

การพัฒนาแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก

นางสาวระวีวรรณ สหัสธรรมรังษี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEVELOPMENT OF CEMENT BOARD REINFORCED WITH BETEL NUT LEAF SHEATH
FIBER

Miss Rawiwan Sahatthamarangsri

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก
โดย	นางสาวระวีวรรณ สหัทธธรรมรังษี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยดำเนินการ
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนาท ประสงค์สุข)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูชัย สุจิ๋วรกุล)

ระวีวรรณ สหัสธรรมรังษี : การพัฒนาแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก.

(DEVELOPMENT OF CEMENT BOARD REINFORCED WITH BETEL NUT

LEAF SHEATH FIBER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิต

ปานสุข, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์,

124 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำเส้นใยกาบหมาก ซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้กับซีเมนต์เพสต์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากให้มีการจัดเรียงตัวของเส้นใย มีปริมาณเส้นใยและอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ให้ค่าความต้านแรงดัดมากที่สุดและเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆคือ ปริมาณเส้นใยโดยปริมาตร การจัดเรียงตัวของเส้นใย อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และการขึ้นรูปโดยใช้การอัดความดันซึ่งควบคุมปริมาตรของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยก่อนและหลังการขึ้นรูป ที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก การศึกษานี้แบ่งออกเป็นสามส่วน คือ ส่วนแรก ศึกษาการจัดเรียงตัวและความยาวของเส้นใย ส่วนที่สอง ศึกษาอัตราส่วนผสมของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยโดยใช้การจัดเรียงและความยาวเส้นใยในส่วนที่แรก ในส่วนสุดท้าย ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก ประกอบด้วย ทดสอบความหนาแน่น ปริมาณความชื้น ค่าการดูดซึมน้ำ ความต้านแรงดัด มอดุลัสยืดหยุ่น ค่าความเป็นกรด/ด่างที่ผิวหน้า ความต้านการร้าวซึม การนำความร้อน การเลื้อย การตอก/ถอนตะปู และสกรู ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM 1185 และ มอก.1427 และเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากกับผลิตภัณฑ์ที่ขายตามท้องตลาดและงานวิจัยที่ผ่านมา ผลการศึกษาพบว่าเส้นใยที่ผสมในแผ่นลักษณะแบบสุ่มที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 และปริมาณเส้นใย 8% โดยปริมาตร เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ให้ค่าความต้านแรงดัดมากที่สุด และจากการทดลองนำเส้นใยมาผสมในซีเมนต์เพสต์จะทำให้มีปริมาณความชื้น ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความต้านแรงดัดเพิ่มขึ้นแต่ค่าความหนาแน่นและมอดุลัสยืดหยุ่นลดลง นอกจากนี้แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติยังสามารถเป็นฉนวนกันความร้อนได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา...2554..

ลายมือชื่อ.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5270629921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : CEMENT BOARD / NATURAL FIBER / BETEL NUT LEAF SHEATH
FIBER / FIBER ORIENTATION / MODULUS OF RUPTURE

RAWIWAN SAHATTHAMARANGSRI : DEVELOPMENT BOARD REINFORCED
WITH BETEL NUT LEAF SHEATH FIBER. ADVISOR : ASST. PROF. WITHIT
PANSUK, CO-ADVISOR : ASST. PROF. NATAPRON TONANON, 124 pp.

The research is a study of using betel nut leaf sheath fibers which is a natural fiber used as a supplementary strength to the cement paste. The objective of this study was to develop of cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber for the highest flexural strength and investigations focused on parameters, fiber orientation, fiber length, volume of fiber, mixture ratio and methodology cast by pressure which controlling the volume of cement boards before and after that affect the mechanical and physical properties of boards. This research was divided into three parts. The first one was aimed at determining the fiber orientation and fiber length. In the second, investigation was conducted to determine the optimum mixture ratio at the optimum length of fiber determined in the first part. Finally, to determine the mechanical and physical properties of cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber. All properties of board were acceptable to use as insulating boards in accordance with ASTM C1185 and TIS 1427 and compare properties of cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber with commercial board and another researches. Test results indicated that the optimum mix of the composite was a mix having freeform fiber length with water-cement ratio of 0.5 and 8% fiber by volume fraction showed a higher flexural strength. The experimental investigation shows that the addition of these fibers increases moisture content, water absorption and flexural strength, while their densities and modulus of elasticity decrease.

Department : Civil Engineering Student's Signature

Field of Study : Civil Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011 Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่ามาให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ทั้งยังเสนอแนวทางแก้ไขเมื่อพบปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม ที่กรุณาได้รับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูชัย สุจิรวงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนาท ประสงค์สุข

ขอขอบพระคุณโครงการภายใต้แผนฟื้นฟูเศรษฐกิจระยะที่ 2 (ไทยเข้มแข็ง 2555) ที่สนับสนุนเงินวิจัย หน่วยทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้มีส่วนให้ข้อมูลผู้ที่สนใจศึกษาและเป็นรากฐานงานวิจัยอื่นเพื่อประโยชน์ของประเทศชาติต่อไป ดิฉันขอขอบพระคุณและยินดีกับทุกท่านที่ตั้งใจหรือไม่ได้ตั้งใจสร้างกุศลนี้โดยที่มีส่วนสร้างการศึกษาทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ขออัญเชิญอนุภาพคุณพระศรีรัตนตรัย โปรดอภิบาลดลบันดาลให้ท่านและครอบครัวผู้สร้างกุศลนี้เจริญด้วยจตุรพิธพรชัย ปฏิภาณบพิวาร ธนสาร สมบัติ สุขภาพแข็งแรงและประสบแต่สิ่งที่เป็นมงคลเทอญ...

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 วัสดุผสม.....	6
2.2 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย.....	7
2.2.1 อิทธิพลของความยาวเส้นใย.....	8
2.2.2 อิทธิพลของความหนาแน่นและการเรียงตัวของเส้นใย.....	10
2.3 เส้นใย.....	10
2.4 เส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ.....	13
2.4.1 พืชที่สามารถนำเซลลูโลสมาใช้ประโยชน์.....	14
2.4.2 ข้อดีของการพัฒนาเส้นใยเซลลูโลสเป็นวัสดุก่อสร้าง.....	15
2.4.3 ข้อเสียของการนำเส้นใยเซลลูโลสมาเป็นวัสดุก่อสร้าง.....	16
2.5 คอนกรีต.....	16
2.5.1 ปูนซีเมนต์.....	17
2.5.2 สารประกอบหลักและปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์.....	17

2.6	สารผสมเพิ่ม.....	19
2.6.1	ถ้าแคลบ.....	19
2.7	คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ.....	21
2.7.1	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใย.....	25
2.7.2	คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยในสภาพสด.....	26
2.7.3	คุณสมบัติของความแข็งแรง.....	26
2.7.4	คุณสมบัติลดสภาพการแตกร้าวและการดูดซึ่มพลังงาน.....	27
2.7.5	คุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อน.....	27
2.7.6	คุณสมบัติเกี่ยวกับเสียง.....	27
2.7.7	คุณสมบัติเกี่ยวกับความสามารถซึ่มน้ำ การดูดซึ่มน้ำ การบวมน้ำ และการหดตัว.....	27
2.7.8	ระยะเวลา ความเสื่อมของเส้นใยและคาร์บอนเนชั่นในเนื้อคอนกรีต.....	28
2.7.9	ความคงทน.....	29
2.8	หมาก.....	30
2.8.1	ลักษณะของหมาก.....	30
2.8.2	หมากในประเทศไทย.....	31
2.8.3	ประโยชน์ของหมาก.....	33
2.8.4	กาบหมาก.....	34
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3	การดำเนินการวิจัย.....	45
3.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	45
3.1.1	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	45
3.1.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	45
3.2	การเตรียมเส้นใย.....	47
3.3	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทั่วไปของเส้นใย.....	47
3.3.1	การทดสอบหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย.....	47
3.3.2	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใย.....	48

3.3.3 การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของเส้นใย.....	49
3.3.4 การทดสอบเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงกลของเส้นใย..	49
3.4 การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย.....	49
3.4.1 การผสมและหล่อขึ้นทดสอบ.....	51
3.4.2 การทดสอบความต้านแรงดัด หรือมอดุลัสแตกหัก.....	52
3.4.3 การทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่น.....	53
3.4.4 ความหนาแน่นปรากฏ.....	54
3.4.5 ปริมาณความชื้น.....	54
3.4.6 การดูดซึมน้ำ.....	55
3.4.7 ความเป็นกรด/ด่างที่ผิวหน้า.....	55
3.4.8 ความต้านการร้าวซึม.....	55
3.4.9 การทดสอบการนำความร้อน.....	56
3.4.10 การทดสอบการเสียด การตอก/ถอนตะปูและสกรู.....	56
3.4.11 การเปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเทียบกับ กับมาตรฐานอุตสาหกรรม(มอก.) ผลิตภัณฑ์แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย ที่ขายตามท้องตลาดและงานวิจัยที่ผ่านมา.....	57
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล.....	58
4.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทั่วไปของเส้นใย.....	58
4.2 การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย.....	61
4.2.1 การทดสอบความต้านแรงดัด หรือมอดุลัสแตกหัก.....	61
4.2.2 การทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่น.....	65
4.2.3 ความหนาแน่นปรากฏ.....	72
4.2.4 ปริมาณความชื้นและค่าการดูดซึมน้ำ.....	73
4.2.5 การศึกษาการขึ้นรูป.....	76
4.2.6 ความเป็นกรด/ด่างที่ผิวหน้า.....	77
4.2.7 ความต้านการร้าวซึม.....	77
4.2.8 ค่าการนำความร้อน.....	77

	ญ หน้า
4.2.9 การทดสอบการเลี้ยง การตอก/ถอนตะปูและสกรู.....	78
4.2.10 การเปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากกับมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ (มอก. 1427-2540)ผลิตภัณฑ์แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่ขายตามท้องตลาด และงานวิจัยที่ผ่านมา.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	124

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	แผนการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน.....	5
ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด.....	22
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด.....	22
ตารางที่ 2.3	สัดส่วนของการผสมเส้นใยแบบเปียกและแบบบดแห้ง.....	23
ตารางที่ 2.4	ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ.....	24
ตารางที่ 2.5	ผลกระทบของความยาวและปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อกำลังของเส้นใยปาน ศรนารายณ์ผสมในซีเมนต์.....	24
ตารางที่ 2.6	คุณสมบัติของปอชโซลานิกชนิดต่างๆ.....	30
ตารางที่ 2.7	องค์ประกอบทางเคมีของหมาก.....	31
ตารางที่ 2.8	แหล่งเพาะปลูกหมาก 10 อันดับแรกของไทย.....	32
ตารางที่ 2.9	ปริมาณและมูลค่าการส่งออกหมากสด / หมากแห้ง.....	33
ตารางที่ 3.1	การเตรียมชิ้นทดสอบ.....	52
ตารางที่ 3.2	ความต้านแรงดัดตามมาตรฐาน มอก.....	57
ตารางที่ 4.1	คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของเส้นใยกาบหมาก.....	59
ตารางที่ 4.2	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกาบหมาก.....	61
ตารางที่ 4.3	กำลังรับแรงดึงของเส้นใยกาบหมากในสภาวะและระยะเวลาต่างๆ.....	61
ตารางที่ 4.4	ค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก และแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมแก้วเคลือบ.....	64
ตารางที่ 4.5	ค่าความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมแก้วเคลือบ.....	73
ตารางที่ 4.6	ค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณความชื้นของแผ่นซีเมนต์ แผ่นซีเมนต์เสริม เส้นใยกาบหมากและแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมแก้วเคลือบ.....	75
ตารางที่ 4.7	ค่าการนำความร้อนของคอนกรีต แผ่นซีเมนต์ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบ หมากและแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมแก้วเคลือบ.....	78
ตารางที่ 4.8	ความต้านแรงดัด ตามมาตรฐาน มอก.....	80
ตารางที่ 4.9	เปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากกับผลิตภัณฑ์ที่ขายตาม ท้องตลาด.....	81

ตารางที่ 4.10	เปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากกับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	83
ตารางที่ ก-1	การทดสอบแรงดึงของเส้นใยกาบหมาก.....	96
ตารางที่ ก-2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ.....	100
ตารางที่ ก-3	คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบ.....	101
ตารางที่ ข-1	อัตราส่วนผสมของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก.....	105
ตารางที่ ข-2	กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์.....	106
ตารางที่ ข-3	ค่ามอดุลัสแตกหักของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก.....	108
ตารางที่ ข-4	ค่าความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก.....	111
ตารางที่ ข-5	ค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก.....	115
ตารางที่ ข-6	ปริมาณความชื้นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก.....	119
ตารางที่ ข-7	ค่าการนำความร้อนของคอนกรีต แผ่นซีเมนต์ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเถ้าแกลบ.....	123

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แสดงวัสดุผสมตามลักษณะของวัสดุเสริมแรง.....	7
ภาพที่ 2.2 ลักษณะการเปลี่ยนรูปที่เกิดในเมตริกซ์ล้อมรอบเส้นใยที่ได้รับแรงดึงกระทำ....	8
ภาพที่ 2.3 แสดงตำแหน่งหน่วยแรงเมื่อเทียบกับความยาวเส้นใย (a) มีค่าเท่ากับความยาววิกฤต (b) ยาวกว่าความยาววิกฤต (c) สั้นกว่าความยาววิกฤต โดยวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยได้รับหน่วยแรงดึงเท่ากับ ความต้านทานแรงดึงของเส้นใย.....	9
ภาพที่ 2.4 แสดงวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย (a) ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (b) ไม่ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (c) ไม่ต่อเนื่องและวางแบบอิสระ.....	10
ภาพที่ 2.5 รูปทรงตามภาคตัดขวางและสภาพของผิวเส้นใยของเส้นใยต่างๆ.....	11
ภาพที่ 2.6 รูปแบบทั่วไปของกราฟ หน่วยแรง-ความเครียดที่เกิดจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของเส้นใย.....	12
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส.....	14
ภาพที่ 2.8 ใยแก้ว.....	20
ภาพที่ 2.9 ต้นหมาก.....	30
ภาพที่ 2.10 กาบหมาก.....	34
ภาพที่ 2.11 ความทนทานของเส้นใยปอกระเจาและเส้นใยป่านรามี่.....	35
ภาพที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ (a) แบบหล่อ (b) เครื่องตัดกระดาษ (c) เครื่องมือจับชิ้นงาน (C-Clamp) (d) เครื่องตัดชิ้นงาน.....	46
ภาพที่ 3.2 เครื่อง Universal Testing.....	46
ภาพที่ 3.3 แสดงเส้นใยกาบหมากที่ใช้ในการทดสอบ (a) (b) และ(c) เส้นใยกาบหมากตัดตามขนาดต่างๆ (d) เส้นใยกาบหมากที่สานเป็นแผ่นแล้ว.....	47
ภาพที่ 3.4 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	48
ภาพที่ 3.5 การทดสอบกำลังรับแรงดึงและกำลังแรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยกาบหมาก.....	49
ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการทดสอบชิ้นทดสอบ.....	50
ภาพที่ 3.7 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบโดยการอัดความดันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค.....	52
ภาพที่ 3.8 การทดสอบความต้านแรงดึง.....	52

	หน้า
ภาพที่ 3.9 ตำแหน่งการวัดความหนาที่รอยแตกหักของชั้นทดสอบสี่เหลี่ยมจัตุรัส	53
ภาพที่ 3.10 การทดสอบความต้านการรั่วซึม	56
ภาพที่ 3.11 การทดสอบการนำความร้อน	56
ภาพที่ 4.1 ภาพตัดตามขวางและตามยาวของเส้นใยกาบหมาก	58
ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยกาบหมาก	60
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดต่อความยาวของเส้นใย	62
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดกับปริมาณเส้นใยโดยปริมาตร	63
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดต่อความหนาแน่นเทียบกับซีเมนต์ เพสต์	64
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับระยะแอนตัวของแผ่นที่อัตราส่วน ระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 (a) ปริมาณเส้นใย 2%โดยปริมาตร, (b) ปริมาณ เส้นใย 4%โดยปริมาตร, (c) ปริมาณเส้นใย 6%โดยปริมาตร, (d) ปริมาณ เส้นใย 8%โดยปริมาตร, (e) ปริมาณเส้นใย 9%โดยปริมาตร	66
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดเทียบเท่ากับระยะแอนตัวของแผ่นที่ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.4	67
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับระยะแอนตัวของแผ่นที่ปริมาณเส้น ใย 4% โดยปริมาตร (a) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.35, (b) อัตราส่วน ระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.40, (c) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.45, (d) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.50	68
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดเทียบเท่ากับระยะแอนตัวของแผ่นที่ ปริมาณเส้นใย 4%โดยปริมาตร	68
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับระยะแอนตัวของแผ่นในทิศทางแรง กระทำที่ 1 และทิศทางแรงกระทำที่ 2	69
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดเทียบเท่ากับระยะแอนตัวของแผ่น	70
ภาพที่ 4.12 การแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก	71
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณเส้นใย	72
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเทียบกับซีเมนต์เพสต์	73
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับปริมาณเส้นใย	74

ภาพที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณความชื้นเทียบกับความหนาแน่น.....	74
ภาพที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณความชื้นเทียบกับซีเมนต์เฟสค์.....	75
ภาพที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดความดันขึ้นรูปแผ่นกับปริมาณเส้นใย.....	76
ภาพที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดความดันขึ้นรูปแผ่นกับความหนาแน่นแผ่น...	77
ภาพที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนเทียบกับคอนกรีต.....	78
ภาพที่ 4.21	การเลื่อย การตอก/ถอนตะปูและสกรู.....	79
ภาพที่ 4.22	แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก.....	79
ภาพที่ ก-1	ภาคตัดขวางและตัดตามยาวของเส้นใยกาบหมาก.....	96
ภาพที่ ก-2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ.....	96
ภาพที่ ก-3	การส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ.....	101
ภาพที่ ข-1	เส้นใยกาบหมากในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก.....	103
ภาพที่ ข-2	แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากก่อนการทดสอบที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.40.....	103
ภาพที่ ข-3	แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากก่อนการทดสอบที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45.....	104
ภาพที่ ข-4	แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากก่อนการทดสอบที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.50.....	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา

ในปัจจุบันทั่วโลกให้ความสนใจด้านสิ่งแวดล้อมกันมาก เนื่องจากเกิดภาวะวิกฤตโลกร้อนทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำแข็งขั้วโลกละลายเกิดภาวะน้ำทะเลหนุนสูง สภาพอากาศแปรปรวนและเปลี่ยนแปลงไปจากเมื่อก่อนมาก ตัวการสำคัญของปัญหา นี้คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม การเผาไหม้เชื้อเพลิง การเผาไม้ทำลายป่า ทำให้หลายประเทศหันมาสนใจด้านการรักษาสิ่งแวดล้อม รวมทั้งหน่วยงานต่างๆที่ก่อให้เกิดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะบริษัทผลิต ปูนซีเมนต์ ซึ่งถือว่าโรงงานอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากเป็นอันดับหนึ่งคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 75 ของอุตสาหกรรมในประเทศไทย [1] นอกจากนี้การทำลายป่ายังเป็นอีกสาเหตุหนึ่ง คือ ต้นไม้ เป็น “ตัวดูดซับคาร์บอน” โดยธรรมชาติต้นไม้จะดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อต้นไม้ถูกทำลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้นไม้ดูดซับไว้จะ ลอยขึ้นไปสะสมอยู่ในบรรยากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะคงอยู่ในบรรยากาศเป็นเวลา 50 ถึง ประมาณ 200 ปี และบางส่วนคงอยู่ตลอดไป ทำให้พลังงานความร้อนสะสมอยู่บนผิวโลกและในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้น [2]

การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลง เป็นสิ่งสำคัญที่จะนำไปสู่การลดภาวะวิกฤตโลกร้อน จากการทำโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาก เป็นอันดับหนึ่งนั้น ถ้าสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลง จะทำให้โรงงานผลิตปูนลดลง การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็ลดลงด้วย แต่การลดปริมาณการใช้ซีเมนต์นั้น อาจทำให้สิ่งก่อสร้างมีคุณสมบัติที่ต่ำลง จำเป็นต้องมีวัสดุทดแทนปริมาณซีเมนต์ที่หายไปเพื่อคงคุณสมบัติเดิมหรือปรับปรุงให้ดีขึ้น ในแง่หนึ่งถ้าวัสดุที่นำมาทดแทนปูนซีเมนต์สามารถช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือลดภาวะโลกร้อนได้จะดียิ่งๆ ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้น่าจะเป็นวัสดุที่เหลือใช้ หรือวัสดุที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นต่อได้อีก เพื่อลดการทำลายหรือลดการเผาวัสดุเหล่านั้นที่จะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การนำขยะ สิ่งเหลือใช้หรือวัสดุจากภาคการเกษตรมาเป็นวัสดุทดแทนปริมาณซีเมนต์ที่ลดลงเป็นสิ่งที่สามารถทำได้ ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัย การนำขยะ สิ่งเหลือใช้หรือวัสดุที่เหลือจากภาคการเกษตรมาผสมในซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ หรือ คอนกรีต มาจำนวนหนึ่ง โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ได้นำวัสดุที่เหลือใช้จากภาคการเกษตร จำพวกพืชเส้นใยธรรมชาติมาผสมในซีเมนต์เพสต์ [3], [4], [5], [6], [7] และ [8] พบว่าการนำเส้นใย

ธรรมชาติมาผสมในซีเมนต์เพสต์จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางด้านเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านกรับแรงดึงและแรงดัด มีความเหนียวมากขึ้น และสามารถป้องกันการแตกร้าวของซีเมนต์เพสต์ได้ เนื่องจากโดยปกติซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการรับแรงอัดได้สูง ในขณะที่สามารถรับกำลังแรงดึงต่ำ เมื่อเทียบกับกำลังอัด [4], [9] ดังนั้นการผสมเส้นใยลงไป ในซีเมนต์เพสต์จะเป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มสมรรถนะดังกล่าวให้ดีขึ้น

งานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะนำวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตรมาผสมในซีเมนต์เพสต์ ในลักษณะเป็นแผ่นบาง “แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย” วัสดุที่นำมาใช้คือ เส้นใยกาบหมาก เนื่องจากเป็นผลผลิตจากธรรมชาติที่เหลือทิ้งทางภาคการเกษตร หาได้ง่าย มีปริมาณมาก ราคาถูกและคุ้นเคยกับคนไทยมาช้านาน โดยนำเส้นใยกาบหมากที่ตัดตามขนาดที่ต้องการหรือสานเป็นแผ่นมาผสมกับซีเมนต์เพสต์ตามอัตราส่วน แล้วอัดขึ้นรูปภายใต้ความดันเป็นแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย จากงานวิจัยที่ผ่านมา [10], [11], [12] และ [13] การใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยเพื่อให้เส้นใยอัดตัวกันอย่างหนาแน่น มีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเส้นใยจะสามารถรับแรงได้อย่างเต็มที่ การศึกษาครั้งนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยกาบหมากมาผสมในซีเมนต์เพสต์ การจัดเรียงตัวของเส้นใย อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้คุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยเหมาะสมที่สุด คือ ความหนาแน่น ปริมาณความชื้น ค่าการดูดซึมน้ำ ความต้านแรงดัด มอดุลัสยืดหยุ่น ค่าความเป็นกรด/ด่างที่ผิวหน้า ความต้านการร้าวซึม การนำความร้อน การเลื่อย การตอก/ ถอนตะปู และสกรู รวมทั้งเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม(มอก.) ผลิตภัณฑ์แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่ขายตามท้องตลาด และงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อสามารถนำแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยมาประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากให้มีการจัดเรียงตัวของเส้นใย มีปริมาณเส้นใยและอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ให้ค่าความต้านแรงดัดมากที่สุด
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆคือ ปริมาณเส้นใยโดยปริมาตร การจัดเรียงตัวของเส้นใย อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก เพื่อศึกษา ความสำคัญของการจัด เรียงตัว ของเส้นใย

กาบหมากในซีเมนต์เพสต์และหัตถรากลุ่มผสม ที่มีคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพที่ดีที่สุดในกรขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย

- 3) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่ผสมและไม่ผสมซีเมนต์แก้วซึ่งอาจมีผลต่อความทนทานของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย พร้อมทั้งเปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่ขายตามท้องตลาด และงานวิจัยที่ผ่านมา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เป็นการนำวัสดุเหลือใช้ทางภาคการเกษตรคือ เส้นใยกาบหมากผสมในซีเมนต์เพสต์ขึ้นรูปโดยการอัดความดัน ในลักษณะเป็นแผ่นบาง “แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย”
- 2) วัสดุที่นำมาใช้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำประปา แก้วแกลบและสารผสมเพิ่ม(สารลดน้ำ) และเส้นใยกาบหมากที่ได้มาจากสวนหมากในจังหวัดปราจีนบุรี โดยนำกาบหมากมาแช่ในน้ำแล้วฉีกเป็นเส้น ซึ่งเรียกว่าเส้นใยกาบหมาก
- 3) เส้นใยกาบหมากที่นำมาทดสอบมี 2 ลักษณะ คือเส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวตรงแล้วตัดขนาด 3, 6, 12, 35 และ 57 เซนติเมตร และเส้นใยที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่นซึ่งกำหนดให้มีน้ำหนักเท่ากันทุกแผ่น โดยมีปริมาณเส้นใยที่ผสมในซีเมนต์เพสต์ 2%, 4%, 6%, 8%, 9%โดยปริมาตร และมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 และ 0.55
- 4) ทำการขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากโดยกดอัดภายใต้ความดันซึ่งควบคุมปริมาตรของแผ่นก่อนและหลังการขึ้นรูป
- 5) พัฒนาคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย โดยพิจารณาปัจจัยที่เกิดจากการที่ซีเมนต์เพสต์มีส่วนผสมของเส้นใยกาบหมาก คือ การจัดเรียงตัวของเส้นใย ความยาวเส้นใย และอัตราส่วนผสม ซึ่งทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ คือ ทดสอบความหนาแน่น ปริมาณความชื้น ค่าการดูดซึมน้ำ ความต้านแรงดัด มอดุลัสยืดหยุ่น ค่าความเป็นกรด/ด่างที่ผิวหน้า ความต้านการรั่วซึม การเลื้อย การตอก/ถอนตะปู และสกรู โดยอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 1427-2540 และ ASTM 1185-03 และทดสอบค่าการนำ

ความร้อน ด้วยเครื่อง Hot Disk Thermal Constant Analyser ใช้เทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นการลดปริมาณวัสดุเหลือใช้จากการทำสวนหมากของเกษตรกรเพื่อนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเป็นแนวทาง ในการนำเส้นใย กาบหมากมาปรับปรุงคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ เพื่อให้มีน้ำหนักเบา ลดรอยแตกกร้าว เพิ่มความเหนียว รวมทั้งเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ
- 2) สามารถพิสูจน์ได้ว่าการจัดเรียงตัวของเส้นใยกาบหมากและอัตราส่วนผสมของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยส่งผลต่อการใช้ความดันในการอัดขึ้นรูป คุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย
- 3) สามารถประยุกต์ใช้เส้นใยกาบหมากในซีเมนต์เพสต์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพที่ดีจากงานวิจัยนี้ไปผลิตเป็นชิ้นงานต้นแบบได้

1.5 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

ระยะเวลาดำเนินการของโครงการวิจัยนี้ คือ 1 ปี 4 เดือน เริ่มจากเดือน พ.ค. 2553 ถึงเดือน ส.ค. 2554 ขั้นตอนการดำเนินงานแสดงโดยลำดับ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาปัญหาและงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับซีเมนต์เพสต์เสริมเส้นใยธรรมชาติ (6 เดือน: พ.ค. - ต.ค. 2553)

ขั้นตอนที่ 2 เขียนโครงร่างงานวิจัยและนำเสนอโครงร่างงานวิจัย (2 เดือน: พ.ย.2553 – ม.ค. 2554)

ขั้นตอนที่ 3 จัดหาเส้นใยกาบหมาก รวมทั้งออกแบบและเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อขึ้นทดสอบ (2 เดือน: ม.ค.-ก.พ. 2554)

ขั้นตอนที่ 4 หล่อขึ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบ คุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ (3 เดือน: ก.พ. - เม .ย. 2554)

ขั้นตอนที่ 5 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของขึ้นทดสอบ (3 เดือน: มี.ค.-พ.ค. 2554)

ขั้นตอนที่ 6 ศึกษาและเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ (2 เดือน: มี.ย.-ก.ค. 2554)

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสม ขั้นตอนการผลิตแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยจากเส้นใยกาบหมาก ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย ซึ่งสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ การเผาทำลายวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร รวมถึงลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตร และสามารถทดแทนการใช้ไม้เพื่อลดการทำลายป่าไม้ธรรมชาติ เนื้อหาที่จะทำการศึกษามีเกี่ยวข้องกับเส้นใยกาบหมากที่ผสมในซีเมนต์เพสต์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ

2.1 วัสดุผสม [14]

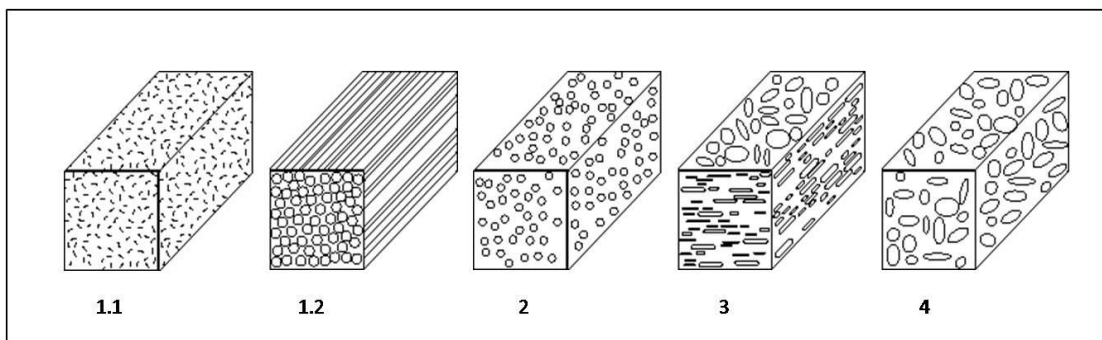
วัสดุผสม(Composite Materials) คือ วัสดุที่เกิดจากการผสมวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดหรือมากกว่าเข้าด้วยกันซึ่งไม่ได้เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ โดยเนื้อของวัสดุผสมจะประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน ไม่กลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกัน วัสดุผสมส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อปรับปรุงสมบัติและคุณลักษณะเชิงกล

วัสดุผสมประกอบขึ้นจากเฟส 2 ชนิด เฟสแรกเรียกว่า เมตริก (Matrix) ซึ่งอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบเฟสที่สองไว้ ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนแรงหรือหน่วยแรงจากภายนอกและกระจายไปสู่เส้นใยจะรับแรงกระทำเพียงเล็กน้อย และทำหน้าที่ป้องกันเส้นใยไม่ให้เกิดความเสียหายที่ผิว ป้องกันการขยายตัวของรอยแตกจากเส้นใยหนึ่งไปสู่เส้นใยหนึ่งซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างทันทีทันใด เฟสที่สองเรียกว่า เฟสกระจาย (Dispersed phase) หรือตัวเสริมแรง (Reinforcement) การรวมกันของวัสดุที่เป็นตัวเสริมแรง (เป็นอนุภาคหรือเส้นใย) กับเมตริกหรือวัสดุเชื่อมประสาน จะถือว่าเมตริกเป็นเสมือนกาวเชื่อมวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกันและปกป้องวัสดุเสริมแรงจากผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม

วัสดุผสมสามารถแบ่งได้ดังนี้ [15]

- 1) วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibrous Composite)
 - 1.1) เส้นใยสั้นแบบสุ่ม (ภาพที่ 2.1(1.1))
 - 1.2) เส้นใยยาว/เส้นใยต่อเนื่อง (ภาพที่ 2.1(1.2))
- 2) วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particulate Composite) (ภาพที่ 2.1(2))

- 3) วัสดุผสมเสริมแรงด้วยวัสดุเป็นแผ่นหรือชิ้นเล็กๆ (Flake Composite) (ภาพที่ 2.1(3))
- 4) วัสดุผสมเสริมแรงที่เป็นสารตัวเติม (Filler Composite) (ภาพที่ 2.1(4))



ภาพที่ 2.1 วัสดุผสมตามลักษณะของวัสดุเสริมแรง [15]

คุณสมบัติของวัสดุผสมขึ้นอยู่กับส่วนต่างๆ ดังนี้ [16], [17]

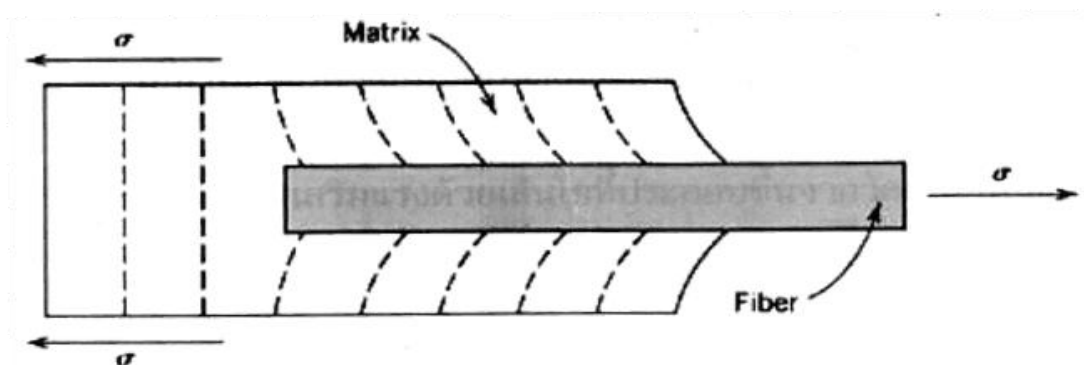
- 1) ปริมาณของตัวเสริมแรง
- 2) ตัวประสานการยึดติดระหว่างเมตริกและตัวเสริมแรง
- 3) ชนิดของเมตริกที่ใช้
- 4) สมบัติของเมตริกและตัวเสริมแรง
- 5) ขนาดและรูปร่างของตัวเสริมแรง
- 6) กระบวนการผลิต
- 7) ตำหนิหรือช่องว่างในวัสดุผสม
- 8) การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของตัวเสริมแรง ซึ่งหน่วยแรงจะสูงสุดในทิศทางขนานกับเส้นใยและต่ำสุดในทิศตั้งฉาก

2.2 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย [14]

วัสดุผสมที่สำคัญมากที่สุดคือวัสดุผสมที่มีเฟสที่กระจายตัวอยู่ในรูปเส้นใย จุดมุ่งหมายในการออกแบบวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced composites) นี้คือ ต้องการความแข็งแรงหรือมอดุลัสความยืดหยุ่นต่อน้ำหนักที่สูง ผลิตขึ้นโดยใช้เส้นใยและวัสดุเมตริกที่มีความหนาแน่นต่ำ

2.2.1 อิทธิพลของความยาวเส้นใย

สมบัติทางกลของวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยขึ้นอยู่กับสมบัติของเส้นใย ระดับความสามารถในการผ่านแรงกระทำจากเมตริกสู่เส้นใย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการส่งผ่านแรงกระทำคือ พันธะการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับเมตริก ภายใต้หน่วยแรงกระทำจะเห็นว่ากรวยยึดเหนี่ยวของเมตริก-เส้นใยจะสิ้นสุดที่บริเวณปลายของเส้นใย หรือกล่าวได้ว่าไม่มีการส่งผ่านแรงกระทำจากเมตริกสู่เส้นใยที่ปลายสุดของเส้นใย ในภาพที่ 2.2 แสดงแบบจำลองการเปลี่ยนรูปของเมตริก



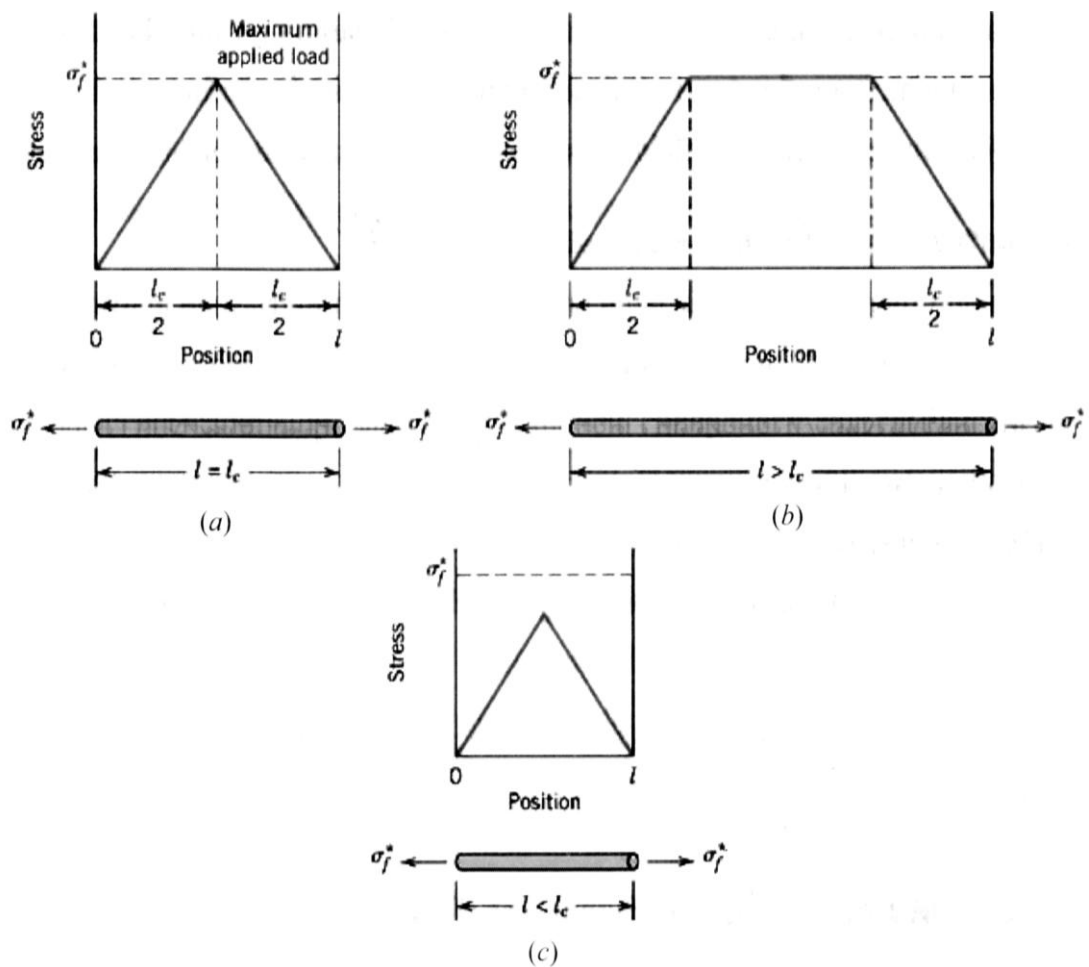
ภาพที่ 2.2 ลักษณะการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นในเมตริกล้อมรอบเส้นใยที่ได้รับแรงดึงกระทำ [14]

ความยาวเส้นใยวิกฤตเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการเพิ่มความแข็งแรงหรือมอดุลัสของวัสดุผสม ความยาววิกฤตขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย และความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเส้นใยและความแข็งแรงของพันธะเส้นใย-เมตริก(ความต้านทานแรงเฉือน τ_c จุดครากของเมตริก) โดยสามารถเขียนสมการได้ตามสมการ(2.1) ดังนี้

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

เมื่อให้หน่วยแรงที่มีค่าเท่ากับ σ_f^* มากระทำต่อเส้นใยที่มีความยาววิกฤตนี้จะได้กราฟหน่วยแรง-ตำแหน่งบนเส้นใยดังภาพที่ 2.3 (a) และพบว่าแรงกระทำสูงสุดบนเส้นใยจะอยู่ตรงตำแหน่งกลางของเส้นใยเท่านั้น เมื่อความยาวเส้นใยเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเป็น l (โดยที่ $l > l_c$) พบว่าตัวเสริมแรงเส้นใยจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังภาพที่ 2.3 (b) จะเห็นได้ว่าเส้นใยจะมีช่วงระยะที่สามารถรับแรงดึงได้เท่ากับความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเส้นใยมากขึ้น ภาพที่ 2.3 (c) แสดงถึงกราฟหน่วยแรง-ตำแหน่งบนเส้นใยเมื่อความยาว $l < l_c$ เส้นใยที่มีความยาวของเส้นใยยาวกว่าค่าความยาว

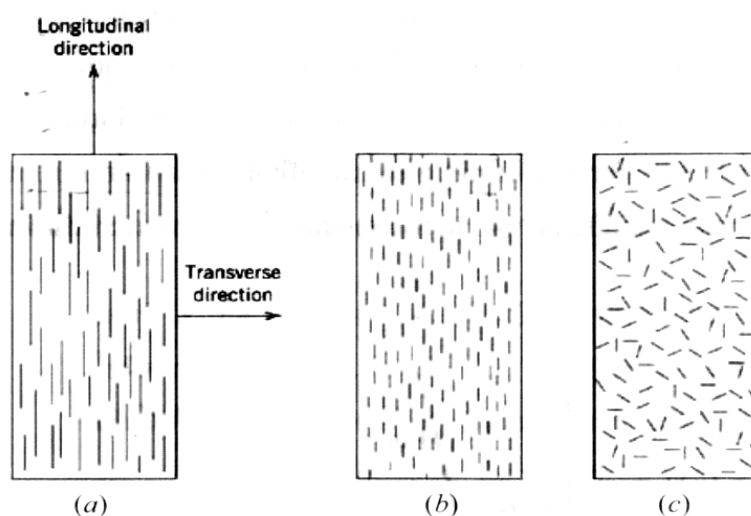
วิกฤตมากๆ ($l \gg l_c$) เช่น $l > 15l_c$ จะถูกเรียกว่า เส้นใยต่อเนื่อง (continuous fiber) และถ้ามีความยาวสั้นกว่านี้จะเรียกกันว่าเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (discontinuous fiber) หรือเส้นใยสั้น (short fiber) ในกรณีที่เส้นใยมีความยาวสั้นกว่าความยาววิกฤต $l < l_c$ เมตริกจะเปลี่ยนรูปร่างรอบเส้นใยจนกระทั่งไม่เกิดการถ่ายแรงไปสู่เส้นใยอีก และลักษณะนี้ทำให้เกิดการเสริมแรงด้วยเส้นใยได้ผลเพียงเล็กน้อย สิ่งนี้เป็นสิ่งที่สำคัญโดยเฉพาะกรณีของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค ดังนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่เด่นชัดในการปรับปรุงความแข็งแรงในวัสดุผสมเส้นใยจึงต้องเป็นเส้นใยต่อเนื่อง



ภาพที่ 2.3 แสดงตำแหน่งหน่วยแรงเมื่อเทียบกับความยาวเส้นใย (a)มีค่าเท่ากับความยาววิกฤต (b)ยาวกว่าความยาววิกฤต (c)สั้นกว่าความยาววิกฤต โดยวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยได้รับหน่วยแรงดึงเท่ากับความต้านทานแรงดึงของเส้นใย [14]

2.2.2 อิทธิพลของความหนาแน่นและการเรียงตัวของเส้นใย

การจัดแนวเรียงตัวของเส้นใย ความหนาแน่นของเส้นใยและการกระจายตัวส่งผลที่สำคัญต่อความแข็งแรงและสมบัติอื่นๆ ของวัสดุผสมเสริมแรงเส้นใยอย่างมาก แนวการเรียงตัวมีอยู่สองแบบที่น่าสนใจคือ การเรียงตัวขนานแกนตามยาวของเส้นใยในทิศทางเดียวกัน และการเรียงตัวแบบอิสระ โดยปกติเส้นใยต่อเนื่องจะมีแนวการเรียงตัวแบบภาพที่ 2.4(a) ในขณะที่เส้นใยไม่ต่อเนื่องอาจจะมีการเรียงตัวแนวเดียวกันดังภาพที่ 2.4(b) หรืออาจจะมีเรียงตัวแบบอิสระดังภาพที่ 2.4(c) หรือเรียงแนวเดียวกันบางส่วน



ภาพที่ 2.4 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ (a) ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (b) ไม่ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (c) ไม่ต่อเนื่องและวางแบบอิสระ [14]

2.3 เส้นใย [18]

เส้นใย (Fiber) คือ วัสดุที่มีมิติตามความยาวมากกว่ามิติตามภาคตัดขวาง (เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่หน้าตัดที่เป็นวงกลม) ไม่น้อยกว่า 100 เท่า สามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดของเส้นใยได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

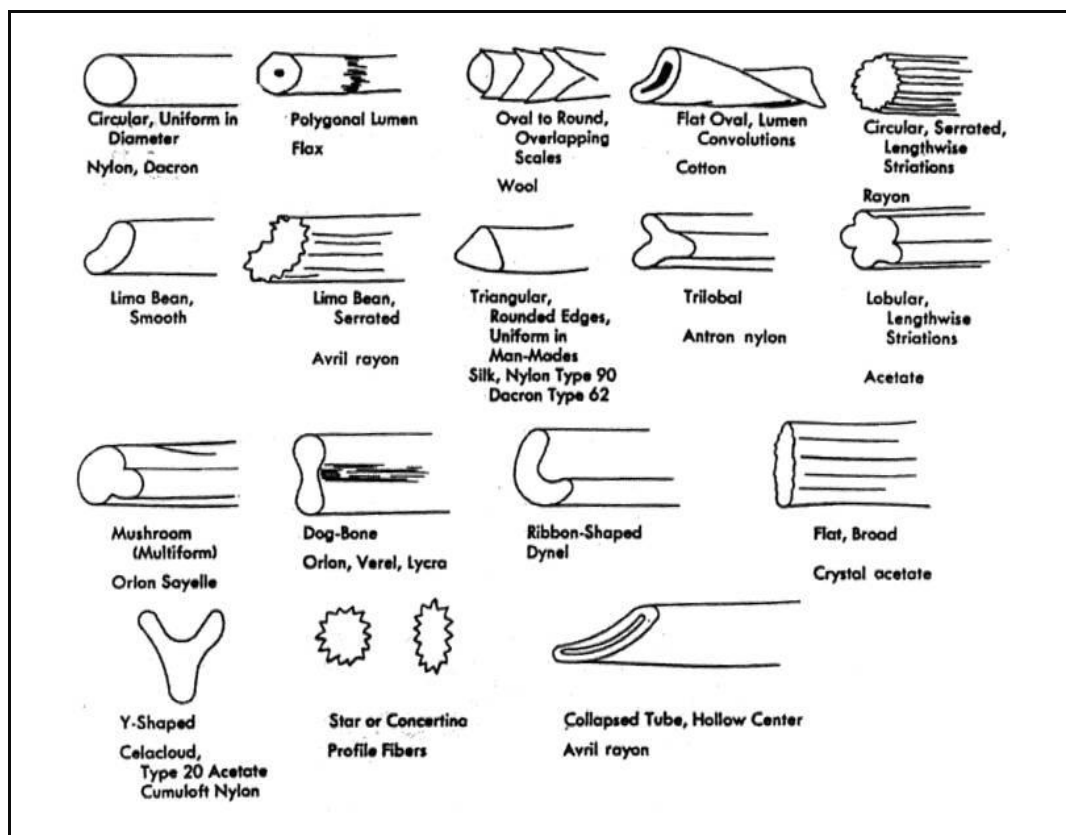
- 1) เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น
 - เซลลูโลส (เส้นใยพืช) เช่น ฝ้าย ลินิน ปอ ป่าน หนุ่น
 - โปรตีน (เส้นใยสัตว์) เช่น ไหม ขนสัตว์ ผม
 - แร่ เช่น แร่ใยหิน
 - ยาง เช่น ยาง

2) เส้นใยประดิษฐ์ (Man-made Fibers) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น

- เซลลูโลส เช่น เรยอน ไตรแอซีเตต
- พอลิเมอร์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส เช่น อะรามิด ไนลอน อะคริลิก
- แร่และเหล็ก เช่น โลหะ แก้ว เซรามิก กราไฟต์

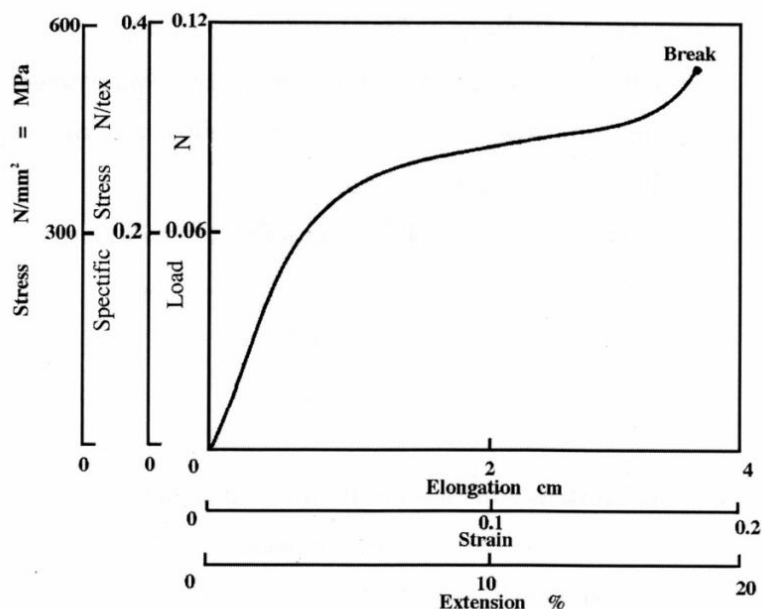
สมบัติของเส้นใยจะถูกกำหนดจากปัจจัยต่างๆที่สำคัญดังนี้ โครงสร้างภายนอกของเส้นใย องค์ประกอบทางเคมี รวมทั้งโครงสร้างภายในของเส้นใย สมบัติต่างๆ คือ

- 1) ความยาวเส้นใย โดยทั่วไปจะมีความยาวที่ค่อนข้างแตกต่างกัน จะมีทั้งเส้นใยสั้นและเส้นใยยาว
- 2) ความละเอียดของเส้นใย ขนาดมีความสำคัญต่อการนำไปใช้งาน และผิวสัมผัส
- 3) รูปทรงตามภาคตัดขวางของเส้นใย ลักษณะรูปทรงของเส้นใยชนิดต่างๆ แสดงเป็นตัวอย่างในภาพที่ 2.5 ที่มีทั้งทรงกลม ทรงสามเหลี่ยม ทรงเม็ดถั่ว รูปทรงนี้ถูกกำหนดตามสภาพการเจริญเติบโต



ภาพที่ 2.5 รูปทรงตามภาคตัดขวางและสภาพของผิวเส้นใยของเส้นใยต่างๆ [18]

- 4) ความหยิกบนเส้นใย ซึ่งอาจเกิดจากการจัดเรียงตัวของลูกโซ่โมเลกุลมีลักษณะหยิกไปตามโครงสร้างของโมเลกุล ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำ
- 5) ความแข็งแรงของเส้นใย ความแข็งแรงของเส้นใยหาได้จากการวัดปริมาณแรงดึงคงที่ ที่ทำให้เส้นใยขาดออกจากกัน ในทางปฏิบัติสามารถวัดจากแรงดึงสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบการวัดความทนแรงดึง การทดสอบเพื่อวัดความแข็งแรงของเส้นใยสามารถนำเสนอผลในรูปของกราฟได้หลายรูปแบบ ลักษณะทั่วไปที่พบจะเป็นไปตามภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะของกราฟหน่วยแรง-ความเครียด (stress-strain curve)



ภาพที่ 2.6 รูปแบบทั่วไปของกราฟ หน่วยแรง-ความเครียดที่เกิดจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของเส้นใย [18]

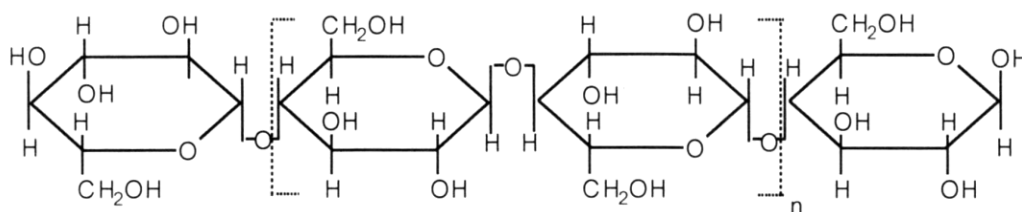
- 6) ความสามารถในการรับการดัดงอได้ สมบัติของเส้นใยนี้อยอมให้ดัดงอได้โดยไม่แตกหัก แม้จะผ่านการดัดงอหลายครั้ง
- 7) ความสม่ำเสมอ เส้นใยธรรมชาติทุกชนิดจะมีความสม่ำเสมอไม่ดี เนื่องจากการได้รับอาหาร อากาศ และสภาพแวดล้อมที่ต่างกันในช่วงเจริญเติบโต ความสม่ำเสมอนี้รวมถึงความยาวของ เส้นใย
- 8) ความหนาแน่น คือ มวลต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุ เส้นใยทุกชนิดจะมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ยกเว้นเส้นใยประดิษฐ์ในกลุ่มของโพลีเอทิลีน (PP และ PE)

- 9) ความมัน คือ ปริมาณของแสงที่สะท้อนออกจากผิวของเส้นใย
- 10) ความสามารถในการดูดซึ่มความชื้น โดยธรรมชาติเส้นใยจะเป็นวัสดุที่ดูดซึ่มความชื้นได้ดี เส้นใยธรรมชาติทั้งเส้นใยพืชและสัตว์จะดูดซึ่มน้ำได้มาก
- 11) สภาพยืดหยุ่น การคืนตัวจากแรงยืด การยืดตัว
 - สภาพยืดหยุ่น สมบัติของเส้นใยที่สามารถยืดออกและคืนกลับสู่ขนาดเดิมภายหลังจากที่ได้รับแรงดึง
 - การยืดตัว ระยะของการยืดออกในทิศทางที่ได้รับแรงดึง
 - มอดุลัสการยืดหยุ่น เป็นการวัดความต้านทานต่อแรงดึง โดยวัดแรงดึงที่ทำให้เส้นใยยืดออกเป็นระยะ 1% สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงต่อความเครียด หรือค่าความชันของกราฟหน่วยแรง - ความเครียด มอดุลัสยิ่งสูงแสดงถึงการใช้แรงดึงสูงเพื่อทำให้เส้นใยยืดออก
- 12) การคืนตัวจากแรงอัด และความสามารถในการรับแรงอัด เส้นใยที่มีความอ่อนนุ่มมากจะมีความสามารถในการรับแรงอัดที่ดี

2.4 เส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ

พืชหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรส่วนใหญ่มีองค์ประกอบหลักทางอินทรีย์เคมี 3 ชนิด คือเซลลูโลส(Cellulose) เฮมิเซลลูโลส(Hemicelluloses) และลิกนิน(Lignin) [19]

เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยพื้นฐานซึ่งเรียกว่า แอนไฮโดรดีกลูโคส(anhydro-d-glucose, $C_6H_{10}O_5$) ต่อกันเป็นโมเลกุลยาว ดังภาพที่ 2.7 แต่ละหน่วยของกลูโคสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน ต่อกันเป็นลูกโซ่ที่ไม่ละลายน้ำ โครงสร้างทางเคมีจะมีบทบาทต่อการกำหนดสมบัติของเส้นใย หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จะเป็นตัวดึงดูดน้ำทำให้มีความสามารถในการดูดซึ่มความชื้นได้ดี ลักษณะการเรียงตัวเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวทำให้มีความแข็งแรงสูงไปด้วย นอกจากนี้โครงสร้างบริเวณที่เป็นการต่อกันของธาตุ -C-O-C- จะเป็นบริเวณที่ถูกทำลายด้วยผลจากการเกิดออกซิเดชันหรือการถูกทำลายด้วยสภาพภูมิอากาศ ทำให้โมเลกุลยาวขาดลงเป็นส่วนเล็กๆ [18]



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส [18]

สูตรทางเคมีทั่วไปของเซลลูโลส คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดย n คือค่าระดับขั้นของการเกิดพอลิเมอร์ ค่า n ยิ่งมากน้ำหนักโมเลกุลยิ่งสูง เส้นใยเซลลูโลสทุกชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีในหน่วยย่อยที่เหมือนกัน จึงทำให้สมบัติของเส้นใยมีความคล้ายคลึงกัน

คุณสมบัติของเซลลูโลส คือ ทนต่อการเนาเปื่อย ทนต่อแรงบิด ทนต่อสารเคมีที่เป็นด่างหรือกรดอ่อน และทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ [19]

ในพืชจะมีสารยับยั้ง ที่จะเข้าไปยับยั้งขัดขวางการก่อตัวของปูนซีเมนต์หรือการจับยึดกันระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์ ได้แก่ น้ำตาล แป้ง ไขมัน ยางไม้ ควิโนน ฟีนอล และเฮมิเซลลูโลส เป็นต้น [19]

2.4.1 พืชที่สามารถนำเซลลูโลสมาใช้ประโยชน์

พืชที่มีศักยภาพในการนำเส้นใยมาผลิตเพื่อนำเซลลูโลสไปใช้ประโยชน์ สามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

- 1) กลุ่มที่ปลูกเพื่ออุตสาหกรรม (Industrial Crops) ได้แก่ ฝ้าย ป่านศรนารายณ์ ปอชนิดต่างๆ และไม้โตเร็ว
- 2) กลุ่มส่วนที่เหลือจากการทำเกษตร (Agricultural By-product) ได้แก่ ฟางข้าว เปลือกข้าวโพด ชานอ้อย ใบสับปะรด ใบมะพร้าว กากยคาบหมากและธัญพืชต่างๆ
- 3) กลุ่มวัชพืช (Natural Grow Crops) ได้แก่ หญ้าแฝก หญ้าคา ผักตบชวา และต้นอ้อ

เมื่อพิจารณาส่วนของพืชที่ให้เส้นใยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ แบ่งได้ดังนี้ [20]

- 1) ขนที่เมล็ดหรือผนังด้านในของผล เช่น ฝ้าย รัก นุ่น และงิ้ว
- 2) เส้นใยในเนื้อเยื่อด้านในของเปลือกที่ลำต้น เช่น ปอแก้ว ปอกระเจา ปอกัญชา ปานลินิน และปานรามิ เส้นใยที่ได้จากเนื้อเยื่อส่วนเปลือกของลำต้น ส่วนใหญ่เรียกว่า "ปอ" ส่วนที่ได้จากเนื้อเยื่อของใบเรียกว่า "ปาน" อย่างไรก็ตาม ก็ไม่ได้เรียกแยกกันอย่างชัดเจน เช่น รามิและลินิน ให้เส้นใยจากลำต้นแต่เรียกกันว่า ปานรามิและปานลินิน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะให้เส้นใยที่เหนียว แข็ง
- 3) เส้นใยที่ได้จากส่วนของใบ ซึ่งเป็นส่วนที่น้ำที่อาหารของใบ เช่น ปานศรนารายณ์ สับปะรดกล้วย มีส่วนที่ใช้ประโยชน์ได้ตั้งแต่ตัวใบ เส้นกลางใบ ก้านใบ และกาบใบ
- 4) เส้นใยที่เป็นเนื้อไม้ของต้นไม้ เป็นส่วนเนื้อเยื่อของท่อน้ำที่อาหาร ใช้ในการทำกระดาษเป็นส่วนใหญ่ เช่น ยูคาลิปตัส สนสามใบหรือสนเกียะ ปอแก้ว ปอสา และต้นพีชล้มลุก โดยใช้กระบวนการที่เหมาะสมแยกเส้นใยจากเนื้อไม้ แล้วนำเส้นใยนี้ไปใช้ประโยชน์ทางด้านสิ่งทอได้ เช่น ผลิตเส้นใยเรยองหรือไหมเทียม (หมายรวมถึงเส้นใยที่ได้จากเซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลส) จากไม้ยูคาลิปตัส
- 5) เส้นใยจากส่วนอื่น ๆ เช่น ทางหรือก้านใบประกอบของต้นปาล์ม ใช้ทำแปรง ส่วนเปลือกของผล (กาบมะพร้าว) หรือรากมะพร้าวใช้ทำเชือก

2.4.2 ข้อดีของการพัฒนาเส้นใยเซลลูโลสเป็นวัสดุก่อสร้าง [19]

- 1) เส้นใยเซลลูโลสไม่เป็นสารพิษ (Non-Toxic Substance) และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่เส้นใยหิน (Asbestos) ที่ใช้ผลิตกระเบื้องมุงหลังคา กระเบื้องแผ่นเรียบและไม้ฝาเทียมเป็นวัสดุที่มีพิษต่อร่างกายมนุษย์ โดยเฉพาะต่อระบบทางเดินหายใจเมื่อมีการใช้งานนานๆ
- 2) เป็นวัสดุที่ผลิตใช้ได้ไม่มีวันหมดไปเหมือนแร่ธาตุตามธรรมชาติ ในพืชทุกชนิดในต้นไม้ทุกต้น มีเส้นใยเซลลูโลสอยู่ประมาณ 40-60 % ดังนั้นจึงมีเส้นใยเซลลูโลสอยู่มากมายและเกิดใหม่ได้ตลอดเวลา
- 3) เป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle) ด้วยคุณสมบัติพิเศษของเส้นใยเซลลูโลสหากใช้กรรมวิธีที่เหมาะสมก็จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ปัจจุบันมีการนำกระดาษที่ใช้แล้ว (เยื่อกระดาษ คือเซลลูโลสของต้นไม้ที่นำมาผลิต) นำกลับมาผลิตเป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น วัสดุผิวพื้นและแผ่นไฟเบอร์อัดแน่น

- 4) ช่วยแก้ปัญหาสภาวะของโลก จากการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาส่วนเหลือใช้จากการทำการเกษตรกรรมช่วงหลังเก็บเกี่ยว
- 5) มีน้ำหนักเบาและความหนาแน่นต่ำ แม้เส้นใยธรรมชาติจะมีความแข็งแรงไม่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ แต่เมื่อนำมาผลิตเป็นวัสดุผสม (Composite) ก็จะได้วัสดุที่มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เนื่องจากมีสมบัติด้านความหนาแน่นต่ำ
- 6) ไม่ขีดสีและสร้างความสึกหรอให้เครื่องมือที่ใช้ในการแปรรูป
- 7) ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่าการผลิตเส้นใยสังเคราะห์

2.4.3 ข้อเสียของการนำเส้นใยเซลลูโลสมาเป็นวัสดุก่อสร้าง

- 1) ไม่สามารถนำไปใช้เป็นโครงสร้างหลักหรือใช้ในงานที่ต้องแบกรับน้ำหนักได้ เนื่องจากสามารถแบกรับน้ำหนักได้เพียงเล็กน้อย [21]
- 2) ความไม่คงทนหรือเกิดปฏิกิริยากับสภาพความเป็นต่างในคอนกรีตทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ หรือในเส้นใยบางชนิดที่มีเหลือแต่สารอินทรีย์เมื่อทำปฏิกิริยากับคอนกรีตจะทำให้เส้นใยมีการย่อยสลายและคอนกรีตเสื่อมสภาพ เช่น น้ำตาลในชานอ้อย ซัลเฟตในพีชบางชนิด [22]

2.5 คอนกรีต

คอนกรีต(Concrete) [23] ประกอบด้วยวัสดุ 2 อย่าง คือส่วนที่เป็นเพสต์และส่วนที่เป็นมวลรวม ส่วนที่เป็นเพสต์ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ โดยจะเกิดปฏิกิริยาทำให้เพสต์แข็งตัวและจับตัวกับส่วนที่เป็นมวลรวม ได้แก่ หิน กรวด ททราย ให้เกาะกันแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน โดยทั่วไปสารเคมีผสมเพิ่มถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของเพสต์

มวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ

- มวลรวมละเอียด เป็นทรายที่ได้จากธรรมชาติหรือจากการสังเคราะห์ขึ้น ขนาดโตสุดของอนุภาคของมวลรวมละเอียดจะไม่เกิน 9.5 มม.

- มวลรวมหยาบ มีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงขนาด 1.18 มม. ขึ้นไป (ตะแกรงร่อนเบอร์ 16) และมีขนาดโตสุดถึง 150 มม.

เพสต์จะประกอบด้วยวัสดุประสาน, น้ำ และฟองอากาศ คอนกรีตจะมีเพสต์เป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 7-15 น้ำประมาณร้อยละ 14-21 และฟองอากาศประมาณร้อยละ 4-8 โดยปริมาตร ส่วนคอนกรีตประกอบไปด้วยมวลรวมประมาณร้อยละ 60-75 โดยปริมาตรของคอนกรีต

คุณภาพของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของเพสต์และมวลรวม รวมทั้งแรงยึดเกาะระหว่างวัสดุทั้งสอง ในการผสมเพสต์และมวลรวมเข้าด้วยกัน มวลรวมแต่ละก้อนต้องถูกเคลือบด้วยเพสต์ ช่องว่างระหว่างมวลรวมจะต้องถูกเคลือบด้วยเพสต์อย่างสมบูรณ์

2.5.1 ปูนซีเมนต์

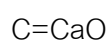
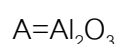
ปูนซีเมนต์(Cement) [24] เป็นผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ (หินปูน หรือ ดินปูนขาว กับ ดินเหนียว หรือดินดาน) จนรวมตัวกันสุกพอดี ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ในน้ำ

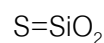
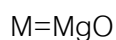
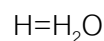
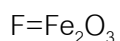
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้าง เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทราย และน้ำจะได้เป็นมอร์ตาร์ (mortar) หากนำไปผสมรวมกับหิน กรวด ทราย และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีตซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน

2.5.2 สารประกอบหลักและปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ [23]

ในระหว่างการเผาปูนเม็ดสารประกอบของธาตุแคลเซียมกับสารประกอบทางเคมีในวัตถุดิบอื่นๆ ที่ใช้ผลิตปูนซีเมนต์จะถูกหลอมและรวมตัวกันเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิดซึ่งมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนเม็ด หลังจากนั้นยิปซัมประมาณ 4-6 % และสารอื่นๆอีกเล็กน้อยจะถูกเพิ่มเข้าไปในระหว่างการบดปูนเม็ด

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์จะประกอบด้วยสารต่างๆ ดังนี้





โดยตัวย่อเหล่านี้จะใช้เรียกแทนสารต่างๆต่อไปเพื่อความสะดวก สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่เกิดจากการรวมตัวกันขององค์ประกอบทางเคมีในระหว่างการเผาปูนเม็ดประกอบด้วย

- ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ใช้ตัวย่อ C_3S
- ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ใช้ตัวย่อ C_2S
- ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ใช้ตัวย่อ C_3A
- เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) ใช้ตัวย่อ C_4AF

นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆ อีกเช่น Anhydrous Calcium Sulfate (CS), Calcium Sulfate Dihydrate หรือ Gypsum (CSH_2), Calcium Sulfate Hemihydrate ($\text{CSH}_{1/2}$) ซึ่งยิปซัมหรือแคลเซียมซัลเฟตเป็นสารประกอบที่ให้ซัลเฟตแก่ของปูนซีเมนต์มากที่สุด

ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) หรือบางที่เรียกว่า Alite อยู่ประมาณร้อยละ 50-70 มีสารประกอบไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) หรือบางที่เรียกว่า Belite ประมาณร้อยละ 15-30 สารประกอบไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ประมาณร้อยละ 5-10 และสารประกอบเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ประมาณร้อยละ 5-15 เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำ สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำหรือเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดสารประกอบใหม่ โดยสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกต 2 ชนิด จะทำปฏิกิริยากับน้ำ และได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีความสำคัญที่ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการ เช่น การก่อตัว การแข็งกำลัง การคงรูป

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิเกต (SiO_2) ในสัดส่วนประมาณ 3 ต่อ 2 โดยพื้นที่ผิวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีค่าประมาณ 30 ตารางเมตรต่อน้ำหนัก 1 กรัม ซึ่งในเวลาที่แข็งตัวแล้ว แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำ

หน้าที่เชื่อมประสานวัสดุต่างๆในคอนกรีต ทั้ง หิน ทราयीให้ติดแน่น และแข็งตัว หรืออนุภาคของ ปูนซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาก็จะถูกจับยึดเข้าด้วยกัน



คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ปริมาตรคอนกรีตมักไม่เปลี่ยนแปลงมาก มีบางส่วนของ คอนกรีตเป็นโพรงที่น้ำและอากาศแทรกอยู่ ซึ่งส่วนนี้ไม่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต แต่กำลังของ คอนกรีตขึ้นอยู่กับส่วนที่เป็นของแข็ง คือแคลเซียมซิลิเกตและมวลรวม

2.6 สารผสมเพิ่ม [23]

สารผสมเพิ่ม (Admixtures) ได้แก่ ละเอียดกรันเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟูม และปอชโซ ลานธรรมชาติ เช่น ดินดานเผา ดินเผาหรือดินขาว เมื่อใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ จะมีผลต่อคุณสมบัติ ของคอนกรีตในระหว่างกระบวนการไฮเดรชัน หรือเรียกว่าปฏิกิริยาปอชโซลานิก ปอชโซลานคือ วัสดุที่มีซิลิกา หรืออะลูมิโนซิลิกาเป็นหลัก เมื่อวัสดุเหล่านี้มีความละเอียดและมีความชื้นที่เพียงพอ จะมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ปูนซีเมนต์ โดยจะเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

การใช้วัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีต อาจใช้เพิ่มหรือใช้แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องการ วัสดุผสมเพิ่มนี้อาจถูกใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของ คอนกรีต เช่น การต้านทานปฏิกิริยาอัลคาไลของมวลรวม

2.6.1 เถ้าแกลบ

เถ้าแกลบ(Rice Husk Ash) ดังภาพที่ 2.8 ได้จากการเผาแกลบข้าวที่ได้จากการสี ข้าวเป็นเปลือกของข้าวสาร พบว่าเถ้าแกลบที่เผาในประเทศไทยมี SiO_2 อยู่ร้อยละ 92.28, 95.36 และ 91.84 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โบรแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัสและ ซัลเฟอร์ และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition หรือ LOI) ซึ่งปกติมี LOI อยู่ประมาณร้อยละ 2-5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแกลบมีผลต่อค่า LOI เพราะการเผา ใหม่ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เถ้าแกลบมี LOI สูงขึ้น LOI ที่อยู่ในเถ้าแกลบส่วนใหญ่จะเป็นธาตุถ่าน คุดน้ำสูง และถ้ามีจำนวนมากจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง โดยแกลบที่เผาในอากาศที่ไม่

เพียงพอปลดลดยุทธศาสตร์และระยะเวลาในการเผาซึ่งจะได้แก่บดที่มีสีด้า และมีค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา(LOI) สูง

ถ้าแก่บดเป็นวัสดุปอชโซลานดังนั้นจึงต้องใช้ต่างที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ปูนซีเมนต์มาทำปฏิกิริยาจึงทำให้กำลังในช่วงอายุต้นด้า แต่เมื่ออายุมากขึ้นกำลังอัดของคอนกรีต ที่ผสมแก่บดสามารถมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมแก่บดได้โดยเฉพาะกรณีที่แก่บดมี ความละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตคุณภาพสูงโดยมีสารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับ ความสามารถในการเท พบว่าในช่วงอายุต้น (3 ถึง 7 วัน) คอนกรีตผสมแก่บดบดละเอียดมี กำลังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่ออายุ 28 และ 56 วันพบว่าคอนกรีตที่ใช้แก่บดบดละเอียด ร้อยละ 30 มีกำลังที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่การแทนที่แก่บดบดละเอียดในปริมาณที่สูงกว่า นี้จะให้กำลังอัดต่ำทั้งอายุต้นและอายุปลาย [25]

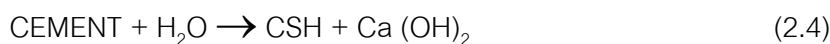


ภาพที่ 2.8 แก่บด [26]

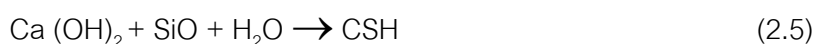
แก่บดมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรม เนื่องจากมี ราคาถูกและหาได้ง่าย การใช้แก่บดในอุตสาหกรรม ซีเมนต์ มีวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่างคือ 1. ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อลดต้นทุนในกา รก่อสร้าง 2. ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิต คอนกรีตความแข็งแรงสูง [26]

ในปี พ.ศ.2544 บุรฉัตร [27] ศึกษาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมแก่บด พบว่าคอนกรีตที่ผสมแก่บดจะมีความหนาแน่นต่ำ และมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีต ธรรมดา พ.ศ. 2545 บุรฉัตร [28] ได้ทำการศึกษาต่อเรื่องความทนทานของคอนกรีตผสมแก่บด โดยคอนกรีตที่ผสมแก่บดจะมีการหดตัวแบบอโตจีเนียสน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาและมีค่า การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมแก่บดเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดไฮโดรคลอริก และซัลฟูริกมีค่าลดลง

ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน [23] ของซีเมนต์เพสต์ ยังมีอัลคาไลของแคลเซียมเหลืออยู่ดังสมการที่ (2.4)



และเมื่ออัลคาไลด์นี้พบกับสารปอซโซลาน หรือ ไมโครซิลิกา เช่น เถ้าลอย สแล็ก หรือ ซิลิกาฟูม จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ดังสมการที่ (2.5)



การเพิ่ม CSH จากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิก จะทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นอย่างมาก แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความไวของผิวสัมผัสของสารปอซโซลานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานั้น

2.7 คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ

ใน ค.ศ. 1997 Zollo [29] ได้ศึกษาเส้นใยเสริมในคอนกรีตหลังจากการพัฒนามากกว่า 30 ปี พบว่าเทคโนโลยีของคอนกรีตเสริมเส้นใยจะมีลักษณะหรือประสิทธิภาพเฉพาะขึ้นกับความแตกต่างกันของเส้นใยในแต่ละชนิดทั้งการกระจาย ปริมาณ รูปร่างของเส้นใยโดยจะมีผลอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใย คอนกรีตเสริมเส้นใยจะมีการเสริมเส้นใย 4 ประเภทตามชนิดของเส้นใยคือ SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) สำหรับที่มีเส้นใยเป็นเหล็ก, SNFRC (Synthetic Fiber Reinforced Concrete) สำหรับเส้นใยสังเคราะห์รวมถึงเส้นใยคาร์บอน, GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete) สำหรับเส้นใยแก้ว และ NFRC (Natural Fiber Reinforced Concrete) สำหรับเส้นใยธรรมชาติ การเริ่มต้นคอนกรีตเสริมเส้นใยมีแนวคิดทางด้านกลศาสตร์ที่พบเห็นการแตกหักรอยร้าว ความเปราะของคอนกรีตจึงได้มีการปรับปรุงความแข็งแรงโดยการเสริมเส้นใยโดยในครั้งแรกใช้ลวดเหล็กในการเสริมคอนกรีตแต่ไม่ได้ผลเท่าที่ควรเนื่องจากเป็นเส้นใยไม่ต่อเนื่อง ไม่ปรับปรุงกำลังและไม่สามารถลดช่องว่างของรอยร้าวได้ หลังจากนั้นใช้โพลีโพรพิลีนซึ่งหาได้ยากจะหาจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ เส้นใยแรกที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15-0.25 มม. หลังจากนั้นก็เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ชนิดของเส้นใยและมีงานวิจัยต่างๆเกี่ยวกับการเสริมความแข็งแรงและความเหนียวรวมทั้งการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตโดยการเสริมเส้นใยชนิดต่างๆ

ค.ศ. 1999-2006 Stitmannaitum [30] ได้เสนอว่าเส้นใยธรรมชาติแบ่งได้ 2 แบบคือเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ และเส้นใยที่มีกระบวนการเพื่อเพิ่มคุณสมบัติ

สมบัติของเส้นใยแสดงดังตารางที่ 2.1 และคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติแสดงดังตารางที่

2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด

Fiber type	Coconut	Sisal	Sugar cane Bagasse	Bamboo	Jute	Flax	Elephant grass	Water reed	Plantain	Musamba	Wood fiber (Kraft pulp)
Fiber length, in.	2-4	N/A	N/A	N/A	7-12	20	N/A	N/A	N/A	N/A	0.1-0.2
Fiber diameter, in.	0.004-0.016	N/A	0.008-0.016	0.002-0.016	0.004-0.008	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.001-0.003
Specific gravity	1.12-1.15	N/A	1.2-1.3	1.5	1.02-1.04	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.5
Modulus of elasticity, ksi	2750-3770	1880-3770	2175-2750	4780-5800	3770-4640	14,500	710	750	200	130	N/A
Ultimate tensile strength, psi	17,400-29,000	40,000-82,400	26,650-42,000	50,750-72,500	36,250-50,750	145,000	25,800	10,000	13,300	12,000	101,500
Elongation at break, percent	10-25	3-5	N/A	N/A	1.5-1.9	1.8-2.2	3.6	1.2	5.9	9.7	N/A
Water absorption, percent	130-180	60-70	70-75	40-45	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	50-75

Note: N/A = properties not readily available or not applicable.

Metric equivalents: 1 in. = 25.4 mm; 1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด

Type of fiber	Average diameter, in.	Average length, in	Absorption after 24 hr, percent	Average fiber density (SG)	Average tensile strength, psi	Average bonding strength, psi	Average elongation, percent
Bagasse	0.020	1.38	122.5	0.639	3,570	36	N/A
Coconut	0.027	11.02	58.5	0.580	8,825	40	2.600
Jute	0.004	15.75	62.0	1.280	53,500	20	N/A
Maguey	0.014	15.75	63.0	1.240	54,400	N/A	N/A
Lechuguilla	0.014	15.75	102.0	1.360	54,100	N/A	N/A
Banana	0.011	3.70	276.0	0.298	10,960	35	3.000
Guaney (palm)	0.017	17.44	129.9	1.195	50,000	40	2.880
Bamboo	Variable	Variable	51.0	0.720	54,680	45	1.800

คอนกรีตที่เสริมเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ เมื่อผสมในคอนกรีต จะต้องพิจารณาปริมาณน้ำในเส้นใยชนิดนั้นๆ ด้วย ความยาวเส้นใยที่ผสมจะแตกต่างกันที่ 2.5-50 เซนติเมตร มีวิธีการผสมทั้งแบบเปียกและแบบแห้งโดยมีสัดส่วนของการผสมตามตารางที่ 2.3 การผสมแบบเปียกจะผสมในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่มีปริมาณเส้นใยต่ำๆ ส่วนการผสมแบบแห้งจากการบดเส้นใยสามารถผสมได้สูงกว่า 10 เท่าของปริมาณเส้นใยการผสมเปียก โดยจะใช้ปริมาณเส้นใยที่ 3-30 % ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมดานี้จะลดความสามารถในการทำงาน เนื่องจากพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ที่สำคัญที่สุดคือ ความเหนียวและการรับกำลังแรงดัดของเส้นใย ซึ่งยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติดังแสดงในตารางที่ 2.4 ส่วนคอนกรีตที่เสริมเส้นใยที่ผ่านกระบวนการเพิ่มคุณสมบัติแล้วจะได้จากเส้นใยที่ผ่านกระบวนการบางอย่างแล้วเช่น การทำกับสารละลายต่างแล้ว แยกเส้นใยทางเชิงกล โดยประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ผ่านกระบวนการเพิ่มคุณสมบัติทั้งในระยะสั้นและระยะยาวจะขึ้นกับการนำไปใช้งานและสัดส่วนการผสม จะเห็นได้ว่าความยาวและปริมาณเส้นใยมีผลต่อกำลังของซีเมนต์เสริมเส้นใยดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนของการผสมเส้นใยแบบเปียกและแบบบดแห้ง

Ingredient	Wet mix	Dry-compacted mix
Cement, lb/yd ³	925-1000	880-925
Coconut fiber, lb/yd ³	30	370
Sand, lb/yd ³	2500	2500
Water		
-in fiber, lb/yd ³	3.5 (natural condition)	3.5 (saturated-surface-dry condition)
-added, lb/yd ³	630	800
Additives		
-Calcium chloride, lb	35	35
-Microbiocide, oz	1.9	2.1
-Water reducers	none	none

Metric equivalents: 1 lb/yd³ = 0.593 kg/m³; 1 lb = 0.454 kg; 1 oz = 28.35 g

ตารางที่ 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ

Factor	Variables
Fiber type	Coconut, sisal, sugarcane bagasse, bamboo, jute, wood, vegetables (akwara, elephant grass, water reed, plantain, and musamba)
Fiber geometry	Length, diameter, cross-section, rings, and hooked ends
Fiber form	Mono-filament, strands, crimped, and single-knotted
Fiber surface	Smoothness, presence of coatings
Matrix properties	Cement type, aggregate type and grading, additive types
Mix proportioning	Water content, workability aids, defoaming agents, fiber content
Mixing method	Type of mixer, sequence of adding constituents method of adding fibers, duration and speed of mixing
Placing method	Conventional vibration, vacuum dewatering for sprayed-up member, vacuum-press dewatering for slurry-dewatered member, extrusion and guniting
Casting technique	Casting pressure
Curing method	Conventional, special methods

ตารางที่ 2.5 ผลกระทบของความยาวและปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อกำลังของเส้นใยปาน

ศรณารายณ์ผสมในซีเมนต์

Mix ratio cement/sand	Fiber volume fraction, percent	Fiber length, in.	Compressiv e strength, psi	Tensile strength, psi	Modulus of rupture, psi	Flexural toughness, in.-lb	Compressive Young's modulus, ksi	Tensile Young's modulus, ksi
1:0	0	—	4560	175	410	0.3	2250	1400
	1	1.0	5175	200	540	4.9	2050	1450
	2	1.0	4350	285	650	7.7	1800	1700
	3	1.0	5430	300	555	6.6	1850	1600
	4	1.0	5075	245	480	6.1	1900	1650
	2	0.5	4435	250	565	5.8	2200	1500
	2	0.7	4160	340	600	7.4	1600	1450
	2	1.5	4520	255	640	7.3	1700	1350

1:1	0	—	5570	295	610	0.5	2150	2250
	2	0.5	5430	365	815	7.8	2050	2600
	2	0.7	4705	315	730	8.9	2050	1950
	2	1.0	4750	315	650	9.7	1800	2100
	2	1.5	4055	305	580	7.2	1250	2550
1:2	0	—	5070	305	545	0.4	1750	2600
	2	0.5	4055	335	645	7.3	1450	3300
	2	0.7	4165	360	670	8.9	1950	3250
	2	1.0	4710	295	570	7.1	2050	2300
	2	1.5	3620	235	545	6.6	2200	2400

Metric equivalents: 1 in. = 25.4 mm., 1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa; 1 in.-lb = 0.113 Nm

พ.ศ. 2538 บุรฉัตร [3] ได้ศึกษารวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ สภาพลักษณะ และคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของเส้นใยธรรมชาติในประเทศกำลังพัฒนา กล่าวไว้ว่าในปี พ.ศ.2503-2513 ได้มีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้เส้นใยธรรมชาติเพื่อเสริมในแผ่นคอนกรีตต่างๆ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ ที่จะผลิตคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์คอนกรีตเสริมเส้นใยหิน

ผลิตภัณฑ์คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยจะช่วยลดสภาพการแตกร้าว และจำกัดการขยายตัวของรอยร้าวในเนื้อคอนกรีตโดยการเพิ่มหน่วยแรงไปยังรอยร้าว ซึ่งในที่สุดจะแตกหัก จากการจำกัดขยายตัวของรอยร้าว กำลังดึงของวัสดุจะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่ใช้งานได้ การกระจายตัวของเส้นใยในเนื้อคอนกรีตที่เปราะง่าย สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของผลิตภัณฑ์ เช่น คุณสมบัติทางการแตกหัก (Fracture) การดึง (Tension) กำลังการดัดงอ (Flexural strength) ความเหนียว (Toughness) ความล้า (Fatigue) และความต้านทานแรงกระแทก (Impact resistance)

2.7.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใย

คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ มีหลายปัจจัยที่ทำให้เกิดผลกระทบ ยังมีความซับซ้อนของขบวนการกระบวนการผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพดี ชนิดของเส้นใย ความยาวและสัดส่วนปริมาตร

2.7.2 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยในสภาพสด

คุณสมบัติในสภาพสดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเนื้อคอนกรีต ชนิดของเส้นใย ความยาวของเส้นใยและปริมาตรของเส้นใยในสภาพที่ใช้งานได้ (Workability) ของส่วนผสมจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเสริมเส้นใย การเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน (Balling) ของเส้นใย เป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่ง ปริมาณที่เกิด Balling ในส่วนผสม คำนวณได้จากความยาว ความหนาของเส้นใยที่ใช้ต่อสัดส่วนปริมาตรของเส้นใย (Fiber volume fraction) เส้นใยที่บางและสั้นจะไม่ทำให้เกิด Balling ซึ่งปกติจะไม่ให้เกิดขึ้น เพราะจะมีผลที่ทำให้เป็นอันตรายต่อกำลัง วิธีการผสมที่จะสามารถลดการเกิดBallingได้ โดยจะผสมเส้นใยลงในการผสมหลังสุด หลังจากผสมส่วนประกอบสำคัญอื่น ๆ หมดแล้ว

การวิจัยเกี่ยวกับคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติจำนวนมากที่ใช้เส้นใยตัดสั้น แต่มีความเป็นไปได้ที่จะใช้เส้นใยธรรมชาติเส้นยาวที่มีปมหรือไม่มีปม หรือมีลักษณะเป็นตะขอที่ปลาย (Hooked ends) ใช้เสริมในเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ เพื่อให้ประโยชน์โดยตรงจากเส้นใย

2.7.3 คุณสมบัติของความแข็งแรง (Strength properties)

กำลังประลัยขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย ความยาว และสัดส่วนปริมาตรเส้นใย (Fiber volume fraction) คุณสมบัติและส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ประกอบ กำลังดึงตอนแรกจะเพิ่มตามการเพิ่มความยาวของเส้นใย และหลังจากถึงค่ามากที่สุดกำลังจะลดลง เนื่องจากผลของการรวมกลุ่มเส้นใย (Bundling effect) สำหรับคอนกรีตที่เสริมเส้นใยที่ตัดสั้น มีคุณสมบัติ กำลังดึง (Tensile strength) กำลังการดัด (Flexural strength) และกำลังกระแทก (Impact strength) เพิ่มขึ้น

คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ สามารถปรับปรุง กำลังดึง (Tensile strength) และการดัด (Bending strength) ให้มีความคงทนสูงขึ้น มีความต้านทานต่อการแตกร้าว อีกทั้งการปรับปรุงกำลังกระแทกและความเหนียว (Toughness) ได้มีการศึกษาพฤติกรรมระหว่างน้ำหนัก - การทรุดตัวของ คอนกรีตที่เสริมเส้นใย มะพร้าว ปานครนารายณ์ ชานอ้อย ไม้ไผ่ ปาล์ม ปอและปานรามิ ฝ้าย ไม้ ฟางข้าว และพืชบางชนิดพบว่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก - การทรุดตัวเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนปริมาตรและความยาวของเส้นใย

2.7.4 คุณสมบัติลดสภาพการแตกร้าวและการดูดซึ่มพลังงาน (Crack arrest and energy absorption on properties)

ผลิตภัณฑ์คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ มีพฤติกรรมแบบวัสดุเนื้อเดียวกัน ภายในขีดจำกัดที่แน่นอน การกระจายเป็นแบบสุ่ม และอัตราส่วนผิวต่อปริมาตรของเส้นใย สูง มีผลในการลดสภาพการเกิดรอยร้าวได้ดี ปกติเส้นใยที่ใช้เสริมผลิตภัณฑ์คอนกรีตมีปริมาณน้อย (ตั้งแต่ 2 ถึง 4% โดยปริมาตร) ความเครียด (Strain) ณ รอยร้าวของเนื้อคอนกรีตจะแตกต่างกันไปจากเนื้อคอนกรีตหรือ มอร์ตาร์ เล็กน้อย เมื่อเริ่มมีรอยแตกร้าว เส้นใยจะลดสภาพการเกิดรอยแตกร้าว (Crack arresting mechanism) และการดูดซึ่มพลังงาน (Energy absorption) ทำให้ผลิตภัณฑ์เสริมใยธรรมชาติมีความเหนียว (Tough) และสามารถทนต่อการกระแทกนานกว่า คอนกรีตปกติ (Plain concrete) คุณสมบัติทำให้ผลิตภัณฑ์เสริมเส้นใยธรรมชาติมีประโยชน์มาก ในผลิตภัณฑ์แบบ Precast ขนาดเล็กๆ ที่ต้องเผชิญความเสียหายจากการกระแทก นอกจากนี้ เมื่อเนื้อคอนกรีตมีรอยร้าว ตัวเส้นใยจะเป็นส่วนสำคัญของหน่วยแรงดึงในผลิตภัณฑ์

2.7.5 คุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อน(Thermal properties)

คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากผลิตภัณฑ์คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ในแง่พฤติกรรมในระยะเวลายาวนาน ภายใต้สภาพสิ่งแวดล้อมที่แปรปรวน ตัวแปรพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความสามารถในการนำความร้อน (Thermal conductivity) การแผ่ความร้อน (Thermal diffusivity) ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากผลของความร้อน (Coefficient of thermal expansion) ซึ่งสามตัวแปรแรกมีความสัมพันธ์กันมาก

2.7.6 คุณสมบัติเกี่ยวกับเสียง(Acoustic properties)

คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากเช่นกันต่อวัสดุก่อสร้างภายในอาคาร โดยหลักแล้ว คุณสมบัติเกี่ยวกับเสียงมีอยู่ 2 อย่างคือ การดูดกลืนเสียง (Sound absorption) และการส่งผ่านเสียง (Sound Transmission)

2.7.7 คุณสมบัติเกี่ยวกับความสามารถซึมน้ำ การดูดซึมน้ำ การบวมน้ำและการหดตัว (Permeability, water absorption, swelling and shrinkage characteristics)

ความสามารถซึมน้ำ (Permeability) ของผลิตภัณฑ์คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ มีความสัมพันธ์กับความทึบน้ำ (Water tightness) ของที่กักเก็บน้ำ และโครงสร้างต่างๆ

นอกจากนี้ การซึมของความชื้นเข้าสู่คอนกรีตเนื่องจากความสามารถซึมได้ มีผลกระทบต่อคุณสมบัติการกันความร้อน

การซึมน้ำของคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ได้ค่าปริมาณ 3×10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของเส้นใย สัดส่วนปริมาตรของเส้นใยและความกดดัน การดูดซึมน้ำปกติอยู่ในช่วง 15% ถึง 30% แต่มีการประยุกต์การทาสีที่ผิว ค่าดังกล่าวสามารถลดลงเป็น 2% ถึง 7% เส้นใยธรรมชาติสามารถดูดซึมปริมาณน้ำจากเนื้อคอนกรีตเปียก มีผลให้เกิดการบวม (Swelling) และหดตัว (Shrinkage) เมื่อเนื้อคอนกรีตแห้ง การใช้สารกันซึมน้ำ (Water-sealing agents) มีประสิทธิภาพลดความสามารถดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงกำลังยึดเหนี่ยว (Bond strength)

2.7.8 ระยะเวลา ความเสื่อมของเส้นใยและคาร์บอนในเนื้อคอนกรีต (Ageing, fiber deterioration and carbonation of the matrix)

เส้นใยธรรมชาติจะถูกเคลือบป้องกันการเน่าเปื่อยจุลินทรีย์ทางชีววิทยาในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากการมีสภาพต่าง (Alkalinity) มากในอนุภาคน้ำ ในน้ำที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะแทรกซึมในเส้นใย การมีสภาพ คาร์บอนเนชั่นในน้ำ ซึ่งยังไม่สามารถทดสอบได้ว่าอะไรเกิดขึ้นต่อเส้นใยถ้าเกิดรอยแตกกว้างขึ้น จากการเคลือบป้องกันการเน่าเปื่อยจุลินทรีย์ทางชีววิทยา อาจจะมีผลทำให้ความกว้างของรอยร้าวอยู่ในขอบเขตจำกัดได้ ถ้าในน้ำมีความเป็นด่างสูง จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่อเส้นใย และเป็นเหตุให้กำลัง (Strength) ของเส้นใยลดลง เส้นใยในสภาพเกลือในเนื้อคอนกรีตซึ่งมีสภาพต่างของอนุภาคน้ำต่ำ จะไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี แต่จะเป็นตัวเคลือบป้องกันการเน่าเปื่อยจุลินทรีย์ทางชีววิทยา

คาร์บอนเนชั่น ในเนื้อคอนกรีตทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ คาร์บอนเนชั่นที่ผิวครั้งแรกจะเคลือบซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เมื่อเวลาผ่านไป การเกิดสภาพ คาร์บอนเนชั่นในเนื้อคอนกรีต จะมีผลทำให้คอนกรีตหดตัว การหดตัวนี้จะมีขนาดเดียวกันกับการหดตัวในสภาพแห้ง จากขบวนการเกิดคาร์บอนเนชั่นปกติจะค่อยๆเกิดการล้า (Creep) ของคอนกรีตซึ่งแพร่กระจายไปทั่ว เพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกกว้างเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage)

ผิวหน้าที่เกิด คาร์บอนเนชั่น ซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีต เมื่อเวลาผ่านไป ผลผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่บางจะเกิดสภาพคาร์บอนเนชั่นสมบูรณ์แบบในช่วง 1-2 ปี รอยแตกกว้างเล็กๆ มีอิทธิพลแง่ลบต่อกำลังดัด และกำลังดึงของผลิตภัณฑ์คอนกรีต การเพิ่มเส้นใยในมอ รต์ตาร์ทสด (Fresh mortar)

ทำให้ต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นในส่วนผสมเพิ่มให้อยู่ในสภาพใช้งานได้ตามที่ต้องการ ซึ่งนำไปสู่การมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง จะทำให้เกิดสภาพ พคาร์บอเนชัน และการหดตัวในเนื้อคอนกรีตเร็วกว่าปกติ

2.7.9 ความคงทน (Durability)

นอกจากความสามารถที่ทนทานต่อการรับน้ำหนัก ผลิตรภัณฑ์คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติยังต้องการความคงทน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความต้านทานต่อการเสื่อม (Deterioration) จากผลของสาเหตุภายนอก (ผลของสภาพแวดล้อมและสภาพการใช้งาน อย่างเช่น สภาพอากาศ ปฏิกริยาเคมี และการสึกกร่อน) และสาเหตุภายใน (ผลจากปฏิกริยาระหว่างวัสดุประกอบสำคัญ อย่างเช่น ปฏิกริยาระหว่างเส้นใยกับด่าง (Alkali) การเปลี่ยนแปลงปริมาตร ความสามารถซึมน้ำได้และการดูดซับน้ำ) เพื่อให้เกิดสภาพคงทน (Durable) ของคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ

พฤติกรรมที่ดีของผลิตรภัณฑ์คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ขึ้นอยู่กับความคงทนต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณสมบัติเกี่ยวกับกำลัง จึงจำเป็นที่คอนกรีตจะต้องทนต่อสภาพที่ออกแบบไว้ โดยปราศจากการเสื่อมในช่วงระยะหนึ่ง การเกิด Embrittlement ในเส้นใย ปานครนารายณ์ เส้นใยมะพร้าว และเส้นใยปอที่เสริมคอนกรีต เนื่องจากมีสภาพด่าง (Alkalinity) ในอนุภาคน้ำในคอนกรีต ซึ่งจะละลายสารบางอย่างของเส้นใย ทำให้เกิดการเนาเปื่อยและสูญเสียความสามารถของเส้นใย สถาบันวิจัยคอนกรีตและซีเมนต์แห่งสวีเดน (Swedish Cement and Concrete Research Institute) แสดงให้เห็นว่ามีทางที่จะขัดขวางการเกิด Embrittlement ของเส้นใยโดยลดการเกิดสภาพต่าง ๆ ของอนุภาคน้ำ ซึ่งวิธีการนี้ทำได้โดยแทนที่ปริมาณซีเมนต์โดยซิลิกาฟุ่ม 40 ถึง 50% การใช้ซีเมนต์ที่มีปริมาณอลูมินาสูง (High alumina cement) สามารถลดสภาพด่างของอนุภาคน้ำและลดอัตราการเกิด Embrittlement การทำให้อนุภาคคอนกรีตที่บดด้วยการใช้ขี้ผึ้งและเรซิน หรือใช้สาร Fiber-impregnating ก็สามารถลดการเกิด Embrittlement ได้

อย่างไรก็ตาม การลดการเกิดสภาพด่าง (Alkalinity) ในเนื้อคอนกรีต โดยใช้ซีเมนต์ที่มีปริมาณอลูมินาสูงหรือแทนที่บางส่วน of ซีเมนต์ Portland ด้วยซิลิกาฟุ่ม ไม่เหมาะสมกับประเทศที่กำลังพัฒนา สามารถนำ Pozzolana ที่หาได้ในท้องถิ่นอย่างเช่น ขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) หรือ Pumice Scoria และ Diatomite มาใช้แทนซิลิกาฟุ่มได้ ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของปอซโซลานิกชนิดต่างๆ

Pozzolana replacement (%)	Locality	Number of days and Toughness (N/mm ²)				
		0	180	365	540	730
Pumice, 40	Addis Ababa	7.5	6.0	10.2	8.2	-
Scoria, 40	Addis Ababa	12.2	14.0	11.8	14.4	-
Diatomite, 20	Addis Ababa	9.1	6.3	7.5	8.2	-
Rice husk ash, 40	Bangkok	22.7	-	12.4	8.3	9.6

2.8 หมาก (Betel nut)

2.8.1 ลักษณะของหมาก



ภาพที่ 2.9 ต้นหมาก [31]

หมาก[32] มีชื่อภาษาอังกฤษว่า Betel nut มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Areca catechu* Linn. มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.7 หมากเป็นไม้ยืนต้นมีลำต้นเดี่ยวไม่แตกกอ เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-6 นิ้ว ระยะแรกจะมีการเจริญโตด้านกว้างและด้านสูง หลังจากหยุดเจริญเติบโตจะเจริญเติบโตด้านความสูง รูปทรงกระบอกตรง หมากมีตายอดส่วนปลายสุดของลำต้นถ้ายอดตายหมากจะตาย ตากยอดจะเป็นที่เกิดของใบหลังจากใบร่วงหล่นจะทิ้งรอยติดของใบ เรียกว่าข้อ ข้อของหมากสามารถคำนวณหาอายุหมากได้ 1 ปี หมากจะมีใบหรือข้อเพิ่มขึ้น 5 ใบ หรือ 5 ข้อ ต้นหมากมีเนื้อเป็นเส้นยาว ๆ จับตัวกันแน่นบริเวณเปลือกนอกลึกเข้าไปประมาณ 2

เซนติเมตร ส่วนกลางลำต้นเป็นเส้นไม่อัดแน่นเหมือนด้านนอกและมีเนื้อไม้อ่อนนุ่มคล้าย ฟองน้ำ ทำให้ต้นหมากเหนียวและสามารถโยกโอนเอนได้มาก ดังภาพที่ 2.9

ใบหมากเกิดจากเนื้อเยื่อส่วนปลายยอด ปลายลำต้นประกอบด้วยโคนกาบใบ เรียกว่ากาบหมากหุ้มติดลำต้นเป็นแผ่นใหญ่ ก้านประกอบด้วยใบย่อย เมื่อหมากออกดอก ดอกหรือภาษาท้องถิ่นเรียกจั่นหมาก ซึ่งถูกห่อหุ้มด้วยกาบหมาก เมื่อกาบหมากแก่หลุดร่วงไปจะเห็นดอกหมาก

ดอกหมากหรือจั่นหมากเกิดบริเวณซอกโคนก้านใบหรือกาบหมาก ดอกออกรวมกันเป็นช่อใหญ่ประกอบด้วยโคนจั่นยึดติดอยู่ที่ข้อของลำต้น ก้านช่อดอกเป็นเส้นยาวแตกออกโดยรอบแกนกลาง ก้านช่อดอกจะมีทั้งดอกตัวผู้และดอกตัวเมีย โดยตัวผู้อยู่ส่วนปลายตัวเมียอยู่ด้านล่างหรือด้านใน ดอกตัวผู้ใช้เวลาบาน 21 วัน หลังจากนั้น 5 วัน ดอกตัวเมียเริ่มบาน

ผลหมากมีลักษณะกลมหรือกลมรี เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 – 2.5 เซนติเมตร โดยเฉลี่ย ผลรวมกันเป็นทะลายใน 1 ทะลายจะมีผลอยู่ประมาณ 10 – 150 ผล ผลอ่อนสีเขียวเข้ม เรียกหมากดิบ ผลแก่จะผิวเปลือกจะเปลี่ยน เป็นสีเหลืองอมส้มทั้งผลเรียกหมากสุกหรือหมากสง ผลประกอบด้วย 4 ส่วน คือเปลือกชั้นนอก ส่วนเปลือกเป็นเยื่อบาง ๆ สีเขียว เนื้อเปลือกมีเส้นใยละเอียด เหนียว เปลือกชั้นกลางเป็นเส้นใยหนาอมองเห็นชัด เมื่อผลอ่อนเส้นใยอ่อน แก่จะเหนียวแข็ง เปลือกชั้นในเป็นเยื่อบาง ๆ ละเอียดติดอยู่กับเนื้อหมาก ส่วนของเมล็ดหรือเนื้อหมาก ถัดจากเยื่อบาง ๆ เข้าไปเป็นส่วนของเนื้อหมาก เมื่ออ่อนจะนิ่ม เนื้อส่วนผิวจะมีลายเส้นสีเหลืองถึงสีน้ำตาล เนื้อจะมีสีเหลืองอ่อน ๆ ถึงสีเหลืองเข้มอมแดง

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของหมาก [33]

Hemi-cellulose (%)	Cellulose (%)	Lignin (%)
35-64.8	40-52	13-24.8

2.8.2 หมากในประเทศไทย

หมาก[34]เป็นไม้ยืนต้นตระกูลปาล์ม เช่นเดียวกับมะพร้าว ถิ่นกำเนิดของหมากปรากฏหลักฐานไม่เด่นชัด แต่มีการแพร่กระจาย ในหลายประเทศ แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และอินเดีย ปัจจุบันแหล่งปลูกหมากที่เป็นเชิงการค้า ของโลก ได้แก่ อินเดีย ศรีลังกา พม่า

มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ ใต้หวัน อินโดนีเซีย ไทย แหล่งปลูกในประเทศไทย ส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้ ภาคกลาง ในปีปัจจุบัน(พ.ศ. 2546)พื้นที่ปลูกหมากของไทยมีประมาณ 116,756 ไร่ ผลผลิตรวม 437,010 ตัน จังหวัดที่มีการปลูกหมากมากที่สุด คือจังหวัดชุมพร รองลงมาคือจังหวัด นครศรีธรรมราช ระนอง ฉะเชิงเทรา พัทลุง ตรัง พังงา ระยอง นครปฐม และสุราษฎร์ธานี ตามลำดับ ตามตารางที่ 2.8 หมากจะเริ่มเก็บเกี่ยวตั้งแต่เดือนพฤษภาคม - ตุลาคม หมากทะวายจะเก็บเกี่ยวตั้งแต่ กุมภาพันธ์ - พฤษภาคม หมากทะวายราคาแพงกว่าหมากปี บางครั้งขึ้นถึงผลละ 3-5 บาท คนไทยบางคนโดยเฉพาะ ผู้เฒ่าผู้แก่ยังกินหมากอยู่ และชาวเขาบางเผ่า แต่ก็ลดปริมาณลงมาก หมากเป็นสินค้าส่งออกในรูปของหมากสดและหมากแห้ง หมากสดส่วนใหญ่จะขายเป็นหมากอ่อน (ส่งใต้หวัน) หรือทิ้งไว้ให้สุกเพื่อทำหมากแห้งต่อไป การบริโภคหมากของไทยสูงถึง 88 % ที่เหลือ 12 % จะเป็นการส่งออกในรูปของหมากสดและหมากแห้ง

ตารางที่ 2.8 แหล่งเพาะปลูกหมาก 10 อันดับแรกของไทย

ลำดับที่	จังหวัด	พื้นที่ ปลูก(ไร่)	ผลผลิตเฉลี่ย(กก./ไร่)	ผลผลิตรวม(กก.)
1	ชุมพร	24,516	6,700	107,849.9
2	นครศรีธรรมราช	18,408	6,091.84	99,461.5
3	ระนอง	13,556	3,430.74	31,230.04
4	ฉะเชิงเทรา	9,583	1958.4	17,641.3
5	พัทลุง	6,451	6,700	34,786.4
6	ตรัง	4,649	6,700	28,387.9
7	พังงา	4,282	5,362.81	14,683.36
8	ระยอง	4,048	2,089.88	7,026.19
9	สุราษฎร์ธานี	3,427	4,705.38	11,509.36
10	นครปฐม	3,409	3,172.3	10,697.01

ที่มา : ฝ่ายประมวลผล กองแผนงาน กรมส่งเสริมการเกษตร ข้อมูลสถิติการปลูกหมาก

การส่งออกหมากไปจำหน่ายต่างประเทศ จะส่งออกมี 2 รูปแบบคือ หมากสดหมากแห้ง มีปริมาณและมูลค่าการส่งออกแสดงในตารางที่ 2.9 หมากสดจะส่งขายในรูปของหมากอ่อน อายุการเก็บเกี่ยวหมากอ่อนระยะตั้งแต่เริ่มติดผล ประมาณ 5 วัน ก็ตัดขายได้ หมาก

อ่อน 1 กิโลกรัมจะมีประมาณ 190-200 ผล ขนาดเท่าปากขวดเอมรี่้อยและเป็นหมากอ่อนหน้าขาว ตลาคที่รับซื้อหมากอ่อนมากที่สุด คือ ใต้หวัน

ฉะนั้น สรุปได้ว่าการส่งออกหมากสดและหมากแห้งของไทย ในปี 2540 มีมูลค่าเพียง 160 ล้านบาท และเพิ่มขึ้น ในปี 2546 มีมูลค่าสูงถึง 569 ล้านบาท และคาดการณ์ว่าจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอีกในอนาคต

ตารางที่ 2.9 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกหมากสด / หมากแห้ง

ปี	2540	2541	2542	2543	2544	2545	2546
ปริมาณ (ตัน)	9,034	12,075	3,114	23,963	21,390	27,647	25,692
มูลค่า (ล้านบาท)	160	328	313	709	419	466	569

2.8.3 ประโยชน์ของหมาก

หมากเป็นพืชที่คู่กับคนไทยมานานแล้ว แม้ในปัจจุบันจะไม่นิยมกินหมากกัน แต่หมากยังเป็นที่ต้องการของตลาดต่างประเทศ ทั้งในรูปหมากสดและหมากแห้ง หมากแห้งใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง ฟอกเส้นใย และทำยารักษาโรค และผลหมากสามารถใช้เป็นยาสมุนไพรในการปฐมพยาบาลเบื้องต้น เช่น ใช้สมานแผล แก้ท้องเสีย รักษาโรคเหงือกและฟัน เป็นต้น[31]

1) การใช้ประโยชน์ด้านสมุนไพร [34]

- ผล (เมล็ด) ใช้เป็นยากำจัดหนอน ในเวลาที่วัวเป็นแผลใช้เมล็ดหมากปิดที่แผล หนอนก็จะตายหมด ใช้เป็นยาสมานแผล ในเวลาหั่นหมาก แล้วมีดบาดมือ ก็จะใช้เมล็ด (เนื้อ) หมากมาปิด ทำให้เลือดหยุดไหล และแผลจะหายเร็ว ใช้เป็นยาถ่ายพยาธิในสัตว์ เช่น พยาธิตัวแบน ตัวกลม และตัวตืด ใช้ขบเคี้ยวเพื่อรักษาเหงือก และฟันให้คงทน ใช้รักษาอาการท้องเดิน ท้องเสีย ในยุโรป ใช้เป็นส่วนผสมของยาสีฟัน เชื่อว่าทำให้ฟันขาว
- ราก นำมาต้มกิน แก้ปากเปื่อย ขับปัสสาวะ และโรคบิด
- ใบ นำมาต้มกิน เป็นยาขับพิษ นำมาทาแก้คัน

2) ใช้ในทางอุตสาหกรรม

เมล็ดหมาก เมื่อนำมาสกัดจะได้ไขมัน เมือก ยางและสารอัลคาลอยด์ ชื่อ Arecoline มีแทนนิน (Tannin) สูง จึงสามารถใช้ในทางอุตสาหกรรมและยารักษาโรคได้หลายชนิด เช่น ใช้ทำสีต่าง ๆ ใช้ย้อมแห อวน ทำให้แห และอวนนิ่ม และอ่อนตัว ยืดอายุการใช้งานได้นาน ไม่เปื่อยเร็ว ใช้สกัดทำยารักษาโรค เช่น ยาสมานแผล ยาขับพยาธิในสัตว์ ยาแก้ท้องเดิน ท้องเสีย ยาขับพิษ ยาทาแก้คัน น้ำมันนวด ยาขับปัสสาวะ และยาแก้ปากเปื่อย เป็นต้น และใช้สกัดเป็นน้ำยาฟอกหนัง จะทำให้หนังนิ่ม และมีสีสวย

2.8.4 กาบหมาก

กาบหมาก[35] หรือที่เรียกว่า กากปุเล หมายถึง ส่วนล่างของทางใบที่หุ้มรอบลำต้นหมาก เมื่อแก่จัดแล้วหลุดลงมามีลักษณะเป็นแผ่นแข็งเหนียว ดังภาพที่ 2.10 มีความกว้างประมาณ 12 นิ้ว ความยาวประมาณ 20 นิ้ว หรือตามขนาดของลำต้น กาบสดจะเป็นสีเขียวอ่อน

เยื่อกาบหมาก [36] ได้มาจากการลอกเยื่อบางบริเวณใต้ท้องด้านในของกาบหมาก มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ

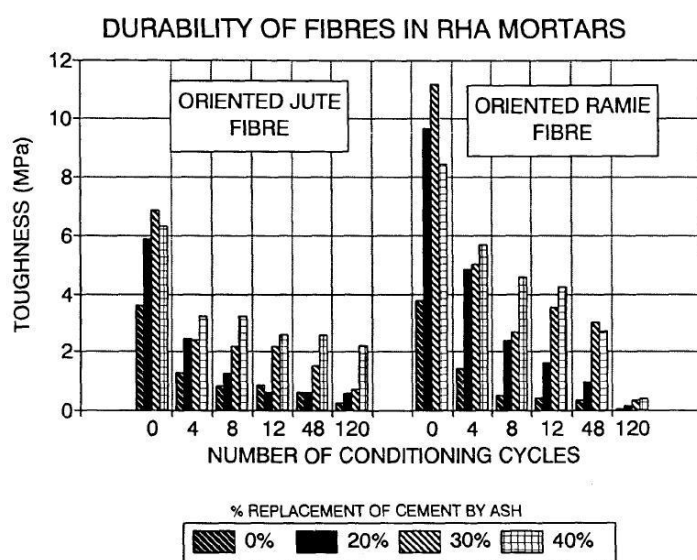


ภาพที่ 2.10 กาบหมาก [37]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1987 Shafiq และคณะ [38] ทำการศึกษาความทนทานของเส้นใยธรรมชาติที่ผสมเพิ่มลงในมอ ร์ตาร์ท์ โดยการใช้ซีเมนต์เก่าเคลือบเข้าแทนที่ในบางส่วนของปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับเส้นใยป่านรามีกับปอกระเจา โดยแผ่นทดสอบมาบ่มในสภาพที่เปียก และแห้งสลับกันโดย

การฉีดพ่นน้ำและอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าการใช้ซีเมนต์เก่ากลับเข้าแทนที่ในบางส่วนของปูนซีเมนต์ จะช่วยให้ความทนทานของเส้นใยที่ผสมเพิ่มในมอร์ตาร์ดีขึ้นและอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ ผสมซีเมนต์เก่าร้อยละ 30 และปูนซีเมนต์เหลือร้อยละ 70 ดังภาพที่ 2.11 แสดงความทนทานของเส้นใยปอกระเจาและเส้นใยป่านรามี่



ภาพที่ 2.11 แสดงความทนทานของเส้นใยปอกระเจาและเส้นใยป่านรามี่

ต่อมา ปี ค.ศ. 2001 Khedari และ Suttisonk [39] ศึกษาวัสดุผสมใหม่ในการก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบาและค่าการนำความร้อนต่ำเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติ คือมะพร้าวและทุเรียน โดยนำเส้นใยมาตัด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำไปตากให้แห้งนำเข้าเครื่องบดเส้นใยที่ใช้มีความยาว น้อยกว่า 2 มม. 3.5 มม. และ 78 มม. นำไปแช่น้ำ 16 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นมาอบให้แห้ง ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 1.5:1 อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 1:1 พบว่าค่าการนำความร้อนลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย และค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อเส้นใยเพิ่มขึ้น อัตราส่วนเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับมะพร้าวคือ 20% ของน้ำหนักซีเมนต์ ส่วนทุเรียนที่ 10 % ของน้ำหนักซีเมนต์ ซึ่งมีค่าการนำความร้อน 0.2543 W/m K และ 0.3506 W/m K ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่ามอร์ตาร์ปกติเหมาะที่จะนำมาป้องกันความร้อนที่จะเข้าสู่ตัวอาคารและมีความหนาต่ำ มีน้ำหนักเบา แต่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่ามอร์ตาร์ปกติ

ปี ค.ศ. 2005 Olanipekun และคณะ [9] ได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้กะลามะพร้าวและเปลือกเมล็ดปาล์มแทนมวลรวมหยาบ กะลามะพร้าวขนาด 5 ถึง 20 มม. และเปลือกเมล็ดปาล์ม ขนาด 5 ถึง 15 มม. ผสมในคอนกรีตอัตราส่วน 1:1:2 และ

1:2:4 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.75 และ 0.50 ในปริมาณกะลามะพร้าวอบและเปลือกเมล็ดปาล์มที่ 0%, 25%, 50%, 75%, 100% โดยปริมาตร เมื่อผสมแทนมวลรวมหยาบในคอนกรีตจะทำให้กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นลดลง แต่การดูดซึมน้ำสูงขึ้นตามปริมาณส่วนผสมของกะลามะพร้าวและเปลือกเมล็ดปาล์มที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนผสม 1:2:4 ที่ปริมาณของเปลือกเมล็ดปาล์มผสมในคอนกรีต 100% มีความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ 1630 กก./ลบ.ม. และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตผสมกะลามะพร้าวอบ กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มตามระยะเวลาการบ่ม

ปี ค.ศ. 2005 Ramakrishna และ Sundararajan [40] ศึกษาความทนทานของเส้นใยธรรมชาติและผลกระทบการกัดกร่อนเส้นใยที่มีต่อกำลังมอร์ตาร์ ใช้เส้นใย 4 ชนิด คือ เส้นใยมะพร้าว เส้นใยปอกระเจา เส้นใยป่านศรนาราย เส้นใยพุระหง โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.65 อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 1:3 ปริมาณเส้นใย 1% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ยาว 15-20 ซม. มีการใช้สาร superplasticizer เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานที่ง่ายขึ้น มีการนำเส้นใยมาทดสอบในหลายลักษณะคือ แซนสารโซเดียมไฮดรอกไซด์มี pH 13, แคลเซียมไฮดรอกไซด์มี pH 14 และในน้ำปกติ pH 7.5 และยังมีการนำเส้นใยมาจุ่มในสารดังกล่าวแบบจุ่มแล้วนำมาทำให้แห้งสลับกัน ทดสอบที่ 60 วัน พบว่าที่สภาพแวดล้อมที่เป็นแบบอัลคาไลด์ เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ส่วนใหญ่ลดลง กำลังรับแรงก็ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับเส้นใยแบบแห้งซึ่งบางชนิดเส้นใยจะพังทันทีเมื่อรับแรงกระทำและกำลังรับแรงอัด แรงดัดของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยพบว่ากำลังการรับแรงนั้นต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่เสริมเส้นใยแบบแห้งทั้งหมด

ปี ค.ศ. 2006 Zhijian และ Wang [4] ศึกษาคุณสมบัติเส้นใยกัญชงที่ผสมในคอนกรีต มีอัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อทรายต่อมวลรวม 1 : 1.5 : 2.5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 เมื่อเพิ่มเส้นใยกัญชงจะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงดัดมีค่ามากเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ แต่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยจะน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ในการผสมแบบเปียกคือใช้เส้นใยที่อิมตัวแล้วจะมีการแอนตัวของคอนกรีตเสริมเส้นใยมากกว่าการผสมแบบแห้ง

ปี ค.ศ. 2007 Asasutjarit และคณะ [41] ได้มีการพัฒนานำเส้นใยมะพร้าวมาผสมซีเมนต์เพื่อเป็นแผ่นซีเมนต์ให้มีน้ำหนักเบา โดยใช้ซีเมนต์ต่อเส้นใยมะพร้าวต่อน้ำที่ 1 : 2 : 1, 1 : 1 : 1, 2 : 1 : 2 โดยน้ำหนัก เส้นใยมะพร้าวมีความยาว 13 ซม. 6 ซม. และ 4 ซม. เส้นใยที่ใช้มี 3 ลักษณะคือ เส้นใยปกติที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ เส้นใยที่ผ่านการล้างแล้ว และเส้นใยที่ผ่านการล้างและการต้ม หล่อขนาด 35 x 35 x 1 ซม. ทำการอัดโดยแรงอัด 560 กก./ซม² ในครั้งแรกทำการ

ทดสอบที่ซีเมนต์ต่อเส้นใยมะพร้าวต่อน้ำ 1 :2:1 พบว่าเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆมาก่อน เมื่อเส้นใยมากขึ้นความหนาแน่นของแผ่นทดสอบน้อยลง ค่าการดูดซึ่มมากขึ้น ค่าความต้านแรงดัด และค่าแรงยึดเหนี่ยวภายในเพิ่มขึ้น เส้นใยที่ผ่านการล้างและเส้นใยที่ผ่านการล้างแล้วต้ม ค่าความต้านแรงดัด มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเส้นใยผ่านกระบวนการต้มแล้วจะทำให้ปริมาณไฮโดรซิลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ที่ความยาวของเส้นใยสั้นๆจะมีค่าความต้านแรงดัด และการแรงยึดเหนี่ยวภายในเพิ่มขึ้นยกเว้นเส้นใยที่ผ่านการล้างและต้มแล้วความยาวเส้นใยที่ 6 ซม.มีค่ามากกว่าและมากที่สุด การทดสอบการนำความร้อน เส้นใยที่สั้นจะนำความร้อนได้สูง ฉะนั้นจึงใช้ความยาวเส้นใยที่ 6 ซม.และผ่านกระบวนการล้างและต้มแล้วมาทดสอบหาอัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อเส้นใยต่อน้ำ ค่าความต้านแรงดัด ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น แรงยึดเหนี่ยวภายใน และค่าการนำความร้อนจะมากที่สุดที่อัตราส่วนผสม 2 :1:2 แต่ค่าการดูดซึ่มน้ำ ความชื้นจะมากที่สุดที่อัตราส่วน 1:2:1

ปี ค.ศ. 2008 Hashim [42] ศึกษาผลกระทบคุณสมบัติคอนกรีตที่ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน ใช้ความยาวเส้นใย 1, 2, 3, 4, 5 ซม. ปริมาณ 0.25 % และ 0.50% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ผสมซีเมนต์ น้ำ หินบด และทราย อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 พบว่าความต้านแรงดัด ของคอนกรีตผสมเส้นใยที่ปริมาณเส้นใย 0.50 % ที่ความยาว 3 ซม. มีค่าแรงดัดมากที่สุด ส่วนที่ 0.25% ที่ความยาว 5 ซม.มีค่าแรงดัดมากที่สุดมากกว่าที่ 0.50 % ค่าการรับกำลังจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม การทดสอบการรับกำลังแรงดึงโดยตรงพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้นและความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้มีกำลังรับแรงดึงที่สูงขึ้นเรื่อยๆ

ปี ค.ศ. 2008 Kriker และคณะ [43] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความคงทนของเส้นใยปาล์มเพศผู้ที่เสริมในคอนกรีตในสภาวะที่ร้อนและแห้ง โดยใช้เส้นใยปาล์มที่ดึงออกมาจากลำต้นยาว 20-50 ซม. กว้าง 20-30 ซม. หนา 0.2-0.8 มม.ผสมทราย และมวลรวมหยาบ ทดสอบแรงดัดของตัวอย่างคานขนาด 70 x70x280 มม.การทดสอบอัลคาไลด์ของเส้นใยโดยนำเส้นใยแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ที่มี pH 12.5 เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 6 เดือน พบว่ากำลังรับแรงดึงลดลง เส้นใยที่ผสมในแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสูญเสียกำลังรับแรงดึงมากกว่า มีความเปราะแตกง่าย จะลดลงเรื่อยๆตามจำนวนวันในการแช่สารละลาย และทดสอบความทนทานของเส้นใยในคอนกรีต ทำการบ่มในน้ำ 14 วัน แล้วนำมาอบที่ 32 องศาเซลเซียส เมื่อทดสอบกำลังรับแรงดัดพบว่าคอนกรีตที่มีเส้นใยในช่วงแรกจะมีการ

แตกร้าและแอนตัวน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใย ส่วนการทดสอบที่ระยะเวลาต่างๆจะมีกำลังรับแรงดัดลดลงเนื่องจากอัลคาไลตีในคอนกรีต

ปีพ.ศ. 2537 บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิमितยงสกุล [5] การประยุกต์ใช้เส้นใย ผักตบชวาเสริมในแผ่นหลังคา โดยใช้เส้นใยผักตบชวาที่ตากแห้ง และใช้ซีเมนต์เพสต์ 2 ชนิด คือ ชนิดที่ไม่ผสมซีเมนต์แก่กลบ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และซีเมนต์เพสต์ผสมซีเมนต์แก่กลบ อัตราส่วนซีเมนต์ต่อซีเมนต์แก่กลบเท่ากับ 70 :30 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนซีเมนต์ต่อน้ำเท่ากับ 0.45 และอัตราส่วนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แก่กลบต่อน้ำยาลดน้ำพิเศษเท่ากับ 0.024 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนวัสดุผสมซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 2 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 25 มม. ขนาดของแผ่นหลังคา 600x 600x8 มม. การใช้น้ำยาลดน้ำพิเศษเพื่อรักษาความสามารถในการเทได้ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำๆ และให้กำลังสูงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งซีเมนต์แก่กลบมีอนุภาคที่เล็กมาก มีความถ่วงจำเพาะต่ำและต้องการปริมาณน้ำมากกว่าเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ผสมซีเมนต์แก่กลบกับไม่ผสมซีเมนต์แก่กลบใกล้เคียงกัน แต่มอดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ผสมซีเมนต์แก่กลบจะต่ำกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา การดูดซึมน้ำ และปริมาณความชื้นจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเส้นใย เมื่อเส้นใยมากปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำจะมีความมากขึ้น มอร์ตาร์ธรรมดาที่เส้นใย 1 % จะให้ค่าปริมาณความชื้นมากที่สุด และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ผสมซีเมนต์แก่กลบจะสูงกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา ในการทดสอบแรงดัด มอร์ตาร์ผสมซีเมนต์แก่กลบจะมีค่ากำลังแรงดัดสูงกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา มอร์ตาร์ธรรมดาที่มีปริมาณเส้นใย 1 % จะให้ค่ากำลังดัดสูง ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมซีเมนต์แก่กลบมีปริมาณเส้นใย 2 % จะให้ค่ากำลังดัดสูง ส่วนค่ามอดูลัสความเหนียวที่ปริมาณเส้นใย 2 % จะทำให้มอร์ตาร์ธรรมดาและมอร์ตาร์ผสมซีเมนต์แก่กลบมีค่าสูงสุด แต่เมื่อใช้ปริมาณเส้นใย 1% จะทำให้ซีเมนต์เพสต์แตกร้า การทดสอบความทึบน้ำได้ผลที่ดี คือไม่มีการรั่วซึมของน้ำตรงบริเวณผิวด้านล่างของแผ่นหลังคา ค่าดัชนีความต้านทานแรงกระแทกจะขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใย เส้นใยมากจะสามารถรับแรงกระแทกได้มาก ค่าความต้านทานการดัดงอกก่อนการแตกร้าครั้งแรกของแผ่นในมอร์ตาร์ธรรมดาสูงกว่ามอร์ตาร์เสริมเส้นใยผักตบชวาแต่ความต้านทานการดัดงอกหลังจากการแตกร้า แผ่นหลังคามอร์ตาร์เสริมเส้นใยผักตบชวาจะสูงกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา

ปีพ.ศ. 2542 ทรงศักดิ์ มิ้มกระโทก [6] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยสอยดาวมีส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ และเส้นใยจากเปลือกต้นสอยดาวมี 2 ลักษณะคือเส้นใยสอยดาวที่ได้จากการทุบ และการตัดจะพบว่าที่อัตราส่วนเส้นใยต่อซีเมนต์มาก

การเตรียมเส้นใยโดยวิธีทุบจะมีความชื้นและการดูดซึ่มมาก การรับกำลังแรงอัดที่การเตรียมเส้นใยโดยวิธีการตัด อัตราส่วนเส้นใยต่อซีเมนต์ 0.150 โดยน้ำหนัก เส้นใยยาว 2 ซม. จะให้ค่ากำลังที่สูงสุดแต่น้อยกว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ธรรมดาแต่ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยสอยดาวจะให้ค่ามากกว่ามอร์ตาร์ธรรมดาเนื่องจากมอร์ตาร์เสริมเส้นใยหลังจากถึงกำลังมากที่สุดตัวอย่างยังคงรับน้ำหนักได้ แสดงว่ามีความเหนียว การรับกำลังแรงดึงที่อัตราส่วนเส้นใยต่อซีเมนต์ 0.160 โดยน้ำหนักเส้นใย

ปีพ.ศ. 2543 เทอดศักดิ์ แก้วศรี [44] ได้ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเส้นใย มีส่วนผสมคือปูนซีเมนต์ น้ำ ซีเมนต์และเส้นใยจะมีทั้งหมด 9 เส้นใย (ใยหินขนาด 0.5-10 มม. โพลีโพรพิลีน (พีบริลเลท) ขนาด 19 มม. โพลีโพรพิลีน (พีบริลเลท) ขนาด 12 มม. ด้าย ขนาด 20 มม. ป่านศรนารายณ์ขนาด 25 มม. ปอแก้วขนาด 15 มม. และ ไม้ จากกระดาษลัง กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษถ่ายเอกสารที่เปียกอยู่) โดยป่านศรนารายณ์และปอแก้ว จะผสมซีเมนต์และเส้นใยเพื่อลดความเป็นด่างที่จะมีผลต่อการย่อยสลาย ใช้ปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ 70 : 30 มีกระบวนการอัด ไม่เกิน 50 กก./ซม. ² กำลังรับแรงดัดของซีเมนต์ผสมเส้นใยทุกชนิดจะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่มากขึ้น เพราะเส้นใยช่วยรับหน่วยแรงดึง แต่ภายหลังที่เกิดรอยแตกกว้าง ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงดัดลดลง เนื่องจากเกิดช่องว่างในส่วนผสมมากเกินไป เส้นใยจะช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์ผสมซีเมนต์และเส้นใย ความต้านทานแรงกระทำจะเพิ่มมากขึ้น ตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น โดยในแต่ละเส้นใยมีปริมาณเส้นใยที่ผสมในซีเมนต์แตกต่างกันที่ทำให้ซีเมนต์ผสมเส้นใยมีกำลังรับสูงสุด ความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณของเส้นใยที่มากขึ้น เพราะเส้นใยมากขึ้น น้ำก็มากขึ้น ช่องว่างมากขึ้น มอดุลัสยืดหยุ่นของซีเมนต์ผสมเส้นใยมีค่าต่ำ ดังนั้นเส้นใยจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับซีเมนต์เพสต์ กำลังรับแรงดึงโดยตรงของซีเมนต์ผสมเส้นใยทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยจะช่วยรับหน่วยแรงดึง ผ่านหน้าตัดที่แตกกว้างของซีเมนต์เพสต์ และยังขึ้นกับสภาพผิว และความยาวของเส้นใยด้วย การหดตัวของซีเมนต์ผสมเส้นใยทุกชนิดมีค่าต่ำลง เนื่องจากเส้นใยจะช่วยยึดประสานกับซีเมนต์เพสต์ และยับยั้งการหดตัว ปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำของซีเมนต์ผสมเส้นใยจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณและคุณสมบัติความชื้นและการดูดซึ่มของเส้นใย ถ้าเส้นใยมีปริมาณความชื้นและการดูดซึ่มสูง จะส่งผลให้ซีเมนต์ผสมเส้นใยมีปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำสูงด้วย

ปีพ.ศ. 2547 ทวี มูลแก้ว [45] ศึกษาการพัฒนาวัสดุผสมซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติจากขนสัตว์ มีวัสดุหลักในการผสมคือ ปูนซีเมนต์ หินปูน ทราย น้ำและเส้นใย (เส้นใยผม

เส้นใยขนสุกร เส้นใยขนกระบือ เส้นใยขนสุนัขและเส้นใยโพลีโพรพิลีน) ในการทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์ ใช้ปริมาณเส้นใยร้อยละ 2 ปูนซีเมนต์และทราย 1 : 1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ใช้ปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 ส่วนการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการควบคุมการแตกร้าวจากการหดตัวของคอนกรีตขณะก่อตัวด้วยเส้นใย ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ต่อ หินปูน ต่อ ทราย 1 : 1 : 1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 จากการทดลองพบว่า เส้นใยชนิดที่ไม่เกินปริมาตรร้อยละ 0.25 มีความสามารถควบคุมการแตกร้าวได้ดีที่สุดในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยนั้นเมื่อเส้นใยมากขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลง ส่วนค่าการรับกำลังดัด เส้นใยชนิดทุกชนิดพฤติกรรมหลังจากเกิดการแตกร้าวและให้ค่ากำลังดัดสูงสุดแล้ว ค่ากำลังดัดจะลดลงทันทีทันใดและจะยังไม่ขาดออกจากกัน

ปีพ.ศ. 2548 วิชาญ ยอดน้ำคำ [7] ศึกษาการพัฒนาการผลิตแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษอัดขึ้นรูป มีส่วนผสมคือ ปูนซีเมนต์ น้ำ เยื่อกระดาษที่ป่นแล้วแต่มีระยะเวลาแช่น้ำที่แตกต่างกัน และเส้นใย (ปอแก้ว ป่านศรนารายณ์ ไม้ไผ่) โดยใส่เส้นใยที่ 1 % ขนาด 10 x 50 x 1.5 ซม. และ 10 x 50 x 2 ซม. อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องระบบไฮดรอลิค ด้วยแรงอัด 100 ksc. นำแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษผึ่งแดดให้แห้ง 2 วัน และนำมาบ่มในอากาศ แผ่นตัวอย่างที่ใส่เส้นใยธรรมชาติจะมีกำลังดัดเทียบเท่า และความเหนียวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นตัวอย่างที่ไม่ใส่เส้นใยธรรมชาติ นอกจากนี้แผ่นตัวอย่างที่ใส่เส้นใยธรรมชาติจะมีพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว (Ductile failure) ในขณะที่แผ่นตัวอย่างที่ไม่ใส่เส้นใยธรรมชาติจะเกิดการวิบัติและลักษณะการวิบัติแบบทันทีทันใด (Brittle failure) การเพิ่มระยะเวลาในการแช่กระดาษให้นานขึ้น แต่ไม่เกิน 30 วัน มีผลทำให้กำลังดัดเทียบเท่าของแผ่นตัวอย่างสูงขึ้น ที่ 30 วัน จะให้กำลังดัดเทียบเท่าที่มีค่าสูงที่สุดและอัตราส่วนผสมที่มีสัดส่วนของซีเมนต์ต่อเยื่อกระดาษสูงขึ้น มีผลทำให้กำลังดัดเทียบเท่าของแผ่นตัวอย่างลดลง โดยที่กำลังดัดเทียบเท่าที่มีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วนซีเมนต์ต่อเยื่อกระดาษเท่ากับ 1:1 และการใส่เส้นใยธรรมชาติทำให้แผ่นตัวอย่างมีกำลังดัดเทียบเท่าสูงขึ้น โดยเฉพาะการใส่เส้นใยธรรมชาติแบบตาข่าย การใส่เส้นใยป่านศรนารายณ์จะให้ค่ากำลังดัดเทียบเท่าสูงสุดในการใส่แบบกระจายแต่เส้นใยปอแก้วให้กำลังดัดเทียบเท่าสูงในแบบตาข่าย การใส่เส้นใยธรรมชาติทุกชนิดมีผลทำให้ค่าพลังงานสะสมเพิ่มขึ้น ใส่เส้นใยแบบกระจายจะให้ค่าพลังงานสะสมสูงกว่าการใส่เส้นใยแบบตาข่าย พฤติกรรมการดูดซึมน้ำ อัตราส่วนผสมที่มีปริมาณเยื่อกระดาษมากขึ้นจะมีการดูดซึมน้ำมากขึ้นด้วย และมีคุณสมบัติการเลื่อย การตอกและการถอนตะปูได้เทียบเท่ากับไม้

ปีพ.ศ. 2548 ศราวิน ปัญจะผลินกุล [46] ได้ศึกษาวัสดุซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืชมีวัตถุประสงค์หลักในการผสมได้แก่ ปูนซีเมนต์ หินปูนย่อย ททราย น้ำและเส้นใย โดยมีเส้นใยปอแก้ว ปานศรนารายณ์ จากอำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และจังหวัดลพบุรี และเส้นใยโพลีโพรพิลีน ได้ทดสอบการแตกร้าวจากการหดตัวของคอนกรีต ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.50 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดรอยแตก ร้าวได้มากที่สุด และที่ความยาวเส้นใยปอแก้วยาว 3 เซนติเมตร เส้นใยปานศรนารายณ์ที่ความยาว 7 เซนติเมตร สามารถควบคุมการแตกร้าวได้ดีที่สุด การเพิ่มปริมาณเส้นใยพืช หรือเส้นใยโพลีโพรพิลีนผสมลงในคอนกรีตที่ปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้การแตกร้าวลดลง เส้นใยที่มีความยาวมากค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะลดลง ส่วนกำลังรับแรงดัด วัสดุซีเมนต์มอร์ตาร์ที่เสริมเส้นใย ปานศรนารายณ์ให้กำลังดัดมีค่ามากที่สุด

ปีพ.ศ. 2548 สัญญา บุรา [47] ศึกษาการศึกษาการนำเส้นใยปอแก้วมาใช้ในงานคอนกรีต เพื่อทดสอบรอยร้าวที่เกิดขึ้นระหว่างคอนกรีตที่ผสมเส้นใยและไม่ผสมเส้นใย มีส่วนผสมคือปูนซีเมนต์ อีจุ่มอณู ททราย น้ำและเส้นใย(แบบกระจายขนาด 2 ซม. แบบถักสานเป็นตาข่ายด้วยมือ และด้วยเครื่องจักร) ก่ออิฐมอญครึ่งแผ่นเพื่อทำเป็นผนังโดยใช้อัตราส่วนผสมที่ทำให้เกิดรอยร้าวมากที่สุด พบว่าการแตกร้าวของผนังที่ไม่มีเส้นใยปอแก้วส่วนใหญ่ จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลา 2 ชั่วโมงแรก มีพื้นที่การแตกร้าวมากกว่าร้อยละ 80 ของพื้นที่ แต่ผนังที่มีเส้นใยปอแก้วในปริมาณร้อยละ 0.2-0.25 ของปริมาตรปูนฉาบสามารถลดรอยแตกร้าวได้ ค่า ความต้านแรงดัด จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยปอแก้วเพิ่ม ขึ้น มีการเสริมแบบตาข่ายถักด้วยมือ และอัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายที่ 1:1.5 ส่วนกำลังอัดของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยจะลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยปอแก้วเพิ่มขึ้น

ปีพ.ศ. 2548 สโรชา เจริญวัย [48] ได้ศึกษาสมรรถนะของวัสดุก่อสร้างมวลเบาที่มีเส้นใยเป็นองค์ประกอบ โดยใช้เส้นใยจากเปลือกทุเรียนผสมกับซีเมนต์และทราย มีอัตราส่วนผสม 1:1:0.1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คือ 0.6 จะพบว่ากำลังต้านทานแรงอัดจะสูงขึ้นที่มีการผสมซีเมนต์กลับที่ 30% นอกจากการเพิ่มความต้านทานแรงอัดแล้วยังช่วยลดค่าความเป็นด่าง ลดการแตกร้าว เนื่องจากเส้นใยทุเรียนประกอบด้วยไฮโดรเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งซีเมนต์กลับประกอบไปด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ทำให้ลดความเป็นด่างในวัสดุ

ปีพ.ศ. 2549 ณัฐพล ฐาตุจิวรงค์กุล[10] ศึกษาแผ่นบางวัสดุผสมซีเมนต์เสริมด้วยเส้นใยไม้ไผ่ มีส่วนผสมหลักคือ ปูน น้ำ และเส้นใยโดยนำเส้นใยมาแช่ในสารละลายสารโซเดียมซิลิเกตและอลูมิเนียมซิลเฟต ทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค บ่มในอากาศ การทดสอบแรง

ตัดพบว่าแผ่นซีเมนต์ที่มีอายุการบ่มมากและแผ่นที่มีการเสริมเส้นใยมาก กำลังรับแรงดัดก็จะมากขึ้น การรับกำลังดัดของแผ่นที่แช่ด้วยสารโซเดียมซิลิเกตจะรับกำลังได้ดีกว่าใยไม้ไผ่ที่แช่ในสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตซึ่งมีความแตกต่างกันน้อยมากกับแผ่นที่ไม่ได้แช่ในสารละลาย การดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์ผสมใยไม้ไผ่ที่แช่สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต มีค่าของการดูดซึมน้ำที่น้อยที่สุด และแผ่นซีเมนต์ผสมใยไม้ไผ่ที่ไม่ได้แช่ในสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตและสารละลายโซเดียมซิลิเกต มีค่าการดูดซึมน้ำที่มากกว่าและปริมาณเส้นใยมากขึ้นการดูดซึมน้ำก็มากขึ้น

ปีพ.ศ. 2550 ศักดิ์สิทธิ์ ศรีแสง และคณะ [11] การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุผสม สำหรับคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทราย และเส้นใยมะพร้าว ผลิตคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักขนาด $70 \times 190 \times 390$ มิลลิเมตร มีส่วนผสมคือปูนซีเมนต์ ทราย เส้นใยมะพร้าวที่บดแล้ว และน้ำ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6 ใช้เครื่องอัดบล็อกคอนกรีตแบบไฮดรอลิค ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัด อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 ทรายร้อยละ 52.50 และเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 22.50 จะให้ค่าการต้านทานแรงอัดมากที่สุดความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดกับส่วนผสมของทรายหยาบ มีความสัมพันธ์แบบตามกัน คือเมื่อความต้านทานแรงอัดมีค่ามาก อัตราส่วนของทรายจะสูง มีช่องว่างน้อยมีผลให้ความต้านทานแรงอัดมีค่าสูง แต่ให้หากปริมาณมากเกินไปปริมาณของคอนกรีตไม่สามารถหล่อหุ้มทรายได้หมด อาจมีผลให้ค่าความต้านทานแรงอัดต่ำลง ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวที่เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนผสมนี้ยังมีการไหลผ่านความร้อนน้อยที่สุดที่ 48 องศาเซลเซียส

ปีพ.ศ. 2550 นุศรินทร์ อินทรกำแหง ณ ราชสีมา [12] ศึกษาการพัฒนาแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษผสมเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ มีส่วนผสม คือ ปูนซีเมนต์ น้ำ เยื่อกระดาษที่นำมาแช่น้ำ 7 วันและปั่นแล้ว และเส้นใย (ปานครนารายณ์ ปอแก้ว โพลีโพรพิลีน) ขนาดแผ่นซีเมนต์ $20 \times 30 \times 1.5$ ซม. ทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดระบบไฮดรอลิค บ่มในอากาศพลิกกลับด้านทุก 6 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการโก่งงอ จากการทดลองพบว่าเส้นใยปานครนารายณ์มีค่ามอดุลัสการแตกร้าวและพลังงานสะสมสูงกว่าเส้นใยอื่นๆ เส้นใยปอแก้วมีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดและมีความหนาแน่นมากที่สุด อิทธิพลของความยาวและปริมาณเส้นใยพบว่า เส้นใยที่มีความยาว 2.5 ซม. ถ้าใส่เส้นใยปริมาณมากจะทำให้มอดุลัสการแตกร้าวและพลังงานสะสมมีค่าลดลง แต่ที่ความยาวเส้นใยที่ 5 ซม. และ 7 ซม. ไม่สามารถสรุปได้ ซึ่งถ้าใส่เส้นใยในปริมาณที่มากและยาวขึ้น จะมีการดูดซึมน้ำมากขึ้นแต่ความหนาแน่นลดลง ปริมาณของเยื่อกระดาษที่ผสมในอัตราส่วนผสม

ซีเมนต์ต่อกระดาษ 1:1 ให้ค่ามอดูลัสการแตกร้าวและพลังงานสะสมสูงที่สุด ปริมาณกระดาษมาก ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำมากแต่ค่าความหนาแน่นน้อย การใช้แรงในการอัดขึ้นรูปที่ 50 ksc. ให้ค่าพลังงานสะสมและมอดูลัสการแตกร้าวสูงสุด มากกว่า 30 ksc. แสดงว่าที่แรงอัดสูงจะทำให้แผ่นตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงดัดสูง เพราะส่วนผสมบีบอัดเข้ากันอย่างแน่น แผ่นตัวอย่างมีความหนาแน่นสูงและทำให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง

ปีพ.ศ. 2551 กรกฎ กิจราช [49] ศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยมะพร้าว ในการทดสอบนี้ได้มีการทดสอบใช้สารโซเดียมซิลิเกตเพื่อเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและซีเมนต์ การทดสอบเมื่อเพิ่มความยาวและปริมาณของเส้นใยของวัสดุซีเมนต์เสริมเส้นใยจะมีอิทธิพลทำให้กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ลดลง เนื่องจากเส้นใยเกิดการเกาะตัวกันเป็นก้อน การใส่ปริมาณสารโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้นก็ทำให้กำลังอัดลดลงเช่นกัน และอัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 :1 มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า 1 :2.75 หน่วยแรงดัดเทียบเท่าสูงสุดของแผ่นตัวอย่างลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยมากขึ้น แต่หลังจากที่หน่วยแรงดัดเทียบเท่าสูงสุดลดลง แผ่นตัวอย่างที่มีปริมาณและความยาวมากจะสามารถกลับมารับหน่วยแรงดัดเทียบเท่าได้สูงขึ้น ส่วนการเพิ่มปริมาณสารโซเดียมซิลิเกตจะทำให้หน่วยแรงดัดลดลงอาจเป็นเพราะสารโซเดียมซิลิเกตทำให้เส้นใยมะพร้าวมีความเปราะ และขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน อัตราส่วนที่ 1 :1 เมื่อหน่วยแรงดัดสูงสุดลดลงจะสามารถรับหน่วยแรงดัดเทียบเท่าสูงกว่าที่อัตราส่วน 1 :2.75 ค่ามอดูลัสการแตกร้าวจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณและความยาวของเส้นใย การใส่สารโซเดียมซิลิเกตในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้มีค่ามอดูลัสการแตกร้าวเพิ่ม แต่ถ้าใส่ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ค่ามอดูลัสลดลง และที่อัตราส่วน 1 :1 ให้ค่ามอดูลัสการแตกร้าวสูง ในการเพิ่มปริมาณ, ความยาวเส้นใย สารโซเดียมซิลิเกต และที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75 จะทำให้มีการดูดซึมน้ำมากขึ้นแต่ความหนาแน่นลดลง การบ่มในน้ำและในอากาศให้ค่ากำลังอัด หน่วยแรงดัดเทียบเท่าและค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน แต่การบ่มในน้ำทำให้ค่ามอดูลัสการแตกร้าวสูงขึ้น ส่วนการบ่มในเตาจะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น

ปีพ.ศ. 2551 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) [50] ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุก่อสร้างประหยัดพลังงานจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่มีคุณสมบัติในการต้านทานความร้อนสูงกว่าวัสดุทั่วไปที่ใช้ในท้องตลาด “แผ่นใยซีเมนต์” โดยนำเส้นใยมะพร้าวซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติมาเป็นส่วนผสมของแผ่นใยซีเมนต์ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าในอาคารทำให้อุณหภูมิภายในห้องต่ำลง มีน้ำหนัก

เบาและผ่านการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (Thai Industrial Standard) มอก.1427-2540 กระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ (Fibre-Cement Flat Sheets) พบว่า ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) $0.097 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ค่าความจุความร้อน (Specific Heat Capacity) $953 \text{ J.kg}^{-1} .\text{K}^{-1}$ ค่าแรงดัด (Bending Strength) 9.82 N.mm^2 ค่าการพองตัวเมื่อแช่น้ำ (Thickness Swelling) 3.2 % ค่าการดูดซับน้ำ (Water Absorption) 13.72 % ค่าการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) 0 %

ปีพ.ศ. 2553 อรรถจักร ค่ายทอง และ เมตตา เพ็ญผลเจริญ [8] ได้ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยไมยราบยักษ์ เส้นใยไมยราบยักษ์ได้จากการสกัดลำต้นของไมยราบยักษ์โดยกระบวนการคราฟท์ ความยาวเส้นใย 1-5 มม. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.35 ผสมเส้นใยแบบสุ่ม บ่มที่อุณหภูมิห้อง ขนาด $65 \times 65 \times 2.54$ ซม. พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นมีค่าลดลงแต่ค่าความชื้นเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงดึงและค่ากำลังรับแรงดัดมีค่าสูงที่อัตราการผลิตผสมเส้นใยร้อยละ 1 โดยปริมาตร เนื่องจากเส้นใยสามารถช่วยรับหน่วยแรงดึงผ่านหน้าตัดที่แตกร้าวของแผ่นเพสต์ได้ เมื่อเริ่มการแตกร้าว เส้นใยจะลดสภาพการเกิดการแตกร้าวและดูดกลืนพลังงานจากแรงที่มากระทำ เมื่อปริมาณเส้นใยอยู่ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะรับกำลังสูงสุด แต่จะเริ่มลดลงเมื่อมีอัตราส่วนผสมมากขึ้น เพราะปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปจะทำให้เกิดโพรงช่องว่างระหว่างซีเมนต์กับเส้นใย ค่ารับแรงกระแทกของแผ่นซีเมนต์ผสมเส้นใยมีค่าสูงกว่าแผ่นซีเมนต์ที่ไม่ผสมเส้นใยประมาณ 4 เท่าเนื่องจากเส้นใยมีความยืดหยุ่นและมีความเหนียว จึงเสมือนเป็นตัวยึดเหนี่ยวไม่ให้เกิดการวิบัติ จะรับแรงกระแทกได้สูงสุดที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 2 โดยปริมาตร

ปิติ พานิชายุนนท์ และคณะ [13] การพัฒนาคอนกรีตบล็อกมวลเบาจากฟางข้าว โดยใช้ทรายฉาบละเอียด ดินลูกรังที่ผ่านการร่อน ฟางข้าวบดละเอียด ปูนซีเมนต์และน้ำ มีอัตราส่วนผสมคือ ดิน 10 ทราย 5 ซีเมนต์ 8 ขึ้นรูป ด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกที่แรงอัด 15-35 MPa บ่ม 7 วัน ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนฟางข้าวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงอัดลดลง เนื่องจากปริมาณฟางข้าวที่เพิ่มขึ้น เข้าไปแทนที่ปริมาณของปูนซีเมนต์ จึงทำให้ความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของปูนซีเมนต์ลดน้อยลง ปริมาณฟางข้าวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นลดลงแต่ค่าการดูดน้ำจะเพิ่มสูงขึ้น อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดคือมีดินต่อทรายต่อซีเมนต์ต่อฟางข้าว 10:5:8:8

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำเส้นใยจากกากหมากซึ่งเป็นเส้นใยเซลลูโลส ที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร สามารถหาได้ง่าย ราคาถูก เพื่อนำมาเสริมกำลังให้กับซีเมนต์เพสต์ โดยการทดสอบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยนี้จะอ้างอิงมาตรฐาน ASTM 1185-03 และ มอก. 1427-2540 เป็นหลัก

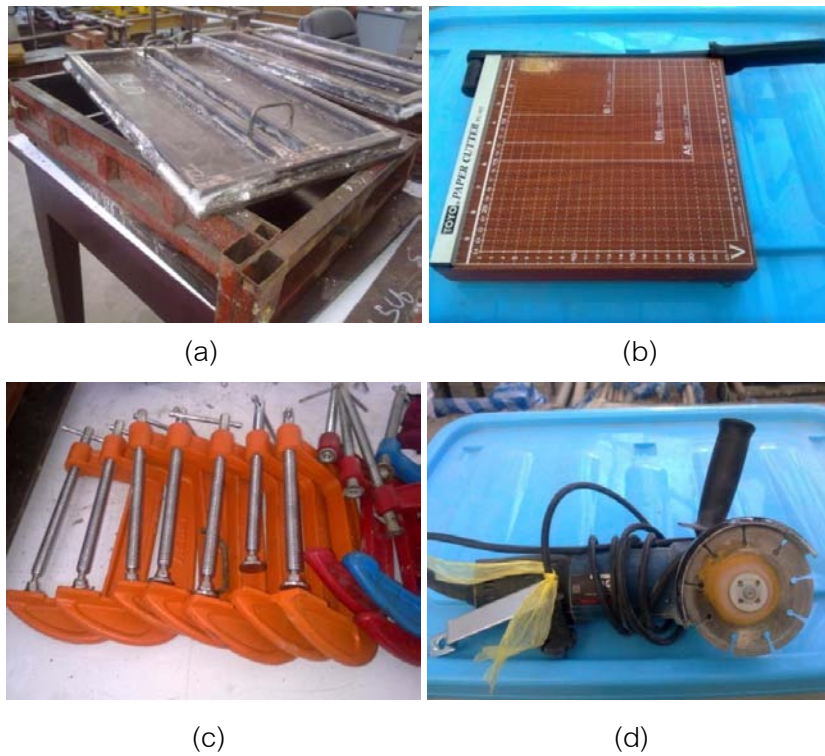
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 2) น้ำสะอาด
- 3) ถ้ำกลบ
- 4) เส้นใยกากหมาก
- 5) สารลดน้ำ

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) แบบหล่อขนาด 35 x 57 x 10 ซม.พร้อมฝาปิดด้านบน (ภาพที่ 3.1 (a))
- 2) เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ Pan Mixer
- 3) ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ
- 4) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 5) นาฬิกาจับเวลา
- 6) เวอร์เนียคาลิเปอร์
- 7) เครื่องมือจับชิ้นงาน (C-Clamp) (ภาพที่ 3.1 (b))
- 8) ตลับเมตร
- 9) เครื่องตัดกระดาษ (ภาพที่ 3.1(c))
- 10) เครื่องตัดชิ้นงาน (ภาพที่ 3.1 (d))
- 11) เครื่อง Universal Testing (ภาพที่ 3.2)
- 12) เตาอบ



ภาพที่ 3.1 แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ (a) แบบหล่อ (b) เครื่องตัดกระดาษ
(c) เครื่องมือจับชิ้นงาน (C-Clamp) (d) เครื่องตัดชิ้นงาน



ภาพที่ 3.2 เครื่อง Universal Testing

3.2 การเตรียมเส้นใย

กาบหมากที่ใช้ทดลองได้มาจากสวนหมากในจังหวัดปราจีนบุรี นำกาบหมากมาแช่น้ำแล้วทำการฉีกเป็นเส้นใย โดยเส้นใยที่นำไปใช้จะมี 2 ลักษณะคือ

1) เส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวตรงแล้วตัดตามขนาดที่ต้องการ คือการนำเส้นใยที่ฉีกไว้ข้างต้นมาทำการผึ่งแดดก่อนนำไปตัดตามขนาดดังภาพที่ 3.3(a) (b) และ(c)

2) เส้นใยที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่น คือการนำเส้นใยที่ฉีกไว้ข้างต้นไปใส่ในแบบกล่องขนาด 35 x 57 ซม. โดยสานพันไปมาเป็นแผ่นซึ่งกำหนดให้มีน้ำหนักเท่ากับทุกแผ่นดังภาพที่ 3.3(d)



ภาพที่ 3.3 แสดงเส้นใยกาบหมากที่ใช้ในการทดสอบ (a) (b) และ(c) เส้นใยกาบหมากตัดตามขนาดต่างๆ (d) เส้นใยกาบหมากที่สานเป็นแผ่นแล้ว

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทั่วไปของเส้นใย

3.3.1 การทดสอบหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

เลือกเส้นใยกาบหมากมาจำนวนหนึ่ง ทำการถ่ายภาพขยายกำลังสูงจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scan Electron Microscope, SEM) เป็นการถ่ายภาพโครงสร้างภายในด้วยกล้องกำลังขยายสูงโดยอาศัยหลักการการตกกระทบของลำแสงอิเล็กตรอนบนวัตถุ

และเกิดการสะท้อนของลำแสงกลายเป็นภาพถ่าย โดยนำเส้นใยคาบหมากที่เลือกวางบนแท่นวางขึ้นตัวอย่างทองเหลืองเคลือบเส้นใยด้วยทองคำขาวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้า จากนั้นสังเกตลักษณะรูปร่างของเส้นใยรวมทั้งหาเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยคาบหมากดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [52]

3.3.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใย

ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของเส้นใยอบแห้งซึ่งในอากาศเทียบกับน้ำหนักน้ำที่ซึ่งในอากาศที่มีปริมาตรเท่ากับมวลรวม โดยไม่รวมช่องว่างในมวลรวมที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ที่อุณหภูมิเดียวกัน

นำเส้นใยคาบหมากมาจำนวนหนึ่ง(ประมาณ 25 กรัม) มาล้างให้สะอาดจากนั้นนำเข้าสู่อบประมาณ 24 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำมาใส่ในขวดปริมาตร ซึ่งน้ำหนักจะได้ น้ำหนักเส้นใยแห้ง เทน้ำลงในขวดปริมาตรประมาณสามในสี่ และทำการคนเพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลา 10 นาที เส้นใยจะดูดซึมน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ได้สภาพอิ่มตัว หลังจากนั้นเติมน้ำจนถึงระดับอ้างอิง นำขวดปริมาตรที่มีเส้นใยและน้ำมาทำการชั่งน้ำหนัก และนำขวดปริมาตรเปล่าที่บรรจุน้ำในระดับอ้างอิงซึ่งอีกครั้ง หาค่าความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏได้ตามสมการที่ (3.1)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ} = \frac{A}{B+A-C} \quad (3.1)$$

โดยที่ A = น้ำหนักเส้นใยอบแห้ง

B = น้ำหนักขวดปริมาตร + น้ำ

C = น้ำหนักขวดปริมาตร + น้ำ + เส้นใย

3.3.3 การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของเส้นใย

นำเส้นใยจำนวนหนึ่ง(ไม่ควรน้อยกว่า 50 กรัม) แช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปรับให้อยู่ในสภาพอิมมัวแห้ง อาจทำโดยการสลัดเส้นใยพอประมาณ และนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำเส้นใยที่อยู่ในสภาพอิมมัวแห้งไปอบที่อุณหภูมิ 100 - 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง คำนวณค่าการดูดซึมน้ำดังสมการที่ (3.2)

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่ A = น้ำหนักของเส้นใยที่แห้งด้วยเตาอบ

B = น้ำหนักของเส้นใยที่สภาวะอิมมัวแห้ง

3.3.4 การทดสอบเพื่อหาค่าประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงกลของเส้นใย

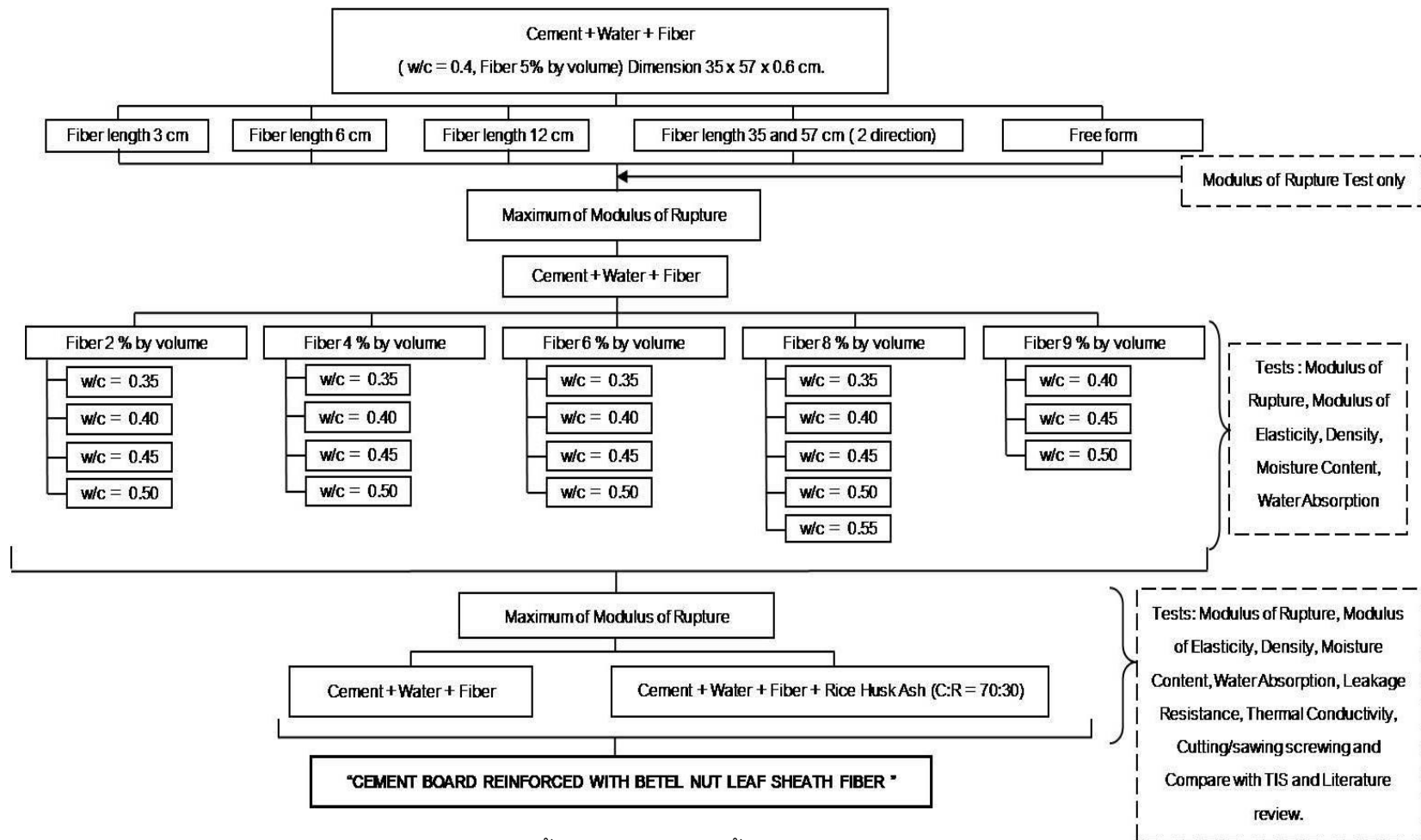
นำเส้นใยจำนวนหนึ่งจากการสุ่มมาทดสอบหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยเช่น กำลังรับแรงดึง กำลังการยืดเหนียว ความยาววิกฤตและมอดุลัสยืดหยุ่นดังภาพที่ 3.5 และทดสอบหาค่าประกอบทางเคมีของเส้นใยโดย ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน TAPPI T222 om-98 ทำการทดสอบที่ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3.5 การทดสอบกำลังรับแรงดึงและกำลังแรงยืดเหนียวของเส้นใยกาบหมาก

3.4 การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย

การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยมีอัตราส่วนผสมและขั้นตอนการทดสอบดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการทดสอบขั้นทดสอบ

3.4.1 การผสมและหล่อขึ้นทดสอบ

การผสมอัตราส่วนผสมขึ้นอยู่กับที่ออกแบบไว้ นำส่วนผสมทั้งหมดผสมในเครื่องผสมแบบ Pan Mixer ผสมให้เข้ากันประมาณ 5 นาที จากนั้นนำมาผสมกับเส้นใยซึ่งแบบการผสมเป็น 2 ลักษณะคือ

- การผสมกับเส้นใยขนาด 3 ซม. 6 ซม. และ 12 ซม. จะนำซีเมนต์ที่ผสมเข้ากันดีแล้วมาคลุกเคล้ากับเส้นใยโดยใช้มือตามปริมาณเส้นใยที่ออกแบบไว้ คลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วจึงนำไปใส่ในแบบหล่อโดยจะเกลี่ยให้ส่วนผสมกระจายให้ทั่วแบบหล่อแล้วปาดหน้าให้เรียบ
- การผสมกับเส้นใยขนาด 35 ซม. และ 57 ซม. ที่วางใน 2 ทิศทาง และเส้นใยที่สถานเป็นแผ่นแล้ว จะนำซีเมนต์ที่ผสมเข้ากันดีแล้วมาเทสลับกับวางเส้นใยเป็นชั้นๆตามจำนวนที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะเกลี่ยเส้นใยให้กระจายทั่วแบบหล่อแล้วปาดหน้าให้เรียบ

ในการผสมแก้วเกลบที่มีอนุภาคเล็กมาก มีความถ่วงจำเพาะต่ำ แต่มีความต้องการปริมาณน้ำมากกว่าเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ ดังนั้นซีเมนต์เพสต์ผสมแก้วเกลบจะแข็งตัวไว้มาก และมีความสามารถในการเทต่ำ อีกทั้งเวลาการก่อตัวเร็วมาก เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าว จึงจำเป็นต้องใช้น้ำยาลดน้ำพิเศษปริมาณ 6% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

การขึ้นรูปขึ้นทดสอบเนื่องจาก การผสมเส้นใยในซีเมนต์เพสต์ อาจก่อให้เกิดช่องว่างในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในการหล่อซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยจึงจำเป็นต้องมีการอัดโดยใช้ความดันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค ดังภาพที่ 3.6 จะทำให้น้ำที่อยู่ในส่วนผสมถูกกระบายออก จึงต้องมีการเจาะรูที่ฐานล่าง ด้านข้างของแบบหล่อแล้วจึง นำส่วนผสมใส่ลงในแบบหล่อ อัดความดันจนถึงระดับ ความหนาที่ต้องการซึ่งทำโดยการใส่เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 ซม. ที่ด้านล่างด้านข้างของแบบหล่อแล้วติดเกจวัดระยะการกดลงของแบบหล่อ เมื่ออัดความดันถึงความหนาที่ต้องการ เกจจะเริ่มหมุนช้าลงแสดงว่าถึงระดับความหนาที่ต้องการจากนั้นจดบันทึกค่าแรงกด นำเครื่องมือจับ ขึ้นทดสอบมายึดไว้ จากนั้นปล่อยความดัน เครื่องมือจับ ขึ้นทดสอบจะยึดไว้ 24 ชั่วโมง แล้วทำการถอดแบบนำขึ้นทดสอบมาบ่ม

การบ่มจะเก็บขึ้นทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้องและความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 65 ± 5 เป็นเวลา 7 วัน โดยเก็บไว้ในลักษณะที่ด้านทุกด้านของขึ้นทดสอบมีอากาศถ่ายเทได้สะดวก



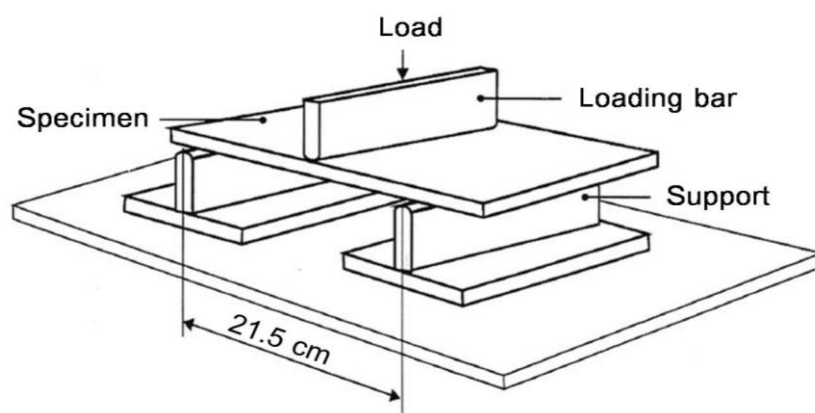
ภาพที่ 3.7 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบโดยการตัดความดันด้วยเครื่องตัดไฮดรอลิก

3.4.2 การทดสอบความต้านแรงดัด หรือมอดุลัสแตกหัก[53]

การเตรียมชิ้นทดสอบโดยตัดแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 25 x 25 เซนติเมตร เนื่องจากแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยมีความหนาไม่เกิน 9 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ซึ่งจะมีระยะระหว่างที่รองรับ 21.5 เซนติเมตร ดังตารางที่ 3.1 และทดสอบความต้านแรงดัด ตามภาพที่ 3.7

ตารางที่ 3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ [53]

Specimen shape	Thickness (cm)	Length (cm)	Width (cm)	Distance between axes of support (cm)
Square	0.6	25.0	25.0	21.5



ภาพที่ 3.8 การทดสอบความต้านแรงดัด หรือมอดุลัสแตกหัก

ทำการทดสอบโดย วางชิ้นทดสอบลงบนที่รองรับ จัดตำแหน่งให้แบ่งกอดอยู่กึ่งกลาง และขนานกับที่รองรับทั้งสองข้าง เพิ่มแรงกดในอัตราคงที่ ประมาณ 6000 นิวตันต่อหน้าที่ จนกระทั่งชิ้นทดสอบแตกหัก บันทึกแรงกดเมื่อแตกหักและวัดความหนาที่รอยแตกหักหลังจากที่ชิ้นทดสอบหักแล้วให้นำมาประกอบกลับให้เป็นแผ่นเช่นเดิมตามภาพที่ 3.8 แล้วทดสอบความต้านแรงดัดในแนวตั้งฉากกับการทดสอบแรกจากนั้นนำผลที่ได้คำนวณหาโมดูลัสแตกหัก



ภาพที่ 3.9 ตำแหน่งการวัดความหนาที่รอยแตกหักของชิ้นทดสอบสี่เหลี่ยมจัตุรัส [53]

คำนวณหาโมดูลัสแตกหัก (เมกะพาสคัล, MPa) ดังสมการที่ (3.3)

$$\text{โมดูลัสแตกหัก (MPa)} = \frac{3PL}{2be^2} \quad (3.3)$$

โดยที่

P = แรงกดที่ทำให้ชิ้นทดสอบหัก, นิวตัน

L = ระยะระหว่างที่รองรับ, เมตร

b = ความกว้างของชิ้นทดสอบ, มิลลิเมตร

e = ค่าเฉลี่ยของความหนาที่รอยแตกหักที่ 4 ตำแหน่ง, มิลลิเมตร

3.4.3 การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น [54]

การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยจะทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบหาค่าความต้านแรงดัดหรือโมดูลัสแตกหักแต่การวัดค่าและการคำนวณแตกต่างกัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นนั้นจะทำการวัดค่าการแอ่นตัวของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยพร้อมอ่านค่าแรงกดที่กระทำ ณ ค่าการแอ่นตัวนั้นซึ่งจะทำลักษณะนี้ 2 ครั้ง

คำนวณโมดูลัสยืดหยุ่น(กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร, kg/mm²) ดังสมการที่ (3.4)

$$\text{โมดูลัสยืดหยุ่น (kg/mm}^2\text{)} = \frac{(P_2 - P_1) \times L^3}{4be^3(y_2 - y_1)} \quad (3.4)$$

โดยที่ P_1 และ $P_2 =$ แรงกดที่เกิดจาก 2 จุดภายใต้หน้าตัดเส้นตรงของการพล็อตกราฟ ,
กิโลกรัม

y_1 และ $y_2 =$ ค่าการแอนตัวของขึ้นทดสอบที่สัมพันธ์กับแรงกด P_1 และ P_2 ,
มิลลิเมตร

$L =$ ระยะระหว่างที่รองรับ, มิลลิเมตร

$b =$ ความกว้างของขึ้นทดสอบ, มิลลิเมตร

$e =$ ความหนาของขึ้นทดสอบ, มิลลิเมตร

3.4.4 ความหนาแน่นปรากฏ[53]

นำขึ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความต้านแรงดัด มาใช้เป็นขึ้นทดสอบโดยก่อน
การทดสอบนำขึ้นทดสอบแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นนำขึ้นทดสอบที่มีน้ำ
อิมตัวแล้วไปชั่งน้ำหนักในอากาศและในน้ำ หาน้ำหนักที่หายไปในน้ำ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาตรของ
น้ำที่ขึ้นทดสอบแทนที่ (v) แล้วนำขึ้นทดสอบอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส เป็น
เวลา 24 ชม. แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก(m)

คำนวณความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, g/cm^3) ดังสมการที่ (3.5)

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{m}{v} \quad (3.5)$$

โดยที่ $m =$ มวลของขึ้นทดสอบหลังจากอบแห้ง, กรัม

$v =$ ปริมาตรของขึ้นทดสอบ, ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.4.5 ปริมาณความชื้น [54]

นำขึ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความต้านแรงดัด มาใช้เป็นขึ้นทดสอบโดยนำขึ้น
ทดสอบชั่งน้ำหนักที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำขึ้นทดสอบเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิ 90 ± 2 องศาเซลเซียส
จนครบ 24 ชั่วโมง นำขึ้นทดสอบออกจากตู้อบจนกระทั่งน้ำหนักของขึ้นทดสอบคงที่และปล่อยให้
เย็นลงที่อุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบอีกครั้ง

คำนวณปริมาณความชื้น (%) ดังสมการที่ (3.6)

$$\text{ปริมาณความชื้น}(\%) = \frac{(W-F)}{F} \times 100 \quad (3.6)$$

โดยที่ $W =$ น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิห้อง, กรัม
 $F =$ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังจากอบแห้ง, กรัม

3.4.6 การดูดซึมน้ำ [54]

นำชิ้นทดสอบ ขนาดกว้าง 100 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร มาใช้เป็นชิ้นทดสอบ โดยนำชิ้นทดสอบเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิ 90 ± 2 องศาเซลเซียส จนครบ 24 ชั่วโมง นำชิ้นทดสอบออกจากตู้อบจนกระทั่งน้ำหนักของชิ้นทดสอบคงที่และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องแล้ว ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ จากนั้นนำชิ้นทดสอบแช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ± 8 ชม. นำชิ้นทดสอบขึ้นจากน้ำ เช็ดด้วยผ้าให้ผิวทดสอบแห้งแล้วชั่งน้ำหนัก

คำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำ (%) ดังสมการที่ (3.7)

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{(W_s - W_d)}{W_d} \times 100 \quad (3.7)$$

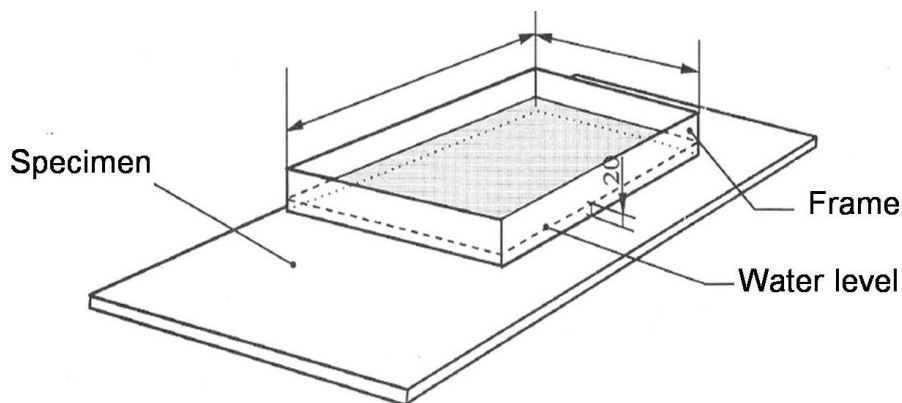
โดยที่ $W_s =$ น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่อิ่มตัว, กรัม
 $W_d =$ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังจากอบแห้ง, กรัม

3.4.7 ความเป็นกรด/ด่างที่ผิวหน้า

นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความต้านแรงดัด มาใช้เป็นชิ้นทดสอบโดย นำชิ้นทดสอบมาวัดค่าความเป็นกรด/ด่างที่ผิวหน้าของชิ้นทดสอบ

3.4.8 ความต้านการรั่วซึม [53]

ก่อนการทดสอบจะเก็บตัวอย่างทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลามาน้อยกว่า 7 วัน การทดสอบทำโดย นำกรอบสี่เหลี่ยมขนาดยาว 55 เซนติเมตร กว้าง 45 เซนติเมตร วางบนชิ้นทดสอบซึ่งวางบนที่รองรับ 2 ข้าง ขนานกันอยู่ตรงตำแหน่งห่างจากขอบพอสมควร ยาแนวลิ่มค้ำเพื่อไม่ให้น้ำรั่วได้ ใส่ให้น้ำในกรอบให้มีระดับความสูงคงที่ 20 มิลลิเมตร จากผิวบนของชิ้นทดสอบเป็นเวลา 24 ชม. แล้วดูการรั่วซึมที่ด้านล่างของชิ้นทดสอบตามภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การทดสอบความต้านการรั่วซึม

3.4.9 การทดสอบการนำความร้อน

เป็นการทดสอบวัสดุเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k-Value) เป็นกระบวนการวัดค่าการนำความร้อนของแผ่นวัสดุ ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Hot Disk Thermal Constant Analyser ใช้เทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA) ดังภาพที่ 3.11(a) และ (b) โดยทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ หน่วยปฏิบัติการวิจัย เทคโนโลยีการวิเคราะห์ทดสอบวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีการวิเคราะห์และวัสดุแห่งชาติ ชั้นทดสอบมีขนาด 5x5x0.6 เซนติเมตร จำนวน 2 ชั้น



ภาพที่ 3.11 การทดสอบค่าการนำความร้อนของแผ่น

3.4.10 การทดสอบการเลื้อย การตอก/ถอนตะปูและสกรู

นำชิ้นทดสอบมาทำการทดสอบการเลื้อย การตอก/ถอนตะปูรวมทั้งการใช้สกรู เพื่อทดสอบความสามารถในการยึดติดชิ้นงานกับส่วนต่างๆของโครงสร้างอื่นๆได้

3.4.11 การเปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) [53] ผลิตภัณฑ์แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่ขายตามท้องตลาดและงานวิจัยที่ผ่านมา

มาตรฐาน มอก. กำหนดการแบ่งประเภทของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยตามความลักษณะการใช้งานออกเป็น 2 ประเภท คือ

- ประเภทที่ถูกแสงแดดและ / หรือน้ำโดยตรง สัญลักษณ์ A
- ประเภทที่ไม่ถูกแสงแดดและ / หรือน้ำโดยตรง สัญลักษณ์ B

และแบ่งตามความต้านแรงดัดตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความต้านแรงดัด ตามมาตรฐาน มอก. [53]

Category	Minimum modulus of rupture (MPa)	
	Type A	Type B
1	-	4
2	-	7
3	7	10
4	13	16
5	18	22

บทที่ 4

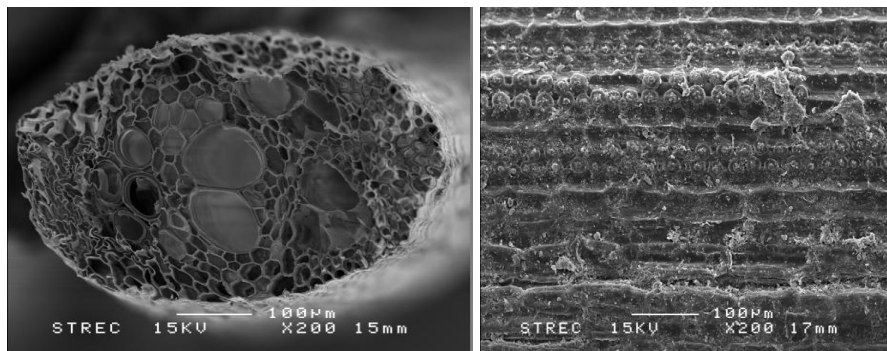
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

จากการดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนที่แสดงไว้ในบทที่ 3 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทั่วไปของเส้นใย

คุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเส้นใยกาบหมาก โดยคุณสมบัติเส้นใยถูกกำหนดจากปัจจัยต่างๆทั้งโครงสร้างของเส้นใยภายในและภายนอก องค์ประกอบทางเคมี ความยาว ความละเอียด ความหนาแน่นรวมทั้งความแข็งแรง และสภาพยืดหยุ่นของเส้นใย

เส้นใยกาบหมากที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีลักษณะ รูปทรงและสภาพผิวที่ได้จากการถ่ายภาพขยายกำลังสูงจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scan Electron Microscope, SEM) แบบ Flat, Broad คือมีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปวงรีแบน มีผิวขรุขระ มีความละเอียด 300-400 ไมโครเมตร และมีความหยักของเส้นใยเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.1 เส้นใยธรรมชาติมักมีขนาดไม่สม่ำเสมอ คุณภาพของเส้นใยจะจากความละเอียดของเส้นใย เส้นใยที่มีความละเอียดมาก (ขนาดเล็ก) จะมีคุณภาพที่ดีกว่า



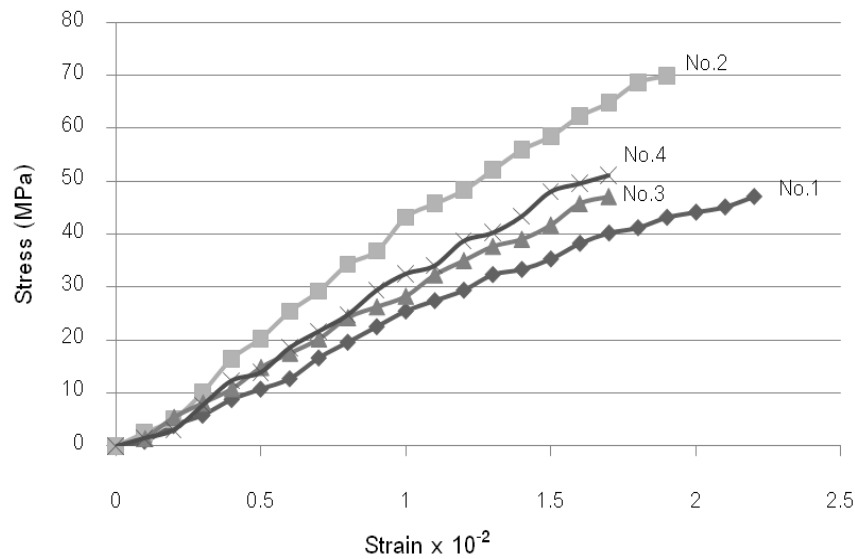
ภาพที่ 4.1 ภาพตัดตามขวางและตามยาวของเส้นใยกาบหมาก

ในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของเส้นใยกาบหมาก ความยาววิกฤตของเส้นใยเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย ถ้าเส้นใยที่นำมาผสมในซีเมนต์เพสต์มีความยาวน้อยกว่าความยาววิกฤตจะไม่เกิดการถ่ายแรงระหว่างเส้นใยในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยมีความแข็งแรงที่ต่ำลง จากการทดสอบคุณสมบัติของเส้นใยพบว่ามีความยาววิกฤต 88.26 มิลลิเมตร ดังนั้นการจะทำให้ความ

แข็งแรงของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากสูงจะต้องให้ความยาวของเส้นใยมากกว่า 88.26 มิลลิเมตร และถ้ามากกว่า 15 เท่าของความยาววิกฤตจะถูกเรียกว่าเส้นใยต่อเนื่อง ส่วนกำลังรับแรงดึง กำลังการยืดเหนียว และมอดุลัสยืดหยุ่นของเส้นใยจะขึ้นอยู่กับ ค่า Aspect ratio คือค่ามิติตามความยาวต่อมิติตามภาคตัดขวาง ยิ่งมีค่ามากก็จะทำให้เพิ่มผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์เพสต์ และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับเส้นใยก็จะมีมากขึ้น เส้นใยที่มีความยาวใช้โมเลกุลมาก มีการเรียงตัว และเชื่อมต่อโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบจะทำให้เหนียว แข็งแรง ทนทานสูง ขาดยาก ความหยาบของเส้นใยก็เช่นเดียวกัน ถ้ามีความหยาบมากจะทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใย มีความยืดหยุ่นมาก ซึ่งจากการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึง กำลังการยืดเหนียวและมอดุลัสยืดหยุ่นของเส้นใยกาบหมากจะไม่สูงมากนักเนื่องจาก เส้นใยกาบหมากมีความหยาบน้อยทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยต่ำ และค่า Aspect ratio ของเส้นใยกาบหมากก็ยังมีค่าน้อย เพราะเส้นผ่านศูนย์กลางของกาบหมากมากแต่มีความยาวน้อย ดังนั้นถ้าเพิ่มความยาวของเส้นใยก็จะทำให้ค่า Aspect ratio มีค่ามาก ซึ่งสอดคล้องกับค่าความยาววิกฤตของเส้นใยที่ความยาวของเส้นใยยาวกว่าค่าความยาววิกฤตมาก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยก็จะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของเส้นใยกาบหมาก

Diameter (mm)	0.32-0.40
Aspect ratio	>237.20
Specific gravity	1.124
Moisture content (%)	12.62
Water absorption (%)	322.21
Ultimate tensile strength (MPa)	49.98
Modulus of elasticity (MPa)	2440
Ultimate bond strength (MPa)	0.17
Critical length (mm)	88.26



ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยกาบหมาก

การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของเส้นใยก็สามารถบ่งบอกความแข็งแรงของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยได้ เส้นใยที่มีเซลลูโลสมาก จะเกิดพันธะไฮโดรเจนมาก แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังมีการจัดตัวเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก จะทนต่อการเนาเปื่อย ทนต่อแรงบิด ทนต่อสารเคมีที่เป็นด่างอ่อนหรือกรดอ่อน ทำให้เส้นใยสามารถทนต่อสิ่งที่เกิดขึ้นในซีเมนต์ได้ดีและทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ ลิกนินก็เช่นเดียวกันเมื่อผสมในซีเมนต์เพสต์จะช่วยให้การแข็งตัวของซีเมนต์ดี เพิ่มความแข็งแรงคงทน แต่ถ้ามีเฮมิเซลลูโลสมากจะเข้าไปยับยั้งขัดขวางการก่อตัวของปูนซีเมนต์หรือการจับยึดกันระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์เพสต์ การทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกาบหมากในตารางที่ 4.2 พบว่าเส้นใยกาบหมากมีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุดซึ่งจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากได้ แต่ปริมาณเฮมิเซลลูโลสก็มีค่ามากใกล้เคียงกัน ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงของเส้นใยในสภาวะปกติและในสภาวะที่เส้นใยถูกแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มี pH 12.5 ที่เปรียบเสมือนเส้นใยผสมอยู่ในซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีความเป็นด่างในระยะเวลาต่างๆ พบว่าเส้นใยที่ถูกแช่ในด่างเป็นระยะเวลาสั้นจะมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงของเส้นใยลดลง ซึ่งมีแนวโน้มลดลงไปเรื่อยๆ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปในเซลล์และรูพรองเล็กๆของเส้นใยและทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสในเส้นใยโดยการเกิดปฏิกิริยา peeling reaction ซึ่งจะตัดโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสออกจากโซ่เซลลูโลสไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดปฏิกิริยา stopping reaction การตัดโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสก็จะหยุดลง ในการเกิดปฏิกิริยา peeling reaction นั้นจะทำให้โซ่เซลลูโลสสั้นลง การ

จัดเรียงเซลล์ของเส้นใยแตกออกจากกัน ไม่ต่อเนื่อง เกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ผิวนิวเคลียสกลายเป็นผิวที่เรียบไม่เกิดการยึดเกาะ และการแช่ในด่างจะทำให้ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสหลุดสลายออกมาทำให้เกิดการเนาเปื่อยซึ่งจะมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากลดลง ดังนั้นเพื่อลดสภาพความเป็นด่างในซีเมนต์เพสต์ ที่ทำให้เกิดการย่อยสลายของเส้นใยจึงมีการนำเถ้ากลับมาผสมรวมในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกาบหมาก

Chemical composition	Hemi-cellulose	Cellulose	Lignin	Ash content	1%NaOH solubility
(%)	36.15	38.81	19.80	3.73	29.08

ตารางที่ 4.3 กำลังรับแรงดึงของเส้นใยกาบหมากในสถานะและระยะเวลาต่างๆ

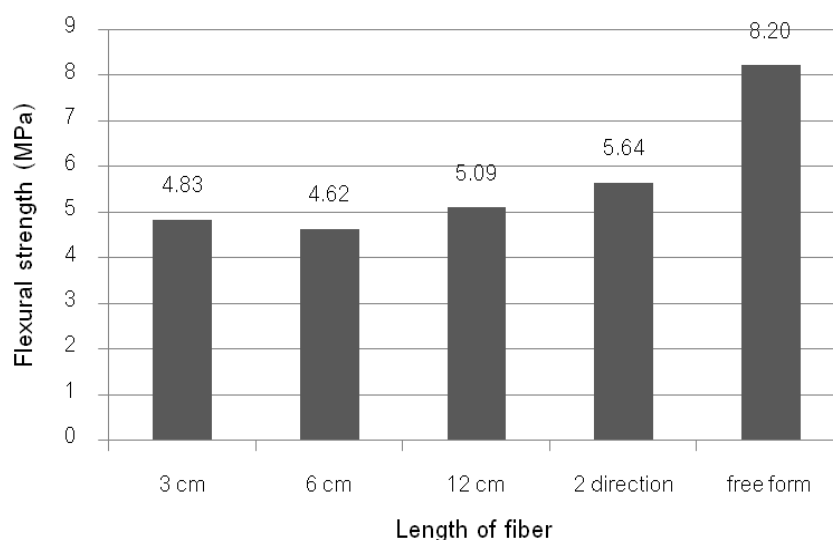
Fiber conditions	Normal	Immersed in Sodium hydroxide (NaOH) solution with pH 12.5	
		60 days	120 days
Ultimate tensile strength (MPa)	49.98	35.89	24.63

4.2 การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย

4.2.1 การทดสอบความต้านแรงดัด หรือมอดุลัสแตกหัก

ในส่วนแรกศึกษาผลของความยาวและการจัดเรียงของเส้นใยต่อความต้านแรงดัด ของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก โดยความยาวของเส้นใยกาบหมากที่ใช้คือ 3, 6, 12 เซนติเมตร มีการจัดเรียงเส้นใยแบบกระจายในซีเมนต์เพสต์ ความยาว 35 และ 57 เซนติเมตร มีการจัดเรียงตัวแบบเรียงยาวต่อเนื่องใน 2 ทิศทาง และเส้นใยต่อเนื่องที่สานขึ้นรูปเป็นแผ่นมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มอย่างเป็นระเบียบ(Freeform) จากการทดสอบความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่มีความยาวและการจัดเรียงตัวในลักษณะต่างๆ พบว่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก ที่ความยาวเส้นใย 3 , 6, 12 เซนติเมตร เส้นใยขนาด 35 และ 57 เซนติเมตรที่วางใน 2 ทิศทาง และเส้นใยต่อเนื่องที่สานเป็นแผ่น มีค่าเท่ากับ 4.83, 4.62, 5.09, 5.64 และ 8.20 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่มีขนาดเส้นใย 3 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร มีค่าน้อยกว่าขนาดเส้นใย 12 เซนติเมตร เส้นใยใน 2 ทิศทางและเส้นใยที่สานเป็นแผ่น ซึ่งสอดคล้องกับ

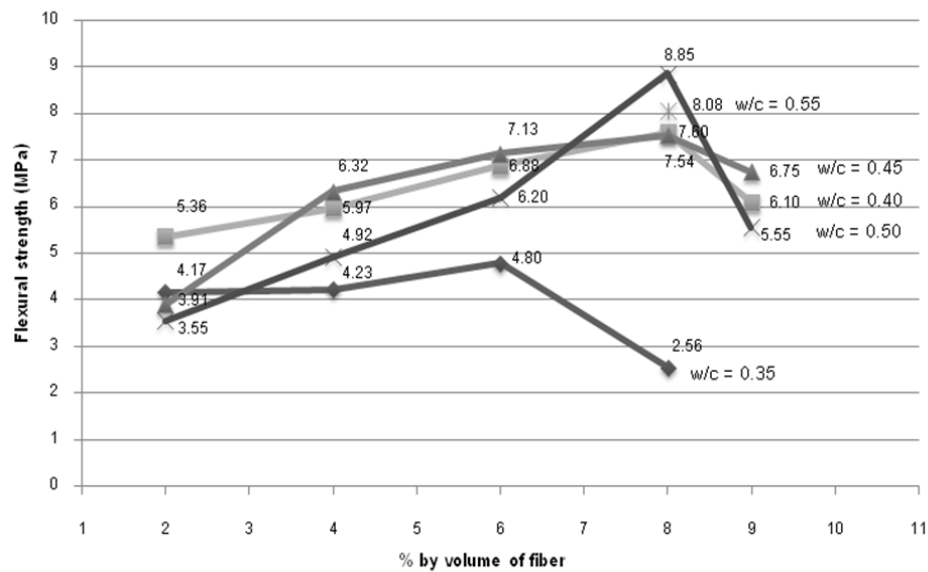
ความยาววิกฤตของเส้นใยกาบหมาก ความยาวของเส้นใยกาบหมากในซีเมนต์เพสต์ที่น้อยกว่าความยาววิกฤต จะไม่เกิดการถ่ายแรงระหว่างเส้นใยในซีเมนต์เพสต์ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์เพสต์น้อยหรือไม่มีเลย เนื่องจากเส้นใยสั้นมาก อาจเกิดการหลุดไถลของเส้นใยออกจากเนื้อซีเมนต์เพสต์ และการจัดเรียงเส้นใยแบบกระจายนี้จะทำให้เส้นใยเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนในขณะผสม จึงทำให้แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยมีความต้านแรงดัดต่ำ แต่ถ้าความยาวของเส้นใยกาบหมากในซีเมนต์เพสต์มากกว่าความยาววิกฤต จะมีการถ่ายแรงระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์เพสต์ตลอดความยาวของเส้นใยจนถึงสิ้นสุดที่ปลายของเส้นใย จึงทำให้ความต้านแรงดัดมีค่ามาก และ ค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่เป็นเส้นใย ต่อเนื่อง สานเป็นแผ่น มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.20 เมกะพาสคัล เนื่องจากมีการเรียงตัวของเส้นใยที่เป็นระเบียบ และสามารถกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นซีเมนต์เพสต์เป็นเหตุให้ปริมาณช่องว่างในแผ่นซีเมนต์ลดลง ดังนั้นความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดต่อความยาวของเส้นใย

ในส่วนที่สองศึกษาอัตราส่วนผสมของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่มีผลต่อค่าความต้านแรงดัด โดยใช้ เส้นใยต่อเนื่องสานเป็นแผ่นที่ได้จากส่วนหนึ่งมาผสมซีเมนต์เพสต์ กดอัดด้วยความดันขึ้นรูปเป็นแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและทำการทดสอบหาค่าความต้านแรงดัด ในภาพที่ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยกาบหมาก ค่าความต้านแรงดัดจะเพิ่มขึ้นจนถึงเส้นใยปริมาณหนึ่งที่ทำให้ค่าความต้านแรงดัดลดลง เนื่องจากปริมาณเส้นใยโดยปริมาตรที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรก เส้นใยยังมีปริมาณน้อยทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ยังสามารถครอบคลุมเส้นใยโดยรอบได้ทั้งหมดในปริมาณที่มาก ทำให้การรับกำลังเกือบทั้งหมดอยู่ที่ซีเมนต์เพสต์ซึ่งซีเมนต์เพสต์มี

ความสามารถในการต้านแรงดัดได้น้อย ดังนั้นความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยจึงน้อยลงไปด้วยและเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มจนมีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมแล้วแรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยและซีเมนต์เพสต์จะยึดเกาะกันดี ทำให้ทั้งเส้นใยและซีเมนต์เพสต์ช่วยกันรับกำลัง จึงมีค่าความต้านแรงดัดที่สูง ในทางกลับกันปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ไม่สามารถจะครอบคลุมเส้นใยได้ทั้งหมด เมื่อทำการทดสอบเส้นใยที่ไม่ถูกซีเมนต์เพสต์ครอบจะถูกรบกวนกระทำก่อนทำให้เกิดการฉีกขาดของเส้นใยและถ่ายแรงไปยังเส้นใยที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการแตกร้าวจึงรับกำลังได้น้อยลง ในด้านอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์พบว่าปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นแต่ก็ไม่เสมอไป เนื่องจากในการผสมและขึ้นรูปมีการกวดอัดด้วยความดันทำให้ปริมาณน้ำปูนซีเมนต์ลดลง และการมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากจะทำให้การผสมรวมกันระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์เพสต์รวมกันได้ดี ซีเมนต์เพสต์สามารถแทรกเข้าไปในเส้นใยได้อย่างทั่วถึง เมื่อทำการกวดอัดจะเกิดโพรงช่องว่างระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์เพสต์น้อย ทำให้ค่าความต้านแรงดัดมีค่าสูง ดังนั้นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 และปริมาณเส้นใย 8% โดยปริมาตร เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ให้ค่าความต้านแรงดัดมากที่สุด



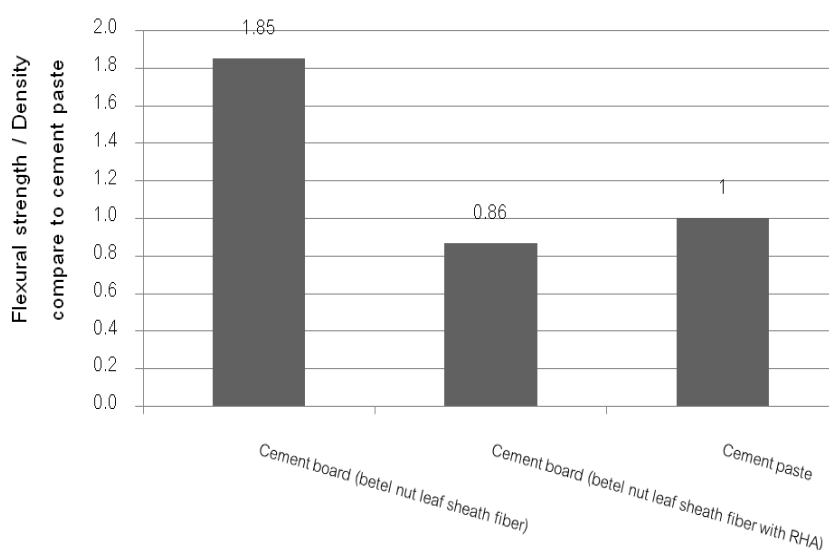
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดกับปริมาณเส้นใยโดยปริมาตร

เมื่อได้ขนาดความยาว การจัดเรียงตัวของเส้นใยและอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมแล้วนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากอีกครั้ง โดยแบ่งเป็นสองลักษณะคือแบบแรกเป็นแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก แบบที่สองเป็นแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่ผสมแก้าเกลือ เนื่องจากการมีสภาพต่างในอนุภาคน้ำในซีเมนต์เพสต์ ซึ่งจะละลายสารบางอย่างของเส้นใยทำให้เกิดการเน่าเปื่อยและสูญเสียความสามารถของเส้นใย ซึ่งวิธีที่จะขัดขวางการเกิด

สภาพต่างทำได้โดยแทนที่ปริมาณซีเมนต์โดย ซิลิกาฟุ่ม 45% แต่ในด้านการลดต้นทุนการผลิตและสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่นจะใช้เถ้าแกลบแทนซิลิกาฟุ่มได้ เถ้าแกลบมีคุณสมบัติลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้ต่ำลง โดยแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ30ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ในตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.5 พบว่าแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากให้ค่าความต้านแรงดัดต่อความหนาแน่นสูงที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่ผสมเถ้าแกลบและซีเมนต์เพสต์ แสดงให้เห็นว่าการผสมเส้นใยกาบหมากในซีเมนต์เพสต์สามารถช่วยเพิ่มความต้านแรงดัดให้กับแผ่นซีเมนต์เพสต์ได้

ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเถ้าแกลบ

Flexural strength (MPa)	Cement paste	Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber	Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber and rice husk ash
		5.6	8.48

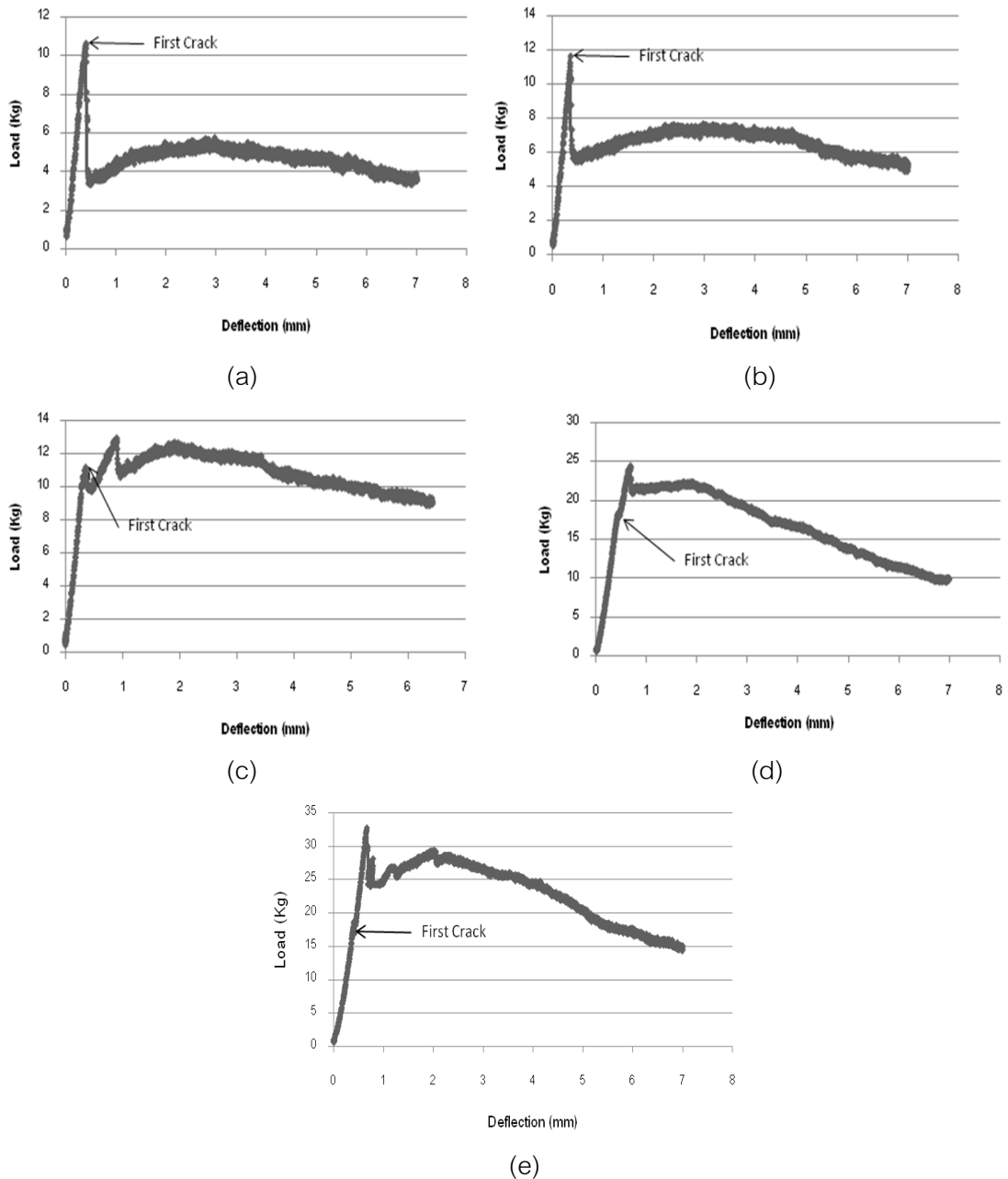


ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดัดต่อความหนาแน่นเทียบกับซีเมนต์เพสต์

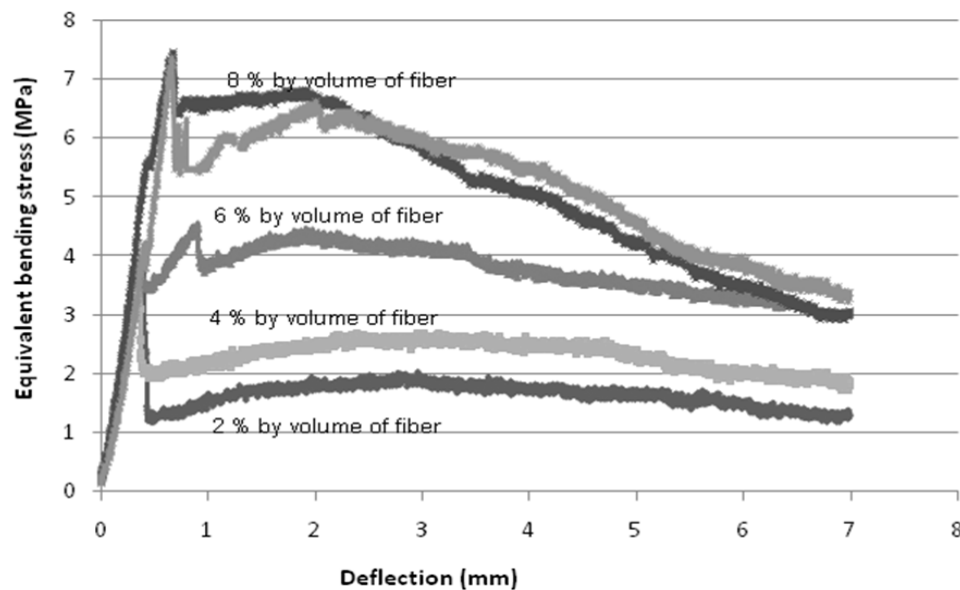
4.2.2 การทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่น

การทดสอบหาค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากทดสอบ โดยใช้ค่าแรงกดที่กระทำต่อแผ่นก่อนที่แผ่นจะเกิดการแตกหัก และค่าระยะการแอ่นตัวของแผ่นก่อนแผ่นเกิดการแตกหักเช่นเดียวกัน ในภาพที่ 4.6 แสดงค่าการรับน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวของแผ่นที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 และทำการเปลี่ยนปริมาณเส้นใยเป็น 2%, 4%, 6% , 8% และ 9% โดยปริมาตรของเส้นใยกาบหมาก จะสังเกตว่าการเกิดรอยแตกร้าวแรกในแผ่น ซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ ที่เท่ากันแต่ปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกัน จะเกิดที่แรงกระทำใกล้เคียงกันคือประมาณ 12-17 กิโลกรัม ซึ่งรอยแตกร้าวแรกที่เกิดขึ้นนั้น จะขึ้นอยู่กับซีเมนต์เพสต์ที่ครอบคลุมเส้นใยไว้ เมื่อแผ่นได้รับแรงกระทำจะทำให้ด้านบนของแผ่นต้องรับแรงอัดส่วนด้านล่างของแผ่นต้องรับแรงดึงและเกิดการแตกร้าว ซีเมนต์เพสต์สามารถรับแรงดึงได้ 1/10 เท่าของกำลังรับแรงอัด จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 สามารถคำนวณเป็นกำลังรับแรงดึงได้ 45.94 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และจะต้องเกิดรอยแตกร้าวแรกที่แรงกระทำ 12.82 กิโลกรัม ซึ่งก็ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยที่ปริมาณเส้นใย 2%, 4%, 6%, 8%, 9% โดยปริมาตร เกิดรอยแตกร้าวแรกเมื่อรับแรงกระทำที่ 11, 12, 11, 17, 17 กิโลกรัม และพบว่าที่ปริมาณเส้นใย 2%และ 4%โดยปริมาตร แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากจะสามารถรับแรงกระทำสูงสุดที่การเกิดรอยแตกร้าวแรกหลังจากนั้นการรับกำลังจะตกลงอย่างรวดเร็วถึงระดับหนึ่งแต่ยังสามารถรับแรงกระทำต่อได้อีก ซึ่งที่ปริมาณเส้นใย 4% จะสามารถรับแรงกระทำหลังจากการรอยร้าวแรกได้มากกว่าปริมาณเส้นใย 2% และที่ปริมาณเส้นใย 6% , 8%, 9% โดยปริมาตร จะมีพฤติกรรมหลังจากเกิดการแตกร้าว แรกได้ดีขึ้นมาก และยังสามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นอีกด้วย หลังจากเกิดการแตกร้าวแรก (First Crack) กำลังที่รับได้นั้นตกลงแต่ไม่ถึงศูนย์ แผ่นไม่ขาดออกจากกัน และสามารถพัฒนากำลังขึ้นต่อไปได้อีกมากโดยจะสังเกตได้จากกราฟที่ยาวออกไป โดยที่ค่าการแอ่นเพิ่มมากขึ้นไปเรื่อยๆ แต่วัสดุก็ไม่แยกออกจากกัน จะพบว่าปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นภายใต้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เท่ากันจะทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำหลังจากที่แผ่นเกิดรอยแตกร้าวแล้วเพิ่มสูงขึ้นจนกว่าปริมาณเส้นใยที่ผสมในแผ่นมากเกินกว่าที่ซีเมนต์เพสต์จะครอบคลุมเส้นใยทั้งหมด ซึ่งจะทำให้แผ่นรับแรงกระทำได้น้อย ในภาพที่ 4.6 (d)และ(e) คือมีปริมาณเส้นใยที่ 8% และ9% โดยปริมาตร จากกราฟระยะรอยร้าวแรกอยู่ในช่วงความชันแรกของเส้นกราฟซึ่งแทบจะมองไม่เห็นเนื่องจากปริมาณเส้นใยจำนวนมากที่ผสมในแผ่นทำให้สามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่เกิดรอยร้าวแรก และเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นจะมีค่าลดลง เนื่องจากการส่งผ่านความเค้นจากซีเมนต์เพสต์ไปสู่เส้นใย และเส้นใยส่งผ่านความเค้นไปเรื่อยๆจนสุดที่ปลายของเส้น

โย การลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณเส้นใยมากจะทำให้แผ่นมีความเหนียว ไม่แตกหัก ไม่พังง่าย ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณเส้นใยน้อย แผ่นจะมีคุณลักษณะที่เปราะ แตกหักง่าย ไม่มีความเหนียว และในภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดเทียบกับระยะแอ่นตัวของแผ่นที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.4

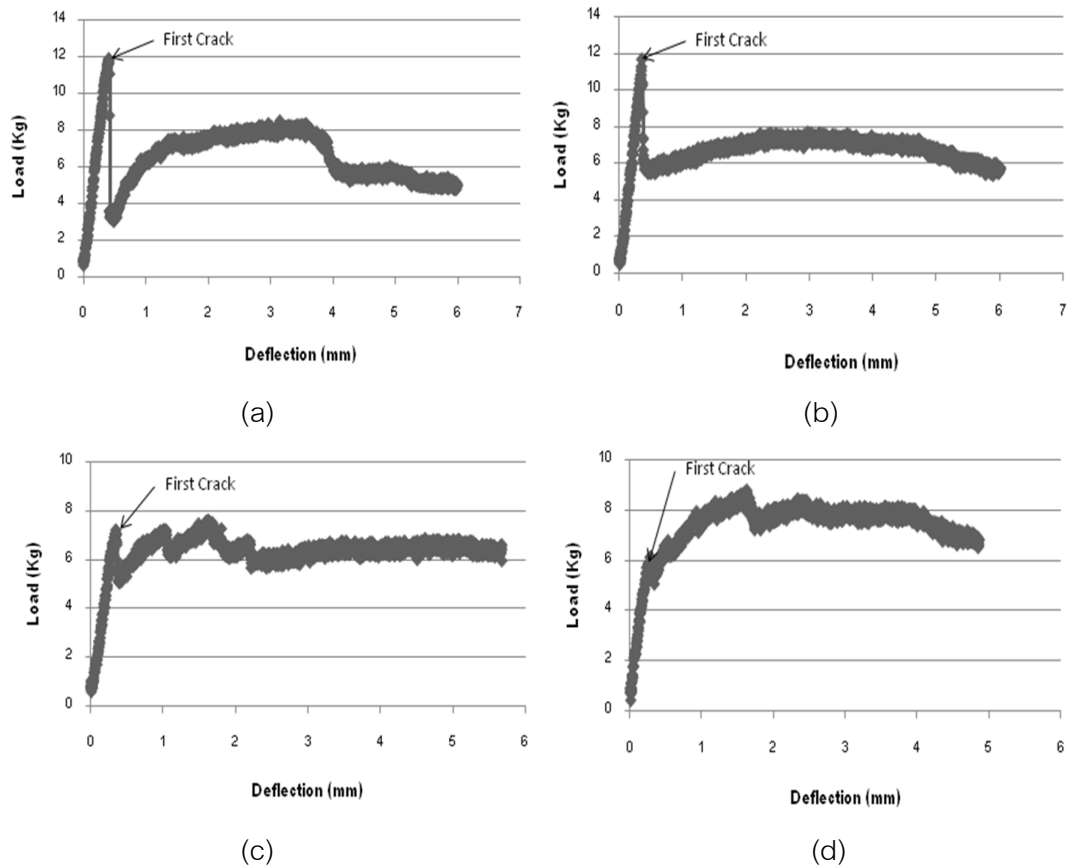


ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวของแผ่นที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 (a) ปริมาณเส้นใย 2%โดยปริมาตร, (b) ปริมาณเส้นใย 4%โดยปริมาตร, (c) ปริมาณเส้นใย 6%โดยปริมาตร, (d) ปริมาณเส้นใย 8%โดยปริมาตร, (e) ปริมาณเส้นใย 9%โดยปริมาตร

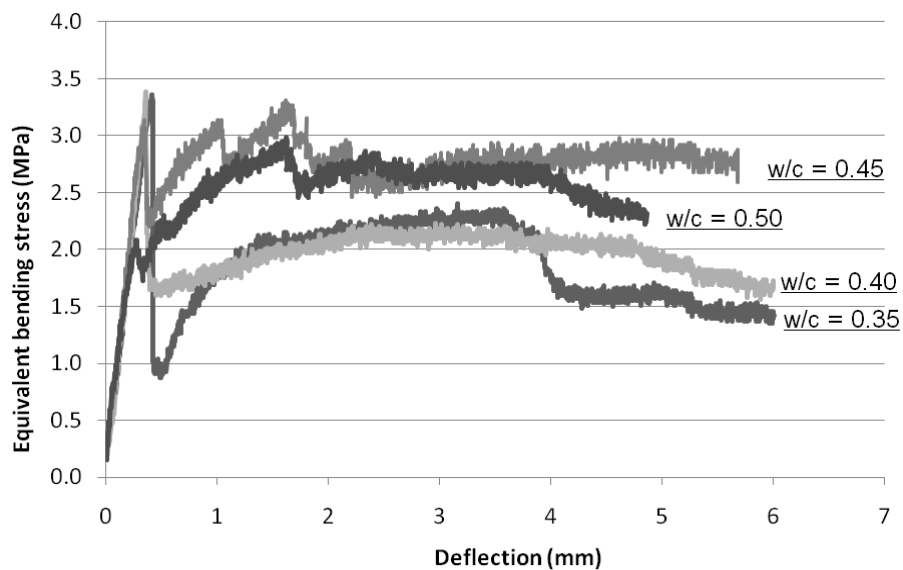


ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดเทียบกับระยะแอ่นตัวของแผ่นที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.4

ในภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9 แสดงค่าการรับน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวของแผ่นที่ปริมาณเส้นใย 4% โดยปริมาตร และเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ เป็น 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 จะสังเกตว่ากำลังการรับแรงกระทำที่รอยแตกแรกค่อนข้างต่างกัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.35 และ 0.40 มีค่าการรับแรงกระทำที่รอยแตกแรกที่ประมาณ 12 กิโลกรัม ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 และ 0.50 มีค่ารับแรงกระทำประมาณ 7 และ 6 กิโลกรัมตามลำดับ คือเมื่อมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มากขึ้นค่าการรับแรงกระทำที่รอยร้าวแรกก็จะมีค่าน้อยลง เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากขึ้นการรับกำลังแรงอัดและแรงดึงน้อยลงทำให้การรับแรงกระทำที่รอยร้าวแรกมีค่าน้อยลงไปด้วยซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาค่าการรับแรงกระทำที่รอยแตกแรกจากกำลังการรับแรงดึงพบว่าที่ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ เป็น 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 จะต้องมีการรับแรงกระทำที่ 13.75, 12.82, 9.49 และ 8.15 กิโลกรัมตามลำดับ ซึ่งก็มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยหลังจากเกิดการแตกร้าว แรก แผ่นยังสามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นอีก ซึ่งที่ปริมาณเส้นใยเท่ากันการรับแรงกระทำหลังการแตกร้าวจะสามารถรับได้ใกล้เคียงกัน และที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยจะมีความอดุลย์ยืดหยุ่นที่สูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มาก ซึ่งเป็นไปตามปกติที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยจะรับกำลังได้มากกว่าแต่มีคุณสมบัติที่เปราะกว่า

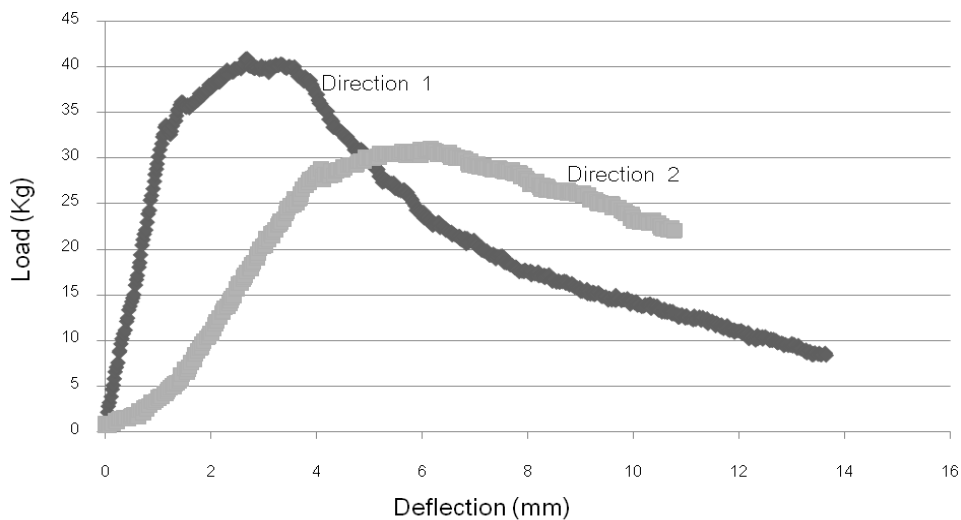


ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวของแผ่นที่ปริมาณเส้นใย 4% โดยปริมาตร (a) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.35, (b) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.40, (c) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.45, (d) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.50



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดเทียบกับระยะแอ่นตัวของแผ่นที่ปริมาณเส้นใย 4%โดยปริมาตร

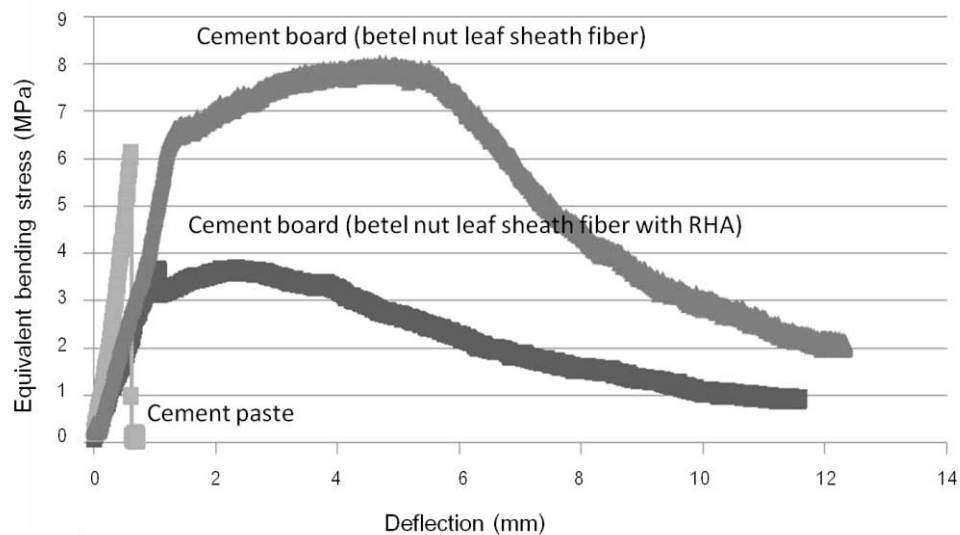
ในภาพที่ 4.10 เป็นการทดสอบค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นที่รับแรงกระทำในด้านที่หนึ่ง จนแผ่นแตกหักออกจากกันเป็น 2 ชิ้นส่วน จากนั้นนำแผ่นมาประกอบกลับให้เป็นแผ่นเช่นเดิมแล้วนำไปทดสอบรับแรงกระทำอีกครั้งในแนวตั้งฉากกันกับการทดสอบครั้งแรกจะพบว่าค่ามอดุลัสที่ทดสอบทั้งสองครั้งมีความแตกต่างกันมาก ในการทดสอบครั้งแรกจะให้ความมอดุลัสที่มากกว่าการทดสอบในครั้งที่สอง เนื่องจากแผ่นเกิดความเสียหายแล้ว



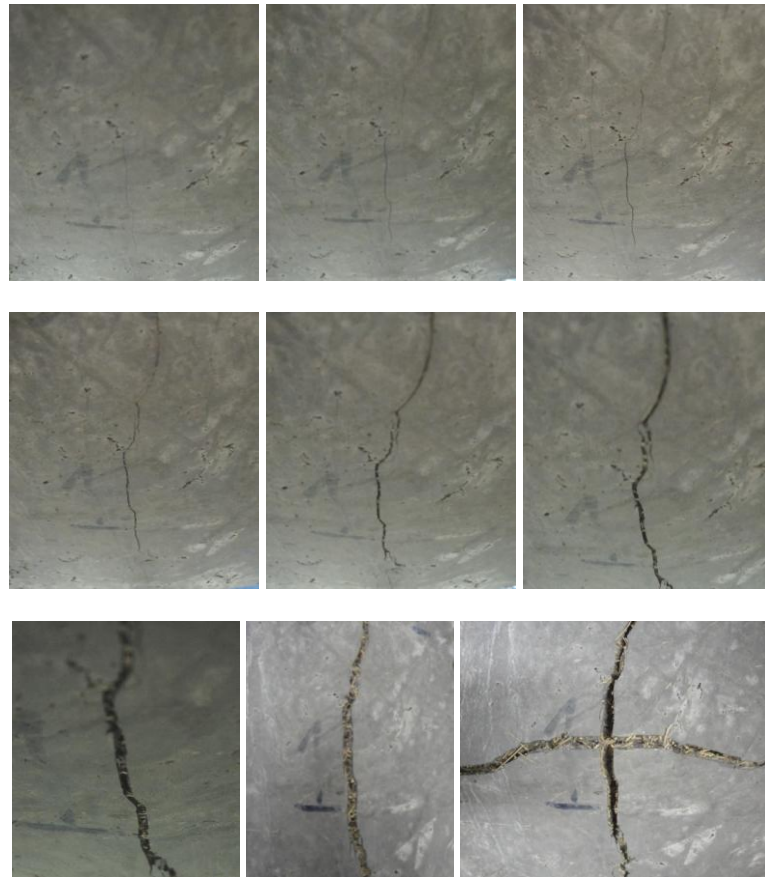
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับระยะแอ่นตัวของแผ่นในทิศทางแรงกระทำที่ 1 และทิศทางแรงกระทำที่ 2

มอดุลัสความยืดหยุ่นเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงของวัสดุในการที่จะต้านทานต่อการบิดรูปหรือเสี้ยวรูปและมีค่าคงที่ในวัสดุแต่ละชนิด จากภาพที่ 4.11 จะเห็นว่าความชันของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่มีและไม่มีแก้วกลบมีความชันที่น้อยกว่าแผ่นซีเมนต์เพสต์ แสดงว่ามีความยืดหยุ่นมากกว่าจึงทำให้ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ การที่ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์เป็นผลมาจากการผสมเส้นใยกาบหมากเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากความเค้นยึดเหนี่ยวที่ผิวระหว่างเนื้อซีเมนต์เพสต์กับตัวเส้นใยมีการส่งผ่านความเค้นซึ่งกันและกันทำให้เมื่อแผ่นได้รับแรงกระทำจะมีการส่งผ่านความเค้นจากเนื้อซีเมนต์ไปยังตัวเส้นใย ซึ่งเส้นใยก็จะส่งผ่านความเค้นซึ่งกันและกัน มีการยึดเหนี่ยวกันระหว่างโมเลกุลของเส้นใยโดยเฉพาะเส้นใยที่มีไซโมเลกุลยาวมาก หรือการจัดเรียงโมเลกุลที่เป็นระเบียบ แผ่นจึงมีระยะการแอ่นตัวที่มากกว่าดัง แสดงในภาพที่ 4.12 และเมื่อแผ่นรับแรงกระทำจนถึงจุดประลัยแผ่นยังคงสภาพเป็นชิ้นเดียวไม่แยกออกจากกัน ยังคงมีการยึดรั้งระหว่างเส้นใยอยู่ ทำให้แผ่นมีความเหนียว สามารถรับแรงกระทำได้อีกและมีระยะการแอ่นตัวที่สูง

ซึ่งแตกต่างจากแผ่นซีเมนต์เฟสท์ที่เมื่อได้รับแรงกระทำสูงสุดแผ่นจะแตกหักแยกออกจากกันเป็นสองส่วนทันทีและไม่สามารถรับแรงกระทำต่อได้อีก คัล ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมการแตกหักที่เกิดในวัสดุผสม คือเกิดการขยายตัวของรอยร้าวในระยะสั้นๆ สลับกับหยุดนิ่งก่อนการแตกหักสุดท้าย ซึ่งรอยร้าวแรกสามารถขยายตัวในซีเมนต์เฟสท์ในระยะสั้นๆ จะหยุดเมื่อขยายตัวถึงเส้นใยและเมื่อรอยร้าวเพิ่มขึ้นมากพอ รอยร้าวจะขยายตัวตัดผ่านเส้นใยเข้าสู่ซีเมนต์เฟสท์หลักได้อีก โดยแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก มีกำลังดัดเทียบเท่า และความเหนียว เพิ่มขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นซีเมนต์เฟสท์ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากมีพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว (Ductile failure) ในขณะที่แผ่นซีเมนต์เฟสท์จะเกิดการวิบัติและลักษณะการวิบัติแบบทันทีทันใด (Brittle failure) ดังนั้นเส้นใยธรรมชาติจึงมีอิทธิพลต่อกำลังดัดและความเหนียวของแผ่นซีเมนต์เฟสท์ โดยจะช่วยเพิ่มกำลังดัด และความเหนียว และเปลี่ยนแปลงลักษณะการวิบัติ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากมีค่าอยู่ในช่วง 3500-3800 เมกะพาสคัล แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเถ้าแกลบมีค่า 2800-2900 เมกะพาสคัล และซีเมนต์เฟสท์มีค่า 16000 เมกะพาสคัล



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดเทียบเท่ากับระยะแอ่นตัวของแผ่น



ภาพที่ 4.12 การแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก

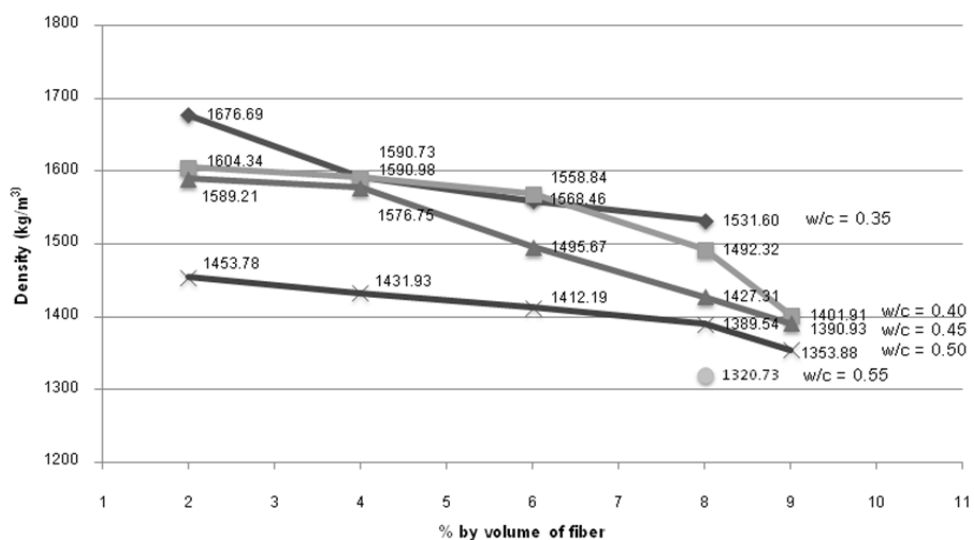
มอดูลัสรีซีเลียนซ์ (Resilience) คือพลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรในการที่จะออกแรงทำให้วัสดุแปรเปลี่ยนรูป (แบบยืดหยุ่น) จากสภาพที่ไม่มีแรงกระทำไปจนถึงจุดที่เกิดการคราก แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากมีค่ามอดูลัสรีซีเลียนซ์ 0.174 นิวตัน-เมตร แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเถ้าแกลบมีค่า 0.108 นิวตัน-เมตร และซีเมนต์เพสต์มีค่า 0.083 นิวตัน-เมตร ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าค่ามอดูลัสรีซีเลียนซ์ของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่มีและไม่มีเถ้าแกลบมีค่ามากกว่าแผ่นซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากเป็นวัสดุที่ยืดหยุ่นได้ดี คือมีค่าความเค้นจุดครากสูงและมีมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำ

มอดูลัสความแกร่ง (Toughness) จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้จนทำให้เกิดการแตกหัก โดยทั่วไปวัสดุเหนียวมีความแกร่งสูง กว่าวัสดุเปราะซึ่งสามารถดูดซับพลังงานได้สูงก่อนแตก แผ่น ซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก มีค่ามอดูลัสความแกร่ง 3.084 นิวตัน-เมตร แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเถ้าแกลบมีค่า 1.790 นิวตัน-เมตร และซีเมนต์เพสต์มีค่า 0.083 นิวตัน-เมตร

การวัดค่าความเหนียวสามารถวัดได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ Complete Load-Deflection Curve in Flexure ค่าที่ได้คือค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทำให้คอนกรีตแตกหักหรือเรียกว่าการดูดซับพลังงาน มาตรฐานการวัดค่าความเหนียวอ้างอิงจาก ASTM C 1018 โดยเป็นค่าดัชนีความเหนียว (พื้นที่ใต้กราฟที่ค่า Deflection ของจุดที่พิจารณา นั้นเป็นก็เท่าของพื้นที่ใต้กราฟที่เกิด First Crack) ค่าดัชนีความเหนียว (Toughness Index) ของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก I5, I10 และ I20 มีค่า 6.80, 15.32 และ 17.72 ตามลำดับ จะเห็นว่าเส้นใยมีผลทำให้ซีเมนต์เพสต์มีค่าความเหนียวและดูดซับพลังงานดีขึ้นเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ธรรมดา สำหรับค่าที่เพิ่มขึ้นนั้นเริ่มตั้งแต่หลังการแตกร้าวครั้งแรกกำลังจะตกลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่าการรับกำลังจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยเริ่มยึดตัวออกเล็กน้อยจึงเกิดแรงยึดเหนี่ยวประสานของเส้นใยบริเวณที่เกิดรอยร้าวมีผลทำให้ทั้งกำลัง และการดูดซับพลังงานเพิ่มมากขึ้น

4.2.3 ความหนาแน่นปรากฏ

การนำเส้นใยกาบหมากมาผสมในซีเมนต์เพสต์ซึ่งเส้นใยมีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ เมื่อนำเส้นใยมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนโดยปริมาตรคงที่แล้วจะทำให้มีความหนาแน่นที่ลดลง ดังนั้นแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่ขึ้นรูปโดยการควบคุมปริมาตรเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของแผ่น จะมีค่าลดลง เช่นเดียวกับการเพิ่มอัตราส่วนน้ำ ต่อซีเมนต์ จะทำให้แผ่นมีความหนาแน่นลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะทำให้มีปริมาณน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ซึ่งความถ่วงจำเพาะ ของน้ำน้อยกว่าปูนซีเมนต์ แผ่นจึงมีความหนาแน่นต่ำกว่าและมีน้ำหนักเบากว่า ดังภาพที่ 4.13

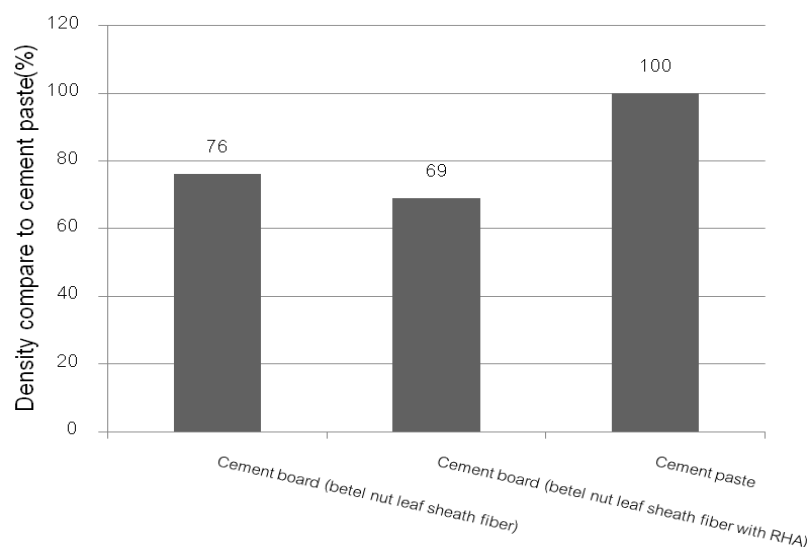


ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณเส้นใย

ในตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.14 แสดงค่าความหนาแน่นของแผ่นโดยใช้อัตราส่วนผสมที่ให้ค่าความต้านแรงดัดมากที่สุด คือปริมาณเส้นใยที่สานเป็นแผ่น 8 % โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 พบว่าความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่มีและไม่มีเถ้าแกลบมีค่าลดลง 18% และ 26% ตามลำดับเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ การผสมเถ้าแกลบในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากจะทำให้ค่าความหนาแน่นลดลงเนื่องจากความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบต่ำกว่าปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเถ้าแกลบ

Density (kg/m ³)	Cement paste	Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber	Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber and rice husk ash
	1845.19	1406.81	1272.32

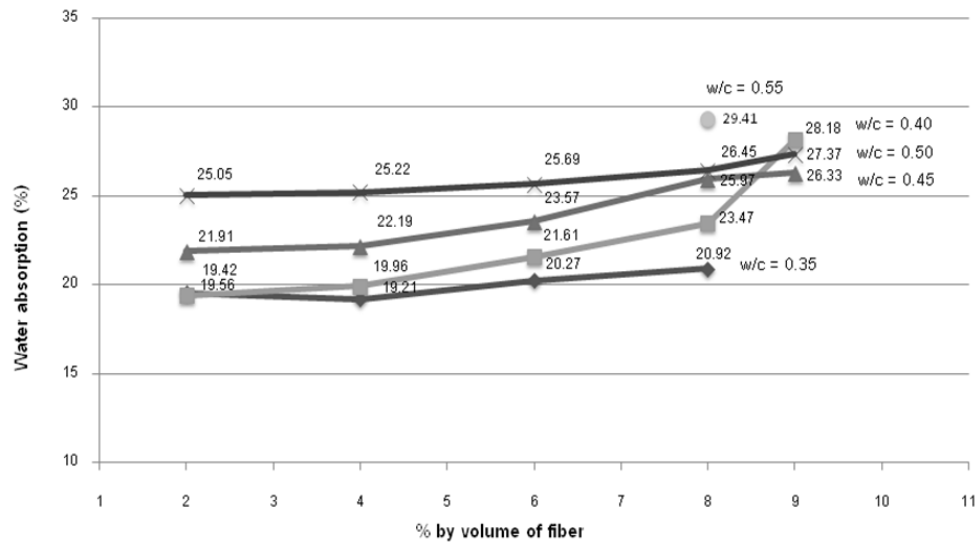


ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเทียบกับซีเมนต์เพสต์

4.2.4 ปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำ

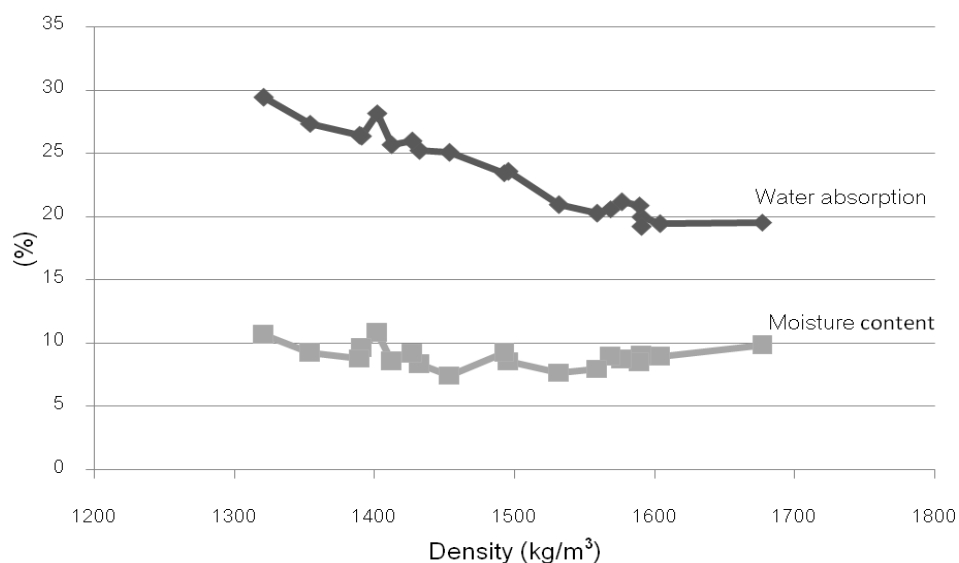
ปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เพสต์เสริมเส้นใย กาบหมากมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเส้นใย เมื่อมีปริมาณเส้นใยมาก ปริมาณความชื้น

และการดูดซึมน้ำจะมีค่ามากตามไปด้วย เนื่องจากเส้นใยมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงทำให้มีการอุ้มน้ำของตัวเส้นใย ดังภาพที่ 4.15 แต่ค่าการดูดซึมน้ำไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากอัตราส่วนผสมของเส้นใยมีปริมาณเพิ่มขึ้นน้อย



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับปริมาณเส้นใย

การดูดซึมน้ำและปริมาณความชื้นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของแผ่นแล้วจะพบว่าเมื่อความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำก็จะลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนปริมาณความชื้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 4.16

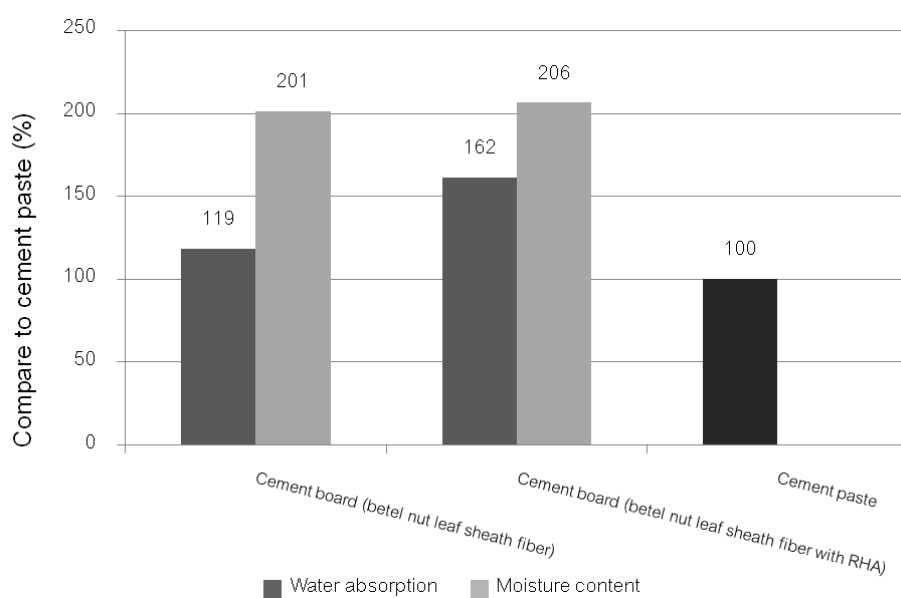


ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณความชื้นเทียบกับความหนาแน่น

จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.17 แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากมีปริมาณความชื้นและค่าการดูดซึมน้ำ สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ 2.01 เท่าและ 1.19 เท่าตามลำดับ และแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเถ้าแกลบมีปริมาณความชื้น และค่าการดูดซึมน้ำ สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ 2.06 เท่าและ 1.62 เท่าตามลำดับ และยิ่งสูงกว่าแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่ไม่ผสมเถ้าแกลบอีก เนื่องจากเถ้าแกลบมีรูพรุนสูง มีรูปร่างไม่แน่นอน ผิวขรุขระ ทำให้เถ้าแกลบดูดซับน้ำไว้ทั้งที่ผิวและภายในอนุภาค จึงมีค่าการดูดซึมน้ำสูง

ตารางที่ 4.6 ค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณความชื้นของแผ่นซีเมนต์ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเถ้าแกลบ

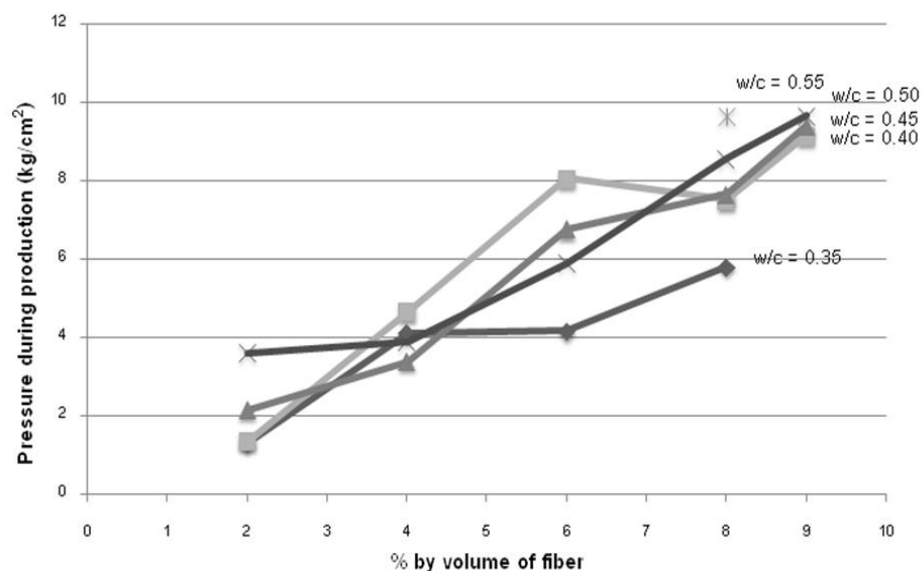
Properties	Cement paste	Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber	Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber and rice husk ash
Water absorption (%)	18.91	22.42	30.54
Moisture content (%)	3.84	7.73	7.93



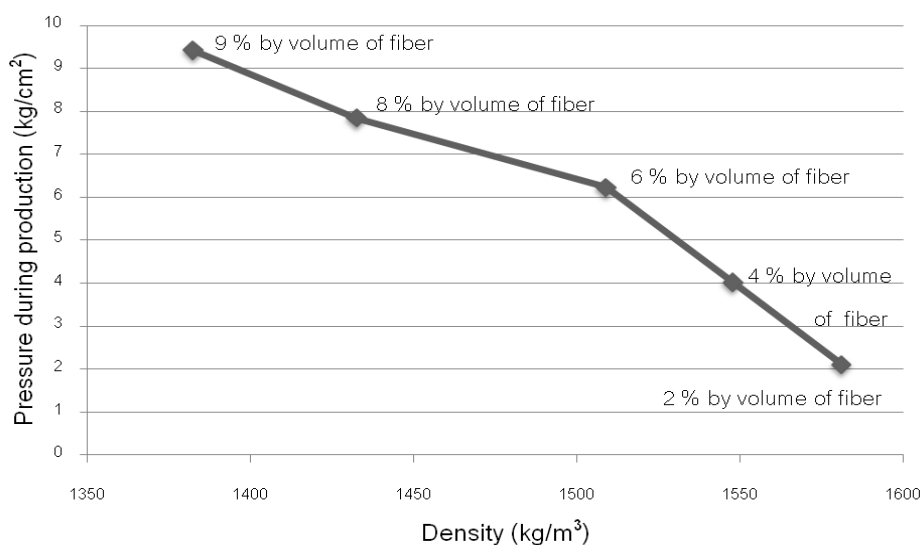
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและปริมาณความชื้นเทียบกับซีเมนต์เพสต์

4.2.5 การศึกษาการขึ้นรูป

การขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยคาบหมากโดยการอัดความดันซึ่งมีการควบคุมปริมาณของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยก่อนและหลังการขึ้นรูปพบว่าความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นที่มีปริมาณเส้นใยต่างกันจะใช้ความดันต่างกัน เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นความดันที่ใช้ในการอัดแผ่นก็มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการอัดความดันจะทำการอัดเส้นใยให้อยู่ในปริมาณที่ต้องการ เส้นใยที่ผสมเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ก่อนกดอัดจะยังมีอากาศแทรกอยู่ เส้นใยยังไม่สามารถเข้าไปในเนื้อซีเมนต์เพสต์ได้อย่างสมบูรณ์ ยังมีการพองตัวของเส้นใย เมื่อทำการกดอัดแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยจะทำให้อากาศที่แทรกอยู่ถูกดันออก ทำให้เส้นใยแทรกไปในเนื้อซีเมนต์เพสต์ได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้แผ่นซีเมนต์แน่นขึ้น ไม่มีหรือมีโพรงหรือรูอากาศภายในน้อยมาก จากภาพที่ 4.18 จะเห็นว่าการกดอัดจะขึ้นอยู่กับการขึ้นรูปเป็นหลัก โดยแทบจะไม่ขึ้นอยู่กับการอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เนื่องจากเส้นใยเป็นของแข็งจำเป็นต้องใช้การกดอัดที่มากกว่าของเหลวอย่างซีเมนต์เพสต์ซึ่งใช้การอัดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในภาพที่ 4.19 จะเห็นว่าเมื่อแผ่นมีความหนาแน่นลดลงเนื่องจากปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจะต้องมีการใช้แรงกดอัดขึ้นรูปที่มากขึ้น เนื่องจากต้องทำการกดอัดให้เส้นใยที่ตามปกติแล้วจะมีการพองตัวและมีอากาศแทรกอยู่ให้เส้นใยมีอัดแน่นเข้าไปในเนื้อซีเมนต์เพสต์ และลดปริมาณช่องว่างในแผ่นให้มีกำลังการรับแรงที่มากขึ้น



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดความดันขึ้นรูปแผ่นกับปริมาณเส้นใย



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดความดันขึ้นรูปแผ่นกับความหนาแน่นแผ่น

4.2.6 ความเป็นกรด/ด่างที่ผิวหน้า

การทดสอบค่าความเป็นกรด/ด่างที่ผิวหน้าของแผ่นซีเมนต์เพสต์เสริมเส้นใยกาบหมากพบว่ามีความค่า pH ประมาณ 10-11.5 ซึ่งค่อนข้างมีความเป็นด่างเช่นเดียวกับซีเมนต์

4.2.7 ความต้านการรั่วซึม

ความต้านทานการรั่วซึมซึ่งทดสอบตามมาตรฐานนั้นปรากฏว่ามีหยดน้ำที่ผิวด้านล่างของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่มีและไม่มีแก้วเกลบดงั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานที่ถูกแสงแดดหรือน้ำโดยตรง

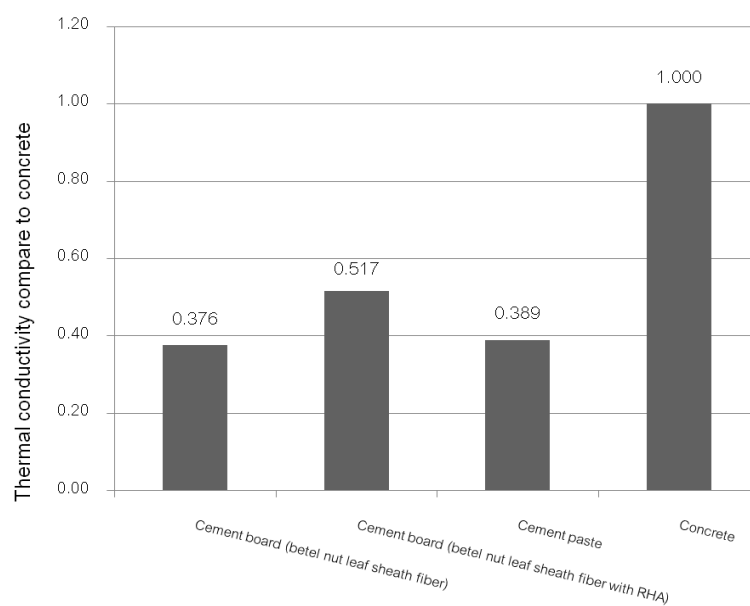
4.2.8 ค่าการนำความร้อน

การทดสอบค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่ผสมและไม่ผสมแก้วเกลบ ซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตตามตารางที่ 4.7 และค่าการนำความร้อนของแผ่นเมื่อเทียบกับคอนกรีตในภาพที่ 4. 20 พบว่าแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยมีค่าการนำความร้อนที่ลดลงจากคอนกรีต และลดลงจากซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมแก้วเกลบก็ยังมีค่าการนำความร้อนน้อยกว่าคอนกรีตแต่มากกว่าซีเมนต์เพสต์เพียงเล็กน้อย โดยปกติจะไม่นิยมนำซีเมนต์เพสต์ไปใช้งานแต่จะใช้คอนกรีตมากกว่า ซึ่งแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากทั้งผสมและไม่ผสมแก้วเกลบจะมีค่าการนำความร้อนลดลงจากคอนกรีต มาก เนื่องจากความพรุนใน

แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก การมีความพรุนมากก็จะทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง ดังนั้น การนำแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากมาใช้แทนคอนกรีตสามารถลดค่าการนำความร้อนได้

ตารางที่ 4.7 ค่าการนำความร้อนของคอนกรีต แผ่นซีเมนต์ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเถ้าแกลบ

Thermal conductivity (W/mK)	Concrete	Cement paste	Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber	Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber and rice husk ash
	1.500	0.584	0.563	0.775



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนเทียบกับคอนกรีต

4.2.9 การทดสอบการเลื่อย การตอก/ถอนตะปูและสกรู

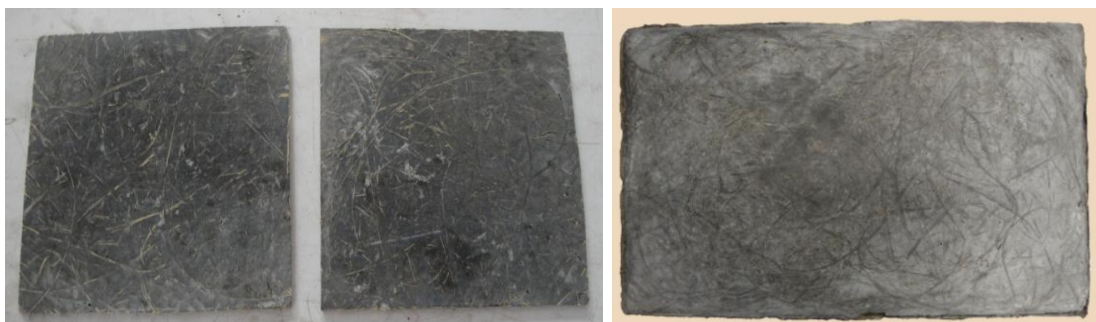
ความสามารถในการเลื่อย ตอก/ถอนตะปูและสกรู ของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากเพื่อการนำไปใช้งาน พบว่าสามารถใช้เลื่อยตัดไม้หรือใช้ใบตัดกระเบื้องตัดแผ่นได้ ทำการตอก/ถอนตะปูไม้ และใช้สกรูหรือตะปูเกลียวได้ ดังภาพที่ 4.21 รวมทั้งสามารถยึดติดกับวัสดุอื่น ๆ ได้



ภาพที่ 4.21 การเลื่อย การตอก/ถอนตะปูและสกรู

4.2.10 การเปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก) ผลิตภัณฑ์แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่ขายตามท้องตลาดและงานวิจัยที่ผ่านมา

แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากดังภาพที่ 4.22 เมื่อเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบหรือ มอก. 1427-2540 ตามตารางที่ 4.8 จะจัดอยู่ในประเภท B ชนิดที่ 2 คือ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่ไม่สามารถถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรงได้ และมีค่าความต้านแรงดัดหรือมอดุลัสแตกหักไม่น้อยกว่า 7 เมกะพาสคัล



ภาพที่ 4.22 แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก

ตารางที่ 4.8 ความต้านแรงดัด ตามมาตรฐาน มอก.

Category	Minimum modulus of rupture (MPa)	
	Type A	Type B
1	-	4
2	-	7
3	7	10
4	13	16
5	18	22

การเปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่ผสมและไม่ผสมเถ้าแกลบ กับผลิตภัณฑ์แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยที่ขายตามท้องตลาด ในตารางที่ 4.9 พบว่าแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่มีเถ้าแกลบและไม่มีเถ้าแกลบมีค่าความต้านแรงดัด ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นที่น้อยกว่าผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาดแต่แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากมีค่าไม่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ขายมากนักซึ่งในด้านการรับกำลังแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากอาจไม่ดีเท่าผลิตภัณฑ์ที่ขายตามท้องตลาด ส่วนความหนาแน่นมีความใกล้เคียงกันมากไม่ต่างไปจากค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณความชื้นของแผ่นมีค่าที่น้อยกว่าเล็กน้อยซึ่งถือว่าอยู่ในระดับเดียวกับผลิตภัณฑ์ที่ขาย ค่าความเป็นกรด/ด่างที่ผิวหน้าก็ใกล้เคียงกัน แต่ค่าการนำความร้อนของแผ่นค่อนข้างจะสูงอยู่มาก การลดความร้อนจึงอาจไม่ค่อยดีนัก โดยค่าการทดสอบทั้งหมดนี้มีทั้งที่อยู่ในระดับเดียวกับผลิตภัณฑ์ที่ขายตามท้องตลาดและบางการทดสอบที่สูงหรือน้อยกว่าทั้งนี้เนื่องมาจากการผลิตแผ่นเสริมเส้นใยกาบหมากใช้วิธีการผลิตที่ค่อนข้างง่ายขึ้นรูปโดยการใช้ความดันแบบธรรมดา มีส่วนผสมที่สามารถหาได้ง่ายตามท้องถิ่น ไม่มีสารเคมีหรือสารผสมเพิ่มอื่นๆ ทำให้ค่าที่ได้จากการทดสอบบางการทดสอบมีค่าที่ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ขายตามท้องตลาดซึ่งมีเครื่องมือในการผลิตที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีสารผสมเพิ่มอื่นๆเข้ามาช่วยให้ผลิตภัณฑ์ดีขึ้น

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากกับผลิตภัณฑ์ที่ขายตามท้องตลาด

Properties	Flexural Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (MPa)	Density (Kg/m ³)	Water Absorption (%)	Moisture Content (%)	pH-Value	Thermal conductivity (W/mK)
Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber	8.48	3500-3800	1406	22.42	7.73	11.5	0.563
Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber and rice husk ash	3.58	2800-2900	1272	30.54	7.93	10	0.775
Commercial A	11.5	8220	1410	29.55	10.81	-	0.599
Commercial B	16.44	8900	1390	28.88	5.7	-	0.511
Commercial C	17.5	4500	1260	34	14	7	0.505
Commercial D	11-15	5000-8000	1200	30	5	9	0.184
Commercial E	>7	5000-5500	1300-1350	<35	<12	7-8	0.150
Commercial F	12	4500	1300	-	9-15	12	0.100
Commercial G	12-16	7500-9500	1300	30	3	7-10	0.220
Commercial H	10	-	1200	-	-	8-9	0.210

งานวิจัยเกี่ยวกับการนำเส้นใยธรรมชาติมาผสมในซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ หรือ คอนกรีต มีการนำเสนองานวิจัยประเภทนี้อยู่จำนวนมากและระยะเวลาที่ผ่านไปพอสมควรแล้ว ซึ่งได้มีการเปลี่ยนชนิด รูปร่าง ขนาดของเส้นใยอยู่เสมอ รวมทั้งมีการผสมสารอื่นๆเพิ่มเติมลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงได้นำงานวิจัยที่ผ่านมาโดยใช้เส้นใยในแต่ละชนิดมารวบรวมสรุปไว้ในตารางที่ 4.10 รวมทั้งแสดงค่าคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากในงานวิจัยนี้ด้วย เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้เส้นใยกาบหมากเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยโดย การนำมาสรุปรวมนี้เป็นการนำเสนอเส้นใยกาบหมาก ซึ่งเป็นเส้นใยใหม่ที่ยังไม่เคยมีการนำเส้นใยกาบหมากนี้มาผสมในซีเมนต์เพสต์ ซึ่งไม่สามารถที่จะนำคุณสมบัติมาเปรียบเทียบกันได้เนื่องจากการมีขนาดของชิ้นตัวอย่างที่ไม่เท่ากัน การทดสอบที่ใช้มาตรฐานต่างกันรวมถึงคุณสมบัติของเส้นใย และปริมาณเส้นใยที่ผสมในชิ้นทดสอบต่างกัน เมื่อสังเกตคุณสมบัติต่างๆของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติพบว่า แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากมีความต้านแรงดัดที่ค่อนข้างสูง และใกล้เคียงกับเส้นใยบางชนิด เช่น ป่านศรนารายณ์ ปอแก้วเยื่อกระดาษ แต่ยังมีน้อยกว่าเส้นใยกล้วย มะพร้าวและด้ายซึ่งมีค่าสูงมาก ส่วนค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากมีค่าค่อนข้างน้อย และความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากมีค่าที่ต่ำมาก ต่ำกว่าเส้นใยทุกชนิด ค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณความชื้นมีค่าใกล้เคียงกับเส้นใยชนิดอื่นๆ เนื่องจากเป็นเส้นใยธรรมชาติเหมือนกันจึงมีค่าใกล้เคียงกัน ปัจจัยหนึ่งของคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย ดังนั้นแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบแผนส่งเสริมเส้นใยจากหมากกับงานวิจัยที่ผ่านมา

คุณสมบัติ	แผนส่งเสริมเส้นใย ส่งเสริมเส้นใย กาบหมาก	แผนส่งเสริมเส้นใย เส้นใยจากหมาก ผสมเก้าแกลบ	การศึกษาคูณสมบัติของซีเมนต์ผสมเส้นใย				คุณสมบัติทาง กลศาสตร์ของมอดาร์ เสริมเส้นใยสอยดาว
			ค่าย	ปานศรณรายณ์	บ่อแก้ว	เยื่อกระดาษ	
ชนิดของเส้นใย	กาบหมาก	กาบหมาก					สอยดาว
ความต้านแรงตัด (เมกะพาสคัล)	8.48	3.58	11.97	8.30	8.66	8.61	3.09
มอดุลัสยืดหยุ่น (เมกะพาสคัล)	3500-3800	2800-2900	3500	2190	2510	3644	8034
ความหนาแน่น(กิโลกรัม ต่อลูกบาศก์เมตร)	1406.81	1272.32	2012.99	1736.36	1736.97	1975.09	-
การดูดซึมน้ำ (%)	22.42	30.54	22.54	26.60	28.21	11.41	18.65
ปริมาณความชื้น (%)	7.73	7.93	14.27	18.94	20.51	10.31	8.65
ค่าการนำความร้อน (วัตต์ ต่อมิลลิเคลวิน)	0.563	0.775	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ต่อ)

คุณสมบัติ	คุณสมบัติของ ซีเมนต์ผสมเส้นใย ไมยราบยักษ์	การพัฒนาแผ่น ซีเมนต์มวลเบาเส้น ใยมะพร้าว	คุณสมบัติทางกลของ มอร์ตาร์เสริมเส้นใย ป่านศรนารายณ์	แผ่นมอร์ตาร์ เสริมเส้นใยใผ่	การพัฒนาคอนกรีต บดออกมาจาก ฟางข้าว	การประยุกต์ใช้เส้น ใยผักตบชวาใน แผ่นหลังคา
ชนิดของเส้นใย	ไมยราบยักษ์	มะพร้าว	ป่านศรนารายณ์	ใผ่	ฟางข้าว	ผักตบชวา
ความต้านแรงดึง (เมกะพาสคัล)	4.22	19.94	2.22	0.12	3.68	5.60
มอดุลลัสยืดหยุ่น (เมกะพาสคัล)	-	5315	-	-	-	9500
ความหนาแน่น(กิโลกรัม ต่อลูกบาศก์เมตร)	1765.00	1040.00	2150.00	-	1591.00	2180.00
การดูดซึมน้ำ (%)	-	19.65	17.20	45.41	19.84	2.82
ปริมาณความชื้น (%)	15.00	9.13	4.80	10.39	-	1.77
ค่าการนำความร้อน (วัตต์ ต่อมิลลิเคลวิน)	-	0.400	-	-	-	-

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ต่อ)

คุณสมบัติ	การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ กาบมะพร้าวและเปลือกเมล็ดปาล์มแทนมวลรวมหยาบ		การพัฒนาผนังซีเมนต์เส้นใยพืช สำหรับอาคารไม่ปรับอากาศ	คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยกัญชง	การพัฒนาวัสดุผสมซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติจากขนสัตว์			
	กาบมะพร้าว	เปลือกเมล็ดปาล์ม	กล้วย	กัญชง	เส้นใยผม	เส้นใยขนสุกร	เส้นใยขนกระบือ	เส้นใยขนสุนัข
ความต้านแรงดัด (เมกะพาสคัล)	-	-	11.38	5.09	5.49	5.69	5.79	5.69
มอดุลัสยืดหยุ่น (เมกะพาสคัล)	-	-	4380	-	-	-	-	-
ความหนาแน่น(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1760.00	1630.00	1232.00	2200.00	-	-	-	-
การดูดซึมน้ำ (%)	13.10	10.41	24.22	0.83	-	-	-	-
ปริมาณความชื้น (%)	-	-	6.59	-	-	-	-	-
ค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อมิลลิเคลวิน)	-	-	0.298	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ต่อ)

คุณสมบัติ	การศึกษาการนำเส้นใยปอแก้วมาใช้ งานคอนกรีต	การศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของ วัสดุซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยมะพร้าว
ชนิดของเส้นใย	ปอแก้ว	มะพร้าว
ความต้านแรงดัด (เมกะพาสคัล)	4.72	8.34
มอดุลัสยืดหยุ่น (เมกะพาสคัล)	-	-
ความหนาแน่น(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	-	2000.00
การดูดซึมน้ำ (%)	-	2.54
ปริมาณความชื้น (%)	-	-
ค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อมิลลิเคลวิน)	-	-

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนที่แสดงไว้ในบทที่ 3 และผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลในบทที่ 4 นำมาสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการทดสอบเพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของเส้นใยและหาอัตราส่วนผสมที่มีคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพที่ดีที่สุดในการขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยพบว่าเส้นใยในลักษณะสานขึ้นรูปเป็นแผ่น ในปริมาณ 8% โดยปริมาตร และมีอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ให้ค่าความต้านแรงดัดมากที่สุด
2. แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมามีค่าความต้านแรงดัด 8.48 เมกะพาสคัล มอดุลัสยืดหยุ่น 3500-3800 เมกะพาสคัล มอดุลัสความแกร่ง 3.084 นิวตัน-เมตร และมอดุลัสรีซีลีเยนซ์ 0.174 นิวตัน-เมตร ซึ่งมีการรับกำลังและมีความเหนียวที่มากกว่าแผ่นซีเมนต์เพสต์ ทำให้แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากใช้งานได้หลากหลาย
3. การนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยมีค่า 0.563 W/mK ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตและซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นการนำแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมามาใช้แทนคอนกรีตสามารถลดค่าการนำความร้อนได้
4. ความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมามีค่าประมาณ 1406.81 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งค่อนข้างน้อย จึง ทำให้มีน้ำหนักเบา สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายและสะดวก
5. ค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณความชื้นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมามีค่า 22.42% และ 7.73% ตามลำดับ มีค่าค่อนข้าง สูง และไม่สามารถต้านการรั่วซึมได้จึงเหมาะสำหรับใช้ภายในอาคารเท่านั้น

6. วิธีการขึ้นรูปโดยการอัดความดันซึ่งมีการควบคุมปริมาตรของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยก่อนและหลังการขึ้นรูปมีความเป็นไปได้ในการผลิตแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากโดยกำลังการกดอัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยที่ผสมในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก
7. สามารถตัด เลื่อยหรือประกอบ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก กับวัสดุหรือชิ้นส่วนอื่นๆได้
8. แผ่นซีเมนต์ เสริมเส้นใยกาบหมากสามารถจัดอยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบหรือ มอก. 1427-2540 ในประเภทที่ไม่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรงและมีค่า ความต้านแรงดัดหรือมอดุลัสแตกหักไม่น้อยกว่า 7 เมกะพาสคัล สัญลักษณ์ ประเภท B ชนิดที่ 2
9. การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเส้นใยกาบหมากสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เพสต์ได้และคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากดีกว่างานวิจัยที่ผ่านมา

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อศึกษาการผลิตแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ผู้วิจัยขอเสนอแนะแนวทางการปรับปรุงและศึกษาเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

1. ควรศึกษาอัตราส่วนผสมของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่ผสมเข้าแกลบ เนื่องจากปริมาณของเข้าแกลบมีผลต่อปริมาณน้ำที่ผสมในซีเมนต์เพสต์ จึงควรมีการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ทั้งการรับกำลังและความสามารถในการเท
2. ควรปรับปรุงแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากให้ด้านทานการรั่วซึมได้ ซึ่งจะสามารถทำให้นำไปใช้งานได้อย่างกว้างมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] นันทิยา ตั้งวิสุทธิจิต. สภาวะโลกร้อน [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา:
<http://www.thaiclimate.org/Articles.cfm?ID=257> [2554, มกราคม 25]
- [2] กรีนพีซ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้. ภาวะคาร์บอนไดออกไซด์ [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา:
<http://www.greenpeace.org/seasia/th/campaigns /climate-and-energy/climate-change-science/co2-emissions/?tab=1> [2554, กุมภาพันธ์ 9]
- [3] บุรฉัตร ฉัตรวีระ, พิชัย นิमितยงสกุล และ Ogunlana, S. สภาพลักษณะและคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของเส้นใยธรรมชาติในประเทศกำลังพัฒนา . วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 9, 25 (เมษายน 2538 – กรกฎาคม 2538): 123-162.
- [4] Zhijian, Li., and Xungai, Wang. Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. Composites Part A 37 (2006): 497–505.
- [5] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิमितยงสกุล. การประยุกต์ใช้เส้นใยผักตบชวาเสริมในแผ่นหลังคา. วิศวกรรมสาร ม.ช. 21, 1-2 (2537): 77-92.
- [6] ทงศักดิ์ มีมกระโทก. ศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของมอร์ต้าเสริมเส้นใยสอยดาว . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ , ภาควิชา วิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.
- [7] วิชาญ ยอดน้ำคำ. ศึกษาการพัฒนาการผลิตแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษอัดขึ้นรูป. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [8] อรรถจักร คัล้ายทอง และเมตตา เพ็ญผลเจริญ. ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเส้นใยไมยราบยักษ์. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553 ณ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี, 2553.
- [9] Olanipekun, E.A., and others. A comparative study of concrete properties using coconut shell and palm kernel shell as coarse aggregates. Building and Environment 41 (2006): 297–301.
- [10] ณัฐพล สุชาติจิวรงค์กุล. ศึกษาแผ่นบางวัสดุผสมซีเมนต์เสริมด้วยเส้นใยไม้ไผ่ . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.

- [11] ศักดิ์สิทธิ์ ศรีแสง, อุบวิทย์ สุวคันธกุล และสุจิตใจ เหง้าสีไพร. การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุผสมสำหรับคอนกรีตบดล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก. วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา 1, 1 (มกราคม-มิถุนายน 2550): 77-87.
- [12] บุศรินทร์ อินทรกำแหง ณ ราชสีมา. ศึกษาการพัฒนาแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษผสมเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต , สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.
- [13] ปิติ พานิชายุนนท์, ฉัตร ผลนาคสุ และคณะ. การพัฒนาคอนกรีตบดล็อกมวลเบาจากฟางข้าว. ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- [14] Willian, D., and Callister, Jr. Material Science and Engineering: An Introduction. 6 Edition. Composites. New York: John Wiley and Sons, 2003.
- [15] Efunfa engineering fundamentals. Introduction to Composite Materials [Online]. 2011. Available from: <http://www.efunda.com/formulae/solidmechanics/composites/> [2011, February 12]
- [16] Sciences Division. Composite Materials [Online]. 2008. Available from: <http://www.rtafa.ac.th/science/KM/AeroMat> [2011, January 17]
- [17] Gantep. Introduction to Composite Materials [Online]. 2008. Available from: <http://www1.gantep.edu.tr/~erklig/me429/introduction.ppt> [2010, December 27]
- [18] วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [19] สิริพร วาสนาประเสริฐ. การพัฒนาผนังซีเมนต์เส้นใยพืช สำหรับอาคารไม่ปรับอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2550.
- [20] จินดา จันทร์อ่อน. เซลลูโลส [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://guru.sanook.com/search> [2553, ธันวาคม 21]
- [21] เฮงทวิค้ำไม้. ผลิตภัณฑ์ไม้คอนวูด [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://xn--42c6ao0d2a8e.com/tag> [2553, ธันวาคม 21]

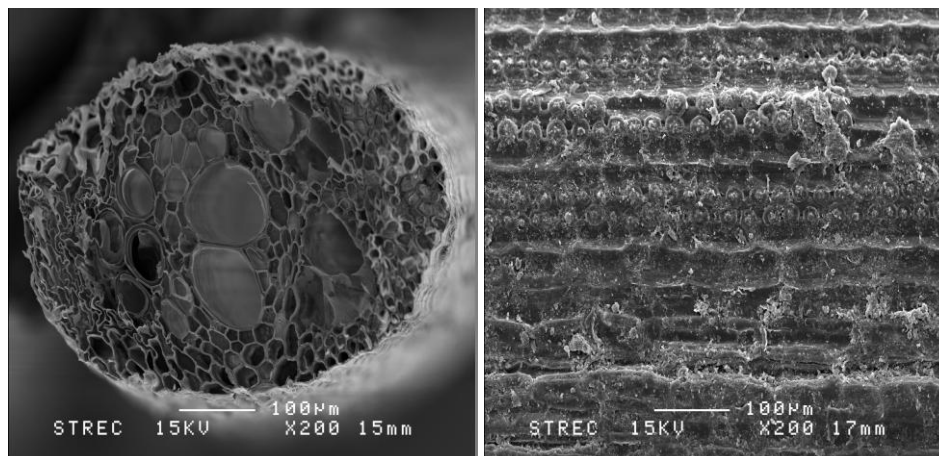
- [22] ไทยเอ็นจิเนียริ์. การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผสมคอนกรีต [ออนไลน์]. 2537.
แหล่งที่มา: <http://www.thaiengineering.com/webboardold/question.asp?> [2553, มกราคม 25]
- [23] บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง. คู่มืออินทรีคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร, 2552.
- [24] วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร, 2544.
- [25] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2553.
- [26] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. แก้วแกลบ [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task [2553, ตุลาคม 8]
- [27] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวัชรากกร วงศ์คำจันทร์. พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมแก้วแกลบละเอียด. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร 24, 3 (2544): 327-342.
- [28] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และทวิสันท์ คงทรัพย์. ความทนทานของคอนกรีตผสมแก้วแกลบดำจากโรงสีข้าว. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร 25, 4 (2545): 373-389.
- [29] Ronald, F. Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development. Cement and Concrete Composites 19 (1997): 107-122.
- [30] Boonchai Stitmannaitum. Lecture Note for Advanced Concrete Technology. Bangkok: Department of Civil Engineering Chulalongkorn University, 1999-2006.
- [31] กรมวิชาการเกษตร. ลักษณะของต้นหมาก [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://it.doa.go.th/vichakan/news.php?newsid=25> [2553, ธันวาคม 4]
- [32] บ้านมหา ดอทคอม. หมาก [ออนไลน์]. 2543. แหล่งที่มา: <http://www.baanmaha.com/community/thread15791.html> [2553, พฤศจิกายน 19]
- [33] Swamy, R.P. Study of Areca-Reinforced Phenol Formaldehyde Composites. Reinforced Plastics & Composites 23 (2004): 1373-1382.
- [34] กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. หมากในประเทศไทย [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.doae.go.th/library/html/detail/futureofac/inde .htm> [2554, มกราคม 7]
- [35] ปัญญาไทย. กาบหมาก [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.panyathai.or.th/wiki/index> [2554, มกราคม 18]

- [36] สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตร ที่ 8. เยื่อกาบหมาก [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.oard8.go.th/infor-kasat/Betel/index-Betel.htm> [2554, มกราคม 6]
- [37] สำนักงานเทศบาลตำบลสูงเนิน. ลักษณะกาบหมาก [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: http://www.sungnoen.go.th/web/main.php?pack=readmore&data_id=3&mode_id=product&field_id=product [2553, ตุลาคม 8]
- [38] Shafiq, N., and others. Durability of Natural Fibres in RHA mortar. Report of J. Ferrocement (1988): 249-262.
- [39] Joseph, K., and others. New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. Cement & Concrete Composite 23 (2001): 65-70.
- [40] Ramakrishna, G., and Sundararajan, T. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. Cement & Concrete Composites 27 (2005): 575–582.
- [41] Asasutjarit, C., and others. Development of coconut coir-based lightweight cement board. Construction and Building Materials 21 (2007): 277–288.
- [42] Huzaiifa bin hashim. The effect of Palm oil fiber on concrete properties. Bachelor's Thesis, Department of Civil Engineering Teknologi Malaysia University, 2008.
- [43] Kriker, A., and others. Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates. Cement & Concrete Composites 30 (2008): 639–648.
- [44] เทอดศักดิ์ แก้วศรี. ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเส้นใย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543.
- [45] ทวี มูลแก้ว. ศึกษาการพัฒนาวัสดุผสมซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติจากขนสัตว์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2547.
- [46] ศราวิน ปัญจะผลินกุล. ศึกษาวัสดุซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [47] สัญญา บุรา. ศึกษาการนำเส้นใยปอแก้วมาใช้ในงานคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.

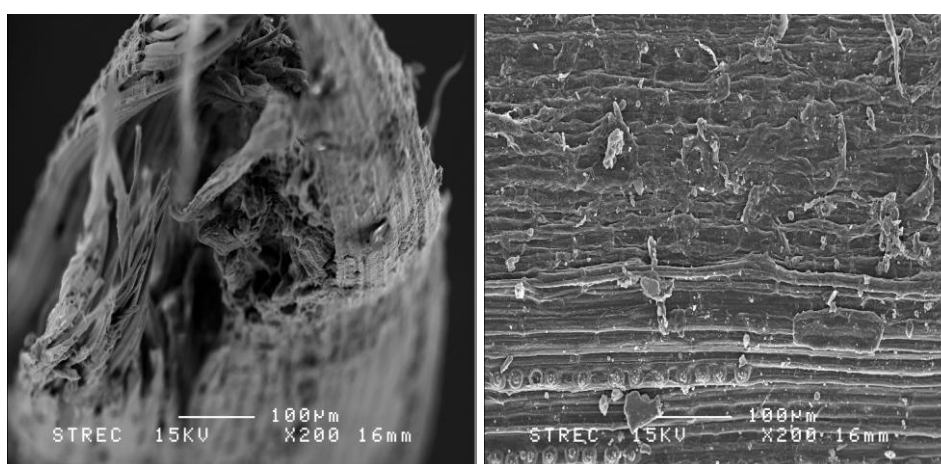
- [48] สโรชา เจริญวัย. ศึกษาสมรรถนะของวัสดุก่อสร้างมวลเบาที่มีเส้นใยเป็นองค์ประกอบ.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจบัณฑิต , สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548
- [49] สถาพร ภูมิลาวัลย์. การพัฒนาแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษเสริมเส้นใยแบบตาข่ายที่ทำจากเส้น
ใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจบัณฑิต , สาขาวิชาวิศวกรรม
โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี, 2550.
- [50] กรกฎ กิจราช. ศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใย
มะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจบัณฑิต , สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์
อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2551.
- [51] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) โดยฝ่ายสิ่งแวดล้อม
นิเวศวิทยา และพลังงาน. จดหมายข่าว วว.สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง
ประเทศไทย(วว.) 11, 3 (มีนาคม 2551):8.
- [52] ชมลักษณ์ การสมบัติ และอรณิชา รองวิริยะพานิช. การพัฒนากำลังอัดและสภาพการไหล
ของคอนกรีตมวลเบาประเภทโฟม. โครงการทางวิศวกรรมโยธา , สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [53] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม , กระทรวง . มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
มอก.1427-2540 กระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ. กรุงเทพฯ มหานคร : กระทรวง
อุตสาหกรรม, 2540.
- [54] American Society for Testing and Materials. ASTM C 1185: Standard Test Methods
for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber-Cement Flat Sheet, Roofing and
Siding Shingles, and Clapboards. Annual Book of ASTM Standard 04.05, Easton
MD USA, 2003.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก



ภาพที่ ก-1 ภาคตัดขวางและตัดตามยาวของเส้นใยจากหมาก



ภาพที่ ก-2 ภาคตัดขวางและตัดตามยาวของเส้นใยจากหมากที่แช่ใน pH 12.5

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยจากหมากคือ ทดสอบกำลังรับแรงดึง มอดุลัสยืดหยุ่น และกำลังการยืดเหนียว สามารถทดสอบโดย เครื่องทดสอบ Texture Analyzer Testing Machine มีอัตราความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 25 มิลลิเมตรต่อนาที กำลังดึงประลัย (Ultimate Load Cell) เท่ากับ 500 นิวตัน ใช้ความยาวก่อนการทดสอบ 10 เซนติเมตร

ตารางที่ ก-1 การทดสอบแรงดึงของเส้นใยจากหมาก

Sample No.	Ultimate load (N)	Elongation (mm)	Tensile strength (N/mm ²)	Strain (x10 ⁻²)
1	0.0	0.0	0.00	0.0
	0.2	0.1	0.98	0.1
	0.8	0.2	3.93	0.2

Sample No.	Ultimate load (N)	Elongation (mm)	Tensile strength (N/mm ²)	Strain (x10 ⁻²)
	1.2	0.3	5.90	0.3
	1.8	0.4	8.85	0.4
	2.2	0.5	10.82	0.5
	2.6	0.6	12.78	0.6
	3.4	0.7	16.71	0.7
	4.0	0.8	19.66	0.8
	4.6	0.9	22.61	0.9
	5.2	1.0	25.56	1.0
	5.6	1.1	27.53	1.1
	6.0	1.2	29.49	1.2
	6.6	1.3	32.44	1.3
	6.8	1.4	33.43	1.4
	7.2	1.5	35.39	1.5
	7.8	1.6	38.34	1.6
	8.2	1.7	40.31	1.7
	8.4	1.	41.29	1.8
	8.8	1.9	43.26	1.9
	9.0	2.0	44.24	2.0
	9.2	2.1	45.23	2.1
	9.6	2.2	47.19	2.2
2	0.0	0.0	0.00	0.0
	0.4	0.1	2.54	0.1
	0.8	0.2	5.09	0.2
	1.6	0.3	10.18	0.3
	2.6	0.4	16.54	0.4
	3.2	0.5	20.36	0.5

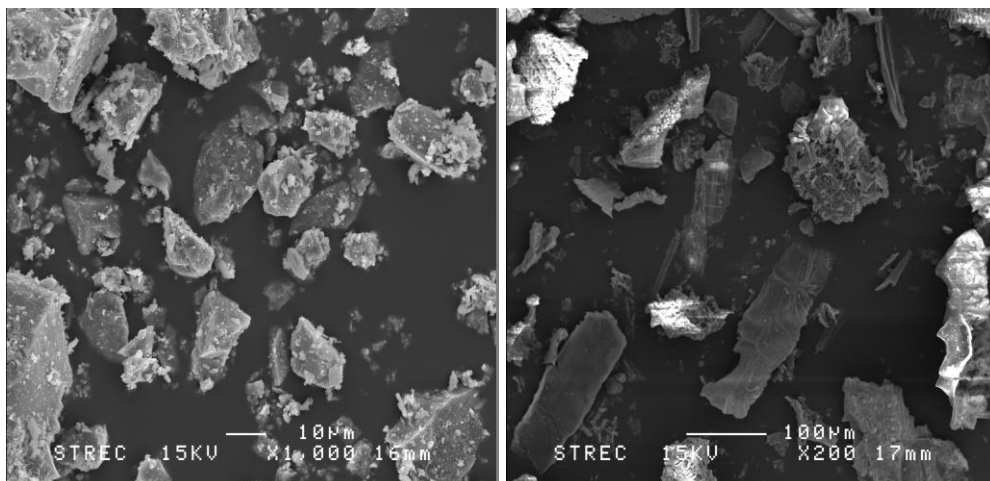
Sample No.	Ultimate load (N)	Elongation (mm)	Tensile strength (N/mm ²)	Strain (x10 ⁻²)
	4.0	0.6	25.45	0.6
	4.6	0.7	29.27	0.7
	5.4	0.8	34.36	0.8
	5.8	0.9	36.90	0.9
	6.8	1.0	43.27	1.0
	7.2	1.1	45.81	1.1
	7.6	1.2	48.36	1.2
	8.2	1.3	52.18	1.3
	8.8	1.4	55.99	1.4
	9.2	1.5	58.54	1.5
	9.8	1.6	62.36	1.6
	10.2	1.7	64.90	1.7
	10.8	1.8	68.72	1.8
	11.0	1.9	69.99	1.9
3	0.0	0.0	0.00	0.0
	0.2	0.1	1.35	0.1
	0.8	0.2	5.39	0.2
	1.2	0.3	8.08	0.3
	1.6	0.4	10.78	0.4
	2.2	0.5	14.82	0.5
	2.6	0.6	17.51	0.6
	3.0	0.7	20.21	0.7
	3.6	0.8	24.25	0.8
	3.9	0.9	26.27	0.9
	4.2	1.0	28.29	1.0
4.8	1.1	32.34	1.1	

Sample No.	Ultimate load (N)	Elongation (mm)	Tensile strength (N/mm ²)	Strain (x10 ⁻²)
	5.2	1.2	35.03	1.2
	5.6	1.3	37.73	1.3
	5.8	1.4	39.08	1.4
	6.2	1.5	41.77	1.5
	6.8	1.6	45.81	1.6
	7.0	1.7	47.16	1.7
4	0.0	0.0	0.00	0.0
	0.2	0.1	1.55	0.1
	0.4	0.2	3.10	0.2
	1.0	0.3	7.75	0.3
	1.6	0.4	12.40	0.4
	1.8	0.5	13.94	0.5
	2.4	0.6	18.60	0.6
	2.8	0.7	21.70	0.7
	3.2	0.8	24.80	0.8
	3.8	0.9	29.45	0.9
	4.2	1.0	32.55	1.0
	4.4	1.1	34.10	1.1
	5.0	1.2	38.75	1.2
	5.2	1.3	40.30	1.3
	5.6	1.4	43.40	1.4
	6.2	1.5	48.05	1.5
6.4	1.6	49.60	1.6	
6.6	1.7	51.15	1.7	

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบสามารถทดสอบโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM C0311 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete และหาองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี วิเคราะห์ Wavelength dispersive X-ray X-ray fluorescence spectrometry โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ X-ray fluorescence spectrometer, Philips model PW 2400

ตารางที่ ก-2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

Chemical composition (%)	Cement Portland type 1	Rice Husk Ash
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.18	0.07
Magnesium Oxide (MgO)	1.61	0.25
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	2.65	0.29
Silicon Dioxide (SiO ₂)	15.15	90.31
Phosphorus Oxide (P ₂ O ₅)	0.08	1.79
Sulfur Trioxide (SO ₃)	5.35	0.48
Chlorine (Cl)	0.02	0.32
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.60	2.38
Calcium Oxide (CaO)	68.98	1.07
Titanium Dioxide (TiO ₂)	0.25	0.03
Manganese Dioxide (MnO ₂)	0.10	0.24
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	3.48	0.25
Zinc Oxide (ZnO)	0.02	0.02
Loss on ignition (LOI)	1.50	2.47

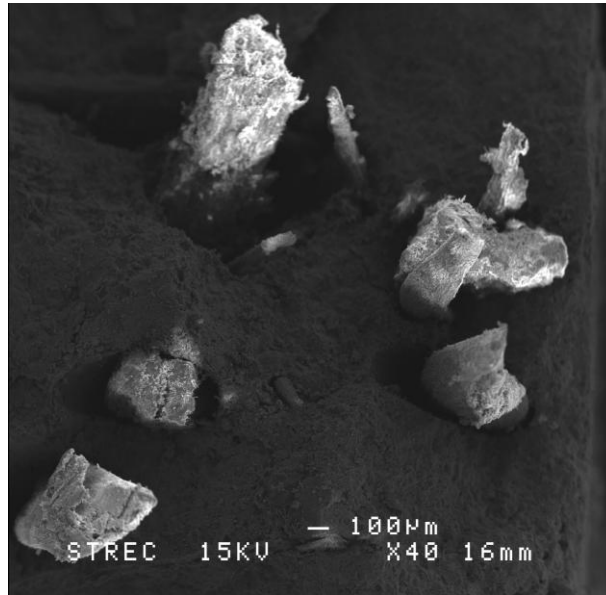


ภาพที่ ก-3 การส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

ตารางที่ ก-3 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบ

Density	2.017
Moisture content (%)	2.73
Water absorption (%)	280.48

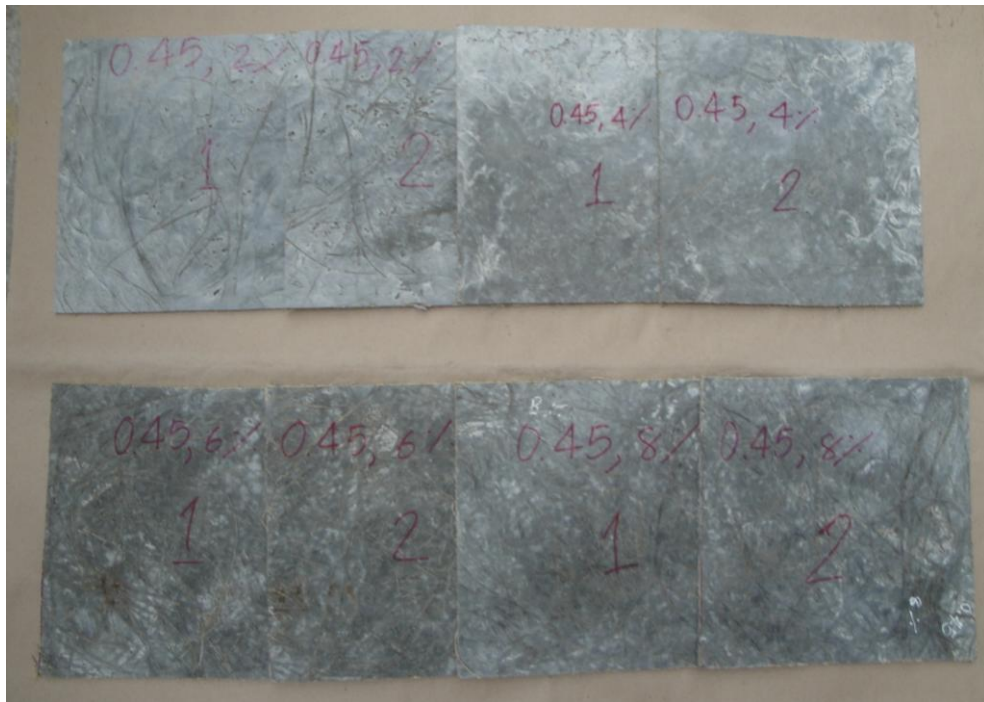
ภาคผนวก ข



ภาพที่ ข-1 เส้นใยกาบหมากในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก



ภาพที่ ข-2 แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากก่อนการทดสอบที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.40



ภาพที่ ข-3 แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากก่อนการทดสอบที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45



ภาพที่ ข-4 แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากก่อนการทดสอบที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.50

ตารางที่ ข-1 อัตราส่วนผสมของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก

Part	water-cement ratio	% fiber by volume	Proportion by weight (kg/m ³)		
			Fiber	Cement	Water
Part 1	0.4	5	53.32	1328.27	531.31
Part 2	0.35	2	23.60	1466.93	513.43
		4	45.16	1451.61	509.68
		6	70.24	1404.85	491.70
		8	90.21	1378.87	482.60
	0.4	2	22.87	1364.77	546.62
		4	45.00	1335.71	535.71
		6	67.88	1307.61	524.47
		8	90.46	1282.05	512.82
		9	101.36	1270.52	506.78
	0.45	2	22.85	1278.11	574.08
		4	45.03	1250.89	563.26
		6	67.88	1221.86	551.63
		8	90.65	1199.14	538.90
		9	101.21	1183.18	534.57
	0.5	2	22.85	1199.57	599.07
		4	45.03	1172.27	587.56
		6	67.86	1150.00	575.00
		8	90.58	1126.96	562.05
		9	101.36	1113.49	556.75
0.55	8	90.58	1055.63	584.88	

Part	water-cement ratio	% fiber by volume	Proportion by weight (kg/m ³)				
			Fiber	Cement	Water	RHA	Super plasticizer
Part 3	0.5	8	90.58	1126.96	562.05	-	-
	0.5	8	90.58	788.87	514.72	338.09	47.33

ตารางที่ ข-2 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฟสค์

Part	Water-cement ratio	Mix No.	Sample No.	Area (cm ²)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Avg. Compressive strength (ksc)
Part 1	0.4	1	1	23.86	11400	477.8	461.6
			2	27.52	12200	443.3	
			3	26.32	12200	463.6	
Part 2	0.35	1	1	25.79	13500	523.4	522.2
			2	26.40	14000	530.4	
			3	25.73	13200	513.0	
		2	1	24.42	13800	565.1	557.8
			2	22.96	13000	566.2	
			3	24.17	13100	542.0	
	0.4	1	1	24.90	12500	501.9	495.3
			2	25.62	12200	476.2	
			3	23.63	12000	507.7	
2		1	25.63	11400	444.8	488.2	
		2	24.03	12200	507.6		
		3	23.82	12200	512.2		
3	1	25.38	11800	464.9	456.2		

Part	Water-cement ratio	Mix No.	Sample No.	Area (cm ²)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Avg. Compressive strength (ksc)
			2	26.41	11900	450.6	
			3	26.49	12000	453.0	
	0.45	1	1	25.88	7700	297.5	340.2
			2	26.14	8800	336.7	
			3	25.36	9800	386.4	
		2	1	23.26	9300	399.8	369.0
			2	25.02	8700	347.7	
			3	24.49	8800	359.4	
		3	1	24.40	9100	373.0	340.8
			2	25.64	8600	335.4	
			3	25.14	7900	314.2	
	0.5	1	1	24.89	4500	180.8	198.4
			2	24.52	4200	171.3	
			3	23.87	5800	243.0	
		2	1	25.63	7300	284.8	258.8
			2	26.69	7500	281.0	
			3	26.58	5600	210.7	
		3	1	26.32	6300	239.4	215.8
2			24.89	4100	164.7		
3			24.26	5900	243.2		
0.55	1	1	25.70	3300	128.4	132.7	
		2	26.85	4100	152.7		
		3	25.63	3000	117.0		
Part 3	0.5	1	1	26.03	4900	188.2	187.9

Part	Water-cement ratio	Mix No.	Sample No.	Area (cm ²)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Avg. Compressive strength (ksc)
			2	26.33	4800	182.3	
			3	26.38	5100	193.3	
		2	1	26.00	6100	234.6	237.8
			2	26.33	6000	227.8	
			3	21.91	5500	251.0	
		0.5 (RHA)	1	1	25.10	4800	191.2
	2			24.66	4100	166.2	
	3			23.85	4300	180.3	
	2		1	24.78	5700	230.1	236.1
			2	25.08	6000	239.3	
			3	24.26	5800	239.0	

ตารางที่ ข-3 ค่ามอดุลัสแตกหักของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Maximum Load (kg)		Average Thickness (mm)	Modulus of Rupture(MPa)		
				No.1	No.2		No.1	No.2	Average
Part 1	0.4	5 (3 cm)	1	32.0	25.0	8.66	5.40	4.21	4.829
			2	19.0	18.0	6.95	4.98	4.71	
		5 (6 cm)	1	22.0	22.0	8.36	3.98	3.98	4.617
			2	14.0	16.0	6.02	4.89	5.59	
		5 (12 cm)	1	26.0	17.0	7.95	5.20	3.40	5.086
			2	33.0	29.0	8.18	6.24	5.48	
		5 (2 direction)	1	26.0	19.0	8.07	5.05	3.69	5.640
			2	38.0	16.0	7.03	9.71	4.09	

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Maximum Load (kg)		Average Thickness (mm)	Modulus of Rupture(MPa)			
				No.1	No.2		No.1	No.2	Average	
		5 (freeform)	1	50.0	58.0	9.68	6.75	7.83	8.20	
			2	62.0	54.0	8.98	9.74	8.48		
Part 2	0.35	2	1	19.7	20.5	8.64	3.33	3.47	4.17	
			2	21.5	15.5	6.89	5.73	4.13		
		4	1	27.0	16.5	7.61	5.90	3.60	4.22	
			2	21.5	14.5	7.85	4.41	2.98		
		6	1	21.5	57.5	10.15	2.64	7.06	4.79	
			2	18.0	45.5	9.20	2.68	6.79		
		8	1	20.0	16.0	9.61	2.74	2.19	2.55	
			2	19.8	20.0	9.75	2.63	2.66		
		0.4	2	1	9.0	13.5	5.41	3.89	5.84	5.36
				2	13.5	14.0	5.45	5.74	5.96	
			4	1	18.0	22.0	6.37	5.61	6.85	5.97
				2	17.0	23.0	6.66	4.85	6.56	
	6		1	24.0	23.0	6.60	6.97	6.67	6.88	
			2	23.0	22.0	6.40	7.09	6.78		
8	1		33.5	31.5	7.19	8.20	7.71	7.62		
	2		40.0	38.0	8.23	7.47	7.09			
9	1		29.0	34.0	7.35	6.79	7.96	6.10		
	2		36.5	28.5	9.23	5.42	4.23			
0.45	2	1	8.5	9.5	5.87	3.11	3.48	3.90		
		2	10.0	9.5	5.23	4.62	4.39			
	4	1	18.5	14.5	5.62	7.39	5.79	6.33		

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Maximum Load (kg)		Average Thickness (mm)	Modulus of Rupture(MPa)			
				No.1	No.2		No.1	No.2	Average	
			2	14.5	18.5	5.87	5.33	6.80		
			6	1	20.5	23.0	6.38	6.37		7.14
		2		23.5	21.5	6.16	7.84	7.17		
		8	1	29.5	30.0	6.99	7.64	7.77	7.53	
			2	24.0	40.5	7.44	5.47	9.24		
		9	1	44.0	38.0	8.78	7.22	6.24	6.74	
			2	34.0	34.0	7.98	6.76	6.76		
		0.5	2	1	7.0	8.0	4.63	4.12	4.71	3.54
				2	7.5	8.5	6.15	2.50	2.84	
			4	1	15.5	13.5	5.28	7.03	6.12	4.92
				2	9.5	8.5	5.91	3.44	3.08	
			6	1	22.0	19.5	6.41	6.78	6.01	6.20
	2			15.0	18.0	5.90	5.45	6.54		
	8		1	29.5	31.5	6.66	8.42	8.99	8.84	
			2	30.0	31.0	6.55	8.83	9.13		
	9	1	27.5	22.5	6.71	7.72	6.32	5.55		
		2	22.5	16.0	7.72	4.77	3.39			
	0.55	8	1	27.5	20.0	5.86	9.12	7.36	8.07	
			2	28.5	20.0	6.44	8.70	7.11		
	Part 3	0.5	8	1	30.5	28.0	6.47	9.21	8.45	8.48
2				29.0	26.0	6.54	8.58	7.69		
8 (RHA)			1	20.0	17.0	8.23	3.73	3.17	3.68	
			2	17.0	16.5	7.35	3.98	3.86		

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Maximum Load (kg)		Average Thickness (mm)	Modulus of Rupture(MPa)		
				No.1	No.2		No.1	No.2	Average
		-	1	16.0	12.5	5.87	5.88	4.59	5.59
			2	15.0	13.5	5.50	6.27	5.64	

ตารางที่ ข-4 ค่าความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Dry mass of specimen (g)	Saturated weight (g)	Suspended weight (g)	Density (kg/m ³)	Average Density (kg/m ³)
Part 1	0.4	5 (3 cm)	1	258.27	288.18	140.70	1751.22	1792.67
			2	202.80	223.17	110.30	1796.76	
			3	245.79	273.31	139.00	1830.02	
		5 (6 cm)	1	152.37	178.31	86.20	1654.22	1708.80
			2	219.62	253.62	123.10	1682.65	
			3	130.60	149.28	76.30	1789.53	
		5 (12 cm)	1	327.91	366.73	184.40	1798.44	1699.91
			2	109.22	128.02	59.60	1596.32	
			3	211.23	240.99	117.10	1704.98	
		5 (2 direction)	1	163.80	186.24	92.90	1754.87	1732.26
			2	182.56	211.46	101.90	1666.30	
			3	126.60	143.80	72.50	1775.60	
		5 (freeform)	1	224.84	277.06	131.10	1540.42	1654.20
			2	182.17	205.16	103.10	1784.93	
			3	294.36	341.69	161.90	1637.24	
Part 2	0.35	2	1	147.80	177.35	88.10	1656.02	1676.69
			2	134.50	160.97	80.50	1671.43	

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Dry mass of specimen (g)	Saturated weight (g)	Suspended weight (g)	Density (kg/m ³)	Average Density (kg/m ³)	
			3	248.58	295.80	149.80	1702.60		
			4	1	162.72	192.63	94.60		1659.90
				2	209.12	248.35	116.60		1587.25
		3		180.64	217.65	99.20	1525.03		
		6	1	170.38	203.11	95.80	1587.74	1558.84	
			2	174.52	216.21	95.90	1450.59		
			3	298.74	351.66	169.30	1638.19		
		8	1	368.28	452.50	203.50	1479.04	1530.23	
			2	243.16	289.30	129.90	1525.47		
			3	258.96	297.85	134.59	1586.18		
		0.4	2	1	172.65	205.86	99.80	1627.85	1604.34
				2	151.54	184.81	85.40	1524.39	
	3			152.06	180.46	88.90	1660.77		
	4		1	98.50	120.02	58.20	1593.34	1590.98	
			2	172.44	207.56	101.60	1627.41		
			3	161.35	197.85	93.90	1552.19		
	6		1	150.83	180.36	86.60	1608.68	1568.67	
			2	147.94	187.73	88.30	1487.88		
			3	151.61	183.00	88.80	1609.45		
	8		1	195.90	236.30	112.50	1582.39	1492.32	
			2	151.26	185.60	86.00	1518.67		
			3	119.29	151.60	64.90	1375.89		
	9	1	166.78	211.51	90.50	1378.23	1401.41		
		2	215.97	262.29	122.90	1549.39			

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Dry mass of specimen (g)	Saturated weight (g)	Suspended weight (g)	Density (kg/m ³)	Average Density (kg/m ³)	
			3	87.32	112.00	43.60	1276.61		
	0.45	2	1	99.98	124.07	57.30	1497.38	1590.23	
			2	130.15	153.74	72.80	1607.98		
			3	154.86	180.29	87.30	1665.34		
		4	1	115.99	143.34	66.80	1515.42	1576.75	
			2	137.60	168.22	81.10	1579.43		
			3	128.02	154.58	76.30	1635.41		
		6	1	115.12	139.55	66.50	1575.91	1495.67	
			2	97.32	122.76	53.40	1403.11		
			3	152.70	188.36	87.10	1508.00		
		8	1	145.08	184.31	80.70	1400.25	1427.31	
			2	160.33	198.92	90.90	1484.26		
			3	156.93	199.00	86.70	1397.42		
		9	1	230.45	279.82	128.60	1523.94	1391.41	
			2	186.54	240.02	104.70	1378.51		
			3	213.76	288.58	120.50	1271.78		
		0.5	2	1	70.30	88.66	40.50	1459.72	1453.78
				2	79.50	99.60	45.20	1461.40	
				3	104.20	131.45	59.10	1440.22	
	4		1	134.33	169.20	73.90	1409.55	1431.93	
			2	118.60	149.05	64.30	1399.41		
			3	78.55	97.43	44.60	1486.84		
	6		1	114.22	143.25	63.60	1434.02	1412.19	
			2	129.58	163.55	70.40	1391.09		

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Dry mass of specimen (g)	Saturated weight (g)	Suspended weight (g)	Density (kg/m ³)	Average Density (kg/m ³)		
			3	130.22	163.36	71.10	1411.45	1359.60		
			8	1	138.54	180.26	77.60		1349.50	
				2	135.78	172.20	76.30		1415.85	
		3		117.08	152.94	63.80	1313.44			
		9	1	128.42	165.80	67.80	1310.41		1353.88	
			2	128.49	159.78	70.20	1434.36			
			3	136.23	175.25	71.80	1316.87			
		0.55	8	1	153.69	194.88	83.30		1377.40	1320.73
				2	91.91	124.56	47.50		1192.71	
	3			145.75	183.50	78.80	1392.07			
	Part 3	0.5	8	1	95.85	119.01	52.03	1431.02	1406.81	
				2	153.84	190.04	83.44	1443.15		
3				139.97	167.34	63.37	1346.25			
0.5		8 (RHA)	1	180.29	231.42	92.93	1301.83	1272.32		
			2	203.15	262.61	106.21	1298.91			
			3	117.39	157.29	60.77	1216.22			
0.5		-	1	116.68	137.23	70.58	1750.64	1716.63		
			2	71.52	84.89	43.24	1717.17			
			3	65.45	78.81	39.90	1682.09			

ตารางที่ ข-5 ค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Dry mass of specimen (g)	Saturated mass of specimen (g)	Water Absorption (%)	Average Water Absorption (%)		
Part 1	0.4	5 (3 cm)	1	258.27	288.18	11.58	10.94		
			2	202.80	223.17	10.04			
			3	245.79	273.31	11.20			
		5 (6 cm)	1	152.37	178.31	17.02	15.60		
			2	219.62	253.62	15.48			
			3	130.60	149.28	14.30			
		5 (12 cm)	1	327.91	366.73	11.84	14.38		
			2	109.22	128.02	17.21			
			3	211.23	240.99	14.09			
		5 (2 direction)	1	163.80	186.24	13.70	14.37		
			2	182.56	211.46	15.83			
			3	126.60	143.80	13.59			
		5 (freeform)	1	224.84	277.06	23.23	17.31		
			2	182.17	205.16	12.62			
			3	294.36	341.69	16.08			
		Part 2	0.35	2	1	147.80	177.35	19.99	19.56
					2	134.50	160.97	19.68	
					3	248.58	295.80	19.00	
4	1			162.72	192.63	18.38	19.21		
	2			209.12	248.35	18.76			
	3			180.64	217.65	20.49			
6	1			170.38	203.11	19.21	20.27		

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Dry mass of specimen (g)	Saturated mass of specimen (g)	Water Absorption (%)	Average Water Absorption (%)	
			2	174.52	216.21	23.89		
			3	298.74	351.66	17.71		
		8	1	368.28	441.40	19.85	20.97	
			2	243.16	295.30	21.44		
			3	256.32	311.70	21.61		
		0.4	2	1	150.83	180.36	19.58	19.42
				2	147.94	174.55	17.99	
				3	151.61	183.00	20.70	
			4	1	172.65	205.86	19.24	19.96
				2	151.54	184.81	21.95	
				3	152.06	180.46	18.68	
		6	1	98.50	120.02	21.85	21.61	
	2		172.44	207.56	20.37			
	3		161.35	197.85	22.62			
	8	1	195.90	236.30	20.62	23.47		
		2	151.26	185.60	22.70			
		3	119.29	151.60	27.09			
	9	1	166.78	211.51	26.82	28.18		
		2	215.97	262.29	21.45			
		3	87.32	119.00	36.28			
	0.45	2	1	99.98	122.40	22.42	21.91	
			2	130.15	156.74	20.43		
			3	154.86	190.29	22.88		

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Dry mass of specimen (g)	Saturated mass of specimen (g)	Water Absorption (%)	Average Water Absorption (%)
		4	1	115.99	143.34	23.58	22.19
			2	137.60	168.22	22.25	
			3	128.02	154.58	20.75	
		6	1	115.12	139.55	21.22	23.57
			2	97.32	122.76	26.14	
			3	152.70	188.36	23.35	
		8	1	145.08	184.31	27.04	25.97
			2	160.33	198.92	24.07	
			3	156.93	199.00	26.81	
		9	1	230.45	289.46	25.61	26.35
			2	186.54	238.40	27.80	
			3	213.76	268.58	25.65	
	0.5	2	1	70.30	87.66	24.69	25.06
			2	79.50	99.60	25.28	
			3	104.20	130.45	25.19	
		4	1	134.33	169.20	25.96	25.22
			2	118.60	149.05	25.67	
			3	78.55	97.43	24.04	
		6	1	114.22	143.25	25.42	25.69
			2	129.58	163.55	26.22	
			3	130.22	163.36	25.45	
		8	1	138.54	172.26	24.34	26.45
			2	135.78	168.88	24.38	

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Dry mass of specimen (g)	Saturated mass of specimen (g)	Water Absorption (%)	Average Water Absorption (%)	
			3	117.08	152.94	30.63	27.37	
			1	128.42	165.80	29.11		
			2	128.49	159.78	24.35		
			3	136.23	175.25	28.64		
	0.55	8	1	153.69	194.88	26.80	29.41	
			2	91.91	124.56	35.52		
			3	145.75	183.50	25.90		
	Part 3	0.5	8	1	95.85	119.01	24.16	22.42
				2	153.84	190.04	23.53	
3				139.97	167.34	19.55		
0.5		8 (RHA)	1	180.29	231.42	28.36	30.54	
			2	203.15	262.61	29.27		
			3	117.39	157.29	33.99		
0.5		-	1	116.68	137.23	17.61	18.91	
			2	71.52	84.89	18.69		
			3	65.45	78.81	20.41		

ตารางที่ ข-6 ปริมาณความชื้นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Initial mass (g)	Final mass when oven-dry (g)	Moisture Content (%)	Average Moisture Content (%)
Part 1	0.4	5 (3 cm)	1	264.48	259.30	2.00	2.43
			2	206.16	202.92	1.60	
			3	255.80	246.65	3.71	
		5 (6 cm)	1	155.97	153.38	1.69	1.70
			2	223.67	219.76	1.78	
			3	137.90	135.70	1.62	
		5 (12 cm)	1	333.55	328.09	1.66	1.70
			2	142.90	140.24	1.90	
			3	214.64	211.41	1.53	
		5 (2 direction)	1	166.00	164.08	1.17	1.39
			2	185.53	183.07	1.34	
			3	130.06	127.94	1.66	
		5 (freeform)	1	257.60	245.64	4.87	5.37
			2	191.70	182.18	5.23	
			3	312.67	294.95	6.01	
Part 2	0.35	2	1	161.97	147.80	9.59	9.85
			2	147.98	134.50	10.02	
			3	273.26	248.58	9.93	
		4	1	178.47	162.72	9.68	9.04
			2	227.53	209.12	8.80	
			3	196.55	180.93	8.63	
		6	1	186.77	176.88	5.59	6.00

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Initial mass (g)	Final mass when oven-dry (g)	Moisture Content (%)	Average Moisture Content (%)	
			2	187.63	175.51	6.91	5.73	
			3	315.39	298.90	5.52		
			1	393.85	374.55	5.15		
		8	2	261.75	243.25	7.61		5.73
			3	280.45	268.57	4.42		
			1	109.13	100.11	9.01		
		2	2	187.58	172.44	8.78		
			3	177.48	162.86	8.98		
			4	1	185.76	172.65		7.59
	2	164.64		152.71	7.81			
	3	168.92		152.10	11.06			
	0.4	6	1	164.34	151.10	8.76	8.95	
			2	161.56	148.24	8.99		
			3	165.41	151.61	9.10		
		8	1	214.07	195.90	9.28	9.21	
			2	164.54	151.26	9.35		
			3	130.02	119.29	8.99		
		9	1	186.06	166.99	10.81	10.83	
			2	239.30	215.97	10.80		
			3	99.46	89.70	10.88		
	0.45	2	1	107.81	99.98	7.83	8.49	
2			142.61	131.16	8.73			
3			172.78	158.63	8.92			

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Initial mass (g)	Final mass when oven-dry (g)	Moisture Content (%)	Average Moisture Content (%)
		4	1	126.60	116.48	8.69	8.73
			2	149.87	137.60	8.92	
			3	139.14	128.14	8.58	
		6	1	124.83	115.41	8.16	8.60
			2	107.87	99.65	8.25	
			3	167.19	152.82	9.40	
		8	1	158.31	145.08	9.12	9.18
			2	175.02	160.33	9.16	
			3	174.17	159.39	9.27	
		9	1	255.33	231.93	10.09	9.59
			2	207.95	186.85	9.29	
			3	235.98	213.76	9.39	
	0.5	2	1	75.35	70.30	7.18	7.48
			2	94.49	87.61	7.85	
			3	113.22	105.42	7.40	
		4	1	149.69	137.75	8.67	8.36
			2	128.72	118.91	8.25	
			3	85.45	79.00	8.16	
		6	1	123.08	114.28	8.70	8.59
			2	140.39	130.04	8.57	
			3	140.76	130.44	8.49	
		8	1	150.59	138.70	8.57	8.82
			2	148.00	136.01	8.82	

Part	Water-cement ratio	% fiber by volume	No.	Initial mass (g)	Final mass when oven-dry (g)	Moisture Content (%)	Average Moisture Content (%)		
			3	128.17	117.50	9.08	9.26		
			1	141.72	128.93	9.52			
			2	141.79	128.78	9.27			
		9	3	151.82	138.17	8.98			
		0.55	8	1	170.54	154.46		10.41	10.64
				2	104.13	93.25		11.67	
	3			160.60	146.20	9.85			
	Part 3	0.5	8	1	103.51	95.85	7.99	7.73	
				2	166.39	153.84	8.16		
				3	149.84	139.97	7.05		
		0.5	8 (RHA)	1	193.51	180.29	7.33	7.93	
				2	219.31	203.15	7.95		
3				127.36	117.39	8.49			
0.5		-	1	121.06	116.68	3.75	3.87		
			2	74.00	71.52	3.47			
			3	68.33	65.45	4.40			

ตารางที่ ๗-7 ค่าการนำความร้อนของคอนกรีต แผ่นซีเมนต์ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก และแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเถ้าแกลบ

Thermal Properties	Thermal conductivity (W/mK)	Thermal diffusivity (mm ² /s)	Specific heat (MJ/m ³ K)
Concrete	1.500	-	-
Cement paste	0.584	0.422	1.385
Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber	0.563	0.397	1.419
Cement board reinforced with betel nut leaf sheath fiber and rice husk ash	0.776	0.251	3.093
Commercial A	0.599	0.402	1.489
Commercial B	0.511	0.438	1.173
Commercial C	0.505	0.681	0.741

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวระวีวรรณ สหัสธรรมรังษี เกิดวันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ.2529 มีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภอเมืองพิจิตร จังหวัดพิจิตร เข้ารับการศึกษาในระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลพิจิตร ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนพิจิตรพิทยาคม จังหวัดพิจิตร และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551 และเข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 จบจนปัจจุบัน