

แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว

นายสกุล ปิยะธรรมาภาพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

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.

CEMENT BOARD REINFORCED WITH BETEL NUT LEAF SHEET  
AND COCONUT FIBERS

Mr.Sakool Piyathamphab

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว
โดย	นาย สกุล ปิยะธรรมมาภาพ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยดำเนินการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ โค้วาวิสารัช)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. นุรฉัตร ด้ตรวีระ)

สกุล ปิยะธรรมาภาพ : แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว. (CEMENT BOARD REINFORCED WITH BETEL NUT LEAF SHEET AND COCONUT FIBERS)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. ณัฐพร โทณานนท์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร. วิจิต ปานสุข, 87 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว โดยที่เส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่นำมาเสริมแรงนั้นเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเกษตร งานวิจัยนี้ได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งศึกษาผลของความยาวของเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่มีต่อความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์ ส่วนที่สองศึกษาผลของปริมาณเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิลที่มีต่อสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว จากการทดลองในส่วนที่หนึ่ง พบว่า การเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวลงในแผ่นซีเมนต์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความต้านแรงดัด และมีความเหนียวเพิ่มขึ้น สำหรับความยาวที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ คือ เส้นใยยาวที่มีการสานแบบสุมเป็นแผ่น และในการทดลองในส่วนที่สอง พบว่า ผลของเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ช่วยเพิ่มการยึดประสานระหว่างเส้นใยและซีเมนต์เพสต์ เมื่อปริมาณเจลาตินมากขึ้น ความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์มีค่ามากขึ้น และค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาตินที่อัตราส่วน 10% มีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.81 MPa ส่วนค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมพลาสติกกรีไซเคิลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออบด้วยความร้อน 250°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยค่าความต้านทานแรงดัดหลังอบด้วยความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมพลาสติกกรีไซเคิลที่อัตราส่วน 5% มีค่าสูงสุดเท่ากับ 12.45 MPa นอกจากนี้การผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิลยังช่วยลดการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์ โดยที่แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาตินที่อัตราส่วน 10% ค่าการนำความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.2837 W/mK ซึ่งมีค่านำความร้อนต่ำกว่าแผ่นซีเมนต์แบบเดียวกันที่มีขายในท้องตลาดถึง 50% และแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวสามารถตกตะกั่วได้โดยไม่แตกร้าว ดังนั้นแผ่นซีเมนต์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติและผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิลจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ รวมทั้งช่วยประหยัดการใช้พลังงานภายในอาคารและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 5270527521: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: CEMENT BOARD / NATURAL FIBER / THERMAL CONDUCTIVITY

SAKOOL PIYATHAMPHAB: CEMENT BOARD REINFORCED WITH BETEL NUT LEAF SHEET AND COCONUT FIBERS, ADVISOR: ASST. PROF. NATTAPORN TONANON, D.Eng., CO-ADVISOR: ASST. PROF. WITHIT PANSUK, Ph.D., 87 pp.

The research presents the cement board reinforced with betel nut leaf sheet and coconut fibers from agricultural wastes. This research consists of two main parts. Part I the effects of length of the betel nut leaf sheet and coconut fibers on the flexural strength of cement board are studied. Part II the amount of gelatin and recycle plastic on physical, mechanical and thermal properties of cement boards reinforced betel nut leaf sheet and coconut fibers is studied. The addition of these fibers increases flexural strength and improves toughness of cement board. The optimum fiber length is long fibers, which align as freeform. The effects of gelatin and recycle plastic improve bonding between fibers and cement paste. The flexural strength of cement board enhances with the increase of gelatin. Cement board reinforced with coconut fibers and 10% gelatin gives the maximum flexural strength, 7.81 MPa. The flexural strength of cement reinforced with betel nut leaf sheet and coconut fibers mixed with recycle plastic increases after dry heat at 250°C for 2 hours, it is found from this study that the most flexural strength of cement board reinforced with coconut fiber and 5% recycle plastic is 12.45 MPa. Moreover, the addition of gelatin and recycle plastic reduces the thermal conductivity of cement boards, the cement board reinforced with betel nut leaf sheet and 10% gelatin has thermal conductivity of 0.2837 W/mK that lower than commercial cement board by about 50%. The cement board reinforced with betel nut leaf sheet and coconut fibers mixed with gelatin and recycle plastic can be nailed without cracking. Finally, the addition of gelatin and recycle plastic in cement boards reinforced natural fibers can substitute for wood and has a high potential for an application as energy saving material and environment-friendly material in buildings.

Department:.....Chemical Engineering..... Student's Signature.....

Field of Study:.....Chemical Engineering..... Advisor's Signature.....

Academic Year:.....2011..... Co-advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ได้วางไว้ด้วยดี เนื่องจากการได้รับการดูแลเอาใจใส่ คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆ จากบุคคลหลายท่าน

ท่านแรกขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของงานวิจัย สำหรับคำแนะนำที่ดีและน่าสนใจเสมอมา ตลอดจน อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธรรมาธิช ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ โคควาวิสารัช และรองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร ฉัตร วีระ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณโครงการภายใต้แผนฟื้นฟูเศรษฐกิจระยะที่ 2 (ไทยเข้มแข็ง 2555) ที่สนับสนุนเงินวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สำหรับค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนุภาคไทย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ เจ้าหน้าที่หน่วยทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยสอนและแนะนำวิธีการในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยเป็นกำลังใจ และคอยดูแลในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด ซึ่งเป็นแรงใจที่สำคัญที่สุด ที่ทำให้มีแรงผลักดันในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุผสม (Composite Materials).....	5
2.2 เส้นใย (Fibers).....	6
2.2.1 สมบัติของเส้นใย.....	6
2.3 เส้นใยธรรมชาติ.....	9
2.3.1 คุณสมบัติของเส้นใยเซลลูโลส.....	10
2.3.2 พืชที่นำมาผลิตเส้นใยเซลลูโลส.....	10
2.3.3 ข้อดีของการพัฒนาเส้นใยเซลลูโลสเป็นวัสดุก่อสร้าง.....	11
2.3.4 คุณสมบัติความเป็นฉนวนของเส้นใยเซลลูโลส.....	11
2.4 กาบหมาก.....	12
2.5 ไยมะพร้าว.....	13
2.6 ปูนซีเมนต์ (Cement).....	13

2.7	เจลาติน.....	14
2.8	พลาสติกกรีซเคิล.....	15
2.9	ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย.....	16
2.9.1	ความยาวเส้นใยและเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย.....	16
2.9.2	การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของเส้นใย.....	17
2.10	คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ.....	18
2.10.1	คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยในสภาพสด.....	18
2.10.2	คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยสภาพที่ใช้งาน.....	18
2.10.2.1	คุณสมบัติของความแข็งแรง (Strength properties).....	18
2.10.2.2	คุณสมบัติลดสภาพการแตกร้าวและการดูดซึมพลังงาน (Crack arrest and energy absorption on properties).....	19
2.10.2.3	คุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อน (Thermal properties).....	19
2.10.2.4	คุณสมบัติเกี่ยวกับความสามารถซึมน้ำ การดูดซึมน้ำ การบวมน้ำ และการหดตัว (Permeability, water absorption, swelling and shrinkage characteristics).....	20
2.11	วัสดุผสมซีเมนต์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Cement Composites หรือ FRC Composites).....	20
2.12	ผลของพอลิเมอร์ในวัสดุผสมซีเมนต์ (polymer-modified cement).....	25
๒๒	๓ วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
3.1	วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง.....	29
3.1.1	วัสดุการทดลอง.....	29
3.1.2	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	29
3.2	วิธีเตรียมเส้นใย.....	30
3.3	วิธีการทดลอง.....	32
3.3.1	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทั่วไปของเส้นใย.....	32
3.3.1.1	การทดสอบหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย.....	32



3.3.1.2 การทดสอบหาค่ากำลังดึงของเส้นใย.....	33
3.3.2 การผสมและหล่อขึ้นทดสอบ.....	34
3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมแรงด้วยเส้นใย.....	36
3.3.3.1 การทดสอบความต้านทานแรงดัด หรือมอดูลัสการแตกหัก.....	36
3.3.3.2 การทดสอบกำลังอัด.....	38
3.3.3.3 ความหนาแน่น.....	39
3.3.3.4 การดูดซึมน้ำ.....	40
3.3.3.5 การอบแผ่นซีเมนต์ด้วยความร้อน.....	40
3.3.3.6 การทดสอบการนำความร้อน.....	41
3.3.3.7 การทดสอบการเลื่อย การตอกและถอนตะปู.....	41
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
4.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทั่วไปของเส้นใย.....	42
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใย.....	42
4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของเส้นใย.....	43
4.1.3 คุณสมบัติทางกลของเส้นใย.....	44
4.2 การศึกษาผลความยาวของเส้นใยต่อความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์.....	45
4.2.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก.....	45
4.2.2 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าว.....	47
4.3 การศึกษาผลของกำลังอัดของซีเมนต์ผสมเจลาติน และซีเมนต์ผสมพลาสติกกรี ไซเคิล.....	48
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและ พลาสติกกรีไซเคิล.....	50
4.4.1 แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล.....	50
4.4.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่น.....	50
4.4.1.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	52
4.4.2 แผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล.....	53

4.4.2.1 ผลการทดสอบความหนาแน่น.....	53
4.4.2.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	54
4.5 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและ พลาสติกกรีไซเคิล.....	56
4.5.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก ผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล.....	56
4.5.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสม เจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล.....	60
4.6 สมบัติเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและพลาสติกกรี ไซเคิล.....	63
4.6.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก ผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล.....	63
4.6.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจ ลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล.....	65
4.7 การทนความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิลที่มี ต่อความต้านแรงดัด.....	67
4.7.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก ผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน.....	67
4.7.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจ ลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน.....	69
4.8 ผลการทดสอบการเลื่อย การตอก และการถอนตะปูของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย ผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง.....	75

ภาคผนวก .....	78
ภาคผนวก ก.....	79
ภาคผนวก ข.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ.....	36
4.1 คุณสมบัติทางเคมีของเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าว.....	44
4.2 คุณสมบัติทางกลของเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าว.....	45
4.3 ค่ามอดุลัสความเหนียวของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาตินและ พลาสติกกรีไซเคิล.....	58
4.4 ค่ามอดุลัสความเหนียวของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาตินและพลาสติกกรี ไซเคิล.....	62
4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจ ลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล.....	63
4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และ พลาสติกกรีไซเคิล.....	65
ข-1 ผลการทดสอบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าว.....	85
ข-2 ผลการทดสอบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล.....	86

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	5
2.2	7
2.3	8
2.4	9
2.5	12
2.5	13
2.7	14
2.8	15
2.9	16
2.10	17
3.1	30
3.2	30
3.3	31
3.4	31
3.5	32
3.6	33
3.7	34
3.8	35
3.9	35
3.10	36
3.11	37
3.12	37
3.13	37

3.14 การทดสอบกำลังอัด.....	38
3.15 ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ.....	41
3.16 เครื่องมือ Hot Disk Thermal Constant Analyzer.....	41
4.1 เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะของผิวเส้นใย.....	43
4.2 เส้นใยยาวที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่น.....	45
4.3 กราฟแสดงค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากขนาดต่างๆ.....	46
4.4 กราฟแสดงค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวขนาดต่างๆ.....	47
4.5 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของตัวยึดประสาน.....	49
4.6 กราฟแสดงความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และ พลาสติกกรีไซเคิล.....	51
4.7 กราฟแสดงการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และ พลาสติกกรีไซเคิล.....	52
4.8 กราฟแสดงความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติก กรีไซเคิล.....	53
4.9 กราฟแสดงการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรี ไซเคิล.....	54
4.10 กราฟแสดงค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล.....	56
4.11 กราฟแสดงกราฟแสดงค่าความเค้นดัดเทียบเท่า (Equivalent Bending Stress) ของ แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล และค่าการแอ่นตัว (Deflection).....	58
4.12 ลักษณะพื้นผิวของซีเมนต์.....	59
4.13 กราฟแสดงค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และ พลาสติกกรีไซเคิล.....	60

4.14 กราฟแสดงกราฟแสดงค่าความเค้นดัดเทียบเท่า (Equivalent Bending Stress) ของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล และค่าการแอ่นตัว (Deflection).....61

4.15 กราฟแสดงค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล และที่มีขายในท้องตลาด.....64

4.16 กราฟแสดงค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล และที่มีขายในท้องตลาด.....66

4.17 กราฟแสดงค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และ พลาสติกกรีไซเคิลก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน.....68

4.18 กราฟแสดงค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยมะพร้าวผสมเจลาตินและ พลาสติกกรีไซเคิลก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน.....69

4.19 การทดสอบการเลื่อย การตอก และการถอนตะปูของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล.....71

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้งานด้านการก่อสร้างภายในประเทศได้มีอัตราการขยายตัวอย่างมาก ในโครงการต่างๆต้องใช้ทรัพยากรอย่างมาก ทำให้ทรัพยากรลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้ราคาสูงขึ้น และยังส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะวัสดุผสมซีเมนต์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Cement Composite) ที่มีเส้นใยเป็นตัวเสริมแรง การแบ่งประเภทของเส้นใยที่ใช้ในงานคอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ตาร์นั้นสามารถจำแนกได้เป็นสองกลุ่มหลัก โดยกลุ่มแรกคือ เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fibers) ได้แก่ เส้นใยที่ทำหรือแปรรูปจาก เหล็ก, คาร์บอน, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol), เคฟลาร์ (Kevlar) และโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) กลุ่มที่สองคือ เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) ได้แก่ เส้นใยที่ได้โดยตรงจาก ไม้ ไม้ไผ่ ไยมะพร้าว ฝ้าย และขนสัตว์ต่างๆ เส้นใยสังเคราะห์เป็นชนิดของเส้นใยที่ส่วนใหญ่ใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากเส้นใยมีกำลังดึงสูง และมีความเหนียวดีไม่เปราะ แต่อย่างไรก็ตามการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการศึกษาและค้นคว้า การนำเส้นใยธรรมชาติมาเสริมแรงในคอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ตาร์ทดแทนการใช้เส้นใยสังเคราะห์ เพื่อเป็นการนำเศษวัสดุจากทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และสามารถลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาทิ้งได้อีกด้วย

การใช้เส้นใยธรรมชาติมาเสริมแรงในคอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ตาร์ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีคุณสมบัติที่สามารถควบคุมการแตกร้าวจากการหดตัวของคอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ เพราะเส้นใยมีขนาดเล็กซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวมากและพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างหยาบ มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่สูง ซึ่งทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับคอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ตาร์ดี สามารถรับแรงดัด และมีความเหนียวที่ดี โดยเส้นใยไม่ขาดในขณะผสม โดยเส้นใยธรรมชาตินั้นโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งมีความสามารถในการทนต่อต่างๆที่



จะเกิดขึ้นในซีเมนต์เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (สิริพร วาสนาประเสริฐ, 2550) ทั้งยังเป็นการส่งเสริมการใช้วัสดุเหลือใช้จากทางการเกษตรภายในประเทศมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์ เพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการนำพอลิเมอร์มาผสมลงในคอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้ผสมลงในคอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ตาร์นั้นมีทั้งพอลิเมอร์ธรรมชาติ และพอลิเมอร์สังเคราะห์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดประสานระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์ เป็นการช่วยยึดรอยแตก ร้าวลดการขยายตัวของรอยแตก ร้าว ทำให้วัสดุซีเมนต์มีความแข็งแรง และความเหนียวมากขึ้น เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกายภาพ และเชิงกลของวัสดุ นอกจากนี้การผสมพอลิเมอร์ลงในคอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ตาร์ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงความร้อนให้กับวัสดุซีเมนต์ได้อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยคาบหมาก และใยมะพร้าว เป็นวัสดุเสริมแรงในแผ่นซีเมนต์ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านการรับแรงดึงและแรงดัดทางการเสียรูป มีความเหนียวที่ดี และสามารถป้องกันการแตกร้าวของซีเมนต์ได้ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดัวยึดประสานของแผ่นซีเมนต์ โดยทั่วไปตัวยึดประสานจะเป็นซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่แข็งแต่เปราะ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการใช้พอลิเมอร์ ได้แก่ เจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล เป็นตัวยึดประสานในแผ่นซีเมนต์ เพื่อช่วยพัฒนาคุณสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยคาบหมากและใยมะพร้าว รวมทั้งนำไปพัฒนาในการผลิตวัสดุต่างๆ ที่สามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์ในงานด้านการก่อสร้างต่างๆต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการนำเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่เป็นเศษวัสดุทางการเกษตรมาเป็นเส้นใยเสริมแรงในแผ่นซีเมนต์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการใช้เจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล เป็นตัวยึดประสานในแผ่นซีเมนต์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาผลของความยาวของเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว โดยใช้เส้นใยที่มีความยาว 3, 6 และ 12 เซนติเมตร ที่มีการเรียงตัวแบบกระจาย และเส้นใยยาวที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่น (Freeform)
- 1.3.2 ศึกษาผลของเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิลที่ใช้เป็นตัวยึดประสานในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อน โดยใช้อัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 กระตุ้นให้เกิดความสนใจในการนำเศษวัสดุทางการเกษตรมาผลิตเป็นแผ่นซีเมนต์ เป็นการลดปริมาณเศษวัสดุทางการเกษตรและนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์
- 1.4.2 สามารถลดต้นทุนในการผลิต โดยวัสดุสามารถหาได้ในท้องถิ่นทำให้เกิดวัสดุที่มีคุณภาพที่ดีและราคาถูกสามารถใช้งานได้
- 1.4.3 สามารถปรับปรุงสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติให้มีคุณสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกลและเชิงความร้อนที่ดีเหมาะสมต่อการใช้งาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

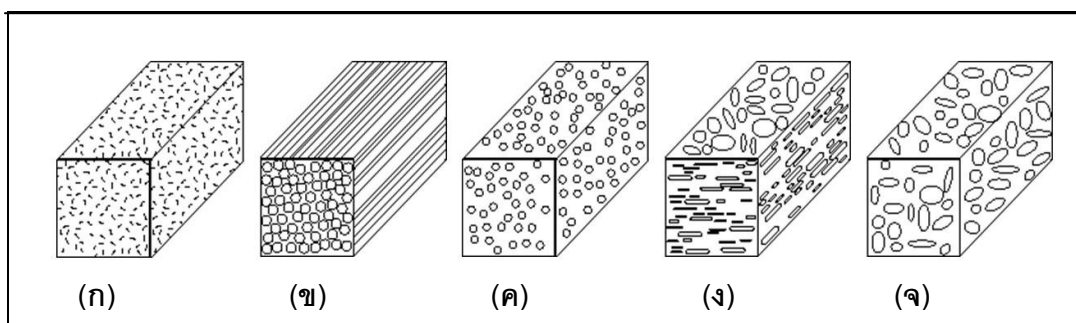
#### 2.1 วัสดุผสม (Composite Materials)

วัสดุผสม คือ วัสดุที่เกิดจากการผสมวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเข้าด้วยกัน อาจเป็นการผสมหรือสร้างพันธะเข้าด้วยกัน โดยที่เนื้อของวัสดุผสมจะประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน ไม่กลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้มีความแตกต่างจากวัสดุชนิดเดียว ทั้งนี้ยังคงสามารถแยกสถานะของวัสดุแต่ละประเภทในเนื้อของวัสดุผสมนั้นได้

วัสดุผสมประกอบด้วยสารพื้น (Matrix phase) และสารเสริมแรง (Reinforcement phase) การรวมกันของวัสดุเสริมแรงกับสารพื้น ซึ่งในบางกรณีจะถือว่าสารพื้นเป็นเสมือนกาวเชื่อมวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกันและปกป้องวัสดุเสริมแรงจากผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม

วัสดุผสมสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. วัสดุผสมที่วัสดุเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous Composites)
  - เส้นใยสั้นแบบสุ่ม (Random/Short Fiber)
  - เส้นใยยาว/เส้นใยต่อเนื่อง (Continuous/Long Fiber)
2. วัสดุผสมที่วัสดุเสริมแรงมีลักษณะเป็นอนุภาค (Particulate Composites)
3. วัสดุผสมที่วัสดุเสริมแรงมีลักษณะเป็นแผ่นหรือชิ้นเล็กๆ (Flake Composites)
4. วัสดุผสมที่วัสดุเสริมแรงเป็นสารตัวเติม (Filler Composites)



**รูปที่ 2.1** วัสดุผสมตามลักษณะของวัสดุเสริมแรงแบบต่างๆ (ก) เส้นใยสั้นแบบสุ่ม (ข) เส้นใยยาว/เส้นใยต่อเนื่อง (ค) อนุภาค (ง) แผ่นหรือชั้นเล็กๆ (จ) สสารตัวเติม

[[http://www.efunda.com/formulae/solid\\_mechanics/composites/comp\\_intro.cfm](http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/composites/comp_intro.cfm)]

องค์ประกอบของวัสดุผสม

วัสดุผสมสามารถแบ่งส่วนประกอบได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

1. สสารพื้น คือ ส่วนประกอบส่วนใหญ่ของวัสดุผสม โดยทั่วไปจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุเสริมแรง สสารพื้นจะเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่องและปกคลุมส่วนที่เป็นวัสดุเสริมแรงจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เมื่อวัสดุผสมได้รับภาระภายนอกกระทำจะถูกส่งผ่านจากสสารพื้นไปสู่วัสดุเสริมแรงซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่า เป็นผลให้เกิดการรับภาระได้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุที่เป็นสสารพื้นที่ไม่มีการเสริมแรง

2. ส่วนเสริมแรง คือ ส่วนประกอบที่ช่วยทำให้สมบัติความแข็งแรงของวัสดุผสมดีขึ้น โดยทั่วไปจะมีความแข็งแรงมากกว่าสสารพื้น เป็นส่วนรับแรงที่ส่งผ่านมาจากสสารพื้น ขนาดและรูปร่างของวัสดุเสริมแรงเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากตัวแปรหนึ่งส่งผลถึงประสิทธิภาพในการเสริมแรง ซึ่งจะทำให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงมากขึ้น

คุณสมบัติของวัสดุผสมขึ้นอยู่กับส่วนต่างๆ ดังนี้

1. การยึดติดระหว่างสสารพื้นและวัสดุเสริมแรง
2. สมบัติของสสารพื้นและวัสดุเสริมแรง
3. ขนาดและรูปร่างของวัสดุเสริมแรง
4. ปริมาณวัสดุเสริมแรง
5. กระบวนการผลิต

6. การจัดเรียง และการกระจายตัวของสารเสริมแรง

7. ตำแหน่งหรือช่องว่างภายในวัสดุผสม

## 2.2 เส้นใย (Fibers)

เส้นใยสามารถแยกประเภทได้หลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการแบ่ง ในที่นี้จะแบ่งตามแหล่งกำเนิดของเส้นใยซึ่งแยกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น

- เซลลูโลส (เส้นใยพืช) เช่น ฝ้าย ลินิน ปอ ป่าน หนุ่น
- โปรตีน (เส้นใยสัตว์) เช่น ไหม ขนสัตว์ ผม
- แร่ เช่น แร่ใยหิน

2. เส้นใยประดิษฐ์ (Man-made Fibers) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น

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

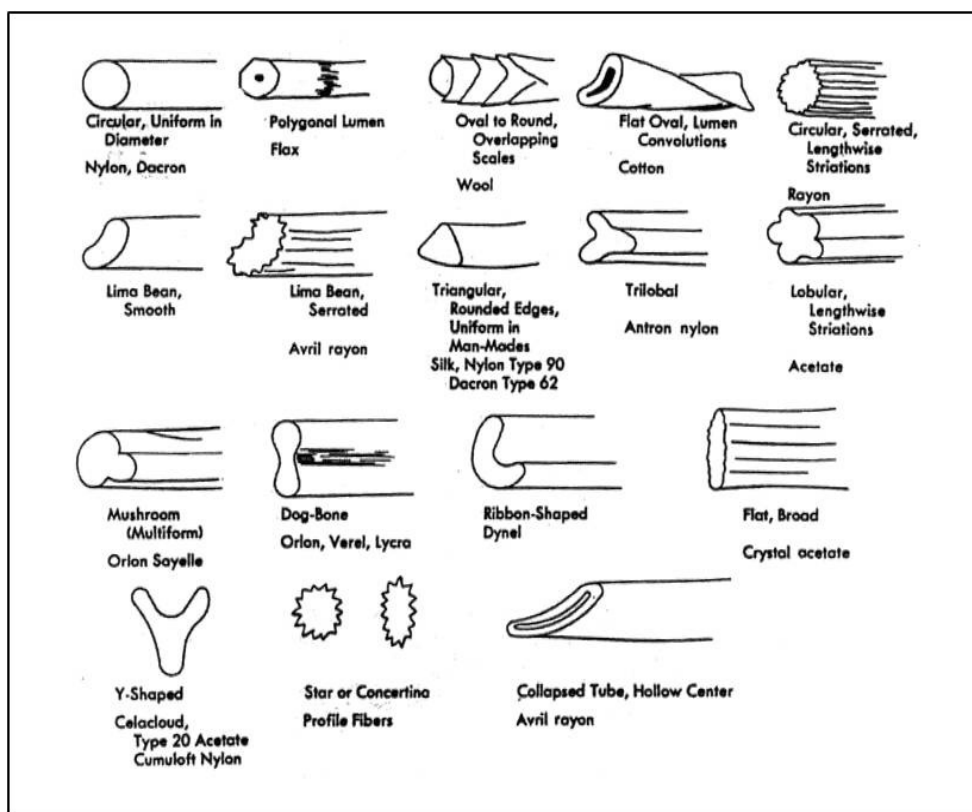
### 2.2.1 สมบัติของเส้นใย

สมบัติของเส้นใยจะถูกกำหนดจากปัจจัยต่างๆที่สำคัญดังนี้

1. ความยาวเส้นใย โดยทั่วไปจะมีทั้งเส้นใยสั้นและเส้นใยยาว ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติ และการนำไปใช้งานของผลิตภัณฑ์

2. รูปทรงตามหน้าตัดขวางของเส้นใย ลักษณะรูปทรงของเส้นใยชนิดต่างๆ ดังรูปที่

2.2 มีทั้งทรงกลม ทรงสามเหลี่ยม ทรงเม็ดถั่ว รูปทรงนี้ถูกกำหนดตามสภาพการเจริญเติบโต

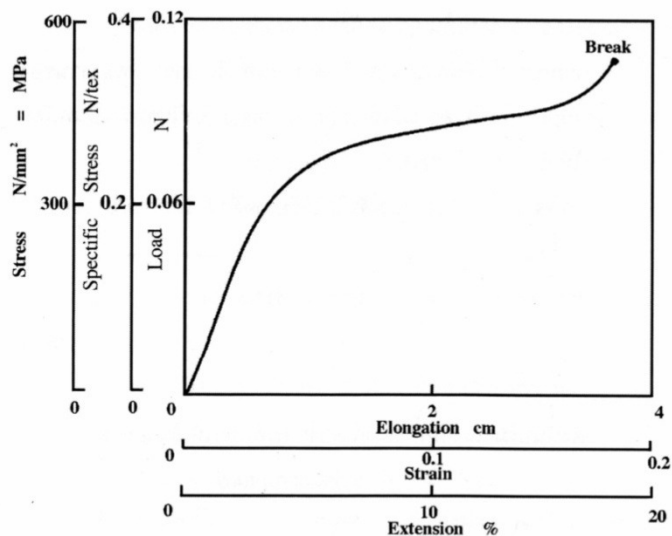


รูปที่ 2.2 รูปทรงตามหน้าตัดขวางของเส้นใยแบบต่างๆ

[[http://www.mtec.or.th/Th/research/textile/textile sci.html](http://www.mtec.or.th/Th/research/textile/textile%20sci.html)]

3. ความหยิกบนเส้นใย ซึ่งอาจเกิดจากการจัดเรียงตัวของลูกโซ่โมเลกุลมีลักษณะหยิกไปตามโครงสร้างของโมเลกุล ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำ

4. ความแข็งแรงของเส้นใย สามารถวัดได้จากแรงดึงคงที่ ที่ทำให้เส้นใยขาดออกจากกัน ในทางปฏิบัติสามารถวัดจากแรงดึงสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบการวัดความทนแรงดึง การทดสอบเพื่อวัดความแข็งแรงของเส้นใยสามารถนำเสนอผลในรูปของกราฟได้หลายรูปแบบ โดยทั่วไปจะ แสดงในลักษณะของกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กราฟความเค้น-ความเครียดที่เกิดจากการทดสอบความทนแรงดึงของเส้นใย (William D. Callister Jr., 2003)

5. ความสามารถในการรับการดัดงอได้ สมบัติของเส้นใยนี้อยอมให้ดัดงอได้โดยไม่แตกหัก แม้จะผ่านการดัดงอหลายครั้ง

6. ความหนาแน่น คือ มวลต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุ เส้นใยทุกชนิดจะมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ยกเว้นเส้นใยประดิษฐ์ในกลุ่มของโพลิเอทิลีน (PP และ PE)

7. ความสามารถในการดูดซึมความชื้น โดยธรรมชาติเส้นใยจะเป็นวัสดุที่ดูดซึมความชื้นได้ดี เส้นใยธรรมชาติทั้งเส้นใยพืชและเส้นใยสัตว์ จะดูดซึมน้ำได้มาก

8. สภาพยืดหยุ่น การคืนตัวจากแรงยืด

- สภาพยืดหยุ่น สมบัติของเส้นใยที่สามารถยืดออกและคืนกลับสู่ขนาดเดิมภายหลังจากที่ได้รับแรงยืดดึง

- การยืดตัว ระยะของการยืดออกในทิศทางที่ได้รับแรงดึง

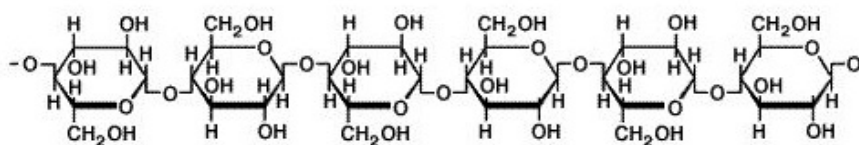
- โมดูลัสของการยืด เป็นการวัดความต้านทานต่อแรงดึง โดยวัดแรงดึงที่ทำให้เส้นใยยืดออกเป็นระยะ 1% สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียด หรือค่าความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด โมดูลัสยิ่งสูงแสดงถึงการให้แรงดึงสูงเพื่อทำให้เส้นใยยืดออก

9. การคืนตัวจากแรงอัด และความสามารถในการรับแรงอัด เส้นใยที่มีความอ่อนนุ่มมากจะมีความสามารถในการรับแรงอัดที่ดี

## 2.3 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติส่วนใหญ่มีองค์ประกอบหลักทางเคมี 3 ชนิด คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin)

- **เซลลูโลส (Cellulose)** คือองค์ประกอบหลักของเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งเซลลูโลสมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยพื้นฐานซึ่งเรียกว่า anhydro-d-glucose ( $C_6H_{10}O_5$ ) ต่อกันเป็นโมเลกุลยาว ดังรูปที่ 2.4 แต่ละหน่วยของกลูโคสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน ต่อกันเป็นลูกโซ่ที่ไม่ละลายน้ำ โครงสร้างทางเคมีจะมีบทบาทต่อการกำหนดสมบัติของเส้นใย หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จะเป็นตัวดึงดูดน้ำทำให้มีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดี ลักษณะการเรียงตัวเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวทำให้มีความแข็งแรงสูงไปด้วย นอกจากนี้โครงสร้างบริเวณที่เป็นการต่อกันของธาตุ -C-O-C- จะเป็นบริเวณที่ถูกทำลายด้วยผลจากการเกิดออกซิเดชันหรือการถูกทำลายด้วยสภาพภูมิอากาศ ทำให้โมเลกุลยาวขาดลงเป็นส่วนเล็กๆ



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส

[[http://www.bio.miami.edu/dana/226/226F09\\_3.html](http://www.bio.miami.edu/dana/226/226F09_3.html)]

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



- **เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)** คือ โมเลกุลรวมของโพลีซัคคาไรด์ น้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไซแลน และกลูโคแมนแนน ที่มีโมเลกุลข้างเคียงเป็นโมเลกุลที่แตกต่างจากโมเลกุลยาวเดิม เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลรวมของน้ำตาลหลายชนิดมีโครงสร้างซับซ้อนและผลึกมากกว่าเซลลูโลส

- **ลิกนิน(Lignin)** คือ เป็นสารชนิดหนึ่งที่มีอยู่ระหว่างและในผนังเซลล์ชั้นนอกของเส้นใยทำหน้าที่คล้ายกาวเป็นตัวเชื่อมเส้นใยเข้าด้วยกันทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรง เป็นพวกสารโมเลกุลฟีนิลโปรเพนียด์เกาะด้วยอีเทอร์และคาร์บอน ลักษณะไม่เป็นผลึกมีความสามารถในการดูดซึ่มสูง และเมื่อถูกความร้อนจะอ่อนตัวลง

### 2.3.1 คุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ

คุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ จะมีส่วนประกอบของเซลลูโลส คือ ทนต่อการเนา เปื่อย ทนต่อแรงบิด ทนต่อสารเคมีที่เป็นด่างหรือกรดอ่อนๆ และทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ

### 2.3.2 พืชที่นำมาผลิตเส้นใยธรรมชาติ

พืชที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเส้นใยธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ สามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ

1. กลุ่มที่ปลูกเพื่ออุตสาหกรรม (Industrial Crops) ได้แก่ ฝ้าย ป่านศรนารายณ์ ปอชนิดต่างๆ และไม้โตเร็ว
2. กลุ่มส่วนที่เหลือจากการทำเกษตร (Agricultural By-product) ได้แก่ ฟางข้าว เปลือกข้าวโพด ชานอ้อย ใบสับปะรด ไยมะพร้าว กัลฉวย และธัญพืชต่างๆ
3. กลุ่มที่ขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Grow Crops) ได้แก่ หญ้าแฝก หญ้าคา ต้นอ้อ และผักตบชวา

### 2.3.3 ข้อดีของการพัฒนาเส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุก่อสร้าง

1. เส้นใยธรรมชาติไม่เป็นสารพิษ (Non-Toxic Substance) และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่เส้นใยหิน (Asbestos) ที่ใช้ผลิตกระเบื้องมุงหลังคา กระเบื้องแผ่นเรียบ และไม้ฝาเทียมเป็นวัสดุที่มีพิษต่อร่างกายมนุษย์ โดยเฉพาะต่อระบบทางเดินหายใจเมื่อมีการใช้งานนานๆ
2. เป็นวัสดุที่ผลิตใช้ได้ไม่มีวันหมดไปเหมือนแร่ธาตุตามธรรมชาติ เนื่องจากสามารถปลูกเพื่ออุตสาหกรรม และส่วนที่เหลือทิ้งจากการเกษตร รวมทั้งที่ขึ้นเองตามธรรมชาติ
3. เป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle) ด้วยคุณสมบัติพิเศษของเส้นใย หากใช้กรรมวิธีที่เหมาะสมก็จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ปัจจุบันมีการนำกระดาษที่ใช้แล้ว (เยื่อกระดาษ) นำกลับมาผลิตเป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น วัสดุผิวพื้นและแผ่นไฟเบอร์อัดแน่น
4. ช่วยแก้ปัญหาภาวะของโลก จากการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาส่วนเหลือใช้จากการทำการเกษตรกรรมช่วงหลังเก็บเกี่ยว
5. มีน้ำหนักเบาและความหนาแน่นต่ำ แม้เส้นใยธรรมชาติจะมีความแข็งแรงไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ แต่เมื่อนำมาผลิตเป็นวัสดุผสมก็จะได้วัสดุที่มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เนื่องจากมีสมบัติด้านความหนาแน่นต่ำ

### 2.3.4 คุณสมบัติความเป็นฉนวนของเส้นใยธรรมชาติ

ฉนวน หมายถึง วัสดุที่มีความสามารถในการสกัดกั้นความร้อนไม่ให้ส่งผ่านจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ง่าย การส่งผ่านความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของวัสดุหรือการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ระหว่างวัตถุ สามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของวัตถุทั้งสองด้านมีความแตกต่างกัน

วัสดุประเภทเส้นใยธรรมชาติ จะมีคุณสมบัติของวัสดุที่มีความเป็นฉนวนหรือมีค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ วัสดุที่เป็นฉนวนจะมีการแบ่งประเภทต่างๆ โดยการแยก

ตามลักษณะทางกายภาพของวัสดุ หรือจะแบ่งตามลักษณะคุณสมบัติของส่วนประกอบหลักที่ใช้เป็นวัสดุสำหรับทำฉนวนกันความร้อน โดยสามารถแบ่งออกได้ 5 ประเภท ดังนี้

1. ประเภทที่เป็นเส้นใย ประกอบด้วยเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กๆจำนวนมาก
2. ประเภทที่เป็นช่องหรือเซลล์ โดยแต่ละช่องผลึกแยกออกจากกัน
3. ประเภทที่วัสดุที่เป็นโพรง หรือช่องกลวง ซึ่งอากาศสามารถถ่ายเทผ่านช่องเหล่านั้นได้
4. ประเภทที่วัสดุที่เป็นเกล็ดหรือแผ่นเล็กๆ
5. ประเภทที่เป็นแผ่นบางๆ

จากคุณสมบัติที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าเส้นใยธรรมชาติจากส่วนเหลือใช้จากทางการเกษตรเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนหรือมีค่าความต้านทานความร้อนประเภทหนึ่ง ทำให้การนำมาใช้เป็นส่วนผสมหนึ่งในการทำแผ่นซีเมนต์เส้นใยธรรมชาติ มีประโยชน์ในด้านการเป็นฉนวนและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

#### 2.4 กาบหมาก

กาบหมาก (รูปที่ 2.5) หรือที่เรียกว่า กากปุเล หมายถึง ส่วนล่างของทางใบที่หุ้มรอบลำต้นหมาก เมื่อแก่จัดแล้วหลุดลงมามีลักษณะเป็นแผ่นแข็งเหนียว ความกว้างประมาณ 12 นิ้ว ความยาวประมาณ 20 นิ้ว หรือตามขนาดของลำต้น กาบสดจะเป็นสีเขียวอ่อน เยื่อกาบหมากได้มาจากการลอกเยื่อบางบริเวณใต้ท้องด้านในของกาบหมาก มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ และในปัจจุบันได้มีการนำกาบหมากแปรรูปเพื่อให้เกิดประโยชน์ ทั้งต่อการใช้สอยและการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เช่น ฉนวนกาบหมาก



รูปที่ 2.5 กาบหมาก

[<http://www.sungnoen.go.th/web/main.php>]

## 2.5 ไยมะพร้าว

มะพร้าวเป็นพืชตระกูลปาล์ม ซึ่งเส้นใยแข็งที่ได้มาจากกาบมะพร้าว จะเรียกว่า ไยมะพร้าว ดังรูปที่ 2.6 ด้วยเส้นใยที่มีลักษณะเฉพาะทางธรรมชาติ เป็นเส้นใยที่หยาบเหนียว แข็งแรง ทนทาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติจึงสามารถทำลายได้ง่าย ดังนั้นใยมะพร้าวจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมรวมทั้งเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันส่วนใหญ่ เช่น

- ใช้ผลิตเชือกเกลียวที่มีความเหนียว แข็งแรง ทนทาน มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเชือกปอ
- ใช้ผลิตเป็นส่วนประกอบของอิฐมวลเบา
- ใช้ผลิตเป็นวัสดุป้องกันการกระแทก เหมาะสำหรับสินค้าประเภทเฟอร์นิเจอร์
- ใช้เป็นฉนวนในการดูดซับเสียงสำหรับห้องบันทึกเสียงและระบบเสียงในลำโพง ผลิตเป็นวัสดุป้องกันการกระแทก



รูปที่ 2.6 ไยมะพร้าว

[<http://www.samcoconutfiber.com/thai/index.html>]

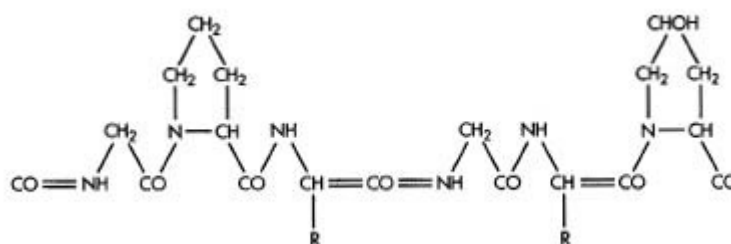
## 2.6 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์ เป็นผงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ (หินปูน หรือ ดินปูนขาว กับ ดินเหนียว หรือดินดาน) จนรวมตัวกันสุกพอดี ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ในน้ำ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้าง เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทราย และน้ำจะได้เป็นมอร์ตาร์ (mortar) หากนำไปผสมรวมกับหิน กรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต (Concrete) ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน

## 2.7 เจลาติน

เจลาติน คือ โปรตีนชนิดหนึ่งที่เกิดจากการสลายคอลลาเจนด้วยกรดหรือด่าง มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อน สามารถสกัดได้จากกระดูกและหนังสัตว์ (เช่น วัว ควาย หมู) โดยที่เจลาตินประกอบด้วยกรดอะมิโน (Amino acids) ที่มีหมู่แอลคิล (Alkyl group) ชนิด glycine proline และ 4-hydroxyproline ดังรูปที่ 2.7 เมื่อนำผงเจลาตินมาอุ่นด้วยน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 32 °C มันจะหลอมกลายเป็นของเหลวหนืด ดังรูปที่ 2.8 ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ของเหลวจะเซตตัวกลายเป็นเจล (ลักษณะคล้ายเยลลี่) ในปัจจุบันมีการนำเจลาตินมาใช้ในการเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น เครื่องสำอาง ยา อาหาร และฟิล์มถ่ายภาพ ทางเภสัชกรรมจะใช้เจลาตินในการเคลือบเม็ดยา ผลิตเป็นแคปซูลทั้งชนิดแคปซูลแข็งและแคปซูลนิ่มเพื่อใช้บรรจุยา ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดในตำรับยาต่าง ๆ และใช้เป็นส่วนผสมของยาชนิดครีม เป็นต้น นอกจากนี้ในงานช่างยังใช้เจลาตินหรือกาวหนัง เป็นส่วนประกอบของวัสดุงานช่างปั้นปูนสด



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเจลาตินหรือกาวหนัง

[<http://www.madehow.com/Volume-5/Gelatin.html>]



**รูปที่ 2.8** เจลาตินหรือกาวหนังหลอมกลายเป็นของเหลวหนืด

[[http://thaihandiwork.com/changsipmu\\_j101.php](http://thaihandiwork.com/changsipmu_j101.php)]

## 2.8 พลาสติกกรีไซเคิล

ในงานวิจัยนี้ใช้โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นวัสดุผสมในแผ่นซีเมนต์ (Low-density Polyethylene) ดังรูปที่ 2.9 LDPE มีความหนาแน่นประมาณ 0.910 - 0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ที่ผลิตโดยใช้แรงดันสูง จากกระบวนการ Free Radical Polymerization มีความเหนียวและยืดหยุ่นได้ดี ทนต่อการกรอบแตก มีความนิ่ม ความใสแต่ใสไม่เท่าพลาสติกชนิด PP (Polypropylene) โครงสร้างทางเคมีเป็นกิ่งสาขา (branching) มากกว่าโครงสร้างทางเคมีของ HDPE (High-density polyethylene) จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ต่ำกว่า และมีความแข็งแรงทนทานน้อยกว่า HDPE ส่วน LDPE ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนสารเคมีได้ดี โดยทนความร้อน (ทนอุณหภูมิสูงถึง 80°C และทนอุณหภูมิสูงถึง 95°C ในช่วงสั้น ๆ) แต่ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงในหม้ออัดไอน้ำ (Autoclave) เท่าพลาสติกชนิด PP และทนต่อสารเคมีน้อยกว่า HDPE เริ่มหลอมตัวที่ 120°C ทนความเย็นได้ถึง - 50°C ทนต่อสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่อากาศสามารถซึมผ่านได้

การใช้งาน LDPE มีความเหนียวและมีความยืดหยุ่น เหมาะสำหรับผลิตแผ่นฟิล์มต่าง ๆ เช่น วัสดุสำหรับบรรจุหีบห่ออาหาร ซองอาหาร ถุงใส่ของ และเคลือบด้านในของถังกระดาด ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก LDPE

- ถุงเย็น
- ซองใส่อาหาร
- เครื่องเล่นเด็ก
- ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า สายเคเบิล
- ขวดพลาสติกชนิดบีบได้ โดยเฉพาะขวดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.9 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

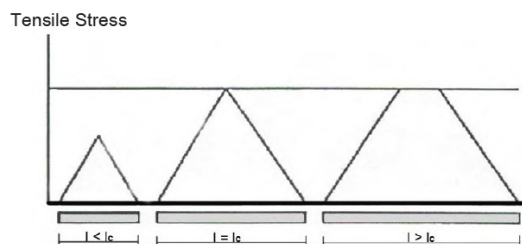
[[http://www.alibaba.com/product-s/328213917/lidpe\\_film\\_grade\\_raw\\_material\\_ldpe.html](http://www.alibaba.com/product-s/328213917/lidpe_film_grade_raw_material_ldpe.html)]

## 2.9 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย

### 2.9.1 ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย

ปัจจัยในส่วนอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อสมบัติของแผ่นซีเมนต์ โดยเฉพาะค่าวิกฤตของอัตราส่วนของความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย (Critical Aspect Ratio:  $l_c/D$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยน้อยที่สุดที่สามารถทำให้เส้นใยรับความเค้นได้มากที่สุด ในการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นที่เส้นใยและความเค้นเฉือนตามความยาวของเส้นใยที่วางตัวขนานกันกับทิศทางของภาระ ดังนั้นการเสริมแรงให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในการผลิตแผ่นซีเมนต์ควรจะมีค่ามากกว่าค่าอัตราส่วนความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต เพื่อให้ค่าความเค้นมากที่สุดเคลื่อนที่ไปยัง

เส้นใยก่อนที่แผ่นซีเมนต์จะเสียรูป หากอัตราส่วนของความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยต่ำกว่าค่าวิกฤตจะส่งผลทำให้เส้นใยไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการเสริมแรง คือ เส้นใยสั้นกว่าจุดที่เกิดแรงเค้นมากที่สุดทำให้เส้นใยไม่สามารถรับแรงเค้นได้ ส่วนในกรณีที่อัตราส่วนของความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยสูงมากเกินไป อาจทำให้เกิดการพันกันระหว่างผลสม เป็นผลทำให้เกิดปัญหาเส้นใยไม่กระจายตัวในระหว่างการผลสมได้ เส้นใยเสริมแรงของแผ่นซีเมนต์จะต้องมีความยาวอย่างน้อยที่สุดค่าหนึ่ง เพื่อให้สามารถทำหน้าที่ในการรับภาระที่ถูกส่งผ่านจากสารพื้นสู่เส้นใยได้ ค่าความยาวน้อยที่สุดค่านี้เรียกว่า ค่าความยาววิกฤต (Critical Length:  $l_c$ ) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงผลของความยาวเส้นใยเสริมแรงที่มีต่อความเค้นแรงดึงของเส้นใย  $l$  = ความยาวของเส้นใย,  $l_c$  = ค่าความยาววิกฤต (Matthews, F.L. และ Rawlings, R.D., 1994)

### 2.9.2 การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของเส้นใย

การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย ซึ่งมีความสำคัญเท่ากับ ความยาวของเส้นใยเสริมแรง การจัดเรียงตัวของเส้นใยโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ การเรียงตัวขนานแกนตามยาวของเส้นใยในทิศทางเดียวกัน และการเรียงตัวแบบกระจาย โดยในงานวิจัยนี้สนใจการจัดเรียงตัวแบบกระจาย และการเรียงเส้นใยยาวที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่น



## 2.10 คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ

### 2.10.1 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยในสภาพสด

คุณสมบัติในสภาพสดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเนื้อคอนกรีต ชนิดของเส้นใย ความยาวของเส้นใยและปริมาตรของเส้นใยในสภาพที่ใช้งานได้ (Workability) ของส่วนผสมจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเสริมเส้นใย การเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน (Balling) ของเส้นใย เป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่ง ปริมาณที่เกิดจับตัวในส่วนผสม คำนวณได้จากความยาว ความหนาของเส้นใยที่ใช้ต่อสัดส่วนปริมาตรของเส้นใย (Fiber volume fraction) เส้นใยที่บางและสั้นจะไม่ทำให้เกิดจับตัว ซึ่งปกติจะไม่ให้เกิดขึ้น เพราะจะมีผลที่ทำให้เป็นอันตรายต่อกำลัง วิธีการผสมที่จะสามารถลดการเกิดจับตัวได้ โดยจะผสมเส้นใยลงในการผสมหลังสุด หลังจากผสมส่วนประกอบสำคัญอื่นๆหมดแล้ว

### 2.10.2 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยสภาพที่ใช้งาน

คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ กำลังหรือความแข็งแรง (Strength) การเสียรูป (Deformation) ภายใต้น้ำหนักที่กระทำ การลดสภาพการแตกร้าว (Crack arrest) การดูดซึมพลังงาน (Energy absorption) ความคงทน (Durability) การซึมน้ำได้ (Permeability) และการหดตัว (Shrinkage)

#### 2.10.2.1 คุณสมบัติของความแข็งแรง (Strength properties)

กำลังประลัยขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย ความยาว และสัดส่วนปริมาตรเส้นใย (Fiber volume fraction) คุณสมบัติและส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ประกอบ ซึ่งคอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติสามารถปรับปรุงคุณสมบัติกำลังดึง (Tensile strength) กำลังการดัด (Flexural strength) กำลังกระแทก (Impact strength ให้มีความคงทนสูงขึ้น มีความต้านทานต่อการแตกร้าว อีกทั้งการปรับปรุงกำลังกระแทกและความเหนียว (Toughness)

### 2.10.2.2 คุณสมบัติลดสภาพการแตกร้าวและการดูดซึ่มพลังงาน (Crack arrest and energy absorption on properties)

ผลิตภัณฑ์คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ มีพฤติกรรมแบบวัสดุเนื้อเดียวกัน ภายในขีดจำกัดที่แน่นอน การกระจายเป็นแบบสุ่ม และอัตราส่วนผิวต่อปริมาตรของเส้นใยสูง มีผลในการลดสภาพการเกิดรอยร้าวได้ดี ปกติเส้นใยที่ใช้เสริมผลิตภัณฑ์คอนกรีตมีปริมาณน้อย (ตั้งแต่ 2 ถึง 4% โดยปริมาตร) ความเครียด (Strain) ณ รอยร้าวของเนื้อคอนกรีตจะแตกต่างไปจากเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ตาร์เล็กน้อย เมื่อเริ่มมีรอยแตกร้าว เส้นใยจะลดสภาพการเกิดรอยแตกร้าว (Crack arresting mechanism) และการดูดซึ่มพลังงาน (Energy absorption) ทำให้ผลิตภัณฑ์เสริมเส้นใยธรรมชาติมีความเหนียว (Tough) และสามารถทนต่อการกระแทกนานกว่าคอนกรีตปกติ (Plain concrete) คุณสมบัติทำให้ผลิตภัณฑ์เสริมเส้นใยธรรมชาติมีประโยชน์มากในผลิตภัณฑ์แบบ Precast ขนาดเล็กๆ ที่ต้องเผชิญความเสียหายจากการกระแทก นอกจากนี้ เมื่อเนื้อคอนกรีตมีรอยร้าว ตัวเส้นใยจะเป็นส่วนสำคัญของความเค้นแรงดึงในผลิตภัณฑ์

### 2.10.2.3 คุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อน (Thermal properties)

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

#### 2.10.2.4 คุณสมบัติเกี่ยวกับความสามารถซึมน้ำ การดูดซับน้ำ การบวมน้ำ และการหดตัว (Permeability, water absorption, swelling and shrinkage characteristics)

ความสามารถซึมน้ำ (Permeability) ของผลิตภัณฑ์คอนกรีตเสริมเส้นใยธรรมชาติ มีความสัมพันธ์กับความทึบน้ำ (Water tightness) ของที่กักเก็บน้ำ และโครงสร้างต่างๆ นอกจากนี้ การซึมของความชื้นเข้าสู่คอนกรีตเนื่องจากความสามารถซึมได้ มีผลกระทบต่อคุณสมบัติการกันความชื้น

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

#### 2.11 วัสดุผสมซีเมนต์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Cement Composites หรือ FRC Composites)

จากที่มอร์ตาร์และคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการรับกำลังอัดได้สูงมาก ในขณะที่ความสามารถในการรับกำลังดึงและกำลังดัดมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับกำลังอัด ดังนั้นการผสมเส้นใยลงไปในซีเมนต์มอร์ตาร์และคอนกรีตที่เรียกว่า วัสดุผสมซีเมนต์เสริมเส้นใย สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านการดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์และคอนกรีต โดยเฉพาะการเสียรูปและความเหนียวได้เป็นอย่างดีและยังสามารถป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตขณะก่อตัวได้ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ ชนิด ขนาดและลักษณะรูปร่างของเส้นใยที่ผสมลงในซีเมนต์มอร์ตาร์และคอนกรีต ปัจจุบันเส้นใยที่มีการผสมวัสดุผสมในซีเมนต์มอร์ตาร์และคอนกรีตมีทั้งเส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์

ทรงศักดิ์ มีมกระโทก (2542) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยสอยดาว โดยที่เส้นใยจากเปลือกต้นสอยดาวมี 2 ลักษณะ คือเส้นใยสอยดาวที่ได้จากการทุบและการตัด ขนาด 1 และ 2 ซม. มีการจัดเรียงแบบกระจาย และอัตราส่วนเส้นใยต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0, 0.150, 0.155, 0.160 โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราส่วนเส้นใยต่อซีเมนต์ 0.150 โดยน้ำหนัก ที่ความยาว 2 ซม. จะให้ค่ากำลังอัดที่สูงสุดแต่น้อยกว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ธรรมดา แต่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยสอยดาวจะให้ค่ามากกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา เนื่องจากการเสริมเส้นใยสอยดาวเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านการดึงและความเหนียวของมอร์ตาร์

วิชาญ ยอดน้ำคำ (2548) ทำการศึกษาการผลิตแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษอัดขึ้นรูป โดยใช้เยื่อกระดาษที่ป่นแล้วที่มีระยะเวลาแช่น้ำที่แตกต่างกัน มีอัตราส่วนซีเมนต์กับเยื่อกระดาษ เท่ากับ 1:1, 1:1.5, 1:2 และ 1:2.5 และผสมเส้นใยธรรมชาติที่มีการจัดเรียงแบบกระจาย และแบบตาข่าย ได้แก่ ปอแก้ว ป่านศรนารายณ์ ไม้ไผ่ โดยใส่เส้นใยที่ 1% ที่อัตราส่วนซีเมนต์กับเยื่อกระดาษ เท่ากับ 1:1.5 พบว่าแผ่นตัวอย่างที่ใส่เส้นใยธรรมชาติจะมีความต้านแรงดัด และความเหนียวเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับแผ่นตัวอย่างที่ไม่ใส่เส้นใยธรรมชาติ นอกจากนี้แผ่นตัวอย่างที่ใส่เส้นใยธรรมชาติจะมีพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว (Ductile failure) ในขณะที่แผ่นตัวอย่างที่ไม่ใส่เส้นใยธรรมชาติจะเกิดการวิบัติและลักษณะการวิบัติแบบทันทีทันใด (Brittle failure) การเพิ่มระยะเวลาในการแช่กระดาษให้นานขึ้น แต่ไม่เกิน 30 วัน มีผลทำให้กำลังดัดเทียบเท่าของแผ่นตัวอย่างสูงขึ้น ที่ 30 วันจะให้กำลังดัดเทียบเท่าที่มีค่าสูงที่สุดและอัตราส่วนผสมที่มีสัดส่วนของซีเมนต์ต่อเยื่อกระดาษสูงขึ้น มีผลทำให้ความต้านแรงดัดของแผ่นตัวอย่างลดลง โดยที่ความต้านแรงดัดมีค่าสูงที่สุดเมื่ออัตราส่วนซีเมนต์ต่อเยื่อกระดาษเท่ากับ 1:1 และการใส่เส้นใยธรรมชาติทำให้แผ่นตัวอย่างมีความต้านแรงดัดสูงขึ้น โดยเฉพาะการใส่เส้นใยธรรมชาติแบบตาข่าย การใส่เส้นใยป่านศรนารายณ์จะให้ค่าความต้านแรงดัดสูงสุดในการใส่แบบกระจาย แต่เส้นใยปอแก้วให้ความต้านแรงดัดสูงสุดในแบบตาข่าย และการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์จะมีค่ามากขึ้น เมื่ออัตราส่วนของเยื่อกระดาษมีปริมาณเพิ่มขึ้น และสามารถย่อย ตอก และถอนตะปูได้

สัญญา บุรา (2548) ทำการศึกษาการนำเส้นใยปอแก้วมาใช้ในงานคอนกรีต เพื่อทดสอบรอยร้าวที่เกิดขึ้นระหว่างคอนกรีตที่ผสมเส้นใยและไม่ผสมเส้นใย โดยการจัดเรียงเส้นใยเป็นแบบกระจายมีขนาด 2 ซม. และแบบตาข่ายขนาด 1×1 ซม. พบว่าการแตกร้าวของผนังที่ไม่มีเส้นใยปอแก้ว จะมีพื้นที่การแตกร้าวมากกว่าร้อยละ 80 ของพื้นที่ แต่ผนังที่มีเส้นใยปอแก้วสามารถลดรอยแตกร้าวได้ ค่าโมดูลัสการแตกหักจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยปอแก้วเพิ่มขึ้นที่มีการเสริมเส้นใยปอแก้วแบบตาข่าย ส่วนกำลังอัดของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยปอแก้วเพิ่มขึ้น

ศราวิน ปัญจะผลินกุล (2548) ทำการศึกษาวัดคุณสมบัติเสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืชได้แก่เส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยปอแก้ว โดยมีการเปรียบเทียบการใช้เส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์โพลีโพรพิลีน ที่ความยาว 3, 5 และ 7 ซม. มีการจัดเรียงแบบกระจาย และปริมาณเส้นใย ร้อยละ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.5 พบว่าที่ความยาวเส้นใยปอแก้ว 3 ซม. และเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ความยาว 7 ซม. สามารถควบคุมการแตกร้าวได้ดีที่สุด เมื่อปริมาณเส้นใยพืช หรือเส้นใยโพลีโพรพิลีนเพิ่มขึ้น การแตกร้าวมีค่าลดลง เส้นใยที่มีความยาวมากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง ส่วนกำลังความต้านแรงดัดวัสดุซีเมนต์ที่เสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์มีค่าความต้านแรงดัดมากที่สุด

บุศรินทร์ อินทรกำแหง ณ ราชสีมา (2550) ทำการศึกษากการพัฒนาแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษผสมเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ โดยมีเยื่อกระดาษที่นำมาแช่น้ำ 7 วันและปั่นและเส้นใยปอแก้ว เส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่มีขนาดเส้นใย 2.5, 5.0 และ 7.5 ซม. มีการจัดเรียงแบบกระจาย ปริมาณเส้นใย ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยปริมาตร และอัตราส่วนของเยื่อกระดาษต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1:0.5, 1:1 และ 1:1.5 พบว่า เส้นใยป่านศรนารายณ์มีค่าโมดูลัสการแตกหักสูงกว่าเส้นใยอื่นๆ เมื่อปริมาณเส้นใยและความยาวเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำจะมีค่ามากขึ้น แต่ค่าความหนาแน่นลดลง และที่อัตราส่วนของเยื่อกระดาษต่อปูนซีเมนต์ 1:1 มีค่าโมดูลัสการแตกหักสูงที่สุด

เทอดศักดิ์ แก้วศรี (2543) ทำการศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเส้นใย โดยมีเส้นใยในการทดลองทั้งหมด 9 ชนิด ได้แก่ ใยหินขนาด 0.5-10 มม. โพลีโพรพิลีน ขนาด 19 มม. โพลีโพรพิลีน ขนาด 12 มม. ด้ายขนาด 20 มม. ป่านศรนารายณ์ขนาด 25 มม. ปอแก้วขนาด 15 มม. และ ไม้ จากกระดาษลัง กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษถ่ายเอกสารที่เปียกอยู่ มีการจัดเรียงตัวแบบกระจาย และปริมาตรเส้นใย (% โดยปริมาตร) 0 - 15 % จากการศึกษาพบว่าความต้านทานแรงดัดของซีเมนต์ผสมเส้นใยทุกชนิดจะเพิ่มสูงขึ้น และเพิ่มความเหนียวให้กับซีเมนต์ ตามปริมาณเส้นใยที่มากขึ้น เนื่องจากเส้นใยช่วยรับความเค้นดึง แต่ภายหลังจากเกิดรอยแตกแล้ว ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความต้านทานแรงดัดลดลง เนื่องจากเกิดช่องว่างในซีเมนต์ ส่วนความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณของเส้นใยที่มากขึ้น เพราะเส้นใยมากขึ้น ทำให้ช่องว่างเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เส้นใยช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับซีเมนต์ เนื่องจากเส้นใยจะช่วยยึดประสานกับซีเมนต์ และยับยั้งการหดตัว สำหรับปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำของซีเมนต์ผสมเส้นใยจะขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณสมบัติความชื้นและการดูดซึมน้ำของเส้นใย ถ้าเส้นใยมีปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำสูง จะส่งผลให้ซีเมนต์ผสมเส้นใยมีปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำสูง

อรรชจักร คล้ายทองและคณะ (2553) ทำการศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเส้นใยไมยราบยักษ์ โดยใช้เส้นใยไมยราบยักษ์ที่มีความยาว 1-5 มม. มีการจัดเรียงแบบกระจาย และปริมาตรเส้นใยร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.35 พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นมีค่าลดลงแต่ค่าความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดัดและค่ากำลังรับแรงดึงมีค่าสูงที่อัตราส่วนผสมเส้นใยร้อยละ 1 โดยปริมาตร เนื่องจากเส้นใยสามารถช่วยรับความเค้นดึงผ่านหน้าตัดที่แตกแล้วของแผ่นซีเมนต์ผสม เมื่อปริมาณเส้นใยอยู่ในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะรับกำลังสูงสุด แต่เมื่อมีอัตราส่วนของเส้นใยมากขึ้น การรับกำลังจะลดลง เพราะปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างซีเมนต์กับเส้นใย ค่ารับแรงกระทำของแผ่นซีเมนต์ผสมเส้นใยมีค่าสูงกว่าแผ่นซีเมนต์ที่ไม่ผสมเส้นใยประมาณ 4 เท่า เนื่องจากเส้นใยมีความยืดหยุ่นและมีความเหนียว

สถาพร ภูมิลาวัลย์ (2550) ทำการศึกษาการพัฒนาแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษเสริมเส้นใยแบบตาข่ายที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ เส้นใยปอแก้ว เส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยโพลีโพรพิลีน โดยมีปริมาตรเส้นใยร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 มีการเรียงจำนวนชั้น 1 และ 2 ชั้น อัตราส่วนซีเมนต์กับเยื่อกระดาษโดยน้ำหนัก 1:0.5, 1:1 และ 1:1.5 พบว่าแผ่นซีเมนต์ที่มีการวางตาข่ายแบบ 2 ชั้น จะทำให้มีความต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้น และค่าการดูดซึมน้ำมีค่าสูงขึ้น

C. Asasutjarit และคณะ (2007) ทำการศึกษานำเส้นใยมะพร้าวมาผลิตเป็นแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่มีน้ำหนักเบา โดยใช้ซีเมนต์ต่อเส้นใยมะพร้าวต่อน้ำที่ 1:2:1, 1:1:1, 2:1:2 โดยน้ำหนัก เส้นใยมะพร้าวมีความยาว 13 ซม. 6 ซม. และ 4 ซม. มีการจัดเรียงแบบกระจาย เส้นใยที่ใช้มี 3 ลักษณะคือ เส้นใยปกติที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ เส้นใยที่ผ่านการล้าง และเส้นใยที่ผ่านการล้างและการต้ม พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้นความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์มีค่าน้อยลง แต่ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความต้านทานแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนเส้นใยที่ผ่านการล้างและเส้นใยที่ผ่านการล้างและการต้ม ค่าความต้านทานแรงดัดมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการล้างและการต้มจะทำให้ส่วนประกอบที่ละลายน้ำได้หลุดออกไป เช่น น้ำตาล แป้ง แทนนิน ทำให้เส้นใยยึดติดกับซีเมนต์ได้ดีขึ้น ส่งผลต่อความต้านทานแรงดัดที่เพิ่มขึ้น

M A Mansur และ M A Aziz (1982) นำเส้นใยปอมาเสริมแรงในซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์ โดยมีการจัดเรียงแบบกระจาย ที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1:0, 1:1 และ 1:2 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ คือ 0.33 ความยาวเส้นใยที่ใช้มีความยาวเท่ากับ 12, 18, 25 และ 38 มม. และปริมาณเส้นใย เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4% พบว่า เมื่อทดสอบความต้านทานแรงดัดชิ้นงานที่ไม่มีเส้นใยเมื่อถูกแรงกดสูงสุดจะแตกออกเป็นสองส่วน แต่ชิ้นงานที่มีเส้นใยจะไม่แตกออกเป็นชิ้นส่วน ยังคงสภาพเป็นแผ่นไว้อยู่ ชิ้นงานที่มีเส้นใยมีค่าความต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้น 60 % เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีเส้นใย และความยาวของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดจากนั้นความต้านทานแรงดัดจะมีค่าลดลง เนื่องจากความยาวของเส้นใยที่มากส่งผลให้เส้นใยเกิดการเกาะตัวเป็นกลุ่มทำให้ค่าความต้านทานแรงดัดลดลง โดยความยาวระหว่าง 12-18

มม. และปริมาณเส้นใยที่ 2% มีค่าความต้านทานแรงดัดมากที่สุด ดังนั้นการเสริมแรงด้วยเส้นใยปอจะทำให้ชิ้นงานมีความเหนียวเพิ่มขึ้น

B. Arisoy และคณะ (2008) ทำการศึกษาการเสริมแรงด้วยเส้นใย polyvinyl alcohol (PVA) ในวัสดุคอนกรีตเพื่อให้มีน้ำหนักเบา พบว่า จากการนำเส้นใย polyvinyl alcohol มาผสมในคอนกรีต ทำให้วัสดุมีค่ากำลังอัด และความเหนียวที่มากขึ้น และทำให้วัสดุมีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคอนกรีตธรรมดาทั่วไป

## 2.12 ผลของพอลิเมอร์ในวัสดุผสมซีเมนต์ (polymer-modified cement)

ผลของพอลิเมอร์ในวัสดุผสมซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อนนั้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ดังนี้ อัตราส่วนของพอลิเมอร์ต่อซีเมนต์ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ และการยึดติดของพอลิเมอร์ในซีเมนต์ นอกจากนี้พอลิเมอร์ยังส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์

Yoshihiko Ohama (1998) ได้ทำการศึกษา Polymer-based admixtures ในซีเมนต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต โดยพอลิเมอร์ที่ทำการศึกษาแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ polymer latex, redispersible polymer powder, water-soluble polymer และ liquid polymer สำหรับพอลิเมอร์ที่เติมลงในซีเมนต์นั้นจะเกิดการ co-matrix phase ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และกระบวนการเกิดฟิล์มของพอลิเมอร์ในซีเมนต์ โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคพอลิเมอร์นี้จะช่วยทำให้การยึดเกาะระหว่างซีเมนต์และมวลรวมดีขึ้น ส่งผลต่อความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้วการเติมพอลิเมอร์ในซีเมนต์จะช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดัด (flexural strength) แต่จะไม่ช่วยเพิ่มกำลังอัด เมื่อเทียบกับ ซีเมนต์, มอร์ตาร์ และคอนกรีต



J. A. Larbi และ J. M. J. M. Bijen (1990) ได้ทำการศึกษาระบวนการเกิดปฏิกิริยาของพอลิเมอร์ระหว่างการเกิดไฮเดรชันของซีเมนต์ จากการศึกษาที่ผ่านมามีการกระจายตัวของพอลิเมอร์ในซีเมนต์นั้น แบ่งได้เป็นสองทฤษฎี คือ ทฤษฎีที่ 1 ไม่มีปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับส่วนประกอบของคอนกรีต ในระหว่างที่เกิดการไฮเดรชันของซีเมนต์น้ำจะค่อยๆถูกใช้จนหมด และอนุภาคของพอลิเมอร์จะเกาะกลุ่มกันที่ละน้อยจนกระทั่งเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติ ส่งผลทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงและความเหนียวมากขึ้น ทฤษฎีที่ 2 นอกจากการเกาะกลุ่มเป็นโครงสร้างตาข่ายแล้ว ยังมีปฏิกิริยาของอนุภาคพอลิเมอร์ที่ทำระหว่างการเกิดไฮเดรชันของซีเมนต์ โดยอาจส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เร็วขึ้นหรือช้าลงก็ได้ จากการศึกษาที่ผ่านได้ทำการทดลองเฉพาะ dried pastes ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในส่วนของของเหลว (liquid phase) โดยพอลิเมอร์ที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ styrene acrylate, styrene acrylate และ polyvinylidene chloride อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.45 และอัตราส่วนของพอลิเมอร์เท่ากับ 5 และ 15% (โดยปริมาตรของส่วนประกอบซีเมนต์) พบว่าพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิด จะทำปฏิกิริยากับ  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$  และ  $SO_4^{2-}$  ขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยมีกระบวนการเริ่มจากปฏิกิริยา saponification ทำให้เกิด carbonyl radicals ที่พอลิเมอร์ และเกิดการจับตัวกับ  $Ca^{2+}$  ในส่วนของของเหลว (liquid phase) ต่อจากนั้น  $SO_4^{2-}$  มาจับตัวที่ส่วนหลังต่อไป

V. R. Riley และ I. Razl (1974) ศึกษาพอลิเมอร์ที่เป็นสารตัวเติมในวัสดุผสมซีเมนต์ โดยทั่วไปอัตราส่วนของพอลิเมอร์ต่อซีเมนต์ที่ใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุผสมซีเมนต์ เท่ากับ 0.05-0.20 กิโลกรัมของพอลิเมอร์ต่อ 1 กิโลกรัมของซีเมนต์ เมื่อผสมพอลิเมอร์ในซีเมนต์เพสต์ อนุภาคของพอลิเมอร์จะกระจายตัวทั่วซีเมนต์เพสต์ ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันน้ำได้ถูกใช้จนหมด และพอลิเมอร์ได้เกิดเป็นเมมเบรนทั่วทั้งซีเมนต์เพสต์ โดยเมมเบรนจะมีลักษณะคล้ายฟิล์มเมื่อแห้งแล้ว และขนาดรูพรุนในซีเมนต์เพสต์จะมีตั้งแต่เล็กไปจนถึงหลายพันอังสตรอม ขณะที่ขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์จะมีขนาดระหว่าง 500-5000 อังสตรอม ดังนั้นขนาดรูพรุนที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์จะถูกฟิล์มของพอลิเมอร์แทรกซึมลงไป ช่วยให้ซีเมนต์เพสต์มีการซึมผ่านที่ลดลงและทนต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ

นอกจากนี้ฟิล์มของพอลิเมอร์ในซีเมนต์เพสต์ยังช่วยยึดประสานเพสต์ของซีเมนต์และเพสต์ของมวลรวมไว้ด้วยกัน โดยทั่วไปซีเมนต์เพสต์จะเป็นโครงสร้างของอนุภาค calcium silicate hydrate ที่ยึดประสานด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เข้าด้วยกัน ดังนั้นเมื่อเกิดการแตกร้าวจะทำให้เกิดการขยายตัวของรอยร้าวได้ง่ายทำให้ความแข็งแรง และความเหนียวลดลง ดังเช่นคอนกรีต แต่เมื่อเติมพอลิเมอร์ลงในซีเมนต์เพสต์ฟิล์มของพอลิเมอร์จะไปช่วยยึดรอยแตกร้าวลดการขยายตัวของรอยแตกร้าว ส่งผลให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และเพิ่มความเหนียวให้กับวัสดุผสม

R. Wang และคณะ (2005) ทำการศึกษาผลของอิมัลชัน styrene butadiene rubber (SBR) ต่อสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ซีเมนต์ (Physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber emulsion modified cement mortars) โดยมีอัตราส่วนของพอลิเมอร์ต่อซีเมนต์ (P/C) ระหว่าง 1–20% และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.40 และอัตราส่วนโดยมวล (mass ratio) ของทรายต่อซีเมนต์ เท่ากับ 3 พบว่า ที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมมีค่าต่ำกว่า 10% จะให้ค่ากำลังอัด ความต้านทานแรงดัด และมีความเหนียวมากที่สุด ถ้าอัตราส่วนของพอลิเมอร์มีค่ามากกว่า 10% ฟิล์มของพอลิเมอร์จะมีความหนาเพิ่มขึ้นส่งผลต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์

A. Benazzouk และคณะ (2008) ทำการศึกษาผลของอนุภาคยางในวัสดุผสมซีเมนต์ที่มีต่อการนำความร้อน เพื่อพัฒนาวัสดุให้มีน้ำหนักเบา และมีค่าการนำความร้อนต่ำ อนุภาคยางที่ใช้มีขนาด 1 มม. และอัตราส่วนของยาง อยู่ระหว่าง 0% ถึง 50% โดยปริมาตร ซึ่งจะแทนในปริมาณของซีเมนต์ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอนุภาคยางลงในซีเมนต์ค่าการนำความร้อนมีค่าลดลง และวัสดุมีน้ำหนักเบาขึ้น ซึ่งอัตราส่วนของอนุภาคยางที่มีค่าการนำความร้อนต่ำสุด คือ 50%

G. Li และคณะ (2010) ทำการศึกษาพัฒนาพอลิเมอร์ผสมในคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็ก เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุคอนกรีตที่มีต่อสมบัติเชิงกล ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้คืออิมัลชัน styrene butadiene rubber (SBR) พบว่า เมื่อทำการผสม SBR ที่อัตราส่วน 3-10 % โดย

น้ำหนัก ค่าความต้านแรงดัดมีค่ามากขึ้น และมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน เท่ากับ 5% โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่ม SBR มากกว่า 10% โดยน้ำหนัก กำลังอัดมีค่าลดลง

R. Morlat และคณะ (2007) ทำการศึกษาผลของปริมาณพอลิเมอร์ในซีเมนต์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้ คือ สารละลายพอลิเมอร์ของ polyvinylpyrrolidone หรือ polyvinylalcohol ที่มีอัตราส่วนของพอลิเมอร์ต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.007 - 0.04 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ มีค่าเท่ากับ 0.2 พบว่า การใช้สารละลายพอลิเมอร์ของ polyvinylpyrrolidone หรือ polyvinylalcohol ในน้ำ ผสมใน silicate cement กับ amorphous silica ช่วยพัฒนาสมบัติเชิงกลเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในเฟสของ CSH

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

##### 3.1.1 วัสดุการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. น้ำสะอาด
3. เส้นใยกาบหมาก
4. เส้นใยมะพร้าว
5. เจลาตินหรือกาวหนิง (ความถ่วงจำเพาะ 0.68) แสดงดังรูปที่ 3.1ก
6. พลาสติกกรีซเคลือบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 350 ไมโครเมตร (ความถ่วงจำเพาะ 0.91) แสดงดังรูปที่ 3.1ข

##### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. แบบหล่อขนาด 35 x 57 x 10 เซนติเมตร พร้อมฝาปิดด้านบน
2. เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ Pan Mixer
3. เครื่องตัดกระดาษ
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก
5. นาฬิกาจับเวลา
6. เวอร์เนียร์
7. เครื่องมือจับชิ้นงาน
8. ตลับเมตร
9. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ
10. เครื่องตัดชิ้นงาน
11. เครื่อง Universal Testing แสดงดังรูปที่ 3.2



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างประสาน (ก) เจลาติน (ข) พลาสติกกรีไซเคิล



รูปที่ 3.2 เครื่อง Universal Testing

### 3.2 วิธีเตรียมเส้นใย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของความยาวของเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว โดยจะนำกาบหมากมาแช่น้ำเป็นเวลาประมาณหนึ่งสัปดาห์ แล้วทำการฉีกเป็นเส้นใย ส่วนใยมะพร้าว นำมาแช่น้ำแล้วทำการล้างเส้นใยด้วยน้ำสะอาดหลายๆครั้ง โดยเส้นใยที่นำไปใช้ในงานวิจัยจะมี 2 กลุ่มตัวอย่าง คือ

กลุ่มตัวอย่างที่ 1 นำเส้นใยที่ได้มาทำการตากแดดก่อนนำไปตัดตามขนาดที่ต้องการ โดยความยาวของเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่ใช้มีความยาว 3, 6 และ 12 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 เส้นใยที่ตัดตามขนาดต่างๆ (ก) เส้นใยกาบหมาก และ (ข) ใยมะพร้าว

กลุ่มตัวอย่างที่ 2 นำเส้นใยที่ได้มาเรียงสานแบบสุ่มเป็นแผ่น (Freeform) ในแบบกล่องขนาด 35 x 57 เซนติเมตร ซึ่งกำหนดให้แต่ละแผ่นมีน้ำหนักเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 3.4



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 เส้นใยยาวที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่น (Freeform) (ก) เส้นใยกาบหมาก และ (ข) ใยมะพร้าว

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทั่วไปของเส้นใย

##### 3.3.1.1 การทดสอบหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

เริ่มจากการเลือกตัวอย่างเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวมาจำนวนหนึ่ง ทำการถ่ายภาพขยายกำลังสูงจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scan Electron Microscope, SEM) ดังรูปที่ 3.5 โดยอาศัยหลักการการตกกระทบของลำแสงอิเล็กตรอนบนวัตถุและเกิดการสะท้อนของลำแสงกลายเป็นภาพถ่าย จากนั้นนำตัวอย่างมาติดตั้งบน SEM stub แล้วทำการเคลือบตัวอย่างด้วย Pt-Pd จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่เคลือบแล้ววางในห้องวางตัวอย่างของเครื่อง SEM จากนั้นสังเกตลักษณะรูปร่างของเส้นใย ลักษณะพื้นผิว และหาเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.3.1.2 การทดสอบหาค่ากำลังดึงของเส้นใย

การทดสอบหาค่ากำลังดึง (Tensile Strength) หรือความเค้นดึงประลัย (Ultimate Tensile Stress) ของเส้นใยธรรมชาติ ทำการทดสอบโดยวิธีตรง (Direct Tensile Test) การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ทดสอบหาค่ากำลังดึงของเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว
2. ทดสอบหาค่ากำลังดึงของเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวในสภาพแช่ต่าง

การทดสอบในส่วนที่ 2 เพื่อศึกษาผลกระทบของต่างต่อกำลังดึงของเส้นใยพืชต่างที่ใช้กำหนดให้มีค่า pH เท่ากับ 12.5 การทดสอบเริ่มจากการเตรียมตัวอย่างคือ เส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าว มายึดที่หัวจับของเครื่องทดสอบ Texture Analyzer Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 3.6 อัตราความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 25 มิลลิเมตรต่อนาที กำลังดึงประลัย (Ultimate Load Cell) เท่ากับ 500 นิวตัน หลังจากดึงตัวอย่างทดสอบขาดออกจากกันแล้วเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมการทดสอบจะทำการบันทึกค่ากำลังดึงของเส้นใยไว้โดยอัตโนมัติ หลังจากนั้นนำเอาตัวอย่างเส้นใยที่ดึงขาดมาวัดหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และทำการคำนวณหาค่ากำลังดึงของเส้นใยหาได้ จากผลการทดลองที่ได้นำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.6 เครื่อง Texture Analyzer Testing Machine



### 3.3.2 การผสมและหล่อขึ้นทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของความยาวของเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่มีต่อสมบัติแผ่นซีเมนต์เสริมแรงด้วยเส้นใย และส่วนที่ 2 ผลของเจลาติน และรีไซเคิลพลาสติกที่ใช้เป็นตัวยึดประสานในแผ่นซีเมนต์เสริมแรงด้วยเส้นใย ในทั้งสองส่วนนี้ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.4 ปริมาณเส้นใยที่ใช้เท่ากับ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ สำหรับในส่วนที่ 2 อัตราส่วนของเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล เท่ากับ ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ในส่วนที่ 1 นำซีเมนต์และน้ำผสมในเครื่องผสมแบบ Pan Mixer ผสมให้เข้ากันประมาณ 5 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และนำมาผสมกับเส้นใย สำหรับในส่วนที่ 2 จะทำการต้มเจลาตินละลายในน้ำก่อน จากนั้นผสมลงในซีเมนต์ แต่พลาสติกกรีไซเคิลจะนำมาผสมกับซีเมนต์ก่อนจากนั้นจึงผสมกับน้ำ ผสมให้เข้ากันประมาณ 5 นาที จากนั้นจึงนำผสมกับเส้นใย



รูปที่ 3.7 เครื่องผสมแบบ Pan Mixer

การผสมเส้นใยขนาด 3, 6 และ 12 เซนติเมตร จะนำซีเมนต์เพสต์ผสมกับเส้นใยจนเข้ากันดีแล้วจึงนำไปใส่ในแบบหล่อโดยจะเกลี่ยให้ส่วนผสมกระจายให้ทั่วแบบหล่อแล้วปาดหน้าให้เรียบ สำหรับการผสมเส้นใยาวมาเรียงแบบสุมเป็นแผ่นแล้ว จะนำซีเมนต์เพสต์ที่

ผสมเข้ากันดีแล้วมาเทสลับกับวางเส้นใยเป็นชั้นๆตามจำนวนที่ได้คำนวณไว้ โดยจะเกลี่ยเส้นใยให้กระจายทั่วแบบหล่อแล้วปาดหน้าให้เรียบ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบหล่อขนาด 35 x 57 x 10 เซนติเมตร

จากนั้นขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยขนาด 35 x 57 x 10 เซนติเมตร พร้อมฝาปิดด้านบน และอัดโดยใช้ความดันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยความดัน 3.5 ksc ดังรูปที่ 3.9 ทำให้น้ำที่อยู่ในส่วนผสมถูกระบายออก โดยมีการควบคุมความหนาซึ่งทำโดยการใส่เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เซนติเมตร เมื่ออัดความดันจนถึงระดับความหนาที่ต้องการ นำที่ยัดขึ้นทดสอบมายึดไว้ จากนั้นปล่อยความดัน จะทำการยึดขึ้นทดสอบจะยึดไว้ 24 ชั่วโมง แล้วทำการถอดแบบนำขึ้นทดสอบมาบ่ม การบ่มจะเก็บขึ้นทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน โดยเก็บไว้ในที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก



รูปที่ 3.9 การอัดขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยโดยเครื่องอัดไฮดรอลิก

### 3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมแรงด้วยเส้นใย

#### 3.3.3.1 การทดสอบความต้านแรงดัด หรือมอดูลัสการแตกหัก

การเตรียมชิ้นทดสอบโดยตัดแผ่นซีเมนต์เสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 25 x 25 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.10 เนื่องจากแผ่นซีเมนต์เสริมแรงด้วยเส้นใยมีความหนาไม่เกิน 9 มิลลิเมตรตามมาตรฐาน มอก.1427-2540 ซึ่งจะมีระยะระหว่างที่รองรับ (L) 21.5 เซนติเมตร ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

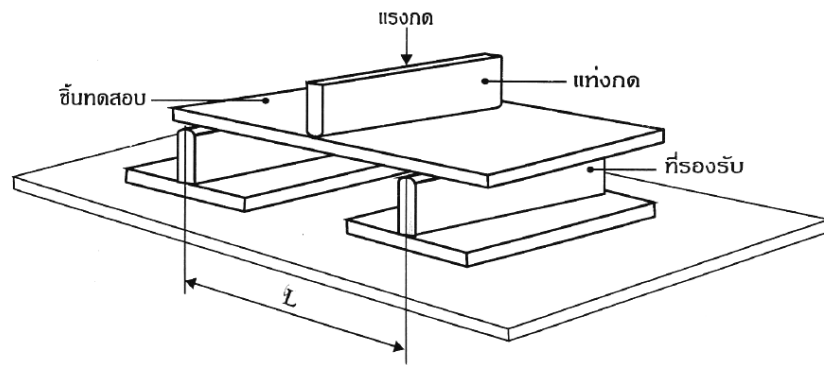
รูปร่างชิ้นทดสอบ	ความหนา (cm)	ความยาว (cm)	ความกว้าง (cm)	ระยะระหว่างที่รองรับ L (cm)
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	0.6	25.0	25.0	21.5



รูปที่ 3.10 ชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดัด

ทำการทดสอบโดยวางชิ้นทดสอบลงบนที่รองรับ จัดตำแหน่งให้แก่งคดอยู่กึ่งกลาง เพิ่มแรงคดในอัตราคงที่ จนกระทั่งชิ้นทดสอบแตกหัก บันทึกแรงคดเมื่อแตกหักและวัดความหนาที่รอยแตกหัก หลังจากที่ยื่นทดสอบหักแล้วให้นำมาประกอบกลับให้เป็นแผ่น

เช่นเดิม แล้วทดสอบความต้านแรงดัดในแนวตั้งฉากกับการทดสอบแรก แสดงดังรูปที่ 3.11, 3.12 และ 3.13 จากนั้นนำผลที่ได้คำนวณหาค่าความเค้นดัดหัก ตามสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.11 การทดสอบความต้านแรงดัด [มอก.1427-2540]



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการวัดความหนาที่รอยแตกหักของชิ้นทดสอบสี่เหลี่ยมจัตุรัส [มอก.1427-2540]



รูปที่ 3.13 การทดสอบความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์

คำนวณหาโมดูลัสแตกหัก (เมกะพาสคัล, MPa) [มอก.1427-2540] จากสมการ

$$\text{โมดูลัสแตกหัก (MPa)} = \frac{3PL}{2be^2} \quad (3.1)$$

โดยที่ P = แรงกดที่ทำให้ขึ้นทดสอบหัก, นิวตัน

L = ระยะระหว่างที่รองรับ, มิลลิเมตร

b = ความกว้างของขึ้นทดสอบ, มิลลิเมตร

e = ค่าเฉลี่ยของความหนาที่รอยแตกหักที่ 4 ตำแหน่ง, มิลลิเมตร

การคำนวณหาโมดูลัสความเหนียว จากพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นดัดเทียบเท่า (Equivalent Bending Stress) และค่าการแอ่นตัว (Deflection) ถ้าผลการทดสอบของตัวอย่างมีพื้นที่ใต้กราฟมาก แสดงว่าตัวอย่างนั้นมีพลังงานความเครียดมาก และวัสดุนั้นก็มีความเหนียวที่มาก

### 3.3.3.2 การทดสอบกำลังอัด

ขึ้นตัวอย่างทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C 109/C มีขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ก่อนทำการทดสอบต้องทำความสะอาดผิวหน้าของตัวอย่าง วัดขนาดหน้าตัด ความสูง และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละก้อนไว้ เวลาที่กดทดสอบจะใช้ผิวหน้าที่เรียบทั้งสองด้านรับแรงอัด เตินเครื่องทดสอบดังรูปที่ 3.14 จนกระทั่งก้อนตัวอย่างแตก บันทึกผลและคำนวณกำลังอัดดังสมการที่ 3.2 โดยเฉลี่ยจาก 3 ก้อนตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.14 การทดสอบกำลังอัด

คำนวณหากำลังอัด (ksc) [ASTM C 109/C] จากสมการ

$$\text{กำลังอัด (ksc)} = f = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

โดยที่  $f$  = กำลังอัดของตัวอย่างซีเมนต์, กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

$P$  = น้ำหนักกดของตัวอย่างซีเมนต์, กิโลกรัม

$A$  = พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงกดของตัวอย่างซีเมนต์, ตารางเซนติเมตร

### 3.3.3.3 ความหนาแน่น

นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความต้านแรงดัด มาใช้เป็นชิ้นทดสอบหาความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM C 1185 โดยก่อนการทดสอบนำชิ้นทดสอบแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่มีน้ำอิ่มตัวแล้วไปชั่งน้ำหนักในอากาศและในน้ำ หาน้ำหนักที่หายไปในน้ำ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาตรของน้ำที่ชิ้นทดสอบแทนที่ ( $v$ ) แล้วนำชิ้นทดสอบอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก ( $m$ )

คำนวณหาความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร,  $\text{kg/m}^3$ ) [ASTM C 1185]  
จากสมการที่ 3.3

$$\text{ความหนาแน่น (kg/m}^3\text{)} = \frac{m}{v} \quad (3.3)$$

โดยที่  $m$  = มวลของชิ้นทดสอบหลังจากอบแห้ง, กิโลกรัม

$v$  = ปริมาตรของชิ้นทดสอบ, ลูกบาศก์เมตร

### 3.3.3.4 การดูดซึมน้ำ

นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความต้านแรงดัด มาใช้เป็นชิ้นทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C 1185 โดยนำชิ้นทดสอบเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิ  $90 \pm 2$  องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักของชิ้นทดสอบคงที่และทิ้งให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ จากนั้นนำชิ้นทดสอบแช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา  $48 \pm 8$  ชม. นำชิ้นทดสอบขึ้นจากน้ำ เช็ดด้วยผ้าให้ผิวทดสอบแห้งแล้วชั่งน้ำหนัก

คำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำ (%) [ASTM C 1185] จากสมการที่ 3.4

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{(W_s - W_d) \times 100}{W_d} \quad (3.4)$$

โดยที่  $W_s$  = น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่อิ่มตัว, กรัม

$W_d$  = น้ำหนักของชิ้นทดสอบแห้ง, กรัม

### 3.3.3.5 การอบแผ่นซีเมนต์ด้วยความร้อน

นำชิ้นทดสอบมาอบด้วยตู้อบควบคุมอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.15 ที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เนื่องจากความชื้นจะระเหยที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส จากนั้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะเริ่มสลายตัวเนื่องมาจากความร้อน (Shinya Yokoyama, 2008) หลังจากนั้นนำมาทดสอบความต้านแรงดัดเหมือนดังขั้นตอนที่ 3.3.2.1



รูปที่ 3.15 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

### 3.3.3.6 การทดสอบการนำความร้อน

เป็นการทดสอบวัสดุ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k-Value) เป็นกระบวนการวัดค่าการนำความร้อนของแผ่นวัสดุ ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Hot Disk Thermal Constant Analyzer (รูปที่ 3.16) ใช้เทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA)



รูปที่ 3.16 เครื่องมือ Hot Disk Thermal Constant Analyzer

[<http://www.mtec.or.th/laboratory/ta/index.php>]

### 3.3.3.7 การทดสอบการเลื่อย การตอกและถอนตะปู

นำชิ้นทดสอบมาทำการทดสอบการเลื่อย การตอกและถอนตะปู เพื่อทดสอบความสามารถในการยึดติดชิ้นงานกับส่วนต่างๆของโครงสร้างอื่นๆได้



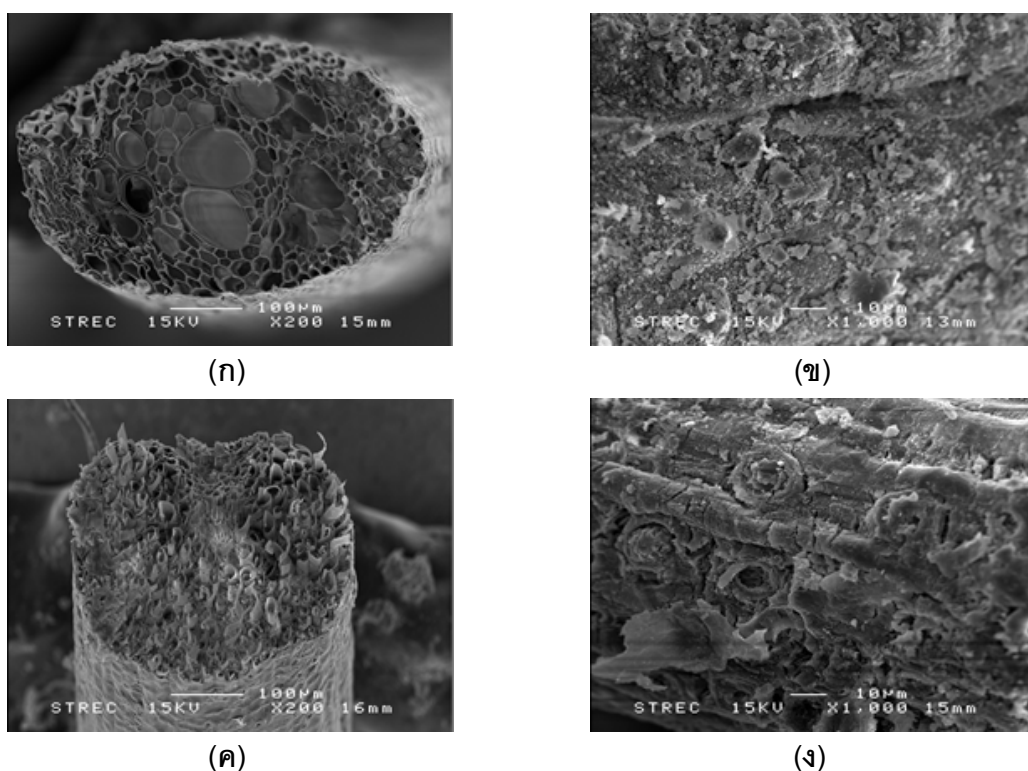
## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทั่วไปของเส้นใย

##### 4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใย

คุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติที่สำคัญต่อการนำมาใช้ในการผลิตแผ่นซีเมนต์ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ลักษณะของผิวเส้นใย และความหยาบของเส้นใย ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยนี้นั้นมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์เฟส เมื่อพิจารณาจากภาพขยายดังรูปที่ 4.1 พบว่าลักษณะผิวของเส้นใยธรรมชาตินั้นจะมีลักษณะผิวที่ขรุขระไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีส่วนช่วยในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์เฟส และเมื่อพิจารณาเส้นใยกาบหมาก พบว่า เส้นใยกาบหมากมีลักษณะเป็นวงรี และมีเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างจะใหญ่อยู่ที่ประมาณ 400 ไมครอน เส้นใยมีตัวเส้นที่ตรง เส้นใยจะแข็งกระด้าง ซึ่งต่างจากใยมะพร้าวที่มีลักษณะเป็นวงกลม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอยู่ที่ประมาณ 350 ไมครอน เส้นใยจะไม่ตรงมากจะงอเป็นลอนใหญ่ๆ ตัวเส้นใยมีความอ่อนนุ่มกว่าเส้นใยกาบหมาก การที่เส้นใยธรรมชาติมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ทำให้เส้นใยธรรมชาติต้องการความยาวที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นความยาวของเส้นใยที่เหมาะสม และการจัดเรียงตัวของเส้นใย เพื่อลดการเกาะตัวกันขณะผสมจึงมีความสำคัญต่อการปรับปรุงสมบัติของแผ่นซีเมนต์



รูปที่ 4.1 เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง และลักษณะของผิวเส้นใย: (ก) และ (ข) เส้นใยกาบหมาก, (ค) และ (ง) เส้นใยมะพร้าว

#### 4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของเส้นใย

เส้นใยธรรมชาติเป็นเศษวัสดุจากทางการเกษตร มีปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารตัวเติมและสารเสริมแรง เพื่อเป็นการลดต้นทุน เพิ่มปริมาณการผลิต ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด และลักษณะของเส้นใยที่นำมาใช้ โครงสร้างทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติจะประกอบไปด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่ องค์ประกอบที่เหลือเป็นเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ เซลลูโลสซึ่งเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆกัน เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยจะพบรวมกับลิกนิน เพนโตแซน กัม แทนนิน ไขมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลส มีหน่วยโมเลกุลยาวและแข็ง มีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังมีการจัดตัวเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก มี

ความคงทนต่อต่าง และจะละลายในกรดเข้มข้นบางชนิด ทำให้เส้นใยพืชสามารถทนต่อต่างที่เกิดขึ้นในซีเมนต์ได้ดี ดังนั้นคุณสมบัติทางเคมีของเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าว ได้ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน TAPPI T222 om-98 แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางเคมีของเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าว

ชนิดเส้นใย	% เฮมิเซลลูโลส	% เซลลูโลส	% ลิกนิน	% เถ้า	การละลายใน 1%NaOH
เส้นใยกาบหมาก	36.15	38.81	19.80	3.73	29.08
ใยมะพร้าว	29.20	35.20	30.09	2.39	17.52

จากการทดสอบทางเคมีของเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าว พบว่า เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน แต่องค์ประกอบลิกนินของใยมะพร้าวมีปริมาณมากกว่าเส้นใยกาบหมาก ส่งผลให้ใยมะพร้าวมีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยกาบหมาก เนื่องจากลิกนินมีลักษณะเสมือนกาวยึด และเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เส้นใย

#### 4.1.3 คุณสมบัติทางกลของเส้นใย

คุณสมบัติทางกลที่ได้ทำการทดสอบกับเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าว คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสามารถในการรับแรงดึงของเส้นใย และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัส ดังตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกลของเส้นใยมีสำคัญต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในซีเมนต์เพสต์ คือ ความเหนียวของเส้นใยเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์ ดังนั้นคุณสมบัติในการรับแรงดึงของเส้นใยจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ คุณสมบัติทางกลของเส้นใยแต่ละชนิดไม่เท่ากันและค่อนข้างจะไม่แน่นอนแม้ว่าจะเป็นพืชตระกูลเดียวกันชนิดเดียวกันก็ตาม อาจจะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศในการเพาะปลูก

#### ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกลของเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าว

ชนิดเส้นใย	เส้นผ่านศูนย์กลาง ( $\mu\text{m}$ )	กำลังรับแรงดึง (ksc)	กำลังรับแรงยืดเหนียว (ksc)	Aspect ratio
กาบหมาก	320	500	1.30	237
มะพร้าว	330	1100	1.83	83

#### 4.2 การศึกษาผลความยาวของเส้นใยต่อความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์

จากการทดลองนำเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าวมาเสริมแรงในแผ่นซีเมนต์ เพื่อปรับปรุงความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์ ซึ่งความยาวของเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่ใช้มีความยาว 3, 6 และ 12 เซนติเมตร ที่มีการเรียงตัวแบบกระจาย และเส้นใยยาวที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่น (Freeform) ดังรูปที่ 4.2



(ก)

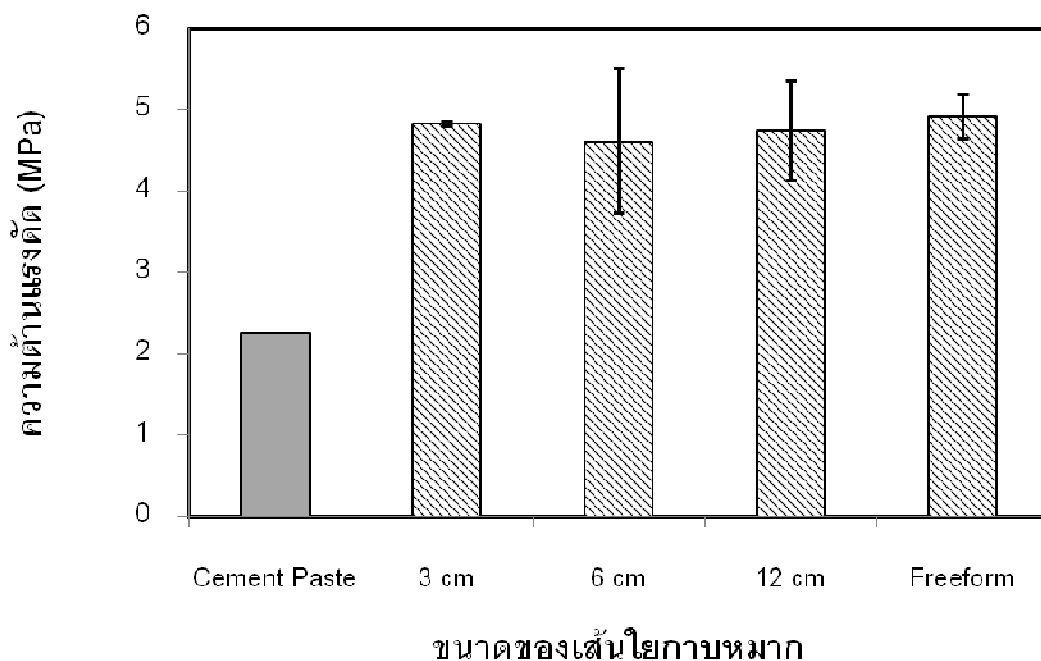


(ข)

รูปที่ 4.2 เส้นใยยาวที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่น (Freeform): (ก) เส้นใยกาบหมาก (ข) ใยมะพร้าว

##### 4.2.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก

จากผลการทดสอบความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก ที่อายุการบ่มในสภาพห้องปฏิบัติการ 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3



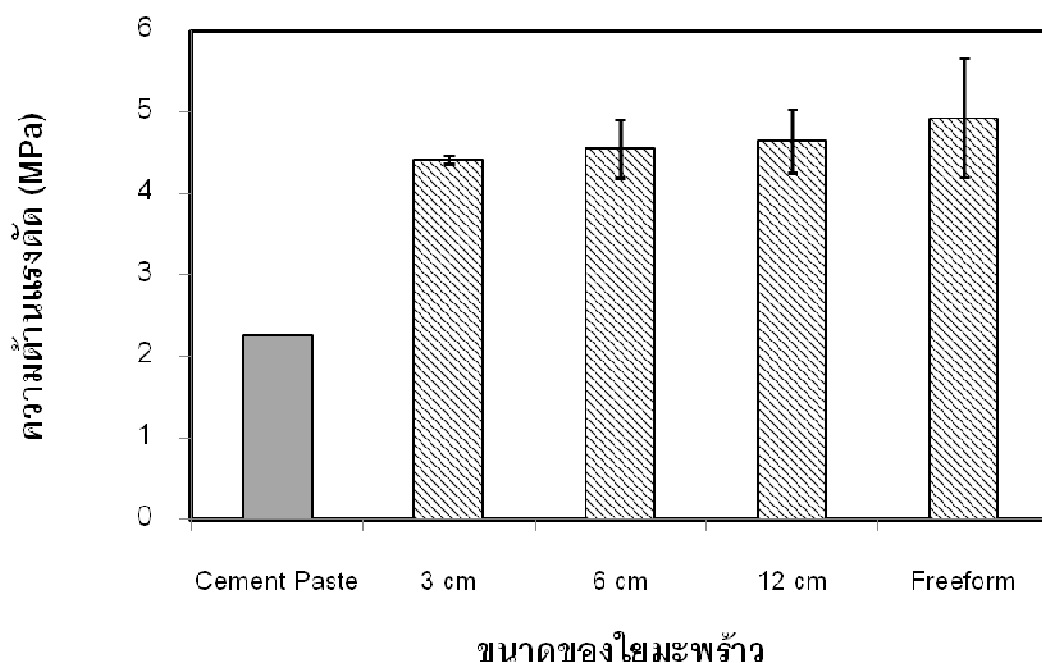
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากขนาดต่างๆ (■ ซีเมนต์เพสต์, ▨ เส้นใยกาบหมาก)

พบว่าความต้านแรงดัดของซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก ที่ความยาวเส้นใย 3, 6 และ 12 เซนติเมตร และเส้นใยยาวที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่น (Freeform) มีค่าเท่ากับ 2.26, 4.83, 4.62, 4.74 และ 4.92 เมกะพาสคัล ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากจะมีค่ามากกว่าซีเมนต์เพสต์ กล่าวคือเส้นใยช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดัด และความเหนียวให้แก่แผ่นซีเมนต์ และค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่เป็นเส้นใยยาวสานเป็นแผ่น มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.92 เมกะพาสคัล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วิชาญ ยอดน้ำคำ (2548) ที่ได้ทำการศึกษากาบใส่เส้นใยธรรมชาติ (ปอแก้ว ไม้ไผ่ และป่านครนารายณ์) แบบตาข่ายและแบบกระจายลงในแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษ โดยพบว่ากาบใส่เส้นใยธรรมชาติแบบตาข่ายจะมีค่าความต้านแรงดัดมากกว่ากาบใส่แบบกระจาย ดังนั้นกาบใส่เส้นใยกาบหมากที่สานเป็นแผ่น ทำให้การเรียงตัวของเส้นใยเป็นระเบียบมากขึ้น และสามารถกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นซีเมนต์ ส่งผลต่อเกิดการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเส้นใย และเส้นใยกับซีเมนต์ดี

ขึ้น เป็นเหตุให้ปริมาณช่องว่างในแผ่นซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้ความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาความยาวเส้นใยคาบหมากที่ 3, 6 และ 12 เซนติเมตร ค่าความต้านแรงดัดมีค่าน้อยกว่าเส้นใยยาวที่สานเป็นแผ่น เนื่องจากการใส่เส้นใยแบบกระจาย ทำให้เส้นใยเกิดการเกาะกลุ่มกัน ส่งผลต่อการกระจายตัวของเส้นใยในแผ่นซีเมนต์ เป็นเหตุให้ปริมาณช่องว่างในแผ่นซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านแรงดัดลดลง

#### 4.2.2 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าว

จากผลการทดสอบความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าว ที่อายุการบ่มในสภาพห้องปฏิบัติการ 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4



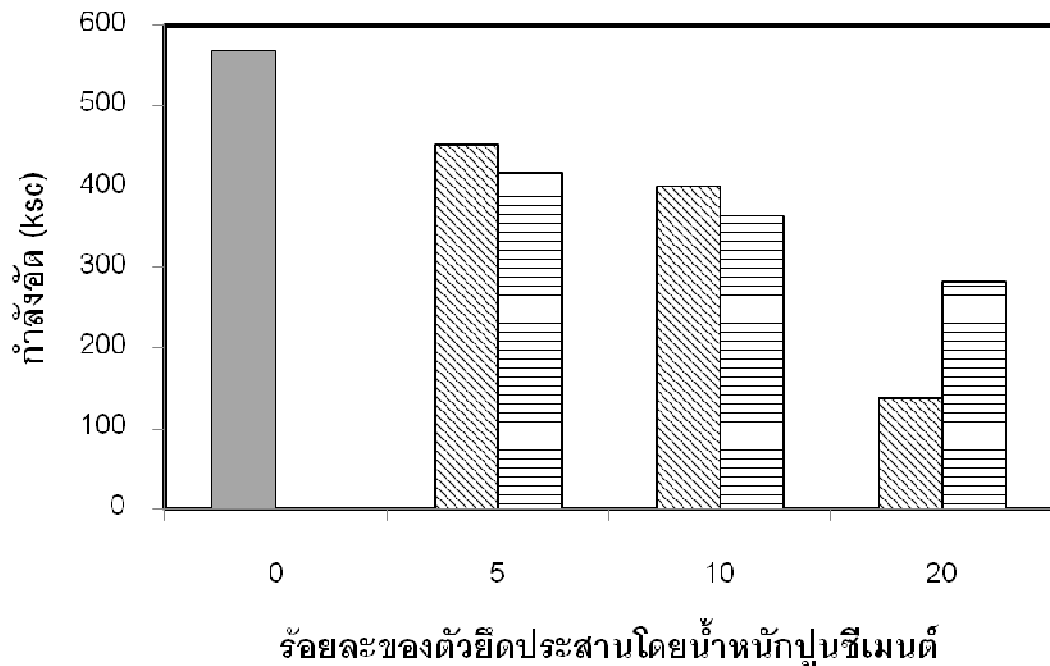
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวขนาดต่างๆ ( ■ ซีเมนต์เพสต์, ▨ ใยมะพร้าว)

พบว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าว ที่ความยาวเส้นใย 3, 6 และ 12 เซนติเมตร และเส้นใยยาวที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่น (Freeform) มีค่าเท่ากับ 2.26, 4.42, 4.55, 4.65 และ 4.93 เมกะพาสคัล ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความยาวมากขึ้น ส่งผลให้แผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวมีความต้านทานแรงดัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ และค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวที่เป็นเส้นใยยาวสานเป็นแผ่น มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.93 เมกะพาสคัลเช่นเดียวกับเส้นใยกาบหมาก

จากการศึกษาผลความยาวของเส้นใยต่อความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์ พบว่าแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่มีการจัดเรียงแบบสุ่มเป็นแผ่น (Freeform) มีค่าความต้านทานแรงดัดมากที่สุด เท่ากับ 4.92 และ 4.93 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ดังนั้นจึงนำการจัดเรียงแบบสุ่มเป็นแผ่นมาศึกษาต่อในส่วนของเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิลเป็นตัวยึดประสานในแผ่นซีเมนต์

#### 4.3 การศึกษาผลของกำลังอัดของซีเมนต์ผสมเจลาติน และซีเมนต์ผสมพลาสติกกรีไซเคิล

จากการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเจลาติน และซีเมนต์เพสต์ผสมพลาสติกกรีไซเคิล โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.40 และอัตราส่วนของเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล (P/C) เท่ากับ 0% (Cement paste), 5%, 10% และ 20% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.5



**รูปที่ 4.5** กราฟแสดงค่ากำลังอัดของตัวยึดประสาน ( ■ ซีเมนต์เพสต์, ▨ เจลาติน, ▨ พลาสติกกรีไซเคิล)

พบว่ากำลังอัดที่อายุการบ่มในสภาพห้องปฏิบัติการ 7 วัน กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์ผสมเจลาติน มีค่าเท่ากับ 569.7, 452.9, 400 และ 137.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมพลาสติกกรีไซเคิล มีค่าเท่ากับ 416.9, 364.7 และ 282.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จะเห็นว่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเจลาติน มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ru Wang (2005) พบว่าฟิล์มของพอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์ แต่เมื่อพอลิเมอร์มีปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟิล์มมีความหนา ส่งผลให้การยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์ลดลง เป็นเหตุให้กำลังอัดลดลง สำหรับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมพลาสติกกรีไซเคิลมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของพลาสติกกรีไซเคิลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yun-Wang Choi และคณะ (2005) ที่ทำการศึกษาการผสมพลาสติกโพลีเอทิลีนเทอพาทาเลท (Polyethylene Terephthalate) ขนาด 20 มม. ในคอนกรีต พบว่า เมื่อปริมาณพลาสติกโพลีเอทิลีนเทอพาทาเลทมากขึ้น ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องจากการยึดเหนี่ยวระหว่างพลาสติกและซีเมนต์มีค่าน้อย รวมทั้งพลาสติกเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยอีกด้วย (Al-Manaseer และคณะ, 1997) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษา



ของ Yoshihiko Ohama (1998) กล่าวคือการผสมพอลิเมอร์ลงในซีเมนต์นั้นไม่ได้ช่วยให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่จะช่วยเพิ่มความต้านแรงดัด และความเหนียวให้มากขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิลเป็นตัวยึดประสานในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย เท่ากับ 5% และ 10% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ เพื่อใช้ในการปรับปรุงสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใย

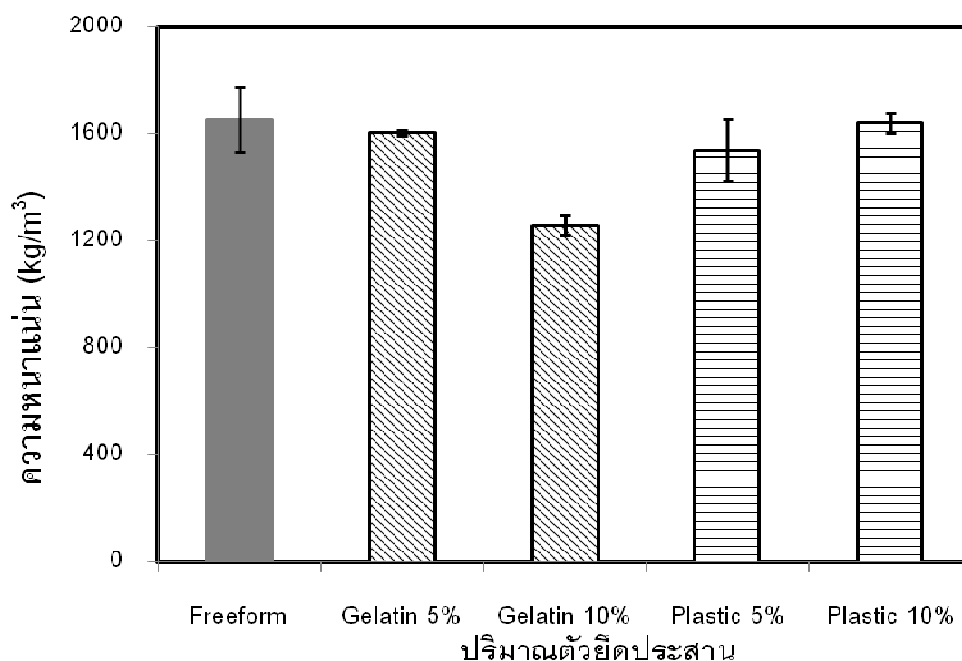
จากการศึกษากำลังอัดของซีเมนต์ผสมเจลาติน และซีเมนต์ผสมพลาสติกกรีไซเคิล มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิลเพิ่มขึ้น

#### **4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล**

##### **4.4.1 แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล**

###### **4.4.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่น**

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ที่อัตราส่วนเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล เท่ากับ 0% (Freeform), 5% และ 10% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.6

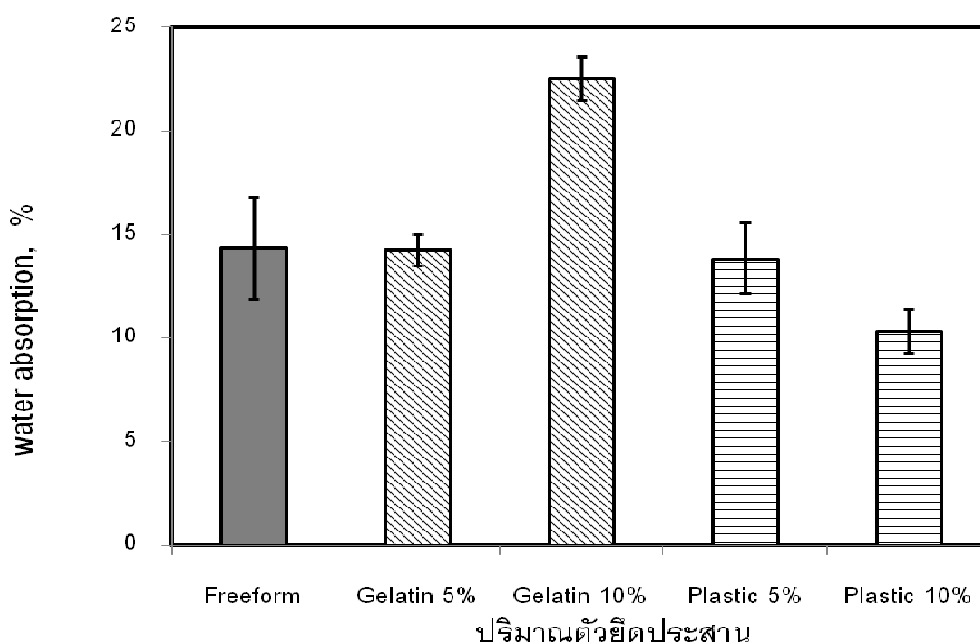


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีซเคิล (■ Freeform, ▨ เจลาติน, ▨ พลาสติกกรีซเคิล)

พบว่า ความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์ผสมเจลาตินจะมีความหนาแน่นลดลงเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันของเจลาตินที่ผสมในซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและอากาศ ทำให้เกิดฟองอากาศขณะผสม ส่งผลให้แผ่นซีเมนต์เกิดช่องว่าง และรูพรุนในซีเมนต์ ซึ่งเห็นได้จากที่อัตราส่วน 10% มีค่าความหนาแน่นลดลงประมาณ 24% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของ Freeform แต่ในส่วนของพลาสติกกรีซเคิลจะมีความหนาแน่นลดลงที่อัตราส่วน 5% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของ Freeform หลังจากนั้นเมื่อปริมาณของพลาสติกกรีซเคิลเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นมาจากขนาดของอนุภาคของพลาสติกที่ผสมลงในซีเมนต์จะกระจายลงในรูพรุนเป็นการลดช่องว่างในแผ่นซีเมนต์ ทำให้ค่าความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น

#### 4.4.1.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ที่อัตราส่วนของเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล 0% (Freeform), 5% และ 10% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล (■ Freeform, ▨ เจลาติน, ▨ พลาสติกกรีไซเคิล)

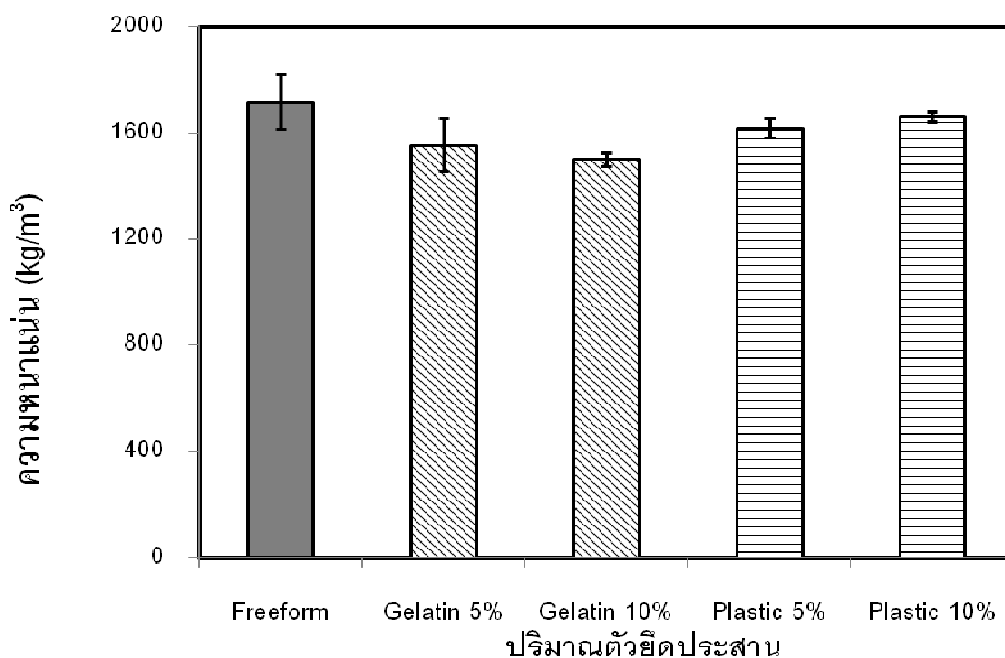
พบว่า การดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์ผสมเจลาตินจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากส่วนประกอบของเจลาตินประกอบด้วยกรดอะมิโน (Amino acids) ที่มีหมู่แอลคิล (Alkyl group) ชนิด glycine proline และ 4-hydroxyproline (Kunal Pal และคณะ, 2007) ซึ่ง proline ของกรดอะมิโนในกลุ่มนี้เป็น hydrophilic คือ ชอบน้ำ สามารถละลายน้ำได้ดี เพราะหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ของกรดอะมิโนในกลุ่มนี้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ รวมทั้งช่องว่าง และรูพรุนในซีเมนต์ที่เกิดจากการผสมเจลาติน เป็นผลให้แผ่นซีเมนต์เกิดการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเห็นได้จากที่อัตราส่วน 10% มี

ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 36% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการดูดซึมน้ำของ Freeform แต่ในส่วนของพลาสติกกรีไซเคิลจะมีการดูดซึมน้ำลดลง เมื่อปริมาณของพลาสติกกรีไซเคิลเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลาสติกนั้นไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ และอนุภาคของพลาสติกที่ผสมลงในซีเมนต์จะกระจายลงในรูพรุนของซีเมนต์ลดช่องว่างในแผ่นซีเมนต์ ซึ่งเห็นได้ค่าความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์มีค่าลดลง

#### 4.4.2 แผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล

##### 4.4.2.1 ผลการทดสอบความหนาแน่น

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ที่อัตราส่วนเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล เท่ากับ 0% (Freeform), 5% และ 10% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.8

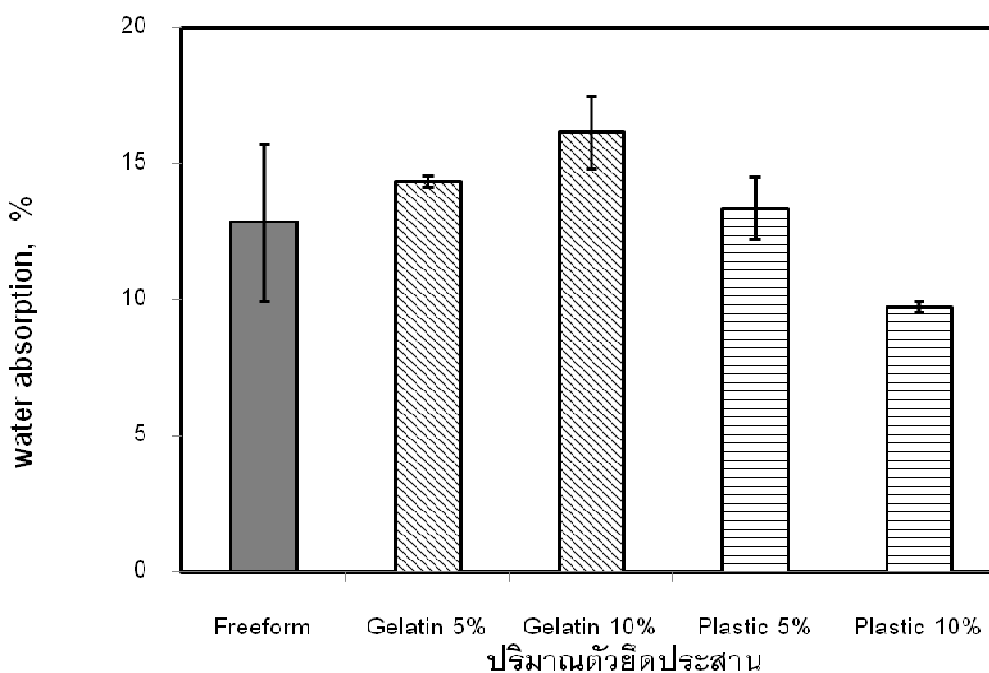


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล (■ Freeform, ▨ เจลาติน, ▤ พลาสติกกรีไซเคิล)

พบว่า ความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์ผสมเจลาตินจะมีความหนาแน่นลดลงเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่อัตราส่วน 10% มีค่าความหนาแน่นลดลงประมาณ 12% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของ Freeform แต่ในส่วนของพลาสติกกรีไซเคิลจะมีความหนาแน่นลดลงที่อัตราส่วน 5% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของ Freeform หลังจากนั้นเมื่อปริมาณของพลาสติกกรีไซเคิลเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิลมีแนวโน้มเช่นเดียวกับเส้นใยกาบหมาก

#### 4.4.2.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ที่อัตราส่วนของเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล 0% (Freeform), 5% และ 10% โดยนำหนักปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล (■ Freeform, ▨ เจลาติน, ▤ พลาสติกกรีไซเคิล)

พบว่า การดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์ผสมเจลาตินจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มมากขึ้น โดยที่อัตราส่วน 10% มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 21% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการดูดซึมน้ำของ Freeform แต่ในส่วนของพลาสติกกรีไซเคิลจะมีการดูดซึมน้ำลดลง เมื่อปริมาณของพลาสติกกรีไซเคิลเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิลมีแนวโน้มเช่นเดียวกับเส้นใยกาบหมาก

จากการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล

- ความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์ผสมเจลาตินจะมีความหนาแน่นลดลง เมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มมากขึ้น
- ความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์ผสมพลาสติกกรีไซเคิลจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของพลาสติกกรีไซเคิลเพิ่มมากขึ้น

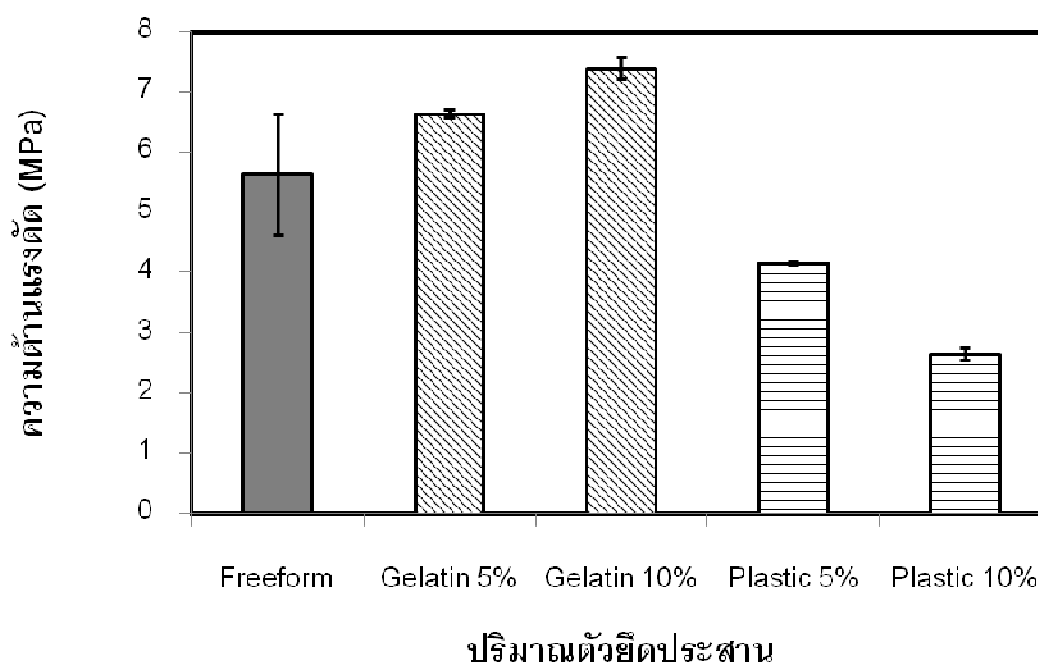
จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล

- การดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์ผสมเจลาตินจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มมากขึ้น
- การดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์ผสมพลาสติกกรีไซเคิลจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของพลาสติกกรีไซเคิลเพิ่มมากขึ้น

#### 4.5 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล

##### 4.5.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล

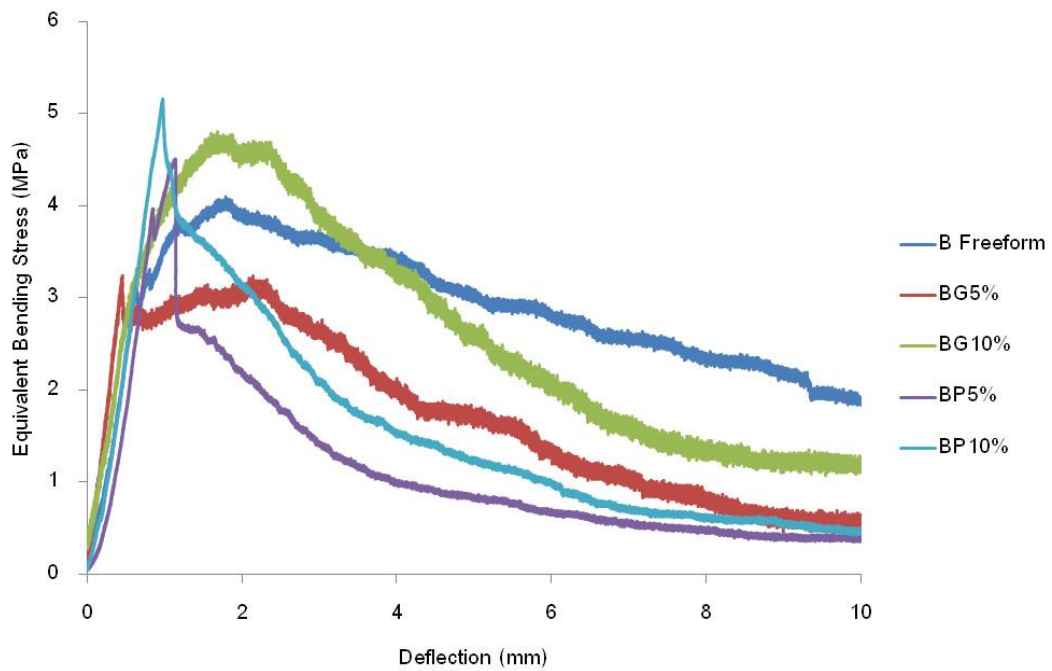
จากผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิลที่อายุการบ่มในสภาพห้องปฏิบัติการ 14 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.40 และอัตราส่วนของเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล (P/C) เท่ากับ 0% (Freeform), 5% และ 10% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล (■ เส้นใยกาบหมาก, ▨ เส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และ ▤ เส้นใยกาบหมากผสมพลาสติกกรีไซเคิล)

พบว่าที่อัตราส่วน 0% มีค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 5.63 เมกะพาสคัล ที่อัตราส่วนของเจลาติน 5% และ 10% มีค่าความต้านแรงดัด เท่ากับ 6.65 และ 7.40 เมกะพาสคัล ตามลำดับ และที่อัตราส่วนของพลาสติกกรีไซเคิล 5% และ 10% มีค่าความต้านแรงดัด เท่ากับ 4.17 และ 2.66 เมกะพาสคัล ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาตินที่อัตราส่วน 10% มีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.40 เมกะพาสคัล เนื่องจากโครงสร้างของเจลาติน จะประกอบด้วยหมู่อะมิโน และหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งจะปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ (Zhao-hui Pan และคณะ, 2006) และการเกิดฟิล์มบางๆของเจลาติน ซึ่งปฏิกิริยาทั้งหมดนี้จะช่วยทำให้การยึดเกาะระหว่างซีเมนต์กับเส้นใยกาบหมากดีขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดัดมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลของไฮโดรเจนบอนด์ระหว่างเส้นใยกับเส้นใย และเส้นใยกับซีเมนต์ที่เป็นสารพื้น (C. Asasutjarit และคณะ, 2007) ยังส่งผลต่อค่าความต้านแรงดัดที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย และเมื่อพิจารณาในส่วนของค่ามอดูลัสความเหนียว ดังรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.3 พบว่า แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน 10% มีความเหนียวมากกว่า Freeform และเมื่อปริมาณเจลาตินเพิ่มมากขึ้น ความเหนียวของแผ่นซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน และที่ อัตราส่วน 10% มีค่ามอดูลัสความเหนียวสูงสุด ซึ่งมาจากผลของการผสมเจลาตินในแผ่นซีเมนต์ แต่ในส่วน of ค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมพลาสติกกรีไซเคิล พบว่าค่าความต้านทานแรงดัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของพลาสติกกรีไซเคิลมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกที่ผสมลงในซีเมนต์นั้นเป็นอนุภาค และไม่เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์ โดยพลาสติกนั้นจะแทรกอยู่ระหว่างการยึดเกาะของซีเมนต์ ทำให้แรงยึดเกาะระหว่างซีเมนต์และพลาสติกนั้นมามีค่าน้อย และปริมาณพลาสติกที่มากขึ้นทำให้แรงยึดเกาะน้อยลง ส่งผลต่อความต้านทานแรงดัดที่ลดลง นอกจากนี้ค่ามอดูลัสความเหนียวของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมพลาสติกกรีไซเคิลมีค่าน้อยกว่า Freeform แต่เมื่อปริมาณของพลาสติกเพิ่มขึ้น ความเหนียวของแผ่นซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความเหนียวของแผ่นซีเมนต์ (ดังรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.3)



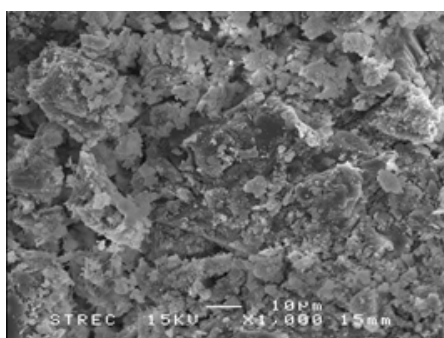


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความเค้นดัดเทียบเท่า (Equivalent Bending Stress) ของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล และค่าการแอ่นตัว (Deflection)

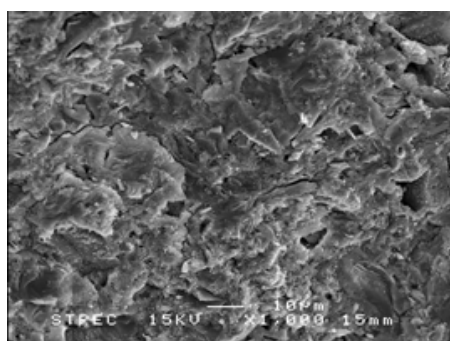
ตารางที่ 4.3 ค่ามอดูลัสความเหนียวของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล

ชนิดเส้นใย	ปริมาณเจลาติน (G) หรือพลาสติกกรีไซเคิล (P) (%)	มอดูลัสความเหนียว (MPa-mm)
เส้นใยกาบหมาก	-	284.52
เส้นใยกาบหมาก	G 5 %	184.46
เส้นใยกาบหมาก	G 10%	1651.62
เส้นใยกาบหมาก	P 5%	112.55
เส้นใยกาบหมาก	P 10%	153.62

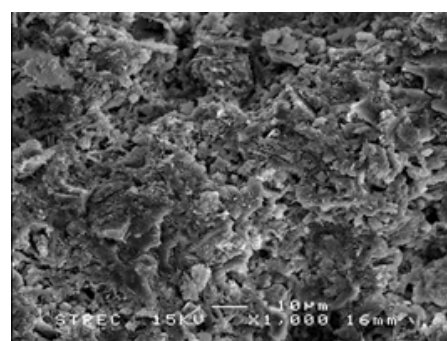
เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวของซีเมนต์ผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ลักษณะพื้นผิวของซีเมนต์ที่ผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ดังรูปที่ 4.12 (ข) และ (ค) จะมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบและมีช่องว่างลดลงกว่าเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ ดังรูปที่ 4.12 (ก) เนื่องมาจากการเกิดฟิล์มของเจลาติน และการแทรกของเจลาตินลงในซีเมนต์ เพื่อช่วยในการยึดประสาน และในส่วนของพลาสติกกรีไซเคิล อนุภาคของพลาสติกจะแทรกลงในรูพรุนและช่องว่างของซีเมนต์ เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของซีเมนต์



(ก)



(ข)

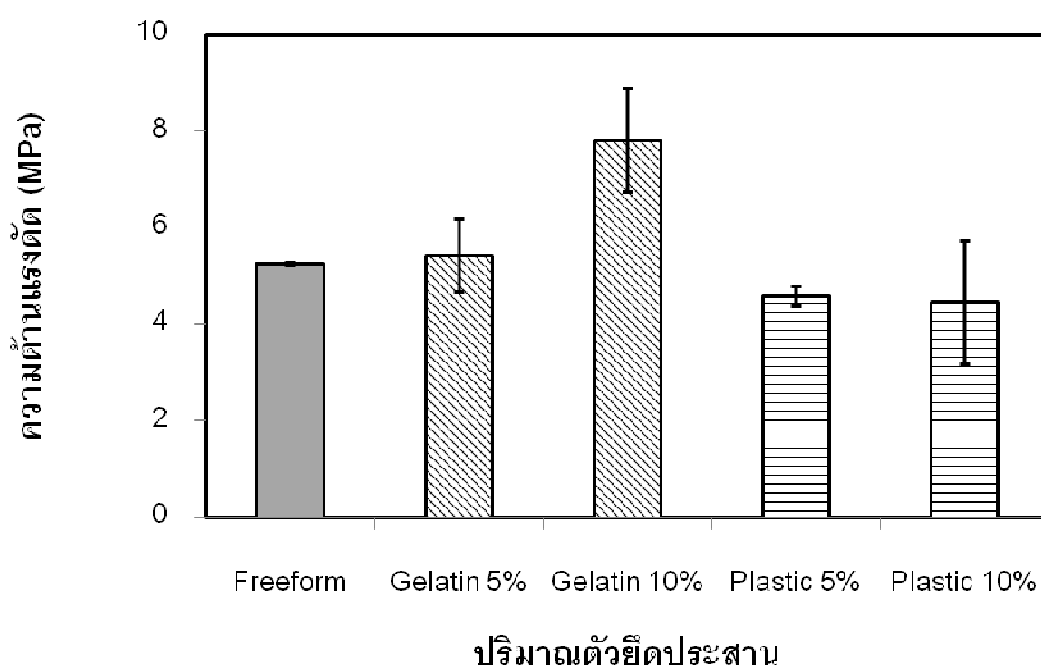


(ค)

รูปที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวของซีเมนต์: (ก) ซีเมนต์เพสต์, (ข) ซีเมนต์เพสต์ผสมเจลาติน และ (ค) ซีเมนต์เพสต์ผสมพลาสติกกรีไซเคิล

#### 4.5.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีซเคิล

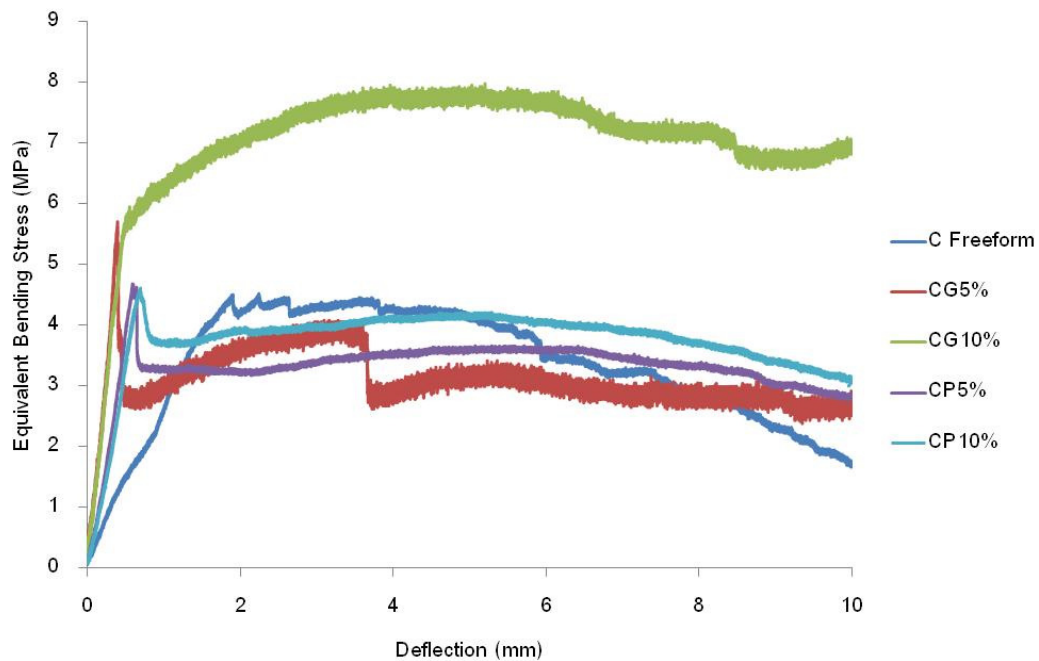
จากผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีซเคิลที่อายุการบ่มในสภาพห้องปฏิบัติการ 14 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.40 และอัตราส่วนของเจลาติน และพลาสติกกรีซเคิล (P/C) เท่ากับ 0% (Freeform), 5% และ 10% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีซเคิล (■ แผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าว, ▨ แผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และ ▤ แผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมพลาสติกกรีซเคิล)

พบว่าที่อัตราส่วน 0% มีค่าความต้านทานแรงดัดเท่ากับ 5.26 เมกะพาสคัล ที่อัตราส่วนของเจลาติน 5% และ 10% มีค่าความต้านทานแรงดัด เท่ากับ 5.43 และ 7.81 เมกะพาสคัล ตามลำดับ และที่อัตราส่วนของพลาสติกกรีซเคิล 5% และ 10% มีค่าความต้านทานแรงดัด เท่ากับ 4.59 และ 4.47 เมกะพาสคัล ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาตินที่อัตราส่วน 10% มีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.81 เมกะพาสคัล เช่นเดียวกับ

เส้นใยคาบหมาก และเมื่อพิจารณาในส่วนของค่ามอดูลัสความเหนียว ดังรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.4 พบว่า แผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน 10% มีความเหนียวมากกว่า Freeform และเมื่อปริมาณเจลาตินเพิ่มมากขึ้น ความเหนียวของแผ่นซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับค่ามอดูลัสความเหนียวของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมพลาสติกกรีไซเคิลมีค่ามากกว่า Freeform และเมื่อปริมาณของพลาสติกเพิ่มขึ้น ความเหนียวของแผ่นซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น และการเกาะกลุ่ม และความเหนียวของใยมะพร้าว ทำให้แผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมพลาสติกกรีไซเคิลนั้นไม่ขาดออกจากกัน ส่งผลให้ความเหนียวของแผ่นซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.4)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความเค้นดัดเทียบเท่า (Equivalent Bending Stress) ของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล และค่าการแอ่นตัว (Deflection)

ตารางที่ 4.4 ค่ามอดูลัสความเหนียวของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล

ชนิดเส้นใย	ปริมาณเจลาติน (G) หรือพลาสติกกรีไซเคิล (P) (%)	มอดูลัสความเหนียว (MPa-mm)
ใยมะพร้าว	-	342.68
ใยมะพร้าว	G 5 %	299.39
ใยมะพร้าว	G 10%	688.34
ใยมะพร้าว	P 5%	564.92
ใยมะพร้าว	P 10%	937.06

จากการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล

- ความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมเจลาตินจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มมากขึ้น และค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่อัตราส่วนเจลาติน 10% มีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.40 และ 7.81 เมกะพาสคัล ตามลำดับ
- ความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมพลาสติกกรีไซเคิลจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของพลาสติกกรีไซเคิลเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่อัตราส่วนพลาสติกกรีไซเคิล 10% มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.66 และ 4.47 เมกะพาสคัล ตามลำดับ

#### 4.6 สมบัติเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล

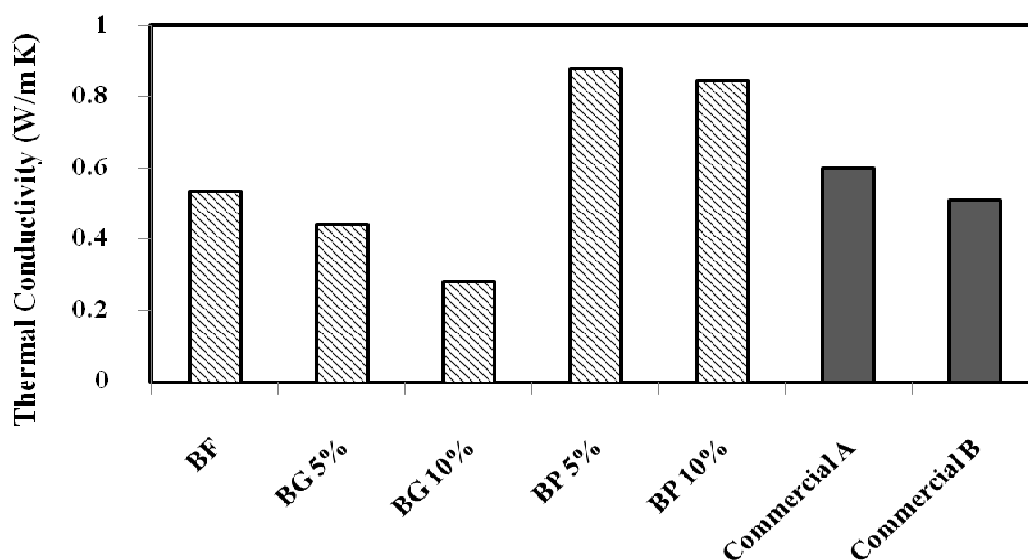
##### 4.6.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล

ในการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน จะทำการทดสอบหาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) โดยทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k-Value) ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Hot Disk Thermal Constant Analyzer (Hot Disk AB) ใช้เทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA) ได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ดังตารางที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล

Samples	Thermal Properties		
	Thermal Conductivity	Thermal Diffusivity	Specific Heat
	(W/mK)	(mm <sup>2</sup> /s)	(MJ/m <sup>3</sup> K)
Betel Freeform	0.5342	0.1722	3.1092
Betel Gelatin 5%	0.4438	0.4995	0.8920
Betel Gelatin 10%	0.2837	0.2736	1.0376
Betel Plastic 5%	0.8784	0.3616	2.4313
Betel Plastic 10%	0.8455	0.1681	5.0707
Commercial A	0.5994	0.4025	1.4897
Commercial B	0.5114	0.4381	1.1737

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน โดยการหาค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ที่อัตราส่วน 5% และ 10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล (▨) และที่มีขายในท้องตลาด (■)

พบว่า ค่านำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาตินมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดที่อัตราส่วน 10% มีค่าเท่ากับ 0.2837 W/mK และค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมพลาสติกกรีไซเคิล มีค่าการนำความร้อนต่ำสุดที่อัตราส่วน 10% เช่นกัน มีค่าเท่ากับ 0.8455 W/mK จะเห็นว่าเมื่อปริมาณของเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิลมากขึ้น ค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์จะมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของเจลาตินกับค่าการนำความร้อนของพลาสติกกรีไซเคิลพบว่า ค่าการนำความร้อนของเจลาตินมีค่าต่ำกว่าค่าการนำความร้อนของพลาสติกกรีไซเคิล เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันของเจลาตินที่ผสมในซีเมนต์ สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและอากาศ ทำให้เกิดฟองอากาศขณะผสม ส่งผลให้แผ่นซีเมนต์เกิดช่องว่าง และรูพรุนในซีเมนต์ แต่ในส่วน of พลาสติกกรีไซเคิลจะมีค่าการนำความร้อนมากกว่าค่าการนำความร้อนของเจลาติน เนื่องจากพลาสติกนั้นไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำและอากาศ และอนุภาคของพลาสติกที่ผสมลงในซีเมนต์จะกระจายลงในรูพรุนของซีเมนต์ลดช่องว่างในแผ่นซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย

ของ A. Benazzouk และคณะ (2008) ได้ทำการผสมอนุภาคยางลงในซีเมนต์ โดยมีอัตราส่วนของยางตั้งแต่ 0-50% พบว่า ค่าการนำความร้อนของซีเมนต์ที่ผสมยางที่ปริมาณ 50% มีค่าเท่ากับ 0.47 W/mK เมื่อทำการเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าเท่ากับ 1.16 W/mK โดยค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุที่ผสมลงในซีเมนต์มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ รวมถึงปริมาณอากาศ และรูพรุนภายในแผ่นซีเมนต์มีจำนวนมาก ส่งผลต่อการนำความร้อนลดลง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแผ่นซีเมนต์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจากพืชธรรมชาติที่มีขายในท้องตลาดทั้งสองแบบ โดยเลือกแผ่นที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับแผ่นซีเมนต์ในงานวิจัยนี้ พบว่า แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาตินที่อัตราส่วน 10% มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าแผ่นซีเมนต์แบบเดียวกันที่มีขายในท้องตลาดถึง 50%

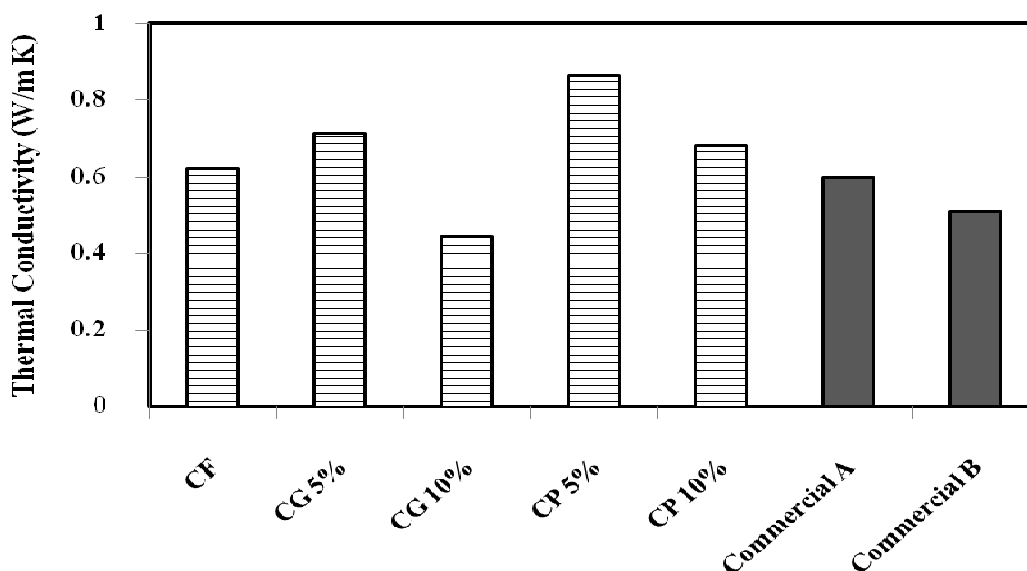
#### 4.6.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล

Samples	Thermal Properties		
	Thermal Conductivity (W/mK)	Thermal Diffusivity (mm <sup>2</sup> /s)	Specific Heat (MJ/m <sup>3</sup> K)
Coconut Freeform	0.6209	0.2073	3.0561
Coconut Gelatin 5%	0.7135	0.3386	2.1101
Coconut Gelatin 10%	0.4447	0.3926	1.1346
Coconut Plastic 5%	0.8638	0.3673	2.3527
Coconut Plastic 10%	0.6806	0.3196	2.1303
Commercial A	0.5994	0.4025	1.4897
Commercial B	0.5114	0.4381	1.1737



จากผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน โดยการหาค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไฮเซล ที่อัตราส่วน 5% และ 10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไฮเซล (▨) และที่มีขายในท้องตลาด (■)

พบว่า ค่านำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาตินมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดที่อัตราส่วน 10% มีค่าเท่ากับ 0.4447 W/mK และค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมพลาสติกกรีไฮเซลมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดที่อัตราส่วน 10% เช่นกัน มีค่าเท่ากับ 0.6806 W/mK ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อปริมาณของเจลาติน และพลาสติกกรีไฮเซลมากขึ้น ค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์จะมีค่าลดลง และค่าการนำความร้อนของเจลาตินมีค่าต่ำกว่าค่าการนำความร้อนของพลาสติกกรีไฮเซลเช่นเดียวกับเส้นใยกาบหมาก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแผ่นซีเมนต์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจากพืชธรรมชาติที่มีขายในท้องตลาดทั้งสองแบบ โดยเลือกแผ่นที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับแผ่นซีเมนต์ในงานวิจัยนี้ พบว่า แผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาตินที่อัตราส่วน 10% มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าแผ่นซีเมนต์แบบเดียวกันที่มีขายในท้องตลาด และแผ่นซีเมนต์เสริมใย

มะพร้าวผสมเจลาติน มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าแผ่นซีเมนต์แบบเดียวกันที่มีขายในท้องตลาดถึง 20%

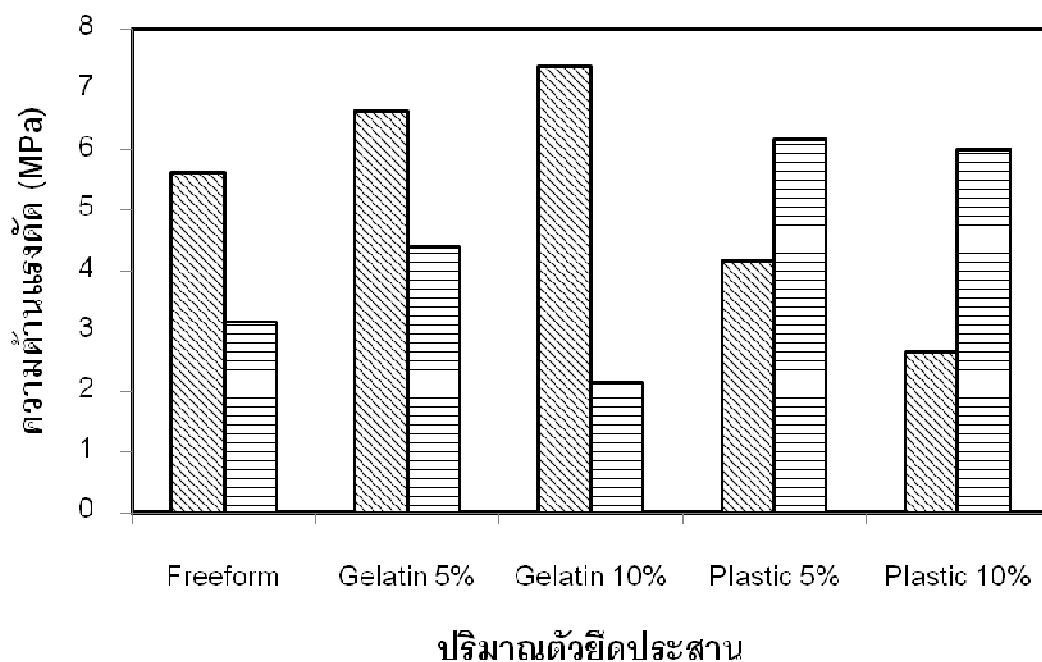
จากการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล

- ค่านำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมเจลาตินมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดที่อัตราส่วน 10% มีค่าเท่ากับ 0.2837 และ 0.4447 W/mK ตามลำดับ
- ค่านำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมพลาสติกกรีไซเคิลมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดที่อัตราส่วน 10% มีค่าเท่ากับ 0.8455 และ 0.6806 W/mK ตามลำดับ
- แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาตินมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าแผ่นซีเมนต์แบบเดียวกันที่มีขายในท้องตลาดถึง 50%

#### 4.7 การทนความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิลที่มีต่อความต้านแรงดัด

##### 4.7.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน

จากผลการทดสอบความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก ผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนที่ 250°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงรูปที่ 4.17



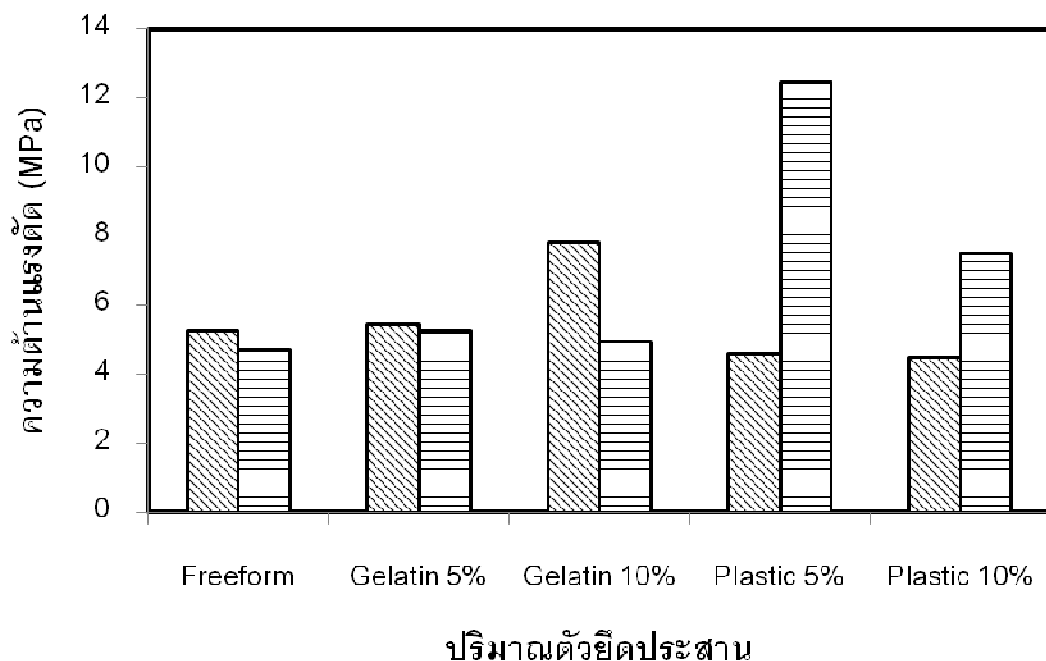
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าความต้านแรงตัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิลก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนที่ 250°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (▨ ก่อนการอบด้วยความร้อน, ▤ หลังการอบด้วยความร้อน)

พบว่าค่าความต้านแรงตัดก่อนการอบด้วยความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิลที่อัตราส่วน เท่ากับ 0% (Freeform), 5% และ 10% โดยนำหน้ากปูนซีเมนต์ เท่ากับ 5.63, 6.65, 7.40, 4.17 และ 2.66 เมกะพาสคัล ตามลำดับ และความต้านแรงตัดหลังการอบด้วยความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล เท่ากับ 3.16, 4.39, 2.14, 6.16 และ 6.00 เมกะพาสคัล ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความต้านทานแรงตัดก่อนการอบด้วยความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่ผสมเจลาติน และ Freeform มีค่ามากกว่าหลังการอบด้วยความร้อน แต่ค่าความต้านแรงตัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากผสมพลาสติกกรีไซเคิลหลังการอบด้วยความร้อนมีค่ามากกว่าก่อนการอบด้วยความร้อน จากการอบด้วยความร้อนนั้นจะทำให้เส้นใยในแผ่นซีเมนต์เกิดการเผาไหม้ เกิดรูพรุนในแผ่นซีเมนต์ส่งผลต่อการลดลงของความต้านทานแรงตัด และปริมาณของเจลาตินที่มีในแผ่นซีเมนต์ ยังส่งผลต่อการลดลงของความต้านทานแรงตัด เนื่องจากเจลาตินเป็นวัสดุที่ไม่ทนต่อความร้อน ทำให้แผ่นซีเมนต์ที่มีเจลาติน

ช่วยยึดประสานเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน แต่ในส่วนของพลาสติกกรีไซเคิลมีคุณสมบัติที่ทนต่อความร้อนที่สูง เมื่อพลาสติกกรีไซเคิลได้รับความร้อนจะเกิดการหลอมเหลว และเกิดการแทรกตัวลงในรูพรุนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใย ซึ่งเป็นการช่วยในการยึดประสานระหว่างซีเมนต์ไว้ด้วยกัน ลดการขยายตัวของรอยแตกร้าว (V. R. Riley และ I. Razi, 1974) ส่งผลให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และเป็นการเพิ่มความเหนียวให้กับแผ่นซีเมนต์

#### 4.7.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน

จากผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าว ผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนที่  $250^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิลก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนที่  $250^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (▨ ก่อนการอบด้วยความร้อน, ▤ หลังการอบด้วยความร้อน)

พบว่าค่าความต้านแรงดัดก่อนการอบด้วยความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิลที่อัตราส่วน เท่ากับ 0% (Freeform), 5% และ 10% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ เท่ากับ 5.26, 5.43, 7.81, 4.59 และ 4.47 เมกะพาสคัล ตามลำดับ และ ความต้านแรงดัดหลังการอบด้วยความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาติน และ พลาสติกกรีไซเคิล เท่ากับ 4.69, 5.25, 4.93, 12.45 และ 7.48 เมกะพาสคัล ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความต้านทานแรงดัดก่อนการอบด้วยความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวที่ผสม เจลาติน และ Freeform มีค่ามากกว่าหลังการอบด้วยความร้อนเช่นเดียวกับเส้นใยกาบหมาก แต่ค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใยมะพร้าวผสมเจลาตินก่อนและหลังอบด้วย ความร้อนมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากใยมะพร้าวมีการเผาไหม้ที่ช้ากว่าเส้นใยกาบ หมากทำให้มีรูพรุนในแผ่นซีเมนต์น้อยกว่า ยกเว้นที่อัตราส่วนของเจลาตินที่ 10% ที่มีปริมาณ เจลาตินมากจึงส่งผลต่อค่าความต้านแรงดัด แต่ค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมใย มะพร้าวผสมพลาสติกกรีไซเคิลหลังการอบด้วยความร้อนมีค่ามากกว่าก่อนการอบด้วยความ ร้อน โดยค่าความต้านทานแรงดัดหลังอบด้วยความร้อนมีค่าสูงสุด เท่ากับ 12.45 เมกะพาส คัล เนื่องจากใยมะพร้าวที่ยังเผาไหม้ไม่หมด และพลาสติกกรีไซเคิลที่รับความร้อนเกิดการ หลอมเหลว ซึ่งช่วยการยึดประสานในแผ่นซีเมนต์ทำให้ค่าความต้านแรงดัดในแผ่นซีเมนต์ เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับในส่วนของเส้นใยกาบหมาก

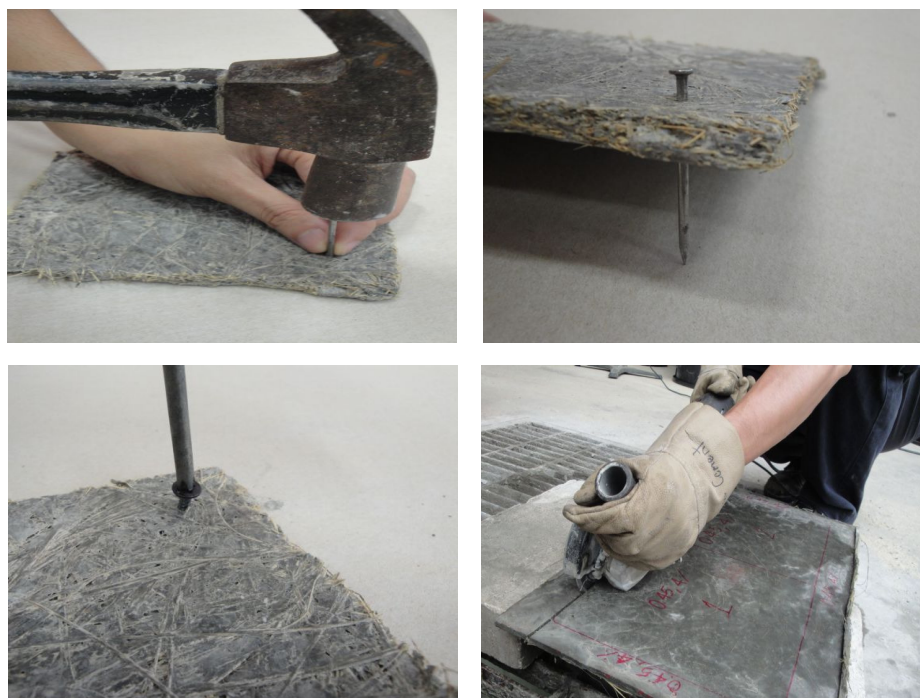
จากการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใย มะพร้าวผสมเจลาติน และพลาสติกกรีไซเคิล ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน

- ค่าความต้านทานแรงดัดก่อนการอบด้วยความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบ หมาก และใยมะพร้าวที่ผสมเจลาติน และ Freeform มีค่าความต้านทานแรงดัด มากกว่าหลังการอบด้วยความร้อน
- ค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าว ผสมพลาสติกกรีไซเคิลหลังการอบด้วยความร้อนมีค่าความต้านทานแรงดัดมากกว่า ก่อนการอบด้วยความร้อน และค่าความต้านทานแรงดัดหลังอบด้วยความร้อนของ

แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยมะพร้าวผสมพลาสติกกรีซไคเคิลมีค่าสูงสุด เท่ากับ 12.45 เมกะพาสคัล

#### 4.8 ผลการทดสอบการเลื่อย การตอก และการถอนตะปูของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและพลาสติกกรีซไคเคิล

จากการนำแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าวผสมเจลาตินและพลาสติกกรีซไคเคิลทดสอบการเลื่อย การตอก และการถอนตะปู เปรียบเทียบความยากง่าย ผลการทดสอบพบว่า แผ่นซีเมนต์สามารถเลื่อย การตอก และการถอนตะปูได้ง่าย โดยที่แผ่นซีเมนต์ไม่มีการแตกร้าวขณะทำการเลื่อย การตอก และการถอนตะปู ดังรูปที่ 4.19 ดังนั้นแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าวผสมเจลาตินและพลาสติกกรีซไคเคิลสามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆได้



รูปที่ 4.19 การทดสอบการเลื่อย การตอก และการถอนตะปูของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและพลาสติกกรีซไคเคิล

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งศึกษาผลของความยาวของเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่มีต่อความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์ ส่วนที่สองศึกษาผลของปริมาณเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิลที่มีต่อสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

ส่วนที่หนึ่ง เมื่อทำการเสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวลงในแผ่นซีเมนต์ พบว่าเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวมีความต้านทานแรงดัด และความเหนียวเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ โดยค่าความต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว ที่เป็นเส้นใยยาวสานเป็นแผ่น (Freeform) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.92 และ 4.93 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวของเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่ความยาวเส้นใย 3, 6 และ 12 เซนติเมตร เนื่องจากการใช้เส้นใยยาวสานเป็นแผ่น ทำให้ระยะห่างระหว่างเส้นใยดีขึ้น และสามารถกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นซีเมนต์ ทำให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น

ส่วนที่สองเมื่อผสมเจลาตินลงในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว พบว่าเมื่อปริมาณของเจลาตินที่ผสมในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์มีค่าลดลง ส่งผลให้แผ่นซีเมนต์มีน้ำหนักเบา แต่ปริมาณของเจลาตินที่เพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์ผสมเจลาตินมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องมาจากผลของเจลาติน ทำให้แผ่นซีเมนต์ผสมเจลาตินนี้เหมาะสมกับการใช้เป็นวัสดุภายในอาคาร สำหรับการผสมพลาสติกกรีไซเคิลลงในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว พบว่าเมื่อปริมาณของพลาสติกกรีไซเคิลที่ผสมในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่เพิ่มมากขึ้น

ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายของอนุภาคของพลาสติกกรีซเคลิทำให้ช่องว่างในแผ่นซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง ทำให้แผ่นซีเมนต์ผสมพลาสติกกรีซเคลินี้สามารถใช้เป็นวัสดุทั้งภายใน และภายนอกอาคาร

เมื่อทดสอบความต้านทานแรงดัดก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ  $250^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลของเจลาตินที่ผสมในแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าวช่วยเพิ่มการยึดประสานระหว่างเส้นใยและซีเมนต์เพสต์ เมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้านทานแรงดัดก่อนอบด้วยความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมเจลาตินมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวที่อัตราส่วนเจลาติน 10% มีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.40 และ 7.81 เมกะพาสคัล ตามลำดับ และเมื่อทำการอบด้วยความร้อนค่าความต้านทานแรงดัดมีค่าลดลง เนื่องจากเจลาตินเป็นวัสดุที่ไม่ทนต่อความร้อน สำหรับผลของพลาสติกกรีซเคลิที่มีต่อแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าว เมื่อปริมาณของพลาสติกกรีซเคลิเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานแรงดัดก่อนอบด้วยความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวมีค่าลดลง เนื่องจากพลาสติกที่ผสมลงในซีเมนต์นั้นเป็นอนุภาค และไม่เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์ และปริมาณพลาสติกที่มากขึ้นทำให้แรงยึดเกาะน้อยลง แต่เมื่อทำการอบด้วยความร้อนพลาสติกกรีซเคลิจะเกิดการหลอมเหลว และเกิดการแทรกตัวลงในรูพรุนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใย ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และเป็นการเพิ่มความเหนียวให้กับแผ่นซีเมนต์ ส่งผลให้แผ่นซีเมนต์ผสมพลาสติกกรีซเคลินี้มีความสามารถทนต่อความร้อนได้ และค่าความต้านทานแรงดัดหลังอบด้วยความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยมะพร้าวผสมพลาสติกกรีซเคลิที่อัตราส่วน 5% มีค่าสูงสุด เท่ากับ 12.45 เมกะพาสคัล

นอกจากนี้เมื่อทดสอบค่าการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมเจลาตินมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดที่อัตราส่วน 10% มีค่าเท่ากับ 0.2837 และ 0.4447 W/mK ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมเจลาตินมีค่านำความร้อนต่ำกว่าแผ่นซีเมนต์แบบเดียวกันที่มีขายในท้องตลาดถึง 50% และ 20% ตามลำดับ ส่วนค่านำความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสม



พลาสติกกรีซไคเคิลมีค่าการนำความร้อนน้อยลง เมื่อปริมาณของพลาสติกกรีซไคเคิลเพิ่มขึ้น ดังนั้นแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมเจลาตินและพลาสติกกรีซไคเคิลมีความเป็นฉนวนที่ดี ซึ่งช่วยประหยัดการใช้พลังงานภายในอาคาร

จากการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อนของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมเจลาตินและพลาสติกกรีซไคเคิล พบว่า แผ่นซีเมนต์นี้เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา และบาง โดยมีความแข็งแรง และความเหนียว รวมทั้งทนต่อความร้อน และมีการนำความร้อนที่ต่ำ นอกจากนี้แผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากและใยมะพร้าวผสมเจลาตินและพลาสติกกรีซไคเคิลนี้สามารถเลื่อย ตอก และถอนตะปูได้ง่าย โดยที่แผ่นซีเมนต์ไม่มีการแตกร้าว ทำให้แผ่นซีเมนต์นี้มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ที่ใช้ได้ทั้งภายใน และภายนอกอาคาร และมีลวดลายที่เกิดจากเส้นใยที่ใส่เสริมแรงในแผ่นซีเมนต์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อศึกษาการผลิตแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ผู้วิจัยขอเสนอแนะแนวทางการปรับปรุงและศึกษาเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

- ควรทำการศึกษาปรับปรุงคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยให้ดีขึ้น เช่น มีความเป็นฉนวนมากขึ้น ทนต่อความร้อนมากขึ้น การดูดซึมน้ำลดลง มีน้ำหนักที่เบา และบาง
- พัฒนาให้มีการผลิตแผ่นซีเมนต์ให้มีขนาดแผ่นที่ใหญ่ขึ้น เพื่อเพิ่มความหลากหลายของการนำไปใช้
- ควรทำการศึกษาการใช้เส้นใยสั้นในการผลิตแผ่นซีเมนต์ เนื่องจากเส้นใยสั้นมีราคาถูก และหาได้ง่ายกว่าเส้นใยยาวที่มีการเตรียมเส้นใยที่ยากกว่า และราคาแพง

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ทรงศักดิ์ มีมกระโทก. คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของมอร์ต้าเสริมเส้นใยสอยดาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.

เทอดศักดิ์ แก้วศรี. การศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเส้นใย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543.

บุศรินทร์ อินทรกำแหง ณ ราชสีมา. การพัฒนาแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษผสมเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.

วิชาญ ยอดน้ำคำ. การพัฒนา การผลิต แผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษอัดขึ้นรูป. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.

ศราวิณ ปัญจะผลินกุล. การศึกษาวัดคุณสมบัติเสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.

สัญญา นุรา. การศึกษาการนำเส้นใยปอแก้วมาใช้ในงานคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.

สถาพร ภูมิลาวัลย์. การพัฒนาแผ่นซีเมนต์เยื่อกระดาษเสริมเส้นใยแบบตาข่ายที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.

สิริพร วาสนาประเสริฐ. การพัฒนาผนังซีเมนต์เส้นใยพืช สำหรับอาคารไม่ปรับอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาคสาขาวิชาสถาปัตยกรรมบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2550.

อรรถจักร คคล้ายทอง และเมตตา เพ็ญผลเจริญ. คุณสมบัติของซีเมนต์โพสท์ผสมเส้นใยไมยราบ  
ยักษ์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, 2553.

### ภาษาอังกฤษ

A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi and M. Queneudec. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modeling. Construction and Building Materials 22 (2008): 573–579.

Al-Manaseer, A.A., Dalal, T.R. Concrete containing plastic aggregates. Concrete International 19 (1997): 47–52.

Bengi Arisoy and Hwai-Chung Wu. Material characteristics of high performance lightweight concrete reinforced with PVA. Construction and Building Materials 22 (2008): 635–645.

C. Asasutjarit , J. Hirunlabh , J. Khedari , S. Charoenvai , B. Zeghmati and U. Cheul Shin. Development of coconut coir-based lightweight cement board. Construction and Building Materials (2007): 277–288.

Gengying Li, Xiaohua Zhao, Chuiqiang Rong and Zhan Wang. Properties of polymer modified steel fiber-reinforced cement concretes. Construction and Building Materials 24 (2010): 1201–1206.

Kunal Pal, Ajit K. Banthia and Dipak K. Majumdar. Preparation and Characterization of Polyvinyl Alcohol–Gelatin Hydrogel Membranes for Biomedical Applications. AAPS PharmSciTech 8 (2007): E1-E5

Matthews, F.L. and Rawlings, R.D. Composite Material : Engineering and Science. London : Chapman and Hall, 1994.

- M A Mansur and M A Aziz. A study of jute fibre reinforced cement composites. The International Journal of Cement Composite and Lightweight Concrete 4 (1982): 75–82.
- Richard Morlat , Gilles Orange , Y. Bomal and Pierre Godard. Reinforcement of hydrated portland cement with high molecular mass water-soluble polymers. J Mater Sci. 42 (2007): 4858–4869.
- Ru Wang, Pei-Ming Wang and Xin-Gui Li. Physical and mechanical properties of styrene–butadiene rubber emulsion modified cement mortars. Cement and Concrete Research 35 (2005): 900–906.
- V. R. Riley and I. Razl. Polymer additives for cement composites: a review. Composites (1974): 27–33.
- William D. and Callister Jr. Material Science and Engineering. New York : John Wiley and Sons, 2003.
- Yoshihiko Ohama. Polymer-base admixtures. Cement and Concrete Composites 20 (1998): 189–212.
- Yun-Wang Choi, Dae-Joong Moon, Jee-Seung Chung and Sun-Kyu Cho. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. Cement and Concrete Research 35 (2005): 776–781.
- Zhaohui Pan, Pingping Jiang, Qingyu Fan, Baoan Ma and Heping Cai. Mechanical and Biocompatible Influences of Chitosan Fiber and Gelatin on Calcium Phosphate Cement. Biomedical Materials Research Part B (2006): 246–252.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### สารประกอบหลักและปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Cement compound and Hydration of Portland Cement)

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

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 ( $\text{CSH}_2$ ), Calcium Sulfate Hemihydrate ( $\text{CSH}_{1/2}$ ) ซึ่งยิปซัมหรือแคลเซียมซัลเฟตเป็นสารประกอบที่ให้ซัลเฟตแก่ของปูนซีเมนต์มากที่สุด

ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) หรือบางที่เรียกว่า Alite อยู่ประมาณร้อยละ 50-70 มีสารประกอบไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) หรือบางที่เรียกว่า Belite

ประมาณร้อยละ15-30 สารประกอบไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) ประมาณร้อยละ5-10 และ สารประกอบเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ ( $C_4AF$ ) ประมาณร้อยละ5-15

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำ สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำ หรือเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดสารประกอบใหม่ โดยสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกต 2 ชนิด จะทำปฏิกิริยากับน้ำ และได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(Calcium Silicate Hydrate) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์(Calcium Hydroxide) โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีความสำคัญที่ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการ เช่น การก่อตัว การแข็ง กำลัง การคงรูป

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ ( $CaO$ ) และซิลิเกต ( $SiO_2$ ) ในสัดส่วนประมาณ 3 ต่อ 2 โดยพื้นที่ผิวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีค่าประมาณ 30 ตารางเมตรต่อน้ำหนัก 1 กรัม ซึ่งในเฟสที่แข็งตัวแล้ว แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำหน้าที่เชื่อมประสานวัสดุต่างๆในคอนกรีต ทั้ง หิน ทราายให้ติดแน่น และแข็งตัว หรืออุณหภูมิของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาก็จะถูกจับยึดเข้าด้วยกัน



คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ปริมาตรคอนกรีตมักไม่เปลี่ยนแปลงมาก มีบางส่วนของคอนกรีตเป็นโพรงที่น้ำและอากาศแทรกอยู่ ซึ่งส่วนนี้ไม่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต แต่กำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับส่วนที่เป็นของแข็ง คือแคลเซียมซิลิเกตและมวลรวม

### ปฏิกิริยาระหว่างอัลคาไลกับมวลรวม (Alkaline Aggregate Reactivity)

การศึกษาเกี่ยวกับการแตกร้าวของคอนกรีตจากปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวมเริ่มครั้งแรกในปี 1940 โดย Stanton ซึ่งได้ทำการศึกษาโดยใช้มวลรวมในแถบอเมริกาเหนือ หลังจากนั้นจึงแพร่หลายไปในประเทศต่างๆ โดยปกติแล้ว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลังจากทำปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วจะมีสภาพเป็นด่างสูงคือ pH ประมาณ 12.5-13 การใช้มวลรวมที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้มวล

รวมทำปฏิกิริยากับต่างและเกิดความเสียหายได้ ปฏิกิริยาระหว่างต่างกับแร่ธาตุต่างๆ ในเนื้อของมวลรวมสามารถจำแนกออกได้ 3 ประเภทคือ

1. ปฏิกิริยาอัลคาไลคาร์บอเนต (Alkali-carbonate Reaction) ปฏิกิริยานี้มักเกิดกับมวลรวมจำพวกหินปูนโดโลมิติก (Dolomitic Limestone) ที่มีดินเหนียวแทรกตัวอยู่ในช่องว่างภายในเนื้อของหินและทำปฏิกิริยาที่มีชื่อว่า “Dedolomitization” สลายตัวเป็นผลึกของโดโลไมต์กับดินเหนียว ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวและตัวดินเหนียวเองก็จะทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศทำให้การขยายตัวมีมากเพิ่มขึ้น

2. ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิเกต (Alkali-silicate Reaction) เกิดจากต่างที่ได้หลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วทำปฏิกิริยากับซิลิเกตและน้ำ ทำให้เกิดการขยายตัว

3. ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา (Alkali-silica Reaction) เกิดจากมวลรวมที่มีองค์ประกอบของซิลิเซียส (Siliceous) ซึ่งมีความไวต่อปฏิกิริยาของต่างและน้ำ ก่อให้เกิดการขยายตัว



## ภาคผนวก ข

### ผลการทดลอง

การคำนวณหาความต้านทานแรงดัดหรือมอดุลัสแตกหัก

$$\text{ความต้านทานแรงดัด (MPa)} = \frac{3PL}{2be^2}$$

โดยที่ P = แรงกดที่ทำให้ชิ้นทดสอบหัก, N

L = ระยะระหว่างที่รองรับ, mm

b = ความกว้างของชิ้นทดสอบ, mm

e = ค่าเฉลี่ยของความหนาที่รอยแตกหักที่ 4 ตำแหน่ง, mm

ตัวอย่างการคำนวณหาความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่สานแบบสุ่ม เป็นแผ่น (Freeform)

โดยมี แรงกดที่ทำให้ชิ้นทดสอบหัก เท่ากับ 245.25 N

ระยะระหว่างที่รองรับ เท่ากับ 215 mm

ความกว้างของชิ้นทดสอบ เท่ากับ 250 mm

ค่าเฉลี่ยของความหนาที่รอยแตกหักที่ 4 ตำแหน่ง เท่ากับ 7.5275 mm

$$\text{ความต้านทานแรงดัด (MPa)} = \frac{3 \times 245.25(\text{N}) \times 215(\text{mm})}{2 \times 215(\text{mm}) \times 7.5275^2(\text{mm}^2)}$$

$$= 5.58 \text{ MPa}$$

การคำนวณหากำลังอัด

$$\text{กำลังอัด (ksc)} = f = \frac{P}{A}$$

โดยที่  $f$  = กำลังอัดของตัวอย่างซีเมนต์,  $\text{kg/cm}^2$

$P$  = น้ำหนักกดของตัวอย่างซีเมนต์,  $\text{kg}$

$A$  = พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงกดของตัวอย่างซีเมนต์,  $\text{cm}^2$

ตัวอย่างการคำนวณหากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

โดย น้ำหนักกดของตัวอย่างซีเมนต์ = 14100  $\text{kg}$

พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงกดของตัวอย่างซีเมนต์ = 26.54  $\text{cm}^2$

$$\begin{aligned} \text{กำลังอัด (ksc)} &= \frac{14100 \text{ (kg)}}{26.54 \text{ cm}^2} \\ &= 531.21 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

การคำนวณหาความหนาแน่น

$$\text{ความหนาแน่น (kg/m}^3\text{)} = \frac{m}{v}$$

โดยที่  $m$  = มวลของชิ้นทดสอบหลังจากอบแห้ง,  $\text{kg}$

$v$  = ปริมาตรของชิ้นทดสอบ,  $\text{m}^3$

ตัวอย่างการคำนวณหาความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่น (Freeform)

โดยที่ มวลของชิ้นทดสอบหลังจากอบแห้ง = 0.224 kg

ปริมาตรของชิ้นทดสอบ =  $0.146 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่น (g/cm}^3\text{)} &= \frac{0.224 \text{ (kg)}}{0.146 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)}} \\ &= 1540.42 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำ

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

โดยที่  $W_s$  = น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่อิ่มตัว, kg

$W_d$  = น้ำหนักของชิ้นทดสอบแห้ง, kg

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมากที่สานแบบสุ่มเป็นแผ่น (Freeform)

โดยที่ น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่อิ่มตัว = 0.341 kg

น้ำหนักของชิ้นทดสอบแห้ง = 0.294 kg

$$\begin{aligned} \text{ค่าการดูดซึมน้ำ(\%)} &= \frac{(W_s - W_d) \times 100}{W_d} \\ &= \frac{0.341 - 0.294 \text{ (kg)} \times 100}{0.294 \text{ (kg)}} \\ &= 16.01\% \end{aligned}$$

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยกาบหมาก และใยมะพร้าว

ชนิดเส้นใย	ขนาดเส้นใย (cm)	ความ หนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ปริมาณ ความชื้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความต้าน แรงดัด (MPa)
เส้นใยกาบหมาก	3	1793	1.80	10.94	4.83
เส้นใยกาบหมาก	6	1709	1.70	15.60	4.62
เส้นใยกาบหมาก	12	1700	1.70	14.38	4.74
เส้นใยกาบหมาก	Freeform	1650	5.37	14.35	4.92
ใยมะพร้าว	3	1683	2.32	13.43	4.42
ใยมะพร้าว	6	1805	2.71	9.07	4.55
ใยมะพร้าว	12	1627	8.44	15.52	4.65
ใยมะพร้าว	Freeform	1717	5.43	12.85	4.93

ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบแผ่นซีเมนต์เสริมเส้นใยผสมเจลาตินและพลาสติกกรีไซเคิล

ชนิดเส้นใย	ปริมาณ เจลาติน (G) หรือพลาสติก กรีไซเคิล (P) (%)	ความ หนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ปริมาณ ความชื้น (%)	การดูด ซึมน้ำ (%)	ความ ต้านแรง ดัด (MPa)	ค่าการนำ ความร้อน (W/mK)
เส้นใยกาบ หมาก	0	1650	5.37	14.35	5.63	0.5342
เส้นใยกาบ หมาก	(G) 5	1601	3.05	14.27	6.65	0.4438
เส้นใยกาบ หมาก	(G) 10	1258	3.45	22.52	7.40	0.2837
เส้นใยกาบ หมาก	(P) 5	1539	4.37	13.85	4.17	0.8784
เส้นใยกาบ หมาก	(P) 10	1640	3.91	10.33	2.66	0.8455
ใยมะพร้าว	0	1717	5.43	12.85	5.26	0.6209
ใยมะพร้าว	(G) 5	1554	4.49	14.35	5.43	0.7135
ใยมะพร้าว	(G) 10	1502	2.91	16.18	7.81	0.4447
ใยมะพร้าว	(P) 5	1619	3.95	13.38	4.59	0.8638
ใยมะพร้าว	(P) 10	1662	1.50	9.75	4.47	0.6806

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย สกฤต ปิยะธรรมมาภาพ เกิดเมื่อวันที่ 4 ตุลาคม 2528 ที่จังหวัดจันทบุรี เข้าศึกษา  
ระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียน ชลราษฎรอำรุง สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา  
เคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อ  
ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552