

การศึกษาเบื้องต้นแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจาก  
เส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล



นางสาวจรีพร นันทรักษ์  
นางสาวชัชวัญ ปิ่นแจ่ม  
นายปรัตถกร ทรัพย์ประภา

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**62142**  
วัน,เดือน,ปี.3.1.0.ค. 2549



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preliminary Study of Wood-Cement Board Prepared from  
Eucalyptus Thermo Mechanical Pulp (TMP)



Miss Jureeporn Nantaragsa

Miss Chukhwan Puncham

Mr. Paruttakorn Supprapah

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement  
for the Degree of Bachelor of Science  
Department of Chemistry  
Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


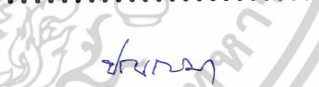
โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาเบื้องต้นการเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียม  
จากเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (TMP)

นักศึกษา นางสาวจรีพร นันทรักษ์  
นางสาวชัชวัญ บันแจ่ม  
นายปรตถกร ทรัพย์ประภา

ภาควิชา เคมี  
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปยุตธมา ศิริพันธ์โนน  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด  
คุณวรธรรม อุ๋นจิตติชัย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.ดร.ศักดิ์ ไตรศักดิ์	
กรรมการ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ	
กรรมการ ผศ.ดร.ปยุตธมา ศิริพันธ์โนน	

  
.....  
(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (TMP)	
นักศึกษา	นางสาวจรีพร นันทรักษ์	รหัสนักศึกษา 44050074
	นางสาวชุชวัญ ปันแจ่ม	รหัสนักศึกษา 44050079
	นายปรัดถกร ทรัพย์ประภา	รหัสนักศึกษา 44050098
ภาควิชา	เคมี คณะวิทยาศาสตร์	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2547	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด คุณวราธรรม อุ่นจิตติชัย	

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์ (Wood-Cement Board, WCB) จากเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (TMP) ในการเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์ ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำเป็น 1:0.4 ผสมเข้ากับเส้นใย ส่วนผสมถูกนำไปขึ้นรูปให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป บ่มภายใต้ความชื้นสูงเป็นเวลา 3 วัน และอบแห้งที่ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น การพองตัวเมื่อแช่น้ำ ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ โดยศึกษาผลของขนาดเส้นใย (20 20-50 และ 50-100 เมช) ปริมาณเส้นใย (5 7.5 และ 10% โดยน้ำหนัก) และการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่า เมื่อขนาดของเส้นใยลดลงทำให้การดูดความชื้นและการพองตัวเมื่อแช่น้ำของแผ่นไม้อัดซีเมนต์เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อความหนาแน่น ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้การดูดความชื้นและการพองตัวเมื่อแช่น้ำเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่าความหนาแน่น ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอลดลง แผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอดีกว่า ผลที่ได้จาก SEM-EDS สามารถยืนยันได้ว่าการก่อตัวของซิลิกาจากโซเดียมซิลิเกตที่ผิวของเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special project title	Preliminary Study of Wood-Cement Board Prepared from Eucalyptus Thermo Mechanical Pulp (TMP)	
Student	Miss Jureeporn Nantaragsa	ID 44050074
	Miss Chukhwan Puncham	ID 44050079
	Mr. Paruttakorn Supprapah	ID 44050098
Special project advisors	Asst.Prof.Dr. Punnama Siriphannon	
	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud	
	Mr. Woratham Oonjittichai	
Department	Chemistry	
Academic Year	2004	

### Abstract

This research is preliminary study of Wood-Cement Board (WCB) prepared by Thermal Mechanical Pulp (TMP) of Eucalyptus fibers. Wood-Cement Boards were made at 1:0.4 of cement to water ratio, mixed with Eucalyptus fiber. The mixtures were shaped up by compression machine, cured for 3 days under high relative humidity (RH) condition, and oven dried at 100 °C for 1 day. The WCB were tested for properties, i.e., density, moisture, swelling when immersed in water, flexural strength, and flexural modulus. Effects of fiber sizes (20, 20-50 and 50-100 mesh), amount of fibers (5, 7.5 and 10% by weight), and fiber treatment by sodium silicate solution were studied. The results showed that when the size of fiber reduced, the moisture absorption and swelling of WCB were increased. However, density, flexural strength and flexural modulus of WCB were hardly changed by adding the fibers. When amount of the fibers was increased, the moisture absorption and swelling of WCB were increased, while the density, flexural strength and flexural modulus were decreased. By treating the fibers with sodium silicate, increase in flexural strength and flexural modulus were found. The SEM-EDS results showed the evidence of silica formation from sodium silicate on the surface of the fiber.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้ จะสำเร็จลุล่วงมิได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่คณะผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปยุตตมา ศิริพันธ์โนน และ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณวรธรรม อุณจิตติชัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และให้ความอนุเคราะห์เส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล และที่ยึดแม่แบบโลหะที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ศักดิ์ ไตรศักดิ์ และ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้อง สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท วิบูลย์วัฒนาอุตสาหกรรม จำกัด ที่กรุณาให้เยี่ยมชมโรงงานและให้คำแนะนำสำหรับโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาและคอยช่วยเหลือตลอดระยะเวลา 4 ปี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ประจำอาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยี เจ้าหน้าที่ธุรการ และแม่บ้าน ที่ให้ความช่วยเหลือและความสะดวกในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ เคมีอุตสาหกรรม ปี4 ทุกคนที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำจนประสบความสำเร็จในด้านการศึกษา

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมาย ที่มีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

จวีพร นันทรักษ์

ชูขวัญ ปิ่นแจ่ม

ปรัตถกร ทรัพย์ประภา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีการนำออกไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต ถือว่าผิดกฎหมาย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 คอนกรีตคืออะไร.....	4
2.2 องค์ประกอบของคอนกรีต.....	4
2.3 หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนผสม.....	5
2.4 ปูนซีเมนต์.....	6
2.5 ปฏิกริยาไฮเดรชัน.....	10
2.6 องค์ประกอบของเพสต์.....	13
2.7 กระบวนการแข็งตัว.....	15
2.8 การบ่ม.....	16
2.9 การหดตัวและพองตัว.....	17
2.10 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers).....	18
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.3 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	34
3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	34
3.4.2 การเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์.....	34
3.4.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	37
3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	41
4.1 ผลการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต.....	41
4.1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วย เทคนิค EDS.....	41
4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี.....	44
4.2 การทดสอบทางกายภาพ.....	45
4.2.1 ความหนาแน่น.....	45
4.2.2 ความชื้น.....	46
4.2.3 การพองตัวเมื่อแช่น้ำ.....	48
4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	50
4.3.1 ความแข็งแรงโค้งงอ.....	50
4.3.2 โมดูลัสโค้งงอ.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	56
ภาคผนวก ก การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์.....	58
ภาคผนวก ข ผลของการทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	63
ภาคผนวก ค ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	67
ภาคผนวก ง ค่ามาตรฐานแผ่นไม้อัดซีเมนต์เกรดการค้า.....	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ใช้ในงานก่อสร้าง.....	2
รูปที่ 2.1 แผนภูมิการเรียกชื่อองค์ประกอบต่างๆ ของคอนกรีต.....	4
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต.....	11
รูปที่ 2.3 กระบวนการห่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต.....	12
รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของเพสต์.....	13
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด การรั่วซึมสัมพัทธ์ของน้ำของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ กัน.....	14
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์กำลังอัดและระยะเวลาการบ่มคอนกรีต.....	15
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำลังอัด อุณหภูมิการบ่ม อายุคอนกรีตขณะทดสอบ.....	16
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัว ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และปริมาณน้ำในคอนกรีต.....	18
รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	19
รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส.....	20
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของลิกนิน.....	20
รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้.....	21
รูปที่ 2.13 ลักษณะของต้นยูคาลิปตัส.....	21
รูปที่ 3.1 แม่พิมพ์โลหะสำหรับแผ่นไม้อัดซีเมนต์ ขนาด 15 x 1 x 1 cm <sup>3</sup> .....	31
รูปที่ 3.2 แผนผังการดำเนินงาน.....	33
รูปที่ 3.3 (ก) แม่แบบโลหะที่ทำน้ำมันซิลิโคนและที่ขอบแม่แบบโลหะมียางกันไว้ (ข) เทของผสมที่เตรียมได้ลงในแม่แบบโลหะ.....	35
รูปที่ 3.4 การกดอัดแผ่นไม้อัดซีเมนต์ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (ก) ก่อนกด (ข) หลังกด.....	35
รูปที่ 3.5 การยึดแม่แบบโลหะให้คงรูป.....	36
รูปที่ 3.6 การบ่มที่ความชื้นสูง.....	36
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด (N) กับการแอนตัว (mm).....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 SEM Micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อน เชิงกลที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์.....	42
รูปที่ 4.2 SEM Micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อน เชิงกลที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์.....	42
รูปที่ 4.3 ลักษณะเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกลที่ไม่ผ่าน (ก) และผ่าน (ข) การบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์.....	43
รูปที่ 4.4 IR spectrum ของเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (TMP) ที่ไม่ผ่าน และผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์.....	44
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดความชื้นกับปริมาณเส้นใยของ แผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยทั้ง 3 ขนาดที่ไม่ผ่านการบำบัด ด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์.....	47
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดความชื้นกับปริมาณเส้นใยของ แผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยทั้ง 3 ขนาดที่ผ่านการบำบัด ด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์.....	47
รูปที่ 4.7 การพองตัวเมื่อแช่น้ำของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยที่ไม่ผ่าน (ก) และผ่าน (ข) การบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์.....	49
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงโค้งงอกับปริมาณเส้นใยของ แผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยยูคาลิปตัสขนาด 20-50 mesh ที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์.....	51
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสโค้งงอกับปริมาณเส้นใยของ แผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยยูคาลิปตัสขนาด 20-50 mesh ที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูป ก-1 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ของเส้นใยยูคาลิปตัสชนิด เยื่อความร้อนเชิงกลที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟเกต.....	59
รูป ก-2 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ของเส้นใยยูคาลิปตัสชนิด เยื่อความร้อนเชิงกลที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟเกต.....	60
รูป ก-3 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ ที่เตรียมจากเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกลที่ไม่ผ่านการบำบัด ด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟเกต.....	61
รูป ก-3 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ ที่เตรียมจากเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกลที่ผ่านการบำบัด ด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟเกต.....	62

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	8
ตารางที่ 2.3 สมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	9
ตารางที่ 2.4 กระบวนการห่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต.....	13
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ ยูคาลิปตัส ความมาตุเลนซีส.....	22
ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยไม้ TMP และ CP.....	24
ตารางที่ 3.1 ขนาดของอนุภาคของปูนซีเมนต์ และเส้นใยยูคาลิปตัสที่เลือกใช้.....	34
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของวัสดุดิบสำหรับการเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์.....	37
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบด้วย EDS แสดงปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ เส้นใยที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต.....	43
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่น.....	45
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการพองตัวเมื่อแช่น้ำของแผ่นไม้อัดซีเมนต์.....	48
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ.....	50
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบมอดุลัสโค้งงอ.....	52
ตาราง ข-1 น้ำหนักและปริมาตรของแผ่นคอนกรีตตัวอย่าง.....	64
ตาราง ข-2 น้ำหนักก่อนอบแห้งและหลังอบแห้ง.....	65
ตาราง ข-3 ความหนาก่อนแช่น้ำและหลังแช่น้ำ.....	66
ตาราง ค-1 แสดงค่าการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกดของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ แบบใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด.....	68
ตาราง ค-1 แสดงค่าการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกดของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ แบบใช้เส้นใยไม่ผ่านการบำบัด.....	70
ตาราง ง-1 สมบัติของแผ่นไม้อัดซีเมนต์เกรดการค้า.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

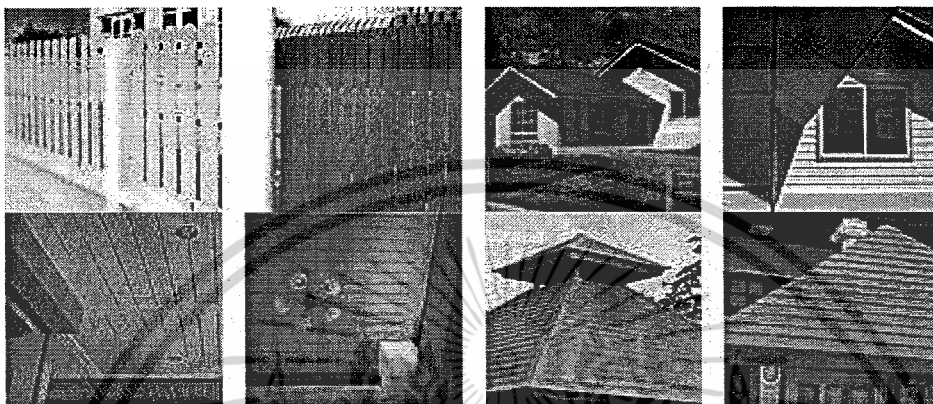
### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ไม้ (Wood) ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน นอกจากการนำไม้มาใช้เป็นโครงสร้างหลักของอาคาร ยังมีการใช้ไม้เพื่อการตกแต่งและการผลิตเฟอร์นิเจอร์ในหลายๆ ลักษณะ เนื่องจากไม้ให้ความสวยงามและมีสมบัติที่ดีหลายประการ อีกทั้งไม้ยังเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และสามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ จากความนิยมในการใช้ไม้เพื่องานประเภทต่างๆ เป็นผลให้ปริมาณไม้ที่ผลิตจากการปลูกป่าเชิงพาณิชย์ภายในประเทศไม่เพียงพอกับความต้องการใช้งานจึงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งไม้นำเข้ามีราคาสูงและมีปริมาณจำกัด จึงทำให้เกิดปัญหาการลักลอบตัดไม้ทำลายป่า ป่าไม้ถูกทำลายมากขึ้นทุกปี จนแทบไม่มีป่าสมบูรณ์เหลืออยู่ในประเทศไทย ส่งผลให้เกิดปัญหาธรรมชาติขาดความสมดุล เกิดปัญหาอื่นๆ ตามมา เช่น ฝนไม่ตกตามฤดูกาล ปรากฏการณ์โลกร้อน เป็นต้น นอกจากนี้ไม้ยังมีข้อเสียบางประการ เช่น ต้องการการดูแลรักษาทุกๆ 2-3 ปี เพื่อรักษาเนื้อไม้ไม่ให้บิดงอและแตกหัก เกิดการผุกร่อน ดูดน้ำมากเกินไป เกิดการบวมตัวสูงและถูกทำลายโดยแมลงต่างๆ เช่น ปลวก มอด ได้ง่าย จากข้อเสียเหล่านี้ทำให้มีการพัฒนาวัสดุอื่นมาใช้งานแทนไม้ เรียกว่า วัสดุทดแทนไม้

แผ่นไม้อัดซีเมนต์ (Wood-Cement Board ; WCB) เป็นหนึ่งในวัสดุทดแทนไม้ [1] ถูกพัฒนาขึ้นโดยการนำไม้ปลูกโตเร็วมาบดย่อยและผสมกับซีเมนต์แล้วกดอัดด้วยแรงกดสูง เป็นการนำสมบัติเด่นของส่วนผสมสองชนิดมารวมไว้ด้วยกัน จึงแข็งแรงทนทาน ทนแดด ทนฝน ทนไฟ ทนต่อความชื้น ไม่ผุกร่อน ไม่ยี้ดหรือหดตัวมาก ทนต่อปลวก มอด เชื้อรา และแมลงกินไม้ต่างๆ เหมือนซีเมนต์ แต่มีน้ำหนักเบา ยึดหยุ่น ใช้งานง่าย ป้องกันความร้อน มีความสวยงามเหมือนไม้ จึงเป็นวัสดุก่อสร้างทันสมัย ใช้งานสะดวก และมีสมบัติเด่นเหนือวัสดุอื่นๆ โดยใช้งานได้ทั้งภายในและภายนอก และการใช้งานเฉพาะด้านต่างๆ ในปัจจุบันแผ่นไม้อัดซีเมนต์ (Wood-Cement Board) เป็นที่นิยมในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลาย แผ่นไม้อัดที่เตรียมจากซีเมนต์กับไม้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติดีกว่าไม้อัดธรรมดา และยังไม่มีปัญหาเรื่องการเกิดก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง เพื่อตอบสนององรสนิยมของการใช้งาน และเพิ่มทางเลือกให้กับการตกแต่งอาคารบ้านเรือน ให้หลากหลายตามความต้องการ [2] นอกจากนี้แผ่นไม้อัดซีเมนต์ดังกล่าวยังมีความเป็นฉนวน มีความสามารถในการดูดกลืนเสียง มีน้ำหนักเบาทำให้เสาและคานไม่ต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับน้ำหนักมาก จึงเป็นการลดต้นทุนในงานก่อสร้าง และลดปริมาณการใช้ไม้ลงได้ นอกจากนี้จึงมีการนำไปใช้ทำวัสดุก่อสร้าง เช่น รั้ว หลังคา ผนัง เพดาน ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ใช้ในงานก่อสร้าง [3]

ในโครงการพิเศษนี้ จึงได้แนวคิดที่จะนำเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยจากต้นยูคาลิปตัส ชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (Thermomechanical Pulp ; TMP) มาผสมลงไปในคอนกรีตโดยศึกษาผลของขนาดของเส้นใย ปริมาณของเส้นใย และการปรับปรุงเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่มาก เป็นที่นิยมปลูกเพื่อการค้า เพราะมีอัตราการเจริญเติบโตสูง ปลูกง่าย โตเร็ว ให้น้ำน้อย ให้น้ำหวาน ราคาถูก และสามารถปลูกทดแทนได้ในระยะเวลาสั้น อีกทั้งการนำสมบัติเด่นของเส้นใยที่ช่วยกระจายแรงได้ดี มาปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้มีความสามารถในการรับแรงและมีน้ำหนักเบา อีกทั้งยังเป็นการนำเส้นใยธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

เพื่อหาอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบที่เหมาะสม ในการเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์จากคอนกรีตผสมเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (Thermomechanical Pulp; TMP) ในการเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณและขนาดของเส้นใยธรรมชาติ ผลของการปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของแผ่นไม้อัดซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเตรียมเส้นใย
- 2) ศึกษาอัตราส่วนของวัตถุดิบ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ น้ำ และเส้นใย ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นแผ่นไม้อัดซีเมนต์
- 3) ศึกษาสมบัติของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ ได้แก่
  - สมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น ความชื้น และการพองตัวเมื่อแช่น้ำ
  - สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ
- 4) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ ได้แก่
  - ขนาดและปริมาณเส้นใย
  - ผลของการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถผลิตแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่มีน้ำหนักเบาและมีสมบัติเชิงกลที่ดี
- 2) สามารถใช้เป็นวัสดุก่อสร้างและมีความเป็นไปได้ในการใช้งานในเชิงพาณิชย์
- 3) สามารถนำความรู้ที่ได้เป็นพื้นฐานในการศึกษาแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ผสมเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่นๆ
- 4) เป็นการนำเอาเส้นใยธรรมชาติที่มีมูลค่าต่ำมาทำให้เกิดประโยชน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 คอนกรีตคืออะไร [4]

คอนกรีต คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจวบจนปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งทางด้านราคาและคุณสมบัติต่างๆ คอนกรีตประกอบด้วย ส่วนผสม 2 ส่วนคือ วัสดุประสาน อันได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต ผสมกับวัสดุผสม อันได้แก่ ทราย หิน กรวด เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวได้อยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นแปรสภาพเป็นของแข็ง มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

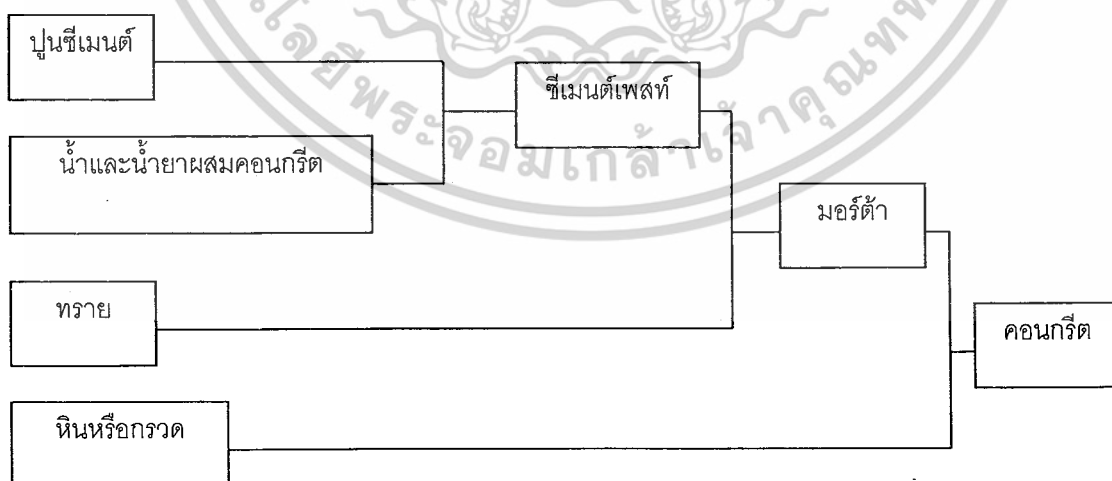
#### 2.2 องค์ประกอบของคอนกรีต [4]

คอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต โดยเมื่อนำส่วนผสมต่างๆ เหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)

ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทราย เรียกว่า มอร์ต้า (Mortar)

มอร์ต้าผสมกับหินหรือกรวด เรียกว่า คอนกรีต (Concrete)



รูปที่ 2.1 แผนภูมิการเรียกชื่อองค์ประกอบต่างๆ ของคอนกรีต [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนผสม [4]

### 2.3.1 ซีเมนต์เพสต์

หน้าที่ของซีเมนต์เพสต์มีดังนี้

- เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม
- หล่อลื่นคอนกรีตสดขณะเทหล่อ
- ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ

สมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับ

- สมบัติของปูนซีเมนต์
- อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
- ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

### 2.3.2 มวลรวม

หน้าที่ของมวลรวมมีดังนี้

- เป็นตัวแทรกประสานราคาถูกที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์
- ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก

สมบัติของมวลรวมที่สำคัญ

- มีความแข็งแรง
- การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ
- คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี
- ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี

### 2.3.3 น้ำ

หน้าที่หลักของน้ำสำหรับงานคอนกรีตมี 3 ประการ

- ใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่างๆ
- ใช้ผสมทำคอนกรีต
- ใช้บ่มคอนกรีต

หน้าที่หลักของน้ำในฐานะที่ใช้ผสมทำคอนกรีตยังแบ่งได้อีก 3 ประการ

- ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์
- ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ขออนุญาต  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ขออนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 น้ำยาผสมคอนกรีต

หน้าที่สำคัญของน้ำยาผสมคอนกรีต คือ ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่เหลว และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในด้านต่างๆ เช่น เวลาการก่อตัว ความสามารถเทได้กำลังอัด และความทนทาน เป็นต้น

## 2.4 ปูนซีเมนต์ [5]

ปูนซีเมนต์เป็นผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ (หิน ปูน กับดินเหนียว หรือ ดินดาน) จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอะลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงและทนทานเมื่อแข็งตัวแล้ว ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้นขณะเริ่มแข็งตัว

### 2.4.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญซึ่งใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์อาจจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ (Calcareous Materials) ซึ่งอยู่ในรูปของ  $\text{CaCO}_3$  ได้แก่ หินปูน (Limestone) ดินสอพองหรือชอล์ค (Chalk) ดินปูนขาว (Marl)
- 2) ประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอน ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมิเนียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นส่วนใหญ่ (Argillaceous Materials) ได้แก่ ดินดานหรือหินเชล (Shale) ดินดำหรือดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate)

### 2.4.2 กรรมวิธีในการผลิต

เมื่อนำวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์มาเผาในหม้อปฏิกิริยา จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง

เหลือไว้เพียง  $\text{CaO}$

ขั้นตอนที่ 3) เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ระหว่างหินปูนและดินสอพอง ซิลิกา

อะลูมินา และเหล็กออกไซด์ จากดินดำ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4) เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยขบวนการการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่  $\text{CaO}$   $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์
- ออกไซด์รอง ได้แก่  $\text{MgO}$   $\text{Na}_2\text{O}$   $\text{TiO}_2$   $\text{P}_2\text{O}_5$  และยิปซัม ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [5]

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
<b>ออกไซด์หลัก</b>	
$\text{CaO}$	60-67
$\text{SiO}_2$	17-25
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3-8
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.5-6
<b>ออกไซด์รอง</b>	
$\text{MgO}$	0.1-5.5
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	0.5-1.3
$\text{TiO}_2$	0.1-0.4
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.1-0.2
$\text{SO}_3$	1-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [5]

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

### 2.4.3 สารประกอบหลัก

#### 1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ )

$\text{C}_3\text{S}$  เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกหกเหลี่ยม มีสีเทาเข้ม สมบัติของ  $\text{C}_3\text{S}$  เหมือนกับสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน  $500 \text{ J/g}$  กำลังอัดของ  $\text{C}_3\text{S}$  ถูกกระทบโดยปริมาณยิปซัม ปริมาณ  $\text{C}_3\text{S}$  ในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะมีประมาณ 35-55%

#### 2) ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_2\text{S}$ )

$\text{C}_2\text{S}$  เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย  $\text{C}_2\text{S}$  มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง  $\beta\text{C}_2\text{S}$  เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป  $\beta\text{C}_2\text{S}$  มีสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน  $250 \text{ J/g}$  เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ  $\text{C}_3\text{S}$  ปริมาณ  $\text{C}_2\text{S}$  ในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะมีประมาณ 15-35%

#### 3) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ )

$\text{C}_3\text{A}$  เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน  $\text{C}_3\text{A}$  จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash set และเกิดความร้อนจำนวนมากประมาณ  $850 \text{ J/g}$  การป้องกัน Flash set ทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการเติมยิปซัมลงระหว่างการบดซีเมนต์กำลังอัดของ  $C_3A$  จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะมี  $C_3A$  อยู่ในปริมาณ 7-15%

#### 4) เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรท์ ( $C_4AF$ )

$C_4AF$  ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 J/g กำลังอัดของ  $C_4AF$  ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี  $C_4AF$  อยู่ในปริมาณ 5-10% สมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [5]

สมบัติ	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว(ชม)	ช้า(วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก(นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว(วัน)	ช้า(อาทิตย์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500J/g)	น้อย (250J/g)	สูงมาก (850J/g)	ปานกลาง (420J/g)
5. สมบัติอื่นๆ	สมบัติเหมือน ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์	-	ไม่คงตัวในน้ำ และถูกซัลเฟต ทำลายได้ง่าย	ทำให้ ปูนซีเมนต์มี สีเทา

#### 2.4.4 สารประกอบรอง

##### 1) ยิปซัม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )

ยิปซัมถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์เกิดกำลังอัดสูงสุด และเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ

- 1.) อัลคาไลออกไซด์ อันได้แก่  $Na_2O$  และ  $K_2O$
- 2.) ปริมาณ  $C_3A$

##### 3.) ความละเอียดของปูนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) Free Lime (CaO)

เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

- 1.) เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ได้หมด
- 2.) ปริมาณ Lime มีไม่มากแต่จะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่างๆ ไม่สมบูรณ์ Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยาอย่างช้าๆ หลังจากที่ใช้เมนต์แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์ไม่อยู่ตัว เนื่องจาก Lime

## 3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมี  $\text{MgCO}_3$  ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้  $\text{MgO}$  และ  $\text{CO}_2$  แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลืออยู่ในรูปของ  $\text{MgO}$  และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเหมือนกับ  $\text{CaO}$  คือปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- 1.) ปริมาณของ  $\text{MgO}$  ในปูนซีเมนต์
- 2.) ขนาดของ  $\text{MgO}$  ถ้าขนาดเล็กมากๆ จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็ว โดยจะไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว

## 4) อัลคาไลต์ออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ และ $\text{K}_2\text{O}$ )

อัลคาไลต์ออกไซด์ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลต์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหายยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่ต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลต์ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต์ต่ำ

## 2.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน [5]

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดเป็น 2 ลักษณะ คือ

- 1) อาศัยสารละลายซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิดไอออนในสารละลาย และไอออนนี้จะผสมทำให้เกิดสารประกอบขึ้นใหม่
- 2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง” (Solid

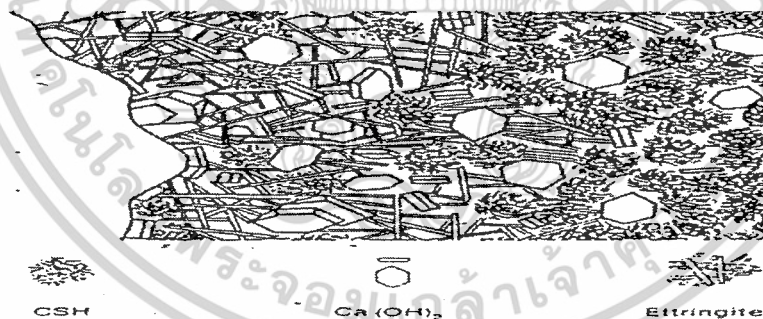
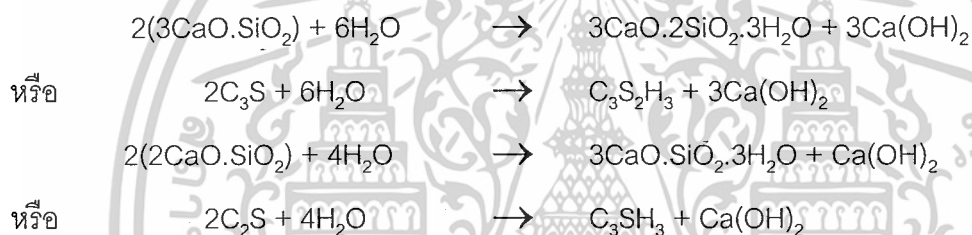
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากปฏิกิริยาที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

### 2.5.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต

แคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$  และ  $C_2S$ ) จะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด  $Ca(OH)_2$  และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน แสดงดังรูปที่ 2.2 และเป็นไปตามสมการการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต [5]

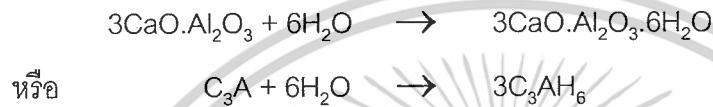
จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิดเจล ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของCSHนี้ ขึ้นอยู่กับระยะเวลา อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เฟสที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมแรง  
ได้อย่างดี

### 2.5.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต

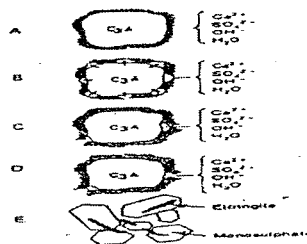
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิด  
การแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ



เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) เข้าไปในระหว่าง  
กระบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite  
บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ดังสมการ



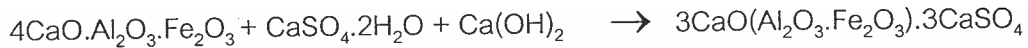
ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงตัวของ  $C_3A$  และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับ  
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุด  
การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  กล่าวคือเมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจาก  
การเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  
 $C_3A$  แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีก  
ครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่งซัลเฟตไอออนมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด  
Ettringite ไปเป็นโมโนซัลเฟต แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต [5]  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 ปฏิกริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์

ปฏิกริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ ( $C_4AF$ ) นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย  $C_4AF$  จะทำปฏิกริยากับยิปซัมและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก่อให้เกิดอนุภาคมีรูปร่างเหมือนเข็มของ ซัลโฟอะลูมิเนตและซัลโฟเฟอไรต์ดังสมการ



เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์จนเสร็จสิ้น ประมาณ 80% จะมีค่าแสดงดังตารางที่ 2.4

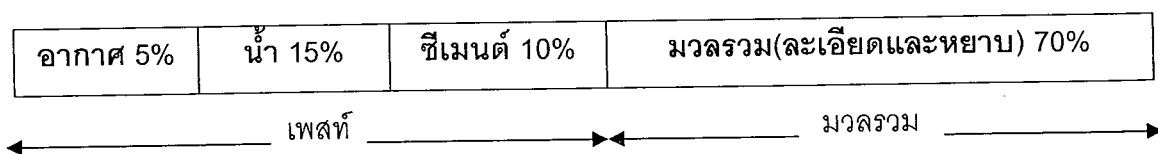
ตารางที่ 2.4 กระบวนการหน่วงปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต [5]

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
$C_3S$	10
$C_2S$	100
$C_3A$	3
$C_4AF$	50

### 2.6 องค์ประกอบของเพสต์ [6]

คอนกรีตที่ผสมใหม่ๆและยังเหลวพอเทได้นั้น ส่วนที่เป็นของแข็งทั้งหมดรวมทั้งซีเมนต์ จะลอยตัวอยู่ในน้ำชั่วคราว อนุภาคเล็กๆ แต่ละเอียดจะถูกคั่นด้วยชั้นบางๆ การแยกตัวของอนุภาค นี้และผลของการหล่อลื่นของชั้นน้ำรวมทั้งแรงยึดระหว่างอนุภาคที่ละเอียดที่สุด ทำให้ส่วนผสมมี ลักษณะเหลวพอเทได้ดี

คอนกรีตอาจแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ เพสต์และมวลรวมที่เป็นแร่ธาตุอนุภาค มวลรวมจะฝังตัวและถูกหุ้มด้วยเพสต์ปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมดเท่ากับปริมาตรของเพสต์ บวกกับ ปริมาตรของมวลรวม และปริมาตรของอากาศที่อยู่ในช่องว่าง แสดงดังรูปที่ 2.4



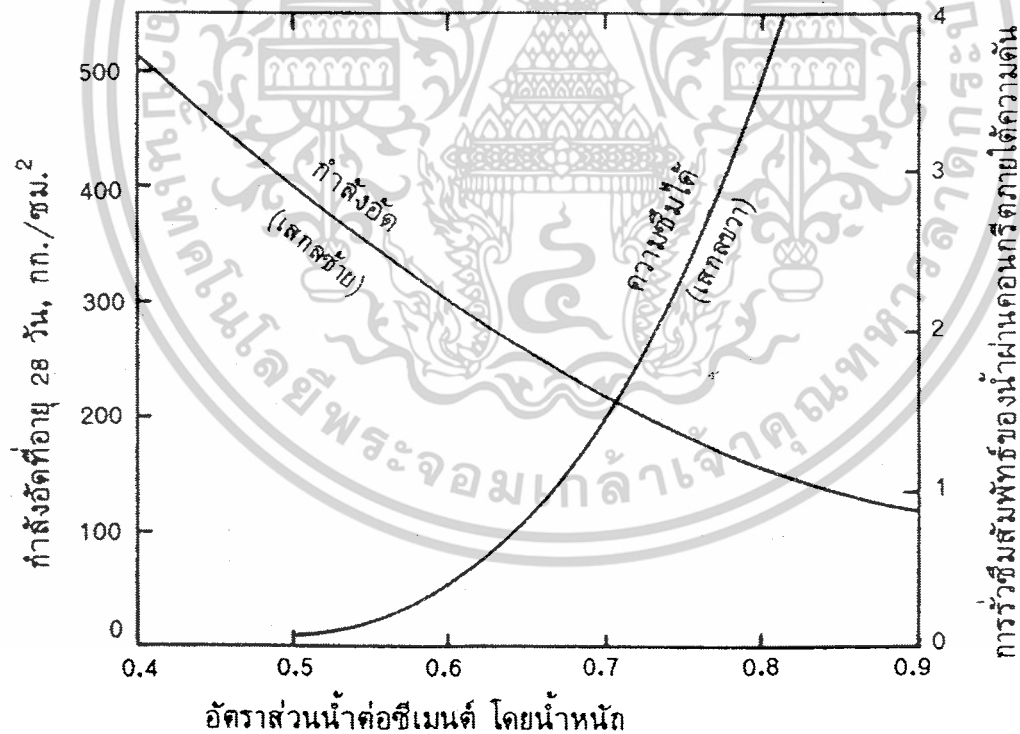
รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของเพสต์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเพสท์เป็นตัวหุ้มและกันอนุภาคของมวลรวมให้ออกห่างจากกัน กำลังของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับกำลังของเพสท์นั่นเอง สารประกอบบางอย่างในเพสท์ที่แข็งตัวอาจจะละลายน้ำได้ และอัตราการละลายน้ำส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเพสท์ ถ้าเพสท์ที่ยังแน่นอัตราการละลายก็ยิ่งช้าลง ฉะนั้นเพสท์จะต้องแข็งแรงและแน่น โดยเฉพาะในงานคอนกรีตที่ต้องแช่น้ำอยู่ตลอดเวลา

กำลังและความแน่นของเพสท์ส่วนใหญ่ ขึ้นอยู่กับปริมาณแรกเริ่มของน้ำซึ่งบรรจุอยู่ในช่องว่างรอบเม็ดซีเมนต์แสดงดังรูปที่ 2.5 และขึ้นอยู่กับขนาดของปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ปริมาณน้ำซึ่งบรรจุในช่องว่างนี้ปกติระบุในรูปของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และต้องกำหนดให้มีการป่มเพื่อให้ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำเกิดได้ตามต้องการ

อัตราส่วนซีเมนต์ต่อน้ำนี้ เดิมทีระบุเป็นปริมาตรของน้ำเป็นลิตรต่อซีเมนต์หนึ่งถุง แต่ปัจจุบันใช้วิธีที่ดีกว่าคือระบุเป็นน้ำหนัก คือกิโลกรัมของน้ำต่อซีเมนต์หนึ่งกิโลกรัม



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด การรั่วซึมสัมพัทธ์ของน้ำของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ กัน [6]

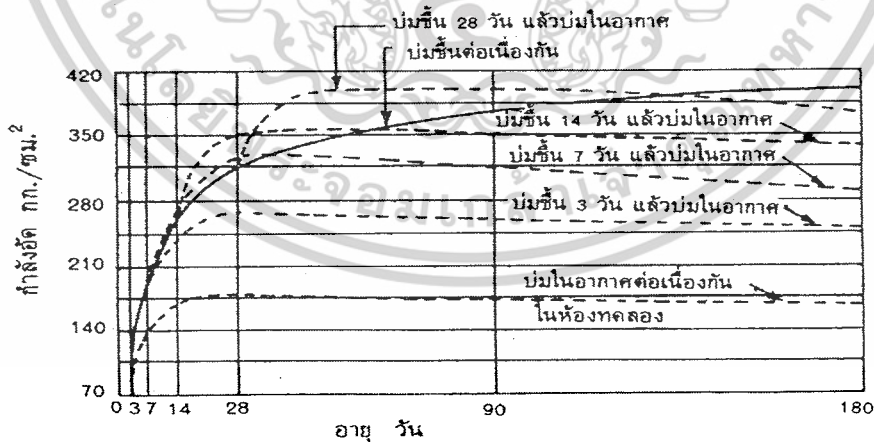
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 กระบวนการแข็งตัว [6]

เวลาที่ต้องการสำหรับการทำปฏิกิริยาของซีเมนต์กับน้ำอย่างสมบูรณ์นั้น ขึ้นอยู่กับ ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม ชนิดของซีเมนต์และอุณหภูมิโดยรอบบริเวณ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์ที่ต่ำกว่า 0.25 โดยน้ำหนักจะขึ้นกับการให้น้ำจากภายนอกด้วย ถ้าบ่มคอนกรีตที่ใช้กันตาม ธรรมดาเป็นเวลาหนึ่งเดือนโดยให้อยู่ในสภาวะมาตรฐานของห้องทดลอง พบว่าซีเมนต์จะทำ ปฏิกิริยากับน้ำกว่า 80% อย่างไรก็ตามสภาพในสนามคอนกรีตจะแห้งภายในไม่กี่วัน หลังจากนั้น ซีเมนต์ยังคงทำปฏิกิริยากับน้ำต่อไปได้โดยอาศัยน้ำที่ซึมมาจากใต้ดิน หรือจากความชื้นในขณะ ที่ฝนตกหรือขณะที่ความชื้นในอากาศสูง ดังนั้นภายใต้ภาวะแวดล้อมธรรมดาการทำปฏิกิริยาของ ซีเมนต์กับน้ำจะยังคงมีต่อไปอีกหลายปี

อัตราการเพิ่มกำลังแตกต่างกับอัตราการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิปกติปฏิกิริยาขั้นแรกจะ ทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงขึ้นเล็กน้อย กำลังคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการทำปฏิกิริยาของ ซีเมนต์ ดังนั้นถ้าคอนกรีตแห้งลงปฏิกิริยาของซีเมนต์ตลอดจนการเพิ่มกำลังจะหยุดทันทีแสดง ดังรูปที่ 2.6

ถ้าอุณหภูมิโดยรอบสูงขึ้นอัตราการทำปฏิกิริยาก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่อุณหภูมิธรรมดา ผลที่ได้จากปฏิกิริยาของซีเมนต์จะเป็นในรูปของสารคล้ายเจลเป็นส่วนใหญ่ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะ กลายเป็นผลิตภัณฑ์จำนวนมาก อุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นเท่าไร ปริมาณ "เจล" ต่อหน่วยซีเมนต์ที่ทำ ปฏิกิริยาแล้วจะน้อยลงเท่านั้น



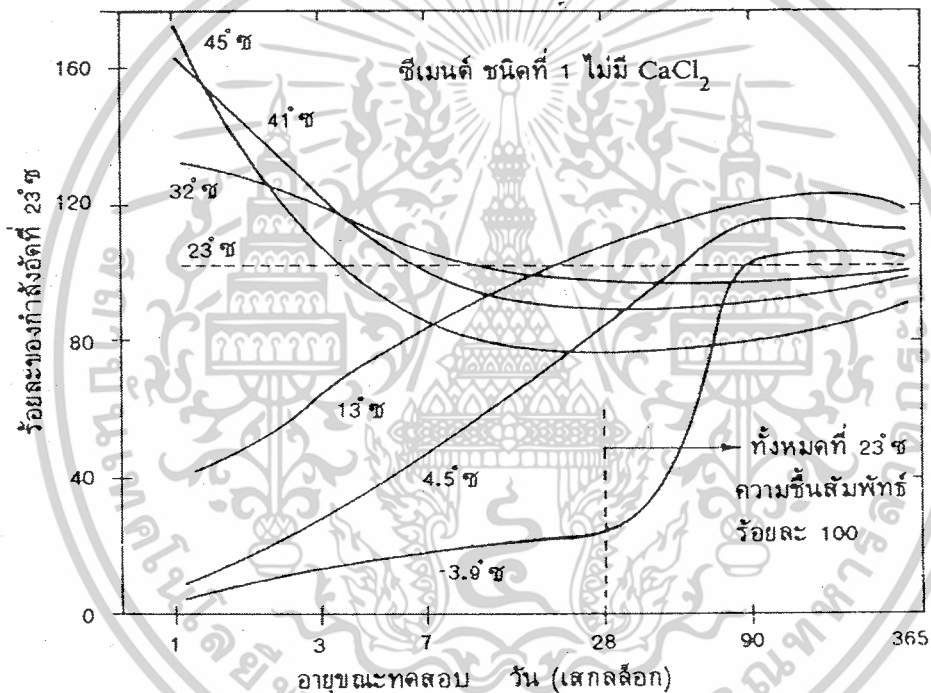
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์กำลังอัดและระยะเวลาการบ่มคอนกรีต [6]

การเปลี่ยนแปลงของเจลที่เกิดจากอุณหภูมิสูง จะทำให้แรงอัดสูงสุดของคอนกรีตต่ำลง นอกจากนี้ยังลดการหดตัวอันเนื่องมาจากการแห้งของคอนกรีตอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 การบ่ม [6]

การบ่มเป็นการกระทำเพื่อป้องกันรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต อันเนื่องจากการสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็ว ในขณะที่คอนกรีตมีลักษณะเหลวพอเทได้อยู่ และเป็นการทำให้ได้กำลังตามต้องการด้วยซีเมนต์ในคอนกรีต และแผ่นพื้นที่ไม่อยู่ติดกับดินซึ่งอาจจะหยุดทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีหลังจากหยุดบ่ม ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปได้ก็ต่อเมื่อมีความชื้นสูงกว่า 80% เท่านั้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าอยู่ในที่ซึ่งปฏิกิริยาจะดำเนินไปด้วยดีโดยไม่ต้องมีการบ่ม จุดประสงค์ของการบ่มก็คือป้องกันการเสียน้ำเร็วเกินไป เพื่อให้ได้ความแข็งแรงในระยะแรกตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำลังอัด อุณหภูมิการบ่ม อายุคอนกรีตขณะทดสอบ [6]

เพสท์ของซีเมนต์ควรอยู่ในสภาพอิ่มตัวที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้อัตราการทำปฏิกิริยาสูงสุดในอุณหภูมิหนึ่ง ดังนั้นควรให้น้ำเพื่อชดเชยส่วนที่ระเหยไปจากผิว และเพื่อจะเติมน้ำที่หายไป จากรูพรุนอันเนื่องมาจากกระบวนการทางเคมี ที่เรียกกันว่าการแห้งในตัวเอง (Self Desiccation) สำหรับส่วนผสมธรรมดาปริมาณน้ำสำหรับเติมน้ำที่ขาดไป เนื่องจากการแห้งในตัวเองนี้มีประมาณ 2 ลิตร ต่อ ซีเมนต์ 1 ถุง (50 kg) ระหว่างสัปดาห์แรก

ถ้าต้องการจะทำผิวคอนกรีตสดให้มันเงาแล้ว จะต้องให้ผลของการแห้งในตัวเองหยุด ปฏิกิริยาของเพสท์ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า 20 ลิตรต่อซีเมนต์ 1 ถุง (0.4% โดยน้ำหนัก) การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเพสท์มีปริมาณน้ำในตอนแรกสูง การแห้งในตัวเองจะไม่ถึงกับทำให้ปฏิกิริยาหยุดเพียงแต่ทำให้ช้าลงเท่านั้น

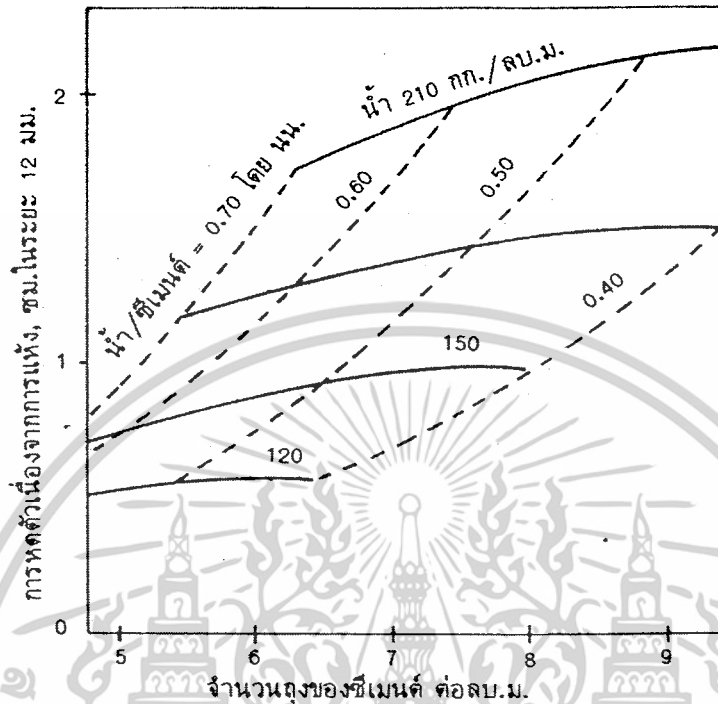
การใช้สารผนึกในการบ่มนั้นจะมีข้อจำกัดเมื่อใช้กับส่วนผสมที่มีซีเมนต์มากๆ ยิ่งกว่านั้น สารเหล่านี้เพียงแต่ทำให้น้ำซึมช้าเท่านั้น แต่ไม่ใช่ผนึกแน่นอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้กับส่วนผสมที่มีอัตราส่วนธรรมดา อาจทำให้น้ำระเหยช้าลงพอที่จะทำให้คอนกรีตได้กำลังตามต้องการภายในเวลาที่กำหนดได้

## 2.9 การหดตัวและพองตัว [6]

ถ้ารักษาคอนกรีตให้มีความชื้นอย่างสม่ำเสมอ คอนกรีตจะขยายตัวช้าๆ เป็นเวลาหลายปี แต่ทั้งปริมาณและอัตราการขยายตัวนี้ปกติมีน้อยมาก จนถือได้ว่าปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาพบรรยากาศอย่างหนึ่งแล้ว ถ้าความชื้นในอากาศลดลงคอนกรีตก็จะเสียน้ำไปบ้างหรือถ้าความชื้นสูงขึ้นคอนกรีตก็จะได้น้ำเพิ่มขึ้น เพสท์ที่แข็งตัวแล้วนั้นสามารถที่จะดูน้ำได้ดี ฉะนั้นเพสท์และคอนกรีตจะเป็นส่วนที่หดตัวหรือพองตัวเมื่อปริมาณน้ำเปลี่ยนแปลง

ในการเปลี่ยนแปลงจากสถานะอิ่มตัวไปเป็นสถานะแห้ง (ความชื้นสัมพัทธ์ 50%) คอนกรีตทั่วๆ ไปจะหดตัวประมาณ 0.6 mm/m หรือ 0.06% ซึ่งเทียบเท่ากับการหดตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง 37.8°C

ปริมาณการหดตัวของคอนกรีตภายใต้สภาวะการทำให้แห้งที่กำหนดให้ขึ้นอยู่กับหลายสิ่งด้วยกัน เพสท์ที่แข็งตัวยิ่งพรุนมากเท่ากี่ยิ่งจะหดตัวมากเท่านั้น ถ้าใช้เพสท์ชนิดเดียวกันคอนกรีตยิ่งมีปริมาณเพสท์มากก็จะหดตัวมาก การเติมส่วนผสมที่ละเอียดเป็นผงลงในคอนกรีตปกติจะทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น คอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ชนิดต่างๆ กันจะหดตัวต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ใช้ทั้งหมดของคอนกรีตสด และการหดตัวของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว สำหรับส่วนผสมต่างๆ กันแต่ใช้วัสดุชนิดเดียวกันจะเห็นว่าปริมาณน้ำมีผลต่อการหดตัว



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัว ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และปริมาณน้ำในคอนกรีต [6]

## 2.10 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) [7]

เส้นใยธรรมชาติเป็นอินทรีย์วัสดุที่สำคัญ หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติมและสารเสริมแรง เพื่อเป็นการลดต้นทุนและเพิ่มปริมาณการผลิต และเสริมแรงแก่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้

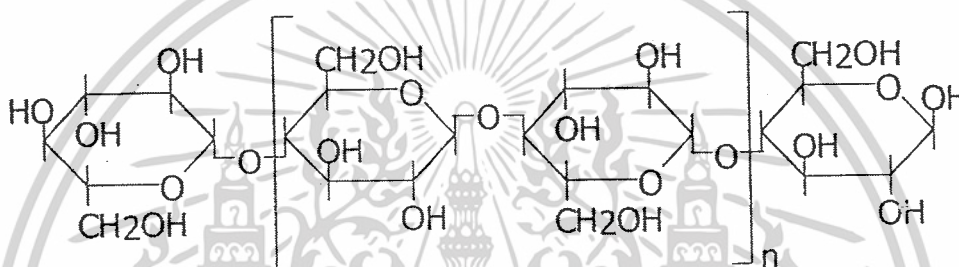
โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติประกอบไปด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่ องค์ประกอบที่เหลือเป็นเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ

### 2.10.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบร่วมกับลิกนิน เพนโตแซน กัม แทนนิน ไขมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสจะมีหน่วยโมเลกุลยาวและแข็ง โดยเซลลูโลสจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี แสดงดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิในการหลอมตัวจึงสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ เซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพไม่ดี ในทางอุตสาหกรรมจะหาน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณได้โดยการวัดความหนืด



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [7]

### สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

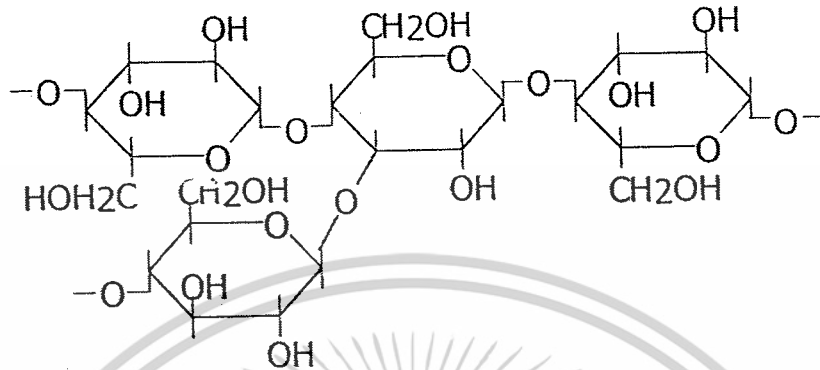
ความหนาแน่นของเซลลูโลสประมาณ  $1.5 \text{ g/cm}^3$  ความหนาแน่นของเส้นใยเดี่ยวมีค่าไม่แน่นอน ซึ่งแปรตามแหล่งที่มาและการปรับปรุงทางเคมี เซลลูโลสเป็นของแข็งไม่มีสี มีการดูดและคายไอน้ำและของเหลวอื่นๆ ที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆ จนกระทั่งถึงสมดุล ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติบางอย่าง เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) เซลลูโลสไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดแร่เข้มข้น เช่น 72% ของกรดซัลฟิวริก 40% ของกรดไฮโดรคลอริก และ 78% ของกรดฟอสฟอริก เซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดแร่ที่อุณหภูมิห้องและปฏิกิริยาจะหยุดที่อุณหภูมิต่ำๆ และสารละลายเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น 72% ของซิงค์ออกไซด์จะทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ละลายได้

#### 2.10.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ชนิดหนึ่ง ซึ่งคล้ายเซลลูโลสแต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโทส แมนโนส ไซโลส อะราบิโนส รวมทั้งกรดกลูคูโรนิก และกาแลกทูโรนิก เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลสเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบมากในแกลบ ชังข้าวโพด เฮไซแซน สูตรทางเคมี คือ  $(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_5)_n$

โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.10

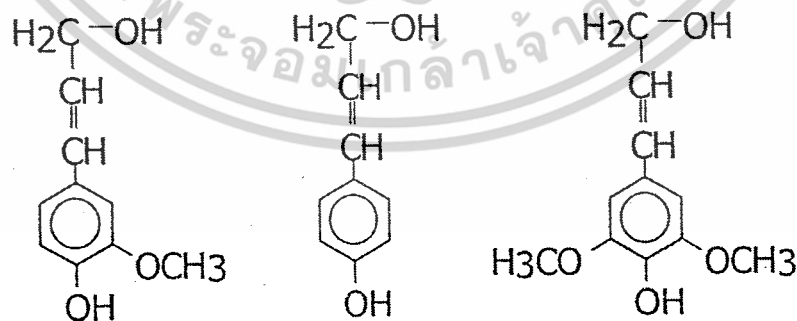
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [7]

### 2.10.3 ลิกนิน (Lignin)

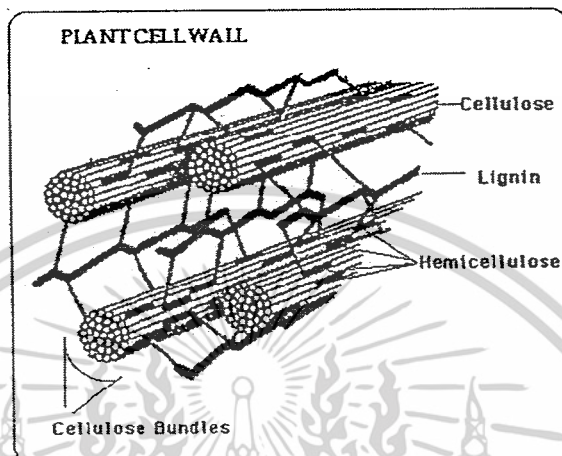
ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน เมื่อพืชตายลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา ตัวอย่างโครงสร้างของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [7]

ไม้แต่ละชนิดมีอัตราส่วนระหว่าง เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ไม่เท่ากัน ขึ้นกับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งแรงสูง และในไม้ชนิดเดียวกันไม้ที่มีเอกสารเป็นเอกสารที่สวางไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

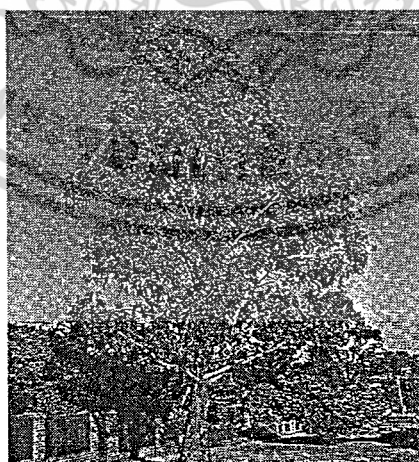
อายุมากจะมีปริมาณลิกนินมากเช่นเดียวกัน โดยการจัดเรียงตัวของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนินในไม้จะเป็นไปแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ [5]

#### 2.10.4 ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) [7]

ไม้ยูคาลิปตัสเป็นไม้ที่สำคัญมากในปัจจุบัน โดยต้นยูคาลิปตัสจะมีลักษณะสูง ใต่ง่าย ปลูกได้ในทุกๆ สภาพดิน มีความทนทาน เมื่อปลูกแล้วสามารถตัดได้ 2-3 ครั้ง โดยไม่ต้องปลูกใหม่ ด้วยเหตุดังกล่าว ไม้ยูคาลิปตัสจึงได้เป็นที่นิยมปลูกและใช้งาน โดยลักษณะของต้นยูคาลิปตัส แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะของต้นยูคาลิปตัส [7]

ต้นยูคาลิปตัส คามาโดเลนซิส (*Eucalyptus Camaldulensis*) เป็นต้นยูคาลิปตัสที่ปลูกได้ดีในประเทศไทย โดยลักษณะของไม้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนนอกสุดจะเป็นเปลือกจะมีสีซีด ไม้ว่ากรณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือสีครีม และจะมีเขตของเนื้อไม้ที่มีสีต่างออกไปมาก คือส่วนที่เรียกว่า แก่น (Heartwood) เป็นส่วนที่มีสีน้ำตาลเข้ม และด้านนอกแก่นจะมีสีขาวกว่า เรียกว่า กระจัง (Sapwood) ส่วนนี้จะมีความหนาขึ้นตามอายุของต้นไม้ ส่วนของกระจังสามารถถูกทำลายได้ง่ายโดยแมลงหรือเห็ด รา ต่างๆ ได้มากกว่าแก่น ถึงแม้ส่วนประกอบของเซลล์และโครงสร้างของกระจังและแก่นเหมือนกัน แต่การสะสมของสารเคมีโดยกระจังจะถูกดูดซึมเข้าไปได้โดยง่ายกว่าแก่น และกระจังจะมีสภาวะที่จะถูกซึมซับโดยสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อได้เป็นอย่างดีจึงเป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมทำกระดาษได้ดี

องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส แสดงดังตารางที่ 2.5 ซึ่งแสดงว่าเมื่อนำไม้ยูคาลิปตัส ความาดูเลนซีสที่มีอายุ 3 10 และ 15 ปี มาเปรียบเทียบกัน จะพบว่าไม้ยูคาลิปตัส ที่มีอายุ 3 ปี จะมีปริมาณลิกนินและปริมาณน้ำตาลอยู่ในเนื้อไม้มากกว่าไม้ที่มีอายุ 10 และ 15 ปี เมื่อพิจารณาปริมาณเซลลูโลสพบว่า 53.43 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าไม้ที่มีอายุ 10 และ 15 ปี จากเหตุผลนี้จึงพอสรุปได้ว่า ไม้ยูคาลิปตัสความาดูเลนซีสที่มีอายุน้อยสามารถนำไปใช้ในประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ ยูคาลิปตัส ความาดูเลนซีส [7]

องค์ประกอบ	ไม้อายุ 3 ปี	ไม้อายุ 10 ปี	ไม้อายุ 15 ปี
ลิกนิน	29.90	27.75	26.60
เซลลูโลส	53.43	58.36	58.18
เฮมิเซลลูโลส	78.50	73.66	73.73
เพนโตซาน	19.45	17.01	17.15
ซีไค์	0.44	0.33	0.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเตรียมเยื่อไม้

เยื่อไม้คุณภาพดีสามารถเตรียมได้จาก 2 ขบวนการ คือ ขบวนการความร้อนเชิงกลและ ขบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถเตรียมได้ดังนี้

### 1) เยื่อไม้คุณภาพดีที่เตรียมได้จากขบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical Pulp; TMP)

เป็นการแยกเยื่อโดยวิธีความร้อนเชิงกล(Thermomechanical Pulping) ซึ่งเป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีการผลิตเยื่อทางกลโดยการบด (Refined Mechanical Pulping) เริ่มจากการนำชิ้นไม้หรือชิ้นวัตถุดิบเข้าในไอน้ำภายใต้ความดันไอน้ำ จนอุณหภูมิไอน้ำสูงกว่า  $140^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ลิกนินอ่อนตัว เรียกว่า จุดเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Point) หรือจุดนิ่มตัว (Softening Point) แล้วจึงทำการบดชิ้นไม้ให้แยกออกจากกันภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงเป็นเส้นใยหรือกลุ่มของเส้นใย การบดใช้วิธีการเสียดสี (Attrition Action) ของเครื่อง Defibrators หรือ Attrition Mills ซึ่งประกอบด้วยจานบดที่มีผิวหยาบเป็นร่อง 2 จาน หมุนสวนทางเสียดสีกันให้ชิ้นไม้ที่อยู่ระหว่างจานทั้งสองแตกแยกออกเป็นกลุ่มเยื่อ ผลผลิตของเยื่อที่ได้ประมาณ 90-95% ขึ้นอยู่กับสภาวะในการแยกเยื่อ ได้แก่ อุณหภูมิหรือความดันไอน้ำ เวลาในการนึ่งชิ้นไม้และเวลาในการบดเยื่อ จะมีความผันแปรไปขึ้นอยู่กับชนิดไม้หรือวัตถุดิบ ความหนาแน่นของไม้หรือวัตถุดิบ ความชื้น และรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นไม้

### 2) เยื่อไม้คุณภาพดีที่เตรียมได้จากขบวนการทางเคมี (Chemical Pulp; CP)

เป็นการแยกเยื่อโดยวิธีทางเคมี (Chemical Pulp) ที่ทำการแยกเยื่อในถังปฏิกรณ์ (Reactor) ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงประมาณ  $125-180^{\circ}\text{C}$  ซึ่งไม่มีขบวนการเชิงกลในการแยก แต่ใช้สารประกอบเคมีที่มีสภาวะเป็นด่าง เรียกว่า Alkaline Process หรือสารประกอบเคมีที่มีสภาวะเป็นกรด เรียกว่า Acidic (Sulfite) Process เข้าทำปฏิกิริยาละลายลิกนินที่อ่อนตัวแล้ว (Delignification) ออกจากไม้หรือชิ้นวัตถุดิบจนได้เป็นเส้นใย ขบวนการนี้จะให้ผลผลิตต่ำเพียง 40- 60% ระยะเวลาในการแยกเยื่อก็จะมากกว่า 1-5 ชั่วโมง ต้นทุนสูงแต่เยื่อที่ได้จะมีความบริสุทธิ์มากกว่า เนื่องจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจะถูกแยกออกเกือบหมด ลักษณะของเส้นใยจะยุบและอ่อนตัวจากเดิมที่มีความแข็งกระด้างและรูปร่างทรงกลม กลายเป็นลักษณะคล้ายโบริบิ้นที่มีพื้นที่ผิวมากขึ้นเพื่อให้เกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) ซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการของขบวนการทำกระดาษหลังจากเตรียมเส้นใยเสร็จแล้ว นำเส้นใยที่บดแล้วไปล้างด้วยน้ำหลังจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 วัน โดยก่อนการทดลองต้องทำการคัดแยกขนาดอนุภาคเส้นใยไม้ โดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาดได้เส้นใยที่พร้อมใช้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยไม้ TMP และ CP [7]

องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)	เส้นใยไม้		หน่วย Unit
	TMP	CP	
1. สารแทรก			
- ความสามารถในการละลาย แอลกอฮอล์-เบนซิน (Alcohol-benzene solubility)	2.47	0.26	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
- ความสามารถในการละลาย แอลกอฮอล์ (Alcohol-benzene solubility)	0.07	0.08	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
- ความสามารถในการละลาย น้ำร้อน (Hot water solubility)	6.72	3.58	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
2. ความสามารถในการละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% (1% NaOH solubility)	24.54	5.39	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
3. ไฮโลเซลลูโลส (Holocellulose)	62.69	94.99	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
4. ลิกนิน (Lignin)	28.05	1.08	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
5. เพนโตแซน (Pentosan)	13.32	13.46	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
6. แอลฟาเซลลูโลส ( $\alpha$ Cellulose)	60.49	86.32	% โดยน้ำหนักอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tsai-Yung Chen และคณะ [2] งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมแผ่นไม้อัดจากซีเมนต์กับไม้ (Cement-Bonded Wood Particleboard) ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติดีกว่าไม้อัดธรรมดา เพราะทนต่อดินฟ้าอากาศ ทนไฟ ทนต่อแมลง ไม้ขึ้นรา และมีเสถียรภาพของรูปร่างดีกว่า นอกจากนี้ยังไม่เกิดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง แต่แผ่นไม้อัดจากซีเมนต์กับไม้มีข้อด้อยคือ มีสารเคมีที่ละลายน้ำได้หลุดออกมาทำให้คอนกรีตใช้เวลาในการเซตตัวนาน จึงได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อเวลาการเซตตัวของวัสดุดังกล่าว โดยศึกษาเปรียบเทียบเวลาการเซตตัวของวัสดุแผ่นที่เตรียมจากเส้นใยของไม้เนื้อแข็งที่ผ่านการบำบัดด้วยการต้มในน้ำร้อน และเส้นใยที่บำบัดด้วย สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ สาเหตุที่ต้องนำเส้นใยมาผ่านการบำบัดเพราะเส้นใยจากไม้เนื้อแข็งหากไม่ทำการบำบัดจะทำให้การเซตตัวเป็นไปได้ช้า ผลการทดลองพบว่าวัสดุแผ่นจากซีเมนต์กับไม้ที่บำบัดด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ทำให้เกิดการเซตตัวได้เร็วกว่าเส้นใยที่บำบัดด้วยน้ำร้อน

L.K.Aggarwal [8] นำขานอ้อย (Bagasse) ซึ่งมีอยู่อย่างแพร่หลาย เพราะเป็นกากของเสียที่ได้จากการผลิตน้ำตาลมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น โดยนำมาเป็นส่วนผสมในซีเมนต์ และศึกษาผลของปริมาณเส้นใยขานอ้อย ความดันที่ใช้เทลงแม่แบบ ระยะเวลาที่เกาะขึ้นงานออกจากแบบ และวิธีการผลิตที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของก้อนคอนกรีต โดยจะทำการผสมเส้นใยในปริมาณที่แตกต่างกันเข้ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปรับเปลี่ยนความดันที่ใช้ในการเทคอนกรีตและระยะเวลาในการเกาะขึ้นงานออกจากแม่แบบ แม่แบบที่ใช้เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  ทำจากโลหะ ก่อนจะนำเส้นใยมาใช้ทำการตีเส้นใยก่อนแล้วจุ่มไว้ในสารละลายเคมีเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้ขานอ้อยดูดซึมน้ำแล้วเทเส้นใยที่ลอยอยู่ด้านบนทิ้งไป จากนั้นนำมาผสมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 ใช้เหล็กกระทุ้งที่ควบคุมด้วยระบบไฮดรอลิก (Hydraulic) ทดสอบหาเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้วัสดุแข็งแรง จากนั้นจึงเกาะแม่แบบออกแล้วเก็บชิ้นงานไว้ในที่ชื้นเป็นเวลา 10 วัน นำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปหาค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างขนาด  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  นำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงโค้งงอทดสอบโดยใช้ระบบการใช้แรง 3 จุด (Three Point Bending) ใช้ชิ้นงานขนาด  $300 \times 50 \text{ mm}^2$  ทดสอบหาค่าความแข็งแรงของพันธะภายในก้อนคอนกรีตและความแข็งแรงดึงด้วยชิ้นงานขนาด  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  โดยใช้อัตราเร็วในการดึง  $1 \text{ mm/min}$  โดยแต่ละการทดสอบจะใช้จำนวนชิ้นงาน อย่างน้อย 6 ชิ้น ค่าที่ได้จะนำมาหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยชานอ้อยมากขึ้น ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนคอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่าความหนาแน่นและความแข็งแรงพันธะ (Bond Strength) ลดลง โดยค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อใส่เส้นใยลงไป 16% โดยน้ำหนัก ส่วนค่าความแข็งแรงโค้งงอจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าสูงที่สุดที่ปริมาณเส้นใยเป็น 16% หลังจากนั้นค่าความแข็งแรงโค้งงอจะลดลงเรื่อยๆ และถ้าเพิ่มความดันในการหล่อแบบจะทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงขึ้น แต่ค่าการดูดซึมน้ำลดลงระยะเวลาที่ใช้แช่เส้นใยมีผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีต กล่าวคือ เมื่อเพิ่มระยะเวลาการแช่เส้นใยให้นานขึ้นในช่วง 200 วัน คอนกรีตจะมีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปริมาณชานอ้อยที่ให้ซีเมนต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด คือ 12-16% โดยน้ำหนัก ความดันในการเท 2-3 N/mm<sup>2</sup> และระยะเวลาที่ทิ้งไว้ในแม่แบบเท่ากับ 6 ชั่วโมง

R.S.P.Coutts [9] ได้ทำงานวิจัยเพื่อศึกษาการนำเส้นใยจากไม้ไผ่มาเสริมแรงในคอนกรีต เพื่อที่ใช้เส้นใยธรรมชาติมาแทนใยหินในงานก่อสร้างและงานคอนกรีต และศึกษาถึงผลของเส้นใยที่มีต่อสมบัติเชิงกล โดยเตรียมเส้นใยจากสภาวะต่างๆ คือ 1) เยื่อไม้ไผ่ที่ไม่ผ่านการตี 2) เยื่อไม้ไผ่ที่ผ่านการตี 3) เยื่อไม้ไผ่ที่ต้มในน้ำร้อน เยื่อที่เตรียมจาก 3 สภาวะนี้นำมาผ่านกระบวนการบำบัดด้วยสารแขวนลอยของซิลิกาชนิดละออง (Silica Fume Slurry) การเตรียมส่วนผสมคอนกรีตทำได้โดยผสมน้ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเยื่อไม้เข้าด้วยกันแล้วทำการปั่นจนจนได้ของเหลวที่พอจะเทได้ เทของผสมดังกล่าวลงในแม่แบบขนาด 125 x 125 mm<sup>2</sup> ทำการดูดน้ำออกด้วยเครื่องสูญญากาศจนก้อนคอนกรีตแห้ง จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาตัดให้มีขนาด 125 x 40 mm<sup>2</sup> ให้มีความหนาต่างๆ กัน (ประมาณ 6 mm) เพื่อนำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) และค่าความเหนียวขณะฉีกขาด (Fracture Strength) ส่วนค่ามอดุลัสจะหาได้จากการทดสอบด้วยการกดขึ้นงาน 3 จุด (Three Point Bending) นอกจากนี้ยังมีการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำหาปริมาตรของช่องว่างในเนื้อคอนกรีต และหาค่าความหนาแน่น โดยทุกการทดสอบจะใช้ชิ้นงานตัวอย่างอย่างน้อย 6 ชิ้น วัดความยาวของเส้นใยและการกระจายตัวของเส้นใย วัดปริมาณเส้นใยที่ถูกทำลายเพื่อนำไปหาการสลายตัวของเส้นใย

ผลการทดลองพบว่าเส้นใยที่เตรียมได้จากทุกวิธี เมื่อเติมเส้นใยในปริมาณมากขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและความเหนียวขณะฉีกขาดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดหนึ่งค่าดังกล่าวจึงค่อยๆ ลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะมากขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นแต่ค่าความหนาแน่นจะค่อยๆ ลดลง สมบัติเชิงกลของก้อนคอนกรีตที่ใช้จากเยื่อที่เตรียมต่างกันมีค่าเล็กน้อยแตกต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากวิธีการเตรียมเยื่อที่ทำให้ได้ค่าความยาวของเส้นใยต่างๆ กัน ค่าความแข็งแรงโค้งงอของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเยื่อไม้ไผ่เพิ่มขึ้นเป็น 18 MPa เมื่อใส่เส้นใยลงไป 18%โดยมวล

บุญศักดิ์ แซ่ฮึ้ง และ วานิช สุวิชาวานิช [10] ได้ศึกษาถึงเกี่ยวกับคอนกรีตเสริมผักตบชวา ซึ่งเป็นการนำเอาผักตบชวาซึ่งเป็นวัชพืชน้ำมาทำประโยชน์ โดยนำมาทำเป็นตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่าง 4 cm และ 8 cm แล้วนำมาเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อจะช่วยรับแรงดึงแทนเหล็กเส้น โดยทำการหล่อตัวอย่างที่นำมาใช้ทดสอบเป็นแผ่นไม้อัดซีเมนต์ขนาด  $60 \times 60 \times 3 \text{ cm}^3$  แล้วนำมาบ่มโดยใช้กระสอบคลุมแล้วฉีดน้ำให้ชุ่ม ใช้ระยะเวลาการบ่มประมาณ 28 วัน จากนั้นจึงทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแรงกด จากผลที่ได้ปรากฏว่าแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เสริมผักตบชวาที่ระยะ 4 cm รับแรงได้น้อยกว่าระยะ 8 cm และแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เสริมผักตบชวาที่ระยะ 8 cm รับแรงได้น้อยกว่าแผ่นไม้อัดซีเมนต์เปล่า เนื่องจากเนื้อคอนกรีตไม่ยึดเกาะกับผักตบชวามีผลทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตซึ่งจะมีผลทำให้คอนกรีตรับแรงได้น้อยลง

Romildo D.Tolêdo Filho และคณะ [11] งานวิจัยนี้เสนอวิธีแก้ปัญหาค่าความเหนียวของก้อนคอนกรีตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจากพืช เนื่องจากเส้นใยที่ผสมลงไปทำให้เกิดจุดอ่อนภายในก้อนคอนกรีตซึ่งทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของน้ำกับซีเมนต์เกิดไม่ดี โดยการนำเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยจากต้นปอ (Sisal) มาบำบัดภายใต้สภาวะของ  $\text{CO}_2$  และบำบัดด้วยการแช่เส้นใยลงในสารแขวนลอยของซิลิกาชนิดละออง ก่อนจะนำไปผสมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และกากโลหะ (Slag) และน้ำในอัตราส่วนต่างๆ ชนิดของเส้นใยที่ใช้มีทั้งแบบเส้นใยสั้นและเส้นใยยาว จากนั้นนำส่วนผสมใส่แม่แบบไม้ขนาด  $400 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$  แต่ละสูตรทำชิ้นงานตัวอย่าง 7 ชิ้น และขณะเทจะใช้เครื่องสั่นเพื่อให้เส้นใยกระจายตัวแบบสุ่ม เมื่อเทจนเต็มแม่แบบแล้วจึงหุ้มก้อนคอนกรีตด้วยแผ่นฟิล์มพอลิเอธิลีนเป็นเวลา 1 วัน หลังจากนั้นแกะก้อนคอนกรีตออกจากแผ่นฟิล์มแล้วนำไปบ่มที่  $18^\circ \text{C}$  97% RH ภายใต้สภาวะของ  $\text{CO}_2$  เป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำก้อนคอนกรีตไปเก็บที่ 3 สภาวะ คือ สภาวะแรกแช่ไว้ในน้ำอุณหภูมิ  $18^\circ \text{C}$  สภาวะที่สองทดสอบแบบวัฏจักรแห้ง เปียก และสภาวะที่สามคือเก็บไว้ในสภาวะอากาศทั่วไป เป็นระยะเวลา 6 เดือน จากนั้นนำมาทดสอบความโค้งงอ (Bending Test) ใช้ Load Cell ขนาด 2500 kN เพื่อหาความสามารถในการรับแรงอัดหลังจากชิ้นงานวิบัติแล้ว นำมาทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อหาการกระจายตัวและการจัดเรียงตัวของเส้นใยในก้อนคอนกรีต สภาวะที่มี  $\text{CO}_2$  มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำเพราะ  $\text{CO}_2$  จะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ทำให้น้ำในคอนกรีตเอกสาร์รินเป็นเอกสาร์ทิสทวงไวส์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเบสลดลง น้ำจึงระเหยไปได้ซ้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ ในทำนองเดียวกับ สารแขวนลอยของซิลิกาชนิดละอองและกากโลหะ ผลการทดลองพบว่า ความเปราะของเส้นใยลดลงเมื่อนำเส้นใยไปแช่ในสารแขวนลอยของซิลิกาชนิดละออง

Philip D. Evans [12] ได้ทำการศึกษาการเตรียมสารประกอบของซีเมนต์และไม้ (Wood Cement Composites) จากวิธีการต่างๆ 3 วิธี ได้แก่

1.) Wood-Wool Cement Board (WWCB) คือ การนำไม้มาตัดเป็นชิ้น กว้าง 3 mm ยาว 40-50 cm หนา 0.5 cm มาผสมกับซีเมนต์ในอัตราส่วน 2 : 1 ถึง 1 : 1 โดยน้ำหนัก แช่เส้นใยในน้ำ เพื่อให้น้ำตาลโมเลกุลต่ำที่ละลายน้ำได้ถูกกำจัดออกมา เพื่อไม่ให้ขัดขวางปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีการเติมแคลเซียมคลอไรด์เพื่อเร่งการเซตตัวของซีเมนต์

2.) Cement-Bonded Particleboard (CBP) คือ การใช้ไม้แผ่นบางๆ ยาว 10-30 mm หนา 0.2-0.3 mm ปริมาณ 20% มาผสมกับซีเมนต์ 60% มาผสมกับซีเมนต์ และน้ำ 20% โดยน้ำหนัก เติมแคลเซียมคลอไรด์เพื่อเร่งการเซตตัวของซีเมนต์

3.) Wood-Fiber Reinforced Cement Composite คือ การใส่ทรายลงไปผสมกับซีเมนต์ และเส้นใยธรรมชาติชนิดเยื่อเคมีจากไม้เนื้ออ่อน โดยใส่ทรายที่บดละเอียด 60% เส้นใยไม้ 7-8.5% และซีเมนต์ 30% โดยน้ำหนัก เติมอะลูมิเนียมไตรไฮเดรต (3-4% โดยน้ำหนัก) ผสมส่วนผสมให้เข้ากันแล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นและทำให้แห้งด้วยระบบสุญญากาศ และอบภายใต้ความชื้นและความดันสูงเป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 200°C เพื่อเร่งการเซตตัวของซีเมนต์

Ling Fei Ma และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ผสมไม้ (CBBs) ด้วยวิธีการที่รวดเร็วขึ้น โดยจะวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่เป็นผลมาจากการเติมสารเติมแต่ง ได้แก่  $MgCl_2$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $NaHCO_3$ ,  $CaCl_2$  และ  $Na_2SiO_3$  เตรียมชิ้นงานโดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์ : น้ำ ประมาณ 0.5-0.6 ผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน แล้วเทลงในแม่แบบแบบแผ่นที่มีขนาด  $300 \times 300 \times 9 \text{ mm}^3$  แล้วทำการกดอัด โดยการกดอัดแผ่นไม้อัดซีเมนต์แบ่งเป็น 2 สภาวะ คือ

1) กดอัดแบบเย็น โดยให้อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้ซีเมนต์เซตตัวเป็นเวลา 14 วัน

2) กดอัดแบบร้อน โดยให้อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 11 นาที แล้วทำการบำบัดด้วยความร้อนที่ 100°C อีก 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมได้จากทั้ง 2 แบบ มาทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน JIS ซึ่งได้แก่การทำ Three-point bending ได้ให้ค่า MOR และ MOE การทดสอบโดยใช้ XRD และการวัดอุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 50 ชั่วโมง

ผลการทดสอบด้วย TG-DTA และ XRD พบว่า องค์การเกิดไฮเดรชันแปรผันตามปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่เกิดขึ้น แต่เมื่อใช้  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เป็นสารเติมแต่งจะทำให้การประมาณค่าองค์การเกิดไฮเดรชันไม่แม่นยำนัก เนื่องจาก  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดไฮเดรชัน จะทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$  ที่มาจาก  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

จากกราฟไฮเดรชันที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา พบว่า

1) ความเข้ากันได้ ( $C_A$ -factor) เป็นดัชนีที่วัดการเกิดพันธะระหว่างลิกนินเซลลูโลสในไม้กับซีเมนต์เป็นค่าอัตราส่วนการเกิดไฮเดรชันของ CCBs เทียบกับพื้นที่ได้กราฟของซีเมนต์ ค่า  $C_A$ -factor นี้สามารถใช้คาดคะเนดังสมการ

$$\text{MOR} = 1.13C_A - 14.80 \quad (r = 0.73)$$

$$\text{MOR} = 2.32T_{\text{MAX}} - 80.54 \quad (r = 0.93)$$

2) การเติม  $\text{CaCl}_2$  จะให้กราฟไฮเดรชัน ที่มีลักษณะคล้ายกับการเติม  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  แต่จะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีกว่า

3) การเติมสารเติมแต่งในปริมาณมากเกินไป ไม่ได้ทำให้การเกิดไฮเดรชันเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด เพียงแต่จะช่วยให้อัตราการเกิดไฮเดรชันรวดเร็วขึ้นเท่านั้น

สรุปได้ว่า การทำนายสมบัติเชิงกลจากองค์การเกิดไฮเดรชัน เป็นวิธีการที่ง่ายและรวดเร็ว เหมาะแก่การใช้เพื่อทดสอบสมบัติของสูตรผสมใหม่ๆ รวมไปถึงการปรับเปลี่ยนวัตถุดิบ ใดๆก็ตาม ควรคำนึงถึงผลของขนาดและลักษณะของเส้นใยด้วย

Kate E. Semple และคณะ [14] ศึกษาไม้ยูคาลิปตัสทั้ง 8 ชนิด เพื่อทดสอบการเข้ากันได้กับซีเมนต์ที่เหมาะสม ในการผลิตแผ่นไม้ซีเมนต์โดยขั้นตอนแรกได้เลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดที่เหมาะสม โดยทดสอบว่า ไม้ชนิดใดที่ไม่ขัดขวางปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงนำมาใช้ในการทดลองนี้ และนำไปศึกษาปริมาณส่วนที่นิ่มของไม้ และผลของการกำจัดสารที่ละลายได้ออกไป

การเตรียมตัวอย่างจะนำไม้แผ่นบางๆ มาเก็บที่อุณหภูมิ  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  และความชื้น  $65 \pm 5\%$  เป็นเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นนำส่วนแรกมาทดสอบไฮเดรชัน ส่วนที่เหลือนำไปกำจัดสารที่ละลายน้ำได้ออกไป แล้วค่อยนำไปทดสอบการเกิดไฮเดรชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบไฮเดรชันจะทำเทียบกันระหว่าง ตัวอย่างซีเมนต์ผสมแผ่นไม้และซีเมนต์ธรรมดา เมื่อผสมตัวอย่างแล้วปิดด้วยถุง PE จากนั้นนำเทปปิดใส่ถ้วย PS ที่มีการต่อเครื่องวัดอุณหภูมิ และใส่ในขวดสุญญากาศขนาด 1 ลิตร บันทึกผลทุก 15 นาที อ่านค่าอุณหภูมิสูงสุดและเวลาที่ใช้ เมื่อได้กราฟไฮเดรชันก็นำไปคำนวณค่า  $C_A$ -factor และ Hydration rate  $(R) = (T_{MAX} - T_{MIN})/Time$  โดยค่าอุณหภูมิต่ำสุดอ่านได้จากเมื่อเวลาไฮเดรชันอยู่ในช่วง 5 ชั่วโมงแรก

จากการทดลองพบว่า

- 1) ยูคาลิปตัสแต่ละชนิดมีอัตราการเกิดไฮเดรชันต่างกันขึ้นกับสารที่หลุดออกมาได้ เช่น พอลิแซคคาไรด์ และฟีนอลิกที่มาจากส่วนที่นิ่มของไม้และแก่นไม้ ไปขัดขวางการเกิดไฮเดรชัน
- 2) เมื่อศึกษาผลการกำจัดสารที่ละลายน้ำได้ออกไป จะมีอัตราการเกิดไฮเดรชันได้มากกว่า
- 3) ถ้ามีส่วนที่นิ่มของไม้มาก และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก จะเกิดไฮเดรชันได้ลดลง เพราะในส่วนที่นิ่มของไม้นั้นจะมีพอลิแซคคาไรด์ขัดขวางปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- 4) การกำจัดฟีนอลิกและเฮมิเซลลูโลส ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยน้ำเย็น แต่สารทั้ง 2 นี้ มีผลน้อยมากในการขัดขวางปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- 5) ไม้ยูคาลิปตัสชนิด *E.badgensis* เข้ากับซีเมนต์ได้ดีที่สุด

## บทที่ 3

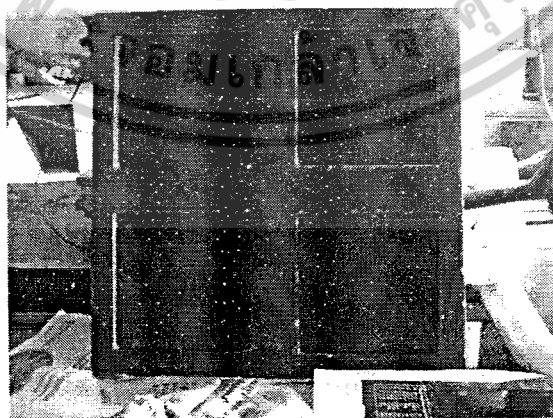
### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เกรดการค้า ตราเสือ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด
2. เส้นใยยูคาลิปตัส (Eucalyptus) ชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp; TMP)
3. สารละลายโซเดียมซิลิเกต เข้มข้น 50% โดยน้ำหนัก เกรดการค้า บริษัท ลาดกระบังเรซิน
4. โพแทชอะลูม (Potash Alum) เกรดการค้า ศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ องค์การค้าคุรุสภา

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ตะแกรงมาตรฐานขนาด 20 50 80 100 230 mesh บริษัท RETSCH รุ่น 5657 HAAN W.GERMANY
2. เครื่องร่อนตะแกรง บริษัท RETSCH รุ่น VIBRO
3. เครื่องชั่งอย่างละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument Company รุ่น TC 254
4. ตู้อบ บริษัท WBT binder รุ่น 7200 Tuttlingen/GERMANY
5. แม่พิมพ์โลหะสำหรับแผ่นไม้อัดซีเมนต์ ขนาด  $15 \times 15 \times 1 \text{ cm}^3$  แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แม่พิมพ์โลหะสำหรับแผ่นไม้อัดซีเมนต์ ขนาด  $15 \times 15 \times 1 \text{ cm}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding Machine) บริษัท LAB TECH ENGINEERING รุ่น LP20
7. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal tester) บริษัท LLOYD Instrument รุ่น LR 5 kN
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope) บริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP
9. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) บริษัท K.Wasana Perkin LTd. รุ่น FT-IR Spectrum GX
10. ที่ยัดแม่แบบโลหะ

### 3.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

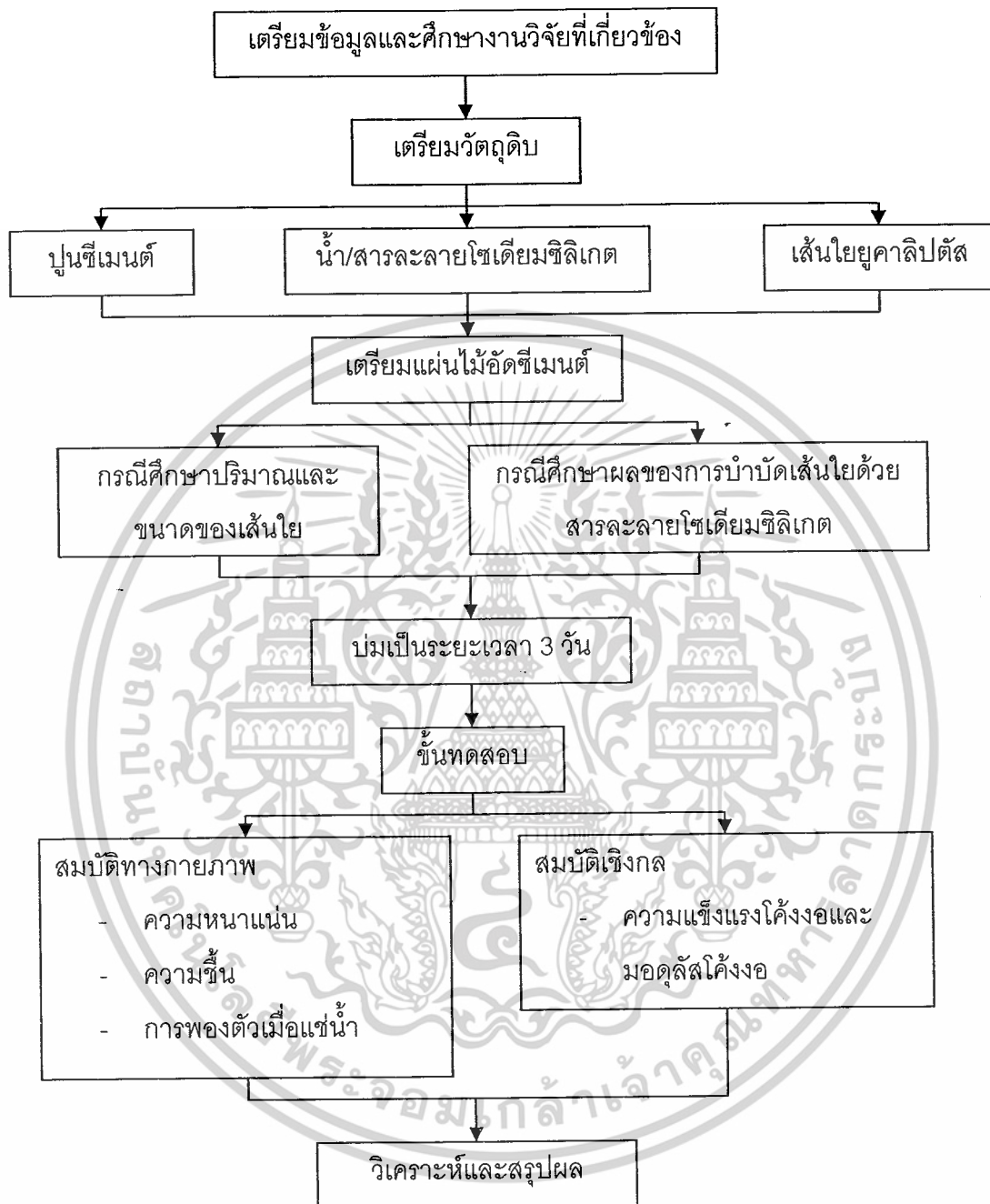
เริ่มต้นจากการศึกษาหาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากนั้นทำการเตรียมวัสดุดิบ ได้แก่ ปูนซีเมนต์และเส้นใย แล้วทำการศึกษาวิธีการผสมวัสดุดิบต่างๆ เมื่อได้วิธีการที่เหมาะสมแล้ว จึงเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์ตามปัจจัยที่จะศึกษาและนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ

ปัจจัยศึกษาและการทดสอบสมบัติคอนกรีต

1. การเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์
  - ศึกษาผลของปริมาณและขนาดของเส้นใยที่มีผลต่อแผ่นไม้อัดซีเมนต์
  - ศึกษาผลของการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นไม้อัดซีเมนต์
2. การทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น การพองตัวเมื่อแช่น้ำ
3. การทดสอบสมบัติทางเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ
4. การวิเคราะห์ลักษณะฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS
5. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (IR)

สำหรับแผนการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปเป็นแผนผัง แสดงดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ขั้นตอนการวิจัย

#### 3.4.1 การเตรียมวัสดุดิบ

1) **ปูนซีเมนต์** โดยนำปูนซีเมนต์มาร่อนคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานขนาด 50 80 100 230 mesh โดยเลือกใช้ขนาดที่มีปริมาณมากที่สุด แสดงดังตารางที่ 3.1

2) **สารละลายโซเดียมซิลิเกต** นำสารละลายโซเดียมซิลิเกตเข้มข้น 50% โดยมวล มาเจือจางด้วยน้ำให้มีความเข้มข้น 2.5% โดยมวล

3) **เส้นใยคาลิปดัส** นำเส้นใยคาลิปดัสมาร่อนคัดแยกด้วยตะแกรงมาตรฐานขนาด 20 50 100 mesh ขนาดของเส้นใยที่เลือกใช้แสดงดังตารางที่ 3.1 สำหรับเส้นใยที่ใช้ในการทดลองแบ่งการเตรียมเป็น 2 กรณี

- **เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด (Untreated Fiber)** นำเส้นใยที่ผ่านการร่อนมาแช่น้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง
- **เส้นใยที่ผ่านการบำบัด (Treated Fiber)** นำเส้นใยที่ผ่านการร่อนมาแช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

นำเส้นใยที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต ไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (IR)

ตารางที่ 3.1 ขนาดของอนุภาคของปูนซีเมนต์ และเส้นใยคาลิปดัสที่เลือกใช้

วัสดุดิบ	ขนาดของอนุภาคที่ใช้ (mesh)		
ปูนซีเมนต์	100-230		
เส้นใยคาลิปดัส	20	20-50	50-100
	(850 $\mu\text{m}$ )	(300-850 $\mu\text{m}$ )	(150-300 $\mu\text{m}$ )

#### 3.4.2 การเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์

1) กำหนดให้มวลรวมของแผ่นไม้อัดซีเมนต์เป็น 400 g

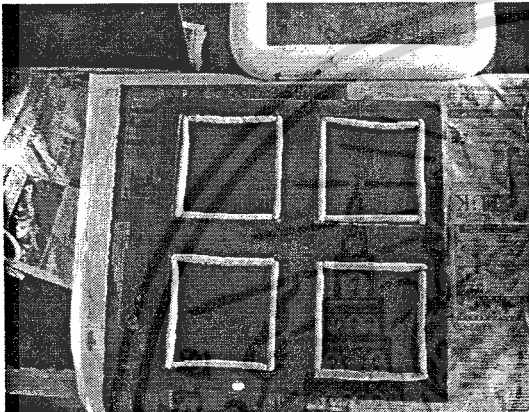
(มวลรวม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ และเส้นใยคาลิปดัส )

- อัตราส่วนของมวลรวม : น้ำ เป็น 1 : 0.4 โดยน้ำหนัก

- ชั่งเส้นใยในปริมาณ 5% 7.5% และ 10% โดยน้ำหนักของมวลรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่น้ำหนักมวลรวมที่เหลือเป็นน้ำหนักของปูนซีเมนต์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชั่งโพแทสเซียมในปริมาณ 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์
- 2) ผสมเส้นใยกับน้ำให้เข้ากัน แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3) ผสมปูนซีเมนต์กับโพแทสเซียมให้เข้ากัน จากนั้นจึงนำไปผสมกับเส้นใยที่เตรียมไว้
- 4) เทของผสมที่เตรียมได้ลงในแม่แบบโลหะขนาด  $15 \times 15 \times 1 \text{ cm}^3$  ที่ทาน้ำมันซิลิโคน และที่ขอบแม่แบบโลหะมียางกันไว้ แสดงดังรูปที่ 3.3 จากนั้นนำแผ่นโลหะมาปิดทับ



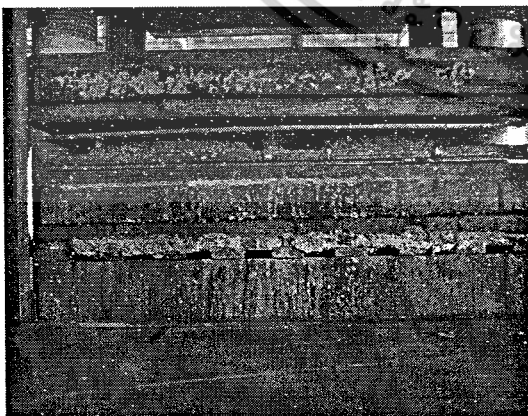
(ก)



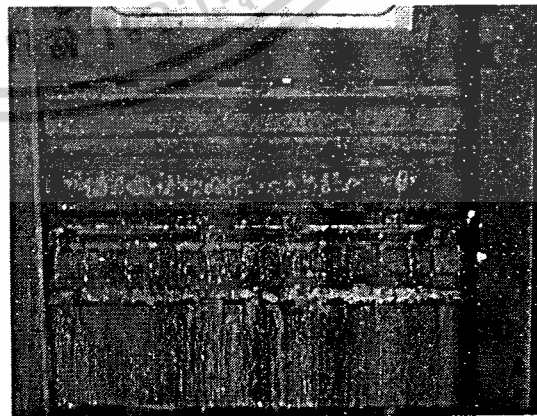
(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) แม่แบบโลหะที่ทาน้ำมันซิลิโคนและที่ขอบแม่แบบโลหะมียางกันไว้  
(ข) เทของผสมที่เตรียมได้ลงในแม่แบบโลหะ

- 5) นำไปกดอัดด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องและความดัน 180 MPa เป็นเวลา 30 นาที แสดงดังรูปที่ 3.4



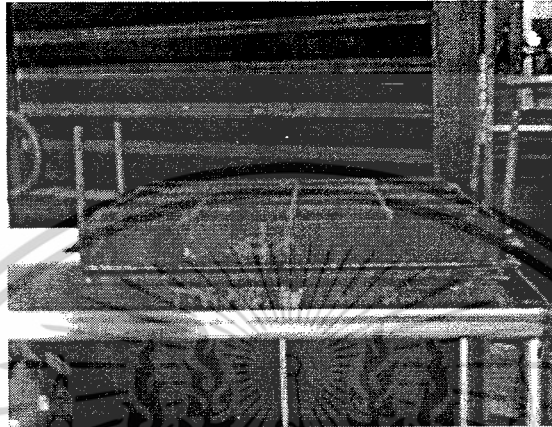
(ก)



(ข)

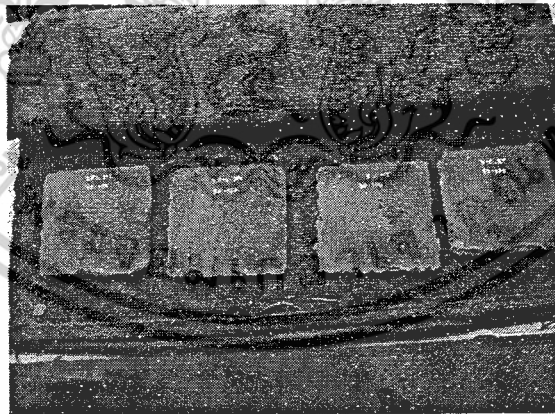
รูปที่ 3.4 การกดอัดแผ่นไม้อัดซีเมนต์ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (ก) ก่อนกด (ข) หลังกด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) นำแม่แบบโลหะออกจากเครื่องอัดขึ้นรูป แล้วทำการยึดแม่แบบโลหะให้คงรูปที่ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้แผ่นไม้อัดซีเมนต์เซตตัว แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การยึดแม่แบบโลหะให้คงรูป

7) แกะแผ่นไม้อัดซีเมนต์ออกจากแม่แบบโลหะ แล้วนำไปบ่มที่ความชื้นสูงเป็นเวลา 3 วัน แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การบ่มที่ความชื้นสูง

8) นำแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 วัน

9) เมื่อครบกำหนดแล้วนำแผ่นไม้อัดซีเมนต์ตั้งทิ้งไว้ เพื่อให้แผ่นไม้อัดซีเมนต์มีอุณหภูมิ

เท่ากับอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปภายนอกให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
10) วัดขนาดและตัดเป็นชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) กรณีศึกษาผลของปริมาณและขนาดของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นไม้อัดซีเมนต์

ซึ่งปูนซีเมนต์ น้ำ โฟแทชอะลัม และเส้นใย ในอัตราส่วนแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยให้ปริมาณเส้นใยเป็น 5% 7.5% และ 10% โดยน้ำหนักของมวลรวม สำหรับขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้คือ 20 20-50 และ 50-100 mesh จากนั้นเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ต้องการศึกษาเหมือนกับวิธีการในข้อ 3.4.2

ข) กรณีศึกษาผลของการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นไม้อัดซีเมนต์

ใช้อัตราส่วนของวัตถุดิบทุกอย่างเหมือนกับกรณีศึกษาในข้อ ก) โดยเปลี่ยนจากน้ำมาใช้เป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกตแทน

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของวัตถุดิบสำหรับการเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ (g)	น้ำ (g)	ปริมาณเส้นใย		โฟแทชอะลัม (g)	ขนาดเส้นใย (mesh)		
		(g)	(%)				
380	160	20	5	3.8	20	20-50	50-100
370	160	30	7.5	3.7	20	20-50	50-100
360	160	40	10	3.6	20	20-50	50-100

### 3.4.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ [15]

#### 3.4.3.1 การหาค่าความหนาแน่น (Density)

นำแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ได้หลังจากที่ผ่านการบ่ม และอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 1 วัน มาตัดให้ได้ขนาด  $2 \times 7 \text{ cm}^2$  จากนั้นนำมาชั่งหาน้ำหนักที่แน่นอน นำฟิล์มยืดมาห่อแผ่นไม้อัดซีเมนต์ทั้งหมด 2 ชั้น เพื่อป้องกันการซึมผ่านของน้ำ แล้วนำแผ่นไม้อัดซีเมนต์ไปแทนที่น้ำ ผลการทดลองที่ได้นำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$D = M/V$$

เมื่อ  $D$  = ความหนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$M$  = มวลรวมของก้อนคอนกรีต (g)

$V$  = ปริมาตรของน้ำที่ถูกแทนที่ ( $\text{cm}^3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3.2 การหาค่าความชื้น

- 1) นำชิ้นทดสอบขนาด  $2 \times 7 \text{ cm}^2$  มาชั่งให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน 2 ตำแหน่งเป็นน้ำหนักก่อนอบ
- 2) อบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  จนมีน้ำหนักคงที่ คือน้ำหนักชิ้นทดสอบที่ชั่ง 2 ครั้งห่างกันอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ต่างกันไม่เกินร้อยละ 0.1
- 3) นำชิ้นทดสอบทิ้งให้เย็นในเดซิกเคเตอร์
- 4) ชั่งชิ้นทดสอบเป็นน้ำหนักอบแห้ง แล้วนำมาคำนวณค่าความชื้นจากสูตร

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ (g)} - \text{น้ำหนักอบแห้ง (g)}}{\text{น้ำหนักอบแห้ง (g)}} \times 100$$

### 3.4.3.3 การหาค่าการพองตัวเมื่อแช่น้ำ

- 1) นำแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ได้จากการบ่ม มาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เป็นระยะเวลา 1 วัน จากนั้นนำมาตัดให้ได้ขนาด  $5 \times 5 \text{ cm}^2$
- 2) ทำเครื่องหมายตามตำแหน่งทั้ง 4 ตำแหน่ง แล้ววัดความหนาหาค่าเฉลี่ยเป็นความหนาก่อนแช่น้ำ
- 3) แช่ชิ้นทดสอบในน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง โดยชิ้นทดสอบต้องตั้งได้ฉากกับผิวน้ำ
- 4) แช่ชิ้นทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นทดสอบขึ้นมาซับน้ำที่ผิวออกให้หมดด้วยผ้าหมาดแล้วปล่อยให้ที่อุณหภูมิห้อง
- 5) นำชิ้นทดสอบมาวัดความหนาที่ตำแหน่งเดิม แล้วหาค่าเฉลี่ยเป็นความหนาหลังแช่น้ำนำมาคำนวณค่าการพองตัวเมื่อแช่น้ำจากสูตร

$$\text{ร้อยละการพองตัวเมื่อแช่น้ำ} = \frac{\text{ความหนาหลังแช่น้ำ (mm)} - \text{ความหนาก่อนแช่น้ำ (mm)}}{\text{ความหนาก่อนแช่น้ำ (mm)}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล [15]

#### 3.4.4.1 การหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus)

1) นำแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ได้จากการบ่ม มาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 1 วัน จากนั้นนำมาตัดให้ได้ขนาด  $2 \times 7 \text{ cm}^2$

2) วัดความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบ แล้วหาค่าเฉลี่ย

3) นำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Tester) ขนาด 5 kN ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ แล้วทำการบันทึกแรงกดสูงสุดที่ชิ้นทดสอบรับได้ แรงกดที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรง ระยะแอนตัวที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรง แล้วนำไปคำนวณค่าแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอจากสูตร

$$f = \frac{3WL}{2bd^2}$$

เมื่อ  $f$  คือ ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)

$W$  คือ แรงกดสูงสุดที่ชิ้นทดสอบรับได้ (N)

$L$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแท่นรองรับ (mm)

$b$  คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ (mm)

$d$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm)

$$E = \frac{L^3 \Delta W}{4bd^3 \Delta S}$$

เมื่อ  $E$  คือ มอดุลัสโค้งงอ (MPa)

$L$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแท่นรองรับ (mm)

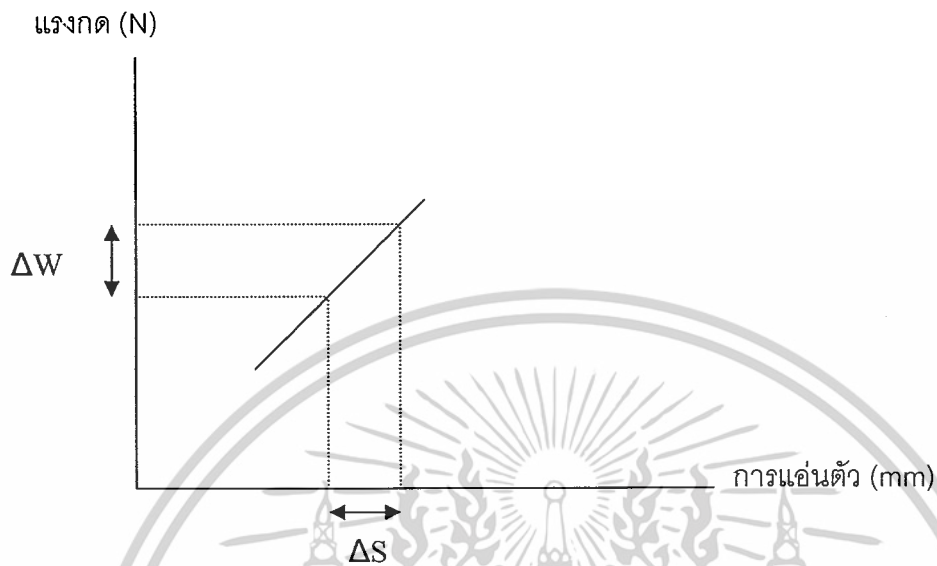
$\Delta W$  คือ แรงกดที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรง (N) แสดงดังรูปที่ 3.7

$\Delta S$  คือ ระยะแอนตัวที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรง (mm) แสดงดังรูปที่ 3.7

$b$  คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ (mm)

$d$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด (N) กับการแฉ่งตัว (mm) [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเส้นใยคาลิปต์ชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (Thermo Mechanical Pulp; TMP) มาผสมกับปูนซีเมนต์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ต่อน้ำในอัตราส่วนโดยมวลเป็น 1:0.4 เส้นใยที่ใช้มี 3 ขนาด คือ 20 20-50 และ 50-100 mesh โดยปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยเป็น 5% 7.5% และ 10% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น การพองตัวเมื่อแช่น้ำ ทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) มอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) และตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ ได้แก่ การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (IR) ซึ่งแสดงผลการทดลองดังนี้

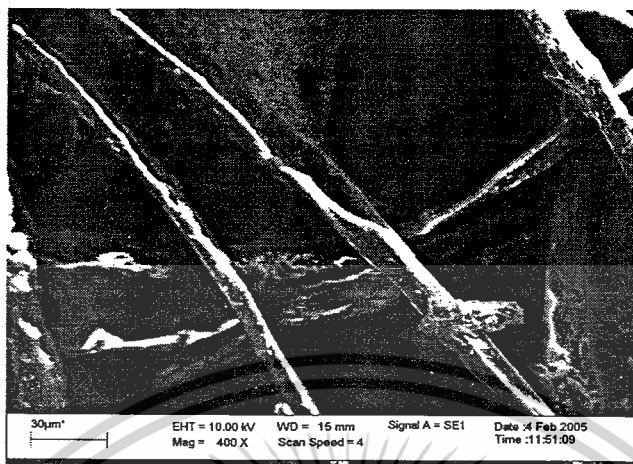
#### 4.1 ผลการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

##### 4.1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

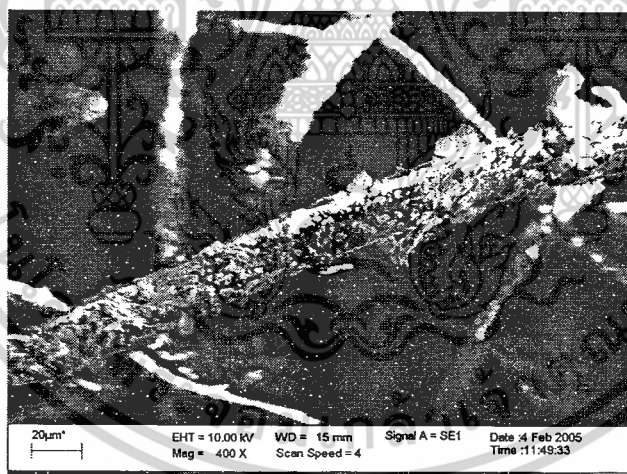
##### และการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยคาลิปต์ชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล ทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงผลดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 (ภาคผนวก ก) พบว่า เส้นใยคาลิปต์ชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (TMP) ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ มีลักษณะเป็นเส้นใยสีน้ำตาลเกี่ยวพันกันเป็นกลุ่มก้อน แสดงดังรูปที่ 4.3 มีขนาดประมาณ 150-850  $\mu\text{m}$  พื้นผิวเส้นใยมีลักษณะเรียบและไม่พบว่ามีสารใดเคลือบเกาะที่ผิว เมื่อเปรียบเทียบกับสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ พบว่ามีอนุภาคของสารบางชนิดเคลือบอยู่ที่ผิวเส้นใย และเมื่อวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของอนุภาคที่เคลือบบนผิวเส้นใยที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ด้วยเทคนิค EDS พบว่ามีธาตุองค์ประกอบได้แก่ โซเดียม (Na) ซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) ซึ่งธาตุซิลิกอนที่พบนี้น่าจะมาจากกรอกตัวของซิลิกาจากสารละลายโซเดียมซัลไฟด์บนพื้นผิวของเส้นใย ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ EDS พบว่า ธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวเส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์มีเพียงธาตุคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) จากเซลลูโลสและองค์ประกอบอินทรีย์ในเส้นใยเท่านั้น แสดงดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

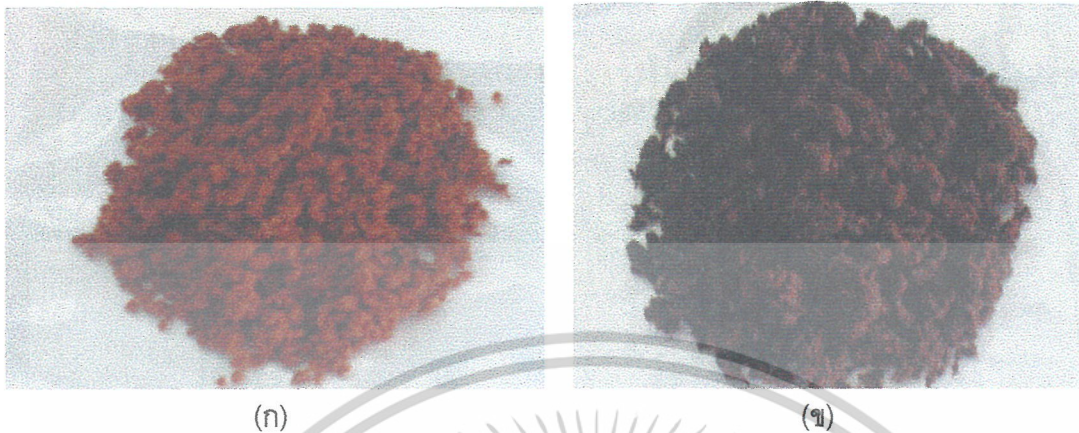


รูปที่ 4.1 SEM Micrograph แสดงลักษณะพื้นผิวของเส้นใยพอลิเอทิลีนที่ได้รับความร้อนเชิงกลที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์



รูปที่ 4.2 SEM Micrograph แสดงลักษณะพื้นผิวของเส้นใยพอลิเอทิลีนที่ได้รับความร้อนเชิงกลที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ลักษณะเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนแข็งที่ไม่ผ่าน (ก) และผ่าน (ข) การบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

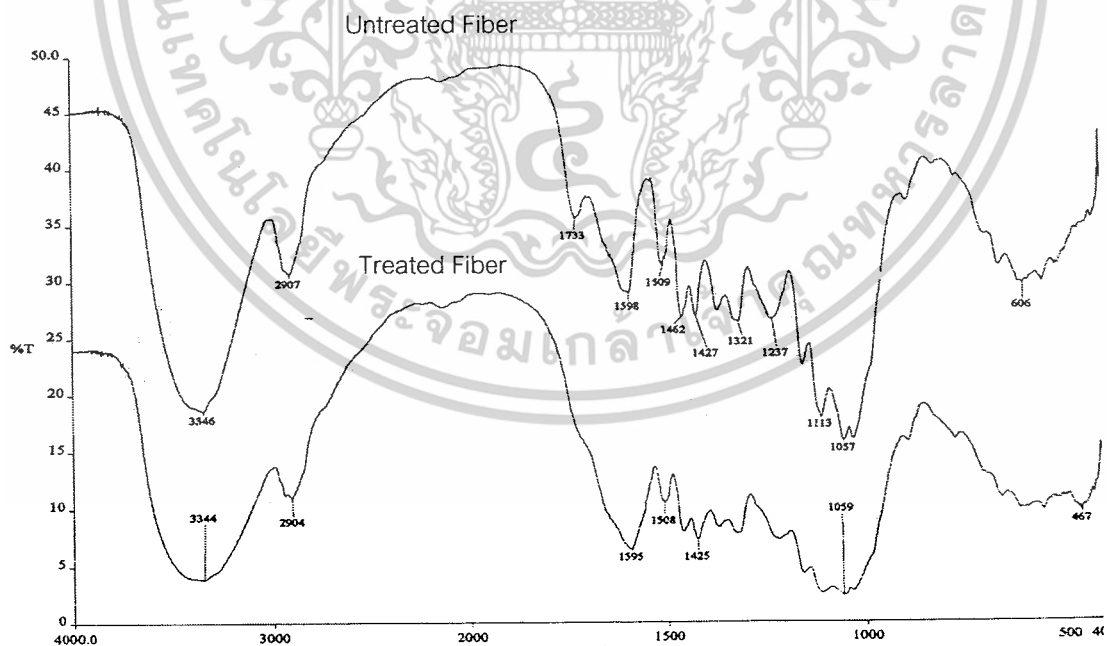
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบด้วย EDS แสดงปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยที่ไม่ผ่าน และผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

ธาตุ	% โดยน้ำหนัก	
	เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด	เส้นใยที่ผ่านการบำบัด
C	84.98	64.28
O	15.02	18.30
Na	-	2.01
Si	-	15.41
รวม	100.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (IR)

จากการนำเส้นใยคาลิปต์สชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (TMP) ที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตไปวิเคราะห์ของหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค IR ได้สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต จะปรากฏหมู่ฟังก์ชันของลิกนินที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ โดยพบหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่เลขคลื่น (Wave number)  $1733\text{ cm}^{-1}$  [16] ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวนี้ ไม่ปรากฏในสเปกตรัมของเส้นใยที่ผ่านการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทั้งนี้เนื่องมาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีความเป็นเบสสูง ทำให้ลิกนินในเส้นใยละลายออกมากับน้ำ ขณะขึ้นรูปด้วยการกดอัดน้ำบางส่วนจะถูกรีดออกมาจากแผ่นไม้อัดซีเมนต์ จึงพาลิกนินออกไปด้วย ดังนั้นจึงไม่พบหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของลิกนินในสเปกตรัมของเส้นใยที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต นอกจากนี้เส้นใยที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตยังแสดงสเปกตรัมที่เลขคลื่น  $467$  และ  $1059\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเนื่องมาจากการสันของพันธะ Si-O ของอนุภาคซิลิกาที่ก่อตัวบนผิวเส้นใย พิกัดดังกล่าวไม่พบในสเปกตรัมของเส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต



รูปที่ 4.4 IR spectrum ของเส้นใยคาลิปต์สชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (TMP) ที่ไม่ผ่านและผ่าน

การบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

### 4.2.1 ความหนาแน่น

เมื่อนำแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (TMP) โดยใช้ปริมาณเส้นใย 5% 7.5% และ 10% โดยน้ำหนัก ทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ไปทดสอบหาค่าความหนาแน่น ได้ค่าความหนาแน่นดังแสดงในตารางที่ 4.2 (ภาคผนวก ข-1) จากผลการทดลองพบว่า แผ่นไม้อัดซีเมนต์ทุกสูตรมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน กล่าวคือ มีความหนาแน่นประมาณ 1.2-1.5 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นไม้อัดซีเมนต์เกรดการค้า (ประมาณ 1.1-1.3 g/cm<sup>3</sup>, ภาคผนวก ง) เมื่อเปรียบเทียบแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่มีปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของแผ่นไม้อัดซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเส้นใยไม่มีความหนาแน่นน้อยกว่าปูนซีเมนต์เมื่อสัดส่วนของเส้นใยไม่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงจึงทำให้ความหนาแน่นของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ลดลง เมื่อเปรียบเทียบผลของขนาดของเส้นใย (20-100 mesh) และการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ พบว่าค่าความหนาแน่นของแผ่นไม้อัดซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากความหนาแน่นเป็นสมบัติทางกายภาพที่ขึ้นกับมวลรวม เส้นใยชนิดเดียวกันย่อมมีความหนาแน่นเท่ากันแม้จะมีขนาดเส้นใยต่างกันก็ตาม ดังนั้นในปริมาณเส้นใยที่เท่ากันค่าความหนาแน่นของแผ่นไม้อัดซีเมนต์จึงมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่น

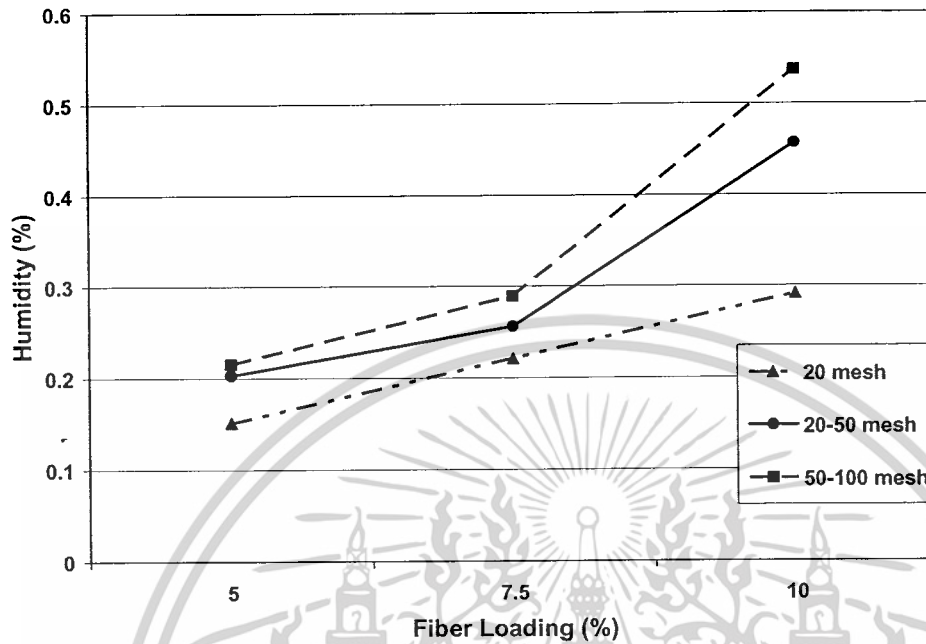
ขนาดของเส้นใย (mesh)	ปริมาณเส้นใย (%)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	
		เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด	เส้นใยที่ผ่านการบำบัด
20	5	1.50	1.48
	7.5	1.44	1.43
	10	1.39	1.37
20-50	5	1.48	1.50
	7.5	1.42	1.38
	10	1.31	1.32
50-100	5	1.49	1.46
	7.5	1.36	1.37
	10	1.28	1.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

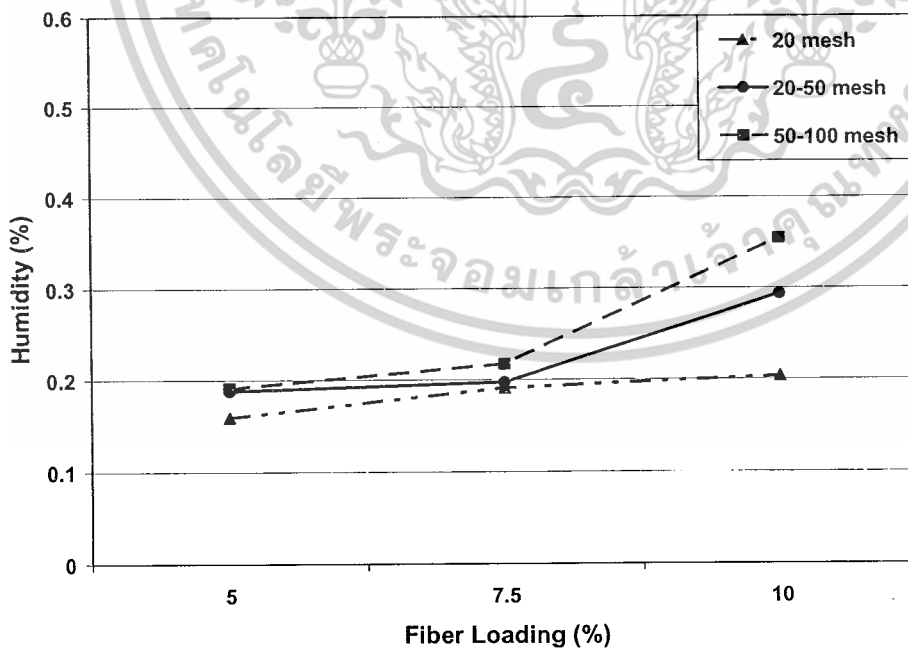
#### 4.2.2 ความชื้น

ผลการทดสอบค่าการดูดความชื้นของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่มีปริมาณ ขนาดและการบำบัด เส้นใยที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 (ภาคผนวก ข-2) โดยจะเห็นได้ว่า ความชื้นของ แผ่นไม้อัดซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นและขนาดเส้นใยลดลง เนื่องจากเส้นใยมี เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักจึงมีหมู่ไฮดรอกซีที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับน้ำได้ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจึงทำให้มีหมู่ไฮดรอกซีเกิดพันธะไฮโดรเจนได้มากขึ้น และ เมื่อขนาดของเส้นใยลดลงจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น หมู่ไฮดรอกซีในเซลลูโลสสามารถสัมผัส กับสิ่งแวดล้อมได้ดี จึงเกิดการดูดความชื้นที่อินเทอร์เฟซ (Interface) มีโอกาสเกิดพันธะไฮโดรเจน ได้มากขึ้นเช่นกัน

กรณีศึกษาผลของการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่า แผ่นไม้อัด ซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัดมีปริมาณความชื้นในช่วง 0.15-0.35% ส่วนแผ่นไม้ อัดซีเมนต์ที่ผ่านการบำบัดมีปริมาณความชื้นในช่วง 0.15-0.55% จากค่าที่ได้แสดงว่าการบำบัดมี ผลต่อการดูดความชื้นของเส้นใยในแผ่นไม้อัดซีเมนต์เนื่องมาจากการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลาย โซเดียมซิลิเกต บนพื้นผิวเส้นใยจะถูกเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา (ยืนยันผลได้จาก SEM micrograph รูปที่ 4.2) ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ต่ำกว่ากับ เซลลูโลสของเส้นใย และซิลิกาจะแทรกตัวอยู่ระหว่างรอยต่อของปูนซีเมนต์และเส้นใย ทำให้มี ปริมาณเซลลูโลสที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำลดลง ดังนั้นค่าการดูดความชื้นของแผ่นไม้อัด ซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตจึงมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยทั้ง 2 แบบมีค่าน้อยกว่า แผ่นไม้อัดซีเมนต์เกรดการค้าที่เตรียมจากขี้เถ้าซึ่งมีปริมาณความชื้นถึง  $12 \pm 3\%$  เนื่องจากเกรด การค้าใช้ขี้เถ้าในปริมาณมากกว่า (อัตราส่วนโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ : ขี้เถ้า เป็น 1.78 : 1)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดความชื้นกับปริมาณเส้นใยของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยทั้ง 3 ขนาดที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดความชื้นกับปริมาณเส้นใยของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่

เตรียมจากเส้นใยทั้ง 3 ขนาดที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 การพองตัวเมื่อแช่น้ำ

การทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.878-2532) ทำได้โดยการนำแผ่นไม้อัดซีเมนต์มาวัดความหนา 4 จุดด้วยไมโครมิเตอร์ แล้วนำแผ่นไม้อัดซีเมนต์ดังกล่าวไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาวัดความหนาใน 4 จุดเดิม นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละการพองตัวเมื่อแช่น้ำ แสดงดังตารางที่ 4.3 (ภาคผนวก ข-3)

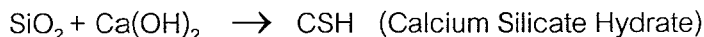
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการพองตัวเมื่อแช่น้ำของแผ่นไม้อัดซีเมนต์

ขนาดของเส้นใย (mesh)	ปริมาณเส้นใย (%)	การพองตัวเมื่อแช่น้ำ (%)	
		เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด	เส้นใยที่ผ่านการบำบัด
20	5	n/a	0.01
	7.5	n/a	0.01
	10	n/a	0.02
20-50	5	n/a	0.02
	7.5	n/a	0.02
	10	n/a	0.02
50-100	5	n/a	0.02
	7.5	n/a	0.02
	10	n/a	0.03

จากผลการทดลองพบว่า แผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ใช้เส้นใยแบบไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตทุกสูตร เมื่อนำไปแช่น้ำจะเกิดการหลุดลอกของแผ่นไม้อัดซีเมนต์จนไม่สามารถวัดการพองตัวเมื่อแช่น้ำได้ ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากการยึดเกาะระหว่างปูนซีเมนต์กับเส้นใยธรรมชาติไม่ดี เมื่อเส้นใยดูดซับน้ำในปริมาณมากจึงเกิดการพองตัวดันให้แผ่นไม้อัดซีเมนต์ขยายออกและเกิดการหลุดร่อน ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณร้อยละการพองตัวได้ ส่วนแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต มีการยึดเกาะระหว่างปูนซีเมนต์กับเส้นใยที่ดีกว่า ไม่เกิดการหลุดลอกของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่พื้นผิว ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีอนุภาคซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เคลือบอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยซิลิกาจะเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ดังสมการ



ซึ่ง CSH เป็นสารประเภทเดียวกับองค์ประกอบหลักปูนซีเมนต์ จึงเกิดการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยกับปูนซีเมนต์ได้ดีกว่ากรณีใช้เส้นใยแบบไม่ผ่านการบำบัด จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าทั้งปริมาณและขนาดของเส้นใยธรรมชาติมีผลต่อการพองตัวของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นและขนาดของเส้นใยลดลงเป็นผลให้การพองตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก จึงมีหมู่ไฮดรอกซีในเซลล์ลูโลสที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เมื่อเส้นใยมีขนาดเล็กหรือมีปริมาณมาก เป็นผลให้เกิดรอยต่อระหว่างภูมิภาคที่บริเวณผิวของเส้นใยมากขึ้น ซึ่งเป็นตำแหน่งที่โมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปได้ง่าย ส่งผลให้เกิดการดูดน้ำหรือความชื้นที่อินเทอร์เฟซ (Interface) มากขึ้นจึงดูดน้ำและพองตัวได้มาก



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.7 การพองตัวเมื่อแช่น้ำของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยที่ไม่ผ่าน (ก) และผ่าน (ข) การบำบัดด้วยสารละลายไฮเดรตซิลิเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 4.3.1 ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength)

ผลการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Tester) โดยใช้ Load cell ขนาด 5 kN แล้วคำนวณค่าความแข็งแรงโค้งงอ แสดงดังตารางที่ 4.4 (ภาคผนวก ค-1)

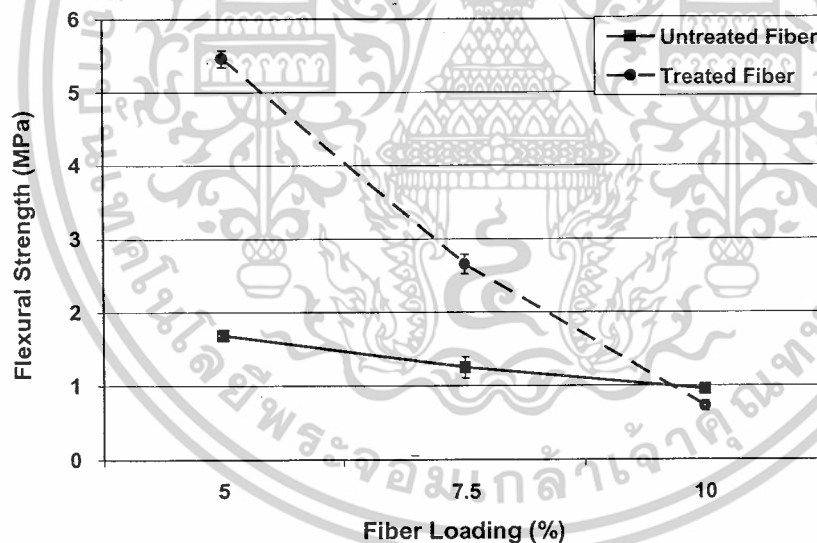
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ

ขนาดของเส้นใย (mesh)	ปริมาณเส้นใย (%)	ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	
		เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด	เส้นใยที่ผ่านการบำบัด
20	5	1.63 ± 0.05	5.17 ± 0.45
	7.5	1.33 ± 0.06	4.53 ± 0.14
	10	0.94 ± 0.05	0.92 ± 0.08
20-50	5	1.68 ± 0.08	5.46 ± 0.12
	7.5	1.25 ± 0.14	2.66 ± 0.13
	10	0.95 ± 0.05	0.73 ± 0.07
50-100	5	1.5 ± 0.10	6.09 ± 0.25
	7.5	1.25 ± 0.08	3.11 ± 0.33
	10	1.27 ± 0.06	1.01 ± 0.08

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงโค้งงอของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมโดยใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านและผ่านบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แสดงว่า เส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (TMP) ในงานวิจัยนี้เป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non - reinforcing fillers) ไม่สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุได้ ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งหรือมอดุลัสสูงมีปริมาณลดลง นอกจากนี้เส้นใยที่ใช้มีความยาวค่อนข้างสั้น (ประมาณ 150-850  $\mu\text{m}$ ) และยังมีความสามารถในการดูดน้ำสูง การใช้เส้นใยปริมาณมากจึงมีความยากในการผสมเส้นใยกับปูนซีเมนต์ อาจเกิดการกระจุกตัวเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใยที่ไม่กระจายตัวเป็นรอยดำในชิ้นงานไม้อัดซีเมนต์ สำหรับขนาดเส้นใยพบว่าไม่มีผลต่อการเสริมแรง เนื่องจากเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกลนี้เป็นเส้นใยสั้น จึงมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของปลายของเส้นใย (Fiber ends) อยู่มาก [17] ทำให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงลดลง เพราะมีความเค้นเฉือนบริเวณปลายเส้นใยสูง ทำให้เกิดรอยตำหนิ (Weak point) บริเวณรอยต่อระหว่างปูนซีเมนต์กับเส้นใยมากขึ้น

ผลของการศึกษาการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตพบว่า ค่าความแข็งแรงโค้งงอของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการบำบัดจะมีค่าสูงกว่า แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากหลังผ่านการบำบัดแล้ว บนพื้นผิวของเส้นใยจะมีอนุภาคซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เคลือบอยู่ โดยซิลิกาเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 4.2.3 ซึ่ง CSH เป็นสารประเภทเดียวกับองค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการเชื่อมต่อยึดระหว่างเส้นใยกับปูนซีเมนต์ดีกว่ากรณีที่ใช้เส้นใยที่ไม่ได้บำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงโค้งงอกับปริมาณเส้นใยของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยยูคาลิปตัสขนาด 20-50 mesh ที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

#### 4.3.2 มอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus)

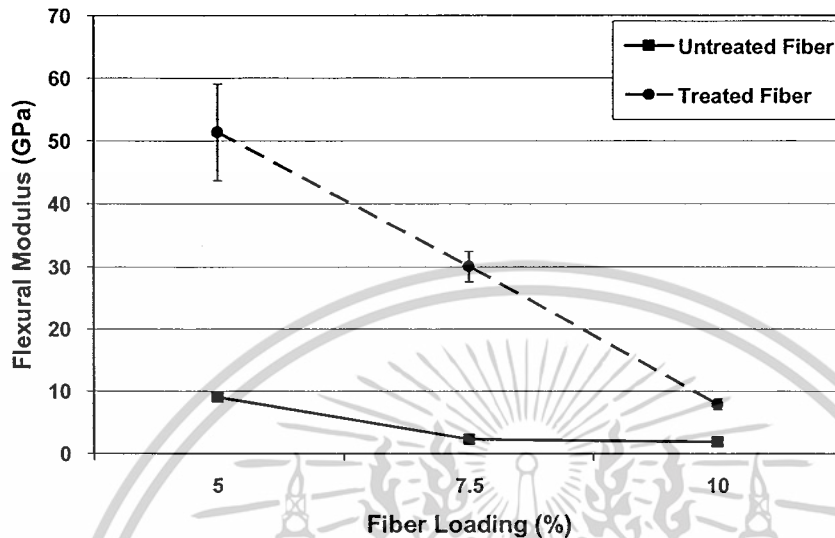
ผลการทดสอบมอดุลัสโค้งงอของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Tester) โดยใช้ Load cell ขนาด 5 kN ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.5 (ภาคผนวก ค-2)

จากการศึกษาพบว่า ค่ามอดุลัสโค้งงอของเส้นใยที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนของเส้นใยไม้เพิ่มขึ้นและปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้แผ่นไม้อัดซีเมนต์มีความแข็งแรงลดลงตามกฎของการผสม (Rule of mixer) ส่วนผลของขนาดพบว่า ขนาดเส้นใยไม่มีผลต่อการเสริมแรงเช่นเดียวกับกรณีของค่าความแข็งแรงโค้งงอ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบมอดุลัสโค้งงอ

ขนาดของเส้นใย (mesh)	ปริมาณเส้นใย (%)	มอดุลัสโค้งงอ (GPa)	
		เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด	เส้นใยที่ผ่านการบำบัด
20	5	5.79 ± 0.32	51.67 ± 6.05
	7.5	4.87 ± 0.31	45.48 ± 5.92
	10	3.23 ± 0.28	3.73 ± 0.55
20-50	5	9.07 ± 0.59	51.40 ± 7.66
	7.5	2.31 ± 0.33	30.01 ± 2.45
	10	1.93 ± 0.15	7.91 ± 0.86
50-100	5	6.13 ± 1.08	59.60 ± 11.51
	7.5	4.22 ± 0.37	19.81 ± 3.60
	10	3.31 ± 0.33	3.55 ± 0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสโค้งงอกับปริมาณเส้นใยของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใยยูคาลิปตัสขนาด 20-50 mesh ที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลของการศึกษาการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่ามอดุลัสโค้งงอกของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการบำบัดที่ปริมาณเส้นใย 5% จะมีค่าสูงกว่าแบบที่ไม่ผ่านการบำบัดถึง 5 เท่า (52 GPa เทียบกับ 9 GPa) เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของเส้นใยที่ผ่านการบำบัดจะมีอนุภาคซิลิกาตกตะกอนลงมาเคลือบบนพื้นผิวเส้นใย โดยซิลิกาเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 4.2.3 และ 4.3.1

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้สามารถเตรียมแผ่นไม้อัดซีเมนต์จากปูนซีเมนต์ผสมเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (TMP) ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปได้ โดยแบ่งปัจจัยการศึกษาออกเป็น 3 ปัจจัย ได้แก่ ศึกษาผลของขนาดเส้นใย ปริมาณเส้นใย และการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซลิเกต ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองในแต่ละปัจจัยศึกษาได้ดังนี้

- ผลของขนาดเส้นใย

เมื่อขนาดของเส้นใยลดลงจะส่งผลให้แผ่นไม้อัดซีเมนต์ มีค่าการดูดความชื้นและการพองตัวเมื่อแช่น้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ทำให้หมู่ไฮดรอกซีของเซลลูโลสเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ แต่ขนาดของเส้นใยไม่มีผลต่อความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ เนื่องจากเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกล (TMP) เป็นเส้นใยสั้นเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (non-reinforced filler) มีส่วนปลายของเส้นใยมาก ซึ่งเป็นจุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูง เป็นผลให้เกิดรอยตำหนิตรงบริเวณรอยต่อระหว่างปูนซีเมนต์กับเส้นใยมากขึ้น

- ผลของปริมาณเส้นใย

เมื่อปริมาณเส้นใยในแผ่นไม้อัดซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น จึงมีหมู่ไฮดรอกซีของเซลลูโลสในเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การดูดความชื้นและการพองตัวเมื่อแช่น้ำเพิ่มขึ้น และเนื่องจากเส้นใยมีความหนาแน่นต่ำกว่าปูนซีเมนต์ เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจึงทำให้ความหนาแน่นของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ลดลงเช่นเดียวกับความแข็งแรงโค้งงอกับมอดุลัสโค้งงอที่มีค่าลดลง เพราะการเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งหรือมอดุลัสสูงมีปริมาณลดลง

- ผลของการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซลิเกต

การบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซลิเกต ไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นและความชื้น แต่มีผลต่อการพองตัวเมื่อแช่น้ำ โดยแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ไม่ผ่านการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซลิเกต ไม่สามารถคำนวณร้อยละการพองตัวได้ ส่วนแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่ผ่านการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมซลิเกต คำนวณร้อยละการพองตัวโดยเฉลี่ยได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.01-0.03 และมีค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการยึดติดระหว่างปูนซีเมนต์กับเส้นใยดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอนณะ

- เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีการกระจายตัวของเส้นใยที่สม่ำเสมอ ควรใช้เทคนิคการผสมให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทุกครั้ง โดยใช้อุปกรณ์ช่วยผสมที่มีประสิทธิภาพ
- เนื่องจากเส้นใยยุคาลิปต์สชนิดเยื่อความร้อนเชิงกลเป็นเส้นใยสั้น ดูดน้ำมาก ทำให้ผสมเข้ากันยาก ไม่เสริมแรง จึงควรใช้ชิ้นไม้แทนเส้นใยหรือใช้เส้นใยแบบที่อัดเป็นแผ่น
- แม้แบบโลหะที่ใช้อยู่ทำให้แกะชิ้นงานออกได้ยาก และชิ้นงานบริเวณขอบได้รับความเสียหายจึงควรปรับปรุงรูปแบบของแม่พิมพ์โลหะใหม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] <http://www.viva.co.th>
- [2] Chen T.Y.and Hwang S.R. Effect of Wood Species on the properties of Cement-Bonded Wood Particleboard. Department of Forestry National Chung University Taichuang,Taiwan 40227 ROC, 554-564
- [3] <http://www.shera.co.th>
- [4] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2536. คอนกรีตเทคโนโลยี, หน้า 1-257
- [5] พิศุทธิ์ พิชัยสวัสดิ์ และสิทธิชัย กิมกิติกุลวิไล. 2546. การศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมคอนกรีตมวลเบา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] อรุณ ชัยเสรี. 1967. คู่มือการตรวจสอบคอนกรีตของสมาคมคอนกรีตอเมริกัน. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์: 14-26. อ้างจาก A.C.I. MANUAL OF CONCRETE INSPECTION,American Concrete Institute
- [7] สมภพ เลิศลักษณ์กุล. 2544. ไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี) และเส้นใยยูคาลิปตัส. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] Aggarwal L.K. 1995. Bagasse-Reinforced Cement Composites. In:Cement and Concrete Composites17, 107-112.
- [9] Coutts R.S.P.and Ni.Y 1995. Autoclaved Bamboo Pulp Fibre Reinforced Cement. In:Cement and Concrete Composites17, 99-106.
- [10] บุญศักดิ์ แซ่อึ้ง และวานิช สุชีวานิช. 2532. คอนกรีตเสริมผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [11] Toledo Filho RD.; Ghavami K.; England GL. and Scrivener K. 2003. Development of vegetable fibre- mortar composites of improved durability. In:Cement and Concrete Composites25, 185-196.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

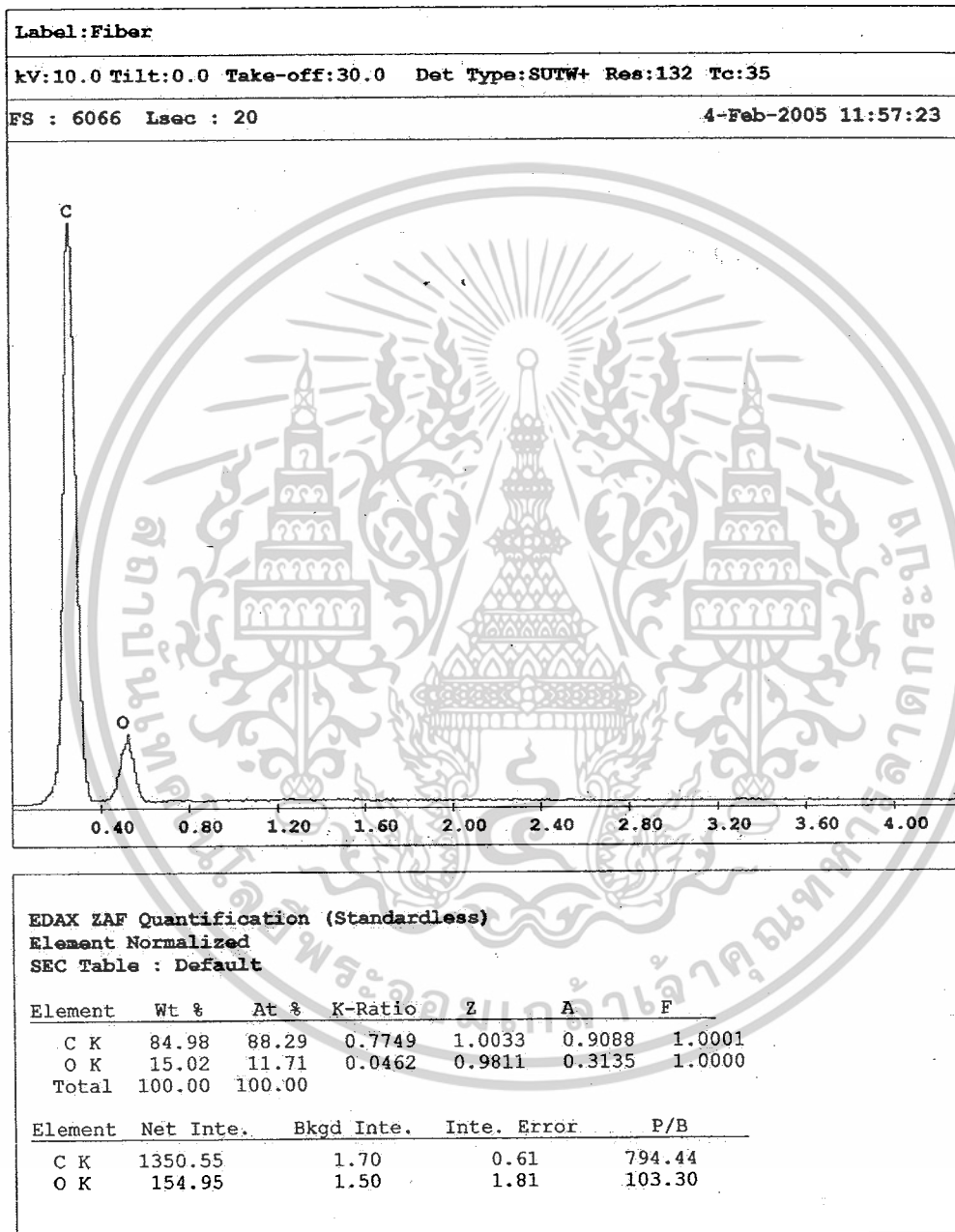
- [12] Evans P.D. An Introduction of Wood-Cement Composites. Centre for Advanced Wood Processing University of British Columbia, 7-10
- [13] Ma L.F.; Yamauchi H.; Pulido O.R.; Tamaru Y.; Sasaki H. and Kawai S. **Manufacture of Cement-bonded Boards from Wood and Other Lignocellulosic Materials: Relationships between Cement Hydration and Mechanical Properties of Cement-bonded Boards**, 13-23
- [14] Semple K.E.; Cunningham R.S. and Evans P.D. **Compatibility of Eight Temperate Australian Eucalyptus Species with Portland Cement**, 40-45
- [15] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2532. **แผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ : ความหนาแน่นสูง (มอก.878-2532)**. กรุงเทพฯ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- [16] โกศลชัย คุณสำราญ และคณะ. 2527. **การประยุกต์สเปกโตรสโคปีในเคมีอินทรีย์**. นวัตกรรม การพิมพ์. ครั้งที่ 2, 120-145
- [17] อธิพิณ แจ่มชัด. 2544. **พอลิเมอร์คอมโพสิต**. เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์ผสม และคอมโพสิต และวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



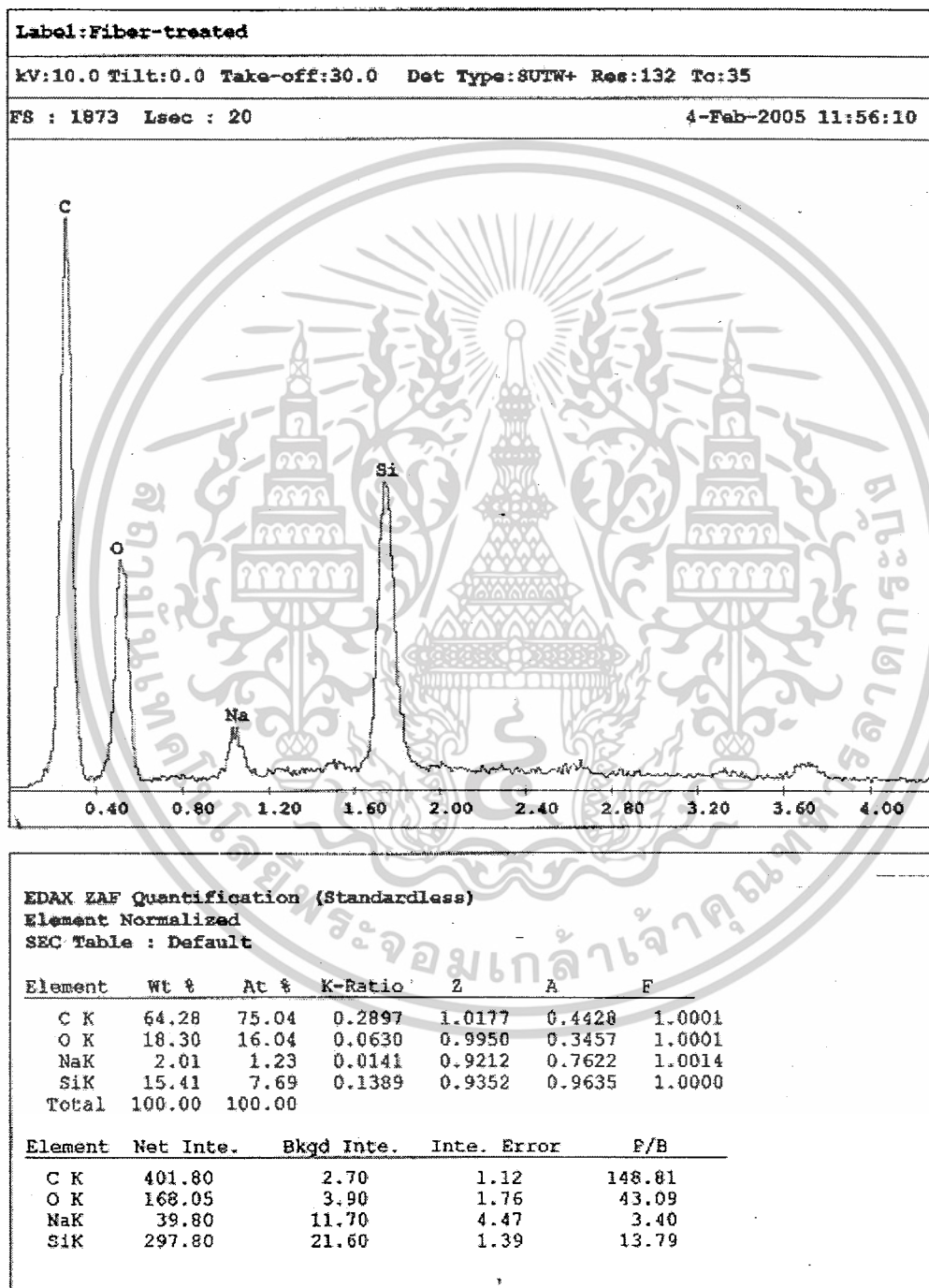
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป ก-1 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ของเส้นใยยุคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อน  
เชิงกลที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์



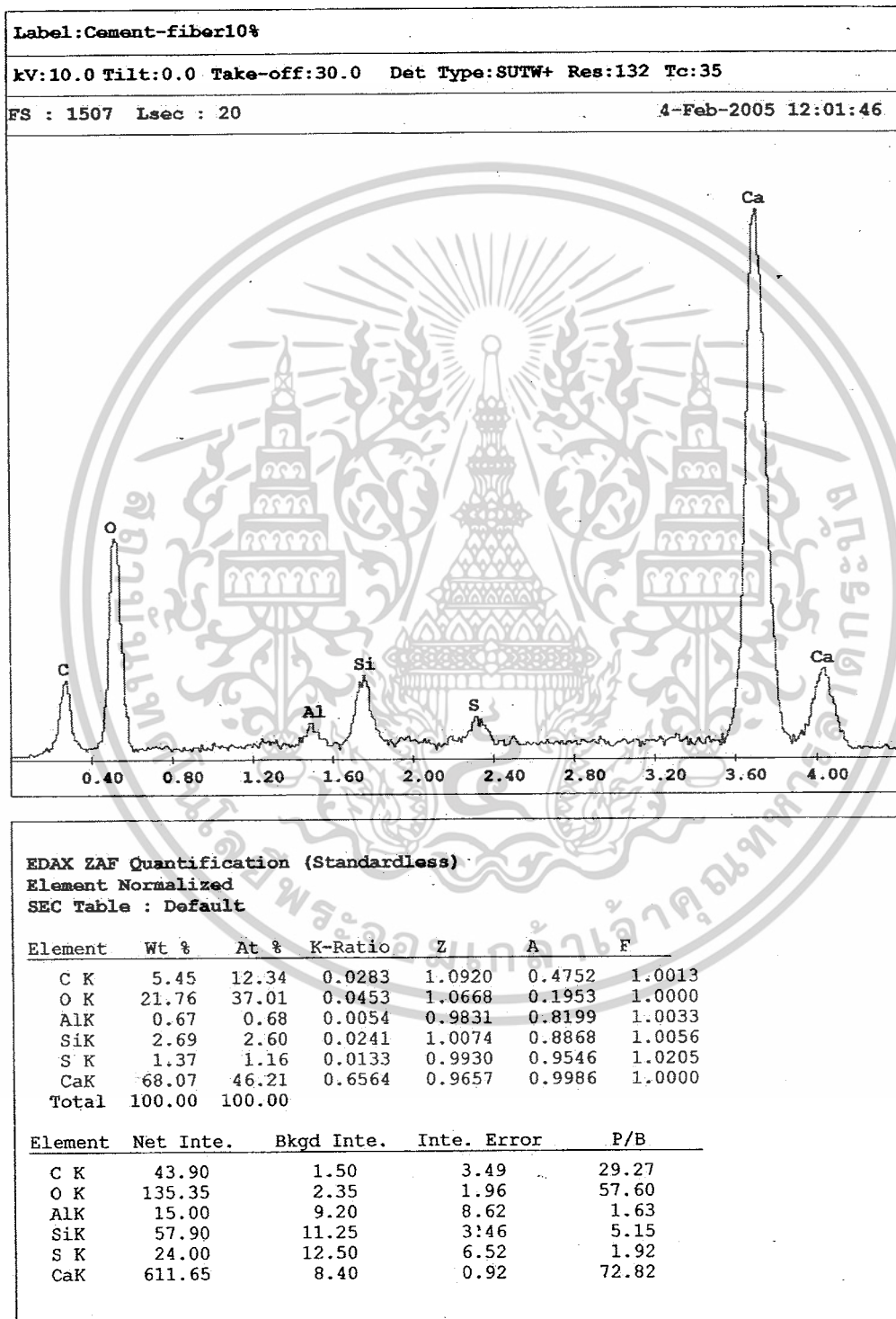
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป ก-2 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ของเส้นใยยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อน  
เชิงกลที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต



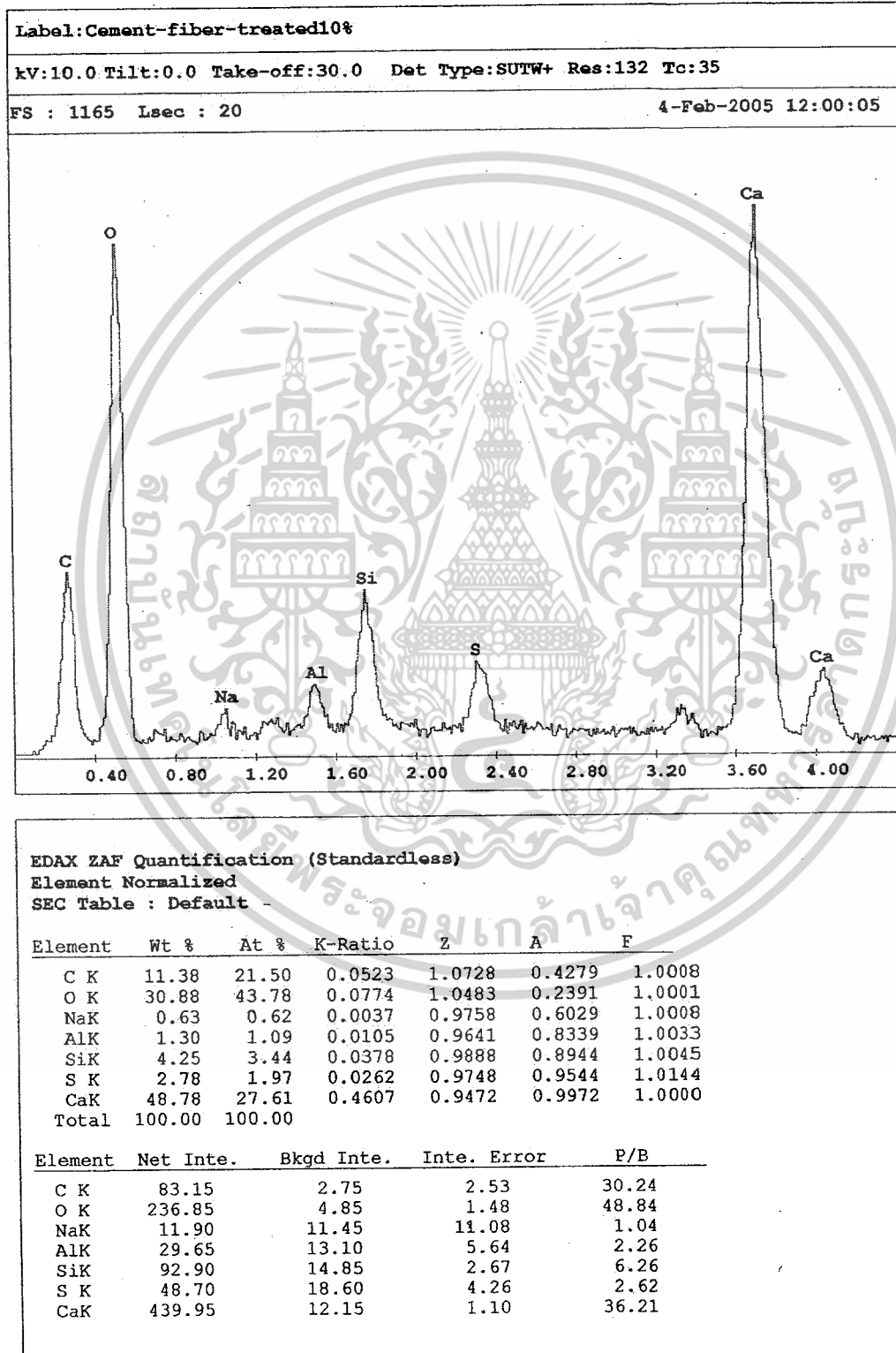
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป ก-3 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใย  
ยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกลที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายไซเตียมซิลิเกต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป ก-4 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ของแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่เตรียมจากเส้นใย  
ยูคาลิปตัสชนิดเยื่อความร้อนเชิงกลที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-1 น้ำหนักและปริมาตรของแผ่นคอนกรีตตัวอย่าง

	ขนาดของเส้นใย (mesh)	ปริมาณเส้นใย (%)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )
Untreated-Fiber	20	5	28.1	18.6
		7.5	26.2	18.2
		10	30.2	21.7
	20-50	5	25.6	17.1
		7.5	21.7	15.0
		10	29.0	20.3
	50-100	5	24.9	16.4
		7.5	25.4	17.3
		10	23.2	16.6
Treated-Fiber	20	5	20.74	14.0
		7.5	30.2	21.7
		10	25.08	19.0
	20-50	5	20.71	14.3
		7.5	21.2	15.7
		10	19.3	15.0
	50-100	5	28.52	20.0
		7.5	25.81	19.0
		10	25.36	22.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 น้ำหนักก่อนอบแห้งและหลังอบแห้ง

	ขนาด (mesh)	ปริมาณ เส้นใย (%)	น้ำหนักก่อน อบแห้ง (g)	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)			ร้อยละ ความชื้น
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
Untreated- Fiber	20	5	24.9089	24.9076	24.8977	24.8714	0.151
		7.5	25.1426	25.1324	25.1153	25.0871	0.221
		10	24.1610	24.1383	24.1210	24.0908	0.291
	20-50	5	21.8672	21.8608	21.8374	21.8229	0.203
		7.5	20.3400	20.3321	20.3202	20.2880	0.256
		10	25.0759	25.0737	24.9969	24.9618	0.457
	50-100	5	18.2444	18.2302	18.2220	18.2053	0.215
		7.5	20.3499	20.3382	20.3192	20.2913	0.289
		10	28.3283	28.2700	28.2218	28.1771	0.537
Treated- Fiber	20	5	27.7931	27.7916	27.7709	27.7490	0.159
		7.5	28.9416	28.9380	28.8941	28.8863	0.191
		10	26.0432	26.0432	26.0083	25.9892	0.208
	20-50	5	25.1123	25.1123	25.0998	25.0651	0.188
		7.5	25.2699	25.2699	25.2619	25.2201	0.197
		10	23.8715	23.8564	23.8527	23.8017	0.293
	50-100	5	24.3981	24.3981	24.3924	24.3515	0.191
		7.5	21.3563	21.3395	21.3164	21.3101	0.217
		10	23.7377	23.7343	23.7238	23.654	0.354

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-3 ความหนา ก่อนแช่น้ำ และหลังแช่น้ำ

	ขนาดเส้นใย (mesh)	ปริมาณ (%)	ความหนา ก่อนแช่น้ำ (cm)					ความหนาลงแช่น้ำ (cm)				
			1	2	3	4	เฉลี่ย	1	2	3	4	เฉลี่ย
Untreated-Fiber	20	5	1.1330	1.1290	1.1510	1.1470	1.1400	1.1460	1.1426	1.1313	1.1314	1.1378
		7.5	1.2660	1.2700	1.2660	1.2520	1.2633	1.2818	1.2908	1.2924	1.2590	1.2810
		10	1.2980	1.2840	1.3210	1.3170	1.3050	1.2870	1.2898	1.2884	1.2989	1.2910
	20-50	5	1.1470	1.1790	1.2160	1.1650	1.1768	1.1592	1.1567	1.1885	1.1616	1.1665
		7.5	1.1990	1.1830	1.2200	1.2340	1.2090	1.1773	1.1639	1.1796	1.1555	1.1691
		10	1.3670	1.3710	1.3750	1.3750	1.3720	1.3604	1.3611	1.3668	1.3984	1.3717
	50-100	5	1.0960	1.0820	1.1330	1.0850	1.0990	1.0838	1.0812	1.0761	1.0779	1.0798
		7.5	1.2010	1.2050	1.2050	1.2160	1.2068	1.2077	1.1918	1.2053	1.2167	1.2054
		10	1.2700	1.2520	1.2200	1.2160	1.2395	1.2540	1.2369	1.2202	1.2209	1.2330
Treated-Fiber	20	5	1.2793	1.2700	1.2520	1.2660	1.2668	1.3120	1.2760	1.2540	1.2710	1.2783
		7.5	1.1720	1.1678	1.1840	1.1850	1.1772	1.1790	1.1830	1.1962	1.2160	1.1936
		10	1.1150	1.1904	1.0970	1.1100	1.1281	1.1406	1.1970	1.1060	1.1776	1.1553
	20-50	5	1.1970	1.1790	1.1850	1.1960	1.1893	1.2129	1.1980	1.2110	1.2220	1.2110
		7.5	1.1895	1.0960	1.2001	1.1776	1.1658	1.2000	1.1040	1.2340	1.2200	1.1895
		10	1.0918	1.0960	1.1050	1.1100	1.1007	1.1130	1.1760	1.1070	1.1156	1.1279
	50-100	5	1.1639	1.1830	1.1726	1.0978	1.1543	1.1650	1.1905	1.1790	1.1686	1.1758
		7.5	1.1340	1.1470	1.1070	1.1470	1.1338	1.1514	1.1611	1.1442	1.1738	1.1576
		10	1.1510	1.1650	1.1470	1.1450	1.1520	1.1530	1.1661	1.2570	1.1480	1.1810



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค-1 แสดงค่าการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ของแผ่นไม้อัดซีเมนต์แบบใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด

ขนาด (mesh)	ปริมาณ (%)	sample	W (N)	Def.max Load (mm)	sample width (mm)	sample Thick (mm)	w1	w2	$\Delta w$
20	5	1	99.25	0.8229	20.76	12.66	47.39	64.06	16.67
		2	82.12	0.7348	20.23	12.7	47.72	60.6	12.88
		3	98.08	0.8533	20.16	12.96	29.57	48.56	18.99
		4	90.81	0.8069	20.93	13	54.89	69.76	14.87
		5	82.65	0.988	18.33	13.06	26	40.25	14.25
		mean	90.58	0.84118	20.082	12.876	41.11	56.65	15.532
	7.5	1	58.86	0.6389	19.13	11.93	41.68	49.89	8.21
		2	58.81	0.6775	21.13	12.03	37.08	47.74	10.66
		3	71.95	0.7182	18.7	12.06	43.49	52.86	9.37
		4	61.73	0.6252	19.53	12.1	40.09	53.39	13.3
		5	60.83	0.5184	19.83	11.93	46.91	57.32	10.41
		mean	62.44	0.63564	19.664	12.01	41.85	52.24	10.39
	10	1	46.93	0.4928	19.44	11.26	34.52	41.66	7.14
		2	38.19	0.4292	21.83	11.37	30.04	34.42	4.38
		3	43.07	0.5888	20.7	11.31	25.12	31.42	6.3
4		35.51	0.7136	18.87	11.28	23.67	28.83	5.16	
5		37.33	0.4758	19.6	11.36	28.64	34.82	6.18	
Mean		40.21	0.54004	20.088	11.316	28.4	34.23	5.832	
20-50	5	1	61.2	0.47	19.83	10.86	29.19	43.26	14.07
		2	72.98	0.4621	20.33	12	41.55	57.96	16.41
		3	68.73	0.4919	21.53	11.06	25.25	45.3	20.05
		4	69.44	0.4621	18.23	11.03	37.99	50.13	12.14
		5	71.69	0.4227	18.66	10.96	44.22	59.68	15.46
		mean	68.808	0.46176	19.716	11.182	35.64	51.27	15.626
	7.5	1	67.66	0.9836	19.86	12.86	34.93	42.63	7.7
		2	59.88	0.8362	20.23	12.83	44.23	47.69	3.44
		3	42.12	0.8677	19.23	11.6	16.07	20.95	4.88
		4	46.66	0.6317	18.93	11.63	35.1	40.93	5.83
		5	87.77	0.7177	20.43	11.73	62.65	71.86	9.21
mean	60.818	0.80738	19.736	12.13	38.6	44.81	6.212		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด (mesh)	ปริมาณ (%)	sample	W (N)	Def.max Load (mm)	sample width (mm)	sample thick (mm)	w1	w2	$\Delta w$
	10	1	63.69	0.9291	19.5	13.2	42.16	48.69	6.53
		2	55.87	0.6046	20.63	13.13	44.65	50.26	5.61
		3	56.56	0.6391	20.86	13.33	45.83	49.86	4.03
		4	59.5	0.6774	20.6	13.26	42.91	49.08	6.17
		5	43.21	0.5577	18.63	13.2	32.93	38.39	5.46
		mean	55.77	0.68158	20.044	13.224	41.7	47.26	5.56
50-100	5	1	49.4	0.4332	19.98	11.13	37.84	45.92	8.08
		2	63.67	0.2776	19.9	11.13	54.97	61.03	6.06
		3	71.95	0.3459	20.4	11	56.47	68.8	12.33
		4	70.03	0.33	20.83	11.1	49.12	65.19	16.09
		mean	63.76	0.346675	20.2775	11.09	49.6	60.24	10.64
	7.5	1	69.77	0.4907	20.5	12.26	46.41	56.53	10.12
		2	55.59	0.4756	20.76	11.73	25.33	34.76	9.43
		3	67.18	0.6544	20.13	11.83	41.52	47.86	6.34
		4	49.91	0.3781	10.43	11.93	32.62	43.57	10.95
		mean	60.6125	0.4997	17.955	11.9375	36.47	45.68	9.21
	10	1	76.98	0.6075	19.27	12.67	49.7	60.48	10.78
		2	66.42	0.5952	20.2	12.63	40.84	49.45	8.61
		3	59.11	0.6005	20.27	12.57	36.27	43.42	7.15
		4	66.06	0.6634	19.83	12.87	42.19	48.03	5.84
		5	68.42	0.5741	20.73	12.43	47.97	57.17	9.2
mean	67.398	0.60814	20.06	12.634	43.39	51.71	8.316		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค-2 แสดงค่าการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของแผ่นไม้อัดซีเมนต์แบบใช้เส้นใยที่ผ่านการบำบัด

ขนาด (mesh)	ปริมาณ (%)	sample	W (N)	Def.max Load (mm)	sample Width (mm)	sample Thick (mm)	w1	w2	$\Delta w$
20	5	1	270.5	0.39	20.7	11.36	124.3	260.6	136.3
		2	251.3	0.53	19.73	11.53	1.87	81.57	79.7
		3	242.8	0.46	21.03	11.6	45.71	148.8	103.09
		4	179.7	0.35	21	11.76	26.32	116.8	90.48
		mean	236.08	0.43	20.62	11.56	49.55	151.9	102.39
	7.5	1	203.9	0.79	20.23	11.19	59.7	162.4	102.7
		2	182.7	0.61	20.73	11.14	65.25	124.1	58.85
		3	187.3	1	19.57	11.31	25.09	105.8	80.71
		mean	191.3	0.8	20.18	11.21	50.01	130.8	80.75
	10	1	34.56	0.56	21.07	11.77	16.14	24.79	8.65
		2	39.56	0.37	19.7	12	33.56	36.87	3.31
		3	38.79	0.59	19	12.27	16.08	24.73	8.65
		4	56.78	0.65	19.87	12.6	16.61	29.89	13.28
		5	62.92	0.78	21.3	12.4	25.4	34.96	9.56
		Mean	46.52	0.59	19.91	12.21	21.56	30.25	8.69
20-50	5	1	230.7	0.92	20.93	11.33	68.15	124.2	56.05
		2	263.7	0.89	21.03	11.46	40.6	131.5	90.9
		3	223.9	0.24	18.26	11.43	70.2	172.4	102.2
		4	213.5	0.31	20.13	10.93	78.03	193.4	115.37
		mean	232.95	0.59	20.09	11.29	64.25	155.4	91.13
	7.5	1	122.6	0.55	20.03	11.1	11.25	74.75	63.5
		2	117.4	0.71	19.97	10.83	31.3	66.68	35.38
		3	93.9	0.53	19.2	10.7	19.3	71.48	52.18
		4	82.89	0.54	19.57	10.67	28.6	66.87	38.27
		5	111	0.65	20.1	11.53	12.41	69.95	57.34
mean	105.56	0.6	19.77	10.97	20.57	69.95	49.33		
	10	1	39.39	0.77	19.1	11.43	12.71	32.33	19.62
		2	25.36	0.72	19.87	11.13	11.06	20.26	9.2
		3	25.47	0.7	18.73	11.2	5.42	16.14	10.72
		4	38.2	0.55	20.33	11.4	11.34	26.38	15.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด (mesh)	ปริมาณ (%)	sample	W (N)	Def.max Load (mm)	sample width (mm)	sample thick (mm)	w1	w2	$\Delta w$
		5	22.1	0.41	19.1	11.3	6.3	21.2	14.9
		mean	30.1	0.63	19.43	11.29	9.37	23.26	13.9
50-100	5	1	282.5	0.92	22.26	11	89.99	247.8	157.81
		2	293.8	0.23	21.2	11.17	59.01	210.7	151.69
		3	205.4	0.35	20.56	10.66	36.9	143.3	106.4
		4	274.5	0.47	20.66	10.96	2.28	29.76	27.49
		5	256.3	0.48	22.26	11	35.45	120.8	85.35
		mean	262.5	0.49	21.39	10.95	44.73	150.5	105.75
	7.5	1	123.2	0.29	20.73	11.9	36.77	76.59	39.82
		2	149.5	0.49	20.43	12.03	28.84	49.57	20.73
		3	225.4	0.39	22.16	12.03	51.69	122.5	70.81
		4	187.1	0.45	21.26	11.63	43.3	89.91	46.61
		mean	171.3	0.4	21.15	11.9	40.15	84.64	44.49
	10	1	37.3	0.7	19.76	12.4	20.35	34.8	14.45
		2	60.59	0.63	20.63	12.5	36.65	50.28	13.63
		3	56.61	0.71	19.96	12.3	38.09	54.17	16.08
		4	53.26	0.73	20.23	12.3	39.79	50.44	10.65
mean		51.94	0.69	20.15	12.38	33.72	47.42	13.7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง-1 สมบัติของแผ่นไม้อัดซีเมนต์เกรดการค้า

สมบัติวัสดุ	แผ่นไม้อัดซีเมนต์เกรดการค้า
1. ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	1100-1300
2. ปริมาณความชื้นในแผ่นไม้อัดซีเมนต์ (%)	3000
3. การพองตัวเมื่อแช่น้ำ 24 ชั่วโมง (%)	9.0-12.0
4. ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	12±3
5. มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	<2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้