

# 1 บทนำ

ในปัจจุบันคอนกรีตมวลเบา มีบทบาทในงานก่อสร้างโดยนำใช้สร้างเป็นผนังบ้าน อาคาร ซึ่งมีน้ำหนักเบาสามารถขนย้ายได้ง่าย ติดตั้งได้ง่ายและรวดเร็ว และเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี คอนกรีตมวลเบาที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายประเภท เช่น คอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (non-autoclaved system) มีการเติมสารเคมีเพื่อให้คอนกรีตเกิดการก่อฟอง คอนกรีตมวลเบาชนิดที่ผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง autoclaved system ได้แก่คอนกรีตมวลเบาที่ใช้ปูนขาวและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัตถุดิบหลัก นอกจากนี้ยังมีการผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับเม็ดโฟม expanded polystyrene (EPS) ซึ่งไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและกระบวนการผลิตมีค่าใช้จ่ายที่สูง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีน้ำหนักเบา มาใช้เป็นวัสดุเสริมในคอนกรีตมวลเบาแทน โดยเปลือกข้าวโพด กากอ้อย และขุยมะพร้าว เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีมากในประเทศไทยในแถบภาคเหนือและภาคกลาง ส่วนใหญ่จะทำการเผาทิ้งซึ่งมีปริมาณมากมายมหาศาลในแต่ละปีอันเนื่องมาจากผลพลอยได้จากการเกษตรดังกล่าวมีปริมาณมาก และการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ (biomass) ก็ยังไม่เกิดขึ้นอย่างจริงจังในระดับภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ อันเนื่องมาจากค่าความร้อน (heating value) ที่ต่ำและความชื้นที่สะสมอยู่ในเส้นใยเอง การเผาทิ้งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน การที่นำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้มาเป็นวัสดุเสริมในคอนกรีตและสร้างเป็นแผ่นคอนกรีตมวลเบาสำเร็จรูปสามารถแก้ไขปัญหาการกำจัดทิ้งโดยการเผาได้ โดยเน้นที่การใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้อีกด้วย จากการค้นคว้างานวิจัยทั้งไทยและต่างประเทศ และสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรไทย ที่เกี่ยวข้องกับเรื่องดังกล่าว ยังไม่พบว่ามีงานนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้งสามชนิดดังกล่าวมาผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบาสำเร็จรูปในเชิงพาณิชย์อย่างเป็นรูปธรรม ทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความเป็นไปได้ในการพัฒนาให้เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย

อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของคอนกรีตมวลเบาขึ้นอยู่กับอินเทอร์เฟซ (interphase) หรือระหว่างผิวหน้าของเส้นใยธรรมชาติกับซีเมนต์เมทริกซ์ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose), เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) และลิกนิน (lignin) โดยการที่เส้นใยมีลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจะส่งผลให้การยึดติด (adhesion) กับซีเมนต์เมทริกซ์ที่ไม่ดีเนื่องจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลสมีความไม่ชอบน้ำค่อนข้างสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาการปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อลดปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ผลที่ได้ทำให้สมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น ในโครงการวิจัยนี้จะนำเส้นใยมาปั่นในเครื่องปั่นละเอียด และทำการคัดแยกขนาดเส้นใยด้วยตะแกรงร่อน ซึ่งจะได้เส้นใยหลายช่วงขนาด แบ่งโดยการร่อนในตะแกรง จากนั้นนำเส้นใยมาผสมกับพอร์ทแลนด์ซีเมนต์และเถ้าลอย (fly ash) โดยพิจารณา 2 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 พิจารณาวัดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดใด ขนาดช่วงอนุภาคเส้นใยเท่าใดที่ทำให้ได้คอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านเปลวไฟที่โดดเด่น

ส่วนที่ 2 พิจารณาการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่จะส่งผลต่อการยึดติดกับซีเมนต์

## 1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.1.1 ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเส้นใยจากขุยมะพร้าว กากอ้อย และเปลือกข้าวโพดมาพัฒนาเป็นคอนกรีตมวลเบา

1.1.2 ศึกษาและปรับปรุงการยึดเกาะของเส้นใยธรรมชาติกับพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดาเพื่อให้ได้คอนกรีตมวลเบาที่มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

1.1.3 ศึกษาสมบัติทางด้านสัญญาณวิทยาและทางกายภาพของคอนกรีตมวลเบาที่เตรียมจากเส้นใยธรรมชาติ

## 1.2 ขอบเขตการวิจัย

1.2.1 ปริมาณการเติมเส้นใยในระบบคอนกรีตคอมโพสิตในช่วง 30-70% โดยปริมาตร

1.2.2 ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์แบบธรรมดา (OPC type 1) ทรานกอินทรีย์ ของ บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

1.2.3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) อยู่ในช่วง 0.3-0.4 ผสมให้เข้ากันก่อนเทลงแม่พิมพ์ใช้เวลาในการผสม 3 นาที

1.2.4 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ปรับปรุงผิวของเส้นใยอยู่ที่ 5-20% โดยน้ำหนัก

## 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุเสริมองค์ประกอบหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite Material) [1,2]

ความหมายของคำว่า “คอมโพสิต” คือ การนำเอาวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดหรือมากกว่ามาผสมกัน สร้างเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างใหม่ อีกทั้งวัสดุจะมีหลายเฟสโดยแต่ละเฟสที่จะแสดงสมบัติที่สำคัญของเฟสนั้นๆ เพื่อให้ได้สมบัติรวมที่ดีมากกว่าเดิม วัสดุคอมโพสิตมีหลายเฟส เฟสหลักถือว่าเป็นเฟสเนื้อพื้น (matrix) ซึ่งจะอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบเฟสที่สองหรือเฟสรองไว้ เฟสที่รองอาจจะเป็นลักษณะของเฟสที่กระจาย (dispersed phase) แบบสุ่ม หรือมีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งปกติในงานที่ต้องการสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นจะเรียกว่าตัวเสริมแรง (reinforcement) จะช่วยเสริมหรือเพิ่มสมบัติทางกลของเฟสเนื้อพื้น ตัวเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและแข็งตึงกว่าเฟสเนื้อพื้น ตัวเสริมแรงสามารถเป็นได้ทั้งอนุภาคหรือเส้นใย และอาจมีเฟสที่เรียกว่าอินเทอร์เฟส (interphase) อยู่รอบๆเส้นใยทำหน้าที่เพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเฟสเนื้อพื้น วัสดุคอมโพสิตส่วนใหญ่จะมีสมบัติที่ดีกว่าวัสดุตั้งเดิมอยู่หลายประการ เช่น ค่าความแข็งแรงสูง สามารถออกแบบให้เกิดประโยชน์ด้านองค์ประกอบต่างๆควบคู่ไปกับการใช้ความรู้ด้านวิศวกรรมวัสดุ การผลิตวัสดุคอมโพสิตจะต้องใช้ความรู้ในหลายๆด้านมาประกอบกัน ทำให้เป็นสิ่งท้าทาย เพราะไม่เพียงแต่จะต้องมีความรู้ด้านการออกแบบรูปร่าง แต่ต้องคำนึงถึงการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานและกระบวนการในการใช้เทคโนโลยีการผลิตที่ถูกต้องอีกด้วย เพื่อผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและราคาเหมาะสมกับคุณภาพ รวมไปถึงอายุการใช้งานที่ยาวนาน

### 2.2 เส้นใยเสริมแรงที่ใช้ในวัสดุคอมโพสิต (Reinforcing fibers in composite materials)

การเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตด้วยเส้นใยที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสามารถแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้

1. เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)
2. เส้นใยแร่ (Mineral fibers)
3. เส้นใยสังเคราะห์อินทรีย์ (Synthetic organic fibers)
4. เส้นใยสังเคราะห์อนินทรีย์ (Synthetic inorganic fibers)

ถึงแม้ว่าเส้นใยที่ใช้เสริมแรงจะมีหลากหลายแต่สิ่งๆที่เหมือนกันก็คือปัจจัยทั้ง 4 ประการที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิตโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ประกอบไปด้วย

1. สมบัติเชิงกลของเส้นใย
2. ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์
3. ปริมาณของเส้นใย
4. การจัดเรียงตัวของเส้นใย

ข้อจำกัดในการใช้งานของเส้นใยธรรมชาติคือเรื่องอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติทนความร้อนได้ต่ำและจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 170-200 องศาเซลเซียส ในขณะที่ความแข็งแรงของเส้นใยจะเริ่มลดลงที่อุณหภูมิประมาณ 125 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มที่จะเสื่อมสภาพเมื่อสัมผัสกับแดด จุลินทรีย์ สามารถดูดซึมน้ำและน้ำมันทำให้เสถียรภาพทางขนาด (dimensional stability) ที่ไม่ค่อยดีนัก และ

เกิดการสลายตัวของเส้นใยเมื่อโดนแสงแดด ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในเส้นใยธรรมชาติที่จะนำมาเป็นเฟสกระจายในวัสดุคอมโพสิต โดยใช้เส้นใยธรรมชาติ 3 ชนิดได้แก่ เปลือกข้าวโพด กากอ้อย และขุยมะพร้าว ซึ่งปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวผลักดันให้เลือกเส้นใยธรรมชาติดังกล่าวก็คือ หาได้ง่าย เป็นวัสดุเหลือใช้ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และราคาต้นทุนที่ต่ำกว่าเส้นใยประเภทอื่นๆ ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีน้ำหนักเบา โดยมีองค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกข้าวโพด, กากอ้อย และขุยมะพร้าว [3,4]

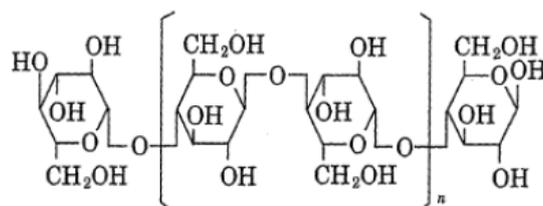
ประเภทสารชีวโมเลกุล	เปลือกข้าวโพด (corn husk)	ขุยมะพร้าว (coconut husk)	กากอ้อย (bagasse)
เซลลูโลส	32.0	24.0	43.8
เฮมิเซลลูโลส	35.7	12.0	28.6
ลิกนิน	32.3	64.0	23.5

หมายเหตุ : ผลรวมทั้งหมดไม่จำเป็นต้องเท่ากับ 100 เนื่องจากแต่ละองค์ประกอบถูกวัดจากวิธีที่แตกต่างกัน

องค์ประกอบทางเคมี จะประกอบด้วยพอลิเมอร์หลัก 3 ชนิด คือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิ-เซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin)

### 2.2.1 เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายยาวและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งมีสูตรโมเลกุลคือ  $(C_6H_{12}O_6)_n$  โดย n คือ ดีกรีของพอลิเมอร์ไรเซชัน เซลลูโลสประกอบด้วยกลูโคส เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะไกลโคซิดิกที่ตำแหน่งเบตา (1,4) ส่วนลักษณะโครงสร้างเซลลูโลสเป็นเส้นใยเล็กๆ ที่เรียกว่าไฟบริล (fibril) ซึ่งมีการเรียงตัวขนานกันเป็นมัดยาวรวมกันอยู่อย่างแข็งแรงและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล เมื่อนำมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเป็นแผ่นบางๆ จะพบส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกที่มีการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเรียงตัวขนานกันไป โดยบางส่วนอาจเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งบริเวณนี้ทำให้เซลลูโลสสลายตัวและแยกออกจากกันได้โดยการเข้าทำปฏิกิริยาของของเหลว แสดงดังรูปที่ 2.1

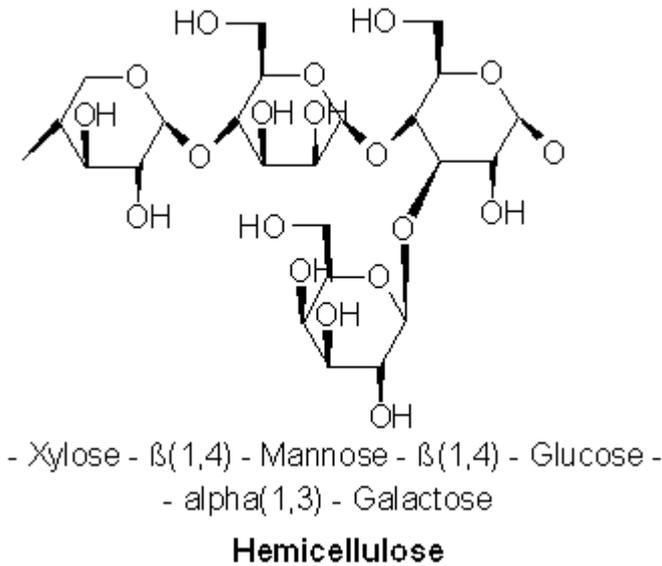


**รูปที่ 2.1** โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

[ที่มา: [www.foodnetworksolution.com](http://www.foodnetworksolution.com)]

### 2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส ที่มีดีกรีโพลิเมอไรเซชัน 50-200 โดยองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไซโลส และอะราบิโนส และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ กลูโคส แมนโนส และกาแลกโตส โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตา (1,4) ทั้งนี้เฮมิเซลลูโลสมักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาลชนิดอื่นๆ และมีส่วนของลิกนินจับตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสจะมีความเป็นกรด เนื่องจากมีหมู่ 4-เมธิล-แอลฟา-D-กลูโคส (4-methyl- $\alpha$ -D-glucose) จับอยู่กับออกซิเจนตำแหน่งที่สอง ซึ่งการมีหมู่แทนที่ในตำแหน่งที่สองและสามส่งผลให้สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกได้ง่ายด้วยสารละลายเบส ซึ่งขั้นตอนของการสกัดเฮมิเซลลูโลสออกนั้นจะมีการกำจัดลิกนิน (delignification) ออกด้วย ส่วนใหญ่จะพบเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นนอกสุด โดยจะถูกย่อยสลายและสกัดออกจากผนังเซลล์พืชได้ในภาวะที่ไม่รุนแรง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมาก และโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสที่ชอบน้ำ ทำให้เกิดการรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นเจลได้ ขณะที่เมื่อเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์จะไม่สามารถสกัดออกได้ด้วยน้ำ แต่สามารถละลายได้ในเบส แสดงดังรูปที่ 2.2



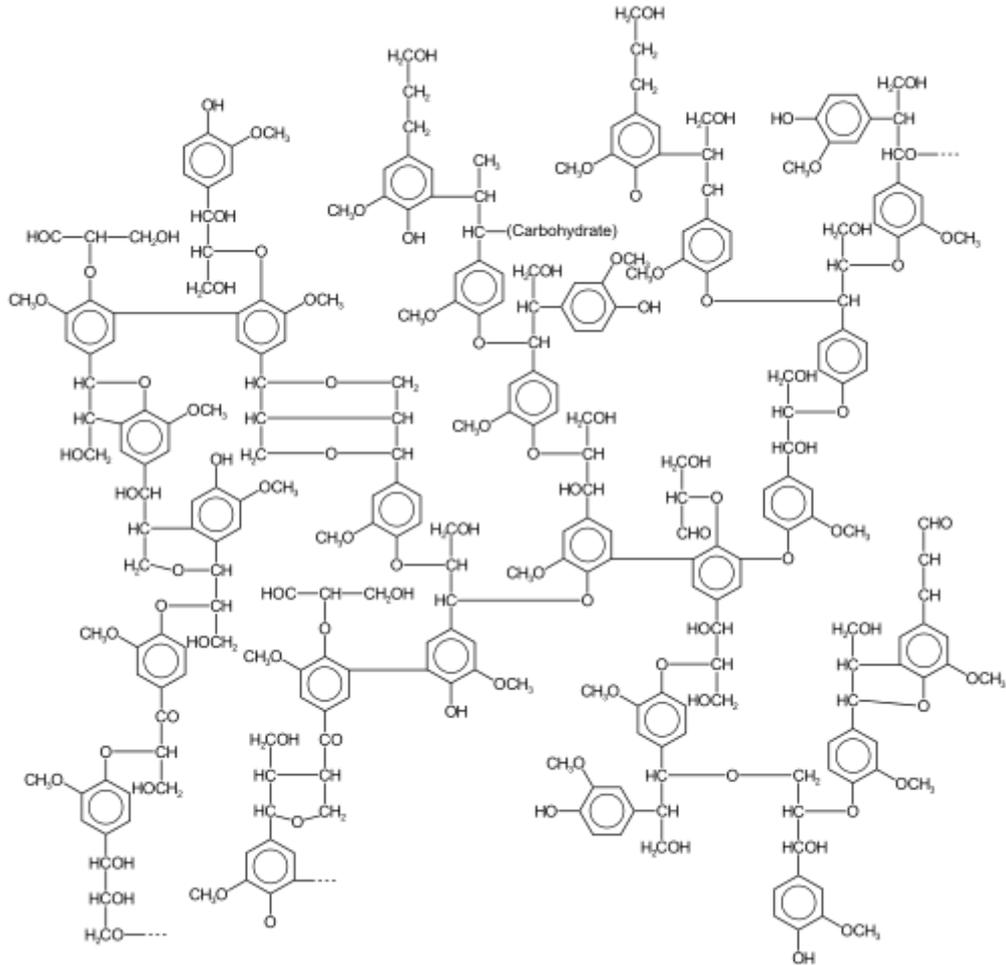
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

[ที่มา: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hemicellulose>]

### 2.2.3 ลิกนิน (lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนที่ต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้าง 3 มิติ โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยหน่วยย่อยคือ ฟีนิลโพรพานอยด์ (phenyl propanoid) แสดงดังรูปที่ 2.3 ที่มีหมู่เมธิลอยู่บนโมเลกุลลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน หย้า ส่วนในไม้เนื้อแข็งมีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมธอกซี (methoxy) ดังนั้นการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกันของพันธะอีเธอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2

โมเลกุลทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์ ดังนั้นจึงต้องอาศัยสารเคมีในการแยกลิกนินออกจากพอลิแซ็กคาไรด์



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน

[ที่มา: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lignin>]

ลิกนินมีสมบัติที่สำคัญคือ การละลายในตัวทำละลาย จึงสามารถสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูง ขณะที่บางส่วนในกลุ่มของอัลคาไลน์ลิกนิน (alkaline lignin) สามารถละลายได้ในตัวทำละลายพวกไดออกเซน (dioxane) ไพริดีน (pyridine) และสารละลายเบสเจือจางได้ ทั้งนี้ การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็เป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้แก่ โครงสร้างของลิกนิน ทำให้เกิดการแยกตัวของลิกนินได้ง่าย ซึ่งโครงสร้างลิกนินจะอยู่ร่วมกับเซลลูโลสด้วยพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากลิกโน-เซลลูโลส จึงต้องใช้ในการปรับสภาพก่อน และป้องกันผลเสียที่เกิดจากลิกนิน รวมทั้งให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ต่อไป

## 2.2.4 คุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ

คุณสมบัติด้านพื้นผิวของเส้นใยมีเซลลูโลสที่มีคุณสมบัติชอบน้ำและดูดความชื้น เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลน้ำในผนังเซลล์ และมีส่วนประกอบที่ไม่ชอบน้ำได้แก่ เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคมีไฮดรอกไซด์ เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และกรดไขมันออก

## 2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับพอร์ทแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) [5, 6]

ปูนซีเมนต์ (cement) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียม และอลูมิเนียม ซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้หมายถึงปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (hydraulic cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามสัดส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ไฮเดรชัน (hydration)

### 2.3.1 ประเภทของปูนซีเมนต์

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย แบ่งปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ซีเมนต์ออกเป็นประเภทใหญ่ๆ 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ และใช้สำหรับการก่อสร้างตามปกติทั่วไป ที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรง หรือในที่ที่มอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ หรือที่ความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะทำให้คุณสมบัติเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตราย

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับการใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกิดความร้อน และทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อน กำแพงดินหนาๆ หล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ตอม่อสะพาน เป็นต้น

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High-early Strength Portland Cement) หรือที่เรียกว่าซูเปอร์ซีเมนต์ ปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ประเภทนี้จะให้กำลังอัดสูงในระยะแรกเพราะมีเนื้อผงที่ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ธรรมดา ผลิตได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วน และการเติมสารเติมแต่งอื่นๆ โดยผ่านการบดให้ละเอียดหรือนำไปเผา ปูนประเภทนี้เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรือถอดไม้แบบในเวลาอันสั้น ข้อควรระวังไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเกิดสูงมากในช่วงต้นอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวในโครงสร้างได้

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด เหมาะสำหรับการก่อสร้างงานคอนกรีตหยาบ (mass concrete) เช่น การสร้างเขื่อน เนื่องจากทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าว เนื่องจากความร้อน (thermal cracking) ซึ่งในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนประเภทนี้

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟตสูง เนื่องจากมีสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ต่ำ เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้

ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีการกระทำของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังอัดซ้ำและให้ความร้อนกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1

### 2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์

ประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ดังนี้

ออกไซด์หลัก ได้แก่  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์ ออกไซด์รอง ได้แก่  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  และยิปซัม ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ที่แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์

กลุ่ม	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
หลัก	$\text{SiO}_2$	17.0-25.0
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	3.0-8.0
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.5-6.0
	$\text{CaO}$	60.0-67.0
รอง	$\text{MgO}$	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

องค์ประกอบของปูนซีเมนต์มีอิทธิพลมาก ทั้งนี้เพราะปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์จะทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมช่องว่างระหว่างมวล ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นและสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้ว ทำหน้าที่คล้ายกาวประสานอนุภาคต่างๆ ในคอนกรีตโดยทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) เนื่องจากการรวมตัวของสารประกอบออกไซด์ตามตารางที่ 2.2 ทำให้ปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์มีสารประกอบหลักที่สำคัญ 4 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณร้อยละของสารประกอบในปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ประเภทต่างๆ

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ประเภทของปูนซีเมนต์				
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2	ประเภทที่ 3	ประเภทที่ 4	ประเภทที่ 5
ไตรแคลเซียมซิลิเกต: $\text{C}_3\text{S}$	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	49	46	56	30	43
ไดแคลเซียมซิลิเกต: $\text{C}_2\text{S}$	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	25	29	15	46	36
ไตรแคลเซียม	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	12	6	12	5	4
อลูมิเนต: $\text{C}_3\text{A}$						

เตตระแคลเซียมอลูมิโน เฟอร์ไรต์: C <sub>4</sub> AF	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	12	8	13	12
--	---	---	----	---	----	----

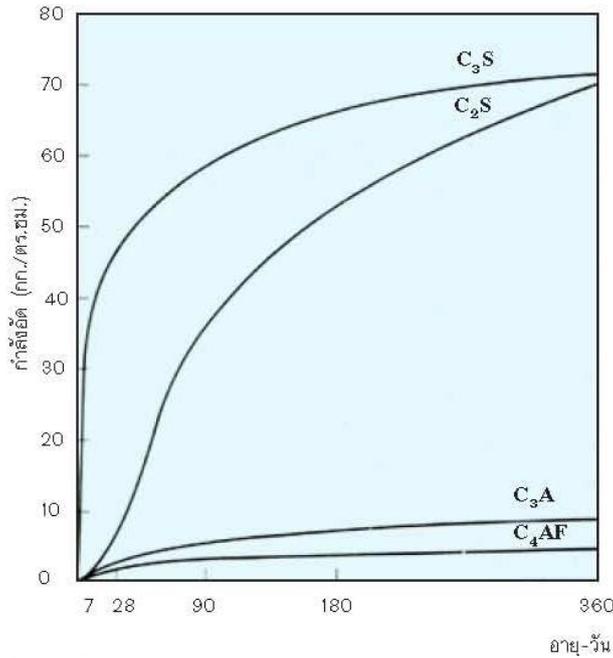
### 2.3.3 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนซีเมนต์เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิด

- 1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตเหมือนกับคุณสมบัติของพอร์ทแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม
- 2) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>2</sub>S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม มีอยู่หลายรูปแบบแต่มีเพียงบีต้าไดแคลเซียมซิลิเกต เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป โดยบีต้าไดแคลเซียมซิลิเกตมีคุณสมบัติในการยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดคอนกรีตอย่างช้าๆ ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับไตรแคลเซียมซิลิเกต
- 3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C<sub>3</sub>A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน โดยไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิดก่อตัวเร็ว (flash set) และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกันการก่อตัวเร็วทำได้โดยการเติมยิปซัมลงไประหว่างการบดซีเมนต์
- 4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C<sub>4</sub>AF) ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม โดยคุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตาราง 2.4 และรูปที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์

คุณสมบัติ	ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C <sub>3</sub> S)	ไดแคลเซียมซิลิเกต (C <sub>2</sub> S)	ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C <sub>3</sub> A)	เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C <sub>4</sub> AF)
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด (วินาที)	เร็วมาก (นาที)
การพัฒนากำลังอัด	เร็ว	ช้า	เร็วมาก	เร็วมาก
กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง 500J/g	น้อย 250J/g	สูงมาก 850J/g	ปานกลาง 420J/g



รูปที่ 2.4 การพัฒนากำลังอัดของ C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF

[ที่มา: www.raungrut.com]

### 2.3.4 สารประกอบรองในปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์

สารประกอบรองบางตัวมีผลกระทบต่อซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตทั้งขณะที่ยังไม่แข็งตัวและที่แข็งตัว ยิปซัม (gypsum, CaSO<sub>4</sub>•2H<sub>2</sub>O หรือ CSH<sub>2</sub>) ป้องกันการก่อตัวที่เร็วจนเกินไป ในทางกลับกันปริมาณของ ยิปซัมจะต้องมีปริมาณที่ไม่มากเกินไป เพราะจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการแตกร้าวได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับยิปซัมไปทำให้เกิด เอ็ททริงไกต์ (ettringite) ซึ่งมีปริมาตร มากขึ้นจากเดิม เมื่อยิปซัมผสมอยู่น้อยปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับยิปซัมจะเกิดเมื่อซีเมนต์เพสต์ อยู่ในสภาพที่เป็นพลาสติก การขยายตัวของปริมาตรเกิดก่อนที่ซีเมนต์เพสต์จะแข็งตัว แต่เมื่อยิปซัมผสมอยู่ใน ปริมาณที่มาก ปฏิกิริยาจะเกิดต่อเนื่องไปหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว และอาจทำให้เกิดการแตกร้าวได้ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โดยวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์จะมี MgCO<sub>3</sub> เมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวได้ เป็น MgO และ CO<sub>2</sub> แมกนีเซียมออกไซด์เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกับ CaO คือมีปริมาณซีเมนต์ เพสต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว ออกไซด์ของอัลคาไลด์ (K<sub>2</sub>O และ Na<sub>2</sub>O) จะมีบทบาทสำคัญเมื่อ วัสดุผสม (aggregate) สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลด์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า “ปฏิกิริยาอัลคาไลด์มวลรวม” ซึ่ง จะทำให้เกิดการขยายตัวและอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ส่วนมากมา จากหินปูน ทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้า

### 2.3.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) [7-9]

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน นอกจากนี้ปฏิกิริยา ดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและในสภาพแข็งตัวแล้ว ดังนั้น

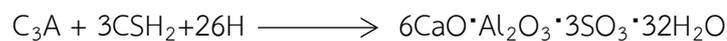
การศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบกับน้ำจึงเป็นเรื่องสำคัญและสามารถนำไปอธิบายปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำดังนี้

ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) เป็นส่วนประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O : CSH$  โดยอัตราส่วนของ  $CaO$ ,  $SiO_2$  และ  $H_2O$  เป็นค่าโดยประมาณ) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $(Ca(OH)_2 : CH)$  ดังสมการต่อไปนี้



ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ทำปฏิกิริยากับน้ำได้แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ( $CAH$ ) และเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์จึงจำเป็นต้องผสมยิปซัมเพื่อหน่วงปฏิกิริยาเพราะไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะทำปฏิกิริยากับไอออนของซัลเฟตได้เป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต

( $6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SO_3 \cdot 32H_2O$ ) หรือเรียกกันโดยทั่วไปว่าเอทริงไกต์ (ettringite) ดังสมการ



ปฏิกิริยาของแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ ) คล้ายกับปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนต แต่เกิดช้ากว่าและมีค่าความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่า สารประกอบเหล็กออกไซด์จะทำปฏิกิริยาคล้ายกับอลูมิเนียมออกไซด์ และสามารถแทนที่กันได้ โดยยิปซัมสามารถหน่วงปฏิกิริยาของ  $C_4AF$  มากกว่าทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ โดยผลิตผลนี้มีลักษณะคล้ายเข็มเหมือน ettringite

ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ซึ่งเรียกว่าเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยปฏิกิริยาจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสารละลายมีความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเกิดขึ้นเคลือบบางของ ettringite และจะยังมีความเป็นพลาสติกอยู่ช่วงหนึ่ง แต่เมื่อความเข้มข้นของไอออนสูงขึ้นเพียงพอที่จะเกิดการตกผลึกกลายเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $CSH$ ) และเมื่อเวลาผ่านไปปฏิกิริยาไฮเดรชันยังคงดำเนินต่อไปทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น และขยายตัวเข้าไปในโพรง เมื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันมากขึ้น

### 2.3.6 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์จะประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีของแต่ละองค์ประกอบแคลเซียมซัลเฟต ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) และน้ำที่ต่อเนื่องกัน โดยปฏิกิริยาของเพสต์ในปูนซีเมนต์พอร์ทแลนด์ที่อุณหภูมิห้องจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

#### 1. ระยะ Pre-induction (นาทีแรก)

เมื่อปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำจะมีการแตกตัวอย่างรวดเร็วของไอออนบางชนิดไปยังสถานะของของเหลว และมีการฟอร์มตัวของไฮเดรตซัลเฟตของอัลคาไลด์จะแตกตัวอย่างสมบูรณ์ภายในไม่กี่วินาที ทำให้ใน

สารละลายที่มีทั้งไอออนของโพแทสเซียม ( $K^+$ ) โซเดียม ( $Na^+$ ) และซัลเฟตไอออน ( $SO_4^{2-}$ ) ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตก็มีการแตกตัวจนกระทั่งอิ่มตัวด้วยไอออนแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) และซัลเฟตไอออน ( $SO_4^{2-}$ ) เช่นเดียวกันไตรแคลเซียมซิลิเกตจะมีการแตกตัวอย่างต่อเนื่องและจะมีชั้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นบนผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $CaO/SiO_2$ ) ของผลิตภัณฑ์ไฮเดรตนี้จะมีค่าต่ำกว่าในไตรแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สภาวะนี้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ในขณะที่ไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะแตกตัวและทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) และซัลเฟตไอออน ( $SO_4^{2-}$ ) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น ettringite ซึ่งปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมิเนตที่ทำปฏิกิริยาจะต่างกันตามชนิดของปูนซีเมนต์

## 2. ระยะ Induction (ในช่วงแรก)

หลังจากช่วงสั้นๆ ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผ่านไปอย่างรวดเร็ว อัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวมจะลดลงในช่วงช่วงแรก เหตุผลที่ปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ในของเหลวที่เริ่มเข้าสู่จุดสูงสุดและกำลังจะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน ( $SO_4^{2-}$ ) อยู่ในระดับที่คงที่ตามสัดส่วนที่ใช้ในการเกิดของเอ็ททริงไกท์

## 3. ระยะเร่ง Acceleration (3-12 ชั่วโมงหลังการผสม)

ในช่วงนี้จะมีการพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งและจะถูกควบคุมโดยการเกิดและพัฒนาโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเริ่มตกผลึกทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตจะกลับมาแตกตัวอย่างสมบูรณ์ แต่ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน ( $SO_4^{2-}$ ) จะลดลงเนื่องจากการฟอร์มตัวของเอ็ททริงไกท์

## 4. ระยะหลังการเร่ง (Post acceleration period)

ในระยะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงตามปริมาณของสารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะมีการฟอร์มตัวอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่อเนื่องของไตรแคลเซียมซิลิเกตและเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต เมื่อแคลเซียมซัลเฟตใช้หมดไปจะทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน ( $SO_4^{2-}$ ) ลดลง ตามด้วยเอ็ททริงไกท์จะฟอร์มตัวขึ้นจะเริ่มทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) และไดแคลเซียม ซึ่งมีโมเลกุลของอลูมิเนียมกับเฟอร์ไรต์ได้เป็นโมโนซัลเฟต

### 2.3.7 คุณสมบัติของพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดา

- ความละเอียด (fineness) เป็นคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดจะทำให้เกิดกำลังได้เร็วภายในระยะเวลา 28 วัน
- ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) การทดลองพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดาพบว่าอยู่ในค่าเฉลี่ยประมาณ 3.12 ถึง 3.16 ซึ่งค่าเหล่านี้จะนำไปใช้ประโยชน์การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต
- ความอยู่ตัว (soundness) เป็นการทดสอบทางกายภาพโดยการหาความสามารถในการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ (hardened cement paste) ที่คงอยู่สภาพรูปปริมาตรภายหลังจากก่อตัวแล้ว

- เวลาของการก่อตัว (setting time) การก่อตัวเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของปูนซีเมนต์ที่เกี่ยวข้องกับเวลา เป็นความจำเป็นที่จะต้องให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวหนานพอที่จะทำการเทแต่งผิว
- กำลัง (strength) ความสามารถในการรับกำลังอัดคอนกรีต (compressive strength) ของปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยนำก้อนทดสอบไปกดที่เวลา 7 และ 28 วัน ผลลัพธ์จะเป็นการรับกำลังต่อหน่วยพื้นที่ เช่น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- ความร้อนที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยากับน้ำ (heat of hydration) เป็นความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เมื่อเกิดความร้อนสะสมมากขึ้นเป็นอันตรายต่อคอนกรีตได้

## 2.4 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมเส้นใยกากอ้อย

แท่งตัวอย่างคอนกรีตผสมเส้นใยเมื่อรับแรงดึงเพิ่มขึ้นจะปรากฏรอยร้าวขนาดเล็กๆ ในเนื้อซีเมนต์เพสต์ แต่ก็ยังสามารถรับแรงดึงได้อยู่ เนื่องจากเส้นใยที่ผสมอยู่ในคอนกรีตทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวอยู่ การเพิ่มขึ้นของความเค้นแรงดึงจนสูงสุดจะได้ค่าความเค้นและความเครียดมา ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเส้นใยธรรมชาติ โดยแรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยซึ่งอยู่ในรูปของความสามารถต้านทานแรงดึงขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ จำนวนของเส้นใยที่ผ่านแนวร้าวและความยาวของขนาดเส้นใย เมื่อกำหนดให้ L คือความยาว และ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางอัตราส่วน L/D เรียกว่า aspect ratio คอนกรีตผสมเส้นใยมีคุณสมบัติดีขึ้นขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านความแข็งแรงของเส้นใย ปริมาณของเส้นใย การกระจายตัวของเส้นใย และชนิดของเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง การกระจายตัวมีผลโดยตรงต่อกำลังอัดคอนกรีต ส่วนเส้นใยที่มีเยเป็นระเบียบ มีทิศทางสม่ำเสมอ ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงต่อการโค้งงอ (flexural strength) ดีขึ้น รูปร่างและค่า aspect ratio สูงจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเส้นใยดีขึ้น [1] ข้อควรพิจารณาที่จะกำหนดสัดส่วนผสมของคอนกรีตเส้นใยจะต้องคำนึงถึงความละเอียดของเส้นใย เพราะการเพิ่มเส้นใยลงไปในส่วนผสมจะส่งผลต่อเนื้อคอนกรีตจะถูกหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ ซึ่งหมายความว่าต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

## 2.5 เถ้าลอย (Fly ash) [7, 8]

เถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา หรือน้ำตาลแล้วแต่แหล่งที่มา มีน้ำหนักเบาเมื่ออยู่สภาพแห้ง จะไม่มีสมบัติการเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายได้ดี ขนาดอนุภาคและรูปร่างของเถ้าลอยอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของถ่านหิน ความสม่ำเสมอ ความละเอียดของถ่านหินก่อนเผา ระดับอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนขณะเผา รวมทั้งวิธีการดักจับเถ้าลอย โดยปกติแล้วเถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ลอยไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า จากนั้นเถ้าลอยจะถูกรวบรวมไว้ในถังเก็บเถ้า (ash hopper) ซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 80 ของเถ้าทั้งหมด มีขนาดประมาณ 1 ไมครอน จนถึง 150 ไมครอน เมื่อนำไปส่องขยายดูด้วยกล้องกำลังขยายสูง จะพบว่า เถ้าลอยมีรูปร่างกลมตันหรือกลวงจนถึงรูปร่างไม่แน่นอน การมีรูพรุนของเถ้าลอยยังแตกต่างกันด้วยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา เถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำคืออยู่ในช่วง 1.90-2.69 มีความหนาแน่น

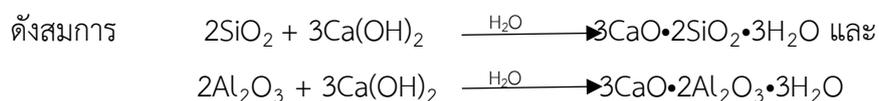
รวม (bulk density) อยู่ในช่วง 800-1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์-เมตร และมีความหนาแน่นสูงสุด 1,000-1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร etailอยสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับน้ำ ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต กล่าวคือมีความแข็งแรงและเกาะยึดกันได้ดี ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

**ตารางที่ 2.5** องค์ประกอบทางเคมีของetailอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง (%โดยมวล) [8]

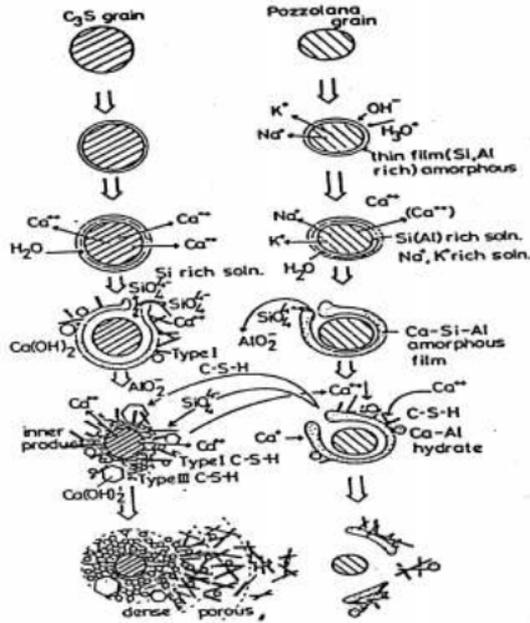
องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละปริมาณโดยน้ำหนัก
SiO <sub>2</sub>	36.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.47
CaO	15.98
MgO	3.44
SO <sub>3</sub>	2.58
LOI	0.87
Na <sub>2</sub> O	1.49
K <sub>2</sub> O	1.99
TiO <sub>2</sub>	0.39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19

### 2.5.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) [8]

วัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618 คำจำกัดความเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบเป็นซิลิกาหรือมีทั้งซิลิกาและอลูมินา การบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานคือ ปฏิกิริยาของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) หรืออลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิคอนไดออกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานของอลูมิเนียมออกไซด์ ได้แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C<sub>3</sub>A<sub>2</sub>H<sub>3</sub>)



ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเกิดร่วมกันได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลาน

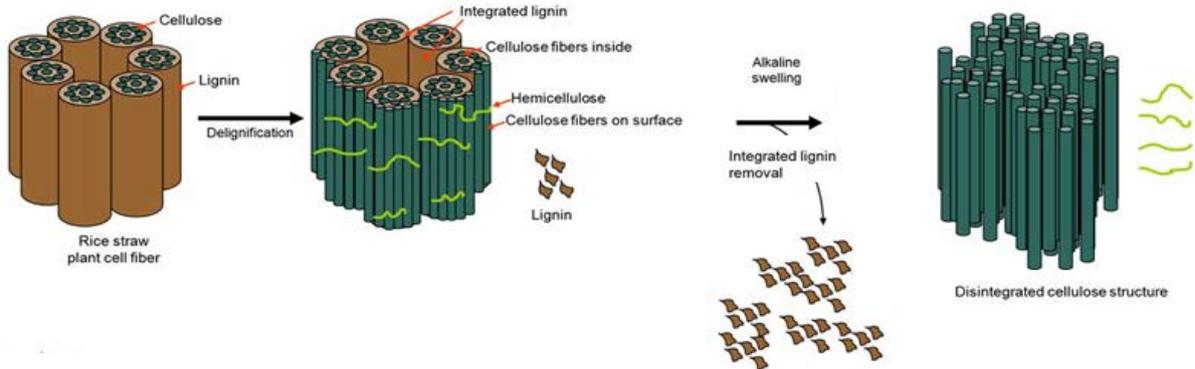
[ที่มา: [http://www.cortecvci.com/Publications/Papers/MCIProducts/Aston\\_U/Aston.html](http://www.cortecvci.com/Publications/Papers/MCIProducts/Aston_U/Aston.html)]

## 2.6 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างปูนซีเมนต์กับเส้นใยธรรมชาติ

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างปูนซีเมนต์กับเส้นใยธรรมชาติ พิจารณาจากการยึดเกาะของปูนซีเมนต์บนพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติที่ประกอบด้วยส่วน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และกรดไขมัน โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยสารเคมีต่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

### 2.6.1 ปฏิกิริยาเมื่อปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

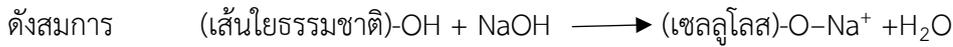
เส้นใยธรรมชาติจะประกอบไปด้วยลิกนินห่อหุ้มอยู่ด้านนอกสุด โดยล้อมรอบเซลลูโลสที่เรียงตัวในแนวเดียวกัน ซึ่งจะมีเฮมิเซลลูโลสเป็นตัวเชื่อมระหว่างเซลลูโลสแต่ละสาย จึงทำการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส รวมทั้งกรดไขมันต่างๆ ด้วยสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังรูปที่ 2.6



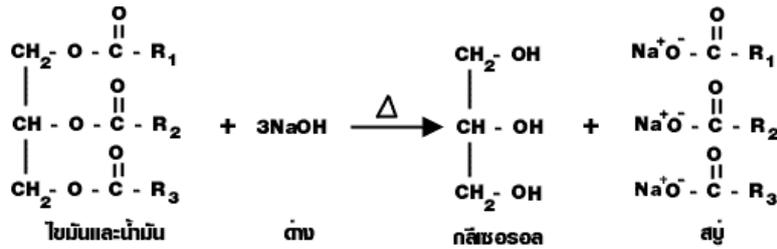
รูปที่ 2.6 กระบวนการปรับปรุงผิวด้วยสารแอลคาไลน์

[ที่มา: <http://www.intechopen.com>]

เส้นใยธรรมชาติจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก เมื่อเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไป หมู่ไฮดรอกซิลของไฮดรอกไซด์จะไปตั้งไฮโดรเจนของเอมิเซลลูโลสและลิกนิน ผลที่ได้คือเอมิเซลลูโลสกับลิกนินถูกกำจัดไปพร้อมกับน้ำ ส่วนออกซิเจนและโซเดียมไอออนที่เหลือก็จะไปจับกับเซลลูโลส



จากนั้นเกิดปฏิกิริยาสaponification เป็นปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสระหว่างไขมันกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นเกลือของกรดไขมัน ( $\text{RCOO}^- \text{Na}^+$ ) ซึ่งก็คือ สบู่กับกลีเซอรอลผสมมากับน้ำ แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสระหว่างไขมันกับโซเดียมไฮดรอกไซด์

[ที่มา: [http://nakhamwit.ac.th/pingpong\\_web/biochem\\_web/Lipid\\_04.htm](http://nakhamwit.ac.th/pingpong_web/biochem_web/Lipid_04.htm)]

ผลที่ได้จากการปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปกำจัดเอมิเซลลูโลส ลิกนิน และไขมันที่เป็นเหตุให้เส้นใยธรรมชาติยึดเกาะไม่ดี อีกทั้งยังทำให้พื้นผิวของเซลลูโลสขรุขระ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใยธรรมชาติดีขึ้น และยังส่งผลถึงกลไกความแข็งแรงของคอนกรีตมวลเบาอีกด้วย ข้อควรระวังการใช้ความเข้มข้นของด่างที่สูงเกินไปจะทำให้เซลลูโลสถูกกำจัดออกไปด้วย ผลที่ได้คือการยึดเกาะและความแข็งแรงของคอนกรีตมวลเบาไม่ได้ตามมาตรฐาน

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

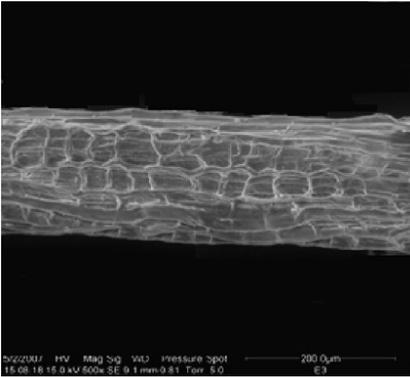
ในวงการการผลิตคอนกรีตมวลเบาจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มีการใช้วัตถุดิบที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแต่ละประเทศมีวัตถุดิบแตกต่างกันไป เช่น เปลือกข้าวโพด กากอ้อย ขุยมะพร้าว เป็นต้น วัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์เมทริกซ์จะเกิดปัญหาการยึดเกาะกันทำให้สมบัติของชิ้นงานต่ำลง ดังนั้นจึงได้มีการนำสารเคมีเข้ามาช่วยในการปรับปรุงเส้นใยว่านหางจระเข้ให้สามารถเข้ากับเมทริกซ์ได้ดีขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.6 เป็นงานวิจัยของ Sghaier และคณะ [10] โดยจะเห็นได้ว่าเส้นใยว่านหางจระเข้ที่ไม่ถูกปรับปรุงด้วยสารเคมีจะมีเปอร์เซ็นต์ของเอมิเซลลูโลสและลิกนินที่สูงและมีเปอร์เซ็นต์ของเซลลูโลสต่ำ แต่เมื่อเส้นใยว่านหางจระเข้ถูกปรับปรุงด้วยสารเคมีคือ NaOH และ NaOCl จะสามารถสังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์เอมิเซลลูโลสและลิกนินลดลง และเปอร์เซ็นต์ของเซลลูโลสสูงขึ้น โดยการปรับปรุงเส้นใยว่านหางจระเข้ด้วย NaOH ทำให้เอมิเซลลูโลสถูกย่อยสลายบางส่วนและลิกนินจะมีการแตกพันธะโพลีเมอร์ทำให้เกิดน้ำตาลและสารประกอบฟีนอลที่ละลายในน้ำ

**ตารางที่ 2.6** เปรียบเทียบการปรับปรุงเส้นใยว่านทางจระเข้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮโปคลอไรท์

	Cellulose %	Lignin %	Hemicelluloses %
Untreated	65.19±1.2	2.72±0.28	32.09±1.7
NaOH treated fibers			
1%	65.19±1.4	2.61±0.5	27.49±2.6
2%	71.07±0.6	2.55±0.4	26.49±1.5
5%	72.92±0.5	2.49±0.9	24.57±2
10%	70.35±1.1	2.34±0.5	27.29±2.6
15%	73.52±0.3	2.29±0.9	24.18±2.4
20%	73.90±0.7	2.23±0.8	23.86±1.2
NaOCl treated fibers			
5%	65.35±1.5	2.78±0.2	31.87±1.5
10%	66.84±1.1	2.71±0.7	30.45±1.7
15%	67.8±0.8	2.63±0.8	29.57±2.2
20%	70.22±0.9	2.66±0.7	27.12±1.9

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาวิเคราะห์โดย SEM ในรูปที่ 2.8-2.12 พบว่าโครงสร้างพื้นผิวของเส้นใยว่านทางจระเข้ได้รับผลกระทบอย่างมากจากสารเคมีที่ใช้ปรับปรุงโดยเฉพาะ NaOH เนื่องจาก NaOH ได้กำจัดพวก non-cellulose (สารขี้ผึ้ง, กรดไขมัน, ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส) ทำให้เกิดการแยกตัวบนพื้นผิวของเส้นใย (defibrillization) ดังนั้นจึงทำให้เส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมีแล้วสามารถเข้ากันได้ดีขึ้นกับเมทริกซ์

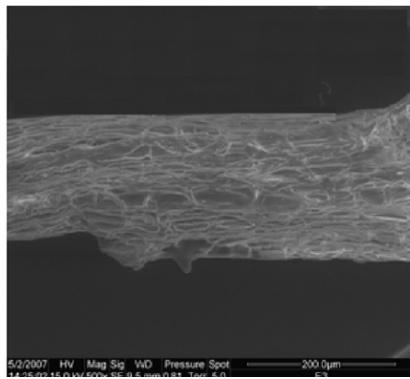
### รูปภาพเส้นใย



รูปที่ 2.8 เส้นใยว่านทางจระเข้ธรรมชาติ

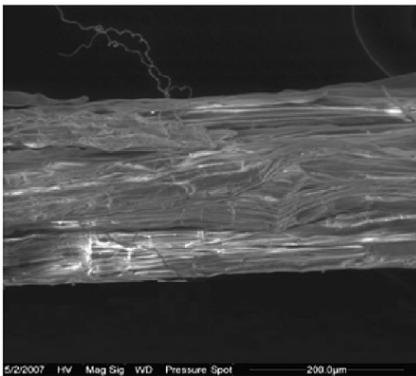
### ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

เส้นใยที่ไม่ได้รับการปรับปรุงโดยปกติจะมีขี้ผึ้ง (wax) และกรดไขมัน (fatty acid) อยู่บนพื้นผิว



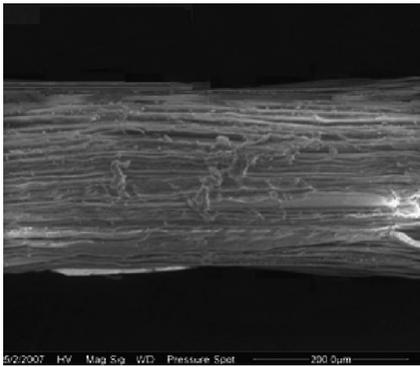
รูปที่ 2.9 การปรับปรุงเส้นใยว่านทางจระเข้ด้วย 10% NaOCl

มีการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวเส้นใยเล็กน้อยโดยเกิดการแยกของเฮมิเซลลูโลสกับลิกนิน



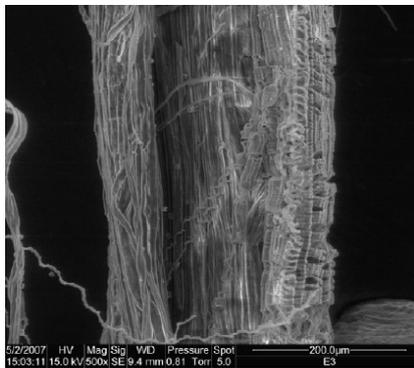
รูปที่ 2.10 การปรับปรุงเส้นใยว่านทางจระเข้ด้วย 20% NaOCl

จำนวนเส้นใยที่เกิดการแยกออกจากกันเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น



เส้นใยถูกกำจัดส่วนที่เป็น ลิกนิน เพกทิน (สารขี้ผึ้งและกรดไขมัน) แต่การสลายเส้นใยจะมีการตกตะกอนของลิกนินหลงเหลืออยู่

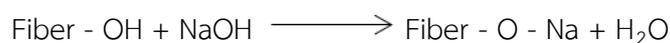
รูปที่ 2.11 การปรับปรุงเส้นใยว่านหาง  
จระเข้ด้วย 10% NaOH



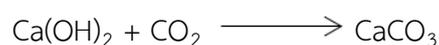
เส้นใยไม่มีการตกตะกอนของลิกนินและเพกทินเหลือบนพื้นผิวเส้นใย

รูปที่ 2.12 การปรับปรุงเส้นใยว่านหาง  
จระเข้ด้วย 20% NaOH

งานวิจัยของ Ozerkan และคณะ [11] ศึกษาวิธีการปรับปรุงทางเคมีของเส้นใยอิทพาล์มด้วย NaOH และ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ด้วยความเข้มข้นที่ต่างกัน โดยเปลือกของต้นอินทพาล์มถูกตัดให้มีขนาดยาวอยู่ในช่วง 10 เซนติเมตร จากนั้นทำการปรับปรุงเส้นใยด้วย NaOH 2%, NaOH 0.173% และ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  0.173% (อุณหภูมิห้อง) และแช่ไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนเส้นใยแห้ง งานวิจัยของ Li และคณะ [12] และ Maria และคณะ [13] ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงเส้นใยด้วยต่าง พบว่าความเป็นด่างจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างที่เชื่อมกันของเส้นใย จึงทำให้เกิดผิวขรุขระขึ้น อีกทั้งจะไปกำจัดพวกลิกนิน ไขมัน ให้ออกไปจากพื้นผิวของผนังเซลล์ด้วยการแตกพันธะของพอลิเมอร์ (depolymerizer) สุดท้ายจะได้เพียงเซลลูโลสตามที่ต้องการ โดยแสดงปฏิกิริยาระหว่างสารละลายต่างและเส้นใยดังนี้



สำหรับการปรับปรุงเส้นใยด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากสารละลาย  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ความดัน 0.9 MPa แล้วตกผลึกออกมาเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนี้



จากปฏิกิริยาได้เส้นใยที่ผ่านการกำจัดพวก non-cellulose และได้ตะกอน  $\text{CaCO}_3$  ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายอัลคาไลน์กับคาร์บอนไดออกไซด์ เส้นใยจะถูกกำจัดไขมันในเส้นใยธรรมชาติโดยจะเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.6 ในงานวิจัยของ Ozerkan และคณะ [11] ศึกษาผลค่าความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นของชิ้นงานเมื่อเติมเส้นใยปาล์มที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมี คณะวิจัยได้ทำการผสมทราย ซีเมนต์ น้ำ และเส้นใยที่ทำการปรับปรุงแล้วเพื่อเตรียมเป็นมอร์ตาร์เหลวโดยใส่เส้นใยที่ปริมาณแตกต่างกัน มอร์ตาร์ถูกเทลงในแม่พิมพ์แล้วปล่อยให้เซตตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นถอดแม่แบบออกพบว่าเส้นใยที่ปรับปรุงด้วย  $\text{Ca(OH)}_2$  0.173% เหมาะที่จะนำไปใช้กับการปรับปรุงเส้นใยที่จะนำไปผสมกับซีเมนต์มากที่สุดเนื่องจากมีค่าที่เสถียรที่สุด นอกจากนี้การเกิดไฮเดรชันของซีเมนต์มีการปลดปล่อย  $\text{Ca(OH)}_2$  ออกมาด้วยจึงทำให้ผลที่ได้มีความแตกต่างจากการปรับปรุงเส้นใยปาล์มด้วยสารปรับสภาพผิวชนิดอื่น

Shafiqh และคณะ [14] ศึกษาผลค่าความหนาแน่นและค่ากำลังกดอัดของชิ้นงานที่เติมเส้นใยและถั่วงอกโดยการเปรียบเทียบความหนาแน่นของคอนกรีตผสมเส้นใยเปลือกปาล์มน้ำมัน (oil palm shell, OPS) ซึ่งมีส่วนผสมของถั่วงอกในปริมาณที่ต่างกัน ทำให้ความหนาแน่นของสูตรคอนกรีต F0, F10, F30 และ F50 ลดลง 0%, 1.5%, 3.5% และ 5.3% ตามตารางที่ 2.7 สาเหตุที่เป็นดังนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคถั่วงอกเล็กกว่าซีเมนต์ทำให้การเพิ่มปริมาณถั่วงอกไปลดอัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อชิ้นงานแห้งแล้วจึงทำให้ความหนาแน่นลดลง

**ตารางที่ 2.7** ความหนาแน่นของชิ้นงานในปริมาณถั่วงอกที่ต่างกัน [14]

Mix no.	Slump (mm)	Density ( $\text{kg/m}^3$ )		
		De-moulded	Air dry	Oven dry
F	145	2046	2011	1898
F10	145	2021	1984	1862
F30	235	1985	1961	1804
F50	240	1948	1886	1805

หมายเหตุ : F0 = ชิ้นงานที่ไม่ได้ใส่ถั่วงอก  
 F10, F30, F40, F50 = ชิ้นที่ใส่ถั่วงอกไปในปริมาณที่ต่างกัน  
 Slump = ค่าวัดผลความสามารถในการไหลลื่น หรือค่ายุบตัวของคอนกรีตเวลาเข้าแบบหล่องานคอนกรีต

**ตารางที่ 2.8** เปรียบเทียบค่ากำลังกดอัดคอนกรีตในปริมาณของถั่วงอกที่ต่างกัน [14]

Mix no.	compressive strength (MPa)				
	1 day	3 days	7 days	28 days	56 days
F	21.09 (47%)	36.81 (83%)	42.29 (95%)	44.49	46.43 (104%)
F10	19.73 (43%)	34.27 (74%)	39.23 (85%)	46.08	46.85 (102%)
F30	14.03 (37%)	26.23 (69%)	31.67 (83%)	38.04	42.09 (110%)
F50	5.94 (20%)	16.47 (55%)	22.10 (74%)	30.04	33.16 (110%)

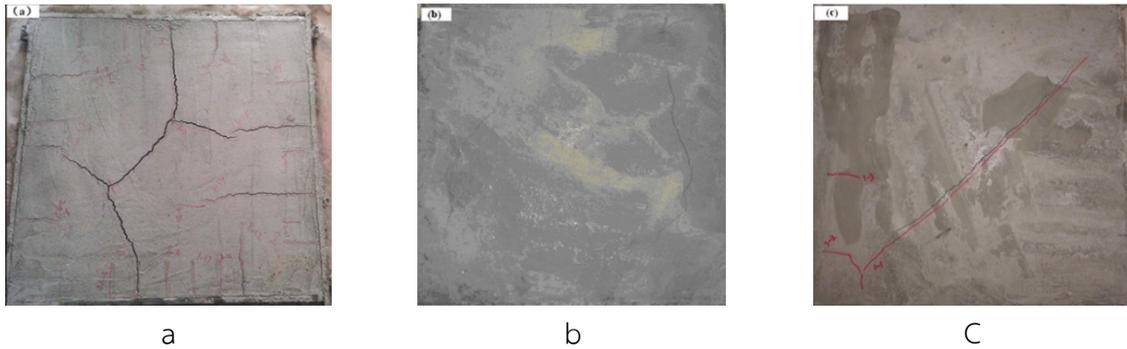
จากตารางที่ 2.8 ผลที่ได้จากการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทำให้ค่า compressive strength ลดลง เนื่องจากปริมาณซีเมนต์น้อยลงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ปล่อยให้แห้งในระยะเวลาที่ต่างกัน (1, 3, 7, 28 และ 56 วัน) ค่ากำลังอัดของชิ้นงานจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยกับซีเมนต์และน้ำ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการใส่เถ้าลอยลงไปทำให้ชิ้นงานหดตัวลง

งานวิจัยของ Aggarwal [15] ศึกษาการทำซีเมนต์มวลเบาโดยเติมปริมาณกากอ้อย (bagasse) ที่แตกต่างกันซึ่งนำมาทดสอบความต้านทานแรงหักงอ (หน่วย  $N/mm^2$ ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงหักงอกับปริมาณกากอ้อยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าในช่วงแรกค่าความต้านทานแรงหักงอเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากอ้อย แต่เมื่อปริมาณกากอ้อยมากกว่า 16% โดยมวล ทำให้ค่าความต้านทานแรงหักงอลดลง ซึ่งขึ้นอยู่กับกาเกาะตัวกันได้ดีระหว่างเส้นใย-เมทริกซ์ เมทริกซ์-เมทริกซ์ และเส้นใย-เส้นใย โดยปริมาณของกากอ้อยที่มากเกินไปและขนาดของเส้นใยที่ใหญ่เกินไปจะมีผลทำให้เส้นใยกับเมทริกซ์เกาะตัวกันไม่ดี โดยสิ่งเหล่านี้ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงหักงอค่าที่ลดลง ดังนั้นปริมาณกากอ้อยที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 12-16% โดยมวล งานวิจัยของ Tong และคณะ [16] ทำการศึกษาเส้นใยบวบ (luffa fibers) ที่ถูกปรับปรุงด้วยสารเคมีที่มีความเข้มข้นต่างกันแล้วนำไปผสมกับซีเมนต์ การศึกษานี้เพื่อปรับปรุงรอยแตก (cracking) และการหดตัว (drying shrinkage) ของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งทำการปรับปรุงเส้นใยบวบด้วยการตัดบวบให้มีความยาว 5 เซนติเมตร แล้วนำไปแช่ในสารละลายอัลคาไลน์ตามความเข้มข้นคือ KOH 2%, KOH 10%, KOH 12%, KOH 2%-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 10%, KOH 10%-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 10% โดยมวล โดยทำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำเปล่าหลายครั้งจนมีค่า pH = 7 แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อทำการปรับปรุงเส้นใยบวบเสร็จแล้วจะได้เส้นใยเดี่ยวของบวบออกมา จากนั้นนำไปตัดให้มีความยาวอยู่ในช่วง 1-1.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 320 ไมครอน Aspect ratio 32-47 ความหนาแน่น 0.54 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร Elastic modulus 2.19 GPa และค่าการดูดซึ่มสูงสุด (maximum value of absorption) ของเส้นใยบวบ 350- 375% พบว่าเส้นใยบวบยับยั้งการเกิดรอยแตกของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใส่เส้นใยบวบเข้าไปผสมกับซีเมนต์มอร์ตาร์ในปริมาณ 0.3-1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลที่ได้พบว่าการใส่เส้นใยบวบที่ไม่ผ่านการปรับปรุงในปริมาณ 0.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเข้าไปผสมกับซีเมนต์มอร์ตาร์ทำให้มีความต้านทานต่อการเกิดรอยแตก ดีที่สุดเมื่อเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ไม่ได้เติมเส้นใยบวบเข้าไปเลย จากตารางที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยบวบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายอัลคาไลน์เมื่อผสมเข้ากับซีเมนต์มอร์ตาร์จะมีความต้านทานการเกิดรอยแตกมากกว่าเส้นใยบวบที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายอัลคาไลน์ ซึ่งค่าความต้านทานของซีเมนต์มอร์ตาร์จะดีที่สุดเมื่อทำการปรับปรุงด้วยสารละลายอัลคาไลน์ในปริมาณดังนี้ KOH 6% และ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 10% ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและค่าดัชนีรอยแตก (cracking index) ของเส้นใยบวบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายอัลคาไลน์เพิ่มขึ้น 62% เมื่อเทียบกับเส้นใยบวบที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายอัลคาไลน์ เนื่องจากเส้นใยยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเมื่อนำสารละลายอัลคาไลน์เข้ามาทำปฏิกิริยาจึงทำให้สารละลายอัลคาไลน์เข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนส่งผลให้ลิกนินและเฮมิ

เซลลูโลสถูกกำจัดออกเหลือแต่เซลลูโลส ดังนั้นเมื่อนำเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลาย KOH 6% และ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 10% มาผสมกับซีเมนต์จะมีความเข้ากันและยึดกันได้เป็นอย่างดี อัตราส่วนการขึ้นรูปมอร์ตาร์ ซีเมนต์:ทราย:น้ำ = 1:1.5:0.5 (อัตราส่วนโดยมวล) โดยใส่ปริมาณเส้นใยบวบที่แตกต่างกันไปตามที่กำหนดไว้ ซึ่งปริมาณของเส้นใยบวบที่ผสมเข้าไปในซีเมนต์อยู่ในช่วง 0.3-1.0 กิโลกรัม วัสดุคอมโพสิตเหล่านี้ถูกทดสอบความต้านทานการเกิดรอยแตกด้วย JC/T951-2005 และทดสอบการหดตัวด้วย JGJ/T70-2009 โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นปริซึมที่มีความกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร และสูง 160 มิลลิเมตร ลักษณะการเกิดรอยแตกบนผิวชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.13

**ตารางที่ 2.9** ดัชนีรอยแตก (cracking index) และอัตราส่วนความต้านทานการเกิดรอยแตก (cracking resistance ratio) ของมอร์ตาร์ที่เติมเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมีในชนิดและปริมาณที่แตกต่างกัน

No.	Treated conditions	Cracking index (mm)	Cracking resistance ratio (%)
1	Base mortar	3215	0
2	Untreated luffa fibres	2157	32.9
3	100°C-2h-10% NaOH	700	78.2
4	100°C-1h-10% KOH	510	84.1
5	100°C-2h-2% KOH	695	78.4
6	100°C-2h-10% KOH	475	85.2
7	100°C-2h-12% KOH	535	83.4
8	100°C-2h-2% KOH- 10% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	572	82.2
9	100°C-2h-6% KOH- 10% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	430	86.6
10	100°C-2h-10% KOH- 10% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	650	79.8



**รูปที่ 2.13** ชิ้นงานมอร์ตาร์ (a) ไม่ผสมเส้นใยบวบ (b) ผสมเส้นใยบวบ  $0.6 \text{ kg/m}^3$  ที่ปรับปรุงด้วย  $\text{KOH } 6\% - \text{H}_2\text{O}_2 \text{ } 10\%$  ที่อุณหภูมิ  $100$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา  $2$  ชั่วโมง และ(c) ผสมเส้นใยบวบ  $0.6 \text{ kg/m}^3$  ที่ปรับปรุงด้วย  $\text{KOH } 10\%$  ที่อุณหภูมิ  $100$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา  $2$  ชั่วโมง

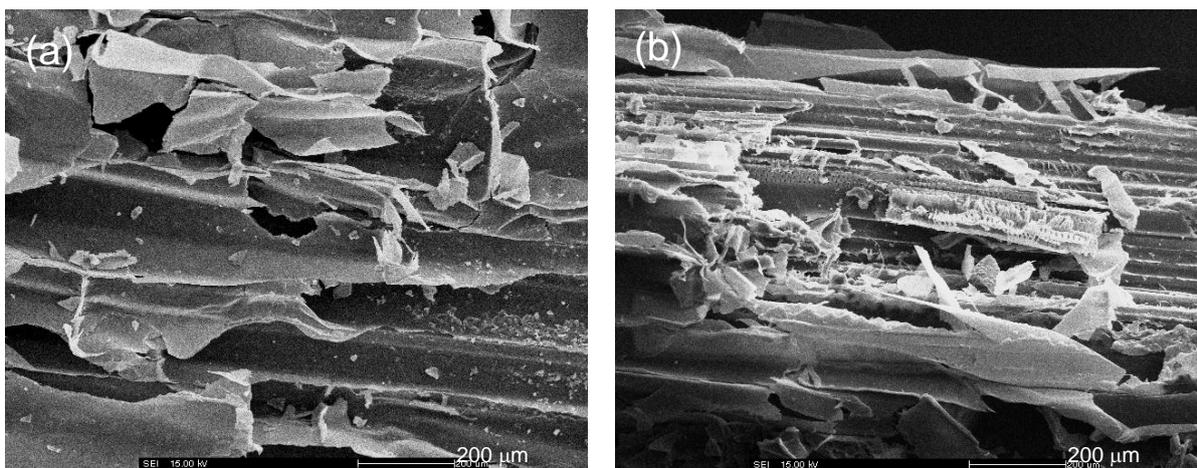
งานวิจัยของ Behrouz และคณะ [17] ศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตโดยมีเหล็กเป็นวัสดุเสริมซึ่งถูกเผาที่อุณหภูมิสูง สมบัติเชิงกลของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อวัสดุโดนความร้อนสาเหตุเพราะความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal stress) สามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ เมื่อพิจารณาวัสดุคอมโพสิตที่เป็นแบบเนื้อผสม (heterogeneous) พบว่าการนำความร้อนของวัสดุแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อทำการเผาวัสดุจึงทำให้ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิแตกต่างกัน ส่งผลให้ส่วนผสมภายในวัสดุพังทลายในเวลาที่แตกต่างกัน คอนกรีตมีความสามารถในการนำความร้อนต่ำจึงทำให้กระจายความร้อนสู่ภายในได้ช้า สำหรับเหล็กที่เป็นแรงเสริมภายในคอนกรีตมีความสามารถในการนำความร้อนสูง แต่ถูกห่อหุ้มด้วยคอนกรีตและเป็นตัวทำให้ความร้อนทะลุผ่านเข้าไปภายในตัววัสดุซึ่งเป็นผลเสียต่อตัววัสดุ สำหรับวัสดุที่ถูกทำลายมาก่อน เช่น ถูกทำลายจากแผ่นดินไหว และวัสดุที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงมักจะเกิดรอยร้าวหรือการผุพังเป็นชิ้นเล็กๆให้กับตัววัสดุ ซึ่งวัสดุเหล่านี้เมื่อนำไปเผาจะทำให้ความร้อนสามารถทะลุผ่านได้เร็ว ส่งผลให้เกิดการพังทลายเร็วกว่าวัสดุทั่วไป เวลาในการพังทลายขึ้นกับอุณหภูมิ โดยความแข็งแรงของคอนกรีตและเหล็กจะค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ถูกเผา และเศษผุพังเล็กๆ ของคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตเปราะเมื่อนำไปเผาไฟจึงทำให้วัสดุสามารถรับแรงได้น้อยลง สำหรับการคำนวณหา fire resistance สามารถคำนวณได้จากคอมพิวเตอร์ซึ่งถูกเขียนด้วย Finite Element Method (FEM) โดยเรียกโปรแกรมนี้ว่า SAFIR โปรแกรมนี้ใช้วิเคราะห์ผลออกมาแล้วจะได้กราฟที่มีลักษณะเป็น non-linear จึงได้นำโปรแกรมนี้มาวิเคราะห์ข้อมูล thermal action ของวัสดุโดยสามารถวิเคราะห์หาได้ทั้งรูปแบบ time-temperature curve และ natural fires

### 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การเตรียมเส้นใยธรรมชาติ

เตรียมเส้นใยทางการเกษตรโดยผ่านการปั่นด้วยเครื่องปั่น เส้นใยจากธรรมชาติที่ใช้ได้แก่ เปลือกข้าวโพด (corn husk), กากอ้อย (bagasse) และ ชูมะพร้าว (coconut husk) นำเส้นใยธรรมชาติอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลามากกว่า 24 ชั่วโมงจนแห้งสนิท จากนั้นนำเส้นใยธรรมชาติมาผ่านการปั่นด้วยเครื่องปั่นกำลังวัตต์สูง คัดแยกอนุภาคด้วยตระแกรงขนาด 850 ไมครอน (ขนาดละเอียด คือ <850 ไมครอน และ ขนาดหยาบคือ >850 ไมครอน แต่ไม่เกิน 5 มิลลิเมตร) นำเส้นใยที่ผ่านการคัดแยกขนาดมาแบ่งตามจุดประสงค์ของการทดลองคือไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

สำหรับการปรับปรุงเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ความเข้มข้นที่ 5-20% โดยมวลภายใต้อุณหภูมิห้อง เป็นเวลาไม่เกิน 20 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาดหลายครั้งจนมีค่า pH เป็นกลางประมาณ 7 และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจนกว่าเส้นใยจะแห้งสนิทและทำการแพ็คเก็บใส่ถุงซิปลิงจากการวิจัยพบว่าการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้เปอร์เซ็นต์โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต่างกันเนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีปริมาณลิกนินที่แตกต่างกันตามตารางที่ 3.1 และผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ด้วยกล้อง SEM ของเส้นใยแต่ละชนิดที่ถูกแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1 - 24 ชั่วโมง พบว่าที่ 15 ชั่วโมงเป็นเวลาแช่ที่เหมาะสมที่สุดในการได้มาซึ่งเส้นใยที่มีผิวขรุขระ ซึ่งคาดได้ว่าการกำจัดปริมาณไขมันออกไปจากผิวที่มากและมีลักษณะเส้นใยที่แยกตัวออกไม่เกาะกระจุกตัวเป็นก้อน ตัวอย่างภาพกำลังขยายสูงของเส้นใยกากอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพผิวที่ไม่เหมาะสมเช่นเวลาการแช่นานไปหรือความเข้มข้นของสารละลายสูงเกินไปจะส่งผลทำให้เส้นใยแตก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สำหรับตารางส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ภาพกำลังขยายสูงจากกล้อง SEM ของเส้นใยกากอ้อย (a) 5% โดยน้ำหนัก NaOH เวลาแช่ 24 ชั่วโมง (b) 10% โดยน้ำหนัก NaOH เวลาแช่ 1 ชั่วโมง

**ตารางที่ 3.1** อัตราส่วนผสมการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ชนิดเส้นใย	ปริมาณเส้นใย (g)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (g)	น้ำ (ml)
กากอ้อย 5% โดยน้ำหนัก NaOH	900	473.68	9000
เปลือกข้าวโพด 10% โดยน้ำหนัก NaOH	900	1000	9000
ขุยมะพร้าว 15% โดยน้ำหนัก NaOH	900	1588.24	9000

**ตารางที่ 3.2** อัตราส่วนผสมของชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการเติมเส้นใยธรรมชาติ (% โดยปริมาตร)

สูตรผสม	เส้นใย*	พอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบ ธรรมดา (OPC-1)	เถ้าลอย (Lignite fly ash)
สูตรที่ 1	0	70	30
สูตรที่ 2	30	49	21
สูตรที่ 3	40	42	18
สูตรที่ 4	50	35	15

\* หมายถึง เส้นใยเปลือกข้าวโพด กากอ้อย และ ขุยมะพร้าว จะใช้สูตรเดียวกันดังตารางที่ 3.2

ซีเมนต์ : เถ้าลอย = 70 : 30 (โดยปริมาตร)

### 3.2 การขึ้นรูปและการทดสอบ

นำพอร์ทแลนด์ซีเมนต์ น้ำ และเถ้าลอยผสมให้เข้ากัน และผสมกับเส้นใยธรรมชาติในสัดส่วนต่างๆที่คำนวณไว้ เทลงแม่พิมพ์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร<sup>3</sup> ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-99 จากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วันเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา hydration ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ เเชิงเคมี และเชิงกลที่เกี่ยวข้อง และทดสอบความเสถียรต่อการเสื่อมสภาพในน้ำและการต้านไฟไหม้ [18] ซึ่งการทดสอบการเสื่อมสภาพของชิ้นงานจะแช่น้ำเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้องจากนั้นนำชิ้นงานไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และนำชิ้นงานไปทดสอบด้วยเครื่องกำลังอัดคอนกรีตแบบดิจิตอล ขนาด 1500 kN (150 TON) ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งในแต่ละสูตรทำการทดสอบ 5 ชิ้นงาน สำหรับความหนาแน่นมวลรวม (bulk density) ทำการชั่งน้ำหนักแห้งของชิ้นงานและหารด้วยปริมาตรชิ้นงาน และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำหาได้จากผลต่างของน้ำหนักเปียกในอากาศ (แช่น้ำ 1 วัน) และน้ำหนักแห้งในอากาศ หารด้วยน้ำหนักแห้งในอากาศ โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องชั่ง digital balance ความละเอียด 4 ตำแหน่งในการวัดค่าน้ำหนัก และทุกสูตรของคอนกรีตมวลเบาได้ทำการทดสอบ 5 ชิ้นงาน ดังเช่นค่ากำลังอัด



รูปที่ 3.2 เครื่องกำลังอัดคอนกรีตแบบดิจิทัล ขนาด 1500 kN (150 TON)

การทดสอบการทนไฟจะนำชิ้นงานสูตรที่ดีที่สุดในด้านความต้านทานต่อแรงกดอัดของแต่ละชนิดเส้นใยธรรมชาติและชิ้นงานควบคุมซึ่งคือชิ้นงานในระบบที่ไม่ได้เติมเส้นใยธรรมชาติ มาทดสอบโดยนำมาเผาด้วยเตาเผาไหม้ ชีวมวลฟลูอิดไดซ์เบดไซโคลนแฝดชนิดหมุนวนดังรูปที่ 3.3 โดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นสังเกตว่าชิ้นงานเกิดความเสียหายมากน้อยอย่างไรโดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม และสังเกตชิ้นงานอีกครั้งเมื่อครบ 7 วันหลังจากตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงาน



รูปที่ 3.3 เตาเผาไหม้ชีวมวลฟลูอิดไดซ์เบดไซโคลนแฝดชนิดหมุนวน สร้างโดยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

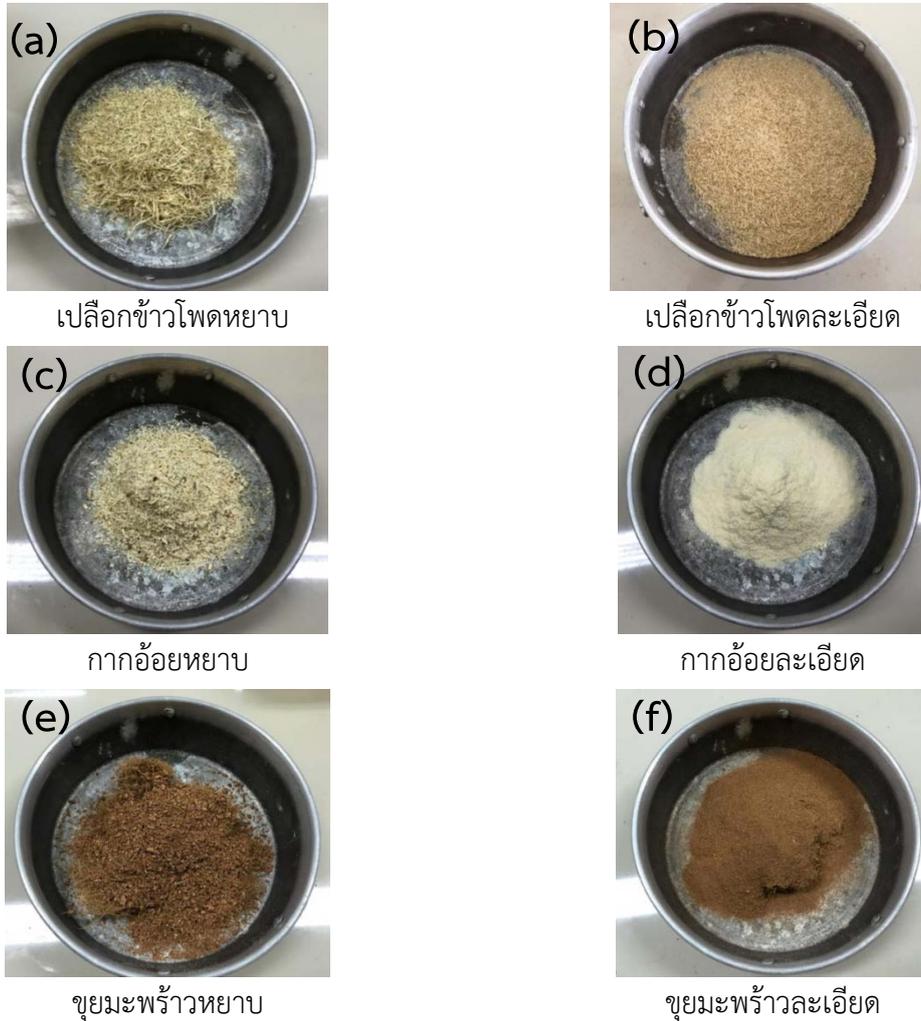
ผู้วิจัยทำการหาสูตรที่มีสมบัติโดยรวมโดดเด่น 3 สูตร โดยมีองค์ประกอบของผลลัพธ์โดยรวมคือ มีน้ำหนักเบา มีการเสื่อมสภาพในน้ำที่ต่ำ ทนกำลังอัดได้สูง และทนการลามไฟ มาทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นสำเร็จรูป (precast) ชนิดหล่อแบบไม่อัดขึ้นรูปชิ้นงาน เพื่อให้สอดคล้องกับชื่อโครงการวิจัย และเนื่องจากไม่มีมอก. โดยตรงที่เกี่ยวกับวัสดุเส้นใยผสมปูนชนิดหล่อแบบ (ไม่อัดขึ้นรูป) จึงจะเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่ใกล้เคียงได้แก่

- คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ, มอก. 2601-2556
- ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ, มอก. 1505-2541

## 4 ผลการวิจัย

### 4.1 การเตรียมเส้นใยธรรมชาติ

#### 4.1.1 เส้นใยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนและหลังการคัดแยก



รูปที่ 4.1 เส้นใยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

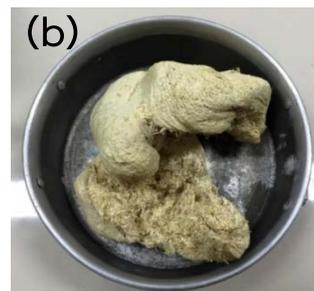
รูปที่ 4.1a และ 4.1b แสดงลักษณะเปลือกข้าวโพดหยาบและเปลือกข้าวโพดละเอียดหลังจากทำการป่น โดยพบว่าเมื่อป่นเปลือกข้าวโพดที่ปริมาตรรวม 4000 มิลลิลิตร เป็นเวลา 5 นาทีจากนั้นนำมาคัดแยกด้วยตะแกรงขนาด 850 ไมครอน สามารถแยกเปลือกข้าวโพดละเอียดได้ 1200 มิลลิลิตร รูปที่ 4.1c และ 4.1d แสดงลักษณะกากอ้อยหยาบและกากอ้อยละเอียดหลังจากทำการป่นที่ปริมาตรรวม 4000 มิลลิลิตร เป็นเวลา 5 นาทีจากนั้นนำมาคัดแยกด้วยตะแกรงขนาด 850 ไมครอน สามารถแยกกากอ้อยละเอียดได้ 940 มิลลิลิตร และรูปที่ 4.1e และ 4.1f แสดงลักษณะขุยมะพร้าวหยาบและขุยมะพร้าวละเอียดหลังจากทำการป่นที่ปริมาตรรวม 4000 มิลลิลิตร เป็นเวลา 5 นาทีจากนั้นนำมาคัดแยกด้วยตะแกรงขนาด 850 ไมครอน สามารถแยกขุยมะพร้าวละเอียดได้ 1371 มิลลิลิตร เนื่องจากก่อนนำมาป่นวัตถุดิบมีขนาดใหญ่เมื่อนำไปวัดปริมาตรในปิกเกอร์

ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างวัตถุดิบมากและลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบต่างกัน ทำให้ใส่เข้าไปบีกเกอร์ได้น้อยและได้ปริมาตรที่ต่างกัน ซึ่งปริมาตรหลังจากการตัดแยกพบว่าปริมาตรลดลง เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีขนาดเล็กทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยธรรมชาติน้อยลง จึงทำให้เส้นใยธรรมชาติเข้าไปอัดในบีกเกอร์ได้มาก และอีกกรณีหนึ่งคือบางส่วนปลิวออกไประหว่างการคัดแยกและติดค้างอยู่ในเครื่องปั่น จึงทำให้ปริมาตรที่วัดได้น้อยลง

#### 4.1.2 เส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนและหลังการคัดแยก



เปลือกข้าวโพดหยาบ



เปลือกข้าวโพดละเอียด



กากอ้อยหยาบ



กากอ้อยละเอียด



ขุยมะพร้าวหยาบ

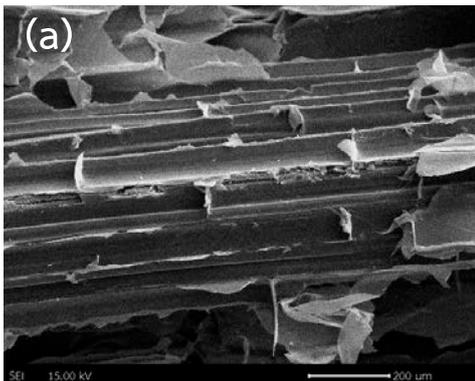


ขุยมะพร้าวละเอียด

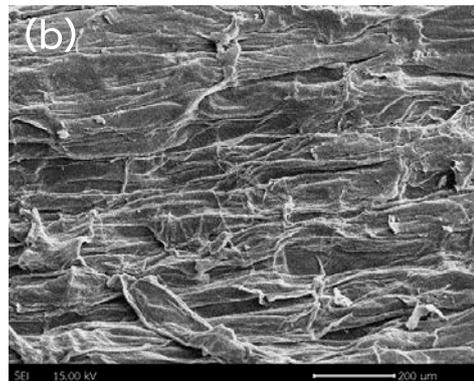
รูปที่ 4.2 เส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 4.2(a-f) แสดงลักษณะเปลือกข้าวโพด กากอ้อย และขุยมะพร้าว แบบหยาบและแบบละเอียดซึ่งผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเส้นใยทั้งหมดถูกปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังทำการปั่นเพื่อแยกขนาด พบว่ามีลักษณะการเกาะกลุ่มรวมกันเมื่อนำเส้นใยธรรมชาติไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แต่เมื่อแห้งแล้วเส้นใยแยกตัวออกจากกันได้ดี

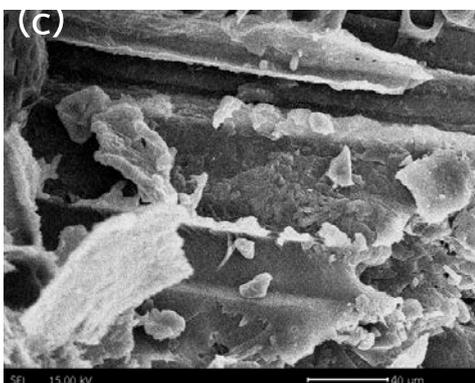
#### 4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยธรรมชาติจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



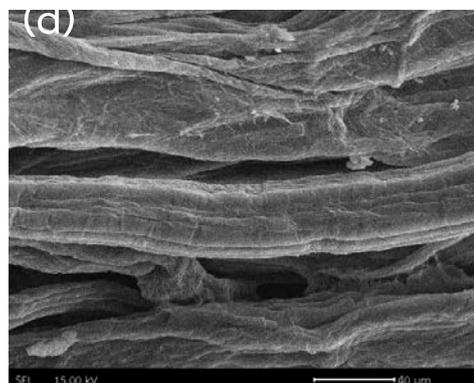
(a) เส้นใยกากอ้อยก่อนการปรับปรุงพื้นผิวที่ กำลังขยาย 100 เท่า



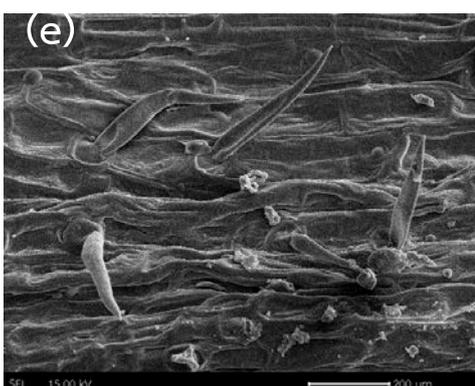
(b) เส้นใยกากอ้อยหลังทำการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5% ที่กำลังขยาย 100 เท่า



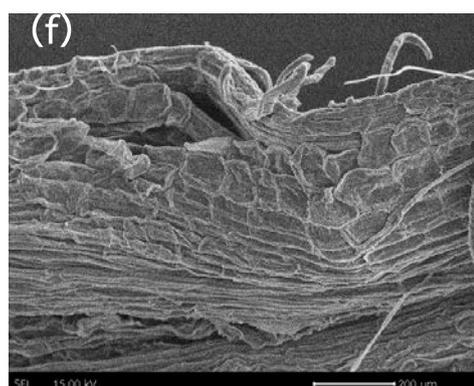
(c) เส้นใยกากอ้อยก่อนการปรับปรุงพื้นผิวที่ กำลังขยาย 500 เท่า



(d) เส้นใยกากอ้อยหลังทำการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5% ที่กำลังขยาย 500 เท่า



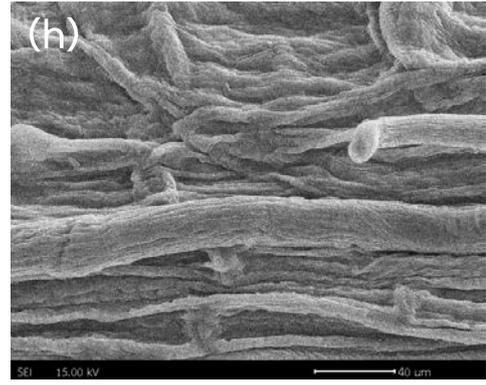
(e) เส้นใยเปลือกข้าวโพดก่อนการปรับปรุง พื้นผิวที่ กำลังขยาย 100 เท่า



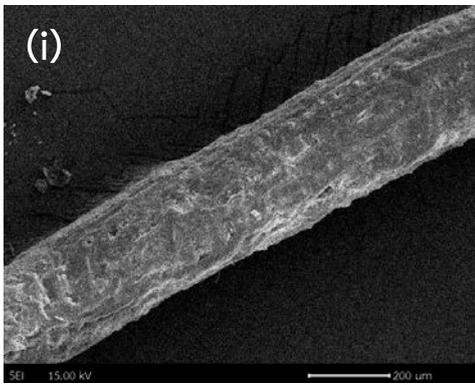
(f) เส้นใยเปลือกข้าวโพดหลังทำการปรับปรุง พื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10% ที่กำลังขยาย 100 เท่า



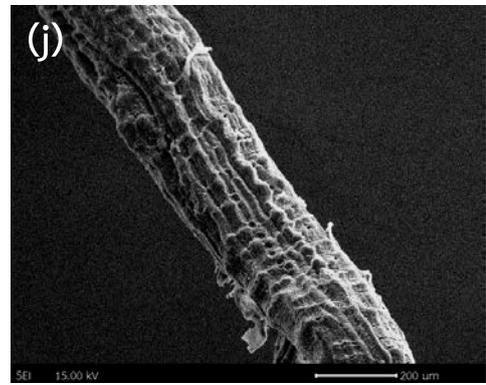
(g) เส้นใยเปลือกข้าวโพดก่อนการปรับปรุง  
พื้นผิวที่กำลังขยาย 500 เท่า



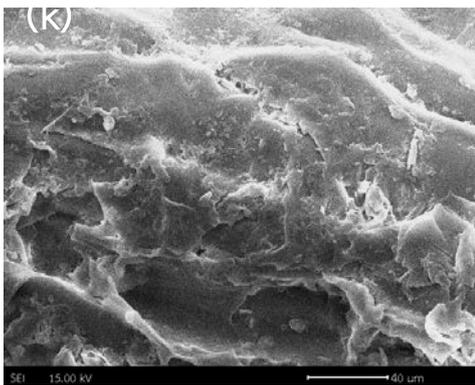
(h) เส้นใยเปลือกข้าวโพดหลังทำการปรับปรุง  
พื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น  
10% ที่กำลังขยาย 500 เท่า



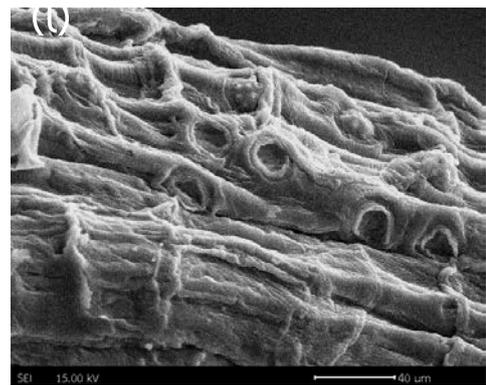
(i) เส้นใยขุยมะพร้าวก่อนการปรับปรุงพื้นผิวที่  
กำลังขยาย 100 เท่า



(j) เส้นใยขุยมะพร้าวหลังทำการปรับปรุง  
พื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น  
15% ที่กำลังขยาย 100 เท่า



(k) เส้นใยขุยมะพร้าวก่อนการปรับปรุงพื้นผิวที่  
กำลังขยาย 500 เท่า



(l) เส้นใยขุยมะพร้าวหลังทำการปรับปรุง  
พื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น  
15% ที่กำลังขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.3 พื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ 3 ชนิดจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดทั้งก่อนและหลังการปรับผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยเปลือกข้าวโพด กากอ้อย และขุยมะพร้าวก่อนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ก้ำกั 100 เท่า แสดงในรูปที่ 4.3(a, e, i) โดยพบว่าที่พื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดจะมีพื้นผิวที่เรียบเป็นแนวยาว และตัน เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่เกาะอยู่ล้อมรอบเซลลูโลส ส่งผลให้เส้นใยธรรมชาติมีความไม่ชอบน้ำ [19-21] และจากรูปที่ 4.3(c, g, k) ที่เพิ่มก้ำกัขยายของกล้องจุลทรรศน์เป็น 500 เท่าของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดจะพบสิ่งเจือปนกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ โดยสิ่งเจือปนนี้ก็คือ ฝุ่น และกรดไขมันต่างๆที่เกาะอยู่บนเส้นใยทำให้เส้นใยมีความไม่ชอบน้ำ หลังการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยเปลือกข้าวโพด กากอ้อย และขุยมะพร้าว ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากรูป SEM ที่ก้ำกัขยาย 100 เท่า แสดงในรูปที่ 4.3(b, f, j) จะพบว่าสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติมีความขรุขระ ร่องลึกมากขึ้น เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงจะสามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่กล่าวไปข้างต้น (ซึ่งจะหลุดออกจากการทำปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชันของโซเดียมไฮดรอกไซด์) ทำให้ผิวของเส้นใยธรรมชาติมีความชอบน้ำมากขึ้น อีกทั้งเป็นการเปิดผิวของเส้นใยธรรมชาติให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นด้วย และจากรูปที่ 4.3(d, h, l) ที่เพิ่มก้ำกัขยายของกล้องจุลทรรศน์เป็น 500 เท่าของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดจะไม่พบสิ่งเจือปน เช่น ฝุ่นหรือไขมันที่เคยอยู่ก่อนทำการปรับปรุงพื้นผิว ทำให้เส้นใยมีความสะอาดบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น แล้วจึงทำการผสมเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้เข้ากับมวลรวมจากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานคอนกรีตมวลเบา ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1-4.3 ซึ่งในเบื้องต้นจะเห็นว่าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเป็นข้อมูลของชิ้นงานคอนกรีตมวลเบา ไม่ใช่การดูดซึมน้ำของตัวเส้นใยดังนั้นการปรับสภาพผิวของเส้นใยจะส่งผลถึงการชอบน้ำที่มากขึ้นและผลที่ตามมาคือเนื้อปูนกับเส้นใยเข้ากันได้ดีในการผสมและลดช่องว่างที่เกิดขึ้นในส่วนผสม อีกทั้งยังเพิ่มการยึดเกาะกับเฟสเมทริกซ์ปูน ทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของคอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่เติมเส้นใยที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว

**ตารางที่ 4.1** ความหนาแน่น ค่าก้ำกัอัดคอนกรีต เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ ค่าก้ำกัอัดของชิ้นงานที่ทำการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดและชิ้นงานควบคุม

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ค่าเฉลี่ยก้ำกัอัดคอนกรีต (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	ค่าเฉลี่ยก้ำกัอัดของชิ้นงานที่ทำการทดสอบการเสื่อมสภาพ (MPa)
UCf30	1.18	1.13	42.03	1.65
UCf40	0.97	0.19	62.71	0.34
UCf50	0.74	0.07	86.57	0.12
UCc30	1.31	2.24	34.29	4.62
UCc40	1.13	1.32	39.17	2.09
UCc50	0.83	0.14	64.13	0.50
TCf30	1.53	9.31	24.53	15.02
TCf40	1.41	7.42	31.09	10.73

TCf50	1.19	4.67	41.49	7.26
TCc30	1.58	10.04	20.66	13.93
TCc40	1.34	6.07	31.75	8.50
TCc50	1.29	4.92	35.14	6.15
base	1.78	15.80	13.24	23.37

หมายเหตุ U คือ เส้นใยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์  
T คือ เส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์  
C คือ เส้นใยเปลือกข้าวโพด  
f คือ เส้นใยละเอียด  
c คือ เส้นใยหยาบ  
base คือ ชั้นงานควบคุมที่ไม่มีการเติมเส้นใยธรรมชาติ  
ตัวเลขต่อท้ายของชั้นงานคือ %vol การเติมเส้นใยในระบบคอนกรีต  
ในแต่ละสูตรทำการกดอัดชั้นงานอย่างละ 5 ชั้นงานเพื่อหาค่าเฉลี่ยและนำไปคำนวณค่า S.D.

**ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่น ค่ากำลังอัดคอนกรีต เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ ค่ากำลังอัดของชั้นงานที่ทำการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของชั้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยกากอ้อยและชั้นงานควบคุม**

ชั้นงาน	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีต (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของชั้นงานที่ทำการทดสอบการเสื่อมสภาพ (MPa)
UBf30	1.31	0.70	32.69	1.81
UBf40	1.22	0.69	39.75	1.30
UBf50	0.94	0.47	62.73	0.73
UBc30	1.36	1.32	25.92	2.14
UBc40	1.28	2.04	28.61	2.30
UBc50	1.28	2.01	34.89	2.08
TBf30	1.43	11.43	23.75	12.44
TBf40	1.22	7.44	33.6	8.77
TBf50	0.86	3.00	42.06	3.42
TBc30	1.44	10.42	21.06	10.80
TBc40	1.32	8.68	27.78	8.87
TBc50	1.17	5.94	36.47	6.98
base	1.78	15.80	13.24	23.37

หมายเหตุ U คือ เส้นใยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์  
T คือ เส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์  
B คือ เส้นใยกากอ้อย  
f คือ เส้นใยละเอียด  
c คือ เส้นใยหยาบ

base คือ ชั้นงานควบคุมที่ไม่มีการเติมเส้นใยธรรมชาติ  
 ตัวเลขต่อท้ายของชั้นงานคือ %vol การเติมเส้นใยในระบบคอนกรีต  
 ในแต่ละสูตรทำการกดอัดชั้นงานอย่างละ 5 ชั้นงานเพื่อหาค่าเฉลี่ยและนำไปคำนวณค่า S.D.

**ตารางที่ 4.3** ความหนาแน่น ค่ากำลังอัดคอนกรีต เปรอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ ค่ากำลังอัดคอนกรีตของชั้นงานที่ทำการทดสอบการเสื่อมสภาพ ของชั้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยขุยมะพร้าวและชั้นงานควบคุม

ชั้นงาน	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีต (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของชั้นงานที่ทำการทดสอบการเสื่อมสภาพ (MPa)
UCCf30	1.57	7.27	24.25	13.42
UCCf40	1.30	9.31	24.30	11.30
UCCf50	1.07	5.51	38.63	6.60
UCCc30	1.51	12.05	15.70	13.94
UCCc40	1.44	10.09	18.63	14.17
UCCc50	1.27	7.24	23.10	8.04
TCCf30	1.53	15.91	20.22	19.60
TCCf40	1.39	10.9	24.82	14.85
TCCf50	1.25	7.65	33.24	9.02
TCCc30	1.55	11.24	18.76	15.69
TCCc40	1.41	8.85	25.95	10.22
TCCc50	1.26	6.64	30.23	8.86
base	1.78	15.80	13.24	23.37

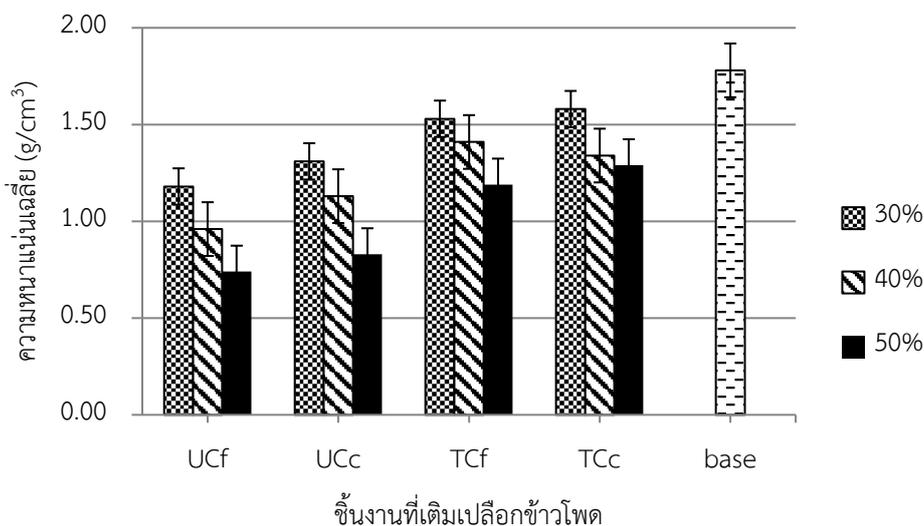
หมายเหตุ U คือ เส้นใยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์  
 T คือ เส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์  
 CC คือ เส้นใยขุยมะพร้าว  
 f คือ เส้นใยละเอียด  
 c คือ เส้นใยหยาบ  
 base คือ ชั้นงานควบคุมที่ไม่มีการเติมเส้นใยธรรมชาติ  
 ตัวเลขต่อท้ายของชั้นงานคือ %vol การเติมเส้นใยในระบบคอนกรีต  
 ในแต่ละสูตรทำการกดอัดชั้นงานอย่างละ 5 ชั้นงานเพื่อหาค่าเฉลี่ยและนำไปคำนวณค่า S.D.

#### 4.3 ความหนาแน่นมวลรวม (Bulk density)

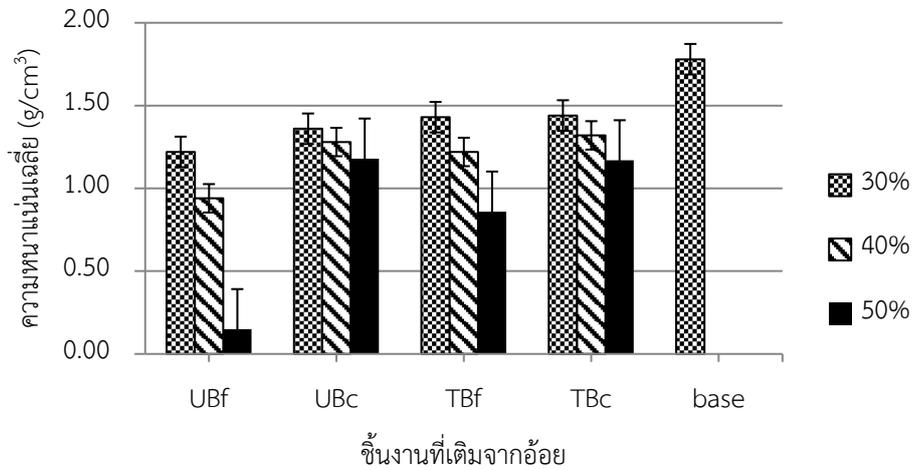
จากตารางที่ 4.1 พบว่าชั้นงานที่เติมเส้นใยเปลือกข้าวโพดละเอียด 50% โดยปริมาตร ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีความหนาแน่นเฉลี่ยน้อยที่สุดที่ 0.74 g/cm<sup>3</sup> ตารางที่ 4.2 พบว่าชั้นงานที่เติมเส้นใยกากอ้อยละเอียด 50% โดยปริมาตร ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีความหนาแน่นเฉลี่ยน้อยที่สุดที่ 0.86 g/cm<sup>3</sup> และตารางที่ 4.3 พบว่าชั้นงานที่เติมเส้นใยขุยมะพร้าวละเอียด 50% โดยปริมาตร ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยน้อยที่สุดที่ 1.07 g/cm<sup>3</sup> ส่วน

ชิ้นงานควบคุม ซึ่งไม่มีการเติมเส้นใยในระบบคอนกรีต มีความหนาแน่นเฉลี่ยมากกว่าชิ้นงานทุกสูตร คือ 1.78 g/cm<sup>3</sup> จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่เติมเส้นใยธรรมชาติ 50% โดยปริมาตรจะมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวกันในปริมาณ 40% และ 30% ตามลำดับ สาเหตุเนื่องจากเส้นใยมีความเบากว่ามวลรวมทั่วไปเมื่อเติมปริมาณเพิ่มขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานมีความเบามากขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งที่น่าคิดว่าจะมีผลคือ เส้นใยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีส่วนประกอบที่เป็นเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และกรดไขมัน ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้โปรบวงปฏิกิริยาไฮเดรชันของระบบปูนพอร์ทแลนด์ซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเบสและซิลิกาจากถ้ำลอย ทำให้การจับตัวกับเส้นใยธรรมชาติได้น้อยเกิดเป็นช่องว่างทำให้ชิ้นงานมีความพรุนตัวมากส่งผลให้ความหนาแน่นน้อย

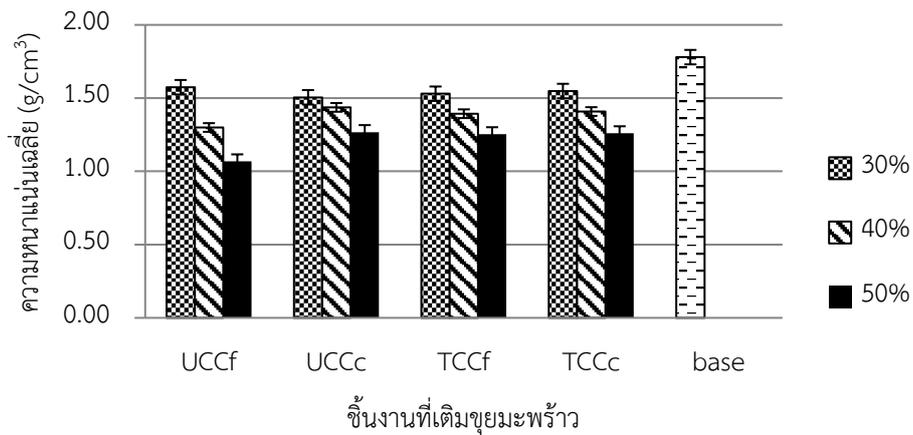
จากรูปที่ 4.4-4.6 พบว่าค่าความหนาแน่นเฉลี่ยสูงสุดที่ 1.57 g/cm<sup>3</sup> ของชิ้นงานคอนกรีตผสมเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเติมปริมาณเส้นใยขุยมะพร้าวละเอียด 30% โดยปริมาตร เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ผิวของเปลือกข้าวโพดมีความขรุขระ และมีความชอบน้ำมากขึ้นทำให้ลักษณะเส้นใยธรรมชาติจะมีการจับตัวกันเป็นก้อนอัดแน่นกว่าเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น เนื่องจากปริมาณในการแทนที่ของเส้นใยธรรมชาติที่ต่ำในระบบพอร์ทแลนด์ซีเมนต์จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้มาก สารประกอบที่เกิดขึ้นจะไปเกาะกับเส้นใยธรรมชาติทำให้เกิดลักษณะมวลรวมเป็นก้อนจึงทำให้มีความหนาแน่นสูงที่สุด ชิ้นงานคอนกรีตที่เติมเส้นใยธรรมชาติแบบหยาบจะมีแนวโน้มค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าชิ้นงานคอนกรีตที่เติมเส้นใยธรรมชาติแบบละเอียด อาจเนื่องมาจากในปริมาตรที่เท่ากัน น้ำหนักของเส้นใยธรรมชาติแบบหยาบจะมีค่ามากกว่าน้ำหนักของเส้นใยธรรมชาติแบบละเอียด



รูปที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นมวลรวมเฉลี่ยของชิ้นงานที่เติมเปลือกข้าวโพดปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตรที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม



**รูปที่ 4.5** ค่าความหนาแน่นมวลรวมเฉลี่ยของชิ้นงานที่เติมกากอ้อยปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตร ที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม

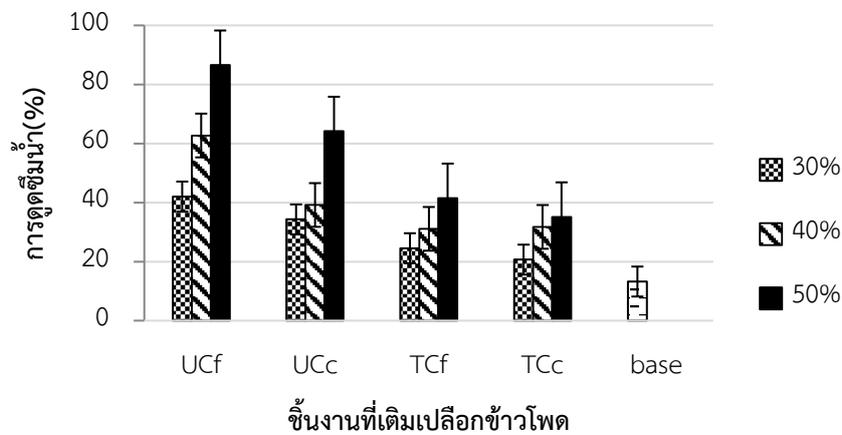


**รูปที่ 4.6** ค่าความหนาแน่นมวลรวมเฉลี่ยของชิ้นงานที่เติมขุยมะพร้าวปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตร ที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม

#### 4.4 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

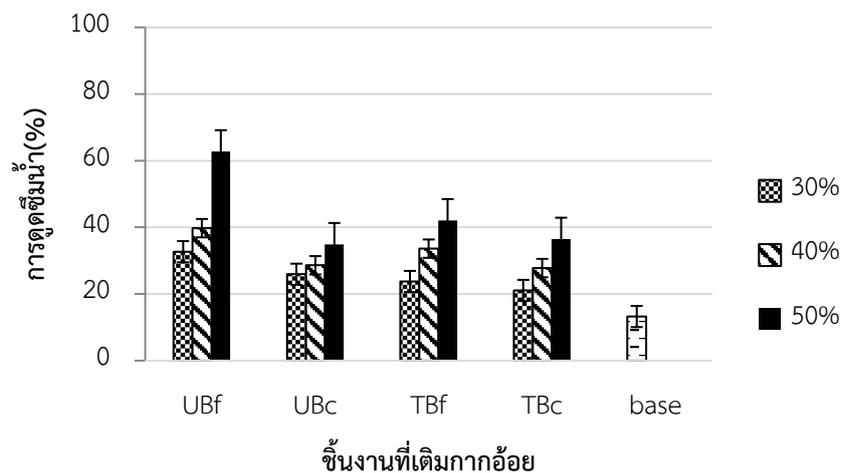
รูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานคอนกรีตที่เติมปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด และชิ้นงานควบคุมที่ไม่เติมเส้นใยธรรมชาติ พบว่าชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดละเอียด 50% โดยปริมาตร ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากที่สุด คือ 86.57% เมื่อ

เทียบกับชั้นงานที่เติมเส้นใยเปลือกข้าวโพดหยาบและการเติมเปอร์เซ็นต์เส้นใยธรรมชาติที่น้อยกว่า 50% โดยปริมาตร ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชั้นงานที่เติมเส้นใยเปลือกข้าวโพดและชั้นงานควบคุม

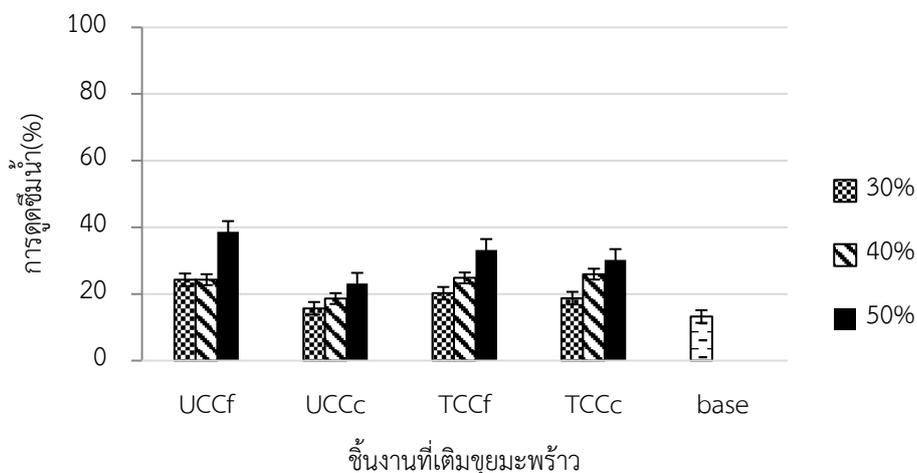
รูปที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชั้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยกากอ้อย และชั้นงานควบคุม พบว่าชั้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยกากอ้อยละเอียด 50% โดยปริมาตร ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากที่สุดคือ 62.73% เมื่อเทียบกับชั้นงานที่เติมเส้นใยอ้อยหยาบและการเติมเปอร์เซ็นต์เส้นใยธรรมชาติที่น้อยกว่า 50% โดยปริมาตร ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชั้นงานที่เติมเส้นใยกากอ้อย และชั้นงานควบคุม

รูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชั้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยขุยมะพร้าว และชั้นงานควบคุม พบว่าชั้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยขุยมะพร้าวละเอียด 50% โดยปริมาตร ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮ

ดรอกไซด์มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากที่สุดคือ 38.63% เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เติมเส้นใยอ้อยหยาบและการเติมเปอร์เซ็นต์เส้นใยธรรมชาติที่น้อยกว่า 50% โดยปริมาตร ดังตารางที่ 4.3



**รูปที่ 4.9** เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เติมเส้นใยขุยมะพร้าว และชิ้นงานควบคุม

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติ และชิ้นงานที่เป็นตัวควบคุม จะเห็นได้ว่าการเติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติมีการดูดซึมน้ำมากกว่าชิ้นงานที่เป็นตัวควบคุม เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีท่อลำเลียงน้ำอยู่ภายใน และเมื่อนำมาผสมกับมวลรวมจะทำให้เกิดช่องว่างภายในเมทริกซ์จึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากกว่าชิ้นงานควบคุม เมื่อพิจารณาชนิดของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด จะเห็นได้ว่าเส้นใยของเปลือกข้าวโพด กากอ้อย และขุยมะพร้าว มีการดูดซึมน้ำจากมากไปน้อยตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยขุยมะพร้าวมีลักษณะละเอียดกว่าเส้นใยกากอ้อย และเส้นใยกากอ้อยมีลักษณะละเอียดกว่าเส้นใยเปลือกข้าวโพด เมื่อทำการผสมเส้นใยธรรมชาติที่มีลักษณะละเอียดจะผสมเข้ากันได้ดีกับมวลรวม ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดช่องว่างน้อยจึงดูดซึมน้ำได้น้อย

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่เติมเส้นใยธรรมชาติผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เติมเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าชิ้นงานที่เติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะถูกกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และกรดไขมันออก ซึ่งเป็นพวกไม่ชอบน้ำ ทำให้เหลือแต่เซลลูโลส ซึ่งเป็นพวกชอบน้ำ ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกับมวลรวมจึงทำให้มีความเข้ากันได้ดี มีการกระจายตัวของเส้นใยธรรมชาติภายในเมทริกซ์มีความสม่ำเสมอ และการยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยธรรมชาติ และปูนซีเมนต์ที่ดี ส่งผลให้เกิดช่องว่างน้อยลง

#### 4.5 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (compressive strength test)

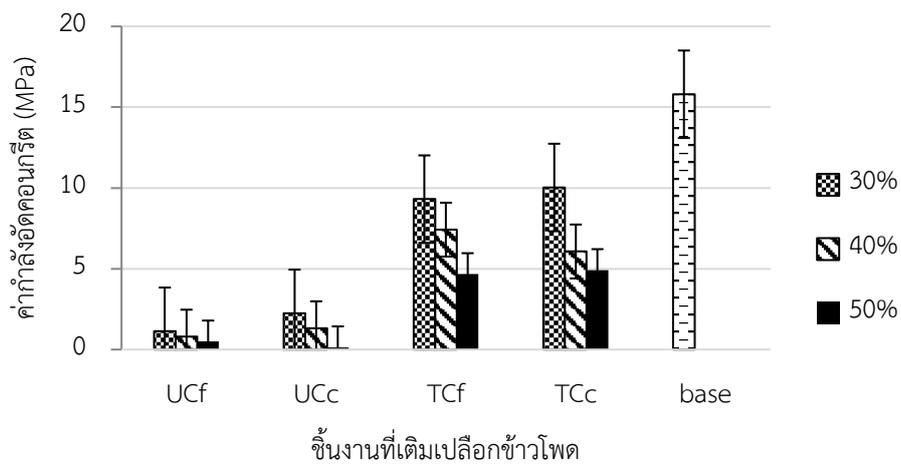
จากตารางที่ 4.1 พบว่าชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดละเอียด 30% โดยปริมาตร ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยสูงสุดที่ 10.04 MPa โดยมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ 40% และ 50% โดยปริมาตร แต่มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่เป็นตัวควบคุมที่ไม่มีการเติมเส้นใยธรรมชาติ จากตารางที่ 4.2 พบว่าชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยกากอ้อยละเอียด 30% โดยปริมาตร ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยสูงสุดที่ 11.43 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับการเติมเส้นใยธรรมชาติที่ 40% และ 50% โดยปริมาตร แต่มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานควบคุม และตารางที่ 4.3 พบว่าชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยขุยมะพร้าวละเอียด 30% โดยปริมาตร ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยที่ 15.91 MPa โดยพบว่ามีค่ากำลังอัดมากกว่าชิ้นงานควบคุมซึ่งมีค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยที่ 15.80 MPa

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.10-4.12 พบว่าแนวโน้มของชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติโดยผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่ากำลังอัดคอนกรีตมากกว่าชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ปริมาณ เสมิเซลลูโลส ลิกนิน และกรดไขมันที่อยู่ในเส้นใยธรรมชาติถูกกำจัดออกเหลือแต่ปริมาณเซลลูโลสที่มาก ซึ่งเซลลูโลสมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) ที่มีความชอบน้ำสูง เมื่อนำไปผสมกับมวลรวมจึงทำให้เกิดการยึดเกาะกับเฟสเมทริกซ์ที่ดี [20, 21] และการกระจายตัวภายในชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ โดยเส้นใยธรรมชาติทำหน้าที่ยึดกับเมทริกซ์ทั้งเชิงเคมี และเชิงกายภาพ เชิงเคมีคือพันธะไฮโดรเจนทำอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์ ส่วนเชิงกายภาพคือพันธะเกิดขึ้นระหว่างการไฮเดรชันของซีเมนต์ และผิวที่ขรุขระของเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว เมื่อผลึกก่อตัวจะทำการเชื่อมระหว่างกัน และเมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบกำลังอัดคอนกรีต พบว่าชิ้นงานถึงแม้จะเริ่มเกิดรอยร้าวแต่ยังสามารถรับแรงได้อีก สาเหตุเนื่องจากเส้นใยธรรมชาติภายในทำหน้าที่เชื่อมกับเมทริกซ์ได้เป็นอย่างดีจึงทำหน้าที่ต้านการเกิดรอยร้าวและทำหน้าที่กระจายความเค้นได้ดี จึงทำให้ชิ้นงานสามารถรับแรงได้ต่อถึงแม้จะเกิดรอยร้าวแล้วก็ตาม สำหรับชิ้นงานที่มีค่ากำลังอัดคอนกรีตที่มากที่สุดคือ ชิ้นงานที่เติมเส้นใยขุยมะพร้าวละเอียด 30% โดยปริมาตร โดยผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากเส้นใยขุยมะพร้าวละเอียดถูกปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงทำให้ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยขุยมะพร้าวมีความขรุขระ มีความชอบน้ำมากขึ้น มีลักษณะเป็นผงละเอียดและเป็นเส้นใยผสมกันอยู่จึงทำให้เข้ากับมวลรวมได้ดี ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในเมทริกซ์น้อยกว่าชิ้นงานที่เติมเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่นเนื่องจากช่องว่างเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก จึงทำให้ชิ้นงานที่มีช่องว่างมากแตกหักง่ายเมื่อได้รับแรงกดอัด

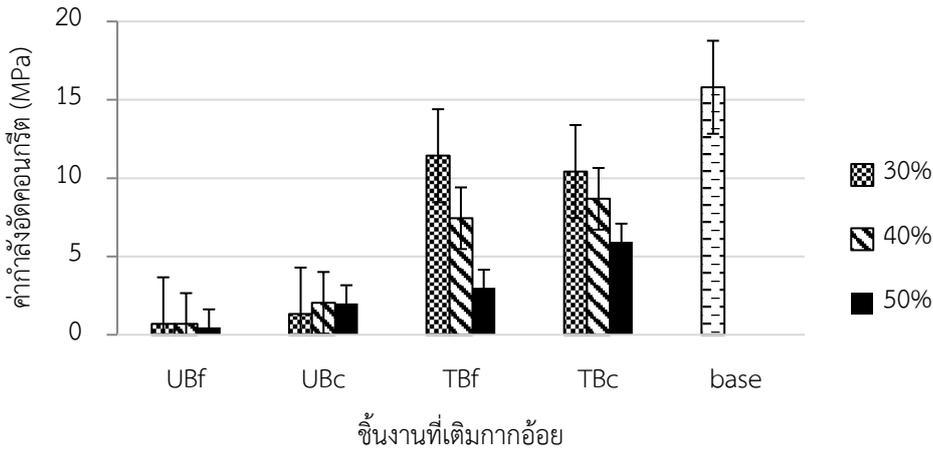
ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูป มอก.2226-2548 ได้ประกอบด้วยมาตรฐานการทดสอบต่างๆ อาทิเช่น ค่าการโก่งตัว ค่าความต้านทานแรงอัด เป็นต้น และมาตรฐาน มอก.409 เป็นการทดสอบมาตรฐานค่าความต้านทานแรงอัด ซึ่งได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นตัวอย่างสำหรับทดสอบในงานวิจัยนี้ โดยชิ้นงานตามมาตรฐาน มอก.409 มีขนาด 10x10x10 เซนติเมตร<sup>3</sup> แต่ละก้อนจะต้องต้านแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 16 MPa และสำหรับค่าเฉลี่ยกำลังอัดจะต้องไม่น้อยกว่า 21 MPa สำหรับชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมี

ขนาดแตกต่างจากมาตรฐาน มอก.409 เนื่องจากกระบวนการเตรียมเส้นใยธรรมชาติสามารถเตรียมค่อนข้างยากประกอบกับเครื่องมือที่ใช้เป็นเครื่องกำลังอัดขนาดเล็ก ผู้วิจัยจึงได้มีการออกแบบชิ้นงานให้เหมาะสมกับปัญหาที่เกิดขึ้นโดยใช้ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร<sup>3</sup> พบว่าชิ้นงานคอนกรีตที่เติมเส้นใยขุยมะพร้าวละเอียด 30% โดยปริมาตร ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตสูงที่สุดคือ 15.91 MPa

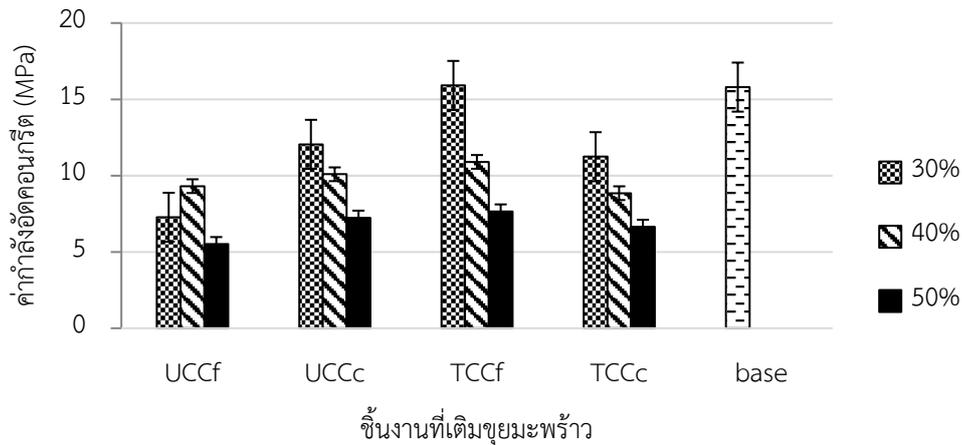
เมื่อพิจารณาแนวโน้มปริมาณการเติมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ดังรูปที่ 4.10-4.12 พบว่าชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นมากจาก 30% ไปเป็น 50% โดยปริมาตร ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลง เนื่องจากปริมาณพอร์ทแลนด์ซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้แรงยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับเมทริกซ์ลดลงเนื่องจากพอร์ทแลนด์ซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน



**รูปที่ 4.10** ค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยของชิ้นงานที่เติมเปลือกข้าวโพดปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตรที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม



**รูปที่ 4.11** ค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยของชิ้นงานที่เติมกากอ้อยปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตรที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม

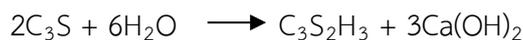


รูปที่ 4.12 ค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยของชิ้นงานที่เติมขุยมะพร้าวปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตรที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม

#### 4.6 การเสื่อมสภาพของชิ้นงานจากการแช่น้ำ

จากการทดสอบการนำชิ้นงานทุกสูตรไปแช่น้ำเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง และนำชิ้นงานมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน รูปที่ 4.13-4.15 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำและน้ำหนักของชิ้นงานหลังจากการแช่น้ำของชิ้นงานทุกสูตร จะเห็นได้ว่าชิ้นงานส่วนใหญ่มีน้ำหนักลดลงจากเดิมเล็กน้อยเนื่องจากชิ้นงานมีการเสื่อมสลายไปบางส่วน ดังนั้นน้ำหนักของชิ้นงานที่นำไปแช่น้ำ 7 วัน ตามด้วยการอบแห้งไม่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของชิ้นงานคอนกรีต และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.16-4.18 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่นำไปแช่น้ำแล้วนำมาอบแห้งจะมีค่ากำลังอัดคอนกรีต (compressive strength) ที่สูงกว่าชิ้นงานเดิมทุกสูตร โดยพอร์ทแลนด์ซีเมนต์มีส่วนประกอบหลักคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) ทำหน้าที่พัฒนากำลังระยะสั้น และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) พัฒนากำลังระยะยาว เมื่อไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ตามสมการดังนี้

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ )

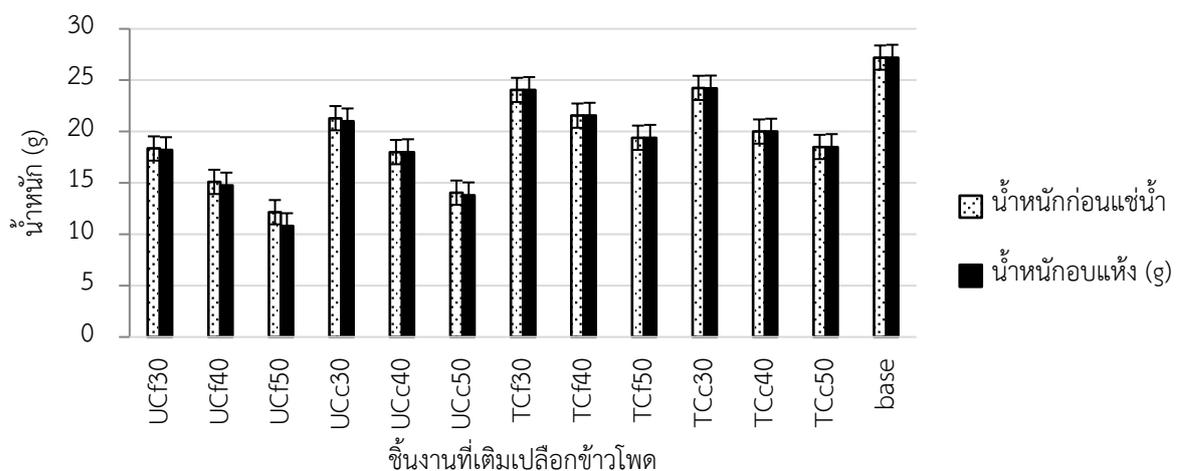


ส่วนไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) เช่นกัน ตามสมการดังนี้

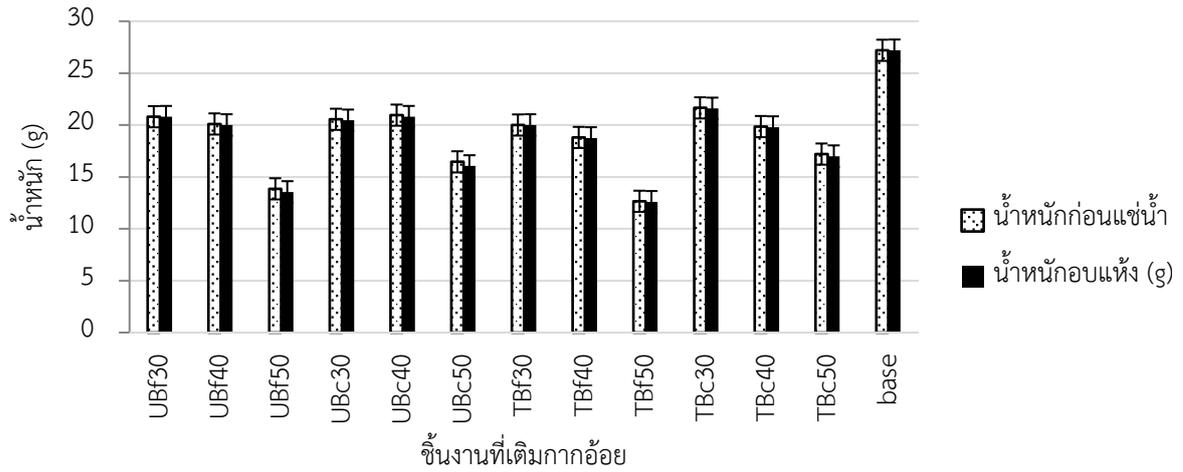
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ )



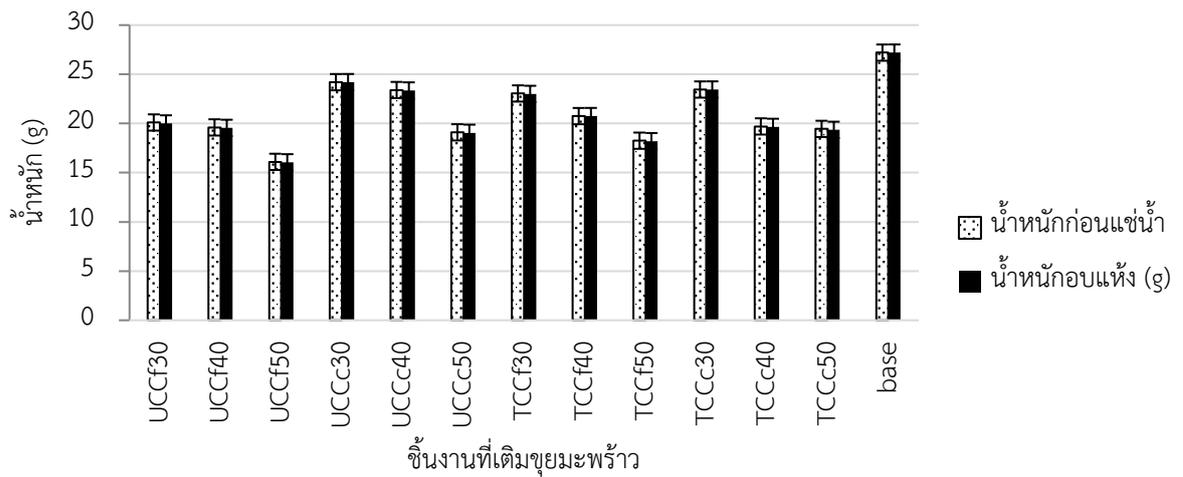
เนื่องจากช่วงผสมชิ้นงานซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำมากจึงเกิดการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) และเกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ซึ่งทำปฏิกิริยากับเถ้าลอยเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ต่อมานำชิ้นงานที่ปล่อยให้แห้งแล้วเป็นเวลา 28 วันมาแช่น้ำอีกครั้งเป็นเวลา 7 วัน อาจเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) เช่นกัน ซึ่งทำปฏิกิริยากับเถ้าลอยเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยไดแคลเซียมซิลิเกตทำหน้าที่พัฒนากำลังในระยะยาวจึงทำให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตของชิ้นงานทุกสูตรเพิ่มขึ้นหลังจากการแช่น้ำ โดยจะสังเกตเห็นว่าชิ้นงานตัวควบคุม มีค่ากำลังอัดคอนกรีตสูงสุดที่สุด คือจากเดิม 15.8 MPa เพิ่มขึ้นเป็น 23.37 MPa และชิ้นงานที่เติมเส้นใยขุยมะพร้าวละเอียด 30% โดยผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์คือ จากเดิม 15.91 MPa เพิ่มขึ้นเป็น 19.6 MPa สาเหตุที่ชิ้นงานควบคุมมีค่ากำลังอัดคอนกรีตเพิ่มขึ้นมากที่สุด เนื่องจากมีเฉพาะพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานได้มากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เติมเส้นใยธรรมชาติ [22, 23] ซึ่งจะมีส่วนผสมของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และเถ้าลอยลดลงเมื่อเติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติมากขึ้น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยลงส่งผลให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตของชิ้นงานลดลง



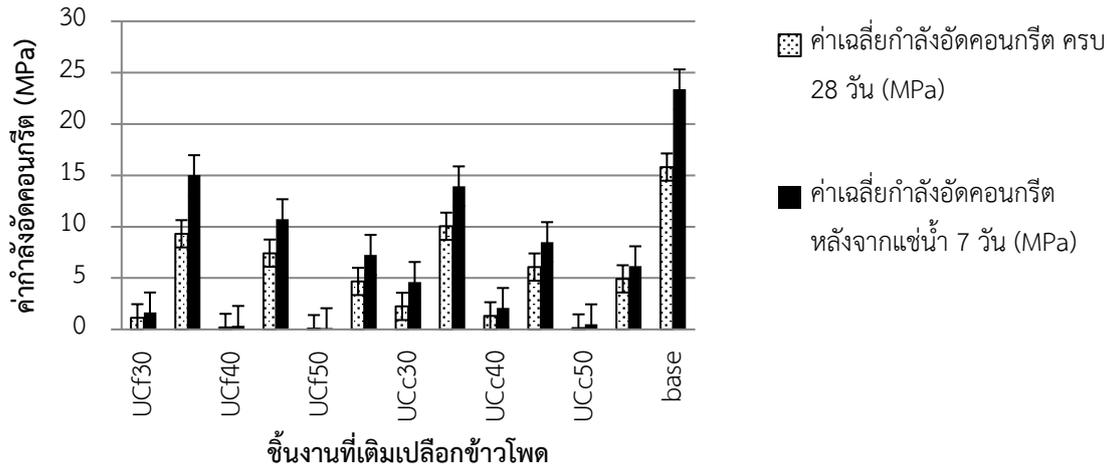
**รูปที่ 4.13** น้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังจากการแช่น้ำ 7 วัน ชิ้นงานที่เติมข้าวโพดปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตร ที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม



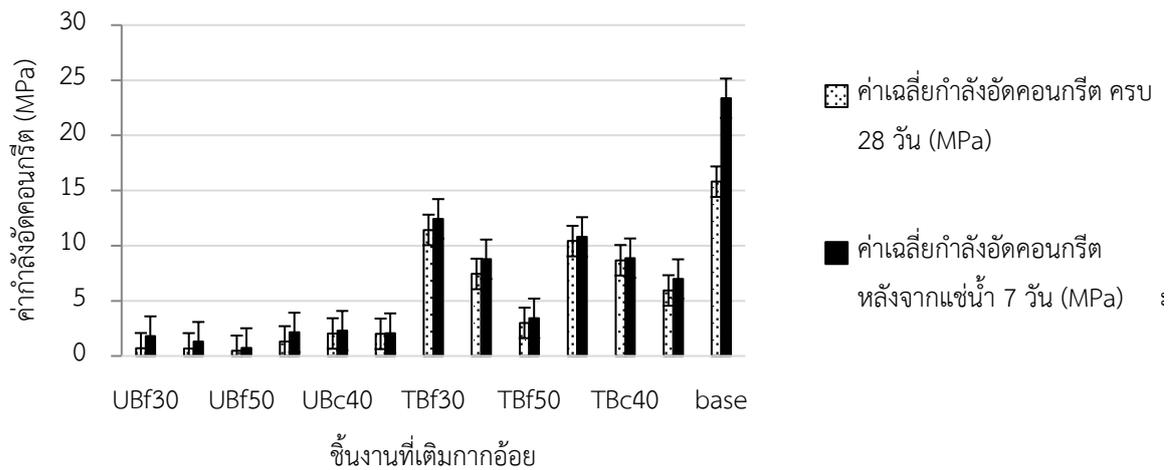
รูปที่ 4.14 น้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังจากการแช่น้ำชิ้นงานที่เติมน้ำก้อยปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตร ที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียม-ไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม



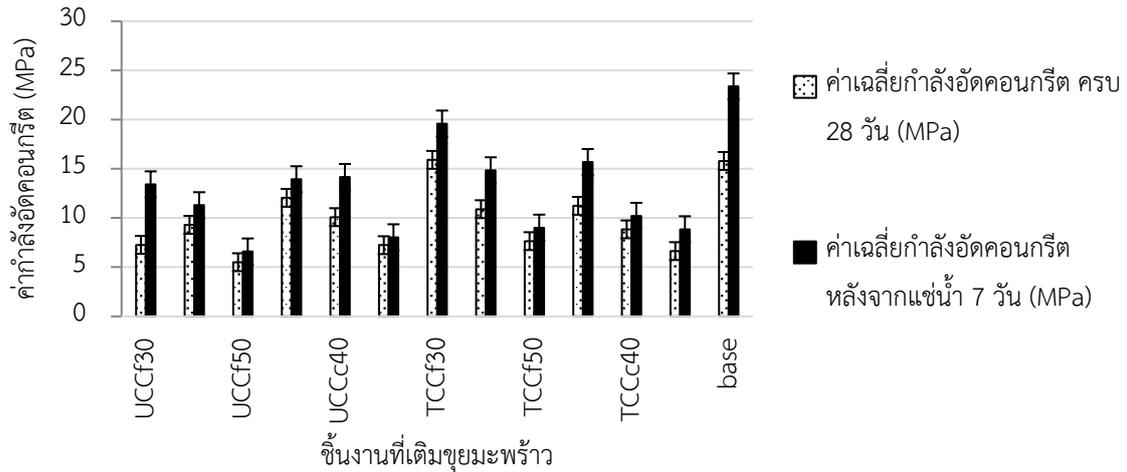
รูปที่ 4.15 น้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังจากการแช่น้ำ 7 วัน ชิ้นงานที่เติมขุยมะพร้าวปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตร ที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม



รูปที่ 4.16 ค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยของชิ้นงานครบ 28 วัน และชิ้นงานที่แช่น้ำ 7 วัน และตามด้วยการอบแห้ง โดยชิ้นงานเติมข้าวโพดปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตร ที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม



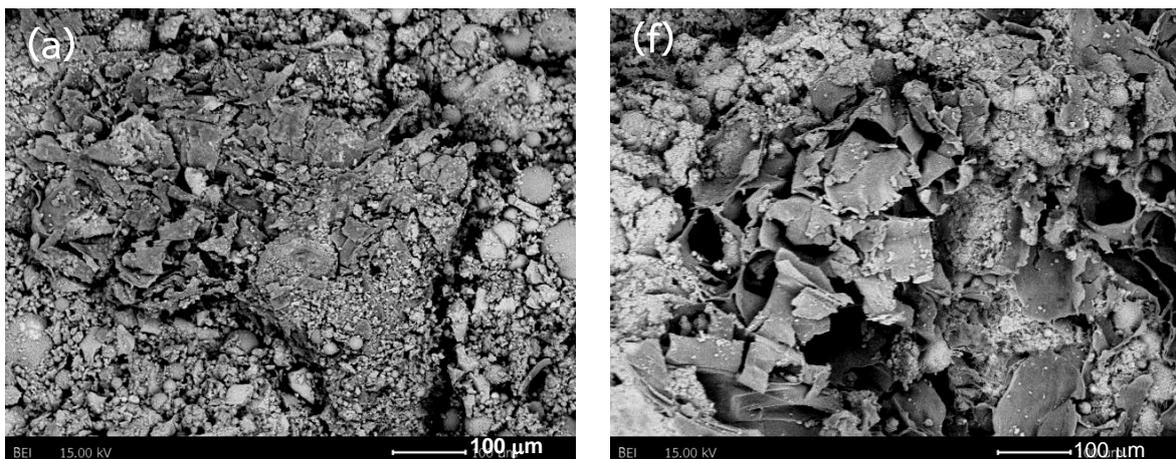
รูปที่ 4.17 ค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยของชิ้นงานครบ 28 วัน และชิ้นงานที่แช่น้ำ 7 วัน และตามด้วยการอบแห้ง โดยชิ้นงานเติมกากอ้อยปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตร ที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม



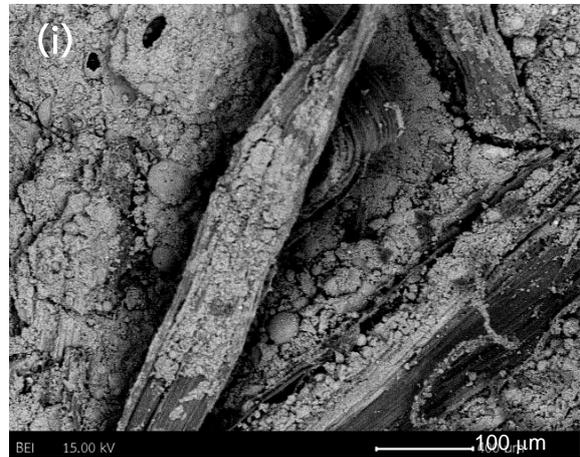
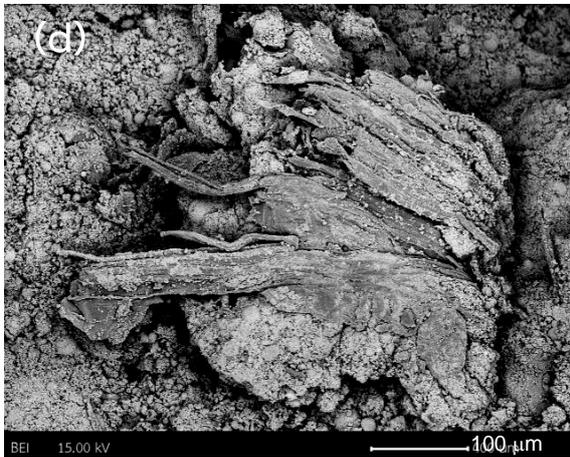
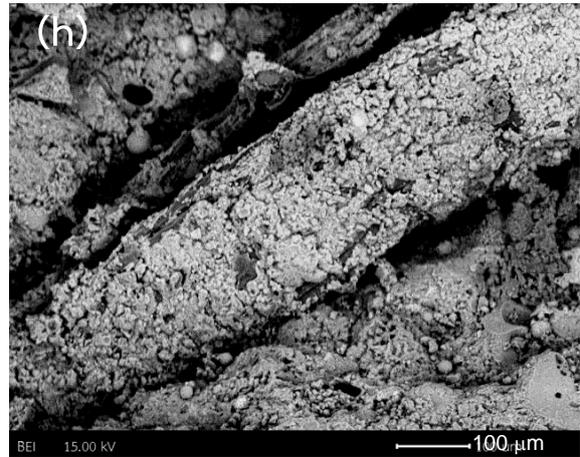
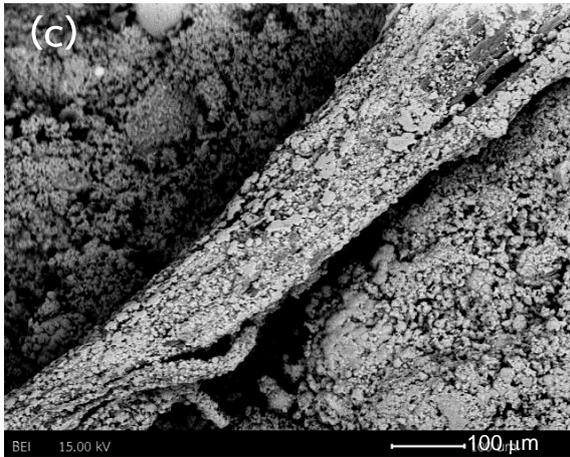
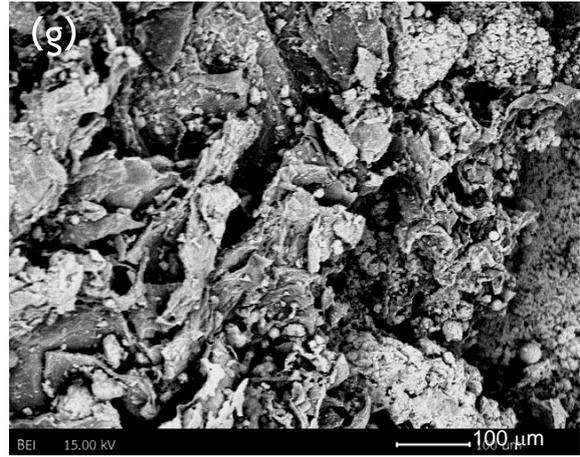
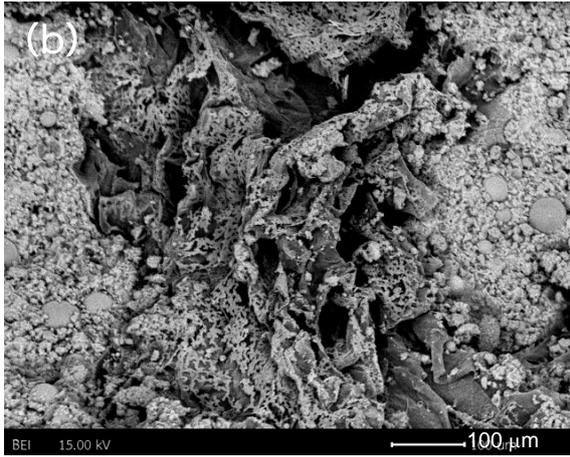
รูปที่ 4.18 ค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยของชิ้นงานครบ 28 วัน และชิ้นงานที่แช่น้ำ 7 วัน และตามด้วยการอบแห้ง โดยชิ้นงานเติมขุยมะพร้าวปริมาณ 30, 40 และ 50% โดยปริมาตร ที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับชิ้นงานควบคุม

#### 4.7 ผลลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานคอนกรีตที่เติมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

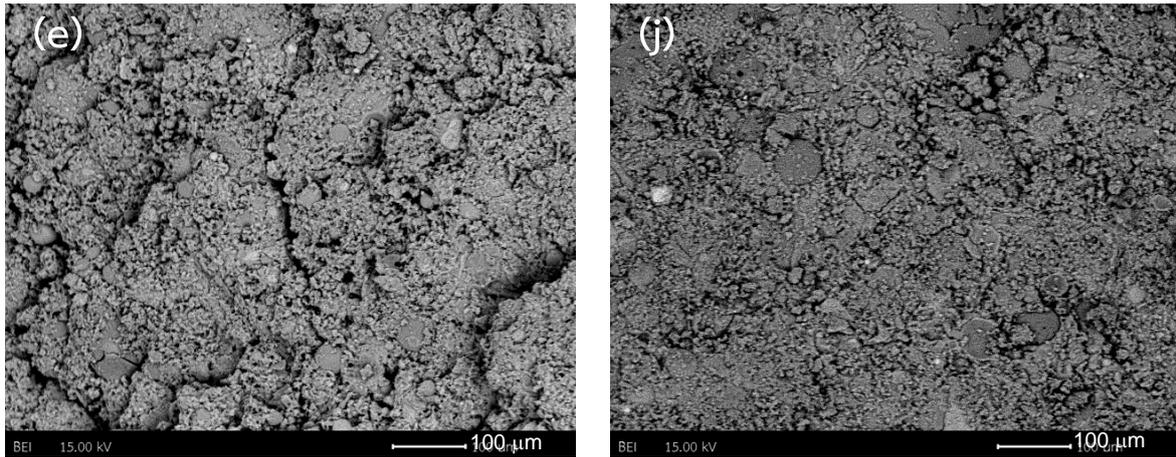
จากรูปที่ 4.19(a-e) แสดงชิ้นส่วนภายในของชิ้นงานที่แตกหัก ซึ่งชิ้นงานถูกปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน และรูปที่ 4.19(f-j) เป็นชิ้นส่วนภายในของชิ้นงานที่แตกหักของชิ้นงานที่เติมเส้นใยธรรมชาติ แล้วปล่อยให้แห้ง ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 28 วันจากนั้นนำไปแช่น้ำ เป็นเวลา 7 วัน แล้วนำมาอบในเตาอบ เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.19 (มีต่อหน้าถัดไป)



รูปที่ 4.19 (มีต่อหน้าถัดไป)



**รูปที่ 4.19** พื้นผิวที่แตกหักภายในของชิ้นงานคอนกรีตที่เติมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดจากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยด้านซ้ายคือชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาที่ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน (a) UCCf30 (b) TCCf30 (c) TCc30 (d) TBf30 (e) base และด้านขวาคือชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาที่ทำการทดสอบการเชื่อมสภาพ (f) UCCf30 (g) TCCf30 (h) TCc30 (i) TBf30 (j) base ตามลำดับ

สำหรับในกรณีชิ้นงานคอนกรีตที่เติมเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้แก่ เส้นใยเปลือกข้าวโพดและเส้นใยกากอ้อย ไม่มีภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เนื่องจากชิ้นงานที่เติมเส้นใยเหล่านี้มีการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์น้อยมาก เมื่อทำการกดอัดด้วยกำลังคอนกรีตทำให้ชิ้นงานแตกกระจายเป็นผง ส่วนชิ้นงานที่สามารถตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 4.19 คือชิ้นงานคอนกรีตที่เติมเส้นใยธรรมชาติมีการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ได้ดีเมื่อทำการกดอัดคอนกรีตไม่แตกเป็นผง จากการเปรียบเทียบชิ้นงานรูปที่ 4.19 (a, f), 4.19 (b, g), 4.19 (c, h), 4.19 (d, i) และ 4.19 (e, j) พบว่ารูปของชิ้นงานคอนกรีตที่ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วันและชิ้นงานคอนกรีตที่ทำการทดสอบการเชื่อมสภาพ เมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงได้นำค่ากำลังอัดคอนกรีตจากตารางที่ 4.1-4.3 มาเปรียบเทียบพบว่ามีความกำลังอัดคอนกรีตมีค่าแตกต่างกัน โดยชิ้นงานคอนกรีตที่ทำการทดสอบการเชื่อมสภาพมีค่ากำลังอัดคอนกรีตที่มากกว่าชิ้นงานที่ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน จากที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อพิจารณารูปที่ 4.19(f-j) อาจจะมีการยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์กับผิวเส้นใยธรรมชาติสม่ำเสมอมากขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีช่องว่างภายในเมทริกซ์น้อยลง ส่วนรูปที่ 4.19(a-e) อาจมีการยึดเกาะกันระหว่างเมทริกซ์กับผิวเส้นใยธรรมชาติได้น้อยลงส่งผลให้มีช่องว่างมากขึ้น

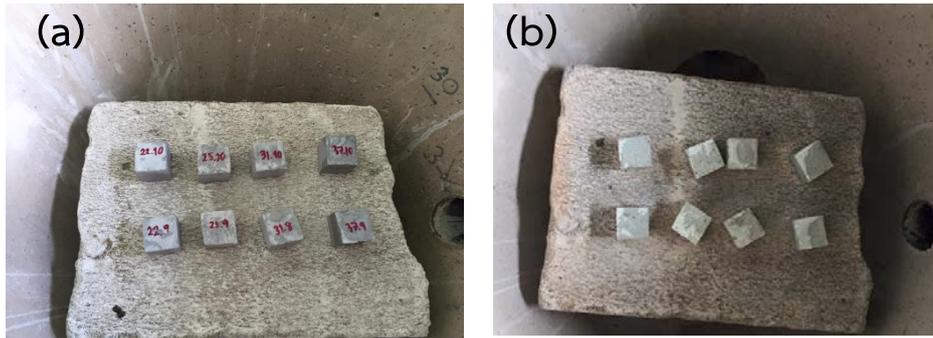
เมื่อพิจารณาในกรณีชิ้นงานที่ปล่อยให้แห้งในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.19(a) กับรูปที่ 4.19(b) พบว่าภายในเมทริกซ์ของรูปที่ 4.19(a) มีการยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์กับผิวเส้นใยธรรมชาติได้น้อยกว่าชิ้นงานของรูปที่ 4.19(b) เนื่องจากชิ้นงานของรูปที่ 4.19(a) เติมปริมาณเส้นใยขุ่ยพร้าวที่

ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้การยึดเกาะระหว่างผิวเส้นใยธรรมชาติกับเมทริกซ์ได้น้อย เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติยังคงมี เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และกรดไขมัน เกาะอยู่บนผิวเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งจะแตกต่างกับชิ้นงานที่เติมขุยมะพร้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในกรณีที่ชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติเท่ากันที่ 30% โดยปริมาตร พบว่าชิ้นงานคอนกรีตที่เติมเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีการยึดเกาะระหว่างผิวเส้นใยธรรมชาติกับเมทริกซ์ได้ดีกว่าเพราะเส้นใยธรรมชาติถูกปรับปรุงพื้นผิวทำให้พื้นผิวมีความขรุขระ มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น เนื่องจากถูกกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และพวกกรดไขมันออก ดังนั้นจึงส่งผลให้คุณสมบัติทางเชิงกลด้านการต้านแรงกดอัดของชิ้นงานดีขึ้น

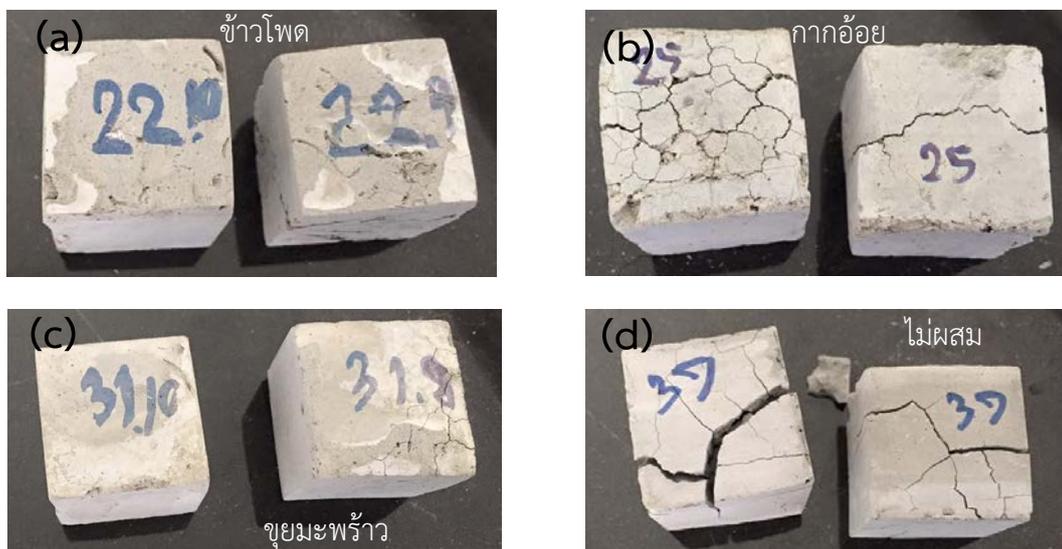
#### 4.8 การทนไฟของชิ้นงาน (Fire resistance) [18]

การทนไฟของชิ้นงานได้มีการทดสอบโดยใช้ furnace burners ทำการควบคุมอุณหภูมิโดย Time-Temperature Curve ในช่วงอุณหภูมิ 538-1260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM E119 แต่เนื่องจากเครื่องที่ใช้ในการทดสอบของผู้วิจัยไม่พร้อมจึงได้ทำการประยุกต์เครื่องทดสอบด้วยการนำชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตที่มากที่สุดของชิ้นงานที่มีการเติมเส้นใยแต่ละชนิดและชิ้นงานควบคุม มาทดสอบการทนไฟด้วยเตาเผาไหม้ชีวมวลฟลูอิดโตซ์เบดไซโคลนแฝดชนิดหมุนวน ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งใช้เวลาในการเผาเป็นเวลา 30 นาที พบว่าหลังจากการเผาไหม้ๆ ชิ้นงานมีลักษณะเปลี่ยนสีจากสีเทาเข้มเป็นเทาอ่อน มีน้ำหนักลดลง และไม่มีการแตกของชิ้นงานดังรูปที่ 4.20 เมื่อเวลาผ่านไปชิ้นงานทุกชิ้นเกิดการแตกหักดังรูปที่ 4.21 พบว่าสาเหตุที่น้ำหนักลดลงเนื่องจากความชื้นภายในชิ้นงานระเหยออกไป เส้นใยธรรมชาติภายในเมทริกซ์ถูกเผาและพันธะระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมถูกทำลายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางความร้อนของซีเมนต์เพสต์และมวลรวม จึงเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานแตกออกจากกัน

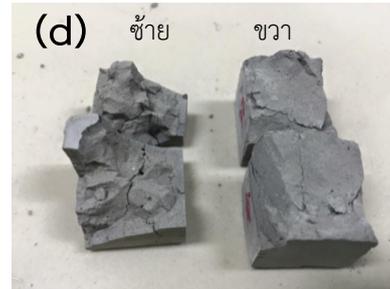
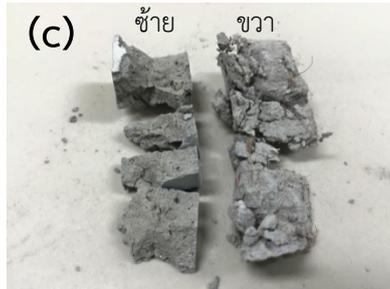
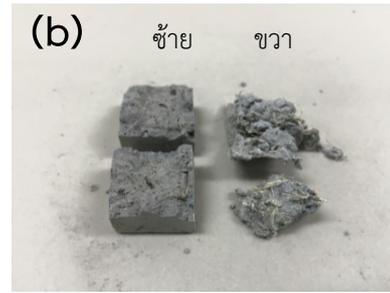
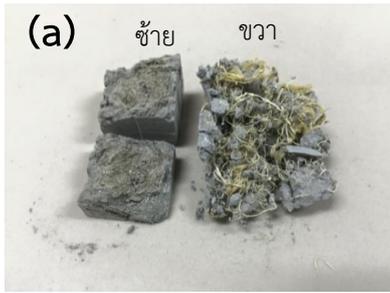
เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติกับชิ้นงานควบคุม พบว่าชิ้นงานควบคุมจะมีความเปราะมากกว่าชิ้นงานที่เติมเส้นใยธรรมชาติเมื่อทดสอบด้วยการเผาไฟ แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติลงไปมีความทนไฟมากกว่า เนื่องจากมีเส้นใยธรรมชาติช่วยในการกระจายความเค้น ถึงแม้ว่าจะมีเส้นใยธรรมชาติบางส่วนที่ถูกเผาไฟ แต่ก็ยังมีบางส่วนที่เหลืออยู่ จึงทำให้เส้นใยธรรมชาติเหล่านี้สามารถกระจายความเค้นได้ เมื่อทดสอบการกดอัดเส้นใยธรรมชาติที่หลงเหลืออยู่จะช่วยแบกรับแรงไว้ได้ ชิ้นงานจึงแตกหักยากแสดงในรูปที่ 4.22 อีกทั้งพอร์ทแลนด์ซีเมนต์ทำหน้าที่ต้านไฟอยู่ภายนอก จึงทำให้เส้นใยธรรมชาติภายในถูกเผาได้ช้าลง โดยสาเหตุที่พอร์ทแลนด์ซีเมนต์สามารถต้านไฟได้ เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตเม็ดปูน (Clinker) ทำที่อุณหภูมิ 1200-1400 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิไฟไหม้บ้านทั่วไปอยู่ในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส จึงทำให้ชิ้นงานสามารถต้านเปลวไฟได้นาน



รูปที่ 4.20 (a) ชิ้นงานก่อนทดสอบ และ (b) ชิ้นงานหลังการทดสอบด้วยเตาเผาไหม้ชีวมวลฟลูอิดไดซ์เบตไซโคลนแฝดชนิดหมุนวน เป็นเวลา 25 นาที โดยวางชิ้นงานเป็นคู่ทั้งหมด 4 คู่ ได้แก่ TCc30, TBf30, TCCf30 และ base ตามลำดับ

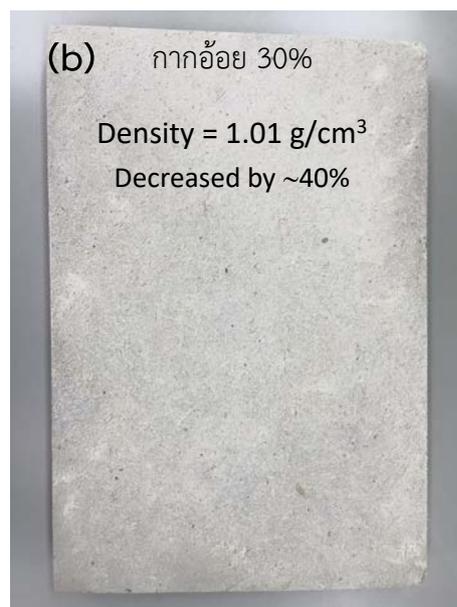
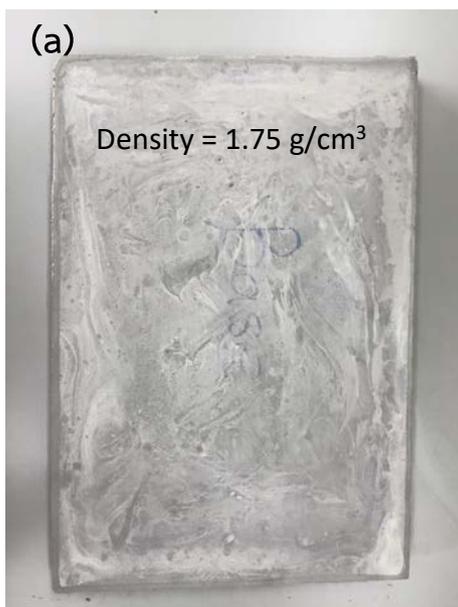


รูปที่ 4.21 ลักษณะภายนอกของชิ้นงานหลังจากทดสอบด้วยเตาเผาไหม้ชีวมวลฟลูอิดไดซ์เบตไซโคลนแฝดชนิดหมุนวน เมื่อปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ภาพ a คือ TCc30 ภาพ b คือ TBf30 ภาพ c TCCf30 และภาพ d คือ base ซึ่งแต่ละสูตรมีชิ้นงานอย่างละ 2 ชิ้น

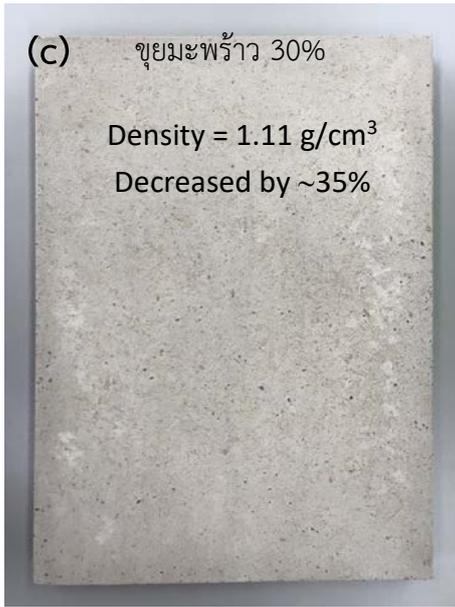


รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบลักษณะการแตกหักของชิ้นงานที่ถูกกดอัดระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการเผาด้วยเตาเผาไหม้ชีวมวลฟลูอิดไดซ์เบดไซโคลนแฝดชนิดหมุนวนเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน (ซ่าย) และชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเผาไหม้ (ขวา) ของแต่ละสูตร ดังนี้ (a) TCC30 (b) TBf30 (c) TCCf30 และ (d) base

#### 4.9 ตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาที่ถูกพัฒนาโดยใช้พอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดาและเส้นใยธรรมชาติ



รูปที่ 4.23 (มีต่อหน้าถัดไป)



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างพื้นผิวชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาขนาดกว้าง 40 cm ยาว 27 cm สูง 4 cm  
(a) ชิ้นงานควบคุมที่ไม่ได้เติมเส้นใยธรรมชาติ (b) TBf30 (c) TCCf30 และ (d) TCCf40

รูปที่ 4.23(b-d) และ 4.24 แสดงภาพตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาที่ขึ้นรูปขนาดใหญ่ มีความสามารถในการรับกำลังอัด (compressive strength test) ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เทียบเคียงกับคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ, มอก. 2601-2556 และคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ, มอก. 1505-2541 อย่างไรก็ตามไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้อย่างถูกต้องในทุกคุณสมบัติเพราะคอนกรีตผสมเส้นใยธรรมชาติแบบไม่ใช้แรงอัดไม่มีมาตรฐานอุตสาหกรรมรองรับ แต่ผู้วิจัยเชื่อว่าสามารถพัฒนาสู่การใช้งานได้จริงในอนาคตและยังเป็นต้นแบบให้กับงานคอนกรีตในลักษณะอื่นที่ต้องการความเบาและความแข็งแรงในระดับที่ยอมรับได้ เช่น กระถางปลูกต้นไม้คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบา ขนย้ายง่าย ลดการแตกหักเมื่อวางซ้อนกัน เป็นต้น ซึ่งทางผู้วิจัยเคยได้รับโจทย์และแนวคิดมาจากผู้ประกอบการ SME เพื่อต่อยอดงานวิจัยและพัฒนาเพื่อเป็นทางเลือกของสินค้ารูปแบบใหม่



รูปที่ 4.24 ภาพแนวตั้งของชิ้นงาน TBf30, TCCf30 และ TCCf40 ที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาดกว้าง 40 cm ยาว 27 cm สูง 4 cm

## 5 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้สามารถนำเส้นใยขุยมะพร้าว กากอ้อย และเปลือกข้าวโพดมาผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบาได้ โดยพบว่าชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยขุยมะพร้าวละเอียด 30% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการต้านแรงกดอัดดีที่สุด และชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดละเอียด 50% โดยปริมาตร ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีน้ำหนักเบาที่สุด ชิ้นงานที่เติมปริมาณเส้นใยขุยมะพร้าว กากอ้อย และเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้ากันกับมวลรวมได้ดีและมีความต้านทานแรงกดอัดดีกว่าชิ้นงานที่เติมเส้นใยแต่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีความชอบน้ำมากขึ้นเมื่อนำไปผสมกับมวลรวมทำให้มีช่องว่างลดลงและเกิดการยึดเกาะที่ดีกับเมทริกซ์จึงช่วยให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตสูง อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่มีการเติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติมากขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากขึ้นด้วยเนื่องจากมีช่องว่างมากขึ้นในคอนกรีตคอมโพสิต เมื่อพิจารณาชนิดของเส้นใยธรรมชาติพบว่าชิ้นงานที่เติมเส้นใยขุยมะพร้าวมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำน้อยที่สุด ทำให้มีความเข้ากันได้ดีกับมวลรวม และชิ้นงานที่เติมเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำน้อยกว่าชิ้นงานที่เติมเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้ากันได้ดีกับมวลรวม

เส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้นและชิ้นงานคอนกรีตที่เติมปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้ากันกับเมทริกซ์ได้ดีกว่าชิ้นงานที่เติมเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าขุยมะพร้าวมีความเหมาะสมที่สุดในการผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบาเพราะเส้นใยเปลือกข้าวโพดและกากอ้อยไม่ทนต่อแรงกดอัดและคอนกรีตมีการดูดซึมน้ำที่มาก

## 6 ผลผลิต (Output)

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

1. การนำเสนอผลงานรูปแบบโปสเตอร์และบทคัดย่อ เรื่อง “Fabrication of lightweight concrete composites using natural fibers in Thailand” 2018 The 8th International Conference on Advanced Materials Research, Jan. 20-22, 2018 Fukuoka, Japan
2. บทความวิจัยระดับนานาชาติ เรื่อง Fabrication of Lightweight Concrete Composites Using Natural Fibers in Thailand, Key Engineering Materials Vol. 765, pp 305-308

## 7 บรรณานุกรม

- [1] Aggarwal L.K., Bagasse-Reinforced Cement Composites, Cement and Concrete Composites, 1994, 17(6), p. 107-12
- [2] ทฤทท์ กิรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. 2552. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ: An Overview of Composite Materials. วารสารวิศวกรรมสาร มก. ปีที่ 23, ฉบับที่ 70: หน้า 18-32
- [3] Paulo, H., Fernandes, P., Herman C., Maria, C., Daniella, R. M., Sandra, M., et al. (2011). Sugarcane bagasse pulping and bleaching: Thermal and chemical characterization. *Bioresources*. 24, 71-82.
- [4] Katinonkul, W., & Phuriragpitikhon, J. (2013). Pretreatment of corn husk and coconut husk using ionic liquid to enhance glucose recovery. *Bulletin of applied science*, 39, 26-34.
- [5] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens), Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.01, 1988
- [6] Burachat, C., & Permphon, S. (2012). A study of properties of mortar Portland cement mixed with ground rice husk ash and limestone powder. Department of civil engineering, 35, 1-18.
- [7] วิจิตต์อัจฉรา สรรพกิจจำนง, ณรงค์ชัย จันดาวงษ์, บุญเลิศ พัดฉวี และสงหวัง โมณรินทร์ (2545). การก่อสร้างและประเมินความแข็งแรงของผิวถนนคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ด้วยวิธีบดอัด, 4-16.
- [8] วิจิตต์อัจฉรา สรรพกิจจำนง, ธนศักดิ์ ไร่กระโทก และบุญเลิศ พัดฉวี (2536). เถ้าลอยในงานทาง, 3-12.
- [9] วิจิตต์อัจฉรา สรรพกิจจำนง และบุญเลิศ พัดฉวี (2545). คอนกรีตแข็งตัวเร็วสำหรับงานบำรุงเร่งด่วน, 4-15.
- [10] Sghaier, B., Chaabouni, Y., Msahli, S., & Sakli, F. (2012). Morphological and crystalline characterization of NaOH and NaOCl treated agave americana L. fiber. *Industrial crops and products*, 36, 57-66.
- [11] Ozerkan, N., Ahsan, B., Mansour, S., & Lyengar, S. (2013). Mechanical performance and durability of treated palm fiber reinforced mortars. *sustainable built environment*, 31-42.
- [12] Li, X., Tabil, L., & Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: *Polymers and the Environment*, 25, 25-33.
- [13] Maria, C., Elena, B., & Florin, C. (2009). In-situ cellulose fibers loading with calcium carbonate precipitated by different methods. *cellulose chemistry and technology*, 39, 79-87.
- [14] Shafiqh, P., Johnson, A. U., Mahmud, H. B., & Jumaat, M. (2013). Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash. *Materials & Design*, 49, 13-21.
- [15] Aggarwal, L. K. (1994). Bagasse-reinforced cement composites. *Cement and concrete composites*. 7-12.
- [16] Tong, Y., Zhao, S., Ma, J., Wang, L., Zhang, Y., Gao, Y., et al. (2014). Improving cracking and drying shrinkage properties of cement mortar by adding chemically treated luffa fibres. *Construction and Building Materials*. 71, 27-33.

- [17] Behrouz, B., Pang, J. L., Hamid, R. R., (2015). Plastic hinge relocation in reinforced concrete frames as a method of improving post-earthquake fire resistance. Structures 2, 21–31.
- [18] Conshohocken, W. (1996). Standard practice for developing accelerated tests to aid prediction of the service life of building components and materials.
- [19] Bentchikou, M., Guidoum, A., Scrivener, K., Silhadi, K., & Hanini, S. (2012). Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. Construction and building materials. 34, 1-6.
- [20] Asasutjarit, C., Hirunlabh, J., Khedari, J., Charoenvai, S., Zeghmami, B., & Shin, C. (2007). Development of coconut coir-based lightweight cement board. Construction and building materials. 77-88.
- [21] Chakraborty, S., Kundu, S. P., Roy, A., Basak, R. K., Adhikari, B., & Majumder, S. (2013). Improvement of the mechanical properties of jute fibre reinforced cement mortar: A statistical approach. Construction and building materials. 38, 76-84.
- [22] อธิติ ศรีจันทร์, บุรฉัตร ฉัตรวิระ, และพงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์ (2554). การศึกษาผลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ชนิดของปูนซีเมนต์และวัสดุประสานร่วมต่างกัน, 83-94.
- [23] กฤษฎา โรจน์ประสิทธิ์พร, สุภัทรชัย สูดกล้า, และอรวิรินทร์ บริรักษ์อรวิรินทร์ (2546). คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมเส้นใยไมโครไฟเบอร์ 1-5.

## 8 ประวัติและผลงานวิจัยที่สำคัญของนักวิจัย

ชื่อ - สกุล นายภัทร์ สุขแสน

วัน เดือน ปีเกิด 20 พฤศจิกายน 2522

เลขประจำตัวประชาชน 3539900254244

ตำแหน่งทางวิชาการปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

e-mail: sooksaen\_p@su.ac.th

### ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี Materials Science and Engineering, University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST) ปีที่จบ พ.ศ. 2545 (2002)

ปริญญาเอกสาขา Materials Engineering, University of Sheffield ปีที่จบ พ.ศ. 2550 (2007)

### สาขาวิชาที่มีความชำนาญ

Industrial Research: Waste management, green materials, refractory, value added industrial wastes, construction materials

Basic Research: Powder technology, biomaterials, sol-gel technology, glass science, advanced and traditional ceramics, nanomaterials

### ผลงานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว: ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ (3 ปีย้อนหลัง)

1. Kantawong, F., Tanum, J., Wattanutchariya, W. and Sooksaen, P. (2016) "Variation of Hydroxyapatite Content in Soft Gelatin Affects Mesenchymal Stem Cell Differentiation", Brazilian Archives of Biology and Technology, 59: 9 pages.
2. Sooksaen, P. and Puathawee, P. (2016) "Conversion of Aluminum Dross Residue into Value-added Ceramics", Key Engineering Materials, 690 :71-75.
3. Tanum, J., Udomsom, S., Wattanutchariya, W., Sooksaen, P. and Kantawong, F. (2016). "Characterization of Gelatin Composite with Low Content Hydroxyapatite and the Influence on Mesenchymal Stem Cell Culture" Key Engineering Materials, 675: 473-476.
4. Sooksaen, P. Pengsuwan, N. Karawatthanaworrakul S. and Pianpraditkul, S. (2015). "Formation of Porous Apatite Layer during In Vitro Study of Hydroxyapatite-AW Based Glass Composites" Advances in Condensed Matter Physics, 2015 (June): Article ID:158582, 9 pages.
5. Sooksaen P. and Karawatthanaworrakul, S. (2015). "The properties of Southern Thailand clay-based porous ceramics fabricated from different pore size templates" Applied Clay Science, 104: 295-302.
6. Sooksaen, P., Janmat, P., Thovasakul, W. and Chulasinont, O. (2015). "Low cost synthesis of hydrophobic aluminium alloy for self-cleaning applications" Key Engineering Materials, 659: 565-569.

7. Sooksaen, P., Keawpimol, A., Deeniam, P. and Boonkum, P. (2015). "Surface modification of zinc oxide nanoparticles using polyethylene glycol under microwave radiation" Key Engineering Materials, 659: 609-614.
8. Sooksaen, P. (2015). "Morphology and phase composition of sol-gel derived aluminum borate nanowhiskers" Key Engineering Materials, 659: 121-126.
9. Sooksaen, P., Rapp, M., Sirinakorn, T., Meepanya, P. and Leangthammarat, P. (2014). "Morphology controlled flower-like ZnO particles synthesized by low cost high pressure cooker" Key Engineering Materials, 608: 159-163.
10. Sooksaen, P., Rapp, M. and Potharin, K. (2014). "Microwave assisted method on the morphology of aluminium doped ZnO nanocrystals" Key Engineering Materials, 608: 153-158.
11. Chomsirigul, N., Khuanthong, O., Sooksaen, P. and Chuankrerkkul, N. (2014). "Influence of Specimen Dimensions and Temperature on the Debinding Behavior of Alumina Feedstock" Key Engineering Materials, 608: 170-174.
12. Sooksaen, P., Utama, N., Pratooyai, J., Chinsatit, P. and Chuankrerkkul, N. (2014). "Microstructure and Dielectric Properties of Alumina Addition on TiO<sub>2</sub>-doped Barium Titanate Ceramics" Ferroelectrics, 458(1), (January): 118-121.
13. Sooksaen, P., Yongvanich, N., Penglao, W., Jeentong, R. and Worapakapakorn, B. (2013). "High Content of Niobium on the Properties of Barium Titanate Ceramics" Ferroelectrics, 452(1), (January): 22-26.
14. Chuankrerkkul, N., Sooksaen, P., Pakunthod, P., Kosalwit, T. and Pinthong, W. (2013). "Powder Injection Moulding of Alumina Using PEG/PVB Binder Systems" Key Engineering Materials, 545: 173-176.

### **การจดหรือยื่นจดสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร**

1. เรื่อง "องค์ประกอบสูตรดินผสมสำหรับการผลิตเซรามิกแบบการอัดรีดขึ้นรูปโดยใช้เถ้าลอยอะลูมินัมเป็นส่วนผสมหลัก" อนุสิทธิบัตรเลขที่ 9916 วันที่ออก 26 พฤษภาคม 2558
2. เรื่อง "องค์ประกอบสูตรเซรามิกมวลเบาจากเถ้าลอยอะลูมินัมที่ขึ้นรูปโดยการอัดด้วยแรงดันสูง" อนุสิทธิบัตรเลขที่ 10729 วันที่ออก 26 พฤษภาคม 2558
3. เรื่อง "องค์ประกอบของสูตรเซรามิกกรุพูนและกรรมวิธีการผลิตจากเถ้าลอยจากอุตสาหกรรมหลอมหล่อโลหะอะลูมินัม" ยื่นจดสิทธิบัตร (เลขที่คำขอ 1301004443) รอออกเลขที่สิทธิบัตร
4. เรื่อง "องค์ประกอบสูตรสารปรับปรุงคุณภาพดินที่มีเถ้าลอยอะลูมินัมเป็นส่วนผสมหลัก" ยื่นจดอนุสิทธิบัตร (เลขที่คำขอ 1803002491)

# ภาคผนวก ก

บทความวิจัยระดับนานาชาติ เรื่อง Fabrication of Lightweight Concrete Composites Using Natural Fibers  
in Thailand, Key Engineering Materials Vol. 765, pp 305-308

# ภาคผนวก ข

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2601-2556

คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

ตารางที่ ข-1 ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งเฉลี่ย (kg/m <sup>3</sup> )
C6	501-600
C7	601-700
C8	701-800
C9	801-900
C10	901-1000
C12	1001-1200
C14	1201-1400
C16	1401-1600

ตารางที่ ข-2 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

ชนิด	ความต้านแรงอัดไม่น้อยกว่า MPa (kg/cm <sup>3</sup> )
C6	
C7	
C8	2.0 (20.4)
C9	
C10	2.5 (25.5)
C12	
C14	
C16	5.0 (51.0)

ตารางที่ ข-3 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

ชนิด	อัตราการดูดซึมน้ำไม่มากกว่าเปอร์เซ็นต์โดยมวล
C6	
C7	25
C8	
C9	
C10	23
C12	
C14	20
C16	

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2226-2548

แผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูป

ตารางที่ ข-4 ค่าความต้านแรงอัด

แท่งคอนกรีต	ความต้านแรงอัด (MPa)	
	แต่ละก้อน ไม่น้อยกว่า	เฉลี่ย ไม่น้อยกว่า
รูปลูกบาศก์	16	21
รูปทรงกระบอก	12	16