

คุณสมบัติของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ จากเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์มเพื่อผลิตวัสดุก่อสร้าง

Properties of Natural Fiber Cement Materials Containing Coconut Coir and Oil Palm Fibers for Manufacture of Building Materials

ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และ อัญชิสา สันติจิตโต

Pusit Lertwattanaruk and Anchisa Suntijitto

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12121

Faculty of Architecture and Planning, Thammasat University, Pathumthani, 12121, Thailand

E-mail: lertwatt@tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์เส้นใยหรือไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติสำหรับพื้นที่ในเขตร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย โดยเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ อันได้แก่ ใยมะพร้าว และกากเยื่อปาล์ม ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตรภายในประเทศ และมีวัตถุประสงค์หลักในการใช้งานเป็นกระเบื้องหลังคาแผ่นเรียบและแผ่นผนัง เพื่อใช้ในการลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร และลดการใช้พลังงานสำหรับระบบปรับอากาศในอาคาร โดยมุ่งเน้นการศึกษาอิทธิพลของเส้นใยธรรมชาติที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM และ JIS ผลจากการวิจัย พบว่า การใช้เส้นใยธรรมชาติทั้งสองประเภทในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักซีเมนต์ในสัดส่วนผสม ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลตามมาตรฐานกำหนด และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมถึงร้อยละ 66 ซึ่งมีผลต่อการประหยัดพลังงานสำหรับระบบปรับอากาศในอาคารพักอาศัย

Abstract

This article presents an investigation of the properties of cellulose fiber cement products, applicable for a hot-humid climate such as Thailand's. These materials were made of cement paste containing coconut coir fibers and oil palm residues, both waste products from agricultural manufacturing in Thailand. They are intended to be used as roof sheet and siding materials to reduce heat transfer through buildings and energy conservation. The investigation focused mainly on the effects of both cellulose fibers on the physical, mechanical and thermal properties of products, as determined in accordance with the ASTM and JIS standards. From the results, the mixtures of fiber cement products containing 5% of both cellulose fibers by weight of Portland cement yielded optimal physical and mechanical properties. Furthermore, the thermal conductivity of the fiber cement pastes was 66% less than that of the control specimens, resulting in reduced energy consumption for air conditioning in residential buildings.

Keywords

ซีเมนต์เส้นใย หรือ ไฟเบอร์ซีเมนต์ (Fiber Cement)

คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties)

ใยมะพร้าว (Coconut Coir Fiber)

กากเยื่อปาล์ม (Oil Palm Residue)

1. ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

กระเบื้องมุงหลังคาเป็นวัสดุสำคัญในการก่อสร้างอาคารพักอาศัย โดยปัจจุบันกระเบื้องมุงหลังคาของประเทศไทยมีหลายประเภทตามวัสดุที่ใช้ผลิตขึ้น ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ประเภทของกระเบื้องมุงหลังคาที่ตรงกับการใช้งานและราคาที่เหมาะสมได้ สำหรับกลุ่มผู้ใช้งานที่มีรายได้น้อยถึงระดับปานกลางในปัจจุบันจะเลือกใช้กระเบื้องซีเมนต์มุงหลังคาถึงร้อยละ 60 และในจำนวนนั้นยังคงเลือกใช้กระเบื้องซีเมนต์ใยหินมุงหลังคาถึงร้อยละ 75 (Thai Green Label Board of Committee, 2008) เนื่องจากกระเบื้องซีเมนต์ใยหินมุงหลังคามีราคาประมาณ 140-180 บาท ต่อตารางเมตร (Bureau of Trade and Economic Indices, 2011) ซึ่งเป็นราคาที่เหมาะสมกับผู้ที่มีรายได้น้อยถึงระดับปานกลาง อีกทั้งคุณสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่มีคุณภาพดี มีความทนต่อไฟ มีความแข็งแรง และมีความยืดหยุ่นในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามกระเบื้องหลังคาประเภทนี้ยังคงมีสารพิษเป็นส่วนผสมซึ่งเมื่อผ่านเข้าสู่ร่างกายทางระบบหายใจเป็นระยะเวลานาน จะทำให้เกิดอาการป่วยได้ โดยโรคที่เกิดจากแร่ใยหินได้แก่ โรคแอสเบสโตซิส (Asbestosis) หรือโรคปอดเรื้อรัง โรคเนื้องอกหรือมะเร็งบริเวณเยื่อหุ้มปอด โรคมะเร็งปอด และโรคมะเร็งบริเวณอื่น ๆ ของร่างกาย (Thai Industrial Standards Institute, 2008) จึงมีการผลิตกระเบื้องมุงหลังคาประเภทอื่นออกมาทดแทนมากขึ้น ได้แก่ กระเบื้องคอนกรีต กระเบื้องเซรามิก และกระเบื้องซีเมนต์เส้นใย เป็นต้น ซึ่งมีระดับราคาและคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป

ในด้านการวิจัย มีการศึกษาเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เส้นใยธรรมชาติเป็นจำนวนมาก ทั้งการผลิตเป็นฉนวนกันความร้อน ผนัง ผ้า และกระเบื้องหลังคา เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีศักยภาพในการนำมาพัฒนาต่อให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานได้ดี ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสภาพแวดล้อม และมีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ซึ่งผลิตภัณฑ์เส้นใยธรรมชาติในแต่ละประเทศจะเลือกเส้นใยที่มีในภูมิภาคของตนที่มีลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศ และวัตถุประสงค์ของงานวิจัยโดยส่วนใหญ่มุ่งไปในการพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ มีเพียงส่วนน้อยที่มุ่งไปในการพัฒนาคุณสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการพัฒนาคุณสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เส้นใยธรรมชาติ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนของวัสดุ ซึ่งจะเป็นผลให้สามารถ

ลดปริมาณความร้อนที่จะเข้าสู่ตัวอาคารพักอาศัย และช่วยประหยัดพลังงานในการปรับอากาศในอาคารพักอาศัย ประกอบกับสถานการณ์ของตลาดที่อยู่อาศัยสำหรับผู้มีรายได้น้อยถึงระดับปานกลางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลช่วงปี 2553-2554 มีแนวโน้มเติบโตขึ้น โดยเฉพาะโครงการบ้านเดี่ยว และทาวน์เฮ้าส์ ในระดับราคาประมาณ 2 ถึง 4 ล้านบาท (Pornchokchai, 2009; TRIS Rating Co., Ltd., 2011) อาคารพักอาศัยเหล่านี้ ส่วนใหญ่ใช้เครื่องปรับอากาศในการปรับสภาวะอากาศภายในอาคารเพื่อให้มีระดับอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมในขอบเขตสภาวะน่าสบายในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย แต่อาคารส่วนใหญ่ยังขาดการคำนึงถึงการออกแบบทางสถาปัตยกรรม และการเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคารที่เหมาะสม ซึ่งมีผลกระทบที่ตามมาคือ การใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อรับภาระของระบบปรับอากาศ อันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เส้นใย หรือไฟเบอร์ซีเมนต์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นกระเบื้องหลังคาและแผ่นผนัง ซึ่งเป็นวัสดุทางเลือกที่คาดว่าจะเป็นที่นิยมในตลาดของประเทศไทยซึ่งอยู่ในภูมิภาคร้อนชื้นเนื่องจากใช้ต้นทุนการผลิตไม่สูงมาก และไม่ก่อสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ปัจจุบันในตลาดวัสดุก่อสร้าง มีการจำหน่ายกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยที่มีการใช้เส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์เป็นส่วนผสม ซึ่งมีคุณสมบัติไม่ด้อยไปกว่ากระเบื้องมุงหลังคาประเภทอื่น ดังเช่น มีเนื้อวัสดุที่เหนียวกว่า สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่ากระเบื้องซีเมนต์ใยหิน และมีความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีกว่า ส่วนกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยที่มีการผสมเส้นใยธรรมชาติเพียงอย่างเดียวนั้น ยังไม่เป็นที่นิยมในการผลิต ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความเหมาะสมในด้านคุณภาพและปริมาณของเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยของกาบมะพร้าว และกากเยื่อไผ่ปาล์ม ในการผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อผลิตแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ ซึ่งมีต้นทุนในการผลิตต่ำ และเป็นการใช้วัสดุธรรมชาติทดแทนวัสดุสังเคราะห์เพื่อลดการใช้พลังงานและทรัพยากรในกระบวนการผลิต

1.1 เส้นใยมะพร้าว

มะพร้าวนับเป็นพืชเศรษฐกิจที่พบมากในประเทศไทย เนื่องจากเป็นประเทศที่อยู่ในเขตร้อนชื้น ซึ่งพบมากในบริเวณจังหวัดริมชายฝั่งทะเล เส้นใยมะพร้าวจะถูกแกะออกมาจากด้านในของเปลือกมะพร้าว ซึ่งสามารถแกะออก

มาได้ด้วยมือ หรือใช้เครื่องช่วยแกะ และเป็นเส้นใยที่มี การนำมาผสมใช้เป็นวัสดุก่อสร้างมากที่สุด เนื่องจากเป็น วัสดุธรรมชาติที่ไม่มีสารพิษ มีปริมาณมาก ราคาต่ำ และ สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ซึ่งส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ ที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เหมาะสม (Assasutjarit, et al., 2005) แต่ยังมีเส้นใยมะพร้าวบางส่วนถูกนำไปทิ้งเป็นขยะ หรือ ถูกเผาทิ้ง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อม

เส้นใยมะพร้าวแบ่งเป็น 2 ประเภท โดยเส้นใยจาก ลูกมะพร้าวสีน้ำตาล ซึ่งเป็นลูกมะพร้าวที่เติบโตเต็มที่ หาก นำไปล้างผ่านน้ำประมาณ 10 ครั้ง เส้นใยที่ได้จะมีสีขาวกว่า และผิวเส้นใยที่ละเอียดกว่าเส้นใยที่ได้จากลูกมะพร้าว สีเขียวที่ยังเจริญไม่เต็มที่ เส้นใยมะพร้าวทั่วไปมีความยาว ประมาณ 350 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.12– 0.25 มิลลิเมตร ความหนาแน่นเส้นใยเท่ากับ 1,250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรง และรับแรงดึงได้ดี เนื่องจากมีลักษณะในองค์ประกอบเป็น ปริมาณมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยพืชชนิดอื่น นอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติในการต้านทานปฏิกิริยาจาก จุลินทรีย์ และการกัดกร่อนจากน้ำเค็มได้ดี (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2009)

1.2 กากเยื่อใยปาล์ม

ปัจจุบันประเทศไทยมีแหล่งเพาะปลูกปาล์มน้ำมัน ที่สำคัญอยู่ในจังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร และจังหวัด อื่น ๆ เป็นจำนวนประมาณ 2,031,242 ไร่ ทำให้สามารถ ผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้ประมาณปีละ 700,000–800,000 ตัน และมีแนวโน้มความต้องการน้ำมันปาล์มดิบเพิ่มขึ้น อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากราคาไม่สูง ส่งผลให้อุตสาหกรรม น้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วย ซึ่งกรรมวิธีและ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์ม เริ่มจากการคัดแยกทะลาย ปาล์มตามคุณภาพ หลังจากผ่านกระบวนการสกัดเป็น น้ำมันปาล์ม จะเหลือกากเยื่อใยปาล์ม คิดเป็นร้อยละ 12 ของช่อปาล์มน้ำมัน ซึ่งจะถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น เช่น ผลิตเป็นเส้นใย หรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น (Chuanraktam, 2005) ปาล์มมีหลายชนิด ได้แก่ Date Palm (อินทผลัม) Oil Palm (ปาล์มน้ำมัน) และ Raphia Palm แต่ชนิดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ได้แก่ Oil Palm หรือปาล์มน้ำมัน เนื่องจากมีปริมาณ ในการเจริญเติบโตภายในประเทศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ลักษณะของกากเยื่อใยปาล์มน้ำมัน มีความยาวประมาณ

20–100 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2–0.8 มิลลิเมตร ความหนาแน่นเส้นใยเท่ากับ 1300–1450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีคุณสมบัติเชิงกลด้อยกว่า เส้นใยมะพร้าวไม่มากนัก เส้นใยปาล์มมีผนังของเซลล์ที่ หุ้มเส้นใยค่อนข้างหนา ทำให้เกิดปฏิกิริยากับส่วนผสมอื่น ได้ยาก (Ilvessalo-Pfäffli, 1995) จึงต้องมีการเตรียมเส้นใย ก่อนการผสมในวัสดุอื่น เช่น การล้างน้ำ การต้ม การแช่ใน สารเคมีพิเศษ เป็นต้น

1.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพลังงานการปรับอากาศของ อาคารพักอาศัย

รูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารพักอาศัย สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การใช้พลังงานไฟฟ้า โดยระบบปรับอากาศ (Air-Condition System) การใช้ พลังงานไฟฟ้าในเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ และการใช้ พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้เกิดแสงสว่าง (Artificial Lighting) เรียงตามลำดับการใช้พลังงานภายในอาคารจากมากไป น้อย (Mingvimol, 1997) โดยจะเห็นว่าการใช้พลังงาน ไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดที่ต้อง คำนึงถึง เนื่องจากมีอิทธิพลมากที่สุดต่อการใช้พลังงาน ไฟฟ้าโดยรวมภายในอาคารพักอาศัย ทั้งนี้ องค์ประกอบ ของอาคารพักอาศัยที่มีอิทธิพลต่อภาระการใช้พลังงาน ในการปรับอากาศมากที่สุดนั้น คือ อิทธิพลจากสภาวะ แวดล้อมภายนอกอาคาร ซึ่งรวมไปถึงความร้อนที่ผ่าน เข้าสู่หลังคาอาคาร ซึ่งตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงพลังงาน ที่ใช้การปรับอากาศของอาคารพักอาศัยจำแนกตามแหล่ง ที่มาของความร้อน

2. วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อศึกษาและ พัฒนาคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์เส้นใยหรือไฟเบอร์ซีเมนต์ สำหรับประยุกต์ใช้ในการผลิตกระเบื้องมุงหลังคาและแผ่น ผนัง เส้นใยที่ทำการศึกษาคือเส้นใยธรรมชาติที่มีปริมาณ มากในประเทศไทย ได้แก่ เส้นใยกาบมะพร้าว และเส้นใย จากกากเยื่อใยปาล์ม โดยมีการพิจารณาสัดส่วนผสมของ วัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ โดยเน้นการพัฒนาคุณสมบัติทางความร้อนให้ดีขึ้นเพื่อ ช่วยในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่จะเข้าสู่ภายในอาคาร อันส่งผลต่อการใช้พลังงานในการปรับอากาศ

ตารางที่ 1 ภาวะการปรับอากาศของอาคารพักอาศัยจำแนกตามแหล่งที่มาของความร้อน

ประเภทบ้าน	ผนังทึบ (%)	กระจก (%)	หลังคา (%)	พื้น (%)	การรั่วซึมของอากาศ (%)	อุปกรณ์ไฟฟ้า (%)	แสงสว่าง (%)	ผู้ใช้งาน (%)
บ้านขนาดเล็ก	18.9	12.5	24.0	9.5	24.3	5.0	4.0	1.5
บ้านขนาดกลาง	25.4	11.1	29.7	5.8	18.4	4.7	3.8	0.8
บ้านขนาดใหญ่	18.5	13.9	26.6	12.3	16.4	6.1	4.9	0.9
บ้านทั่วไป (เฉลี่ย)	21.2	12.4	26.8	8.9	19.9	5.2	4.2	1.1
ทาวน์เฮ้าส์ทั่วไป (เฉลี่ย)	20.4	10.9	29.3	4.4	14.4	3.0	1.7	6.2

ที่มา: Krapoochai, 2003; Chiewnantawong, 2004

2.1 การเตรียมวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาและพัฒนาวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำประปา และเส้นใยธรรมชาติ 2 ประเภท ได้แก่ เส้นใยมะพร้าว และเส้นใยปาล์ม ขนาดความยาว 5–10 มิลลิเมตร ซึ่งได้ล้างด้วยน้ำประปาจนกระทั่งมีค่า pH เท่ากับ 7 โดยประมาณ และผ่านการต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และอบให้แห้งเพื่อปรับสภาพผิวของเส้นใย โดยมีการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใย และทำการผสมซีเมนต์เพสต์ตามสัดส่วนผสมดังในตารางที่ 2 โดยเริ่มจากการนำปูนซีเมนต์มาผสมกับน้ำในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.3 ซึ่งเหมาะสมกับวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ในการผลิตกระเบื้องหลังคาแผ่นเรียบ (Cook, Pama & Weerasingle, 1978) จากนั้นจึงนำเส้นใยธรรมชาติมาผสมในปริมาณตามสัดส่วนของเส้นใยแต่ละประเภทในอัตราร้อยละ 5 10 และ

15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ แล้วจึงนำซีเมนต์เพสต์ไปขึ้นรูปในแบบตามขนาดสำหรับการทดสอบต่าง ๆ

2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C20-00 (ASTM, 2006a) เพื่อพิจารณาสัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ คุณสมบัติทางกายภาพที่ศึกษา ได้แก่ ความพรุน (Apparent Porosity) ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) และความหนาแน่น (Bulk Density) ของซีเมนต์เพสต์ ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการผสมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ แล้วนำไปขึ้นรูปตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละสัดส่วนผสม และทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงถอดแบบและ

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ (วัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์)

สัดส่วนผสม	อัตราส่วนของเส้นใย (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (กรัม)	น้ำ (กรัม)	น้ำหนักเส้นใย (กรัม)
OPC	0	1,000	300	0
C5	5	1,000	300	50
C10	10	1,000	300	100
C15	15	1,000	300	150
P5	5	1,000	300	50
P10	10	1,000	300	100
P15	15	1,000	300	150

หมายเหตุ OPC หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ควบคุม
Cx หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่มีการผสมเส้นใยจากมะพร้าว
Px หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่มีการผสมเส้นใยปาล์ม
x หมายถึง อัตราส่วนการผสมเส้นใยโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

นำไปชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นจึงนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดเข้าตูบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักแห้ง (Dry Weight, D) ต่อจากนั้นแช่ก้อนตัวอย่างทั้งหมดในน้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักในน้ำ (Suspended Weight, S) จากนั้นใช้ผ้าแห้งซับน้ำและทำการชั่งน้ำหนักแบบหมด (Saturated Weight, W) หลังจากนั้นนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ทั้งหมดบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงนำก้อนตัวอย่างไปทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM, 2006b) ต่อไป

2.3 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ

การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยมะพร้าว และเส้นใยปาล์มในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เป็นไปตามมาตรฐาน JIS R 2618 (JIS, 1992) ซึ่งใช้ตัวอย่างซีเมนต์ ขนาด $5 \times 5 \times 2.5$ เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละสัดส่วนผสม เพื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของตัวอย่างแต่ละสัดส่วนผสม

2.4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ตามมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM, 2006b) เพื่อพิจารณาสัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่เหมาะสม โดยใช้ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละสัดส่วนผสมเพื่อทำการทดสอบและหาค่าเฉลี่ยของค่ากำลังรับแรงอัด

2. การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C1185-03 (ASTM, 2006c) และ ASTM C1186-02 (ASTM, 2006d) เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ตามเกณฑ์มาตรฐานสากลและสามารถใช้งานได้ การขึ้นรูปตัวอย่างแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์เริ่มจากการผสมซีเมนต์เพสต์ที่มีเส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนผสมในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักปูนของซีเมนต์ แล้วนำส่วนผสมเทใส่แบบหล่อขนาด

$30 \times 15 \times 0.5$ เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละสัดส่วนผสม เพื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดัดในสภาวะสมดุล (Equilibrium Condition) ซึ่งแผ่นตัวอย่างได้ผ่านการบ่มในอากาศเป็นเวลาอย่างต่ำ 7 วัน ในสภาพอุณหภูมิอากาศ 23 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 และการทดสอบในสภาวะบ่มชื้น (Wet Condition) ซึ่งแผ่นตัวอย่างได้ผ่านการบ่มในน้ำเป็นเวลาอย่างต่ำ 48 ชั่วโมง โดยมีอุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 23 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบตัวอย่างแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ทันทีที่นำออกจากน้ำ

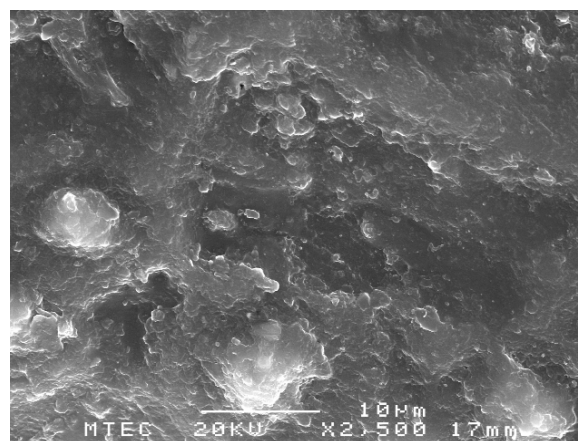
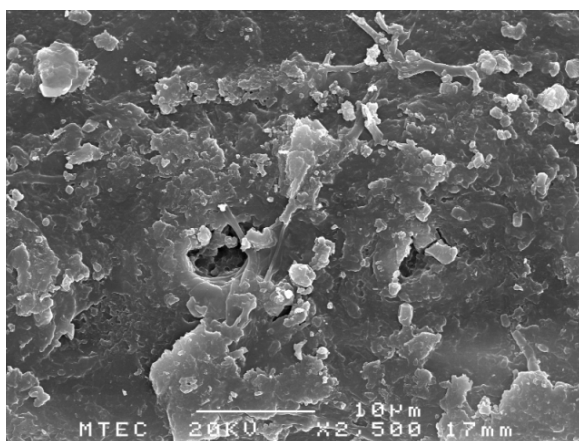
3. ผลการศึกษา

3.1 องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางสัญญาณวิทยาของเส้นใยธรรมชาติ

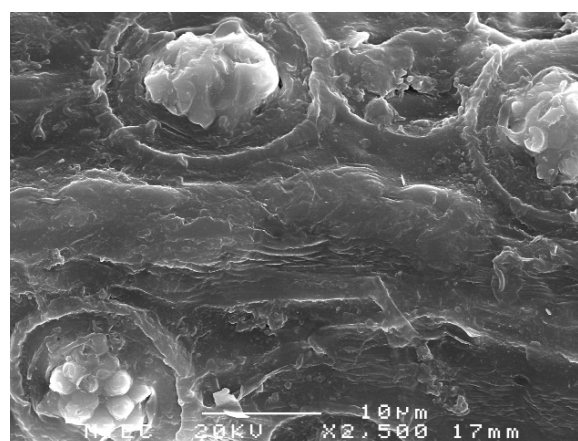
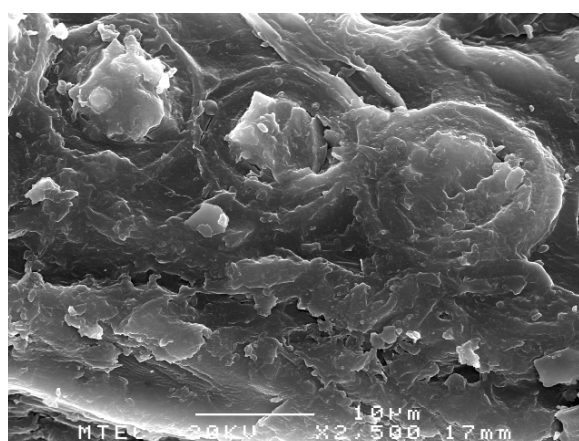
คุณสมบัติด้านองค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) ของเส้นใยธรรมชาติมีความแตกต่างกันตามวิธีการเพาะปลูก และสภาพแวดล้อม เช่น ดิน น้ำ อากาศ และสารเคมีที่ใช้ (Lewin & Goldstein, 1991) ตารางที่ 3 แสดงผลการศึกษารายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว และเส้นใยปาล์มทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ การปรับสภาพของเส้นใยโดยการล้างด้วยน้ำประปาจนกระทั่งมีค่า pH เท่ากับ 7 และต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และอบให้แห้ง มีผลในการปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยทั้งสองชนิด (Asasutjarit et al., 2009) โดยพบว่า ปริมาณเถ้า การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน การละลายในน้ำร้อน และการละลายในสารละลาย 1% NaOH มีปริมาณลดลง โดยเฉพาะการลดลงของปริมาณสิ่งเจือปน เช่น เถ้า ส่งผลให้เส้นใยมีความคงตัว แข็งแรงและน้ำหนักเบาขึ้น (Sun et al., 2004) นอกจากนี้ สารประกอบหลัก ได้แก่ ลิกนิน โอลิโกเซลลูโลส อัลฟาเซลลูโลส และเพนโตซาน ก็มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยลิกนินมีปริมาณเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่ต่ำกว่าเซลลูโลส เนื่องจากลิกนินไม่ทนทานต่อความร้อนและสารเคมี โดยจะสลายตัวที่อุณหภูมิ $100-120^{\circ}\text{C}$ (Yang et al., 2007) และเซลลูโลสมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ มีความทนทานและคงรูปได้ดีกว่าสารประกอบอื่น (Bousri, 2001) ซึ่งสารเหล่านี้ทำหน้าที่ในการเชื่อมเส้นใยเข้าด้วยกันระหว่างผนังเซลล์ชั้นนอก โดยเฉพาะเซลลูโลสนั้นเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ส่งผลให้เส้นใยมีคุณสมบัติความแข็งแรงและความสามารถในการดูดซับเสียง (Rangsiraksa, 2008)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์ม

องค์ประกอบทางเคมี	เส้นใยก่อนการปรับสภาพ		เส้นใยหลังการปรับสภาพ	
	เส้นใยมะพร้าว (%)	เส้นใยปาล์ม (%)	เส้นใยมะพร้าว (%)	เส้นใยปาล์ม (%)
ปริมาณเถ้า	2.65	6.99	0.80	4.53
การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน	9.32	11.1	1.76	6.89
การละลายในน้ำร้อน	9.34	8.21	0.76	2.43
การละลายในสารละลาย 1% NaOH	38.5	44.2	26.3	26.3
ลิกนิน (Lignin)	29.8	24.5	32.2	32.4
ไฮโลเซลลูโลส (Holoellulose)	56.8	47.7	70.9	63.8
อัลฟาเซลลูโลส (Alpha-cellulose)	34.9	32.6	53.9	52.1
เพนโตซาน (Pentosan)	14.4	16.5	15.14	20.9



(ก) เส้นใยมะพร้าว ก่อนและหลังการปรับสภาพ (กำลังขยาย x 2,500)



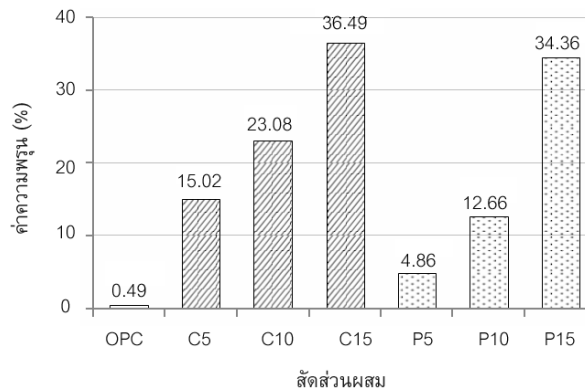
(ข) เส้นใยปาล์ม ก่อนและหลังการปรับสภาพ (กำลังขยาย x 2,500)

รูปที่ 1 ภาพถ่ายระดับจุลภาค (SEM micrograph) ของเส้นใยธรรมชาติ

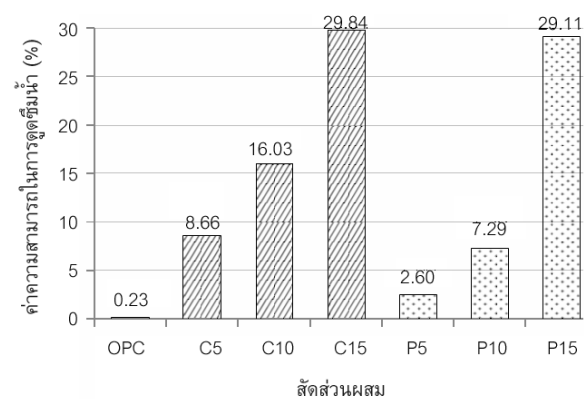
จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน หรือ scanning electron microscope (SEM) รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายระดับจุลภาค (micrograph) ของเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์ม ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพเส้นใย ผลการศึกษาในรูปที่ 1 (ก) และ (ข) พบว่า เส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์มก่อนการปรับสภาพ มีลักษณะผิวขรุขระและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสิ่งเจือปนต่าง ๆ บนอนุภาคของเส้นใย และหลังผ่านการปรับสภาพด้วยการล้างและต้ม สิ่งเจือปนต่าง ๆ บนเส้นใยจึงมีปริมาณลดลง เส้นใยทั้งสองจึงมีลักษณะผิวเรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในอนุภาคเพิ่มมากขึ้น และมีความหนาแน่นลดลง (Asasutjarit et al., 2009) โดยเส้นใยมะพร้าวมีลักษณะพื้นผิวเรียบและสม่ำเสมอมากกว่าเส้นใยปาล์มอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เส้นใยมะพร้าวมีสิ่งเจือปนเช่น เถ้า ในปริมาณที่ต่ำกว่าเส้นใยปาล์ม และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของเส้นใยก่อนและหลังการปรับสภาพ พบว่า การล้างและการต้มเป็นการกำจัดสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำบางส่วนออกจากเส้นใย และนำไปสู่การเพิ่มปริมาณช่องว่างและพื้นที่ผิวของอนุภาค และเพิ่มความสามารถในการดูดซับความชื้น ซึ่งส่งผลให้สารประกอบทางเคมีและปูนซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างซีเมนต์เพสต์และเส้นใย (Delvasto et al., 2010)

3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ

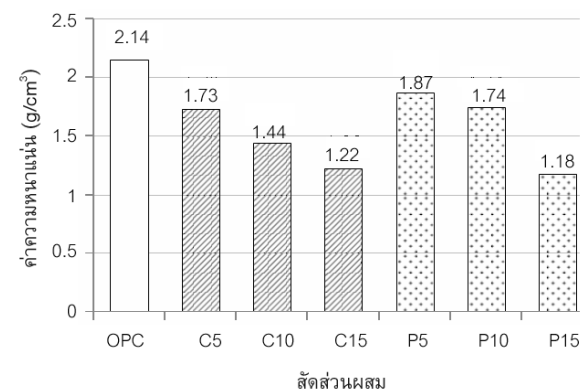
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์ ได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 ถึง 4 ผลจากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด มีค่าความพรุน (apparent porosity) และความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption) เพิ่มมากขึ้น และมีค่าความหนาแน่น (bulk density) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่ไม่มีเส้นใย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ ส่งผลให้ปริมาณรูพรุน และความพรุนของซีเมนต์เพสต์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ลดลง และความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของงานวิจัยอื่น (Cook, Pama & Weerasingle, 1978; Khedari et al., 2001; Asasutjarit et al., 2009) การเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยทั้ง 2 ชนิด พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยปาล์มมีค่า



รูปที่ 2 ค่าความพรุน (Apparent Porosity)



รูปที่ 3 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ

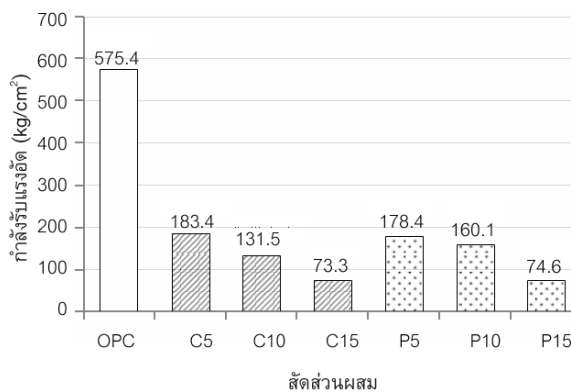


รูปที่ 4 ค่าความหนาแน่น (Bulk Density)

ความพรุน และความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยมะพร้าว ในขณะที่ความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยปาล์มมีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยมะพร้าว อันเนื่องมาจากเส้นใยปาล์มมีค่าความหนาแน่นมากกว่าเส้นใยมะพร้าว จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยปาล์มมีค่ามากกว่า ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ เช่นเดียวกัน

3.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างซีเมนต์ผสมตามมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM, 2006b) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5 ผลจากการทดสอบ พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมเส้นใยปาล์มและที่ผสมเส้นใยมะพร้าวมีแนวโน้มลดลง และค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก อันเนื่องมาจากผลของคุณสมบัติทางกายภาพที่มีความแตกต่างกันไม่มาก ค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเส้นใยในสัดส่วนผสม ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัย Khedari et al. (2001) และมีค่าต่ำลงมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 92 เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ผสมปกติ ในขณะที่ซีเมนต์ผสมที่ผสมเส้นใยทั้งสองประเภทมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน คือ 183.4 131.5 และ 73.3 kg/cm² (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) สำหรับเส้นใยมะพร้าว และ 178.4 160.1 และ 74.6 kg/cm² สำหรับเส้นใยปาล์มตามสัดส่วนของเส้นใยในอัตราร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ตามลำดับ

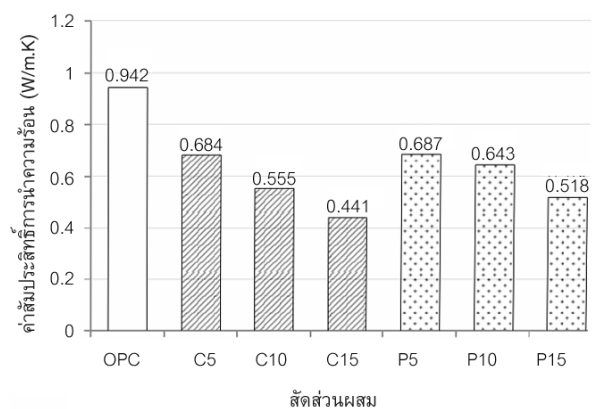


รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสม

3.4 คุณสมบัติทางความร้อนของซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ ดังในรูปที่ 6 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเส้นใยทั้งสองประเภทในสัดส่วนผสม ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะมีค่าลดลง โดยค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำที่สุดมีค่าน้อยกว่าซีเมนต์ผสมปกติถึงร้อยละ 66 และเส้นใยทั้งสองประเภทส่งผล

ต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซีเมนต์ผสมที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.684 0.555 และ 0.441 W/m.K (วัตต์ต่อเมตร-เควิน) สำหรับตัวอย่างที่ผสมเส้นใยมะพร้าว และ 0.687 0.643 และ 0.518 W/m.K สำหรับตัวอย่างที่ผสมเส้นใยปาล์ม ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับคุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์ผสม โดยเฉพาะค่าความหนาแน่นที่แปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และสอดคล้องกับผลจากงานวิจัยอื่น (Khedari et al., 2001; Asasutjarit et al., 2005; Asasutjarit et al., 2009) สำหรับการพัฒนาวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ

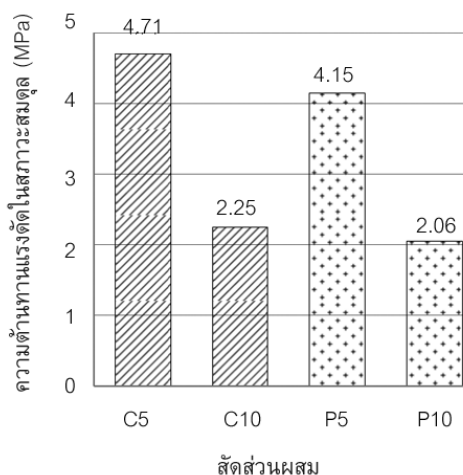


รูปที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซีเมนต์ผสม

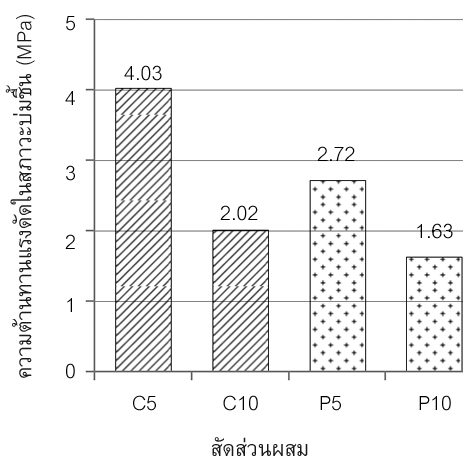
3.5 คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1185-03 (ASTM, 2006c) รูปที่ 7 และ 8 แสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดในสภาวะสมดุลและสภาวะบ่มชื้นของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ ซึ่งมีเส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนผสมในซีเมนต์ผสม ผลจากการศึกษา พบว่า การหล่อตัวอย่างแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ ขนาด 30 x 15 x 0.5 เซนติเมตร สามารถทำการขึ้นรูปได้เพียง 2 สัดส่วนผสม ซึ่งมีปริมาณเส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนผสมในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ประกอบกับผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดัด พบว่า ความต้านทานแรงดัดของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยทั้งสองประเภทในอัตราส่วนร้อยละ 5 มีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานแรงดัดต่ำสุดตามมาตรฐาน ASTM C1186-02 (ASTM, 2006d) ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 4 MPa (เมกะปาสคาล) และมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาจากงานวิจัย

อื่น (Agopyan et al., 2005; Kriker et al., 2005) ซึ่งการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนผสมของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 2 ถึง 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความต้านทานแรงดัดเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดสำหรับแผ่นกระเบื้องหลังคาซึ่งผลิตขึ้นโดยไม่ได้ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยแรงดัน



รูปที่ 7 ค่าความต้านทานแรงดัดในสภาวะสมมูล



รูปที่ 8 ค่าความต้านทานแรงดัดในสภาวะบ่มขึ้น

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติจากเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์มเพื่อประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรมและงานก่อสร้างอาคารสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบอาคาร เช่น แผ่นกระเบื้องหลังคา และแผ่นผนัง

ซึ่งเน้นคุณสมบัติทางกายภาพและการเป็นฉนวนกันความร้อน สัดส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุซีเมนต์เส้นใยหรือไฟเบอร์ซีเมนต์ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.3 และเส้นใยมะพร้าวหรือเส้นใยปาล์มในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และควรมีการปรับสภาพเส้นใยโดยการต้มและอบให้แห้งก่อนทำการผสมกับซีเมนต์เฟส

2. เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของซีเมนต์เฟสเป็นปัจจัยหลักในการพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของเส้นใยโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ดังนั้น ปริมาณของปูนซีเมนต์จึงมีสัดส่วนโดยรวมที่ลดลงตามอัตราส่วนของเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดและแรงดัดมีค่าลดลง สำหรับงานวิจัยในอนาคต จึงควรมีการศึกษาการใช้วัสดุปอชโซลาน เช่น ถั่วลย ถั่วกลบ ถั่วเขียวพล เป็นต้น ในสัดส่วนผสมของซีเมนต์เฟสเพื่อช่วยเสริมในการพัฒนากำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์

3. การใช้เส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์ม เป็นส่วนผสมของซีเมนต์เฟสในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความหนาแน่นลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดต่ำลงด้วย จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อน และช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในอาคาร นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นกระเบื้องหลังคาในตลาดปัจจุบัน แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติทั้งสองชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น หากนำวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์นี้ไปประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ก่อสร้างสำหรับอาคารพักอาศัยที่ใช้ระบบปรับอากาศ จะส่งผลให้สามารถลดการใช้พลังงานในการปรับอากาศได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ สำหรับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2555 และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร สำหรับเครื่องมือในการทดสอบ

References

- Agopyan, V., Savastano Jr, H., John, V. M., & Cincotto, M. A. (2005). Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview. *Cement and Concrete Composite*, 27(5), 527–536.
- American Society of Testing and Material [ASTM]. (2006a). *ASTM C20-00 Standard test methods for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water*. Philadelphia: Author.
- American Society of Testing and Material [ASTM]. (2006b). *ASTM C109 Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)*. Philadelphia: Author.
- American Society of Testing and Material [ASTM]. (2006c). *ASTM C1185-03 Standard test methods for sampling and testing non-asbestos fiber-cement flat sheet, roofing and siding shingles and clapboards*. Philadelphia: Author.
- American Society of Testing and Material [ASTM]. (2006d). *ASTM C1186-02 Standard specification for flat non-asbestos fiber-cement sheet*. Philadelphia: Author.
- Asasutjarit, C., Hirunlabh, J., Khedari, J., Charoenvai, S., Zeghmami, B., & Shin, U. C. (2007). Development of coconut coir-based lightweight cement board. *Construction and Building Materials*, 21(2), 277–288.
- Asasutjarit, C., Charoenvai, S., Hirunlabh, J., Khedari, J. (2009). Material and Mechanical Properties of Pretreated Coir-based Green Composites. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 633–637.
- Bousri, K. (2001). การผลิตแผ่นฉนวนความร้อนจากฟางข้าว [The production of thermal insulation boards from rice straw]. Master of Engineering Thesis, King Mongkuts University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.
- Bureau of Trade and Economic Indices. (2011). ราคาวัสดุก่อสร้างส่วนกลาง เดือนธันวาคม 2554 กรุงเทพมหานคร [Consumer Price Indexes of Thailand]. Retrieved October 1, 2011, from <http://www.price.moc.go.th/content1.aspx?cid=18>
- Chiewnantawong, S. (2004). การออกแบบบ้านแถวเพื่อใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ [Townhouse Design with Energy Efficiency]. Master of Architecture Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
- Chuanraktam, W. (2005). นวัตกรรมน้ำมันปาล์มจากอุตสาหกรรมอาหารสู่แหล่งพลังงานทดแทนของคนไทย [Plam oil innovation: From the food industry to renovable energy sources in Thailand]. *Engineering Today*, 3(36), 58–63.
- Cook, D. J., Pama, R. P., & Weerasingle, H. (1978). Coir fibre reinforced cement as a low cost roofing material. *Building and Environment*, 13(3), 193–198.
- Delvasto S., Toro, E. F., Perdomo, F., & Mejía de Gutiérrez, R. (2010). An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials*, 24(2), 187–192.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2009). *Natural Fibers: Coir, International Year of Natural Fibers 2009*. Retrieved December 1, 2011, from <http://www.naturalfibres2009.org>
- Ilvessalo-Pfäffli, M.-S. (1995). *Non wood fibers, fibers atlas: Identification of papermaking fibers*. New York: Springer.
- Japanese Standards Association [JSA, JIS]. (1992). *JIS R 2618-1992 Testing method for thermal conductivity of insulating fire bricks by hot wire*. Japan: Author.
- Jústiz-Smith, N. G., Virgo G., & Buchanan, V. E. (2008). Potential of Jamican banana, coconut coir and bagasse fibres as composite materials. *Materials Charaterization*, 59(9), 1273–1278.

- Khedari, J., Suttisonk, B., Pratinthong, N., & Hirunlabh, J. (2001). New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 23(1), 65-70.
- Krapoochai, K. (2003). แนวทางการสร้างแบบประเมินอาคารปรับอากาศเพื่อประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานในภูมิอากาศเขตร้อนชื้น [An approach to formulate energy conservation evaluation index for air-conditioned buildings in a hot-humid climate]. Master of Architecture Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
- Kriker, A., Debicki, G., Bali, A., Khenfe, M. M., & Chabannet, M. (2005). Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. *Cement and Concrete Composite*, 27(5), 554-564.
- Lewin, M., & Goldstein, I. (1991). *Wood structure and composition*. New York: Dekke.
- Mingvimol, U. (2546). แนวทางในการสร้างแบบประเมินค่าการประหยัดพลังงานในอาคารพักอาศัย [An approach to formulate energy conservation evaluation index in residential buildings]. Master of Architecture Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
- Pornchokchai, S. (2009). สถานการณ์ตลาดที่อยู่อาศัย ปี 2552 และแนวโน้มปี 2553 [Housing market in 2009 and trends in 2010]. *Annual Report 2009. Home & Money, Journal of Housing Finance Association*, 62-67.
- Rangsiraksa, P. (2008). การควบคุมเสียงภายในอาคาร [Noise control in building]. Bangkok, Thailand: Faculty of Architecture, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang.
- Sun, J., Sun, X., Zhao, H., & Sun, R. (2004). Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse. *Polymer Degradation and Stability*, 84(2), 331-339.
- Thai Green Label Board of Committee. (2008). ข้อกำหนดฉนวนฉนวนสำหรับกระเบื้องซีเมนต์มุงหลังคา [Cement roofing tiles]. Bangkok, Thailand: Office of The Green Label Secretariat, Thai Industrial Standards Institute.
- Thai Industrial Standards Institute. (2008). กระเบื้องซีเมนต์ใยหิน: ปลอดภัยต่อสุขภาพ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [Asbestos cement tiles: Health, safety and environment]. *Thai Green Label*, 10.
- TRIS Rating Co., Ltd. (2011). ทริสเรตติ้งบทวนและประเมินแนวโน้ม “ตลาดที่อยู่อาศัย” [TRIS Rating review and assess trends “Housing Market”]. Retrieved October 1, 2011, from http://www.trisrating.com/th/rating_criteria.html
- Vasanaprasert, S. (2007). การพัฒนาผนังซีเมนต์เส้นใยพืชสำหรับอาคารไม่ปรับอากาศ [Development of cement-cellulose wall for passive building]. Master of Architecture Thesis, Silpakorn University, Bangkok, Thailand.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12), 1781-1788.