



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “บล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์
ผสมเถ้าลอยและปูนซีเมนต์”

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร ภูเงินขำ และคณะ

พฤษภาคม 2561

สัญญาเลขที่ RDG60T0158

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “บล็อกเชียนมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์
ผสมเถ้าลอยและปูนซีเมนต์

โดย

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร ภูเงินคำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระยุทธ สืบสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา อ่างรุ่งดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
4. ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

พฤษภาคม 2561

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

บล็อกชีวะมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในงานวิจัยนี้เป็นส่วนผสมระหว่างเถ้าชานอ้อย เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ทราเยลเยียด สารละลายต่าง และสารเพิ่มฟอง เถ้าชานอ้อยได้จากโรงงานน้ำตาล จังหวัดนครราชสีมา ส่วนเถ้าลอยได้รับจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุที่มีขายทั่วไป โดยออกแบบหน่วยน้ำหนักเปียกของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสเท่ากับ 1000 kg/m^3 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารต่างในส่วนผสม โดยกำหนดอัตราส่วนผสม $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนสารเพิ่มฟองต่อน้ำประปาเท่ากับ 1:50 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 10 และ 15 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.1, 2:1 และ 3.1 ปริมาณการใช้เถ้าชานอ้อยต่อเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 ของน้ำหนักวัสดุประสาน หลังการผสม มวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ถูกนำมาบ่มที่อุณหภูมิห้องเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่มเท่ากับ 3, 7, 14 และ 28 วัน และดำเนินการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.2601-2556 ที่ต้องมีกำลังอัดอย่างน้อย 2.5 MPa ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน ผลการทดสอบ พบว่า ส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จำนวน 7 ส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 ประกอบด้วย 1.OSB10M80BA20PC, 1.OSB15M80BA20PC, 1.OSB15M80BA10PC10FA, 1.OSB15M70BA30PC, 1.OSB15M70BA15PC15FA, 1.OSB15M60BA40PC และ 1.OSB15M60BA20PC20FA โดยทั้ง 7 ส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 เพียงอายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน แสดงให้เห็นว่า สามารถผลิตบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสได้มากกว่าบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า (ต้องการอายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน) ถึง 4 เท่า

หลังจากนั้น ดำเนินการตรวจสอบค่าการดูดซึมน้ำค่าการดูดซึมน้ำของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า ส่วนผสม 1.OSB15M80BA20PC และ 1.OSB15M80BA10PC10FA มีค่าการดูดซึมน้ำผ่านค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556 ที่ต้องไม่มากกว่าร้อยละ 23 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ขณะที่ส่วนผสมอื่นๆ พบว่า มีค่าดูดซึมน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 30 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556 อาจเนื่องจากเถ้าชานอ้อยจะมีการดูดซึมน้ำสูงจึงส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของมวลเบาแบบเซลลูโลส ขณะเดียวกันดำเนินการตรวจสอบค่าหดตัวแห้งและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้งาน พบว่า ส่วนผสมของ 1.OSB10M80BA20PC, 1.OSB15M80BA20PC, 1.OSB15M70BA30PC และ 1.OSB15M60BA40PC มีค่าหดตัวแห้งใกล้เคียงกับบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้าและคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อย ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ขณะที่การใช้เถ้าลอยในส่วนผสมมีแนวโน้มมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว เพื่อเป็นการยืนยันความเป็นบล็อกชีวะมวลเบาแบบเซลลูโลส เนื่องด้วยการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญในปัจจุบัน ดังนั้น การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) จึงถูกวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบ พบว่า มวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์มีค่าประเมินวัฏจักรชีวิตต่ำกว่า

บล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากระบบของปูนซีเมนต์ทุกส่วนผสม ขณะที่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์ พบว่า มีค่าประเมินวัฏจักรชีวิตใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งส่วนผสมของ 1.OSB15M80BA10PC10FA มีค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตต่ำที่สุด เพราะถ้าลอยจะมีค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าปูนซีเมนต์

เพื่อความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานและเป็นบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสทางเลือก การทดสอบแบบผนังเพื่อตรวจสอบการยึดเกาะระหว่างก้อนเมื่อใช้ปูนก่อเป็นวัสดุประสาน พบว่า บล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้าให้ค่ากำลังอัดเมื่อหล่อเป็นผนังสูงกว่าบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากปูนก่อที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างก้อนเป็นปูนก่อที่ใช้สำหรับบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสของระบบปูนซีเมนต์โดยตรง ซึ่งแนวทางแก้ไขสามารถอาจใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นปูนก่อแทนปูนก่อของมวลเบา ซึ่งการใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์ยังเป็นการลดต้นทุนที่ต้องสั่งซื้อปูนก่อของมวลเบามาใช้ในการหล่อผนัง นอกจากนั้น เพื่อให้ทราบต้นทุนการผลิตของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การวิเคราะห์ต้นทุนจึงถูกนำมาวิเคราะห์ โดยพิจารณาราคาวัสดุตามราคาของวัสดุในปัจจุบันและเปรียบเทียบกับราคาของบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า พบว่า บล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์มีต้นทุนการผลิตสูงกว่าบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า ยกเว้นส่วนผสมของ 1.OSB10M80BA20PC ที่มีราคาใกล้เคียงกับบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า ซึ่งเมื่อพิจารณาส่วนผสมของ 1.OSB10M80BA20PC จะมีค่ากำลังอัด การหดตัวแห้ง ค่าการนำความร้อน และค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ยกเว้นค่าการดูดซึมน้ำไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 โดยค่าการดูดซึมน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 30 อาจเนื่องจากเถ้าขานอ้อยมีการดูดซึมน้ำสูง แนวทางแก้ไขอาจใช้เถ้าขานอ้อยที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดค่าความละเอียดของพื้นผิวเถ้าขานอ้อย นอกจากนั้น บล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์สามารถผลิตเป็นบล็อกทนไฟได้ เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์สามารถทนไฟได้สูง ซึ่งในปัจจุบันราคาของอิฐทนไฟอยู่ประมาณ 50-90 บาท ต่อ 1 ก้อน ซึ่งสูงกว่าราคาของบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์จากงานวิจัยนี้ประมาณ 2-5 เท่า ดังนั้น เมื่อพิจารณาผลการทดสอบทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่าการใช้เถ้าขานอ้อยต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 80:20 ทราบดีดต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ สามารถผลิตบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์ได้โดยมีคุณสมบัติเทียบเคียงกับบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า ขณะที่การใช้เถ้าขานอ้อยต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 80:20 ทราบดีดต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ สามารถพัฒนาเป็นอิฐทนไฟได้และจะเป็นอิฐทนไฟที่มีราคาถูกกว่าอิฐทนไฟในปัจจุบัน

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : RDG60T0158

ชื่อโครงการ : บล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยและปูนซีเมนต์

ชื่อนักวิจัย : 1. ธนากร ภูเงินขำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
2. จิระยุทธ สืบสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
3. เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
4. จักขดา อารังวุฒิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
5. สกวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

E-mail Address : tanakorn.ph@rmuti.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 ปี

บล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์ในงานวิจัยนี้เป็นส่วนผสมระหว่างเถ้าชานอ้อย เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย สารละลายต่าง และสารเพิ่มฟอง โดยออกแบบหน่วยน้ำหนักเปียกของ บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสเท่ากับ $1,000 \text{ kg/m}^3$ สารละลายต่างเป็นส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในอัตราส่วนผสม $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.0 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 10 และ 15 โมลาร์ อัตราส่วน สารเพิ่มฟองต่อของเหลวเท่ากับ 1:50 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนระหว่าง ทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 ปริมาณการใช้เถ้าชานอ้อยต่อเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 ของน้ำหนักวัสดุประสาน ตัวอย่างถูกนำมาบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน เพื่อทดสอบกำลังอัด ขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัวแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์การนำ ความร้อน โครงสร้างระดับจุลภาค และความคืบหน้าของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ได้รับตรวจสอบ หลังจากนั้นส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อย จีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมจะทดสอบผนังมวลเบาเปรียบเทียบกับบล็อกมวลเบาทางการค้า

ผลการทดสอบ พบว่า กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอายุการบ่มตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสลดลง เมื่อพิจารณากำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลส ร่วมกับค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556 พบว่า ส่วนผสมที่เหมาะสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจาก เถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าผ่านเกณฑ์กำลังอัดของมวลเบาแบบ เซลลูโลสมากกว่า 2.5 MPa ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า มวลเบาแบบเซลลูโลส จากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถพัฒนาเป็นบล็อกมวลเบาแบบ เซลลูโลสทางเลือกได้

คำสำคัญ: มวลเบาแบบเซลลูโลส, เถ้าชานอ้อย, เถ้าลอย, ปูนซีเมนต์, จีโอโพลิเมอร์

ABSTRACT

Project Code : RDG60T0158

Project Title : Green cellular lightweight brick from bagasse ash geopolymer
containing fly ash and Portland cement

Investigators : 1. Tanakorn Phoo-ngernkham, Rajamangala University of Technology Isan
2. Jirayut Suebsuk, Rajamangala University of Technology Isan
3. Cheardsak Suksiripattanapong, Rajamangala University of Technology Isan
4. Jaksada Thumrongvut, Rajamangala University of Technology Isan
5. Sakonwan Hanjitsuwan, Lampang Rajabhat University

E-mail Address : tanakorn.ph@rmuti.ac.th

Project Period : 1 year

Green cellular lightweight brick from geopolymer in this research was composed of bagasse ash, fly ash, Portland cement, sand, alkali solutions and foam agent. Wet density of cellular lightweight brick was designed at 1,000 kg/m³. The liquid alkali solutions were sodium hydroxide solution (NaOH) and sodium silicate solution (Na₂SiO₃) which was fixed at Na₂SiO₃/NaOH ratio of 1.0. The NaOH concentrations of 10, 15 molar, foam agent to liquid alkali ratio of 1:50, and sand to binder ratios of 1:1, 2:1, 3:1, liquid alkali to binder ratio of 0.50 and BA:FA or PC ratios of 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 by weight of a binder, were used. Cellular lightweight brick was kept in the ambient room temperature until testing ages of 3, 7, 14, and 28 days for compressive strength testing. Water absorption, drying shrinkage, thermal conductivity, microstructure (SEM and XRD) and cost analysis were investigated. Then, the suitable mixtures of cellular lightweight brick made from BA geopolymer containing FA and PC were took in-place testing by the method of non-load bearing brick masonry units compared with a commercial cellular lightweight brick.

Test results found that compressive strength of cellular lightweight brick made from BA geopolymer containing FA and PC tended to increase with increasing of NaOH concentration, PC replacement level, and curing time. However, the compressive strength of cellular lightweight brick tended to decrease with increasing of sand to binder ratio. The 7-day suitable mixtures cellular lightweight brick made from BA geopolymer containing FA and PC met the compressive strength requirement of TIS2601-2556 (>2.5 MPa). Test results can be concluded that cellular lightweight brick made from BA geopolymer containing FA and PC could develop as an alternative cellular lightweight brick.

Keywords: Cellular lightweight, Bagasse ash, Fly ash, Portland cement, Geopolymer

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ สำนักประสานงานชุดโครงการวิจัยด้านอ้อยและน้ำตาล สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่เล็งเห็นความสำคัญของการศึกษาวิจัยเรื่อง บล็อกเชนมวลเบาแบบเซลลูลาร์จากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยให้ทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปี 2560 จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการหาแนวทางในการนำเถ้าขานอ้อยที่เป็นผลพลอยมาใช้ในการเกิดประโยชน์ โดยนำมาพัฒนาเป็นบล็อกมวลเบาแบบเซลลูลาร์ซึ่งถือเป็นวัสดุทางเลือกในงานก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้ความรู้และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีเสมอมา และขอขอบพระคุณ บริษัท กรีนนิช เทคโนโลยี จำกัด ที่ได้ร่วมสนับสนุนงานวิจัย ทั้งในด้านความรู้เกี่ยวกับการออกแบบส่วนผสม การทดสอบ ตลอดจนแนวทางที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับการผลิตบล็อกมวลเบาแบบเซลลูลาร์จนสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้บริหารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่เล็งเห็นความสำคัญของงานวิจัยและให้การสนับสนุนสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ และอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ของห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีต ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้อนุเคราะห์ชุดทดสอบการนำความร้อนเพื่อทดสอบค่าการนำความร้อนของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูลาร์ และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประสานของสำนักประสานงานชุดโครงการวิจัยด้านอ้อยและน้ำตาล สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยพร้อมรับคำแนะนำถึงข้อบกพร่องในงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปปรับปรุงและพัฒนา
งานวิจัยต่อไปในอนาคต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร ธนากร ภูเงินขำ และคณะ

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	
บทคัดย่อ (ไทย-อังกฤษ)	
กิตติกรรมประกาศ	
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1-3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1-4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	1-4
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า	2-1
2.2 ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า	2-1
2.3 จีโอโพลิเมอร์	2-2
2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับจีโอโพลิเมอร์	2-5
2.5 เถ้าลอย	2-6
2.6 เถ้าขานอ้อย	2-7
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	3-1
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในผสมมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-2
3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุตั้งต้น	3-4
3.4 การออกแบบอัตราส่วนผสมของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-5
3.5 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา	3-9
3.6 ส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-10
3.7 ขั้นตอนการผสมมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-11
3.8 ทดสอบกำลังอัดและการดูดซึมน้ำของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 ทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคและองค์ประกอบทางแร่ของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-17
3.10 ทดสอบค่าการหดตัวแห้งของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-18
3.11 ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-19
3.12 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-19
3.13 ทดสอบกำลังอัดของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง	3-19
3.14 วิเคราะห์ราคาของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เปรียบเทียบกับบล็อกทางการค้า	3-20
3.15 การเขียนรายงานและถ่ายทอดเทคโนโลยี	3-21
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	
4.1 องค์ประกอบทางเคมีและรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัย	4-1
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพและลักษณะรูปร่างของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัย	4-3
4.3 กำลังอัดและการดูดซึมน้ำของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-4
4.4 โครงสร้างระดับจุลภาคและองค์ประกอบทางแร่ของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-18
4.5 ค่าการหดตัวแห้งของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-21
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-22
4.7 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-24
4.8 กำลังอัดของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง	4-25
4.9 วิเคราะห์ราคาของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เปรียบเทียบกับบล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่าทางการค้า	4-27
4.10 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับมาตรฐานต่างๆ	4-29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษา	5-1
5.2 ข้อเสนอแนะ	5-2
บรรณานุกรม	บ-1
ภาคผนวก ก รายละเอียดของมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง	ก-1
ภาคผนวก ข อัตราส่วนผสมของบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ ผสมเกล็ดลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้งาน	ข-1
ภาคผนวก ค แผ่นพับประชาสัมพันธ์	ค-1

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อัตราส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-10
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	4-1
4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	4-3
4.3 ตารางแสดงการวิเคราะห์เชิงสถิติแบบ ANOVA ด้วยวิธี Scheffa ของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-17
4.4 ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย (Phoo-ngernkham et al., 2016)	4-24
4.5 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-25
4.6 ส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ราคา (kg/m^3)	4-28
4.7 ราคาที่ใช้ในการผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Baht/1 kg)	4-28
4.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับมาตรฐานต่างๆ	4-31
ข-1 อัตราส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้งานของส่วนผสม 0.50LB1.0SB10M80BA20PC	ข-2
ข-2 อัตราส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้งานของส่วนผสม 0.50LB1.0SB15M80BA20	ข-2
ข-3 อัตราส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้งานของส่วนผสม 0.50LB1.0SB15M70BA30	ข-2
ข-4 อัตราส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้งานของส่วนผสม 0.50LB1.0SB15M60BA40	ข-2

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กลไกปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดจีโอโพลิเมอร์ (Xu, Van Deventer, 2000)	2-4
2.2 ภาพแบบการจัดเรียงพันธะเคมีสามมิติของจีโอโพลิเมอร์ (Davidovits, 1999)	2-4
2.3 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาระหว่างระบบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับจีโอโพลิเมอร์ (Davidovits, 1999)	2-5
2.4 กองซานอ้อย (รัฐพล สมนา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554)	2-7
2.5 กองเถาซานอ้อย (รัฐพล สมนา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554)	2-8
2.6 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเถาซานอ้อย (รัฐพล สมนา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554)	2-8
3.1 การบดเถาซานอ้อย	3-1
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	3-2
3.3 สารกระจายเพิ่มฟองอากาศ ยี่ห้อ Sikaporo-40	3-2
3.4 โม่ผสมคอนกรีต	3-3
3.5 เครื่องผลิตโฟมเหลวคงรูป (foam generator)	3-3
3.6 เครื่องปั๊มลม	3-3
3.7 เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.1 กรัม	3-4
3.8 Excel สำหรับออกแบบส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาซานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-8
3.9 การเตรียมน้ำยาโฟมและการปรับแรงดันของปั๊มลม	3-11
3.10 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	3-12
3.11 วัสดุที่ใช้ในการผสม	3-12
3.12 ลักษณะการผสมมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาซานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-13
3.13 ลักษณะการจับตัวของมอร์ตาร์	3-13
3.14 การฉีดโฟมเหลวลงในมอร์ตาร์	3-14
3.15 ลักษณะเนื้อเถาซานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-14
3.16 การตรวจสอบความหนาแน่นเปียกของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาซานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-15
3.17 การเทมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาซานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงในแบบหล่อ	3-16
3.18 ลักษณะตัวอย่างของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาซานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-16
3.19 การทดสอบของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาซานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-17
3.20 ลักษณะการทดสอบค่าการหดตัวแห้งของบล็อกเขี้ยวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาซานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-18

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21 ลักษณะการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-19
3.22 ลักษณะตัวอย่างบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง	3-20
3.23 ลักษณะตัวอย่างบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากท้องตลาด	3-20
3.24 ลักษณะการเตรียมบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสเมื่อหล่อเป็นผนัง	3-20
3.25 ลักษณะการทดสอบกำลังอัดของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง	3-21
4.1 XRD ของเถาขานอ้อย	4-1
4.2 XRD ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-2
4.3 XRD ของเถ้าลอย	4-2
4.4 SEM ของเถาขานอ้อย	4-3
4.5 SEM ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-4
4.6 SEM ของเถ้าลอย	4-4
4.7 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20	4-5
4.8 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20	4-5
4.9 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20	4-6
4.10 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30	45
4.11 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30	4-7

[illegible]

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.20	กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30	4-12
4.21	กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30	4-13
4.22	กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 40	4-14
4.23	กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 40	4-14
4.24	กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 40	4-15
4.25	ค่าดูดซึมน้ำของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-15
4.26	ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติแบบ ANOVA ด้วยวิธี Scheffa ของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-18
4.27	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่ม 28 วัน	4-19
4.28	โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่ม 28 วัน	4-20
4.29	ค่าการหดตัวแห้งของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4-22
4.30	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่ม 28 วัน	4-23
4.31	กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง	4-25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.32	ลักษณะการวิบัติของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาซานฮวยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง	4-26
4.33	วิเคราะห์ราคาของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาซานฮวยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เปรียบเทียบกับบล็อกทางการค้า	4-29

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการสร้างอาคารเกือบทุกสถานที่ทั่วโลก ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีความได้เปรียบในการขึ้นรูปง่ายกว่าวัสดุอื่น มีคุณสมบัติที่ดีทั้งทางกลและกายภาพ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตหาได้ง่าย ต้นทุนการผลิตต่ำและใช้งานง่าย โดยปกติความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะอยู่ในช่วง $2,300\text{--}2,700\text{ kg/m}^3$ (Nambiar and Ramamurthy, 2006) ดังนั้นการทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำจึงส่งผลด้านบวกต่อน้ำหนักขององค์อาคาร รวมถึงสมบัติของการเป็นฉนวนความร้อน และฉนวนกันเสียง (Feng and Peng, 2005) จึงมีการพัฒนาวัสดุก่อสร้างจากคอนกรีตที่มีทั้งความแข็งแรง ความสะดวกในการใช้งาน ความหนาแน่นต่ำ และสมบัติการเป็นฉนวนความร้อน และฉนวนกันเสียง ซึ่งนั่นก็คือ คอนกรีตมวลเบา หรือ Lightweight Concrete (Beben and Manko, 2011)

ในปัจจุบันคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสหรือโฟมคอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างบ้านพักอาศัยและอาคารทั่วไป เนื่องจากมีสมบัติเด่นด้านการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดขึ้นจากการรวมกันของสารเคมีสร้างฟองและการบ่มในอากาศในกระบวนการผลิต คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเหล่านี้เป็นสิ่งใหม่และเป็นนวัตกรรมวัสดุก่อสร้างมีคุณสมบัติที่น่าสนใจคือมีความหนาแน่นต่ำและมีกำลังที่ดี (Just and Middendorf, 2009) แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตแบบเซลลูโลสจะมีส่วนประกอบปูนซีเมนต์เป็นหลัก ซึ่งข้อจำกัดของการการผลิตปูนซีเมนต์คือมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศปริมาณมาก ใช้พลังงานในการผลิตมาก ดังนั้น จึงมีการพัฒนาวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ที่กระบวนการผลิตส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด เพื่อให้สอดคล้องกับการจัดการทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน และการวิจัยและพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ที่เรียกว่า “วัสดุสีเขียว (Green Material)” ดังนั้น การศึกษาวัสดุชนิดใหม่เพื่อใช้ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง นั่นคือ มวลเบาแบบเซลลูโลสที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมผลิตจากวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกต หรือที่เรียกกันว่า จีโอโพลิเมอร์มวลเบาแบบเซลลูโลส ซึ่งเป็นการพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก และกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง สารละลายต่างที่นิยมใช้ คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้สามารถก่อตัวและแข็งตัวทำให้มีสมบัติในการรับแรงได้ ในประเทศไทยวัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ เถ้าลอยซึ่งเถ้าลอยเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลักซึ่งถือเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ นอกจากนี้เถ้าลอยยังมีขนาดเล็ก อนุภาคกลม มีความเป็นอสัณฐานในองค์ประกอบทางแร่จึงเหมาะสมและนิยมใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์

อย่างไรก็ตาม ตามแผนงานส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยที่มุ่งเป้าตอบสนองความต้องการในการพัฒนาประเทศ ผู้วิจัยได้เล็งเห็นว่าการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์สูงสุดเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง อีกทั้ง ตามที่กรอบวิจัยที่กองบริหารแผนและงบประมาณการวิจัย (กบง.) สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ได้มุ่งเน้นให้มีการวิจัยเชิงนโยบายเพื่อส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตร โดยมีอ้อยเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมน้ำตาลที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ ดังนั้น วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย

ได้แก่ ชานอ้อย มีอยู่ในปริมาณที่มากจากโรงงานน้ำตาล หรืออาจกล่าวได้ว่า อ้อยที่ส่งเข้าโรงงานแปรรูปเป็นกระบวนการผลิตน้ำตาลอ้อย 1 ตัน จะเหลือกากหรือชานอ้อยออกมาประมาณ 300 กิโลกรัม (ศูนย์สารสนเทศการเกษตรสำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2553) ในปี 2552 ประเทศไทยผลิตอ้อยทั้งหมด 66.8 ล้านตัน เมื่อนำไปผลิตน้ำตาลจะเหลือเป็นชานอ้อย 20 ล้านตันต่อปี บางส่วนเกษตรกรนำไปทำปุ๋ยและส่วนใหญ่ใช้ถมที่และยังคงกองทิ้งก่อให้เกิดผลต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยที่ผ่านมาของรัฐพลสมนา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) จากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยจึงมีความเป็นไปได้ในใช้เถ้าชานอ้อยในการผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์เช่นเดียวกันกับเถ้าลอย อีกทั้งด้วยคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยที่มีลักษณะพรุนน่าจะเป็นข้อดีที่จะนำไปเป็นส่วนผสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มวลเบาแบบเซลลูโลส เพื่อเป็นการบ่มภายในและลดการแตกร้าวของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาแบบเซลลูโลส

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะนำเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์นี้จัดเป็น Green material ซึ่งไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานหรือใช้เพียงบางส่วน (กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน) ซึ่งวัสดุจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการใช้อุณหภูมิสูงในการเตรียมตัวอย่าง และปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ต่ำ และมีกำลังอัดเพียงพอต่อการพัฒนาเป็นบล็อกมวลเบา โดยพิจารณาตัวแปรควบคุม ได้แก่ ปริมาณการใช้เถ้าชานอ้อยในส่วนผสม อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอายุบ่ม เพื่อผลิตเป็นบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกแบบไม่รับน้ำหนัก ตาม มอก. 2601-2556 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และองค์ประกอบทางแร่ด้วยเครื่อง X-Ray diffraction (XRD) เพื่อทราบพฤติกรรมทางเคมีและทางจุลภาคที่คาดว่าจะเกิดขึ้นภายในบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ เพื่อสามารถอธิบายความสัมพันธ์กับพฤติกรรมด้านกำลังของบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ ศึกษาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพื่อทราบถึงค่าการนำความร้อน ค่าการหดตัวแห้ง และการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์เมื่อทราบส่วนผสมของบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ที่เหมาะสมจะทดสอบผนังมวลเบาตามมาตรฐานอุตสาหกรรมและเปรียบเทียบกับบล็อกมวลเบาทางการค้า เพื่อทราบจุดเด่นและข้อจำกัด และความคุ้มค่าของบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์เพื่อเป็นทางเลือกในการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุโดยการนำวัสดุพลอยได้จากเกษตรกรและอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์โดยทุกกระบวนการผลิตมีการคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมซึ่งถือเป็นการเพิ่มทางเลือกในการประยุกต์ใช้กับงานทางวิศวกรรมโยธา และเป็นการเพิ่มช่องทางสร้างรายได้ให้กับหน่วยงานเอกชนหรือชุมชนในการประกอบธุรกิจสำหรับการผลิตบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ต่อไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนผสม (ปริมาณการใช้เถาขานอ้อยในส่วนผสม อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอายุบ่ม) ที่เหมาะสมเพื่อผลิตบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ ที่มีกำลังต้านแรงกด หน่วยน้ำหนัก ขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำ สภาพการซึมผ่านน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกแบบไม่รับน้ำหนักตาม มอก. 2601-2556 และเปรียบเทียบผลทดสอบกับผลิตภัณฑ์บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า

1.2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และองค์ประกอบทางแร่ด้วยเครื่อง X-Ray diffraction (XRD) ของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์

1.2.3 เพื่อศึกษาค่าหดตัวแห้งของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ และเปรียบเทียบผลทดสอบกับผลิตภัณฑ์บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า

1.2.4 เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ และเปรียบเทียบผลทดสอบกับผลิตภัณฑ์บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า

1.2.5 เพื่อศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ และเปรียบเทียบกับบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า

1.2.6 เพื่อศึกษากำลังอัดของผนังจากบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบของผนังจากของผลิตภัณฑ์บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า

1.2.7 เพื่อวิเคราะห์ราคาเพื่อความคุ้มค่าในการลงทุนผลิตบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับราคาของผลิตภัณฑ์บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า

1.2.8 เพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับการผลิตบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ เพื่อจะนำข้อมูลจากการทดสอบสำหรับการจัดอบรมวิธีการออกแบบบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ เพื่อเป็นการเพิ่มช่องทางสร้างรายได้ให้กับหน่วยงานเอกชนหรือชุมชนในการประกอบธุรกิจ (SMEs) สำหรับการผลิตบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์

1.2.9 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ เพื่อให้ผู้ประกอบการสามารถเลือกใช้ในการผลิตภัณฑ์อื่นๆ นอกเหนือจากบล็อกมวลเบา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

บล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ในงานวิจัยนี้เป็นส่วนผสมระหว่างเถ้าขานอ้อย เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ทราบ สารละลายต่าง และสารเพิ่มฟอง เถ้าขานอ้อยได้จากโรงงานน้ำตาล จังหวัดนครราชสีมา เถ้าลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยออกแบบหน่วยน้ำหนักเปียกของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสเท่ากับ $1,000 \text{ kg/m}^3$ สารละลายต่างเป็นส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในอัตราส่วนผสม $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.0 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 10 และ 15 โมลาร์ อัตราส่วนสารเพิ่มฟองต่อของเหลวเท่ากับ 1:50 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนระหว่างทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.1, 2:1 และ 3:1 ปริมาณการใช้เถ้าขานอ้อยต่อเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 ของน้ำหนักวัสดุประสาน ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ถูกนำมาบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน และทดสอบกำลังอัด หน่วยน้ำหนัก ขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำ สภาพการซึมผ่านน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกแบบไม่รับน้ำหนักตาม มอก. 2601-2556 ค่าการหดตัวแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ตามลำดับ และมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และองค์ประกอบทางแร่ด้วยเครื่อง X-Ray diffraction (XRD) ของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์เพื่อทราบพฤติกรรมทางเคมีและทางจุลภาคที่คาดว่าจะเกิดขึ้นภายในบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยเถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อสามารถอธิบายความสัมพันธ์กับพฤติกรรมด้านกำลังของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลส และผลการทดสอบทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์ เพื่อกำหนดวิธีการออกแบบการผลิต (Manufacturing design method) ของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสเพื่อให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการ และมีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ เมื่อทราบส่วนผสมของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ที่เหมาะสมจะทดสอบผนังมวลเบาตามมาตรฐานอุตสาหกรรมและเปรียบเทียบกับบล็อกมวลเบาทางการค้า เพื่อทราบจุดเด่นและข้อจำกัด และความคุ้มค่าของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ถ่ายทอดสู่ธุรกิจขนาดกลางและขนาดเล็ก (SMEs)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ผลการวิจัยที่เสนอนี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมวัสดุ รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธา

1.4.2 ผลการวิจัยที่เสนอนี้สามารถประยุกต์ใช้เถ้าขานอ้อยสำหรับการผลิตบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งเป็นการจัดการของเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.4.3 ผลการวิจัยที่เสนอนี้สามารถประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์ เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ และการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ

1.4.4 ได้วิธีการออกแบบการผลิตบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ เพื่อประกอบแผนธุรกิจการจำหน่ายบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ และส่งเสริมธุรกิจขนาดกลาง และขนาดเล็ก (SMEs) เพื่อเป็นการเพิ่มช่องทางสร้างรายได้ให้กับหน่วยงานเอกชนหรือชุมชนในการประกอบธุรกิจสำหรับการผลิตบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์

1.4.5 ได้ข้อมูลพื้นฐานจากการทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์ เพื่อให้สามารถจำแนกความเหมาะสมของประเภทของงานได้นอกเหนือจากการผลิตบล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่า

บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า คือ ผลิตภัณฑ์ความหนาแน่นต่ำชนิดหนึ่งทีประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และสารเพิ่มฟอง มีลักษณะช่องว่างเป็นเนื้อเดียวกันหรือโครงสร้างของเซลล์ (cellular structure) ด้วยช่องว่างอากาศขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.1–1 mm ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยก๊าซเคมีหรือโฟมเหลว ซึ่งโฟมได้มาจากการผลิตด้วยเครื่องกำเนิดโฟมโดยใช้สารเพิ่มฟอง ประกอบด้วยฟองอากาศซึ่งแยกออกจากกัน ทำให้ได้ช่องว่างขนาดเล็กที่ไม่ต่อเนื่องกันจำนวนมาก ส่งผลให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีน้ำหนักเบา ผิวผนังของช่องว่างหรือเซลล์สามารถทนต่อการบีบอัดหรือการทำให้แน่น และการผสมในกระบวนการผลิตคอนกรีตสด เป็นที่รู้จักกันในชื่อโฟมคอนกรีตหรือคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (CLC) เป็นคอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมหยาบผสมร่วมด้วย การควบคุมความหนาแน่นทำได้โดยการแทนที่มวลรวมละเอียดทั้งหมดหรือเพียงบางส่วนด้วยเซลล์อากาศ (air cell) ซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า และไม่ใช่มวลรวมหยาบน้ำหนักปกติในส่วนผสม แต่ทั้งมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบน้ำหนักเบามักจะพบบอยในส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า (ASTM C796-2004)

คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่ามีการใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกครั้งแรกเรียกว่าโฟมคอนกรีต (foam concrete) โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพเพียงพอที่จะอนุโลมให้ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับเป็นส่วนประกอบของอาคารรับแรงแบกทาน เนื่องจากสัดส่วนของช่องว่างอากาศมีปริมาณสูง การเป็นวัสดุก่อสร้างจึงมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี โดยการควบคุมปริมาณของโฟมที่เหมาะสมหลากหลายของความหนาแน่น ($400\text{--}1,600\text{ kg/m}^3$) ของเซลลูล่าคอนกรีต สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นโครงสร้างของผนังกันห้องในงานสถาปัตยกรรม ฉนวนกันความร้อนและวัสดุรองพื้นทาง ความหนาแน่นแห้ง $1,000\text{ kg/m}^3$ เหมาะสำหรับการใช้เป็นบล็อกผนังและความหนาแน่นแห้ง $1,200\text{ kg/m}^3$ เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ขึ้นส่วนสำเร็จรูปและผนังหล่อในที่ (cast in-situ) ข้อได้เปรียบของวัสดุรูปขึ้น คือ มีน้ำหนักบรรทุกคงที่ต่ำประมาณหนึ่งในสามของโครงสร้างเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป การปรับแต่งการกระจายช่องว่างของอากาศดังที่กล่าวมาในช่วงต้นเหมือนจะทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ เช่น กำลังรับแรงอัด และ ความหนาแน่นเปลี่ยนไปตามวัตถุประสงค์ความต้องการของการใช้อาคาร ถึงแม้ว่าวัสดุมวลเบาได้มีการจดสิทธิบัตรครั้งแรกในปี 1923 ซึ่งการก่อสร้างโดยใช้วัสดุกึ่งโครงสร้าง (semi-structural) น้ำหนักเบาที่ว่ามีเพิ่มขึ้นตามลำดับอย่างต่อเนื่องในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา และได้มีผู้นำเสนอวิจารณ์บทความเป็นครั้งแรกเกี่ยวกับองค์ความรู้ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าโดย Valore ในปี ค.ศ. 1954 สรุปองค์ประกอบ คุณสมบัติและการใช้คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าโดยไม่ได้กล่าวถึงวิธีการวัดขนาดของโครงสร้างเซลล์ ต่อมา Jones and Mc Carthy (2005) มีการศึกษาความเป็นมาประวัติเรื่องราวของการใช้โฟมคอนกรีตเกี่ยวกับส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้ คุณสมบัติและรวมถึงการประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างจากบางโครงการที่กำลังได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในสมัยนั้น

2.2 ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (type-I Portland cement หรือ OPC) ใช้เป็นสารยึดประสานหลักสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (CLC) อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทแข็งตัวเร็ว (type III) ก็สามารถใช้ได้ และปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตดูเหมือนจะยังไม่เคยมีหลักฐานปรากฏการใช้ให้เห็นว่า

ทำไมไม่สามารถใช้ได้ ปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมดสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (CLC) มักจะไม่อยู่ในระหว่าง 300–400 kg/m³ แต่อาจสูงถึง 500 kg/m³ ซึ่งมีปริมาณการใช้มากกว่าคอนกรีตกำลังสูงทั่วไป ตามที่ Jones and Mc Carthy (2005) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (CLC) พบว่าปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้สูงถึง 500 kg/m³ เป็นอย่างต่ำ

2.2.2 น้ำ

น้ำ (water) ที่ใช้สำหรับโฟมคอนกรีตควรเป็นน้ำสะอาด หรือน้ำประปา โดยทั่วไปมักดื่มได้ เช่นเดียวกับน้ำผสมคอนกรีตปกติ นั้นเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเมื่อใช้สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีน (protein-based foaming agent) เพราะการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในน้ำนั้นสามารถส่งผลกระทบต่อคุณภาพของโฟมคอนกรีต และคอนกรีตที่ผลิตได้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่ต้องการสำหรับส่วนผสมพื้นฐานที่จำเป็นเพื่อให้คอนกรีตสามารถทำงานได้อย่างเพียงพอขึ้นขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุยึดประสานหรือวัสดุเชื่อมประสาน (binder) ซึ่งคอนกรีตต้องมีความแข็งแรงโดยไม่ต้องใช้สารลดน้ำหรือสาร Plasticizing ช่วยแต่อย่างใด ส่วนใหญ่ค่า w/c จะอยู่ระหว่าง 0.4–0.8 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเม็ดวัสดุยึดประสาน เช่น ซิลิกาฟูมจะมีความต้องการน้ำมากกว่าเถ้าลอย เนื่องจากซิลิกาฟูมมีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่าเถ้าลอย ดังนั้นค่า w/c ที่ใช้จะต้องสูงกว่าเถ้าลอย ขณะที่ความสามารถเท่าเทียมกันและการทำให้ค่า w/c ต่ำลงทั้งที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนั้นเป็นสิ่งที่ปรารถนาได้โดยอาจใส่สารผสมเพิ่มจำพวก Superplasticizer ช่วยได้ การที่มีปริมาณน้ำในส่วนผสมอย่างไม่เพียงพอที่จะรับประกันว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกแย่งจากโฟมและอาจนำไปสู่การล่มสลายของฟองอากาศได้ การนำโฟมคอนกรีตไปประยุกต์ใช้งาน ในขณะที่การใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงนั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อความพรุน (porosity) ของโฟมคอนกรีตแต่อย่างใด และขณะที่คอนกรีตยังอยู่ในสภาพสดอยู่นั้นก็ไม่ปรารถนาที่จะให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว (segregation) หรือมีการหดตัวแห้งมากขึ้นหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว

2.2.3 สารเพิ่มฟอง

สารเพิ่มฟอง (foaming agent) เป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactants) ชนิดหนึ่ง แบ่งเป็นสองประเภท คือสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ (synthetic) และชนิดโปรตีน (protein-based) สามารถนำมาใช้ในการผลิตเป็นโฟม เนื่องจากมีความเป็นไปได้ในการย่อยสลายโดยแบคทีเรียและสิ่งมีชีวิตอื่น สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีนในธรรมชาติ เช่น กรดไขมันของสบู่ (fatty acid soap) ซึ่งไม่นิยมในการผลิตเป็นโฟมคอนกรีตสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา อย่างไรก็ตามการวิจัยเกี่ยวกับการใช้สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีนเพื่อพัฒนาความแข็งแรงสูงเพื่อเป็นการยกระดับของโครงสร้างโฟมคอนกรีตให้สูงขึ้นอีก องค์ประกอบทางเคมีของสารลดแรงตึงผิวต้องมีความมั่นคงในสภาพแวดล้อมที่เป็นด่างของคอนกรีต (pH = 12.5 โดยประมาณ) เพราะสารลดแรงตึงผิวทั้งหมดมีความอ่อนไหวง่ายต่อการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการเก็บรักษาสารลดแรงตึงผิวดังกล่าวควรปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตโดยเคร่งครัด และความหลากหลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีอยู่และในขณะที่การเลือกสารลดแรงตึงผิวให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจาะจงประยุกต์ใช้จึงเป็นเรื่องยากที่จะพิสูจน์ความถูกต้อง ด้วยเหตุนี้ก่อนจะใช้สารเพิ่มฟองจึงควรมีความรอบคอบที่จะดำเนินการทดลองผสมก่อนนำไปใช้กับงานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานจริงที่มีปริมาณมาก

2.3 จีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุสังเคราะห์ชนิดอนินทรีย์โพลิเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในรูปอสัณฐานมาทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารละลายอัลคาไลน์เพื่อให้เกิดการ

จะละลายของซิลิกอนไอออน (Si^{4+}) และอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จากวัสดุตั้งต้น เมื่อระบบมีไอออนดังกล่าวมากเพียงพอจะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนและเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างใหม่ และมีการเติมสารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกตเพื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนไอออนที่พร้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาให้ระบบและทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้เกิดการเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง วัสดุจีโอโพลิเมอร์สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้องหรือใช้ความร้อนไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยา (Khale, Chaudhary, 2007)

ลักษณะโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยโมเลกุลลูกโซ่โพลิเมอร์ของโครงสร้างซิลิเกตเตตระไฮดรอน ($\text{Si}(\text{OH})_4$) และอะลูมิเนียมเตตระไฮดรอน ($\text{Al}(\text{OH})_4$) เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวและก่อดักรวมกันเป็นโครงข่ายสามมิติโดยมีหน่วยหลักของโครงสร้างที่เรียกว่าไซอะเลต (Sialate, $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$) และมีโลหะอัลคาไลน์ (เช่น Li^+ , Na^+ , K^+) หรือโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท (เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+}) ทำหน้าที่ปรับสมดุล ณ ตำแหน่งของอะลูมิเนียมในโครงสร้างอะลูมิเนียมเตตระไฮดรอน สามารถเขียนเป็นสูตรเคมี (Empirical formula) ดังสมการที่ 1 (Davidovits, 1999) และลักษณะโครงสร้างหลักสามมิติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยพีระมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน (หรือเตตระไฮดรอน) จำนวนสอง สาม และสี่หน่วย ได้แก่ โพลิไซอะเลต (Polysialate, PS), โพลิไซอะเลตซิลอกโซ (Polysialate siloxo, PSS) และโพลิไซอะเลตไดซิลอกโซ (Polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับ กรณีที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินามากกว่า 3 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 3$) ลักษณะโครงสร้างจะเป็นโครงข่ายเชื่อมโยง (Cross link) ระหว่างสายโพลิไซอะเลต (Polysialate chains) หรือแผ่นของโพลิไซอะเลต (Polysialate sheets) กับโพลิไซอะเลตเพื่อเกิดเป็นโครงข่ายเชื่อมโยงแบบสองมิติหรือสามมิติ ลักษณะโครงสร้างของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 1 นอกจากนี้ อัตราส่วนโมลแต่ละออกไซด์เพื่อให้ได้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสม คือ $(\text{M}_2\text{O})/\text{SiO}_2 = 0.25-0.28$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4.0$, $\text{H}_2\text{O}/(\text{M}_2\text{O}) = 16-17.5$, $(\text{M}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.0-1.14$ และมีการปรับช่วงของอัตราส่วนโมลแต่ละออกไซด์เพื่อความเหมาะสม คือ $(\text{M}_2\text{O})/\text{SiO}_2 = 0.20-0.48$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.3-4.5$, $\text{H}_2\text{O}/(\text{M}_2\text{O}) = 10-25$, $(\text{M}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.8-1.6$ เมื่อ M_2O คือ Na_2O หรือ K_2O (Khale, Chaudhary, 2007)

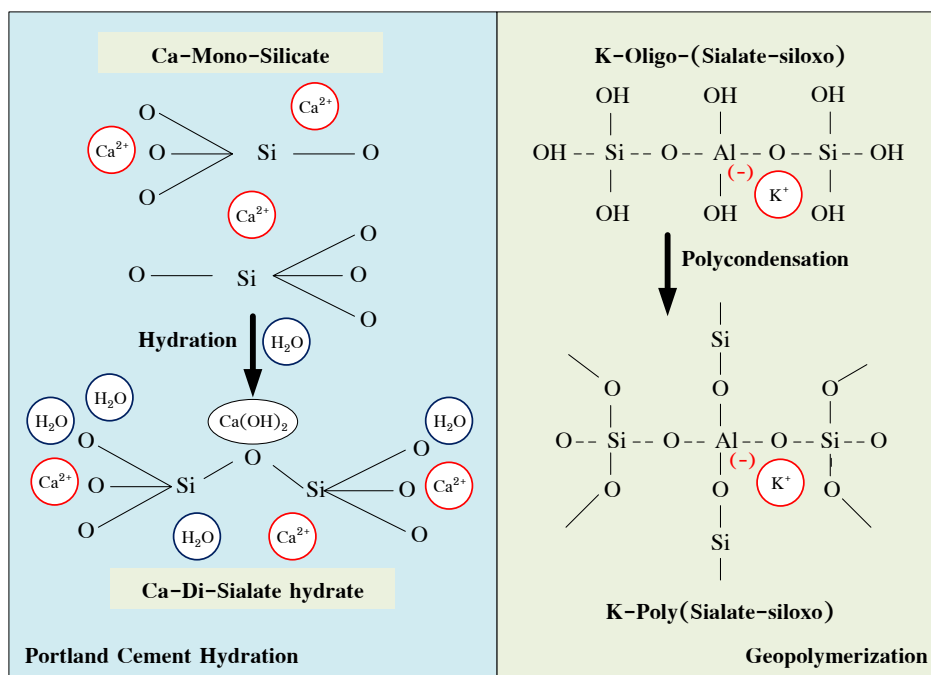
$$M_n [-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2]_n \cdot w\text{H}_2\text{O} \quad (2.1)$$

โดย M หมายถึง ไอออนบวก เช่น โพแทสเซียม (K^+) โซเดียม (Na^+) และแคลเซียม (Ca^{2+})
 - หมายถึง การยัดเกาะ
 z หมายถึง จำนวนโมเลกุลของ SiO_2 เท่ากับ 1, 2, 3 หรือ สูงขึ้นจนถึง 32
 n หมายถึง ดีกรีของกระบวนการโพลิคอนเดนเซชัน
 w หมายถึง ปริมาณน้ำในส่วนผสม

กลไกปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดจีโอโพลิเมอร์เรียกว่า จีโอโพลิเมอไรเซชัน (Geopolymerization) มีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา คือ ขั้นตอนแรกจะเป็นการละลาย (Dissolution) แก้วหรือสารตั้งต้นเมื่อผสมสารละลายที่มีความเป็นเบสสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการชะละลายของซิลิกาและอะลูมินาออกมาจากผิว ซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส (สารละลายโซเดียม-ซิลิเกต) เกิดการก่อดักรวมเป็นเจลเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคของแก้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ (Polymerization) กล่าวคือ ไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาจะเกิดการรวมตัวกับไอออนออกซิเจนอยู่ในรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า แล้วเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของซิลิกอนและ

2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับจีโอโพลิเมอร์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบหลักของธาตุอยู่ในรูปของออกไซด์หลัก (Major oxide) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันประมาณร้อยละ 90 และออกไซด์รอง (Minor oxide) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไลน์ (K_2O , Na_2O) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) ซึ่งออกไซด์หลักเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันรวมอยู่ในรูปของสารประกอบ คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) ลักษณะโครงสร้างของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอโพลิเมอร์นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดแก่ซีเมนต์-เพสต์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลานใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ซึ่งจากปฏิกิริยานี้เองส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ หรือคอนกรีตมีโครงสร้างทางจุลภาคที่หนาแน่น แข็งแรงและความทนทานมากขึ้น (Kroehong et al., 2011)



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาระหว่างระบบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับจีโอโพลิเมอร์ (Davidovits, 1999)

ขณะที่โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์จะมีความแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างสิ้นเชิง กลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์ดังที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วว่าจีโอโพลิเมอร์จำเป็นต้องมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ ซึ่งพบได้มากในวัสดุปอซโซลาน อาทิเช่น เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) หรือดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นต้น ดังนั้นวัสดุปอซโซลานเหล่านี้

สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นกับจีโอโพลิเมอร์ได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์นั้นวัสดุตั้งต้นจะถูกกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) เพื่อทำหน้าที่ชะละลายซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นเหล่านี้ หลังจากนั้นใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเข้าไปเพื่อให้เกิดการรวมตัวกันในลักษณะของโครงสร้างแบบสามเหลี่ยมขณะเดียวกันจากรูปที่ 2.3 จะแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน

2.5 เถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน เพื่อใช้เป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน และถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตาจึงเรียกกันว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ลอยออกไปกับอากาศ และเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า เถ้าลอยมีสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้ ปัจจุบันเถ้าลอยมีมากจึงจำเป็นต้องกำจัด หรือนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อลดปัญหาทางด้านมลภาวะ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) เถ้าถ่านหินนิยมนำไปใช้ในงานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นๆ ด้วยเหตุผล 2 ประการ คือประการแรก เถ้าถ่านหินมีออกไซด์ของซิลิกอน อะลูมิเนียม และเหล็ก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้ถ่านหินที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง เถ้าถ่านหินมีอนุภาคค่อนข้างเล็ก และส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าถ่านหินจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์ หิน หรือทราย ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมได้เนื่องจากรูปร่างที่กลมและผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้าถ่านหิน ทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง นอกจากนี้ลักษณะทรงกลมของเถ้าถ่านหิน จะช่วยทำให้คอนกรีตมีการลื่นไหลที่ดีขึ้น ทำให้การสูบส่งคอนกรีตหรือเทคอนกรีตในแบบทำได้สะดวกและง่ายขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553) การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดการหดตัว ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าถ่านหินจะมีข้อเสียคือทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น

ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2008) ได้กำหนดชนิดของวัสดุปอซโซลานเป็น 3 ชนิด ได้แก่

(1) ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ

(2) ชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ เถ้าลอยชนิด F มีปริมาณรวมของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำ สำหรับซิลิกามาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ เนื่องจากถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มีซิลิกาสูง

(3) ชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินซับบิทูมินัสและลิกไนต์เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณรวมของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง มีองค์ประกอบทางกายภาพตามข้อกำหนดของ

มาตรฐาน ASTM C618 และมีสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับอะลูมินามาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอะลูมินาต่ำ ทำให้เถ้าลอย Class C นอกจากมีซิลิกาต่ำแล้ว ยังมีปริมาณของอะลูมินาต่ำด้วย

2.6 เถ้าขานอ้อย

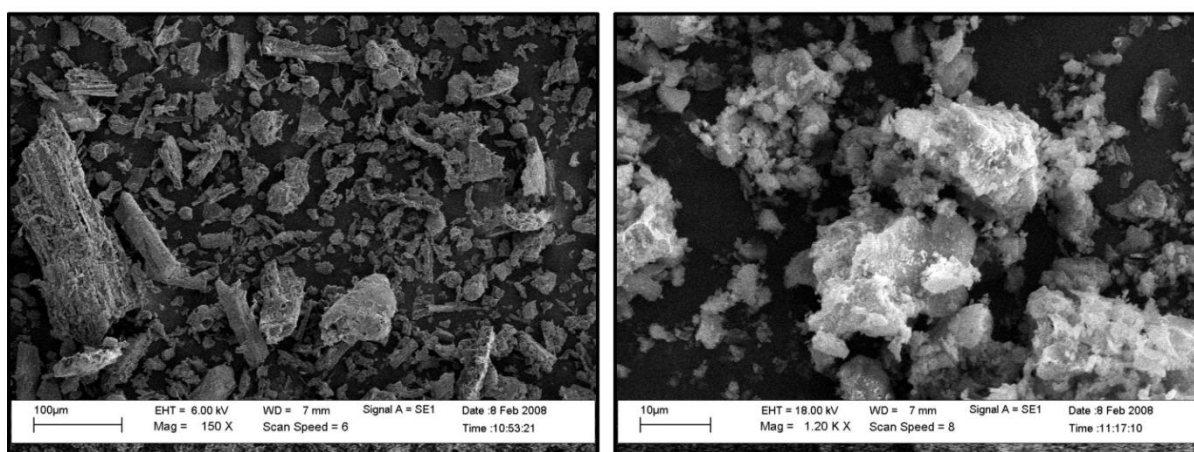
เถ้าขานอ้อยเป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลที่ได้จากการเผาขานอ้อยเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงาน โดยประเทศไทยผลิตอ้อยในปี 2552 ได้เป็นจำนวนทั้งหมด 68.5 ล้านตัน (Office of Cane and Sugar Board, 2010) เมื่อคำนวณโดยวิธีของ Cordeiro และคณะ (2004) จะได้เถ้าขานอ้อยหลังจากการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 427,700 ตันต่อปี โดยเถ้าขานอ้อยดังกล่าวนำมาใช้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้พื้นที่ในการจัดทิ้งเป็นบริเวณกว้าง และรอบๆ บริเวณพื้นที่จัดทิ้งยังได้รับผลกระทบจากฝุ่นละอองของเถ้าขานอ้อยอีกด้วย ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านศึกษาคุณสมบัติของเถ้าขานอ้อยเพื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต โดยพบว่าเถ้าขานอ้อยที่ละเอียดมีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี และการทำปฏิกิริยาของเถ้าขานอ้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกอนออกไซด์ที่ไม่เป็นผลึก สิ่งเจือปน ขนาดอนุภาค และความละเอียด นอกจากนี้ Chusilp และคณะ (2009) ยังพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมของเถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และยังพบอีกว่าการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดสามารถช่วยลดค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและลดการขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากซัลเฟตได้อีกด้วย



รูปที่ 2.4 กองขานอ้อย (รัฐพล สมนา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554)



รูปที่ 2.5 กองเถ้าขานอ้อย (รัฐพล สมนา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554)



รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าขานอ้อย (รัฐพล สมนา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kearsley (1996) ได้ทดสอบจำนวนตัวอย่างของระบบการบ่ม พบว่ากำลังสูงสุดของก้อนตัวอย่างโฟมคอนกรีตที่ได้จากการบ่มคือที่อุณหภูมิ 50 °C และตัวอย่างที่บ่มปิดผนึกไว้ในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิคงที่ 22 °C และได้ข้อสรุปว่าการทดสอบตัวอย่างโดยบ่มในน้ำพบว่าให้กำลังในระดับที่ต่ำ เนื่องจากโพรง (pore) ของโฟมคอนกรีตเกิด (build-up) แรงดันน้ำขึ้นในโครงสร้างจุลภาคที่อึดตัวเต็มที่ ดังนั้น จึงแนะนำว่าขึ้นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบของโฟมคอนกรีตจึงควรบ่มแบบปิดผนึกไว้ เช่น ห่อด้วยฟิล์มและเก็บไว้ในถุงพลาสติก รายละเอียดรูปแบบของระบบการบ่มนี้ประกอบด้วยขั้นตอนการทำก้อนตัวอย่างให้เปื่อยหลังจากการถอดแบบออกและก่อนห่อ แล้วเก็บตัวอย่างไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง

Khatib and Wild (1996) ศึกษาพบว่าปริมาณทรายที่ใช้ในส่วนผสมไม่ได้มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามผลการศึกษายังไม่ได้ปรากฏผลที่ชัดเจนเท่าใดนัก กำลังของโฟมคอนกรีตลดลงเล็กน้อยในช่วงอายุต้น อาจเป็นเพราะว่าส่วนผสมที่ประกอบด้วยสารซีเมนต์มีการอัดตัว (cementitious filler) มากกว่าการใช้ทรายเป็นส่วนผสมจำนวนหนึ่ง แต่กำลังของโฟมคอนกรีตยังคงเพิ่มขึ้น

อย่างต่อเนื่องเกิน 28 วัน เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ในขณะที่กำลังของโฟมคอนกรีตในระยะปลายไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

De Rose and Morris (1999) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ของโฟมคอนกรีตความหนาแน่นต่ำอาจมีค่าต่ำมากถึง 0.10 W/m.K ค่าที่ต่ำนี้ส่งผลดีต่อคุณสมบัติการเป็นวัสดุฉนวนของโฟมคอนกรีต ซึ่งต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่อยู่ระหว่าง $1.1\text{--}1.4 \text{ W/m.K}$ สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ จะเห็นว่าโฟมคอนกรีตมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าประมาณ 10 เท่า

Visagie (2000) ได้ศึกษาผลกระทบของโครงสร้างจุลภาคต่อคุณสมบัติของโฟมคอนกรีตทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าถ่าน (pozz-fill) ความหนาแน่น $700\text{--}1500 \text{ kg/m}^3$ โดยวิธี PRE-FORMED FOAM METHOD พบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่าน มีผลทำให้ช่องว่างอากาศ (air-void) กระจายตัวและมีขนาดเล็กลงตามระดับการแทนที่ของเถ้าถ่าน ขนาดช่องว่างอากาศยังสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กล่าวคือกำลังรับแรงอัดคอนกรีตมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องว่างอากาศที่ลดลง ทั้งนี้ขนาดช่องว่างอากาศมีอิทธิพลเฉพาะคอนกรีตที่มีความหนาแน่นแห้งต่ำกว่า $1,000 \text{ kg/m}^3$ เท่านั้น เนื่องจากคอนกรีตที่มีความหนาแน่นตั้งแต่ $1,000 \text{ kg/m}^3$ ขึ้นไป ช่องว่างอากาศมักกระจายอยู่ห่างกัน ดังนั้นอิทธิพลของช่องว่างอากาศจึงมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ลดลงตามสัดส่วนความหนาแน่นของคอนกรีต

Kearsley and Wainwright (2001) ได้รายงานเกี่ยวกับผลกระทบของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของโฟมคอนกรีตและการวิจัยเมื่อเร็ว ๆ นี้แสดงให้เห็นว่านอกจากจะเป็นการเพิ่มกำลังในช่วงอายุปลายแล้ว เถ้าลอยยังมีอิทธิพลทำให้การมีโครงสร้างของฟองที่สม่ำเสมอมากขึ้นในซีเมนต์เพสต์ซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างทางวิศวกรรมของคอนกรีต นอกจากนี้การทดสอบการซึมผ่านน้ำ (water permeability) ก่อนตัวอย่างของโฟมคอนกรีตตามวิธีของสมาคมคอนกรีต (Concrete Society) ปี 1988 เนื่องจากการแตกต่างในการจัดเตรียมและการทดสอบชิ้นงาน จึงเป็นการยากที่จะทำการเปรียบเทียบโดยตรงได้ แต่ดูเหมือนว่าการทดสอบการซึมผ่านน้ำของโฟมคอนกรีตทั้งสามชนิด ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสม ซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์กับเถ้าลอย และซีเมนต์กับทราย มีค่าสูงประมาณ 100 เท่า ซึ่งมากกว่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตปกติ

Kearsley and Wainwright (2002) รายงานว่า เถ้าลอย (fly ash) มักจะใช้เป็นส่วนผสมในโฟมคอนกรีตในระดับที่สูงถึง 80% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์เพื่อเป็นการลดต้นทุน เพิ่มความสามารถเทได้และเพิ่มความแข็งแรงในระยะยาวของโฟมคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อหล่อคอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำ และจะเป็นการลดอัตราผลลัพธ์ของความแข็งแรงจากการเพิ่มปริมาณในส่วนผสมของเถ้าลอย เพราะว่าเถ้าลอยมีความละเอียดที่เพิ่มขึ้นด้วยเหตุนี้จึงมีพื้นที่ผิว (surface area) มาก สำหรับความสามารถเทได้เท่ากัน (equivalent workability) ของโฟมคอนกรีตทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยจะมีความต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมทรายจำนวนหนึ่ง

Jones and Mc Carthy (2005) พบว่า การที่โฟมคอนกรีตมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์ (cellular structure) อากาศส่งผลดีทำให้มีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งมักจะอยู่ระหว่าง 5%–30% ของคอนกรีตน้ำหนักปกติ ในแง่ของการปฏิบัตินั้นชิ้นส่วนคอนกรีตน้ำหนักปกติจะต้องมีความหนามากกว่าของโฟมคอนกรีตถึง 5 เท่า จึงจะมีความเป็นฉนวนกันความร้อนเทียบเท่ากันได้

Nambiar and Ramamurthy (2007) ศึกษา กำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีตพบว่ามีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของโฟม (foam) และประเภทของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ และโฟมคอนกรีตกำลังสูงโดยทั่วไปสามารถทำได้เมื่อฟองอากาศมีขนาดเล็กอย่างสม่ำเสมอและเมื่อใช้กับสารลดแรงตึงผิวชนิดโปรตีน หลังจากนั้นจากการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพของสารเพิ่มฟองสามารถให้เหตุผลได้ว่าสารลดแรงตึงผิวชนิด

โปรตีนมีความสามารถในการเกาะติดกับน้ำและทำให้ใช้ได้ดีกับซีเมนต์มอร์ตาร์ในอัตราความสูญเสียการยุบตัวของฟองอากาศที่ต่ำมาก

Chindaprasirt and Rattanasak (2011) รายงานว่าการหดตัวแห้งนั้นสามารถลดลงได้ด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยการใส่เถ้าลอยและทรายในส่วนผสมและลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ w/c ประมาณ 0.5 สารเพิ่มฟองจำพวก Glycol ยังได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อลดการหดตัวแห้งของโพรคอนกรีต ดังนั้นสารดังกล่าวก่อนที่จะถูกนำมาใช้ให้แน่ใจว่าสามารถเติมเต็มโพรงหรือช่องว่าง (cavity) อย่างสมบูรณ์ได้นอกจากนี้ยังพบว่า การหดตัวมักจะเกิดขึ้นภายในช่วงอายุไม่เกิน 28 วันหรืออยู่ในช่วงของการหล่อ (casting) นอกจากนี้การวัดการดูดซึมน้ำของตัวอย่างโพรคอนกรีตที่แช่น้ำทั้งหมดบ่งบอกพฤติกรรมที่คล้ายกันและระดับการดูดซึมน้ำสำหรับส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทรายและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เถ้าลอย พบว่าส่วนผสมทั้งสองประเภทนี้มีอัตราการดูดซึมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามช่วงเวลาของการแช่น้ำ

Esmaily and Nuranian (2012) ได้ศึกษาเซลล์ลู่ล่าคอนกรีตกำลังสูงแบบไม่อบไอน้ำ (non-autoclaved) ทำจากตะกรันเตาถลุงเหล็ก (slag) โดยใช้ด่างกระตุ้นด้วยโซเดียมซิลิเกต จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายอิทธิพลของโครงสร้างโพรงอากาศภายในที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ออปติคอลที่มีความละเอียดสูง พบว่าการกระจายขนาดโพรงอากาศเป็นแบบเซลล์ลู่ล่า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กล่าวคือคอนกรีตที่ให้กำลังรับแรงอัดค่อนข้างสูง ลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศมักมีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

Ganesan et al. (2007) ศึกษาหาปริมาณเถ้าขานออยที่เหมาะสมในการแทนที่สารซีเมนต์โดยนำเถ้าขานออยจากโรงงานน้ำตาลมาเผาเพิ่มที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นมีขนาดอนุภาค 5.4 ไมโครเมตร แทนที่ในสารซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ทำการทดสอบ ความชื้นเหลว และเวลาก่อตัวของซีเมนต์ผสม กำลังอัดของซีเมนต์ผสม กำลังอัดและกำลังดึงแยกของคอนกรีต การดูดซึมน้ำ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ทดสอบปริมาตรของโพรงในคอนกรีต การแพร่ของคลอไรด์ และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ ผลการทดสอบพบว่า เวลาก่อตัวมีค่ามากขึ้นที่ระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าขานออยที่การแทนที่ 0-20 มีค่าสูงกว่าซีเมนต์ควบคุม ส่วนการแทนที่สูงกว่าร้อยละ 20 มีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อย กำลังอัดของคอนกรีตมีผลคล้ายกับซีเมนต์ผสม กำลังดึงแยกที่การแทนที่ร้อยละ 0-20 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม การทดสอบปริมาตรของโพรง ทุกระดับการแทนที่มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม แต่การแทนที่ร้อยละ 25 และ 30 มีค่าใกล้เคียง แต่จะลดลงอย่างชัดเจนที่อายุ 90 วัน การแทรกซึมของคลอไรด์ ที่การแทนที่มากขึ้นจะมีการแทรกซึมน้อยลงตามลำดับ ยกเว้นที่ร้อยละ 30 จะมีค่าสูงแต่น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม จากการวิจัยนี้สรุปได้ว่าการแทนที่ ร้อยละ 20 เป็นค่าที่เหมาะสมในปริมาณการแทนที่มากที่สุด และให้ผลในการทดสอบดีที่สุด

Singh, Singh and Rai (2000) ศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าขานออยผสมปูนซีเมนต์ ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน โดยแทนที่สารซีเมนต์ด้วยเถ้าขานออยร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักสารซีเมนต์ ผลการทดสอบพบว่า ความชื้นเหลวของสารซีเมนต์ที่เพิ่มเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเถ้าขานออยเนื่องจากพื้นที่ผิวของเถ้าขานออยที่เพิ่มขึ้น แล้วพบอีกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าขานออยที่ไม่เผาในช่วงแรกมีค่าต่ำ ในกรณีที่ผสมเถ้าขานออย ปูนขาวอิสระ (free lime) เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนที่การแทนที่ร้อยละ 20 ปูนขาวอิสระเพิ่มขึ้นถึง 3 วันหลังจากนั้นจะลดลง ผลนี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าขานออยสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ โดยจะลดปูนขาวอิสระ เพื่อมาทำปฏิกิริยาปอซโซลานโดยปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เมื่อผสมเถ้าขานออยจะน้อยกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 10 เนื่อง

จากเถาขานอ้อยเป็นผลให้กำลังอัดสูงกว่าตัวควบคุม เนื่องจากความละเอียดของเถาขานอ้อยจะแบ่งขนาดของโพรงให้เล็กลง นอกจากนี้ยังเป็นผลของปฏิกิริยาปอซโซลานรวมด้วย นอกจากนี้การทดสอบการขยายตัวเนื่องจากซัลฟูริก (H_2SO_4) ยังพบว่าการผสมเถาขานอ้อยช่วยต้านทานการกัดกร่อนได้ รวมถึงลดการซึมผานด้วย

Nambiar and Ramamurthy (2007) ได้ทำการศึกษาถึงคุณลักษณะเฉพาะของช่องว่างในเนื้อโฟมคอนกรีต ซึ่งผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 600-1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถให้กำลังรับแรงอัด 20-140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากผลการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์พบว่า ขนาด ปริมาณ ระยะห่างของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตมีผลต่อกำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา เมื่อฟองอากาศมีขนาดใหญ่จะทำให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าฟองขนาดเล็ก ปริมาณฟองอากาศในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นมีผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงเป็นผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาลดลง ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติด้านอื่นๆของคอนกรีตมวลเบาด้วย

สำเริง รักซ้อน และคณะ (2557) พัฒนานวัตกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสด้วยการใช้วัสดุเหลือทิ้งโดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษากำลังอัด กำลังดึงแยก กำลังดัด และดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสโดยการใส่เถาขานอ้อยและเถาขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 0, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การทดสอบแสดงให้เห็นว่า เถาขานอ้อยและเถาขานอ้อยสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยกำลังอัด กำลังดึงแยก กำลังดัดสูง และดูดซึมน้ำต่ำ วัสดุปอซโซลานสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในปริมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน นอกจากนี้ ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า เถาขานอ้อยและเถาขานอ้อยใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสให้กำลังอัด กำลังดึงแยก กำลังดัด และการดูดซึมน้ำในทิศทางที่ดี

Syed M.S. Kazmi, Safeer Abbas, Muhammad A. Saleem, Muhammad J. Munir, Anwar Khitab (2016) ศึกษาการผลิตอิฐจากดินเหนียวด้วยการใช้เถาขานอ้อยในส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของอิฐที่มีการใช้เถาขานอ้อยในส่วนผสมจะมีการกำลังอัดต่ำกว่าที่ไม่มีการใช้เถาขานอ้อยในส่วนผสม อย่างไรก็ตามการแทนที่เถาขานอ้อยในดินเหนียวเพื่อผลิตอิฐร้อยละ 5 สามารถให้กำลังอัดได้ตามมาตรฐานการผลิตอิฐของประเทศปากีสถาน ซึ่งผลการทดสอบด้านกำลังอัดมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคของอิฐ

Natt Makul, Gritsada Sua-iam (2016) ศึกษาการใช้ประโยชน์กากขานอ้อยในการผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลส ในการศึกษาครั้งนี้จะแทนที่กากขานอ้อยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และออกแบบหน่วยน้ำหนักของมวลเบาแบบเซลลูโลส เท่ากับ 900, 1000 และ 1100 kg/m^3 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ทุกอัตราส่วนผสม โดยศึกษาระยะเวลาการก่อตัวกำลังอัด กำลังดัด การหดตัวแห้ง ขนาดโพรงและดูดซึมน้ำ ค่าการนำความร้อน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมทุกส่วนผสมที่ดำเนินการผสมได้ค่าหน่วยน้ำหนักตามที่ออกแบบไว้ ส่วนผสมที่มีการแทนที่เถาขานอ้อย พบว่า กำลังอัด กำลังดัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่เถาขานอ้อย การแทนที่เถาขานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถให้ค่าที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับส่วนผสมควบคุม จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าเถาขานอ้อยสามารถใช้ผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลสได้เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เหมาะสม

พัชรพล โพธิ์ศรี (2552) ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มวลเบาแบบเซลลูโลส โดยใช้เถาขานอ้อย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต และบ่มโดยใช้อุณหภูมิ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด และ

ความหนาแน่นของวัสดุอีโพลิเมอร์มวลเบา โดยมีตัวแปรที่ศึกษาต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนของของเหลวต่อเถ้าลอย อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนของทรายต่อเถ้าลอย ปริมาณร้อยละของโฟมโดยมวล และอุณหภูมิสำหรับการบ่ม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของของเหลวต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.7 อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนของทรายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 2.75 ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างด้วยความร้อน 1 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40°C 1 วันตามด้วยการบ่มที่ 60°C 2 วัน ปริมาณร้อยละของโฟมโดยมวลเท่ากับ 3% ทำให้ได้วัสดุอีโพลิเมอร์มอร์ตาร์มวลเบาเหมาะสมสำหรับงานโครงสร้าง จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุอีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตได้เท่ากับ 185 กก./ตร.ซม. และความหนาแน่นเท่ากับ 1,760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

Cherdsak Suksiripattanapong, Suksun Horpibulsuk, Surachet Boongrasan, Artit Udomchai, Avirut Chinkulkijniwat, Arul Arulrajah (2015) ศึกษาหน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และโครงสร้างทางจุลภาคของมวลเบาแบบเซลลูโลสอีโพลิเมอร์จากกากตะกอนประปา-เถ้าลอย การศึกษาพบว่า ของเหลวที่ LL คือสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลสอีโพลิเมอร์จากกากตะกอนประปา-เถ้าลอย สำหรับทุกสัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และปัจจัยของการบ่ม ซึ่งสามารถให้กำลังสูงสุด อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของเหลวมากกว่า LL จะไม่เหมาะสมด้านของราคาต้นทุนในการผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลสอีโพลิเมอร์จากกากตะกอนประปา-เถ้าลอย จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า กากตะกอนประปาสามารถใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลสอีโพลิเมอร์ได้ ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสมจากการเหลือทิ้ง

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ถ้ำซานอ้อย เป็นวัสดุผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล อำเภอครบุรี จังหวัดนครราชสีมา จะถูกบดด้วยเครื่องบดเพื่อปรับขนาดของถ้ำซานให้เล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การบดถ้ำซานอ้อย

3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

3.1.3 ถ้ำลอย เป็นวัสดุผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3.1.4 ทราชน้ำ จากอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา

3.1.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.1.6 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

3.1.7 สารกระจายเพิ่มฟองอากาศ



รูปที่ 3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.3 สารกระจายเพิ่มฟองอากาศ ยี่ห้อ Sikaporo-40

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในผสมมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

- 3.2.1 โม่ผสมคอนกรีต ยี่ห้อ Baton Mixer ที่ความรอบ 16 รอบต่อนาที
- 3.2.2 เครื่องผลิตโฟมเหลวคงรูป (foam generator)
- 3.2.3 เครื่องปั๊มลม
- 3.2.4 เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.1 กรัม



รูปที่ 3.4 โม่ผสมคอนกรีต



รูปที่ 3.5 เครื่องผลิตโฟมเหลวคงรูป (foam generator)



รูปที่ 3.6 เครื่องปั๊มลม



รูปที่ 3.7 เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.1 กรัม

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุตั้งต้น

ผู้วิจัยจะทำการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของวัตถุดิบทั้งหมด ได้แก่ เถ้าขานอ้อย เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 และทราย คุณสมบัติพื้นฐานประกอบด้วย การกระจายขนาดของวัสดุ ความถ่วงจำเพาะ รูปถ่ายขยายอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุตั้งต้นจะนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลล์จากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อไป

3.3.1 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเถ้าขานอ้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย เพื่อหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุตั้งต้น การทดสอบดำเนินการเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C188 (2003)

3.3.2 การทดสอบหาค่าความละเอียดของเถ้าขานอ้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย ด้วยวิธีของเบลน (Blaine method) ใช้วัดพื้นที่ผิวของอนุภาค อาศัยหลักการของการอากาศไหลผ่านชั้นวัสดุทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C204 (2007)

3.3.3 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทราย เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพต่าง ๆ ของมวลรวมละเอียดโดยเฉพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (Absorption) ของมวลรวมละเอียด และนำค่าไปออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ การทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C128 (2007)

3.3.4 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของทราย เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักของทราย การทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C29 (2007)

3.3.5 การทดสอบการกระจายขนาดของวัสดุตั้งต้น ผงของวัสดุตั้งต้นจะผ่านการทดสอบการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค (particle size analyzer) ด้วยเครื่องยี่ห้อ Malvern, Mastersizer 3000 ซึ่งเครื่องมือวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคในระดับจุลภาค (micro) โดยอาศัยหลักการกระเจิงและการเลี้ยวเบนของแสงโดยใช้ Helium-neon laser เป็นแหล่งกำเนิดแสง กล่าวคือเมื่อมีแสงตกกระทบกับอนุภาคบางส่วน จะถูกดูดกลืนและส่วนเลี้ยวเบนบางส่วนทะลุผ่านออกไป ทำให้เกิดการสอดแทรก Scattering pattern ด้วยความเข้มของแสงต่างๆ อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะสามารถทำให้มุมที่แสงมีการเลี้ยวเบนเป็นมุมกว้างกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ การวัดปริมาตรถูกควบคุมด้วยความกว้างของ Laser beam (ขนาด 10–25 mm) และความ

ยาวของทางเดิน Sample cell สามารถวัดการกระจายขนาดของอนุภาคได้จาก Scattering โดยสามารถวัดขนาดอนุภาคได้ในช่วง 0.04–2,000 μm มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 5%

3.3.6 การทดสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุตั้งต้น การทดสอบโดยการนำผงของวัสดุตั้งต้นผ่านเครื่องการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (crystalline pattern phase) ของวัสดุโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึก โดยดำเนินการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bruker รุ่น X8APEX และสแกนที่มุมระหว่าง 5-60 องศา

3.3.7 การหาค่าองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น การทดสอบโดยการนำผงของวัสดุตั้งต้นผ่านเครื่องวิเคราะห์ X-ray fluorescence หรือ XRF โดยการนำผงวัสดุตั้งต้นทาบบนเทปด้านที่เป็นกาวบนแผ่นเฟรมที่เตรียมไว้ ใช้ฟุ้งที่สะอาดเกลี่ยผงตัวอย่างให้ติดบนเทปเป็นชั้นบางอย่างสม่ำเสมอ ทำความสะอาดแผ่นตัวอย่างให้เรียบร้อย ตรวจสอบความสม่ำเสมอของแผ่นตัวอย่าง แล้วจึงใช้เทปใสปิดทับตัวอย่าง เพื่อกันไม่ให้ผงหลุดออกจากแผ่นเฟรม จากนั้นนำไปทดสอบ ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence analysis (XRF)

3.3.8 การทดสอบลักษณะรูปร่างของวัสดุตั้งต้น การทดสอบโดยการนำผงของวัสดุตั้งต้นเข้าเครื่องถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนหรือส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM) เพื่อที่จะนำภาพถ่ายขยายของอนุภาค (Scanning electron microscopy) มาวิเคราะห์ โดยดำเนินการถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงด้วยเครื่อง JSM-6460LA model Scanning Electron Microscope (JEOL)

3.4 การออกแบบอัตราส่วนผสมของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การออกแบบส่วนผสมของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปรับปรุงจากมาตรฐาน ASTM C796 (2004) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 กำหนดหน่วยน้ำหนักของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ต้องการ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ความหนาแน่นเท่ากับ $1,000 \text{ kg/m}^3$ (ρ_{CLGC})

3.4.2 กำหนดปริมาณวัสดุประสานที่ใช้ในการผสมต่อครั้ง (ใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์)

3.4.3 คำนวณหาน้ำหนักของทรายที่ต้องใช้จากอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่กำหนดไว้ โดยในการศึกษาครั้งนี้ดำเนินการแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00, 2.00 และ 3.00

3.4.4 คำนวณหาน้ำหนักของเหลวที่ต้องใช้จากอัตราส่วนของเหลว (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต) ต่อวัสดุประสานที่กำหนดไว้ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้กำหนดอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

3.4.5 คำนวณหาปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสมจากปริมาณน้ำหนักของเหลวทั้งหมดจากขั้นตอน 3.4.4 โดยในการศึกษาครั้งนี้กำหนดอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0

3.4.6 คำนวณหาปริมาตรเนื้อแท้ของวัสดุผสมทั้งหมด, V_T

$$V_T = V_{BA} + V_{PC} + V_{FA} + V_{RS} + V_{NH} + V_{NS} \quad (3.1)$$

เมื่อ V_{BA} คือ ปริมาตรเนื้อแท้ของเก้าชานอ้อย (m^3)
 V_{PC} คือ ปริมาตรเนื้อแท้ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (m^3)
 V_{FA} คือ ปริมาตรเนื้อแท้ของเถ้าลอย (m^3)
 V_{RS} คือ ปริมาตรเนื้อแท้ของทราย (m^3)
 V_{NH} คือ ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (m^3)
 V_{NS} คือ ปริมาตรสารละลายโซเดียมซิลิเกต (m^3)

และ
$$V = \frac{M}{G\rho_w} \quad (3.2)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรเนื้อแท้ของวัสดุ (m^3)
 M คือ น้ำหนักของวัสดุ (kg)
 G คือ ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ของวัสดุ
 ρ_w คือ ความหนาแน่นที่ของน้ำ (kg/m^3)

3.4.7 คำนวณหาปริมาตรอากาศที่ต้องการ, V_A

$$V_A = \left(\frac{M_T}{\rho_{CLGC}} \right) - V_T \quad (3.3)$$

เมื่อ M_T คือ น้ำหนักของวัสดุทั้งหมด (kg)
 ρ_{CLGC} คือ ความหนาแน่นที่ต้องการ (kg/m^3)

3.4.8 คำนวณหาน้ำหนักฟองโฟมเหลวหลังการขยายตัว, M_{F+W}

$$M_{F+W} = V_A \rho_F \quad (3.4)$$

เมื่อ ρ_F คือ ความหนาแน่นที่ของฟองโฟม (kg/m^3)

3.4.9 คำนวณหาปริมาณน้ำยาโฟมที่ใช้, M_F

$$M_F = \frac{M_{F+W}}{(W/F) + 1} \quad (3.5)$$

เมื่อ W/F คือ อัตราส่วนน้ำต่อน้ำยาโฟม

3.4.10 คำนวณหาปริมาณน้ำสำหรับผสมน้ำยาโฟม, M_w

$$M_w = M_{F+W} - M_F \quad (3.6)$$

3.4.11 ปรับแก้อัตราส่วนผสม เนื่องจากความชื้นของเก้าชานอ้อยและทราย

3.4.12 คำนวณส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนผสมดังแสดงในรูปที่ 3.7

3.4.13 ทดลองผสมเพื่อตรวจสอบหน่วยน้ำหนักเปียก โดยในการตรวจสอบหน่วยน้ำเปียกจะควบคุมไม่ให้เกิน $\pm 50 \text{ kg/m}^3$

การออกแบบส่วนผสม มวลเบาแบบเซลล์จากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยและปูนซีเมนต์									
ขั้นตอนที่ 1: ความหนาแน่นเบี่ยงที่ต้องการ :		1.000 กก/ม ³(1)							
ขั้นตอนที่ 2: วัสดุและส่วนผสมที่ต้องการ :									
ความถ่วงจำเพาะของเถ้าขานอ้อย =		2.25	↓	(2)					
ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย =		2.67	↓	(3)					
ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ =		3.15	↓	(4)					
ความถ่วงจำเพาะของทราย =		2.65	↓	(5)					
ความหนาแน่นของสารเพิ่มฟอง =		50	↓	กก/ม ³(6)					
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน =		0.50	↓	(7)					
อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน =		1.00	↓	(8)					
อัตราส่วนน้ำปะปัดต่อสารเพิ่มฟอง =		40	↓	(9)					
ปริมาณการขยายตัวของสารเพิ่มฟอง =		26	↓	(10)					
ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ =		15 Molar	↓	(11)					
ความถ่วงจำเพาะของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ =		1.43	↓	(12)					
อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ =		1.0	↓	(13)					
ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าขานอ้อย =		20	↓	%(14)					
ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในเถ้าขานอ้อย =		0	↓	%(15)					
ขั้นตอนที่ 3: จำนวนปริมาณของวัสดุที่ต้องการ :									
ปริมาณของวัสดุตั้งต้นที่ต้องการ =		500.00	↓	กก.					
เถ้าขานอ้อย =		400.00	↓	กก.	(16)	ปริมาตรของเถ้าขานอ้อย =	0.17778	↓	ม ³(23)
เถ้าลอย =		0.00	↓	กก.	(17)	ปริมาตรของเถ้าลอย =	0.00000	↓	ม ³(24)
ปูนซีเมนต์ =		100.00	↓	กก.	(18)	ปริมาตรของปูนซีเมนต์ =	0.03175	↓	ม ³(25)
ทราย =		500.00	↓	กก.	(19)	ปริมาตรของทราย =	0.18868	↓	ม ³(26)
สารละลายโซเดียมซิลิเกต =		141.13	↓	กก.	(20)	ปริมาตรของโซเดียมซิลิเกต =	0.09504	↓	ม ³(27)
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ =		141.13	↓	กก.	(21)	ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ =	0.09869	↓	ม ³(28)
รวมทั้งหมด =		1282.27	↓	กก.	(22)	ปริมาตรทั้งหมด =	0.59194	↓	ม ³(29)
ขั้นตอนที่ 4: จำนวนปริมาตรของอากาศที่ต้องการ (โพและน้ำ) :									
ปริมาตรของอากาศที่ต้องการ [(22)/(1)]-(29) =		0.6903	↓	ม ³	(30)	1.2823	↓	ม ³	
น้ำหนักของสารเพิ่มฟองหลังการขยายตัว (30)*(6) =		34.5165	↓	กก.	(31)				
น้ำหนักของสารเพิ่มฟอง (31)/[(9)+1] =		0.8419	↓	กก.	(32)				
น้ำหนักของน้ำปะปาดสำหรับผสมกับสารเพิ่มฟอง (31)-(32) =		33.6746	↓	กก.	(33)				
ขั้นตอนที่ 5ก: การปรับส่วนผสมเนื่องด้วยการดูดซึมน้ำของเถ้าขานอ้อย :		Dry	↓						
ค่าการดูดซึมน้ำของเถ้าขานอ้อยก่อนการผสม =		0.00	↓	%	(34)				
ค่าการดูดซึมน้ำของเถ้าขานอ้อย (เช่น 24 ชั่วโมง) =		22.00	↓	%	(35)				
ปริมาณการเพิ่ม/ลดของเถ้าขานอ้อย =		88.00	↓	กก.	(36)				
ปริมาณการเพิ่ม/ลดของสารละลาย =		88.00	↓	กก.	(37)				
ขั้นตอนที่ 5ข: การปรับส่วนผสมเนื่องด้วยการดูดซึมน้ำของทราย :		Dry	↓						
ค่าการดูดซึมน้ำของทรายก่อนการผสม =		0.00	↓	%	(38)				
ค่าการดูดซึมน้ำของทราย (อิมั้วผิวแห้ง) =		1.50	↓	%	(39)				
ปริมาณการเพิ่ม/ลดของทราย =		7.50	↓	กก.	(40)				
ปริมาณการเพิ่ม/ลดของสารละลาย =		7.50	↓	กก.	(41)				
ขั้นตอนที่ 6: สรุปส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร :									
เถ้าขานอ้อย =		243.32	↓	กก.		ปริมาตรที่ต้องการผสมต่อ 1 ครั้ง (ม ³)		0.016	
เถ้าลอย =		0.00	↓	กก.		เถ้าขานอ้อย =		3893	กรัม
ปูนซีเมนต์ =		77.99	↓	กก.		เถ้าลอย =		0	กรัม
ทราย =		384.09	↓	กก.		ปูนซีเมนต์ =		1248	กรัม
สารละลายโซเดียมซิลิเกต =		110.07	↓	กก.		ทราย =		6145	กรัม
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ =		110.07	↓	กก.		สารละลายโซเดียมซิลิเกต =		1761	กรัม
น้ำปะปาดสำหรับผสมกับวัสดุประสาน =		74.48	↓	กก.		สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ =		1761	กรัม
สารเพิ่มฟอง =		0.66	↓	กก.		น้ำปะปาดสำหรับผสมกับวัสดุประสาน =		1192	กรัม
น้ำปะปาดสำหรับผสมกับสารเพิ่มฟอง =		26.26	↓	กก.		สารเพิ่มฟอง =		17.33	กรัม
						น้ำปะปาดสำหรับผสมกับสารเพิ่มฟอง =		693	กรัม

รูปที่ 3.8 Excel สำหรับออกแบบส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลล์จากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.5 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

งานวิจัยได้กำหนดสัญลักษณ์ของส่วนผสมบล็อกเชื่อมมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อย จีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในสมการที่ 3.7

11LB22SB33M44BA55PC66FA

(3.7)

เมื่อ	11	คือ	ปริมาณของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน
	LB	คือ	หน่วยของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน
	22	คือ	ปริมาณของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน
	SB	คือ	อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน
	33	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)
	M	คือ	หน่วยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
	44	คือ	ปริมาณการใช้เถ้าขานอ้อยโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
	BA	คือ	เถ้าขานอ้อย
	55	คือ	ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าขานอ้อยโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
	PC	คือ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
	66	คือ	ร้อยละการแทนที่เถ้าลอยในเถ้าขานอ้อยโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
	FA	คือ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตัวอย่างในการอ่านสัญลักษณ์ เช่น 0.5LB1.0SB10M70BA30PC0FA หมายถึง มวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ที่มีการผลิตจากอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าขานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุ

3.6 ส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

หลังจากการออกแบบส่วนผสมมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากรูปที่ 3.8 จะสามารถสรุปอัตราส่วนผสมได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

No.	Mixes	BA (g)	FA (g)	PC (g)	Fine Agg. (g)	NaOH (g)			Na ₂ SiO ₃ (g)	Tap Water with Binders (g)	Foam Agent (g)	Tap Water (g)
						5M	10M	15M				
1	0.50LB1.0SB5M80BA20PC	4608	-	1280	6304	1600	-	-	1600	608	15	613
2	0.50LB1.0SB5M80BA20FA	4608	1280	-	6304	1600	-	-	1600	608	15	607
3	0.50LB1.0SB5M80BA10PC10FA	4608	640	640	6304	1600	-	-	1600	608	15	610
4*	0.50LB1.0SB5M70BA30PC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0.50LB1.0SB5M70BA30FA	4032	1920	-	6304	1600	-	-	1600	544	15	611
6	0.50LB1.0SB5M70BA15PC15FA	4032	960	960	6304	1600	-	-	1600	544	15	615
7*	0.50LB1.0SB5M60BA40PC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0.50LB1.0SB5M60BA40FA	3456	2560	-	6304	1600	-	-	1600	480	15	614
9	0.50LB1.0SB5M60BA20PC20FA	3456	1280	1280	6304	1600	-	-	1600	480	15	619
10	0.50LB2.0SB5M80BA20PC	3291	-	914	8965	1143	-	-	1143	503	16	644
11	0.50LB2.0SB5M80BA20FA	3291	914	-	8965	1143	-	-	1143	503	16	640
12	0.50LB2.0SB5M80BA10PC10FA	3291	457	457	8965	1143	-	-	1143	503	16	642
13*	0.50LB2.0SB5M70BA30PC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	0.50LB2.0SB5M70BA30FA	2880	1371	-	8965	1143	-	-	1143	457	16	642
15	0.50LB2.0SB5M70BA15PC15FA	2880	686	686	8965	1143	-	-	1143	457	16	645
16*	0.50LB2.0SB5M60BA40PC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	0.50LB2.0SB5M60BA40FA	2469	1829	-	8965	1143	-	-	1143	411	16	645
18	0.50LB2.0SB5M60BA20PC20FA	2469	914	914	8965	1143	-	-	1143	411	16	648
19	0.50LB3.0SB5M80BA20PC	2560	-	711	10423	889	-	-	889	444	17	661
20	0.50LB3.0SB5M80BA20FA	2560	711	-	10423	889	-	-	889	444	16	658
21	0.50LB3.0SB5M80BA10PC10FA	2560	356	356	10423	889	-	-	889	444	16	660
22*	0.50LB3.0SB5M70BA30PC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	0.50LB3.0SB5M70BA30FA	2240	1067	-	10423	889	-	-	889	409	16	660
24	0.50LB3.0SB5M70BA15PC15FA	2240	533	533	10423	889	-	-	889	409	17	662
25*	0.50LB3.0SB5M60BA40PC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	0.50LB3.0SB5M60BA40FA	1920	1422	-	10423	889	-	-	889	373	17	662
27	0.50LB3.0SB5M60BA20PC20FA	1920	711	711	10423	889	-	-	889	373	17	665
28	0.50LB1.0SB10M80BA20PC	4542	-	1262	6202	-	1692	-	1692	599	15	619
29	0.50LB1.0SB10M80BA20FA	4542	1262	-	6202	-	1692	-	1692	599	15	614
30	0.50LB1.0SB10M80BA10PC10FA	4542	631	631	6202	-	1692	-	1692	599	15	616
31	0.50LB1.0SB10M70BA30PC	3974	-	1892	6202	-	1692	-	1692	536	16	625
32	0.50LB1.0SB10M70BA30FA	3974	1892	-	6202	-	1692	-	1692	536	15	617
33	0.50LB1.0SB10M70BA15PC15FA	3974	946	946	6202	-	1692	-	1692	536	16	621
34	0.50LB1.0SB10M60BA40PC	3406	-	2523	6202	-	1692	-	1692	473	16	631
35	0.50LB1.0SB10M60BA40FA	3406	2523	-	6202	-	1692	-	1692	473	16	620
36	0.50LB1.0SB10M60BA20PC20FA	3406	1262	1262	6202	-	1692	-	1692	473	16	635
37	0.50LB2.0SB10M80BA20PC	3257	-	905	8843	-	1214	-	1214	498	16	648
38	0.50LB2.0SB10M80BA20FA	3257	-	905	8843	-	1214	-	1214	498	16	644
39	0.50LB2.0SB10M80BA10PC10FA	3257	452	452	8843	-	1214	-	1214	498	16	646
40	0.50LB2.0SB10M70BA30PC	2850	-	1357	8843	-	1214	-	1214	452	16	652
41	0.50LB2.0SB10M70BA30FA	2850	1357	-	8843	-	1214	-	1214	452	16	647
42	0.50LB2.0SB10M70BA15PC15FA	2850	679	679	8843	-	1214	-	1214	452	16	649
43	0.50LB2.0SB10M60BA40PC	2443	-	1810	8843	-	1214	-	1214	407	16	656
44	0.50LB2.0SB10M60BA40FA	2443	1810	-	8843	-	1214	-	1214	407	16	649
45	0.50LB2.0SB10M60BA20PC20FA	2443	905	905	8843	-	1214	-	1214	407	16	653
46	0.50LB3.0SB10M80BA20PC	2539	-	705	10349	-	946	-	946	441	17	664
47	0.50LB3.0SB10M80BA20FA	2539	705	-	10349	-	946	-	946	441	17	661
48	0.50LB3.0SB10M80BA10PC10FA	2539	353	353	10349	-	946	-	946	441	17	663
49	0.50LB3.0SB10M70BA30PC	2222	-	1058	10349	-	946	-	946	406	17	668
50	0.50LB3.0SB10M70BA30FA	2222	1058	-	10349	-	946	-	946	406	17	663
51	0.50LB3.0SB10M70BA15PC15FA	2222	529	529	10349	-	946	-	946	406	17	665
52	0.50LB3.0SB10M60BA40PC	1905	-	1411	10349	-	946	-	946	370	17	671
53	0.50LB3.0SB10M60BA40FA	1905	1411	-	10349	-	946	-	946	370	17	665
54	0.50LB3.0SB10M60BA20PC20FA	1905	705	705	10349	-	946	-	946	370	17	668

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ต่อ)

No.	Mixes	BA (g)	FA (g)	PC (g)	Fine Agg. (g)	NaOH (g)			Na ₂ SiO ₃ (g)	Tap Water with Binders (g)	Foam Agent (g)	Tap Water (g)
						5M	10M	15M				
55	0.50LB1.0SB15M80BA20PC	4492	-	1248	6144	-	-	1761	1761	593	16	624
56	0.50LB1.0SB15M80BA20FA	4492	1248	-	6144	-	-	1761	1761	593	15	619
57	0.50LB1.0SB15M80BA10PC10FA	4492	624	624	6144	-	-	1761	1761	593	16	621
58	0.50LB1.0SB15M70BA30PC	3931	-	1872	6144	-	-	1761	1761	530	16	630
59	0.50LB1.0SB15M70BA30FA	3931	1872	-	6144	-	-	1761	1761	530	16	622
60	0.50LB1.0SB15M70BA15PC15FA	3931	936	936	6144	-	-	1761	1761	530	16	626
61	0.50LB1.0SB15M60BA40PC	3369	-	2496	6144	-	-	1761	1761	468	16	635
62	0.50LB1.0SB15M60BA40FA	3369	2496	-	6144	-	-	1761	1761	468	16	625
63	0.50LB1.0SB15M60BA20PC20FA	3369	1248	1248	6144	-	-	1761	1761	468	16	630
64	0.50LB2.0SB15M80BA20PC	3232	-	898	8797	-	-	1267	1267	494	16	651
65	0.50LB2.0SB15M80BA20FA	3232	898	-	8797	-	-	1267	1267	494	16	648
66	0.50LB2.0SB15M80BA10PC10FA	3232	449	449	8797	-	-	1267	1267	494	16	650
67	0.50LB2.0SB15M70BA30PC	2828	-	1347	8797	-	-	1267	1267	449	16	656
68	0.50LB2.0SB15M70BA30FA	2828	1347	-	8797	-	-	1267	1267	449	16	650
69	0.50LB2.0SB15M70BA15PC15FA	2828	673	673	8797	-	-	1267	1267	449	16	653
70	0.50LB2.0SB15M60BA40PC	2424	-	1795	8797	-	-	1267	1267	404	16	660
71	0.50LB2.0SB15M60BA40FA	2424	1795	-	8797	-	-	1267	1267	404	16	652
72	0.50LB2.0SB15M60BA20PC20FA	2424	898	898	8797	-	-	1267	1267	404	16	656
73	0.50LB3.0SB15M80BA20PC	2524	-	701	10315	-	-	989	989	438	17	667
74	0.50LB3.0SB15M80BA20FA	2524	701	-	10315	-	-	989	989	438	17	664
75	0.50LB3.0SB15M80BA10PC10FA	2524	351	351	10315	-	-	989	989	438	17	665
76	0.50LB3.0SB15M70BA30PC	2208	-	1052	10315	-	-	989	989	403	17	670
77	0.50LB3.0SB15M70BA30FA	2208	1052	-	10315	-	-	989	989	403	17	666
78	0.50LB3.0SB15M70BA15PC15FA	2208	526	526	10315	-	-	989	989	403	17	668
79	0.50LB3.0SB15M60BA40PC	1893	-	1402	10315	-	-	989	989	368	17	673
80	0.50LB3.0SB15M60BA40FA	1893	1402	-	10315	-	-	989	989	368	17	667
81	0.50LB3.0SB15M60BA20PC20FA	1893	701	701	10315	-	-	989	989	368	17	670

3.7 ขั้นตอนการผสมมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ขั้นตอนการผสมบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีขั้นตอนการผสมดังต่อไปนี้

3.7.1 ออกแบบส่วนผสมของบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยการควบคุมความหนาแน่นเท่ากับ 1,000 kg/m³

3.7.2 เตรียมเครื่องผลิตโฟมเหลวคงรูป ซึ่งประกอบด้วยปั๊มลมและถังแรงดันผสมน้ำยาเพิ่มฟอง โดยการผสมสารเพิ่มฟองกับน้ำในอัตราส่วน 1:40 ใส่ลงในถังของเครื่องผลิตโฟม และปรับแรงดันของถังให้เหมาะสมเท่ากับ 0.30 MPa (สำหรับถังเล็ก) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



(ก) เทน้ำยาโฟมผสมน้ำลงในถังแรงดัน



(ข) ปรับแรงดันของปั๊มลมเท่ากับ 0.30 MPa

รูปที่ 3.9 การเตรียมน้ำยาโฟมและการปรับแรงดันของปั๊มลม

3.7.3 เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการใช้เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ ละลายด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์ ยกตัวอย่างการเตรียมความเข้มข้น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ ได้จากการชั่งน้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ด 40 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นเพื่อเป็นตัวทำละลายให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 1000 มิลลิลิตร ในระหว่างขั้นตอนการปรับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นจะมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นจะต้องเตรียมสารละลายก่อนการนำไปใช้ ผสม 24 ชั่วโมง (NaOH : โมลน้ำหนักของโซเดียมเท่ากับ 23 กรัม ออกซิเจนเท่ากับ 16 กรัม และไฮโดรเจน เท่ากับ 1 กรัม ดังนั้นผลรวมน้ำหนักเท่ากับ 40 กรัม ต่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์) ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.7.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถใช้ได้เลยเนื่องจากเป็นของเหลวอยู่แล้ว

3.7.5 เตรียมวัสดุที่ได้จากการออกแบบส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วัสดุที่ใช้ในการผสม

3.7.6 ใส่ทรายและวัสดุประสานลงในโม่ผสมคอนกรีต เสร็จแล้วเปิดเครื่องผสมให้ทรายและ วัสดุประสานผสมกัน

3.7.7 เมื่อทรายและวัสดุประสานผสมกันดีแล้ว ใส่สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในโม่ผสมคอนกรีตโดยให้เติมเข้ารอบๆ เพื่อให้สารละลายสามารถผสมเข้ากับทรายและวัสดุประสานได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยใช้เวลาในการผสมประมาณ 2 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะการผสมมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.7.8 ในระหว่างผสมให้สังเกตการผสมกันของทราย วัสดุประสาน และสารละลาย หรือที่เรียกว่า มอร์ต้า หากพบว่ามอร์ต้าจับตัวกันเป็นก้อน ให้ปิดเครื่องผสมแล้วใช้เกรียงบดมอร์ต้าให้แตกตัวออกจากกันโดยไม่จับตัวกัน เสร็จแล้วเปิดเครื่องผสมอีกครั้งจนมอร์ต้าผสมกันได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ลักษณะการจับตัวของมอร์ต้า

3.7.9 ฉีดโฟมเหลวใส่ไปในเครื่องผสม



รูปที่ 3.14 การฉีดโฟมเหลวลงในมอร์ตาร์

3.7.10 เปิดเครื่องผสมรจนโฟมเหลวและมอร์ต้าผสมกันได้ดี โดยใช้เวลาในการผสมประมาณ 1 นาที จะได้มวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ลักษณะเนื้อเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.7.11 ตรวจสอบหน่วยน้ำหนักเปียกของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การตรวจสอบความหนาแน่นเปียกของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.8 ทดสอบกำลังอัดและการดูดซึมน้ำของบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การทดสอบกำลังอัดและการดูดซึมน้ำของบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM และตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ตามลำดับ หลังจากดำเนินการผสมเสร็จเรียบร้อยแล้ว เทมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้ลงในภาชนะที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นบรรจุลงแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาด 7.5x15 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.17 สำหรับกระบวนการเตรียมตัวอย่างเนื่องจากมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งในขณะการผสมจะมีฟองเหลวบางส่วนแตกตัว จึงทำให้ปริมาตรมีการลดลง ดังนั้นการหล่อมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงควรเทให้มีความสูงเกินแบบหล่อ เมื่อคอนกรีตมวลเบาเริ่มแข็งตัว จึงตัดส่วนที่เกินออกด้วยลวดหรือเหล็กบาง ซึ่งจะทำให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ หากไม่ได้ทำตามนี้อาจจะทำให้ขนาดของคอนกรีตมวลเบาไม่ได้ตามขนาดที่ต้องการแต่ผิวบนให้เรียบ หลังจากดำเนินการเทลงแบบเรียบร้อยแล้ว ทำการหุ้มตัวอย่างทั้งแบบด้วยพลาสติกใสทันที ปล่อยให้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับส่วนผสมแข็งตัวแล้วหรือยัง หลังจากนั้นแกะแบบและหุ้มพลาสติกตัวอย่างอีกครั้งแล้วนำมาบ่มที่อุณหภูมิปกติจนอายุการทดสอบ ลักษณะตัวอย่างของบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 การเทมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเก้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงในแบบหล่อ



รูปที่ 3.18 ลักษณะตัวอย่างของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเก้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การทดสอบกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเก้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้จากตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 7.5x15 เซนติเมตร โดยดำเนินการเคลือบหัวและท้ายตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่บ่มครบอายุด้วยกัมมะถันเพื่อให้เกิดการกระจายแรงกดสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดแล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 โดยแต่ละส่วนผสมใช้จำนวนตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง ทุกอายุทดสอบ การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเก้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 สำหรับผลการทดสอบกำลังที่ได้รับจะระบุถึงผลกระทบของส่วนผสม และอายุบ่มต่อค่ากำลังต้านแรงอัด ผลที่ได้จากขั้นตอนนี้จะช่วยในการกำหนดส่วนผสมที่เหมาะสมของบล็อกเขี้ยวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเก้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อไป



รูปที่ 3.19 การทดสอบของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

หลังจากได้ผลการทดสอบกำลังอัดของบล็อกเชิวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจะดำเนินการวิเคราะห์ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.2601-2556 ซึ่งระบุว่าบล็อกมวลเบาต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2.5 MPa ซึ่งส่วนผสมที่มีกำลังอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 จะดำเนินการหล่อตัวอย่างและทดสอบกำลังอัดซ้ำอีก 2 ครั้ง เพื่อยืนยันผลการทดสอบ หลังจากนั้นจะดำเนินการทดสอบการดูดซึมน้ำของบล็อกเชิวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อไป

3.9 ทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคและองค์ประกอบทางแร่ของบล็อกเชิวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และองค์ประกอบทางแร่ด้วยเครื่อง X-Ray diffraction (XRD) เพื่อทราบพฤติกรรมทางเคมีและทางจุลภาคที่คาดว่าจะเกิดขึ้นภายในบล็อกเชิวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อสามารถอธิบายความสัมพันธ์กับพฤติกรรมด้านกำลังของบล็อกเชิวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.9.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ของบล็อกเชิวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ก่อนตัวอย่างบล็อกเชิวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะถูกนำมาเข้าเครื่องถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนหรือส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM) เพื่อที่จะนำภาพถ่ายขยายของอนุภาค (Scanning electron microscopy) มาวิเคราะห์ สำหรับการเตรียมตัวอย่างโดยทำการทุบก้อนตัวอย่างให้แตกเป็นชิ้นเล็กให้มีขนาดกว้าง×ยาว ประมาณ 10×10 มิลลิเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร นำชิ้นตัวอย่างไป

แช่สารละลายอะซิโตนเป็นเวลา 1 วัน และอบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบผิวด้วยทองคำและนำไปทดสอบถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงด้วยเครื่อง JSM-6460LA model Scanning Electron Microscope (JEOL) โดยดำเนินการถ่ายภาพที่กำลังขยาย 100x

3.9.2 การศึกษาองค์ประกอบทางแร่ด้วยเครื่อง X-Ray diffraction (XRD) ของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (crystalline pattern phase) ของวัสดุโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่าแล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้น การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ XRD นั้น ทำได้โดยการทุบก้อนตัวอย่างให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ประมาณ 5-10 มิลลิเมตร นำชิ้นตัวอย่างไปแช่สารละลายอะซิโตนเป็นเวลา 1 วัน และอบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน หลังจากนั้นจึงนำชิ้นตัวอย่างไปบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM เบอร์ 100 นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบ XRD โดยดำเนินการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bruker รุ่น X8APEX และสแกนที่มุมระหว่าง 5-60 องศา

3.10 ทดสอบค่าการหดตัวแห้งของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การทดสอบการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) ของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำได้โดยการหล่อบล็อกมวลเบาดังด้วยแบบหล่อมาตรฐานขนาด 75×75×285 mm พร้อมติดตั้งหัว Stud เพื่อหาค่าการหดตัวแห้งเฉลี่ยของแท่งตัวอย่าง ภายหลังถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง จึงนำคอนกรีตไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวมาตรฐานคงที่ (285 mm) ซึ่งจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้น จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างบ่มไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 2\%$ แล้วทำการวัดความยาวของแท่งตัวอย่างที่อายุต้องการวัด โดยนับจากวันที่ปล่อยให้เกิดการหดตัวแห้ง



รูปที่ 3.20 ลักษณะการทดสอบค่าการหดตัวแห้งของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.11 ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อย จีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การทดสอบหาค่าการนำความร้อนของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทดสอบโดยวัดด้วยหัววัดแบบวางที่ผิวของวัสดุ (Surface probe) โดยเครื่องมือที่ใช้วัดเป็นเครื่องมือรุ่น ISOMET2114 ของบริษัท Applied Precision Ltd. ขนาดตัวอย่างที่ทดสอบควรมีขนาดหน้าตัดกว้างอย่างน้อย 6 ซม. หนาอย่างน้อย 2 ซม. และมีผิวหน้าเรียบ การทำการทดสอบวัดค่าการนำความร้อนคอนกรีตพูนต้องถูกอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชม. เพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวอย่างเนื่องจากความชื้นของตัวอย่างมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนอย่างมาก



รูปที่ 3.21 ลักษณะการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.12 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงจุดเด่นและข้อจำกัดของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

3.13 ทดสอบกำลังอัดของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง

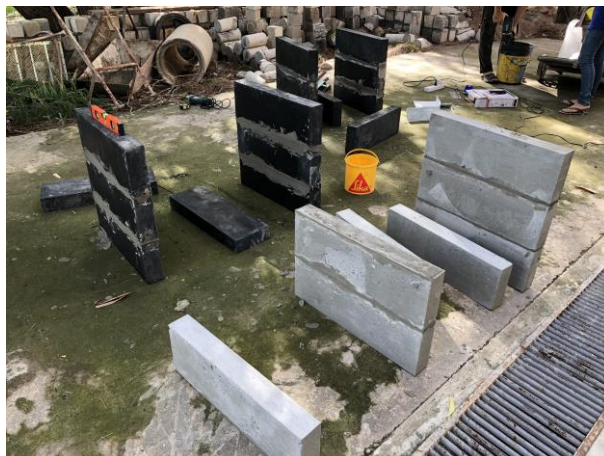
หลังจากได้ส่วนผสมที่ดีที่สุดของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะดำเนินการหล่อเป็นผนังมวลเบา และนำบล็อกมวลเบาจากท้องตลาดมาหล่อเช่นเดียวกัน และทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงจุดเด่นและข้อจำกัดของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง



รูปที่ 3.22 ลักษณะตัวอย่างบล็อกเชิยมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง



รูปที่ 3.23 ลักษณะตัวอย่างบล็อกเชิยมวลเบาแบบเซลลูล่าจากท้องตลาด



รูปที่ 3.24 ลักษณะการเตรียมบล็อกเชิยมวลเบาแบบเซลลูล่าเมื่อหล่อเป็นผนัง



รูปที่ 3.25 ลักษณะการทดสอบกำลังอัดของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง

3.14 วิเคราะห์ราคาของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เปรียบเทียบกับบล็อกทางการค้า

เพื่อวิเคราะห์จุดเด่นและข้อจำกัด และวิเคราะห์ราคาเพื่อความคุ้มค่าในการลงทุนผลิตบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อเปรียบเทียบกับราคาของผลิตภัณฑ์บล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่าทางการค้า

3.15 การเขียนรายงานและถ่ายทอดเทคโนโลยี

งานวิจัยนี้จะนำเสนอรายงานความก้าวหน้า โดยสรุปผลการดำเนินงานในเดือนที่ 12 ของโครงการ และส่งมอบรายงานฉบับสมบูรณ์ภายใน 30 วัน หลังจากสิ้นสุดโครงการ และการจัดอบรมให้แก่ผู้ประกอบการรายย่อยหรือโรงงานน้ำตาลเพื่อพัฒนางานวิจัยสู่เชิงพาณิชย์ต่อไป

บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล

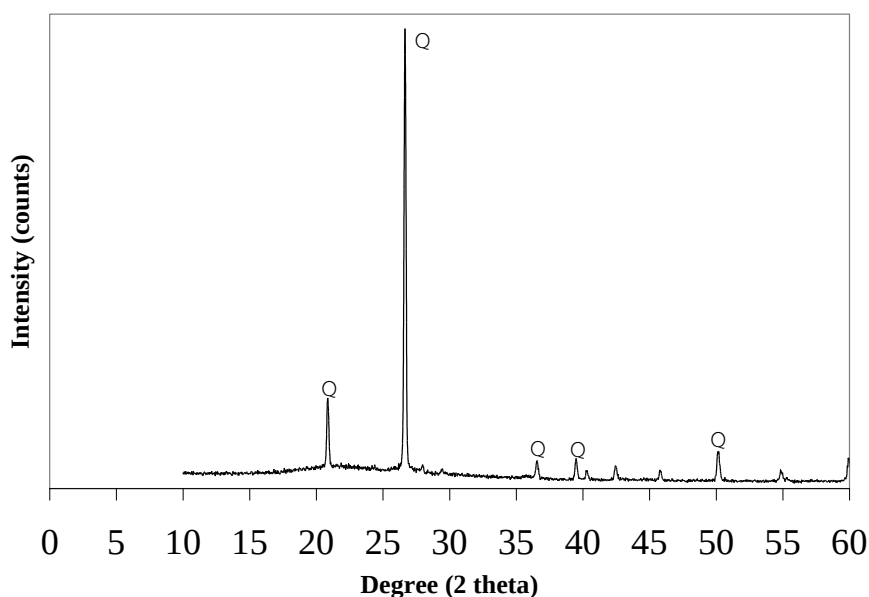
4.1 องค์ประกอบทางเคมีและรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัย

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย (BA) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) และเถ้าลอย (FA) ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) ทำให้ทราบปริมาณของออกไซด์แต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า เถ้าขานอ้อย จัดเป็นวัสดุปอซโซลานประเภท N ซึ่งกำหนดให้ปริมาณสารประกอบหลักของวัสดุต้องมีค่า $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 70 ค่า LOI ไม่มากกว่าร้อยละ 10 ค่า SO_3 ไม่มากกว่าร้อยละ 4 จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับร้อยละ 80.54 ค่า LOI เท่ากับร้อยละ 3.22 และค่า SO_3 เท่ากับร้อยละ 10 จึงจัดเป็นวัสดุปอซโซลานประเภท N ตามมาตรฐาน ASTM C618

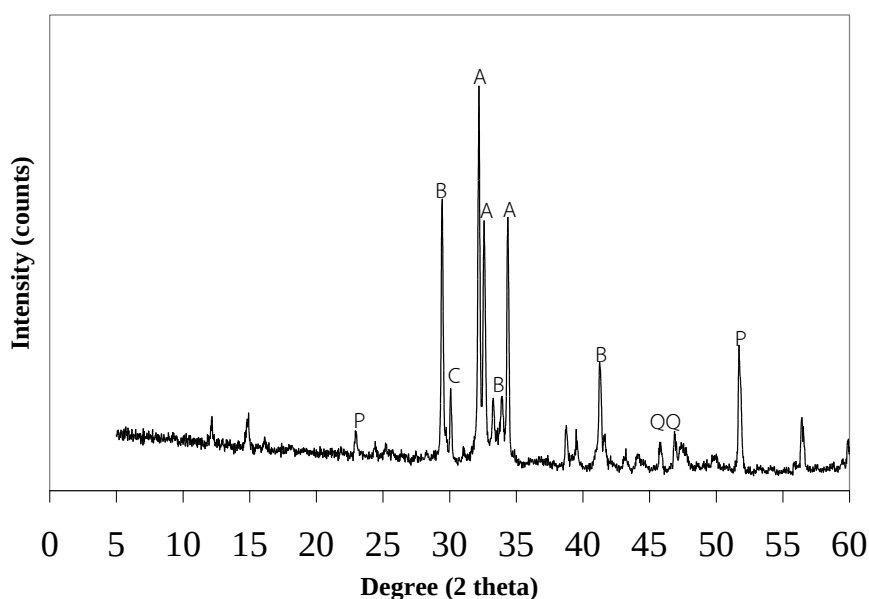
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบหลักของ SiO_2 และ CaO ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งมีปริมาณของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 20.80 และปริมาณของ CaO เท่ากับร้อยละ 65.30 ขณะที่เถ้าลอยมีองค์ประกอบของ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ซึ่งตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C618 ระบุว่า เถ้าลอยมีองค์ประกอบ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ตั้งแต่ 50% แต่ไม่เกิน 70% และมีองค์ประกอบของ CaO มากกว่า 10% อีกทั้งค่า LOI ไม่มากกว่า 6% และค่า SO_3 ไม่มากกว่า 5% จัดเป็นเถ้าลอยประเภท C ดังนั้นจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า เถ้าลอย จัดเป็นประเภท C

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

วัสดุ	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	SO_3	LOI
FA	31.32	13.96	15.64	25.79	2.94	2.93	2.83	-	3.29	1.30
PC	20.80	4.70	3.40	65.30	1.50	0.40	0.10	-	2.70	0.90
BA	74.84	3.50	2.30	2.14	1.06	1.36	0.21	0.38	3.22	10.00

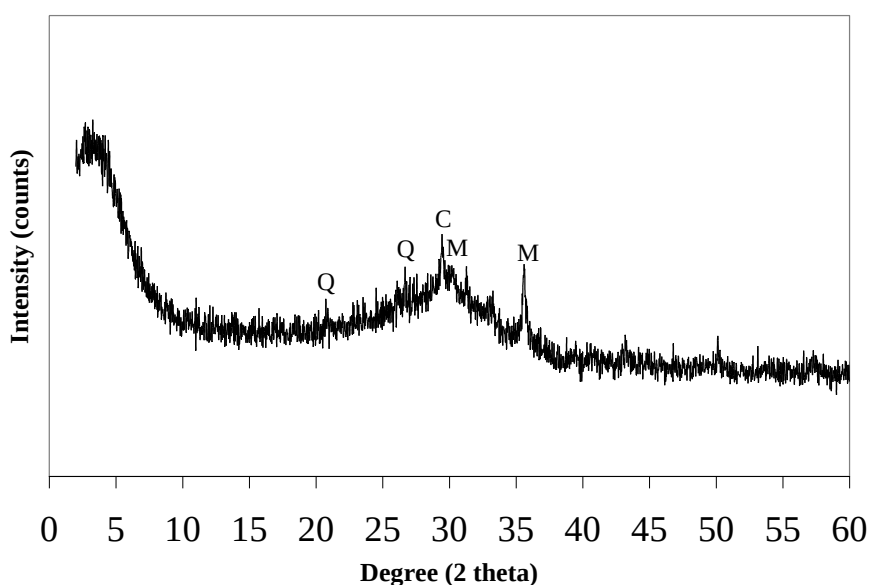


รูปที่ 4.1 XRD ของเถ้าขานอ้อย
[Q= SiO_2]



รูปที่ 4.2 XRD ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

[A=Alite (C_3S), B=belite (C_2S), Q= SiO_2 , P= $Ca(OH)_2$, S=CSH, C= $CaCO_3$]



รูปที่ 4.3 XRD ของเถ้าลอย

[C= $CaCO_3$, Q= SiO_2 , M= Fe_2O_3]

จากรูปที่ 4.1-4.3 แสดงผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเถ้าลอย โดยวิธี X-Ray Diffraction Analysis (XRD) พบว่า เถ้าขานอ้อยมีทั้งส่วนที่เป็นอสัณฐานและส่วนที่เป็นผลึกของ Quartz เป็นหลัก แสดงให้เห็นว่า เถ้าขานอ้อยสามารถใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุโพลิเมอร์ได้ ขณะที่ปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบทางแร่ที่เป็นผลึกคือ Alite (C_3S), Belite (C_2S), SiO_2 , $Ca(OH)_2$, CSH, $CaCO_3$ ส่วนเถ้าลอยมีลักษณะไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐาน (Glassy phase or Amorphous) ที่มุ่มประมาณ 20-40

องศา ซึ่งหมายถึงมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง โดยมีองค์ประกอบของ CaCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3

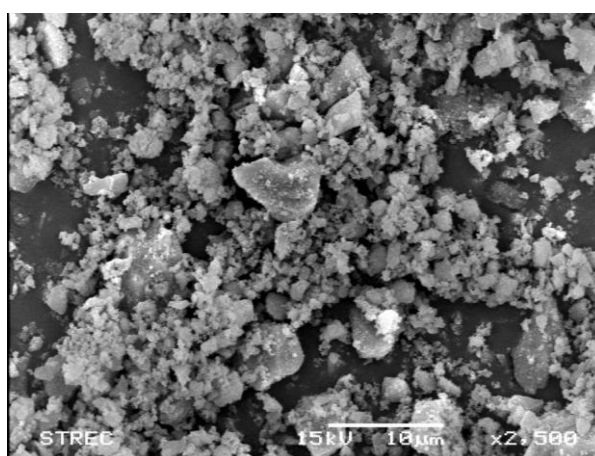
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพและลักษณะรูปร่างของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัย

จากตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่า เถ้าชานอ้อย มีความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และความละเอียดของวัสดุด้วยวิธีของเบลนเท่ากับ 2.25, 23.26 ไมโครเมตร และ 12,660 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และความละเอียดของวัสดุด้วยวิธีของเบลนเท่ากับ 3.15, 14.60 ไมโครเมตร และ 3,600 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ขณะที่เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และความละเอียดของวัสดุด้วยวิธีของเบลนเท่ากับ 2.67, 16.17 ไมโครเมตร และ 4,300 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้จากตารางที่ 4.2 พบว่า ทรายที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จะมีความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2.65 และ 1,550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

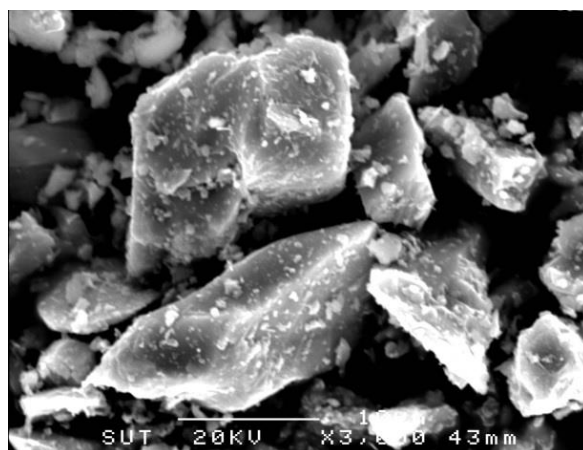
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติทางกายภาพ	BA	PC	FA	Sand
Specific gravity	2.25	3.15	2.67	2.65
Dry unit weight (kg/m^3)	-	-	-	1,550
Median particle size (μm)	23.26	14.60	16.17	-
Blaine fineness (cm^2/g)	12,660	3,600	4,300	-

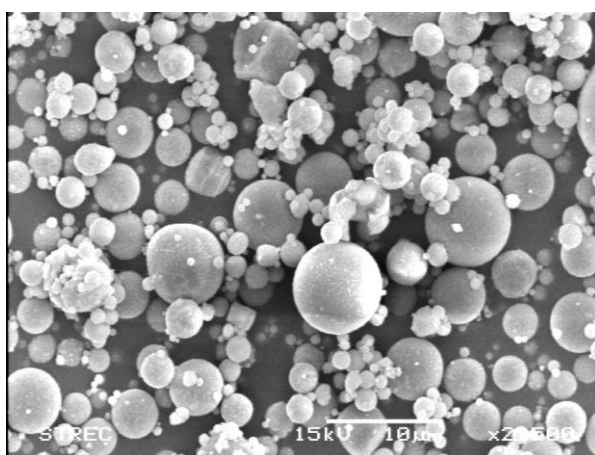
โครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุตั้งต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.6 พบว่า เถ้าชานอ้อยมีลักษณะอนุภาคที่ไม่แน่นอนและจับตัวกันแบบหลวมๆ ส่งผลให้มีแนวโน้มของความพรุนสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคแบบทรงกลมและการกระจายตัวของอนุภาคมีอย่างสม่ำเสมอและมีอนุภาคใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 SEM ของเถ้าชานอ้อย



รูปที่ 4.5 SEM ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



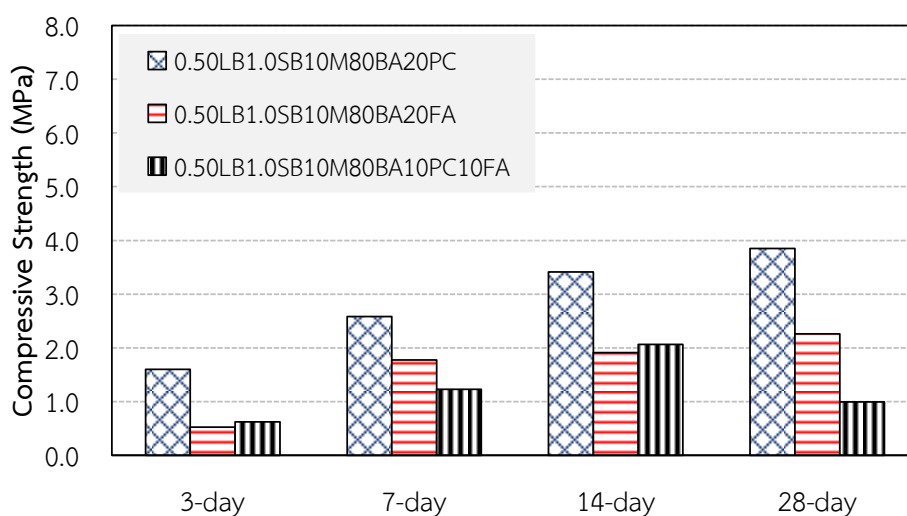
รูปที่ 4.6 SEM ของแก้วลอย

4.3 กำลังอัดและการดูดซึมน้ำของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสม แก้วลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

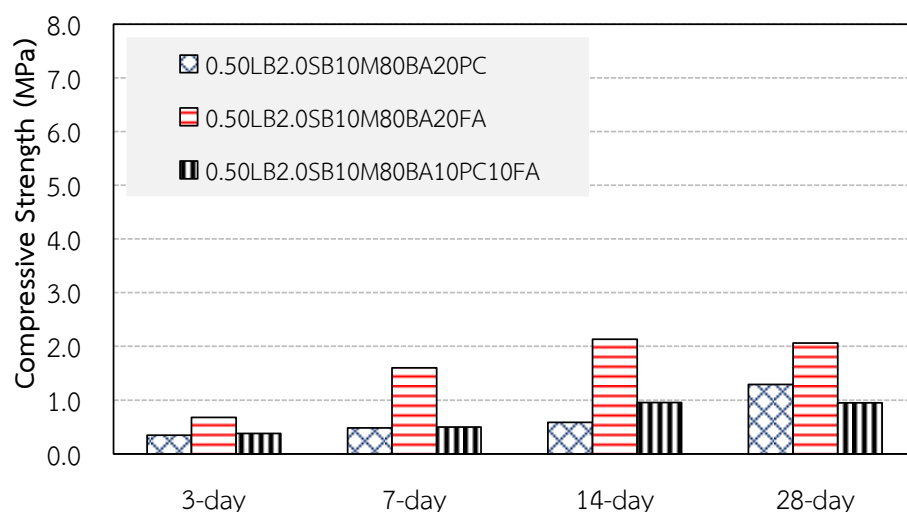
การทดสอบกำลังอัดของบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมแก้วลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมของบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมแก้วลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของบล็อกตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ซึ่งระบุว่าบล็อกมวลเบาต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2.5 MPa ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน (มอก.2601-2556) ขณะเดียวกันเมื่อได้ส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.2601-2556 จะดำเนินการทดสอบการดูดซึมน้ำ ค่าการนำความร้อน ค่าการหดตัวแห้ง และโครงสร้างทางจุลภาคของบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมแก้วลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อไป

จากบทที่ 3 ที่ได้ดำเนินการออกแบบส่วนผสมบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมแก้วลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมทั้งหมด 81 ส่วนผสม โดยแบ่งออกเป็นการแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00, 2.00 และ 3.00 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5, 10 และ 15 โมลาร์ การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือแก้วลอยในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และ

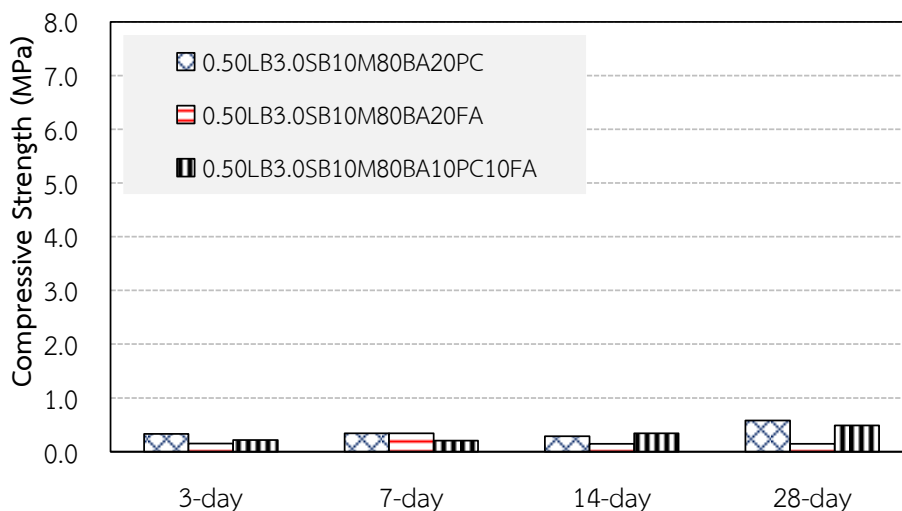
ทดสอบกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 3, 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 4.7 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20

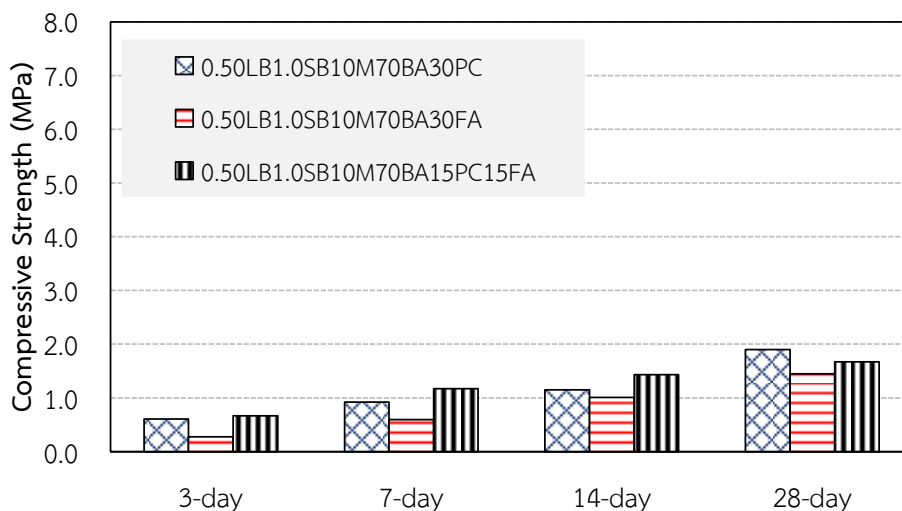


รูปที่ 4.8 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20

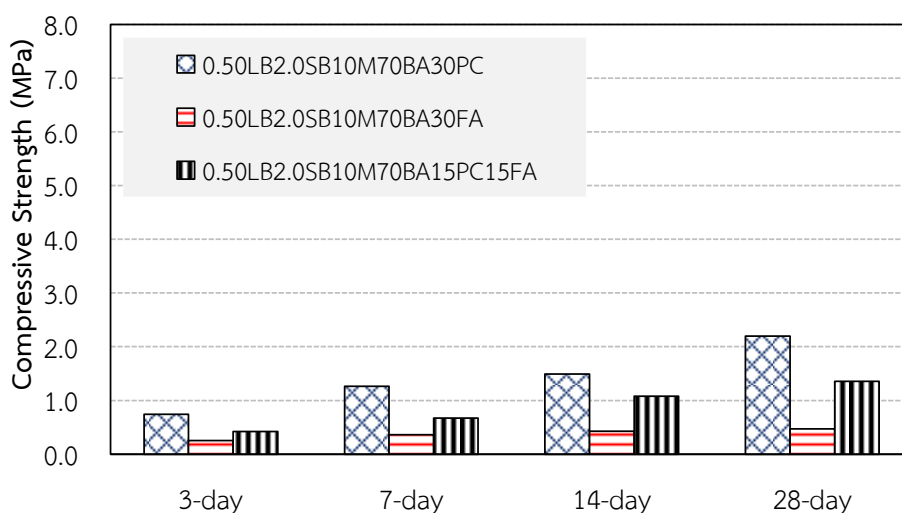


รูปที่ 4.9 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20

จากรูปที่ 4.7-4.9 แสดงผลกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20 พบว่า เมื่ออัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของบล็อกเชิวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการใช้อุณหภูมิในการบ่มปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือเถ้าลอยแทนที่ในเถ้าชานอ้อย พบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ในเถ้าชานอ้อยมีแนวโน้มช่วยพัฒนากำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจีโอโพลิเมอร์ได้ดีกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอย และเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยอย่างละครึ่งแทนที่ในเถ้าชานอ้อย พบว่า กำลังอัดของบล็อกเชิวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของบล็อกตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ซึ่งระบุว่าบล็อกมวลเบาต้องมียกกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2.5 MPa อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน (มอก.2601-2556) พบว่า ส่วนผสมของ 0.5LB1.0SB10M80BA20PC มีกำลังอัดผ่านค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556 ตั้งแต่อายุการบ่ม 7 วันขึ้นไป ขณะที่ส่วนผสมอื่นๆ ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน



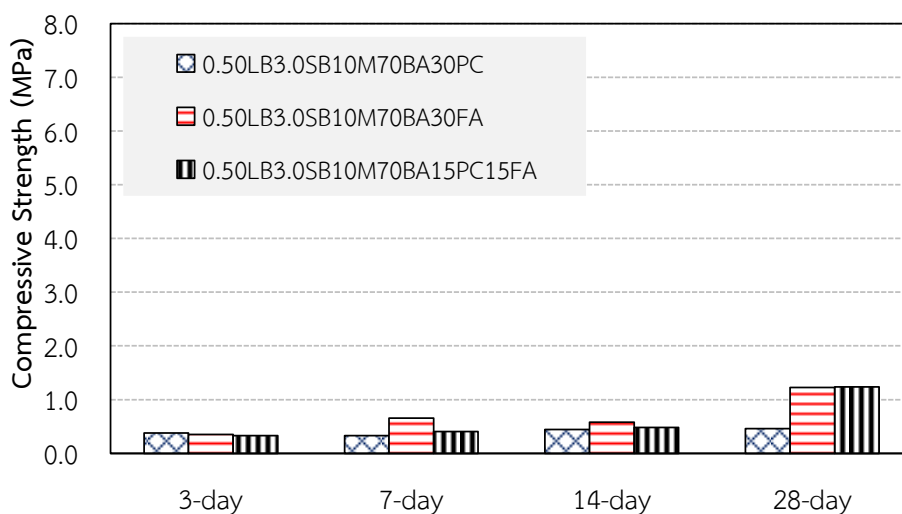
รูปที่ 4.10 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30



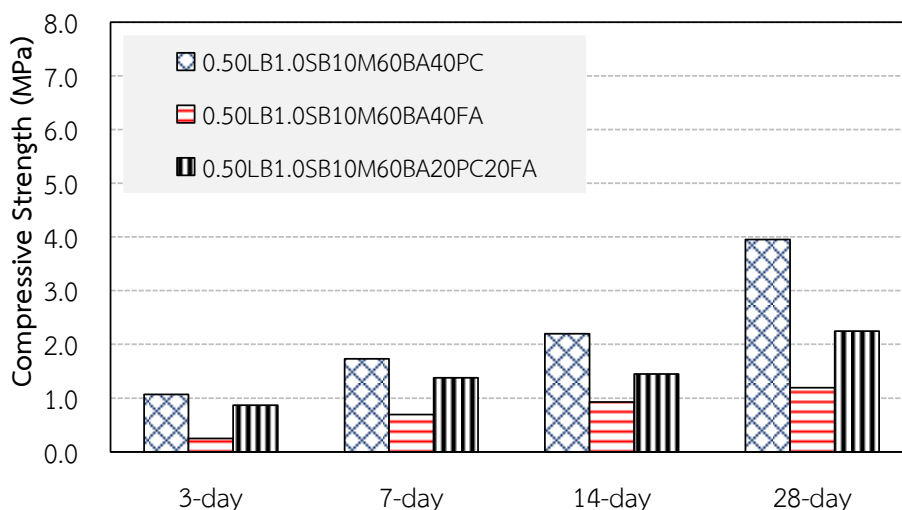
รูปที่ 4.11 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30

จากรูปที่ 4.10-4.12 แสดงผลกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30 พบว่า เมื่ออัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันกับผลการทดสอบของการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัด

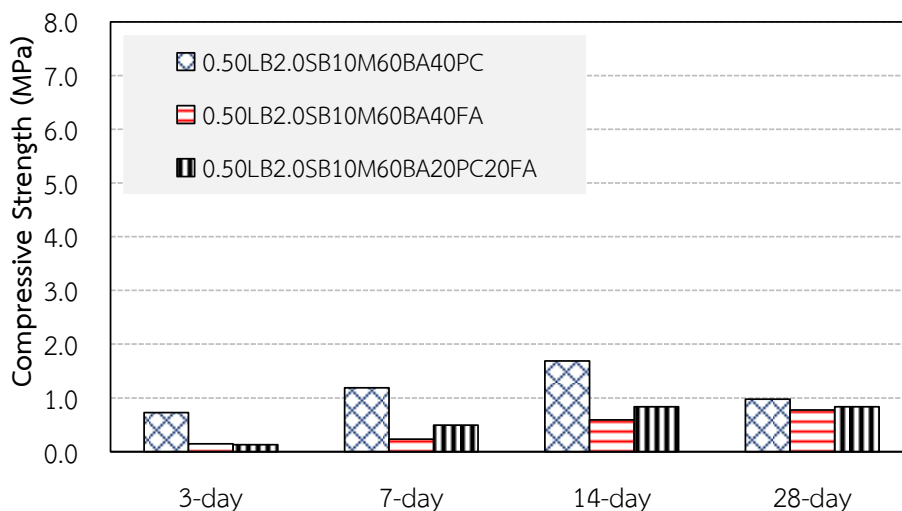
ของบล็อกตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ซึ่งระบุว่าบล็อกมวลเบาต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2.5 MPa อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน (มอก.2601-2556) พบว่า ไม่มีส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน



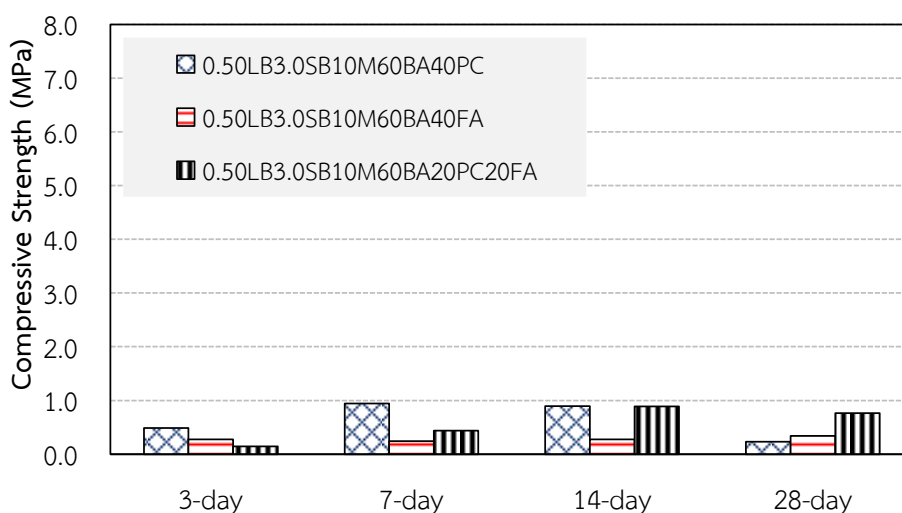
รูปที่ 4.12 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30



รูปที่ 4.13 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 40



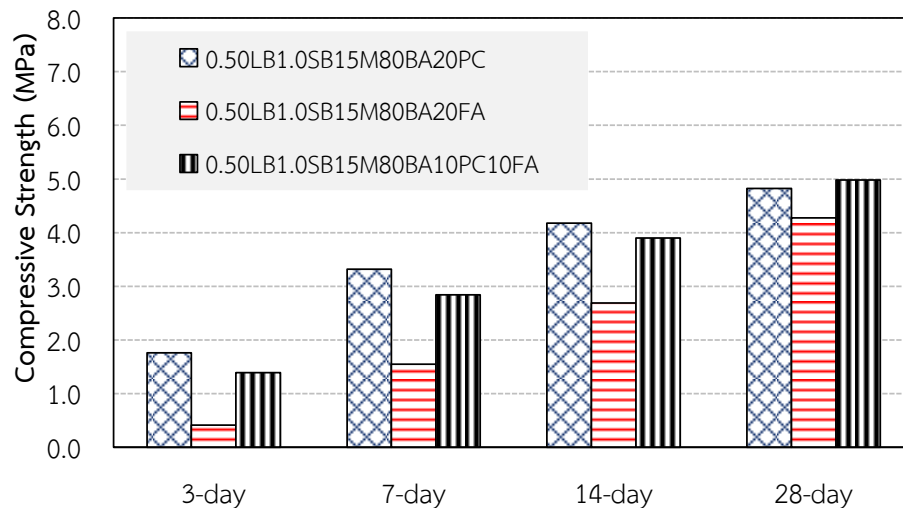
รูปที่ 4.14 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 40



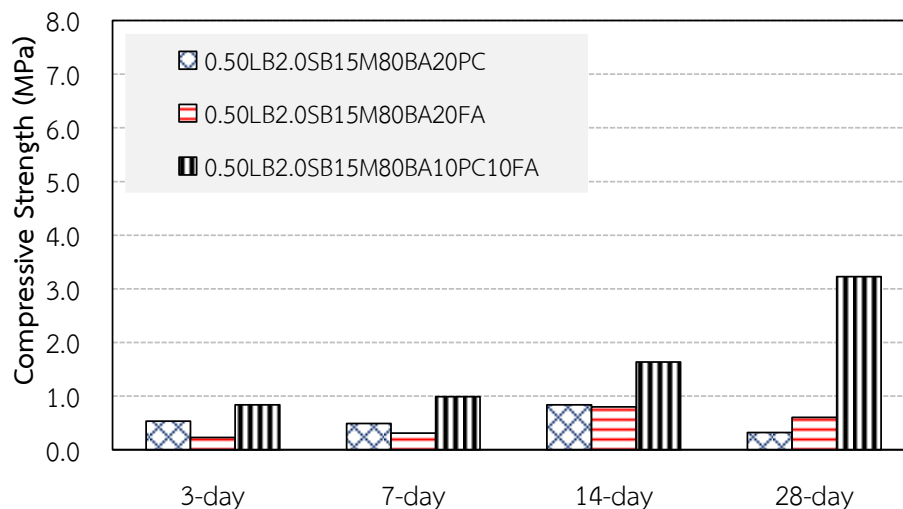
รูปที่ 4.15 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 40

จากรูปที่ 4.13-4.15 แสดงผลกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 40 พบว่า เมื่ออัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับผลการทดสอบของการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20 และ 30 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ

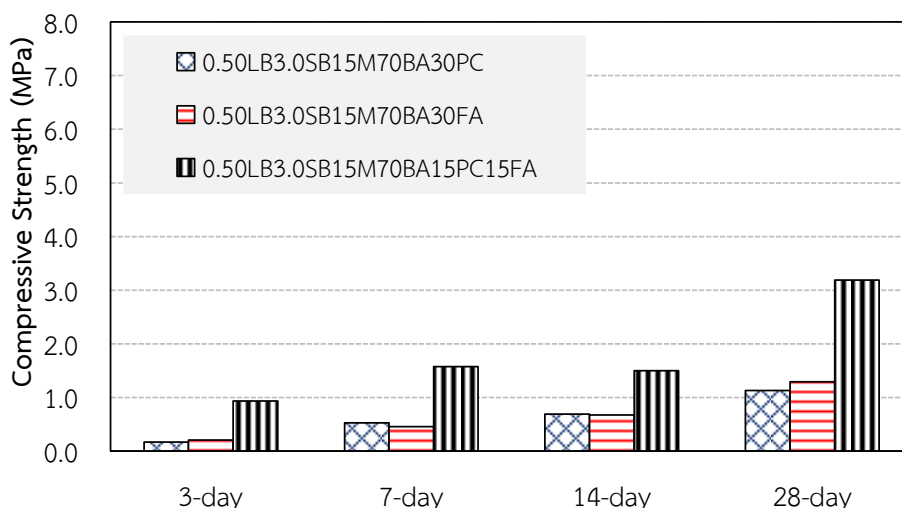
ค่ากำลังอัดของบล็อกตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ซึ่งระบุว่าบล็อกมวลเบาต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2.5 MPa อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน (มอก.2601-2556) พบว่า ส่วนผสมของ 0.5LB1.0SB10M60BA40PC ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน มีกำลังอัดผ่านค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556 ขณะที่ส่วนผสมอื่นๆ ไม่มีผ่านเกณฑ์มาตรฐาน



รูปที่ 4.16 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20

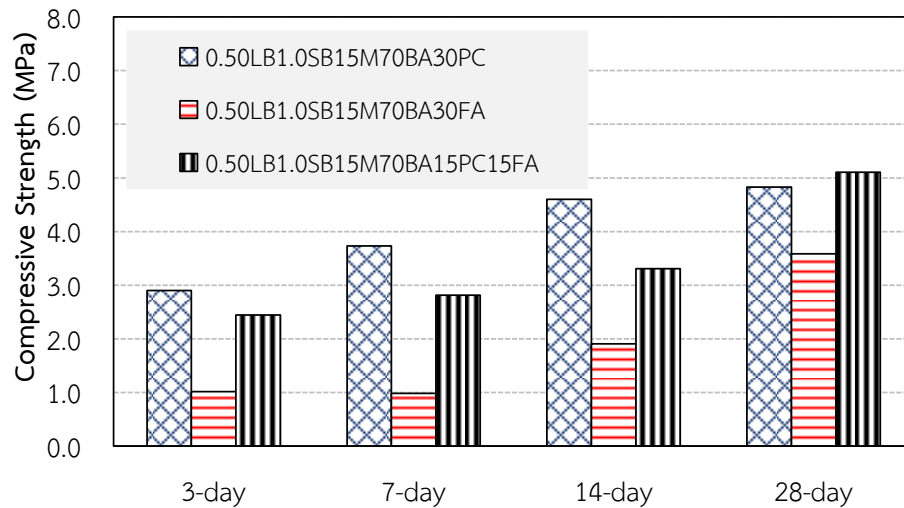


รูปที่ 4.17 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20

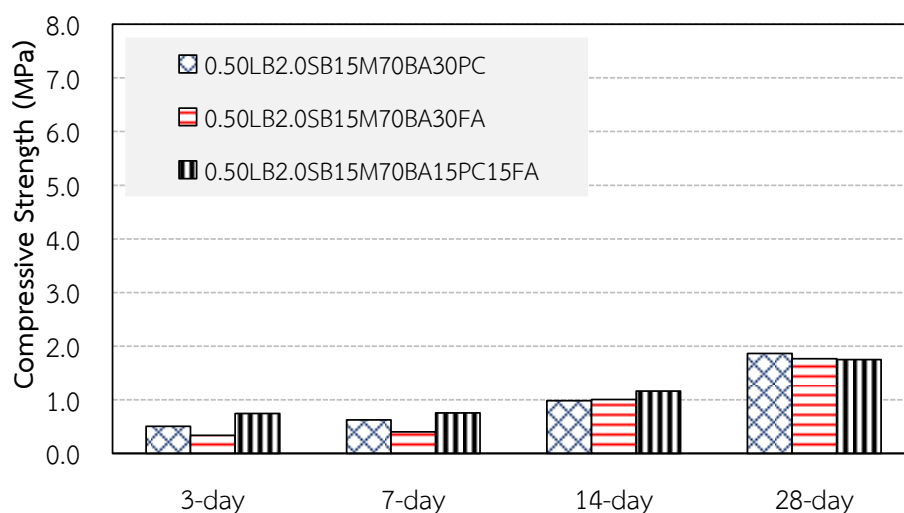


รูปที่ 4.18 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20

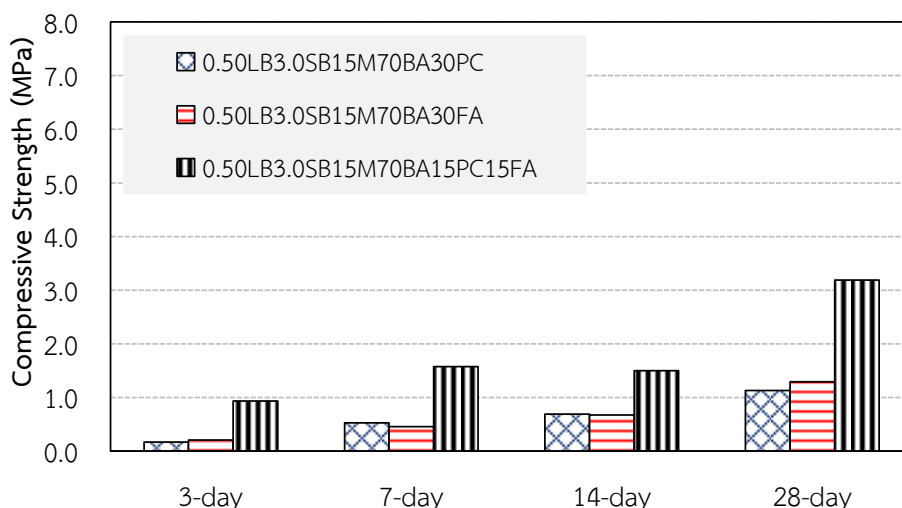
จากรูปที่ 4.16-4.18 แสดงผลกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20 พบว่า เมื่ออัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของบล็อกเชิวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ มีแนวโน้มพัฒนา กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ได้มากกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของบล็อกตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ซึ่งระบุว่าบล็อกมวลเบาต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2.5 MPa อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน (มอก.2601-2556) พบว่า ส่วนผสมของ 0.5LB1.0SB15M80BA20PC และ 0.5LB1.0SB15M80BA10PC10FA ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน มีกำลังอัดผ่านค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556



รูปที่ 4.19 กำลังอัดของมวลเบแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30

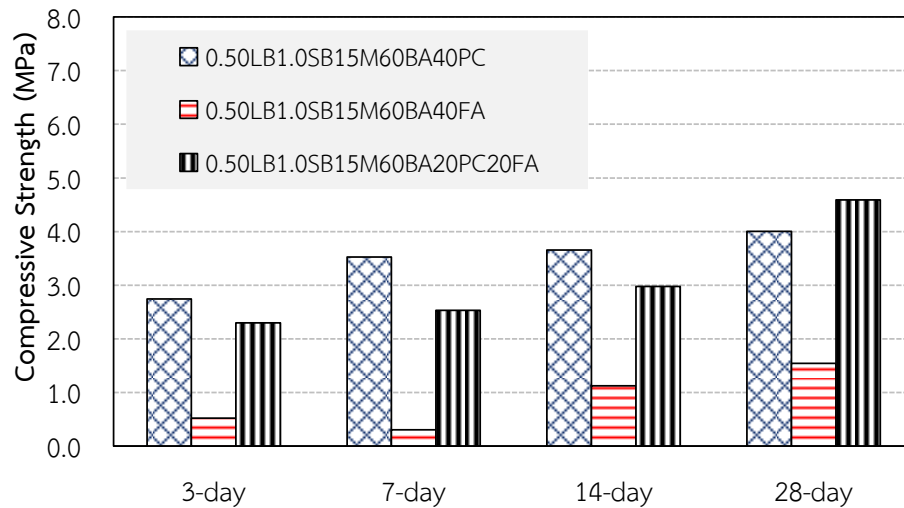


รูปที่ 4.20 กำลังอัดของมวลเบแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30

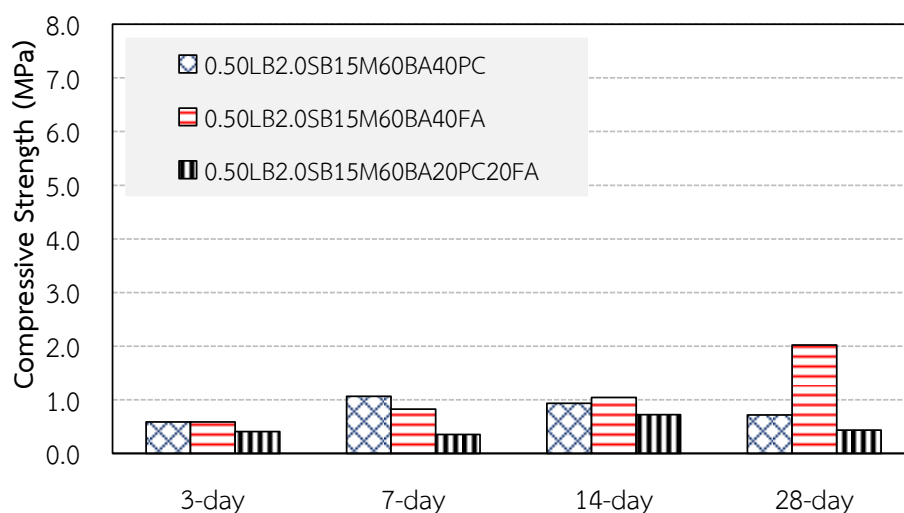


รูปที่ 4.21 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30

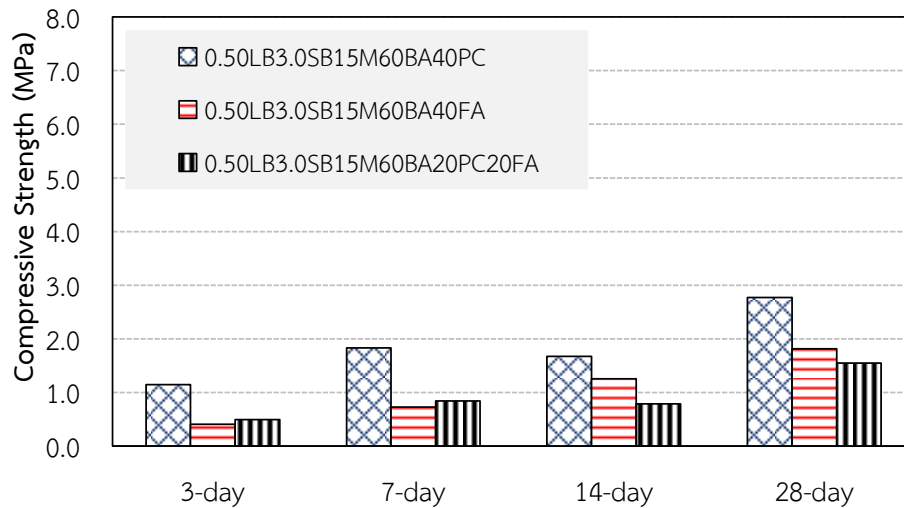
จากรูปที่ 4.19-4.21 แสดงผลกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 30 พบว่า เมื่ออัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของบล็อกเชิวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันกับผลการทดสอบของการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20 เช่นเดียวกันกับที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ มีแนวโน้มพัฒนากำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ได้มากกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของบล็อกตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ซึ่งระบุว่าบล็อกมวลเบาต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2.5 MPa อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน (มอก.2601-2556) พบว่า ส่วนผสมของ 0.5LB1.0SB15M70BA30PC และ 0.5LB1.0SB15M70BA15PC15FA มีกำลังอัดผ่านค่ามาตรฐานของ มอก. 2601-2556 ตั้งแต่อายุการบ่มเท่ากับ 3 วัน ขึ้นไป



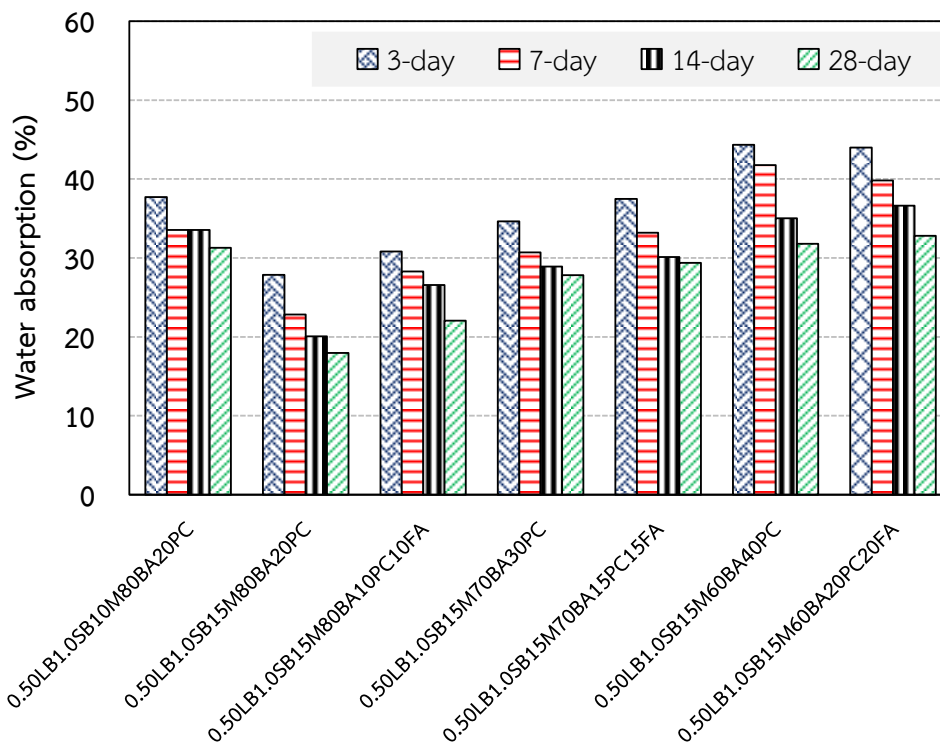
รูปที่ 4.22 กำลังอัดของมวลเบแบบเซลลูล่าจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 40



รูปที่ 4.23 กำลังอัดของมวลเบแบบเซลลูล่าจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 40



รูปที่ 4.24 กำลังอัดของมวลเบแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3.00 และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเท่ากับร้อยละ 40



รูปที่ 4.25 ค่าดูดซึมน้ำของมวลเบแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

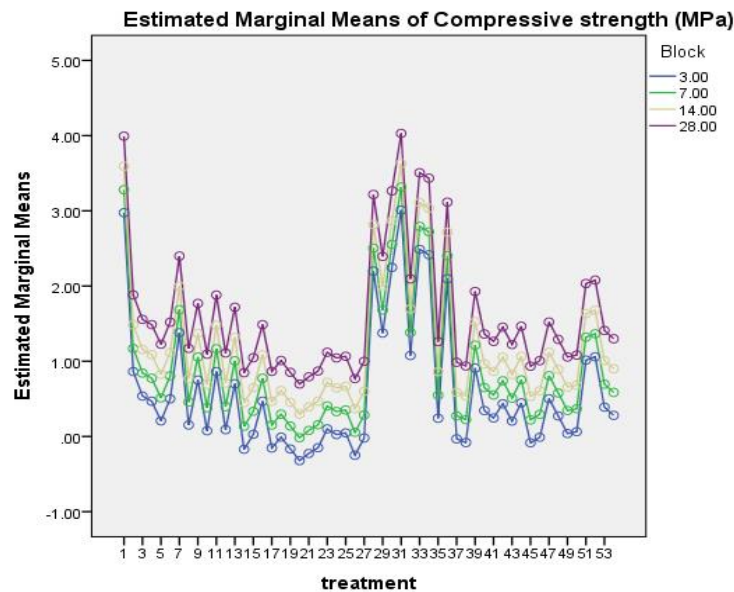
จากรูปที่ 4.22-4.24 แสดงผลกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 40 พบว่า เมื่ออัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของบล็อกซีวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันกับผลการทดสอบของการแทนที่เถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเท่ากับร้อยละ 20 และ 30 เช่นเดียวกันกับที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ มีแนวโน้มพัฒนากำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ได้มากกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของบล็อกตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ซึ่งระบุว่าบล็อกมวลเบาต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2.5 MPa อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน (มอก.2601-2556) พบว่า ส่วนผสมของ 0.5LB1.0SB15M60BA40PC และ 0.5LB1.0SB15M60BA20PC20FA มีกำลังอัดผ่านค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556 ตั้งแต่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน ขึ้นไป

จากผลการทดสอบกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.24 พบว่า ส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่จะสามารถพัฒนาเป็นบล็อกเซลลูโลสต่อไป ประกอบด้วย 7 ส่วนผสมดังนี้ 0.5 LB1.0SB10 M8 0BA2 0PC, 0.5 LB1.0SB15M8 0BA2 0PC, 0.5 LB1.0SB15M8 0BA1 0PC10FA, 0.5 LB1.0SB15M70BA30PC, 0.5 LB1.0SB15M70BA1 5PC15FA, 0.5LB1.0SB15M60BA40PC และ 0.5LB1.0SB15M60BA20PC20FA ซึ่งผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 จากผลการทดสอบข้างต้น พบว่า ส่วนผสมของ 0.5 LB1.0SB15M8 0BA2 0PC และ 0.5LB1.0SB15M80BA10PC10FA มีค่าการดูดซึมน้ำผ่านค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556 (ร้อยละ 23 ที่อายุการบ่ม 28 วัน) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ส่วนผสมของ 0.5LB1.0SB15M80BA20PC มีค่าการดูดซึมน้ำผ่านค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556 ตั้งแต่อายุการบ่ม 7 วัน

นอกจากนั้นจากตารางที่ 4.3 ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงสถิติแบบ ANOVA ด้วยวิธี Scheffa' test หรือ S-method ของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งวิธี Scheffa' test เป็นวิธีเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเป็นคู่ๆ คล้ายกับวิธี Fisher's least significant different (LSD) โดยแบ่งกลุ่มข้อมูลออกเป็น 4 กลุ่มด้วยกัน คือ กำลังอัดที่อายุการบ่มเท่ากับ 3, 7, 14 และ 28 วัน จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น พบว่า ส่วนผสมลำดับที่ 1 (0.5LB1.0SB10M80BA20PC), 28 (1.0SB15M8 0BA2 0PC), 30 (1.0SB15M80BA10PC10FA), 31 (1.0SB15M7 0BA3 0PC), 33 (1.0SB15M70BA15PC15FA), 34 (1.0SB15M60BA40PC) และ 36 (1.0SB15M60BA20PC20FA) มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดโดยเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.24

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการวิเคราะห์เชิงสถิติแบบ ANOVA ด้วยวิธี Scheffa ของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

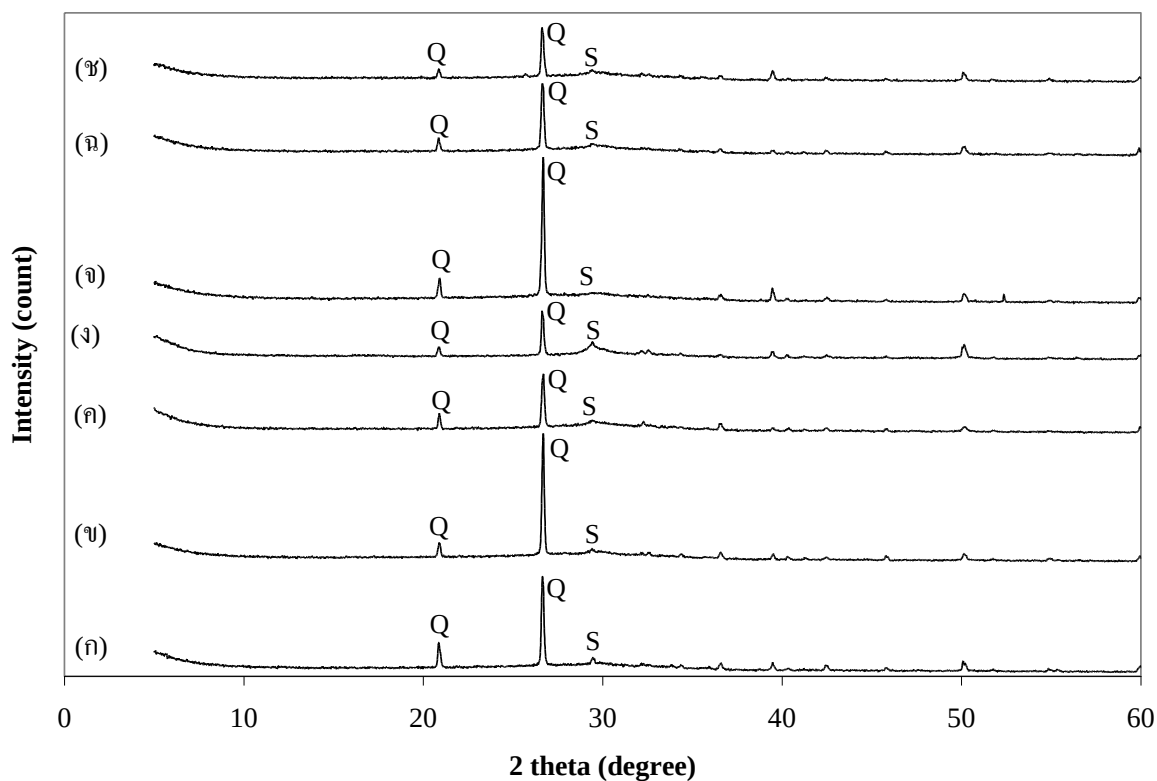
Compressive strength (MPa)					
treatment	N	Subset			
		1	2	3	4
Scheffe ^{a,b}	4	3.2750			
20	4	4.7200			
26	4	5.2000			
21	4	6.3050			
14	4	6.3900			
19	4	6.6500	6.6500		
17	4	6.7200	6.7200		
22	4	8.0200	8.0200	8.0200	
45	4	8.0850	8.0850	8.0850	
38	4	9.0700	9.0700	9.0700	
37	4	9.3200	9.3200	9.3200	
27	4	9.4950	9.4950	9.4950	
46	4	9.5350	9.5350	9.5350	
18	4	10.2300	10.2300	10.2300	
24	4	10.2850	10.2850	10.2850	
15	4	10.4850	10.4850	10.4850	
49	4	10.6550	10.6550	10.6550	
25	4	10.9750	10.9750	10.9750	
50	4	11.2200	11.2200	11.2200	
10	4	11.5400	11.5400	11.5400	
12	4	11.7200	11.7200	11.7200	
23	4	12.7700	12.7700	12.7700	
8	4	13.8000	13.8000	13.8000	
43	4	13.8600	13.8600	13.8600	
5	4	14.5600	14.5600	14.5600	
35	4	14.6300	14.6300	14.6300	
41	4	15.1650	15.1650	15.1650	
48	4	15.3200	15.3200	15.3200	
54	4	16.6000	16.6000	16.6000	
40	4	17.5100	17.5100	17.5100	
53	4	18.4150	18.4150	18.4150	18.4150
42	4	18.6450	18.6450	18.6450	18.6450
44	4	19.0850	19.0850	19.0850	19.0850
16	4	19.0900	19.0900	19.0900	19.0900
4	4	19.7250	19.7250	19.7250	19.7250
6	4	19.7650	19.7650	19.7650	19.7650
47	4	20.4600	20.4600	20.4600	20.4600
3	4	23.7200	23.7200	23.7200	23.7200
13	4	24.7250	24.7250	24.7250	24.7250
9	4	26.9550	26.9550	26.9550	26.9550
11	4	26.9750	26.9750	26.9750	26.9750
2	4	27.9000	27.9000	27.9000	27.9000
39	4	30.0100	30.0100	30.0100	30.0100
51	4	30.9300	30.9300	30.9300	30.9300
52	4	31.2350	31.2350	31.2350	31.2350
32	4	37.2100	37.2100	37.2100	37.2100
29	4	37.3050	37.3050	37.3050	37.3050
7	4	51.6500	51.6500	51.6500	51.6500
36	4	53.6750	53.6750	53.6750	53.6750
28	4	54.6600	54.6600	54.6600	54.6600
30	4		58.0300	58.0300	58.0300
34	4			59.4650	59.4650
33	4				69.2100
1	4				69.9350
31	4				
Sig.		.054	.054	.052	.051



รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติแบบ ANOVA ด้วยวิธี Scheffa ของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อย จีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

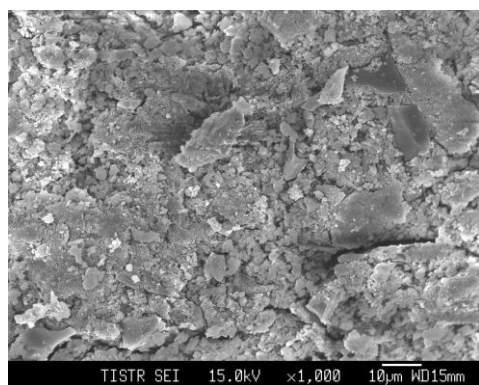
4.4 โครงสร้างระดับจุลภาคและองค์ประกอบทางแร่ของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อย จีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถาขานอ้อย จีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่า จากรูปที่ 4.27ก-4.27ข แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากันและเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีปริมาณควอตซ์เพิ่มขึ้นส่วนสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตไม่แตกต่างกันมาก ขณะที่รูปที่ 4.27ค-4.27ง พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในระบบ ส่งผลทำให้ปริมาณควอตซ์ลดลงส่วนสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีแนวโน้มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.27จ-4.27ข พบว่า การเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในระบบ โดยที่ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมมีปริมาณเท่ากัน ส่งผลทำให้ปริมาณควอตซ์ลดลง และมีสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมากขึ้นเล็กน้อย

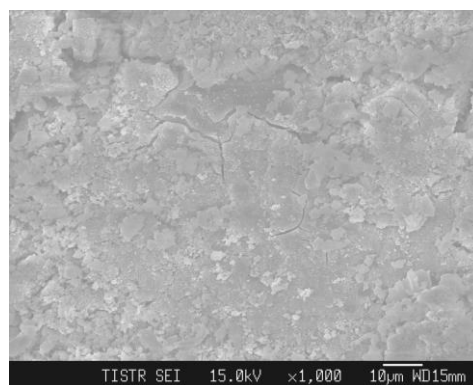


รูปที่ 4.27 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) 10M20PC, (ข) 15M20PC (ค) 15M30PC (ง) 15M40PC (จ) 15M10FA10PC (ฉ) 15M15FA15PC (ช) 15M20FA20PC
(Q= Quartz (SiO_2), S= Calcium silicate hydrate ($\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5} \cdot x\text{H}_2\text{O}$))

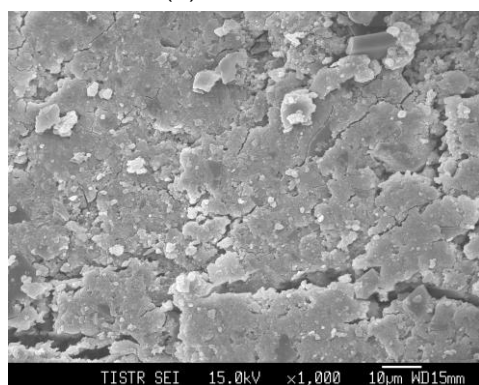
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่า โครงสร้างทางจุลภาคของมวลเบาแบบเซลลูโลสมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ลักษณะโครงสร้างของมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ (รูปที่ 4.28ก) มีแนวโน้มของความหนาแน่นน้อยกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ (รูปที่ 4.28ข) ขณะที่เมื่อแทนที่เถ้าลอยในส่วนผสม พบว่า โครงสร้างทางจุลภาคของมวลเบาแบบเซลลูโลสไม่แตกต่างกันมาก ส่วนเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น พบว่า โครงสร้างทางจุลภาคของมวลเบาแบบเซลลูโลสมีแนวโน้มมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



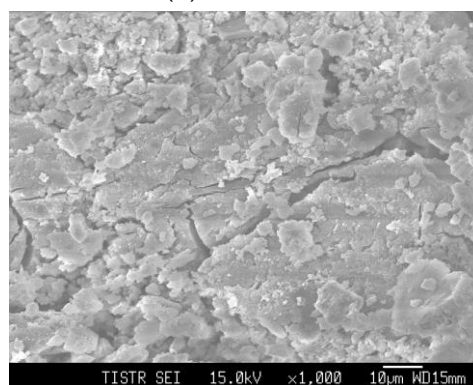
(ก) 10M20PC



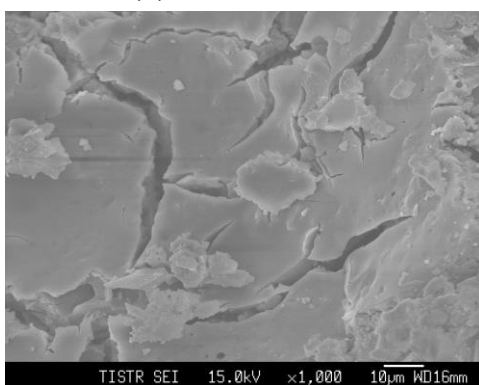
(ข) 15M20PC



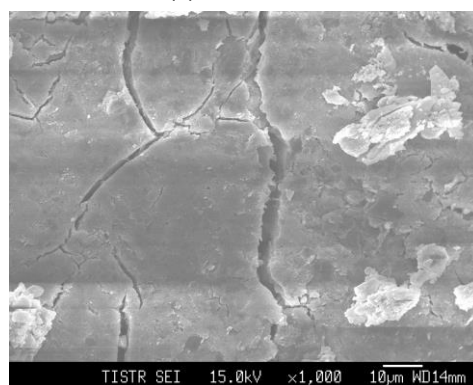
(ค) 15M10FA10PC



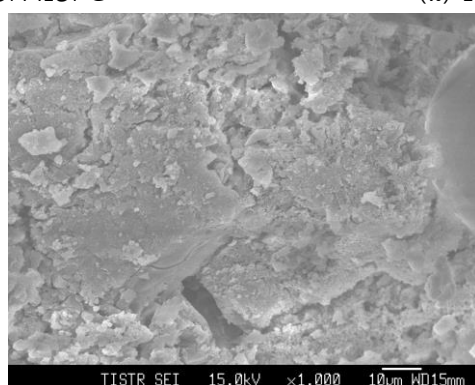
(ง) 15M30PC



(จ) 15M15FA15PC



(ฉ) 15M40PC



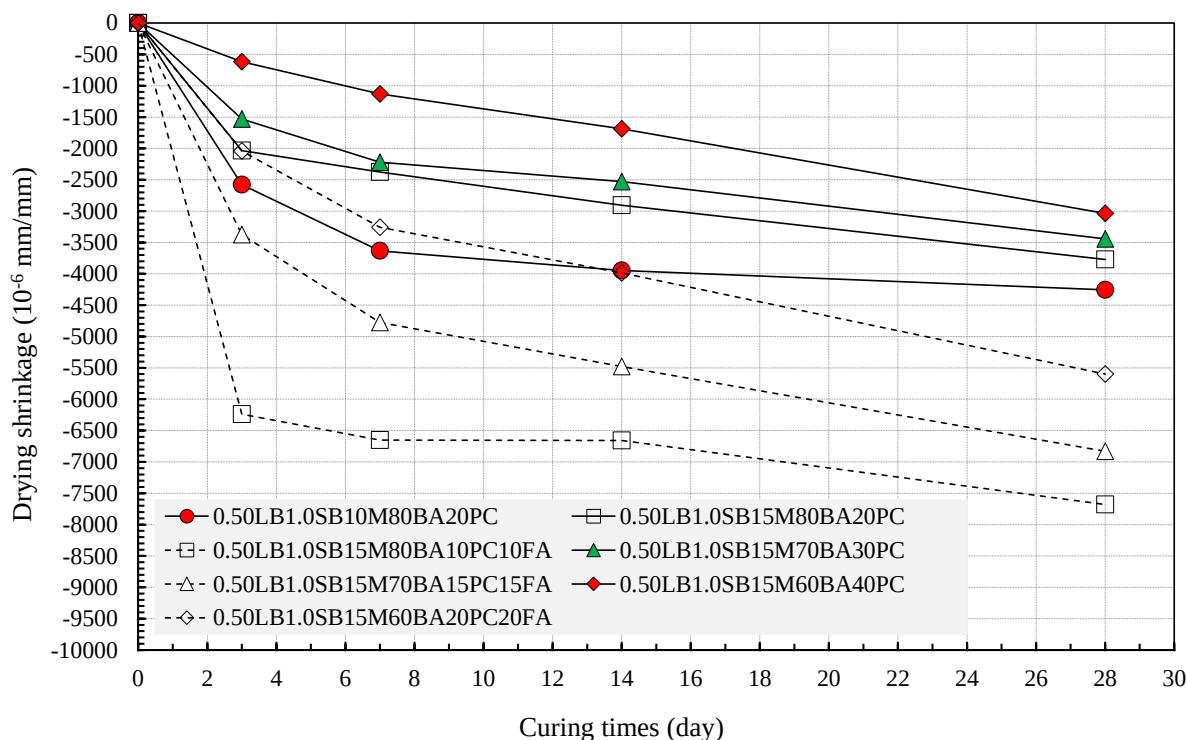
(ช) 15M20FA20PC

รูปที่ 4.28 โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

4.5 ค่าการหดตัวแห้งของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ผลการทดสอบค่าการหดตัวแห้งของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่า การหดตัวแห้งของมวลเบาแบบเซลลูโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ปล่อยให้แห้ง ซึ่งมีอัตราการหดตัวแห้งสูงในช่วงระยะต้นและอัตราการหดตัวแห้งลดลงเกือบคงที่ในช่วง 28 วัน สำหรับส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าชานอ้อยเพียงอย่างเดียว ขณะที่ส่วนผสมที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยแทนที่เถ้าชานอ้อยอย่างละครึ่ง ค่าหดตัวแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะที่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปัจจัยของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มส่งผลต่อค่าหดตัวแห้งที่ลดลงทำนองเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

โดยค่าการหดตัวแห้งของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน มีค่าเท่ากับ -4255×10^{-6} , -3770×10^{-6} , -7680×10^{-6} , -3443×10^{-6} , -6830×10^{-6} , -3037×10^{-6} และ -5600×10^{-6} mm/mm ของส่วนผสม 1.0 SB1 0 M8 0 BA2 0 PC, 1.0SB15M80BA20PC, 1.0SB15M80BA10PC10FA, 1.0SB15M70BA30PC, 1.0SB15M70BA15PC15FA, 1.0SB15M60BA40PC และ 1.0SB15M60BA20PC20FA ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบกับค่ามาตรฐานของมวลเบาแบบเซลลูโลส พบว่า มอก.2601-2556 ไม่ได้มีการระบุค่ามาตรฐานของมวลเบาแบบเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ วันโชค เครือหงษ์ และอภิวิชญ์ พูลสง (2560) ที่ได้ศึกษาสมบัติทางกล โครงสร้างทางจุลภาค การนำความร้อนและการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อย โดยควบคุมค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ $900\text{--}1,200 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งค่าหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าระหว่าง $-2,000$ ถึง $-2,500 \times 10^{-6}$ mm/mm เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า ค่าหดตัวแห้งมีค่าน้อยกว่างานวิจัยนี้ที่เป็นมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของงานวิจัยทั้ง 2 งานนี้ พบว่า การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยสูงสุดเพียงร้อยละ 30 ขณะที่งานวิจัยนี้ใช้เถ้าชานอ้อยในส่วนผสมถึงร้อยละ 80 ด้วยคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยที่มีความพรุนสูงและดูดน้ำสูงส่งผลให้ค่าหดตัวแห้งมีแนวโน้มสูงตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ส่วนผสมของ 1.0SB15M80BA20PC, 1.0SB15M70BA30PC และ 1.0SB15M60BA40PC มีค่าหดตัวแห้งเท่ากับ -3770×10^{-6} , -3443×10^{-6} และ -3037×10^{-6} mm/mm จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามีค่าหดตัวแห้งไม่แตกต่างกันมากกับงานคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยถึงแม้มีการใช้เถ้าชานอ้อยในปริมาณสูง

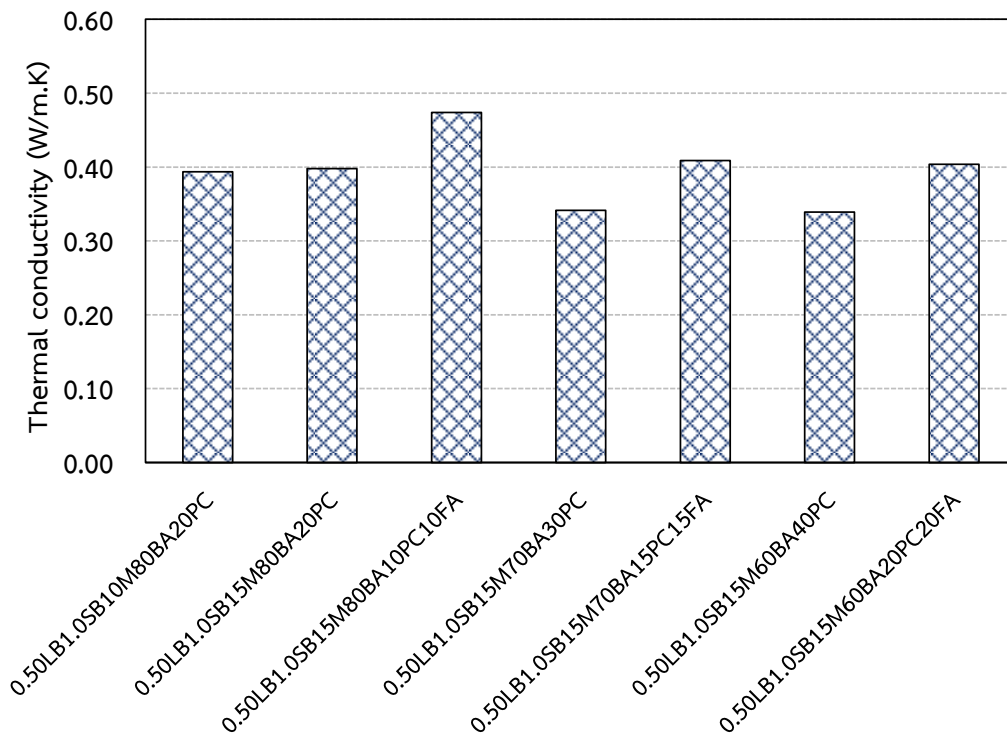


รูปที่ 4.29 ค่าการหดตัวแห้งของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสเท่ากับ 0.394, 0.398, 0.474, 0.341, 0.401, 0.339 และ 0.404 W/m-K สำหรับของผสม 1.0SB10M80BA20PC, 1.0SB15M80BA20PC, 1.0SB15M80BA10PC10FA, 1.0SB15M70BA30PC, 1.0SB15M70BA15PC15FA, 1.0SB15M60BA40PC และ 1.0SB15M60BA20PC20FA ตามลำดับ จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการใช้เถาขานอ้อยที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลง ขณะที่การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยอย่างละครึ่งแทนที่ในเถาขานอ้อยส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสเช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่าจากงานวิจัยของ Kim et al. (2012) ที่ได้มีการรายงานไว้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสของระบบซีเมนต์จะมีแนวโน้มลดลงตามค่าความพรุนที่สูงขึ้น เช่นเดียวกับกับผลการทดสอบของ วันโชค เครือหงษ์ และอภิวิชญ์ พูลสง (2560) ได้ศึกษาการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถาขานอ้อย โดยควบคุมค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 900-1,200 kg/m³ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสของระบบซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่เถาขานอ้อยในปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาการแทนที่เถาขานอ้อยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงร้อยละ 30 ขณะที่งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาการใช้เถาขานอ้อยในส่วนผสมถึงร้อยละ 80 อาจจะเป็นได้ว่า การใช้เถาขานอ้อยในส่วนผสมในปริมาณสูงส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลส

เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลส พบว่า มอก.2601-2556 ไม่ได้มีการระบุค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาได้ระบุว่า มวลเบาแบบเซลลูโลสของระบบซีเมนต์ที่มีการควบคุมค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ $900-1,200 \text{ kg/m}^3$ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสระหว่าง $0.15-0.42 \text{ W/m-K}$ หรือจากงานวิจัยของวันโชค เครือหงษ์ และอภิวิชัย พูลสง (2560) ที่ได้ควบคุมค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ $1,000 \text{ kg/m}^3$ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสของระบบซีเมนต์เท่ากับ 0.273 W/m-K เมื่อวิเคราะห์ตามผลการทดสอบครั้งนี้ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าสูงกว่ามวลเบาแบบเซลลูโลสของระบบซีเมนต์แต่ไม่มาก อย่างไรก็ตามผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนยังคงต้องพิจารณา ร่วมกับกำลังอัด การดูดซึมน้ำ การหดตัวด้วย นอกจากนั้น ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของงานวิจัยนี้จะค่อนข้างสูงกว่าปกติ แต่เมื่อพิจารณาถึงการใช้เถ้าขานอ้อยในปริมาณสูงถือว่าเป็นจุดที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง



รูปที่ 4.30 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

4.7 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การประเมินวัฏจักรชีวิตของบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นการหาในส่วนของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เปรียบเทียบกับบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากระบบของปูนซีเมนต์ ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย จากตารางที่ 4.4 พบว่า สารละลายโซเดียมซิลิเกตมีค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดและเถาขานอ้อยมีค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด ส่วนปูนซีเมนต์มีค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.82 t CO₂-e/ton ขณะที่ตารางที่ 4.5 แสดงส่วนผสมและผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เปรียบเทียบกับบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากระบบของปูนซีเมนต์ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมของ 1.OSB10M80BA20PC, 1.OSB15M80BA20PC, 1.OSB15M80BA10PC10FA, 1.OSB15M70BA30PC, 1.OSB15M70BA15PC15FA, 1.OSB15M60BA40PC และ 1.OSB15M60BA20PC20FA มีค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตเท่ากับ 0.140, 0.140, 0.113, 0.167, 0.127, 0.195 และ 0.140 CO₂-e/ton ตามลำดับ ขณะที่บล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากระบบของปูนซีเมนต์มีค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตเท่ากับ 0.525 CO₂-e/ton จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า บล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์มีค่าประเมินวัฏจักรชีวิตต่ำกว่าบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากระบบของปูนซีเมนต์ทุกส่วนผสม ซึ่งหมายถึงบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนั่นเอง นอกจากนั้นจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมของ 1.OSB15M80BA10PC10FA มีค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตต่ำที่สุด อาจเนื่องจากการใช้เถ้าลอยในส่วนผสมช่วยให้มีค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เนื่องจากเถ้าลอยมีค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับผลการทดสอบกำลังอัด การดูดซึมน้ำ การหดตัวแห้ง และค่าการนำความร้อน พบว่า บล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสของ 1.OSB15M80BA20PC เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมถึงแม้ว่าจะมีค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตสูงกว่าส่วนผสมของ 1.OSB15M80BA10PC10FA และ 1.OSB15M70BA15PC15FA

ตารางที่ 4.4 ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

(Phoo-ngernkham et al., 2016)

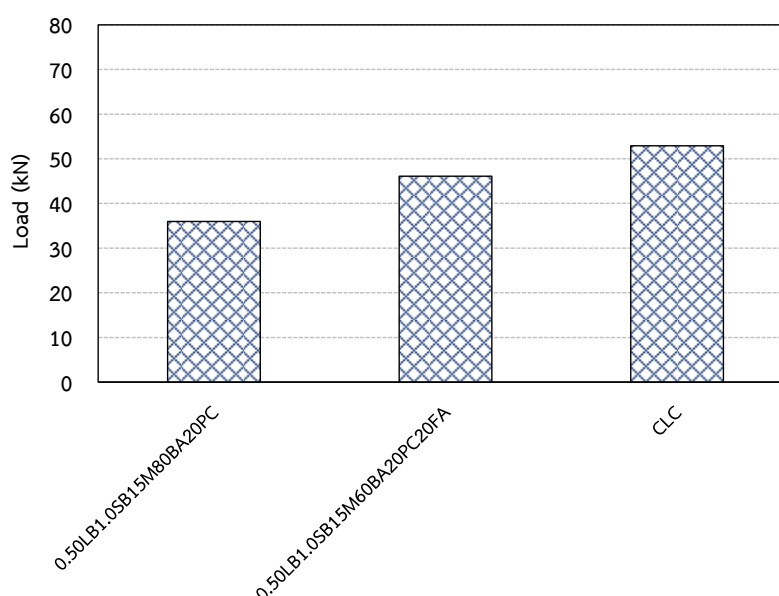
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (t CO ₂ -e/ton)
เถาขานอ้อย, (BA) (kg)	0.0016
เถ้าลอย, FA (kg)	0.0070
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, PC (kg)	0.8200
ทรายละเอียด, Sand (kg)	0.0139
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, NH (kg)	0.7000
สารละลายโซเดียมซิลิเกต, NS (kg)	1.5140

ตารางที่ 4.5 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ส่วนผสม	BA (kg)	CO ₂ -e/t from BA	FA (kg)	CO ₂ -e/t from FA	PC (kg)	CO ₂ -e/t from PC	Sand (kg)	CO ₂ -e/t from RS	NH (kg)	CO ₂ -e/t from NH	NS (kg)	CO ₂ -e/t from NS	ผลรวม CO ₂ -e/t
0.50LB1.0SB10M80BA20PC	209	0.00033	-	-	67	0.0549	330	0.0046	90	0.0189	94	0.0612	0.140
0.50LB1.0SB15M80BA20PC	207	0.00033	-	-	66	0.0541	326	0.0045	94	0.0197	94	0.0612	0.140
0.50LB1.0SB15M80BA10PC10FA	207	0.00033	33	0.0002	33	0.0271	326	0.0045	94	0.0197	94	0.0612	0.113
0.50LB1.0SB15M70BA30PC	181	0.00029	-	-	99	0.0812	326	0.0045	94	0.0197	94	0.0612	0.167
0.50LB1.0SB15M70BA15PC15FA	181	0.00029	50	0.0004	50	0.0410	326	0.0045	94	0.0197	94	0.0612	0.127
0.50LB1.0SB15M60BA40PC	155	0.00025	-	-	133	0.1091	326	0.0045	94	0.0197	94	0.0612	0.195
0.50LB1.0SB15M60BA20PC20FA	155	0.00025	66	0.0005	66	0.0541	326	0.0045	94	0.0197	94	0.0612	0.140
CLC	-	-	-	-	630	0.5166	620	0.0086	-	-	-	-	0.525

4.8 กำลังอัดของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง

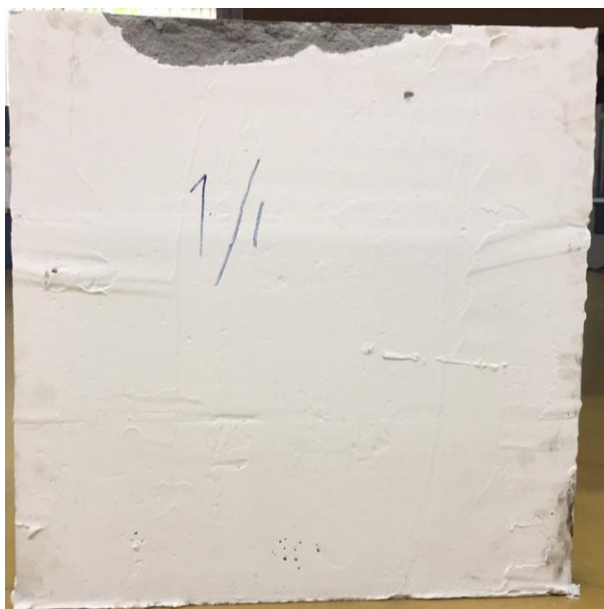
หลังจากได้ส่วนผสมที่ดีที่สุดของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นั้นคือ ส่วนผสมของ 1.0SB15M80BA20PC ขณะที่ส่วนผสมของ 1.0SB15M60BA20PC20FA เป็นเพียงการเลือกส่วนผสมเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบเนื่องด้วยจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ต้องการใช้เถาขานอ้อยและปูนซีเมนต์เป็นวัสดุสำหรับการผลิตบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสเท่านั้น โดยจะดำเนินการหล่อเป็นผนังมวลเบาและใช้ปูนก่อของมวลเบาเป็นวัสดุประสานระหว่างก้อนและนำบล็อกมวลเบาจากท้องตลาดมาหล่อเช่นเดียวกันเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบ และดำเนินการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 โดยก่อนการทดสอบจะฉาบด้วยปูนขาวเพื่อให้สามารถเห็นพฤติกรรมของบล็อกมวลเบาพร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงจุดเด่นและข้อจำกัดของบล็อกเขียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง



รูปที่ 4.31 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง



(ก) 0.50LB1.0SB15M80BA20PC



(ข) CLC

รูปที่ 4.32 ลักษณะการวิบัติของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง

รูปที่ 4.31 แสดงกำลังอัดของบล็อกเชียวมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาขานหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อหล่อเป็นผนัง พบว่า บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า (CLC) ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าส่วนผสมของ 1.OSB15M80BA20PC และ .0SB15M60BA20PC20FA การที่บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาขานหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้าอาจเนื่องจากปูนก่อก่อที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างก้อนเป็นปูนก่อก่อที่ใช้สำหรับบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสของระบบปูนซีเมนต์โดยตรง ขณะที่ปูนก่อก่อที่ใช้จะส่งผลต่อบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ที่เกิดรอยแยกเล็กๆที่จุดต่อระหว่างก้อน ซึ่งแนวทางแก้ไขสามารถแยกเป็น 2 กรณี กรณีแรกคือ พัฒนาปูนก่อก่อสำหรับบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์ และกรณีที่ 2 คือ ใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นปูนก่อก่อแทนปูนก่อก่อของมวลเบา เนื่องด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์จะสามารถยึดเกาะกับจีโอโพลิเมอร์ได้เป็นอย่างดีดังเช่นผลงานวิจัยของ Phoo-ngernkham et al. (2015) การยึดเกาะที่ตีระหว่างซีเมนต์มอร์ตาร์กับจีโอโพลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินาจากเถาขานอ้อยกับแคลเซียมออกไซด์ส่งผลให้เกิดเป็นผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ซึ่งการใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์ยังเป็นการลดต้นทุนที่ต้องสั่งซื้อปูนก่อก่อของมวลเบามาใช้ในการหล่อผนัง

4.9 วิเคราะห์ราคาของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาขานหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เปรียบเทียบกับบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า

การวิเคราะห์ราคาเพื่อความคุ้มค่าในการลงทุนผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาขานหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เปรียบเทียบกับราคาของผลิตภัณฑ์บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า โดยส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาขานหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ราคาดังแสดงในตารางที่ 4.6 และราคาที่ใช้ในการผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาขานหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ขณะที่ผลการวิเคราะห์ราคาของมวลเบาแบบเซลลูโลสดังแสดงในรูปที่ 4.33 พบว่า ส่วนผสมของ 1.0SB10M80BA20PC มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดประมาณ 21 บาท ขณะที่ส่วนผสมของ 1.0SB15M80BA20PC, 1.0SB15M80BA10PC10FA, 1.0SB15M70BA30PC, 1.0SB15M70BA15PC15FA, 1.0SB15M60BA40PC และ 1.0SB15M60BA20PC20FA มีต้นทุนการผลิตใกล้เคียงกันประมาณ 25-28 บาท เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า พบว่า บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์มีต้นทุนการผลิตสูงกว่าบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า (ประมาณ 21 บาท) ยกเว้นส่วนผสมของ 1.0SB10M80BA20PC ที่มีราคาใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาราคาของเถาขานอ้อยเปรียบเทียบกับราคาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ดังแสดงในตารางที่ 4.7) พบว่า ถึงแม้ว่าราคาของเถาขานอ้อย (ในงานวิจัยนี้คิดเป็นราคา 0.10 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม เนื่องด้วยพิจารณาค่าใช้จ่ายในการบดเถาขานอ้อยร่วมด้วย) จะถูกกว่าราคาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงประมาณ 20 เท่า แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยราคาของสารละลายโซเดียม-ซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงทำให้ราคาของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์สูงตามไปด้วย แนวทางแก้ไขสำหรับงานวิจัยในอนาคต คือ ลดการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวในส่วนผสม ดังเช่นรายงานวิจัยของ Phoo-ngernkham et al. (2016) ที่ได้รายงานไว้ว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวสามารถพัฒนากำลังอัดได้แต่จะมีค่าน้อยกว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เมื่อพิจารณาส่วนผสมของ 0.50LB1.0SB10M80BA20PC ร่วมกับผลการทดสอบกำลังอัด การดูดซึมน้ำ การหดตัวแห้ง ค่าการนำความร้อน และค่าการประเมินวัฏจักรชีวิต พบว่า ส่วนผสมนี้มีค่ากำลังอัด การหดตัว

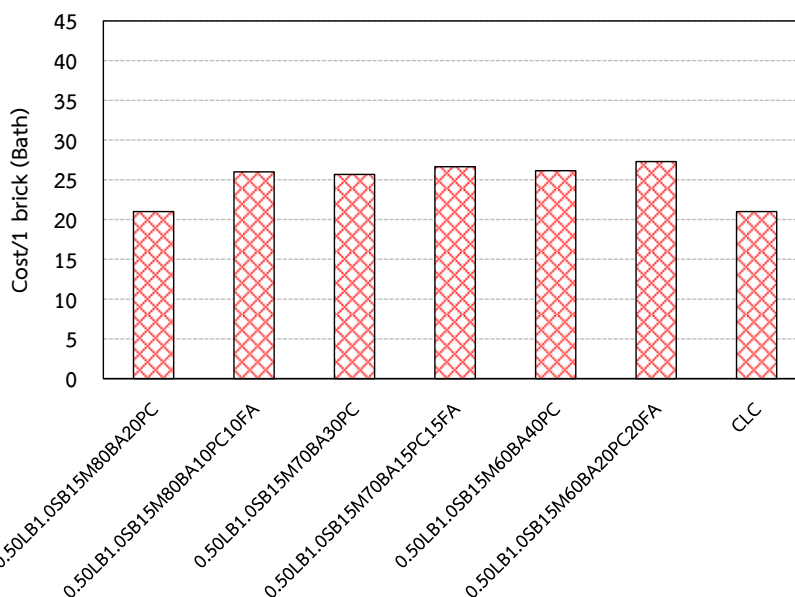
แห้ง ค่าการนำความร้อน และค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเทียบเคียงกับส่วนผสมของ 1.0SB15M80BA20PC ยกเว้นค่าการดูดซึมน้ำไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 ถึงแม้ว่า บล๊อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์จะมีราคาต้นทุนสูงกว่าบล๊อคมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า แต่อย่างไรก็ตาม บล๊อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์มีกำลังอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก. 2601-2556 ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน ขณะที่บล๊อคมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้าต้องดำเนินการบ่ม ที่อายุเท่ากับ 28 วัน จากเหตุผลข้างต้น การที่บล๊อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์มีกำลังอัดผ่าน เกณฑ์ที่อายุการบ่ม 7 วัน แสดงถึงสามารถผลิตบล๊อคมวลเบาแบบเซลลูโลสได้มากกว่าบล๊อคมวลเบา แบบเซลลูโลสทางการค้าถึง 4 เท่า นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ พบว่า บล๊อคมวลเบา แบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์สามารถผลิตเป็นบล๊อคทนไฟได้ เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์สามารถทนไฟได้สูง ดังรายงานวิจัยที่ผ่านมา ในปัจจุบันราคาของอิฐทนไฟอยู่ประมาณ 50-90 บาท ต่อ 1 ก้อน (ที่มา: www.cerawan.com) ซึ่งสูงกว่าราคาของบล๊อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์จากงานวิจัยนี้ ประมาณ 2-5 เท่า ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าส่วนผสมของ 1.0SB10M80BA20PC และ 1.0SB15M80BA20PC สามารถพัฒนาเป็นบล๊อคมวลเบาแบบเซลลูโลสทางเลือกเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม การก่อสร้างต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 4.6 ส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ราคา (kg/m^3)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสม (kg/m^3)								
		BA	FA	PC	Sand	NH	NS	สารเพิ่มฟอง	น้ำสำหรับผสมกับ วัสดุประสาน	น้ำสำหรับผสมกับ สารเพิ่มฟอง
1	0.50LB1.0SB10M80BA20PC	209	0	67	330	90	90	0.74	64	30
2	0.50LB1.0SB15M80BA20PC	207	0	66	326	94	94	0.74	63	30
3	0.50LB1.0SB15M80BA10PC10FA	207	33	33	326	94	94	0.74	63	30
4	0.50LB1.0SB15M70BA30PC	181	0	99	326	94	94	0.75	56	30
5	0.50LB1.0SB15M70BA15PC15FA	181	50	50	326	94	94	0.74	56	30
6	0.50LB1.0SB15M60BA40PC	155	0	133	326	94	94	0.75	49	30
7	0.50LB1.0SB15M60BA20PC20FA	155	66	66	326	94	94	0.75	49	30
8	CLC	0	0	630	620	0	0	0.63	324	32

ตารางที่ 4.7 ราคาที่ใช้ในการผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Baht/1 kg)

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย (Baht/1 kg)										
BA	FA	PC	Sand	5M NH	10M NH	15M NH	NS	สารเพิ่มฟอง	น้ำ	
0.1	1.0	2.1	0.2	5.98	8.02	13.00	14.0	200.0	1.0	



รูปที่ 4.33 วิเคราะห์ราคาของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เปรียบเทียบกับบล็อกทางการค้า

4.10 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับมาตรฐานต่างๆ

จากส่วนผสมมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ผ่านเกณฑ์กำลังอัดตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 จำนวน 7 ส่วนผสม จะดำเนินการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับมาตรฐานต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลและง่ายต่อผู้ใช้ประโยชน์ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า

4.10.1 ส่วนผสมของ 0.50LB1.0SB10M80BA20PC จะเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่จะพัฒนาเป็นบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลส ทั้งในด้านกำลังอัด การหดตัวแห้ง สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และราคาต้นทุน ถึงแม้ว่าจะมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่ามาตรฐาน มอก.2601-2556 แต่ถือแต่ถือว่ายังคงใกล้เคียงกัน ดังนั้นส่วนผสมสามารถพัฒนาเป็นบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสได้เพื่อเป็นทางเลือกของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า โดยมีข้อดีตรงที่สามารถถอดเร็วได้เพียงอายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน เท่านั้น

4.10.2 ส่วนผสมของ 0.50LB1.0SB15M80BA20PC ส่วนผสมนี้มีคุณสมบัติด้านต่างๆที่ดีทั้งกำลังอัด และค่าการดูดซึมน้ำที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 โดยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนการนำความร้อนใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับมวลเบาแบบเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตาม ราคาต้นทุนสูงกว่าบล็อกปกติจึงเหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นบล็อกทนไฟ ซึ่งมีราคาต่ำกว่าบล็อกมวลเบาทนไฟทางการค้า

4.10.3 ส่วนผสมของ 0.50LB1.0SB15M80BA10PC10FA ส่วนผสมนี้มีกำลังอัดและค่าการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 แต่อย่างไรก็ตามค่าหดตัวแห้ง สัมประสิทธิ์การนำความร้อนการนำความร้อนและราคาต้นทุนที่สูง ดังนั้น จึงไม่เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้าง

4.10.4 ส่วนผสมของ 0.50LB1.0SB15M70BA30PC ส่วนผสมนี้มีคุณสมบัติด้านต่างๆที่ดีทั้งกำลังอัด และค่าการดูดซึมน้ำที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 โดยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนการนำความร้อนใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับมวลเบาแบบเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตาม ราคาต้นทุน

สูงกว่าบล็อกปกติจึงเหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นบล็อกทนไฟ ซึ่งมีราคาต่ำกว่าบล็อกมวลเบาทนไฟทางการค้า เช่นเดียวกันกับส่วนผสมของ 0.50LB1.OSB15M80BA20PC

4.10.5 ส่วนผสมของ 0.50LB1.OSB15M70BA15PC15FA ส่วนผสมนี้มีกำลังอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนการนำความร้อนใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับมวลเบาแบบเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตามค่าดูดซึมน้ำ ค่าหดตัวแห้ง และราคาต้นทุนที่สูง ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างเช่นเดียวกับส่วนผสมของ 0.50LB1.OSB15M80BA10PC10FA

4.10.6 ส่วนผสมของ 0.50LB1.OSB15M60BA40PC ส่วนผสมนี้มีคุณสมบัติด้านกำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 และค่าการหดตัวแห้ง โดยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนการนำความร้อนใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับมวลเบาแบบเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตาม ค่าดูดซึมน้ำและราคาต้นทุนสูงกว่าบล็อกปกติจึงเหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นบล็อกทนไฟ ซึ่งมีราคาต่ำกว่าบล็อกมวลเบาทนไฟทางการค้าเช่นเดียวกันกับส่วนผสมของ 0.50LB1.OSB15M80BA20PC และ 0.50LB1.OSB15M70BA30PC

4.10.7 ส่วนผสมของ 0.50LB1.OSB15M60BA20PC20FA ส่วนผสมนี้มีกำลังอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนการนำความร้อนใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับมวลเบาแบบเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตามค่าดูดซึมน้ำ ค่าหดตัวแห้ง และราคาต้นทุนที่สูง ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างเช่นเดียวกับส่วนผสมของ 0.50LB1.OSB15M80BA10PC10FA และ 0.50LB1.OSB15M70BA15PC15FA

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจิโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับมาตรฐานต่างๆ

สัญลักษณ์	กำลังอัด	การดูดซึมน้ำ	ค่าหดตัวแห้ง	สปส.การนำความร้อน	การประเมินวัฏจักรชีวิต	กำลังอัดของบล็อกเมื่อหล่อเป็นผนัง	ราคา	แนวทางการใช้ประโยชน์	ข้อจำกัด/หมายเหตุ
0.50LB1.0SB10M80BA20PC	√	×	เทียบเท่า ²	เทียบเท่า ³	√	√	เทียบเท่า ⁴	1. บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลส 2. บล็อกทนไฟ	ส่วนผสมนี้เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่จะพัฒนาเป็นบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลส ทั้งในด้านกำลังอัด การหดตัวแห้ง สปส.การนำความร้อน และราคาต้นทุน ถึงแม้ว่าจะมีการดูดซึมน้ำมากกว่ามาตรฐาน มอก. 2601-2556 แต่ถือว่ายังคงใกล้เคียงกัน
0.50LB1.0SB15M80BA20PC	√	√	√	เทียบเท่า ³	√	√	×	1. บล็อกทนไฟ	ส่วนผสมนี้มีคุณสมบัติด้านต่างๆที่ดี โดย สปส.การนำความร้อนใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับมวลเบาแบบเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตามราคาต้นทุนสูงกว่าบล็อกปกติจึงเหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นบล็อกทนไฟ

หมายเหตุ:

¹ มอก.2601-2556

² งานวิจัยของวันโชค เครือหงษ์ และอภิวิชญ์ พูลสง (2560) ใช้ปูนซีเมนต์ต่อเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 70:30 ในการผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลส

³ งานวิจัยของ Kim et al. (2012)

⁴ ราคาบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่าจากเถ้าขานอ้อยจิโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับมาตรฐานต่างๆ (ต่อ)

สัญลักษณ์	กำลังอัด	การดูดซึมน้ำ	ค่าหดตัวแห้ง	สปส.การนำความร้อน	การประเมินวัฏจักรชีวิต	กำลังอัดของบล็อกเมื่อหล่อเป็นผนัง	ราคา	แนวทางการใช้ประโยชน์	ข้อจำกัด/หมายเหตุ
0.50LB1.0SB15M80BA10PC10FA	√	√	×	×	√	√	×	-	ส่วนผสมนี้มีค่าหดตัวแห้ง สปส.การนำความร้อน และ ราคาต้นทุนที่สูง ถึงแม้ว่า กำลังอัดและค่าดูดซึมน้ำจะ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 ดังนั้น ไม่เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุ ก่อสร้าง
0.50LB1.0SB15M70BA30PC	√	เทียบเท่า ¹	√	เทียบเท่า ³	√	√	×	1. บล็อกทนไฟ	ส่วนผสมนี้มีคุณสมบัติด้าน ต่างๆที่ดี โดยค่าการดูดซึมน้ำและ สปส.การนำความร้อนใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ ผ่านมาที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับ มวลเบาแบบเซลลูล่า แต่ อย่างไรก็ตาม ราคาต้นทุน สูงกว่าบล็อกปกติจึงเหมาะ สำหรับการพัฒนาเป็น บล็อกทนไฟ

หมายเหตุ:

¹ มอก.2601-2556

² งานวิจัยของวันโชค เครือหงษ์ และอภิวิชญ์ พูลสง (2560) ใช้ปูนซีเมนต์ต่อเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 70:30 ในการผลิตมวลเบาแบบเซลลูล่า

³ งานวิจัยของ Kim et al. (2012)

⁴ ราคาบล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่าทางการค้า

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจิโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับมาตรฐานต่างๆ (ต่อ)

สัญลักษณ์	กำลังอัด	การดูดซึมน้ำ	ค่าหดตัวแห้ง	สปส.การนำความร้อน	การประเมินวัฏจักรชีวิต	กำลังอัดของบล็อกเมื่อหล่อเป็นผนัง	ราคา	แนวทางการใช้ประโยชน์	ข้อจำกัด/หมายเหตุ
0.50LB1.0SB15M70BA15PC15FA	✓	×	×	เทียบเท่า ³	✓	✓	×	-	ส่วนผสมนี้มีค่าหดตัวและราคาต้นทุนที่สูง ถึงแม้ว่ากำลังอัดและค่าดูดซึมน้ำจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 และ สปส.การนำความร้อน อยู่ในช่วงที่สามารถรับได้ก็ ตาม ดังนั้น ไม่เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้าง
0.50LB1.0SB15M60BA40PC	✓	×	✓	เทียบเท่า ³	✓	✓	×	1. บล็อกทนไฟ	ส่วนผสมนี้มีคุณสมบัติด้าน สปส.การนำความร้อน ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่าน มาที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับมวล เบาแบบเซลลูโลส แต่ อย่างไรก็ตาม ราคาต้นทุน สูงกว่าบล็อกปกติ นอกจากนั้น ค่าดูดซึมน้ำ ใกล้เคียงกับม มอก.2601-2556 จึงเหมาะสำหรับการ พัฒนาเป็นบล็อกทนไฟ

หมายเหตุ:

¹ มอก.2601-2556

² งานวิจัยของวันโชค เครือหงษ์ และอภิวิชญ์ พูลสง (2560) ใช้ปูนซีเมนต์ต่อเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 70:30 ในการผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลส

³ งานวิจัยของ Kim et al. (2012)

⁴ ราคาบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับมาตรฐานต่างๆ (ต่อ)

สัญลักษณ์	กำลังอัด	การดูดซึมน้ำ	ค่าหดตัวแห้ง	สปส.การนำความร้อน	การประเมินวัฏจักรชีวิต	กำลังอัดของบล็อกเมื่อหล่อเป็นผนัง	ราคา	แนวทางการใช้ประโยชน์	ข้อจำกัด/หมายเหตุ
0.50LB1.0SB15M60BA20PC20FA	√	×	×	เทียบเท่า ³	√	√	×	-	ส่วนผสมนี้มีค่าหดตัวและราคาต้นทุนที่สูง ถึงแม้ว่ากำลังอัดและค่าดูดซึมน้ำจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556 และ สปส.การนำความร้อน อยู่ในช่วงที่สามารถรับได้ก็ตาม ดังนั้น ไม่เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้าง

หมายเหตุ:

¹ มอก.2601-2556

² งานวิจัยของวันโชค เครือหงษ์ และอภิวิชญ์ พูลสง (2560) ใช้ปูนซีเมนต์ต่อเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 70:30 ในการผลิตมวลเบาแบบเซลลูโลส

³ งานวิจัยของ Kim et al. (2012)

⁴ ราคาบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งออกแบบหน่วยน้ำหนักเปียกของบล็อคมวลเบาแบบเซลลูโลสเท่ากับ $1,000 \text{ kg/m}^3$ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารต่างในส่วนผสม โดยกำหนดอัตราส่วนผสม $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนผสมเพิ่มฟองต่อน้ำประปาเท่ากับ 1:50 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และแปรผันความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 10 และ 15 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.1, 2:1 และ 3:1 ปริมาณการใช้เถาขานอ้อยต่อเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 ของน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอายุการบ่มตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสลดลง เมื่อพิจารณากำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสร่วมกับค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556 พบว่า ส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของ 1.OSB10 M8 0BA2 0PC, 1.OSB15M8 0BA2 0PC, 1.OSB15M8 0BA1 0PC10FA, 1.OSB15M70BA30PC, 1.OSB15M70BA1 5PC15FA, 1.OSB15M60BA40PC และ 1.OSB15M60BA20PC20FA ผ่านเกณฑ์กำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสมากกว่า 2.5 MPa ตั้งแต่อายุการบ่ม 7 วัน

5.1.2 ค่าการดูดซึมน้ำของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของส่วนผสม 1.OSB15M80BA20PC และ 1.OSB15M80BA10PC10FA มีค่าการดูดซึมน้ำผ่านค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556 ที่ต้องไม่มากกว่าร้อยละ 23 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ขณะที่ส่วนผสมอื่นๆ พบว่า มีค่าดูดซึมน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 30 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานของ มอก.2601-2556 อาจเนื่องจากเถาขานอ้อยจะมีการดูดซึมน้ำสูงจึงส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของมวลเบาแบบเซลลูโลส

5.1.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณควอตซ์เพิ่มขึ้นขณะที่สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตไม่แตกต่างกันมาก เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณควอตซ์ลดลงขณะที่สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีแนวโน้มมากขึ้น ส่วนการแทนที่เถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมมีปริมาณเท่ากันส่งผลทำให้ปริมาณควอตซ์ลดลงและมีสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่โครงสร้างทางจุลภาคของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ มีแนวโน้มของความหนาแน่นน้อยกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ส่วนการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของมวลเบาแบบเซลลูโลสมีแนวโน้มมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และโครงสร้างทางจุลภาคสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของมวลเบาแบบ

เซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเพิ่มขึ้น

5.1.4 ค่าการหดตัวแห้งของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ปล่อยให้แห้ง ซึ่งมีอัตราการหดตัวแห้งสูงในช่วงระยะต้นและอัตราการหดตัวแห้งลดลงเกือบคงที่ในช่วง 28 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยเพียงอย่างเดียวมีแนวโน้มมีค่าหดตัวแห้งต่ำกว่าการใช้เถาลอยในส่วนผสม ขณะที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มมีค่าลดลงสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากผลการทดสอบค่าการหดตัวแห้ง พบว่า ส่วนผสมของ 1.OSB10M80BA20PC, 1.OSB15M80BA20PC, 1.OSB15M70BA30PC และ 1.OSB15M60BA40PC มีค่าหดตัวแห้งใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสผสมเถาขานอ้อย

5.1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถาลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถาขานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ขณะที่เถาลอยในส่วนผสมมีแนวโน้มมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนไม่มาก

5.1.6 มวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์มีค่าประเมินวัฏจักรชีวิตต่ำกว่าบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากระบบของปูนซีเมนต์ทุกส่วนผสมจึงเป็นบล็อกมวลเบาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์ พบว่า มีค่าประเมินวัฏจักรชีวิตใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งส่วนผสมของ 1.OSB15M80BA10PC10FA มีค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตต่ำที่สุด เพราะเถาลอยจะมีค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าปูนซีเมนต์

5.1.7 บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากการค้าให้ค่ากำลังอัดเมื่อหล่อเป็นผนังสูงกว่าบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากปูนก่อกที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างก้อนเป็นปูนก่อกที่ใช้สำหรับบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสของระบบปูนซีเมนต์โดยตรง ซึ่งแนวทางแก้ไขสามารถอาจใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นปูนก่อกแทนปูนก่อกของมวลเบา ซึ่งการใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์ยังเป็นการลดต้นทุนที่ต้องสั่งซื้อปูนก่อกของมวลเบามาใช้ในการหล่อผนัง

5.1.8 บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากจีโอโพลิเมอร์มีต้นทุนการผลิตสูงกว่าบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า ยกเว้นส่วนผสมของ 1.OSB10M80BA20PC ที่มีราคาใกล้เคียงกับบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสทางการค้า ซึ่งส่วนผสมของ 1.OSB10M80BA20PC มีค่ากำลังอัด การหดตัวแห้ง ค่าการนำความร้อน และค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตอยู่ในเกณฑ์ที่ดียกเว้นค่าการดูดซึมน้ำไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.2601-2556

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถาขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์จะมีการดูน้ำสูง อาจเนื่องมาจากงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการปรับปรุงขนาดของเถาขานอ้อยให้เล็กลง แนวทางแก้ไขส่วนนี้ ไม่ต้องปรับปรุงขนาดของเถาขานอ้อยให้เล็กเทียบเคียงกับเถาลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถทำให้มีขนาดเทียบเคียงกับทรายละเอียดจะช่วยให้ลดค่าการดูดซึมน้ำของ บล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสได้

5.2.2 เมื่อหล่อบล็อกเขี้ยวมวลเบาแบบเซลลูล่าจีโอโพลิเมอร์เป็นผนัง พบว่า การยึดเกาะระหว่างบล็อกมวลเบาค่อนข้างไม่ดีเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับบล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่าทางการค้า ดังนั้น จำเป็นต้องมีการพัฒนาปูนก่อบล็อกมวลเบาแบบเซลลูล่าจากจีโอโพลิเมอร์ต่อไป

5.2.3 ในปัจจุบันบล็อกเขี้ยวมวลเบาแบบเซลลูล่าจีโอโพลิเมอร์ยังเป็นวัสดุใหม่สำหรับอุตสาหกรรมการก่อสร้างของประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของมวลเบาแบบเซลลูล่าจีโอโพลิเมอร์จะเห็นได้ว่า สามารถพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับงานก่อสร้าง เนื่องด้วยมีข้อดีหลายด้าน เช่น กำลังอัดที่รวดเร็ว ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี กำลังยึดเหนี่ยวที่ดี และทนต่อการเผาไหม้ได้ดี ดังนั้น มวลเบาแบบเซลลูล่าจีโอโพลิเมอร์จึงควรได้รับการพิจารณาใช้งานอย่างจริงจังในงานก่อสร้างในอนาคต

บรรณานุกรม

- ปริญญ์ จินดาประเสริฐ. **ถั่วลอยในงานคอนกรีต**. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย; 2547.
- ปริญญ์ จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย; 2553.
- รัฐพล สมณา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554. การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**. 34(4): 369-381.
- วันโชค เครือหงษ์ และอภิวิชญ์ พูลสง, 2560. สมบัติเชิงกล โครงสร้างทางจุลภาค การนำความร้อน และการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อย. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม**, 13(2): 22-38.
- พัชรพล โพธิ์ศรี. **การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มวลเบาแบบเซลลูโลสสำหรับงานโครงสร้าง**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2552
- ASTM C618. **Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in cement**. Annual Book of ASTM Standard, Vol.04.01. Philadelphia: [n.p.]; 2008.
- ASTM C642-97. **Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete**. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.02 (Philadelphia).
- ASTM C796-2004. **Standard test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam**. Annual book of ASTM standards. Vol. 04.02 (Philadelphia): 144.
- ASTM C869-99. **Standard specification for foaming agents used in making preformed foam for cellular concrete**. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.02 (Philadelphia).
- Davidovits J. Chemistry of geopolymeric systems, terminology. In: Davidovits J, Davidovits R, James C, editors. **Proceedings of Geopolymer Second International Conference**; 1999 June 30-July 2; Saint-Quentin, France. [n.p.]; 1999. p. 9-39.
- Beben, D., and Manko, Z. Z. (2011). Influence of selected hydrophobic agents on some properties of autoclaving cellular concrete (ACC). **Construction and Building Materials**. 25(1): 282–287.
- Chindaprasirt, P., and Rattanasak, U. (2011). Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash. **Materials and Design**. 32(2): 723–727.
- Cordeiro, G.C., Filijp, R.D.T., Fairbairt, E.M.R., Luis, M.M.T., and Oliver, C.H., 2004, "Influence of mechanical grind on the pozzolanic activity of residual sugarcane bagasse ash", **Proceedings of the international conference on use of recycled materials in building and structure**, Barcelona; pp. 342.

Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2009, “Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars”, **Construction and Building Materials**, Vol. 23, No. 12, pp. 3523-353.

De Rose and Morris (1999). The influence of the mix design on the properties of micro-cellular concrete. **Thomas Telford Publishing. R. K. D. a. N. A. Henderson.**

Esmaily, H., and Nuranian, H. (2012). Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali activated slag. **Construction and Building Materials**. 26(1): 200–206.

Feng, N.-Q., and Peng, G.-F. (2005). Applications of natural zeolite to construction and building materials in China. **Construction and Building Materials**. 19(8): 579–584.

Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K., 2007. “Evaluation of bagasse as supplementary cementitious material, **Cement and Concrete Compoisite**. 29: 515-524.

Jones, M. R., and Mc Carthy, A. (2005). Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications. **N. M. Dhir RK, McCarthy A. London, Thomas Telford**: 61–88.

Jones, M. R., and Mc Carthy, A. (2005). Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete. **Fuel**. 84(11): 1398–1409.

Just, A., and Middendorf, B. (2009). Microstructure of high-strength foam concrete. **Materials Characterization**. 60(7): 741–748.

Khale D, Chaudhary R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**. 2007: 42: 729-746.

Kearsley, E. P. (1996). The use of foamcrete for affordable development in third world countries. Appropriate **Concrete Technology. R. K. Dhir and M. J. Mc Carthy. London, E & FN**: 233–243.

Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J. (2001). The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. **Cement and Concrete Research**. 31(1): 105–112.

Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J. (2001). Porosity and permeability of foamed concrete. **Cement and Concrete Research**. 31(5): 805–812.

Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J. (2002). Ash content for optimum strength of foamed concrete. **Cement and Concrete Research**. 32(2): 241–246.

Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J. (2002). The effect of porosity on the strength of foamed concrete. **Cement and Concrete Research**. 32(2): 233–239.

Khatib, J. M., and Wild, S. (1996). Pore size distribution of metakaolin paste. **Cement and Concrete Research**. 26(10): 1545–1553.

Kim, H. K., Jeon, J. H., and Lee, H. K. (2012). Workability and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air. **Construction and Building Materials**. 29: 193-200.

Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasirt, P. (2011). Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. **Construction and Building Materials**. 25(11): 4095–4104.

Nambiar, E. K. K., and Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. **Cement and Concrete Composites**. 28(5): 475–480.

Nambiar, E. K. K., and Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete." **Cement and Concrete Research**. 37(2): 221–230.

Office of Cane and Sugar Board, 2010, **Report on total cane crushing and sugar production 2009/2010**, Thailand: Ministry of Industry.

Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Suksiripattanaong, C., Thumrongvut, J., Suebsuk, J., and Sookasem, S. (2016). Flexural strength of notched concrete beam filled with alkali activated binders under different types of alkali solutions". **Construction and Building Materials**. 127: 673-678.

Visagie, M. (2000). **The effect of microstructure on properties of foamed concrete**. Master of Engineering (Structural Engineering) Thesis, Faculty of Engineering, University of Pretoria. 4–7.

Xu H, Van Deventer JSJ. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. **International Journal of Mineral Processing** 2000; 59(3): 247-266.

ภาคผนวก ก
รายละเอียดของมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง



Designation: C 188 – 95 (Reapproved 2003)

American Association of State
Highway and Transportation Officials Standard
AASHTO No.: T133

Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement¹

This standard is issued under the fixed designation C 188; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the density of hydraulic cement. Its particular usefulness is in connection with the design and control of concrete mixtures.

1.2 The density of hydraulic cement is defined as the mass of a unit volume of the solids.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement²

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials³

3. Apparatus

3.1 *Le Chatelier flask*—The standard flask, which is circular in cross section, with shape and dimensions conforming essentially to Fig. 1 (Note 1). The requirements in regard to tolerance, inscription and length, spacing, and uniformity of graduation will be rigidly observed. There shall be a space of at least 10 mm between the highest graduation mark and the lowest point of grinding for the glass stopper.

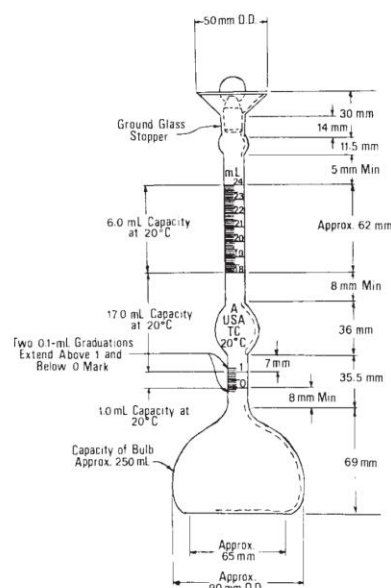
3.1.1 The material of construction shall be excellent quality glass, transparent and free of striae. The glass shall be chemically resistant and shall have small thermal hysteresis. The flasks shall be thoroughly annealed before being graduated. They shall be of sufficient thickness to ensure reasonable resistance to breakage.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C01 on Cement, and is the direct responsibility of Subcommittee C01.25 on Fineness.

Current edition approved June 10, 2003. Published August 2003. Originally approved in 1944. Last previous edition approved in 1995 as C 188 – 95.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.



NOTE—Variations of a few millimetres in such dimensions as total height of flask, diameter of base, and so forth, are to be expected and will not be considered sufficient cause for rejection. The dimensions of the flask shown in Fig. 1 apply only to new flasks and not to flasks in use which meet the other requirements of this test method.

FIG. 1 Le Chatelier Flask for Density Test

3.1.2 The neck shall be graduated from 0 to 1 mL and from 18 to 24 mL in 0.1-mL graduations. The error of any indicated capacity shall not be greater than 0.05 mL.

3.1.3 Each flask shall bear a permanent identification number and the stopper, if not interchangeably ground, shall bear the same number. Interchangeable ground-glass parts shall be marked on both members with the standard-taper symbol, followed by the size designation. The standard temperature shall be indicated, and the unit of capacity shall be shown by the letters "mL" placed above the highest graduation mark.



C 188 – 95 (2003)

3.2 Kerosine, free of water, or naphtha, having a density greater than 0.73 g/mL at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ shall be used in the density determination.

3.3 The use of alternative equipment or methods for determining density is permitted provided that a single operator can obtain results within $\pm 0.03 \text{ Mg/m}^3$ of the results obtained using the flask method.

NOTE 1—The design is intended to ensure complete drainage of the flask when emptied, and stability of standing on a level surface, as well as accuracy and precision of reading.

4. Procedure

4.1 Determine the density of cement on the material as received, unless otherwise specified. If the density determination on a loss-free sample is required, first ignite the sample as described in the test for loss on ignition in section 16.1 on Portland Cement of Test Methods C 114.

4.2 Fill the flask (Note 2) with either of the liquids specified in 3.2 to a point on the stem between the 0 and the 1-mL mark. Dry the inside of the flask above the level of the liquid, if necessary, after pouring. Record the first reading after the flask has been immersed in the water bath (Note 3) in accordance with 4.4.

NOTE 2—It is advisable to use a rubber pad on the table top when filling or rolling the flask.

NOTE 3—Before the cement has been added to the flask, a loose-fitting, lead-ring weight around the stem of the flask will be helpful in holding the flask in an upright position in the water bath, or the flask may be held in the water bath by a buret clamp.

4.3 Introduce a quantity of cement, weighed to the nearest 0.05 g, (about 64 g for portland cement) in small increments at the same temperature as the liquid (Note 2). Take care to avoid splashing and see that the cement does not adhere to the inside of the flask above the liquid. A vibrating apparatus may be used to accelerate the introduction of the cement into the flask and to prevent the cement from sticking to the neck. After all the cement has been introduced, place the stopper in the flask and roll the flask in an inclined position (Note 2), or gently whirl it in a horizontal circle, so as to free the cement from air until no further air bubbles rise to the surface of the liquid. If a proper amount of cement has been added, the level of the liquid will be in its final position at some point of the upper series of

graduations. Take the final reading after the flask has been immersed in the water bath in accordance with 4.4.

4.4 Immerse the flask in a constant-temperature water bath for sufficient periods of time in order to avoid flask temperature variations greater than 0.2°C between the initial and the final readings.

5. Calculation

5.1 The difference between the first and the final readings represents the volume of liquid displaced by the mass of cement used in the test.

5.2 Calculate the cement density, ρ , as follows:

$$\rho(\text{Mg/m}^3) = \rho(\text{g/cm}^3) = \text{mass of cement, g} / \text{displaced volume, cm}^3$$

NOTE 4—The displaced volume in millilitres is numerically equal to the displaced volume in cubic centimetres.

NOTE 5—Density in megagrams per cubic metre (Mg/m^3) is numerically equal to grams per cubic centimetre (g/cm^3). Calculate the cement density, ρ , to three decimal places and round to the nearest 0.01 Mg/m^3 .

NOTE 6—In connection with proportioning and control of concrete mixtures, density may be more usefully expressed as specific gravity, the latter being a dimensionless number. Calculate the specific gravity as follows: $\text{Sp gr} = \text{cement density} / \text{water density at } 4^\circ\text{C}$ (at 4°C the density of water is $1 \text{ Mg/m}^3 (1 \text{ g/cm}^3)$).

6. Precision and Bias

6.1 The single-operator standard deviation for portland cements has been found to be 0.012.⁴ Therefore, the results of two properly conducted tests by the same operator on the same material should not differ by more than 0.03.

6.2 The multilaboratory standard deviation for portland cements has been found to be 0.037.⁴ Therefore, the results of two properly conducted tests from two different laboratories on samples of the same cement should not differ by more than 0.10.⁴

6.3 Since there is no accepted reference material suitable for determining any bias that might be associated with this test method, no statement on bias is being made.

7. Keywords

7.1 density; hydraulic cement; specific gravity

⁴ These numbers represent the 1s and d2s limits described in Practice C 670.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Designation: C 204 – 07

American Association State
Highway and Transportation Officials Standard
AASHTO No.: T 153

Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation C 204; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope*

1.1 This test method covers determination of the fineness of hydraulic cement, using the Blaine air-permeability apparatus, in terms of the specific surface expressed as total surface area in square centimetres per gram, or square metres per kilogram, of cement. Two test methods are given: Test Method A is the Reference Test Method using the manually operated standard Blaine apparatus, while Test Method B permits the use of automated apparatus that has in accordance with the qualification requirements of this test method demonstrated acceptable performance. Although the test method may be, and has been, used for the determination of the measures of fineness of various other materials, it should be understood that, in general, relative rather than absolute fineness values are obtained.

1.1.1 This test method is known to work well for portland cements. However, the user should exercise judgement in determining its suitability with regard to fineness measurements of cements with densities, or porosities that differ from those assigned to Standard Reference Material No. 114.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

A 582/A 582M Specification for Free-Machining Stainless Steel Bars

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials

E 832 Specification for Laboratory Filter Papers

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C01 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.25 on Fineness.

Current edition approved Aug. 1, 2007. Published September 2007. Originally approved in 1946. Last previous edition approved in 2005 as C 204 – 05.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

2.2 Other Document:

No. 114 National Institute of Standards and Technology Standard Reference Material³

BS 4359: 1971 British Standard Method for the Determination of Specific Surface of Powders: Part 2: Air Permeability Methods⁴

TEST METHOD A: REFERENCE METHOD

3. Apparatus

3.1 *Nature of Apparatus*—The Blaine air-permeability apparatus consists essentially of a means of drawing a definite quantity of air through a prepared bed of cement of definite porosity. The number and size of the pores in a prepared bed of definite porosity is a function of the size of the particles and determines the rate of airflow through the bed. The apparatus, illustrated in Fig. 1, shall consist specifically of the parts described in 3.2-3.8.

3.2 *Permeability Cell*—The permeability cell shall consist of a rigid cylinder 12.70 ± 0.10 mm in inside diameter, constructed of austenitic stainless steel. The interior of the cell shall have a finish of $0.81 \mu\text{m}$ ($32 \mu\text{in.}$). The top of the cell shall be at right angles to the principal axis of the cell. The lower portion of the cell must be able to form an airtight fit with the upper end of the manometer, so that there is no air leakage between the contacting surfaces. A ledge $\frac{1}{2}$ to 1 mm in width shall be an integral part of the cell or be firmly fixed in the cell 55 ± 10 mm from the top of the cell for support of the perforated metal disk. The top of the permeability cell shall be fitted with a protruding collar to facilitate the removal of the cell from the manometer.

NOTE 1—Specification **A 582/A 582M** Type 303 stainless steel (UNS designation S30300) has been found to be suitable for the construction of the permeability cell and the plunger.

3.3 *Disk*—The disk shall be constructed of noncorroding metal and shall be 0.9 ± 0.1 mm in thickness, perforated with 30 to 40 holes 1 mm in diameter equally distributed over its area. The disk shall fit the inside of the cell snugly. The center

³ Available from National Institute of Standards and Technology (NIST), 100 Bureau Dr., Stop 1070, Gaithersburg, MD 20899-1070, <http://www.nist.gov>.

⁴ Available from British Standards Institute (BSI), 389 Chiswick High Rd., London W4 4AL, U.K., <http://www.bsi-global.com>.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

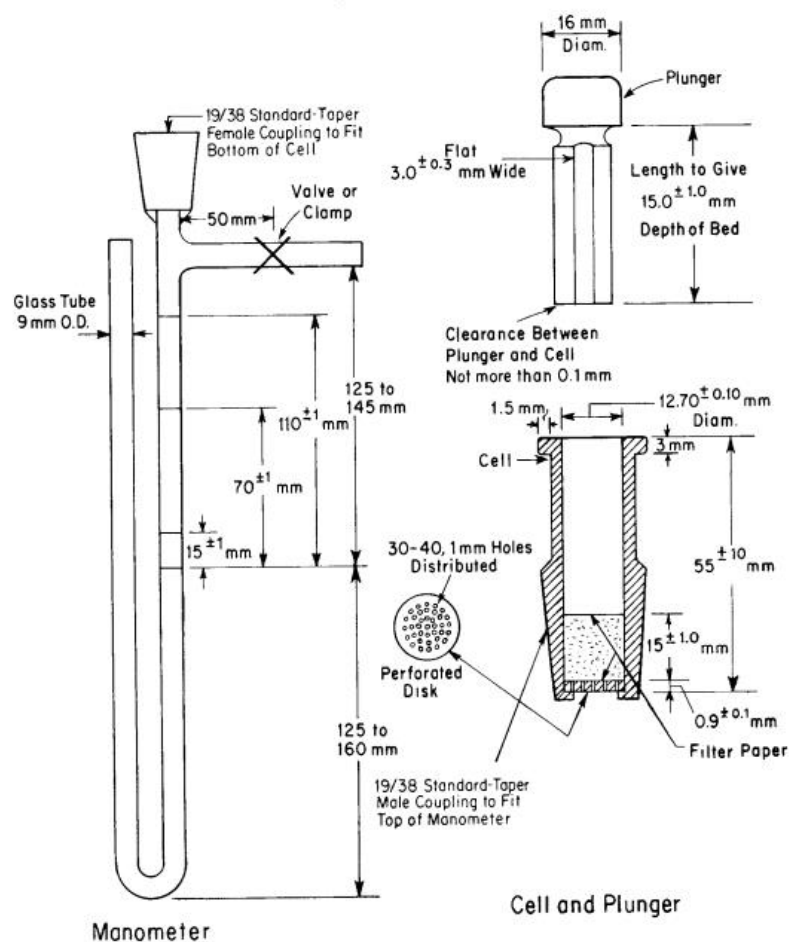
 C 204 - 07


FIG. 1 Blaine Air-Permeability Apparatus

portion of one side of the disk shall be marked or inscribed in a legible manner so as to permit the operator always to place that side downwards when inserting it into the cell. The marking or inscription shall not extend into any of the holes, nor touch their peripheries, nor extend into that area of the disk that rests on the cell ledge.

3.4 Plunger—The plunger shall be constructed of austenitic stainless steel and shall fit into the cell with a clearance of not more than 0.1 mm. The bottom of the plunger shall sharply meet the lateral surfaces and shall be at right angles to the principal axis. An air vent shall be provided by means of a flat 3.0 ± 0.3 mm wide on one side of the plunger. The top of the plunger shall be provided with a collar such that when the plunger is placed in the cell and the collar brought in contact with the top of the cell, the distance between the bottom of the plunger and the top of the perforated disk shall be 15 ± 1 mm.

3.5 Filter Paper—The filter paper shall be medium retentive, corresponding to Type 1, Grade B, in accordance with

Specification E 832. The filter paper disks shall be circular, with smooth edges, and shall have the same diameter (Note 2) as the inside of the cell.

NOTE 2—Filter paper disks that are too small may leave part of the sample adhering to the inner wall of the cell above the top disk. When too large in diameter, the disks have a tendency to buckle and cause erratic results.

3.6 Manometer—The U-tube manometer shall be constructed according to the design indicated in Fig. 1, using nominal 9-mm outside diameter, standard-wall, glass tubing. The top of one arm of the manometer shall form an airtight connection with the permeability cell. The manometer arm connected to the permeability cell shall have a midpoint line etched around the tube at 125 to 145 mm below the top side outlet and also others at distances of 15 ± 1 mm, 70 ± 1 mm, and 110 ± 1 mm above that line. A side outlet shall be provided at 250 to 305 mm above the bottom of the manometer for use

C 204 – 07

in the evacuation of the manometer arm connected to the permeability cell. A positive airtight valve or clamp shall be provided on the side outlet not more than 50 mm from the manometer arm. The manometer shall be mounted firmly and in such a manner that the arms are vertical.

3.7 Manometer Liquid—The manometer shall be filled to the midpoint line with a nonvolatile, nonhygroscopic liquid of low viscosity and density, such as dibutyl phthalate (dibutyl 1,2-benzene-dicarboxylate) or a light grade of mineral oil. The fluid shall be free of debris.

3.8 Timer—The timer shall have a positive starting and stopping mechanism and shall be capable of being read to the nearest 0.5 s or less. The timer shall be accurate to 0.5 s or less for time intervals up to 60 s, and to 1 % or less for time intervals of 60 to 300 s.

4. Calibration of Apparatus

4.1 Sample—The calibration of the air permeability apparatus shall be made using the current lot of NIST Standard Reference Material **No. 114**. The sample shall be at room temperature when tested.

4.2 Bulk Volume of Compacted Bed of Powder—Determine the bulk volume of the compacted bed of powder by the mercury displacement method as follows:

4.2.1 Place two filter paper disks in the permeability cell, pressing down the edges, using a rod having a diameter slightly smaller than that of the cell, until the filter disks are flat on the perforated metal disk; then fill the cell with mercury, ACS reagent grade or better, removing any air bubbles adhering to the wall of the cell. Use tongs when handling the cell. If the cell is made of material that will amalgamate with mercury, the interior of the cell shall be protected by a very thin film of oil just prior to adding the mercury. Level the mercury with the top of the cell by lightly pressing a small glass plate against the mercury surface until the glass is flush to the surface of the mercury and rim of the cell, being sure that no bubble or void exists between the mercury surface and the glass plate. Remove the mercury from the cell and measure and record the mass of the mercury. Remove one of the filter disks from the cell. Using a trial quantity of 2.80 g of cement (**Note 3**) compress the cement (**Note 4**) in accordance with **4.5** with one filter disk above and one below the sample. Into the unfilled space at the top of the cell, add mercury, remove entrapped air, and level off the top as before. Remove the mercury from the cell and measure and record the mass of the mercury.

4.2.2 Calculate the bulk volume occupied by the cement to the nearest 0.005 cm³ as follows:

$$V = (W_A - W_B)/D \quad (1)$$

where:

- V = bulk volume of cement, cm³,
- W_A = grams of mercury required to fill the cell, no cement being in the cell,
- W_B = grams of mercury required to fill the portion of the cell not occupied by the prepared bed of cement in the cell, and
- D = density of mercury at the temperature of test, Mg/m (see **Table 1**).

4.2.3 Make at least two determinations of bulk volume of cement, using separate compactions for each determination. The bulk volume value used for subsequent calculations shall be the average of two values agreeing within ± 0.005 cm³. Note the temperature in the vicinity of the cell and record at the beginning and end of the determination.

NOTE 3—It is not necessary to use the standard sample for the bulk volume determination.

NOTE 4—The prepared bed of cement shall be firm. If too loose or if the cement cannot be compressed to the desired volume, adjust the trial quantity of cement used.

4.3 Preparation of Sample—Enclose the contents of a vial of the standard cement sample in a jar, approximately 120 cm³ (4 oz), and shake vigorously for 2 min to fluff the cement and break up lumps or agglomerates. Allow the jar to stand unopened for a further 2 min, then remove the lid and stir gently to distribute throughout the sample the fine fraction that has settled on the surface after fluffing.

4.4 Mass of Sample—The mass of the standard sample used for the calibration test shall be that required to produce a bed of cement having a porosity of 0.500 ± 0.005 , and shall be calculated as follows:

$$W = \rho V(1 - \epsilon) \quad (2)$$

where:

- W = grams of sample required,
- ρ = density of test sample (for portland cement a value of 3.15 Mg/m³ or 3.15 g/cm³ shall be used),
- V = bulk volume of bed of cement, cm³, as determined in accordance with **4.2**, and
- ϵ = desired porosity of bed of cement (0.500 ± 0.005) (**Note 5**).

NOTE 5—The porosity is the ratio of volume of voids in a bed of cement to the total or bulk volume of the bed, V .

4.5 Preparation of Bed of Cement—Seat the perforated disk on the ledge in the permeability cell, inscribed or marked face down. Place a filter paper disk on the metal disk and press the edges down with a rod having a diameter slightly smaller than that of the cell. Measure the mass to the nearest 0.001 g the quantity of cement determined in accordance with **4.4** and place in the cell. Tap the side of the cell lightly in order to level the bed of cement. Place a filter paper disk on top of the cement and compress the cement with the plunger until the plunger collar is in contact with the top of the cell. Slowly withdraw the

TABLE 1 Density of Mercury, Viscosity of Air (η), and $\sqrt{\eta}$ at Given Temperatures

Room Temperature, °C	Density of Mercury, Mg/m ³	Viscosity of Air, η μ Pa·s	$\sqrt{\eta}$
18	13.55	17.98	4.24
20	13.55	18.08	4.25
22	13.54	18.18	4.26
24	13.54	18.28	4.28
26	13.53	18.37	4.29
28	13.53	18.47	4.30
30	13.52	18.57	4.31
32	13.52	18.67	4.32
34	13.51	18.76	4.33

 C 204 – 07

plunger a short distance, rotate about 90°, repress, and then slowly withdraw. Use of fresh paper filter disks is required for each determination.

4.6 *Permeability Test:*

4.6.1 Attach the permeability cell to the manometer tube, making certain that an airtight connection is obtained (Note 6) and taking care not to jar or disturb the prepared bed of cement.

4.6.2 Slowly evacuate the air in the one arm of the manometer U-tube until the liquid reaches the top mark, and then close the valve tightly. Start the timer when the bottom of the meniscus of the manometer liquid reaches the second (next to the top) mark and stop when the bottom of the meniscus of liquid reaches the third (next to the bottom) mark. Note the time interval measured and record in seconds. Note the temperature of test and record in degrees Celsius.

4.6.3 In the calibration of the instrument, make at least three determinations of the time of flow on each of three separately prepared beds of the standard sample (Note 7). The calibration shall be made by the same operator who makes the fineness determination.

NOTE 6—A little stopcock grease should be applied to the standard taper connection. The efficiency of the connection can be determined by attaching the cell to the manometer, stoppering it, partially evacuating the one arm of the manometer, then closing the valve. Any continuous drop in pressure indicates a leak in the system.

NOTE 7—The sample may be reuffled and reused for preparation of the test bed, provided that it is kept dry and all tests are made within 4 h of the opening of the sample.

4.7 *Recalibration*—The apparatus shall be recalibrated (Note 8):

4.7.1 At periodic intervals, the duration of which shall not exceed 2½ years, to correct for possible wear on the plunger or permeability cell, or upon receipt of evidence that the test is not providing data in accordance with the precision and bias statement in Section 8.

4.7.2 If any loss in the manometer fluid occurs, recalibrate starting with 4.5, or

4.7.3 If a change is made in the type or quality of the filter paper used for the tests.

NOTE 8—It is suggested that a secondary sample be prepared and used as a fineness standard for the check determinations of the instrument between regular calibrations with the standard cement sample.

5. Procedure

5.1 *Temperature of Cement*—The cement sample shall be at room temperature when tested.

5.2 *Size of Test Sample*—The weight of sample used for the test shall be the same as that used in the calibration test on the standard sample, with these exceptions: When determining the fineness of Type III or other types of fine-ground portland cement whose bulk for this mass is so great that ordinary thumb pressure will not cause the plunger collar to contact the top of the cell, the weight of the sample shall be that required to produce a test bed having a porosity of 0.530 ± 0.005 . When determining the fineness of materials other than portland cement, or if for a portland cement sample one of the required porosities cannot be attained, the mass of the sample shall be adjusted so that a firm, hard bed is produced by the compacting process. In no case, however, shall more than thumb pressure

be used to secure the proper bed, nor shall such thumb pressure be used that the plunger “rebounds” from the cell top when pressure is removed.

5.3 *Preparation of Bed of Cement*—Prepare the test bed of cement in accordance with the method described in 4.5.

5.4 *Permeability Tests*—Make the permeability tests in accordance with the method described in 4.6, except that only one time-of-flow determination need be made on each bed.

6. Calculation

6.1 Calculate the specific surface values in accordance with the following equations:

$$S = \frac{S_s \sqrt{T}}{\sqrt{T_s}} \quad (3)$$

$$S = \frac{S_s \sqrt{\eta_s} \sqrt{T}}{\sqrt{T_s} \sqrt{\eta}} \quad (4)$$

$$S = \frac{S_s(b - \epsilon_s) \sqrt{\epsilon^3} \sqrt{T}}{\sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T_s}(b - \epsilon)} \quad (5)$$

$$S = \frac{S_s(b - \epsilon_s) \sqrt{\epsilon^3} \sqrt{\eta} \sqrt{T}}{\sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T_s} \sqrt{\eta}(b - \epsilon)} \quad (6)$$

$$S = \frac{S_s \rho_s(b_s - \epsilon_s) \sqrt{\epsilon^3} \sqrt{T}}{\rho(b - \epsilon) \sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T_s}} \quad (7)$$

$$S = \frac{S_s \rho_s(b_s - \epsilon_s) \sqrt{\eta_s} \sqrt{\epsilon^3} \sqrt{T}}{\rho(b - \epsilon) \sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T_s} \sqrt{\eta}} \quad (8)$$

where:

S = specific surface of the test sample, m^2/kg ,

S_s = specific surface of the standard sample used in calibration of the apparatus, m^2/kg (Note 9),

T = measured time interval, s, of manometer drop for test sample (Note 10),

T_s = measured time interval, s, of manometer drop for standard sample used in calibration of the apparatus (Note 10),

η = viscosity of air, micro pascal seconds ($\mu Pa \cdot s$), at the temperature of test of the test sample (Note 10),

η_s = viscosity of air, micro pascal seconds ($\mu Pa \cdot s$), at the temperature of test of the standard sample used in calibration of the apparatus (Note 10),

ϵ = porosity of prepared bed of test sample (Note 10),

ϵ_s = porosity of prepared bed of standard sample used in calibration of apparatus (Note 10),

ρ = density of test sample (for portland cement a value of 3.15 Mg/m^3 or 3.15 g/cm^3 shall be used),

ρ_s = density of standard sample used in calibration of apparatus (assumed to be 3.15 Mg/m^3 or 3.15 g/cm^3),

b = a constant specifically appropriate for the test sample (for hydraulic cement a value of 0.9 shall be used), and

b_s = 0.9, the appropriate constant for the standard sample.

NOTE 9—Upon purchase of SRM 114 series samples, a certificate comes with them that indicates the proper specific surface value.

NOTE 10—Values for $\sqrt{\eta}$, $\sqrt{\epsilon^3}$, and $\sqrt{T}$ may be taken from Tables 1-3, respectively.

 C 204 – 07

TABLE 2 Values for Porosity of Cement Bed

Porosity of Bed, ϵ	$\sqrt{\epsilon^3}$
0.496	0.349
0.497	0.350
0.498	0.351
0.499	0.352
0.500	0.354
0.501	0.355
0.502	0.356
0.503	0.357
0.504	0.358
0.505	0.359
0.506	0.360
0.507	0.361
0.508	0.362
0.509	0.363
0.510	0.364
0.525	0.380
0.526	0.381
0.527	0.383
0.528	0.384
0.529	0.385
0.530	0.386
0.531	0.387
0.532	0.388
0.533	0.389
0.534	0.390
0.535	0.391

6.1.1 Eq 3 and 4 shall be used in calculations of fineness of portland cements compacted to the same porosity as the standard fineness sample. Eq 3 is used if the temperature of test of the test sample is within $\pm 3^\circ\text{C}$ of the temperature of calibration test, and Eq 4 is used if the temperature of test of the test sample is outside of this range.

6.1.2 Eq 5 and 6 shall be used in calculation of fineness of portland cements compacted to some porosity other than that of the standard fineness sample used in the calibration test. Eq 5 is used if the temperature of test of the test sample is within $\pm 3^\circ\text{C}$ of the temperature of calibration test of the standard fineness sample, and Eq 6 is used if the temperature of test of the test sample is outside of this range.

6.1.3 Eq 7 and 8 shall be used in calculation of fineness of materials other than portland cement. Eq 7 shall be used when the temperature of test of the test sample is within $\pm 3^\circ\text{C}$ of the temperature of calibration test, and Eq 8 is used if the temperature of test of the test sample is outside of this range.

6.1.4 It is recommended that values of b be determined on no less than three samples of the material in question. Test each sample at a minimum of four different porosities over a porosity range of at least 0.06. Correlation coefficients should exceed 0.9970 for the correlation of $\sqrt{\epsilon^3 T}$ versus ϵ on each sample tested (see Appendix X1).

6.2 To calculate the specific surface values in square metres per kilogram, multiply the surface area in cm^2/g by the factor of 0.1.

6.3 Round values in cm^2/g to the nearest 10 units (in m^2/kg to the nearest unit). Example: $3447 \text{ cm}^2/\text{g}$ is rounded to $3450 \text{ cm}^2/\text{g}$ or $345 \text{ m}^2/\text{kg}$.

7. Report

7.1 For portland cements and portland cement-based materials, report results on a single determination on a single bed.

7.2 For very high fineness materials with long time intervals, report the average fineness value of two permeability tests, provided that the two agree within 2 % of each other. If they do not agree, discard the values and repeat the test (Note 11) until two values so agreeing are obtained.

NOTE 11—Lack of agreement indicates a need for checks of procedure and apparatus. See also the “Manual of Cement Testing.”

8. Precision and Bias

8.1 *Single-Operator Precision*—The single-operator coefficient of variation for portland cements has been found to be 1.2 % (Note 12). Therefore, results of two properly conducted tests, by the same operator, on the same sample, should not differ by more than 3.4 % (Note 12) of their average.

8.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory coefficient of variation for portland cements has been found to be 2.1 % (Note 12). Therefore, results of two different laboratories on identical samples of a material should not differ from each other by more than 6.0 % (Note 12) of their average.

NOTE 12—These numbers represent, respectively, the 1s % and 2s % limits as described in Practice C 670.

8.3 Since there is no accepted reference material suitable for determining any bias that may be associated with Test Method C 204, no statement is being made.

TEST METHOD B: AUTOMATED APPARATUS

9. Apparatus

9.1 The automated test method shall employ apparatus designed either on the principles of the Blaine air-permeability method (See Note 13) or apparatus based on the air-permeability principles of the Lea and Nurse method (See Note 14).

NOTE 13—Automated apparatus is generally equipped with a micro-processor capable of operating the measuring devices, calculating and displaying the test results. Commercially available units may have significantly different dimensions for manometer and cement bed than those specified by standard methods.

NOTE 14—The Lea and Nurse constant flow rate air permeability method is described in BS 4359: 1971.

10. Calibration of Apparatus

10.1 Follow the manufacturer's directions for calibrating the apparatus (See Note 15). If the apparatus is equipped with more than one cell, each cell will require a separate calibration. The manufacturer's procedure shall detail the method for bed preparation and the steps required to initiate the automated measurement. It is essential that the procedure be followed precisely and consistently for all tests.

NOTE 15—The manufacturer of the apparatus will generally provide standard samples that can be used for calibration.

11. Procedure

11.1 *Temperature of Cement*—The cement sample shall be at room temperature when tested.



C 204 – 07

TABLE 3 Time of Airflow
 T = time of airflow in seconds; $\sqrt{T}$ = the factor for use in the equations

T	$\sqrt{T}$	T	$\sqrt{T}$	T	$\sqrt{T}$	T	$\sqrt{T}$	T	$\sqrt{T}$	T	$\sqrt{T}$
26	5.10	51	7.14	76	8.72	101	10.05	151	12.29	201	14.18
26½	5.15	51½	7.18	76½	8.75	102	10.10	152	12.33	202	14.21
27	5.20	52	7.21	77	8.77	103	10.15	153	12.37	203	14.25
27½	5.24	52½	7.25	77½	8.80	104	10.20	154	12.41	204	14.28
28	5.29	53	7.28	78	8.83	105	10.25	155	12.45	205	14.32
28½	5.34	53½	7.31	78½	8.86	106	10.30	156	12.49	206	14.35
29	5.39	54	7.35	79	8.89	107	10.34	157	12.53	207	14.39
29½	5.43	54½	7.38	79½	8.92	108	10.39	158	12.57	208	14.42
30	5.48	55	7.42	80	8.94	109	10.44	159	12.61	209	14.46
30½	5.52	55½	7.45	80½	8.97	110	10.49	160	12.65	210	14.49
31	5.57	56	7.48	81	9.00	111	10.54	161	12.69	211	14.53
31½	5.61	56½	7.52	81½	9.03	112	10.58	162	12.73	212	14.56
32	5.66	57	7.55	82	9.06	113	10.63	163	12.77	213	14.59
32½	5.70	57½	7.58	82½	9.08	114	10.68	164	12.81	214	14.63
33	5.74	58	7.62	83	9.11	115	10.72	165	12.85	215	14.66
33½	5.79	58½	7.65	83½	9.14	116	10.77	166	12.88	216	14.70
34	5.83	59	7.68	84	9.17	117	10.82	167	12.92	217	14.73
34½	5.87	59½	7.71	84½	9.19	118	10.86	168	12.96	218	14.76
35	5.92	60	7.75	85	9.22	119	10.91	169	13.00	219	14.80
35½	5.96	60½	7.78	85½	9.25	120	10.95	170	13.04	220	14.83
36	6.00	61	7.81	86	9.27	121	11.00	171	13.08	222	14.90
36½	6.04	61½	7.84	86½	9.30	122	11.05	172	13.11	224	14.97
37	6.08	62	7.87	87	9.33	123	11.09	173	13.15	226	15.03
37½	6.12	62½	7.91	87½	9.35	124	11.14	174	13.19	228	15.10
38	6.16	63	7.94	88	9.38	125	11.18	175	13.23	230	15.17
38½	6.20	63½	7.97	88½	9.41	126	11.22	176	13.27	232	15.23
39	6.24	64	8.00	89	9.43	127	11.27	177	13.30	234	15.30
39½	6.28	64½	8.03	89½	9.46	128	11.31	178	13.34	236	15.36
40	6.32	65	8.06	90	9.49	129	11.36	179	13.38	238	15.43
40½	6.36	65½	8.09	90½	9.51	130	11.40	180	13.42	240	15.49
41	6.40	66	8.12	91	9.54	131	11.45	181	13.45	242	15.56
41½	6.44	66½	8.15	91½	9.57	132	11.49	182	13.49	244	15.62
42	6.48	67	8.19	92	9.59	133	11.53	183	13.53	246	15.68
42½	6.52	67½	8.22	92½	9.62	134	11.58	184	13.56	248	15.75
43	6.56	68	8.25	93	9.64	135	11.62	185	13.60	250	15.81
43½	6.60	68½	8.28	93½	9.67	136	11.66	186	13.64	252	15.87
44	6.63	69	8.31	94	9.70	137	11.70	187	13.67	254	15.94
44½	6.67	69½	8.34	94½	9.72	138	11.75	188	13.71	256	16.00
45	6.71	70	8.37	95	9.75	139	11.79	189	13.75	258	16.06
45½	6.75	70½	8.40	95½	9.77	140	11.83	190	13.78	260	16.12
46	6.78	71	8.43	96	9.80	141	11.87	191	13.82	262	16.19
46½	6.82	71½	8.46	96½	9.82	142	11.92	192	13.86	264	16.25
47	6.86	72	8.49	97	9.85	143	11.96	193	13.89	266	16.31
47½	6.89	72½	8.51	97½	9.87	144	12.00	194	13.93	268	16.37
48	6.93	73	8.54	98	9.90	145	12.04	195	13.96	270	16.43
48½	6.96	73½	8.57	98½	9.92	146	12.08	196	14.00	272	16.49
49	7.00	74	8.60	99	9.95	147	12.12	197	14.04	274	16.55
49½	7.04	74½	8.63	99½	9.97	148	12.17	198	14.07	276	16.61
50	7.07	75	8.66	100	10.00	149	12.21	199	14.11	278	16.67
50½	7.11	75½	8.69	100½	10.02	150	12.25	200	14.14	280	16.73

11.2 *Size of the Test Sample*—The mass of the sample used for the test shall be the same as used in the calibration test unless cements of different density or porosity are to be tested and then follow the manufacturer's guidelines for adjusting mass.

11.3 *Permeability Tests*—Make permeability tests using the same procedure used for the calibration tests. Only one determination need be made for each bed preparation.

12. Performance Requirement (Qualification) for the Automated Apparatus

12.1 *Scope*—When the specific surface values determined by an automated apparatus are to be used for acceptance or rejection of cement, the method used shall comply with the qualification requirements of this section. A method is considered to consist of the specific instrument and testing procedure

C 204 – 07

meeting the requirements of this standard and used in a consistent manner by a given laboratory.

12.2 Samples—Select two cement samples that have surface area and density that bracket the desired test range. The range of the surface area shall not exceed 2000 cm²/g (200 m²/kg) and shall have densities that differ no more than 0.06 g/cm³ (60 Mg/m³).

12.3 Tests—Make triplicate determinations on each cement sample following Test Method A (Reference Method). On the same day, complete a second round of triplicate tests using the method to be qualified (Test Method B) and including the standardization formula described in this section. Prepare a new cell bed and repeat all the steps of the test procedures for each determination. Report values to the nearest 10 cm²/g (1 m²/kg).

12.4 Calculations—Calculate the range and the mean of the three replicate tests for each method and each cement. A method complies with the qualification requirements if the absolute difference between the average value of Test Method A and the corresponding average value for Test Method B (each with three replicates) is not greater than 2.7 % of the Test Method A average (See **Note 16**) and the range for any three replicate tests does not exceed 4.0 % of the average (See **Note 17**). The method is qualified only if both cement samples shall meet the above requirements. Example qualification data are given in **Appendix X2**.

NOTE 16—This value represents the least-significant-difference (Lsd) for 95 % confidence as applied to the coefficient of variation of 1.2 % (Single-Operator-Precision) for Test Method A, given in section 8.1. The equation is:

$$Lsd (95 \%) = t_{0.05, df} \left[(2CV^2/n) \right]^{1/2} \quad (9)$$

where:

- df = 4, degree of freedom, two from each of the two sets of results
- n = 3, the number of replicates
- CV = 1.2 %, the Single-Operator-Precision, and
- $t_{0.05, 4}$ = 2.776, Students-t statistic for a 5 % probability with a $df = 4$.

NOTE 17—This value represents the d2s % calculation for 3 replicates in accordance with Table 1 of Practice C 670 and applied to the coefficient

of variation of 1.2 % (Single-Operator-Precision) for Test Method A, given in section 8.1.

12.5 Standardization:

12.5.1 When standardization is required in order to achieve agreement between Test Method A and Test Method B, standardize the apparatus as follows:

12.5.1.1 Prepare a separate standardization for each type of cement to be tested, using reference samples of density within 0.06 g/cm³ (60 Mg/m³) of the cement to be tested, and packed to the same bed porosity.

12.5.1.2 For each standardization, obtain five reference samples with a minimum air permeability fineness range of 800 cm²/g (80 m²/kg) and a minimum difference between samples of 50 cm²/g (5 m²/kg). If cements samples used for qualification are used, make new determinations. Use the same method as used for the instrument qualification and follow all the steps. Valid standardization formulas shall be mathematically derived and applied to all samples.

13. Requalification of a Method

13.1 Requalify the method at least once per year and when any of the following conditions occur:

- 13.1.1** The instrument has been significantly modified.
- 13.1.2** The instrument has been substantially repaired.
- 13.1.3** Substantial evidence indicates that the method is not providing data meeting the performance requirements.
- 13.1.4** The average of a Cement and Concrete Reference Laboratory (CCRL) proficiency test sample differs from the value obtained by the method by more than 6 %.

14. Precision and Bias

14.1 Precision—No precision data are available at this time. Based on qualification requirements, the precision of the method should not be greater than that of Test Method A.

14.2 Bias—Since there are no acceptable reference materials suitable for determining any bias that may be associated with Test Methods C 204, no statement on bias is presented.

15. Keywords

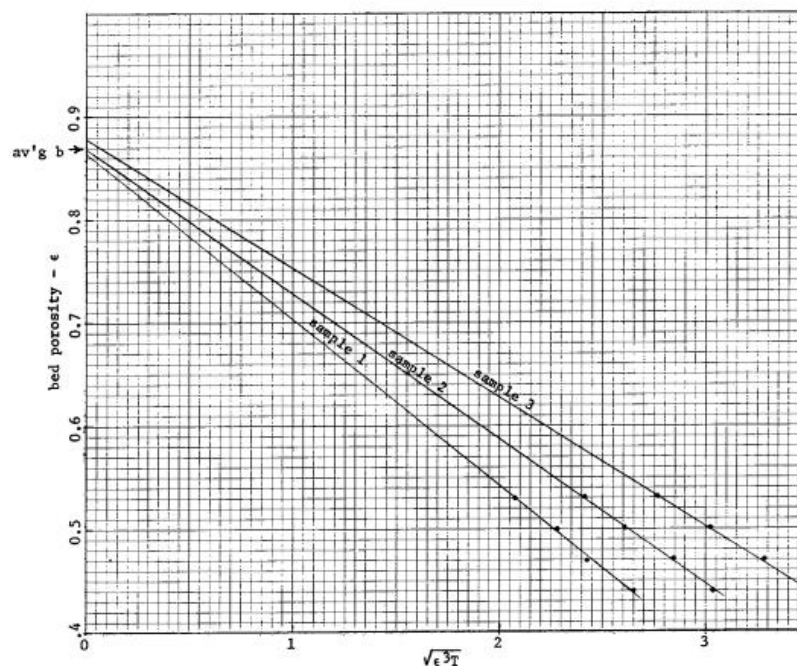
- 15.1** air-permeability; apparatus; fineness



APPENDICES

(Nonmandatory Information)

X1. ILLUSTRATIVE METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE VALUE FOR THE CONSTANT b



	ϵ	W	T	$\sqrt{\epsilon^3 T}$
Material: Silica flour ρ = density of test sample = 2.65 Mg/m ³ V = bulk volume of sample bed = 1.887 cm ³ ϵ = desired porosity of test W = grams of sample required = $\rho V(1 - \epsilon)$ T = measured test time interval, seconds	0.530	2.350	Sample 1 29.0	2.078
	0.500	2.500	42.0	2.291
	0.470	2.650	57.5	2.443
	0.440	2.800	82.5	2.651
Computed values of b by linear regression: Sample 1 $b = 0.863$ (correlation coefficient = 0.9980) Sample 2 $b = 0.869$ (correlation coefficient = 0.9993) Sample 3 $b = 0.879$ (correlation coefficient = 0.9973) Average $b = 0.870$	0.530	2.350	Sample 2 39.0	2.410
	0.500	2.500	55.5	2.634
	0.470	2.650	79.0	2.864
	0.440	2.800	108.5	3.040
FIG. X1.1 Illustrative Method for the Determination of the Value for the Constant b (for use in fineness calculations of materials other than portland cement)	0.530	2.350	Sample 3 51.5	2.769
	0.500	2.500	73.0	3.021
	0.470	2.650	104.0	3.286
	0.440	2.800	141.5	3.472



C 204 – 07

X2. SAMPLE QUALIFICATION RESULTS

TABLE X2.1 Sample Qualification Results

Cement	Tests	Test Method A cm ² /g (m ² /kg)	Test Method B cm ² /g (m ² /kg)	Difference
A	1	3120 (312)	3130 (313)	
A	2	3130 (313)	3160 (316)	
A	3	3090 (309)	3140 (314)	
	Avg.	3113 (311.3)	3143 (314.3)	30
	Range Max.	40 (4)	30 (3)	
	4.0 % of Avg.	1.3 % (Pass)	1.0 % (Pass)	
	Max. Difference		(30 × 100)/3113 =	
	2.7 % of Test Method A Avg.		or	
			3 × 100/311.3 =	0.9 % (Pass)
Cement	Tests	Test Method A cm ² /g (m ² /kg)	Test Method B cm ² /g (m ² /kg)	Difference
B	1	4180 (418)	4160 (416)	
B	2	4030 (403)	4150 (415)	
B	3	4060 (406)	4210 (421)	
	Avg.	4090 (409.0)	4173 (417.3)	83
	Range Max.	150	60	
	4.0 % of Avg.	3.7 % (Pass)	1.4 % (Pass)	
	Max. Difference		(83 × 100)/4090 =	2.0 % (Pass)
	2.7 % of Test Method A Avg.		or	
			(8.3 × 100)/409 =	

SUMMARY OF CHANGES

Committee C01 has identified the location of selected changes to these test methods since the last issue, C 204 – 05, that may impact the use of these test methods. (Approved August 1, 2007)

(I) Revised 3.6 and 3.7.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Designation: C 128 – 07a

Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate¹

This standard is issued under the fixed designation C 128; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of the average density of a quantity of fine aggregate particles (not including the volume of voids between the particles), the relative density (specific gravity), and the absorption of the fine aggregate. Depending on the procedure used, the density, in kg/m³ (lb/ft³) is expressed as oven-dry (OD), saturated-surface-dry (SSD), or as apparent density. Likewise, relative density (specific gravity), a dimensionless quality, is expressed as OD, SSD, or as apparent relative density (apparent specific gravity). The OD density and OD relative density are determined after drying the aggregate. The SSD density, SSD relative density, and absorption are determined after soaking the aggregate in water for a prescribed duration.

1.2 This test method is used to determine the density of the essentially solid portion of a large number of aggregate particles and provides an average value representing the sample. Distinction is made between the density of aggregate particles as determined by this test method, and the bulk density of aggregates as determined by Test Method C 29/C 29M, which includes the volume of voids between the particles of aggregates.

1.3 This test method is not intended to be used for light-weight aggregates.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as the standard for conducting the tests. The test results for density shall be reported in either SI units or inch-pound units, as appropriate for the use to be made of the results.

1.5 The text of this test method references notes and footnotes which provide explanatory material. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of this test method.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the*

responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

- C 29/C 29M Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate
- C 70 Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate
- C 117 Test Method for Materials Finer than 75-μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing
- C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
- C 127 Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate
- C 188 Test Method for Density of Hydraulic Cement
- C 566 Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying
- C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials
- C 702 Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size
- D 75 Practice for Sampling Aggregates
- D 854 Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer

2.2 *AASHTO Standard:*

- AASHTO No. T 84 Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregates³

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 *absorption, n*—the increase in mass of aggregate due to water penetrating into the pores of the particles, during a

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.20 on Normal Weight Aggregates.

Current edition approved Aug. 1, 2007. Published September 2007. Originally approved in 1936. Last previous edition approved in 2007 as C 128-07.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 444 N. Capitol St., NW, Suite 249, Washington, DC 20001, <http://www.transportation.org>.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

C 128 – 07a

prescribed period of time but not including water adhering to the outside surface of the particles, expressed as percentage of the dry mass.

3.1.2 *density, n* —the mass per unit volume of a material, expressed as kilograms per cubic metre (pounds per cubic foot).

3.1.2.1 *density (OD), n* —the mass of oven-dry aggregate particles per unit volume of aggregate particles, including the volume of permeable and impermeable pores within particles, but not including the voids between the particles.

3.1.2.2 *density (SSD), n* —the mass of saturated-surface-dry aggregate per unit volume of the aggregate particles, including the volume of impermeable pores and permeable, water-filled pores within the particles, but not including the voids between the particles.

3.1.2.3 *apparent density, n* —the mass per unit volume of the impermeable portion of the aggregate particles.

3.1.3 *oven-dry (OD), adj* —related to aggregate particles, the condition in which the aggregates have been dried by heating in an oven at $110 \pm 5^\circ\text{C}$ for sufficient time to reach a constant mass.

3.1.4 *relative density (specific gravity), n* —the ratio of the density of a material to the density of water at a stated temperature; the values are dimensionless.

3.1.4.1 *relative density (specific gravity), (OD), n* —the ratio of the density (OD) of the aggregate to the density of water at a stated temperature.

3.1.4.2 *relative density (specific gravity), (SSD), n* —The ratio of the density (SSD) of the aggregate to the density of water at a stated temperature.

3.1.4.3 *apparent relative density (apparent specific gravity), n* —the ratio of the apparent density of aggregate to the density of water at a stated temperature.

3.1.5 *saturated-surface-dry (SSD), adj* —related to aggregate particles, the condition in which the permeable pores of aggregate particles are filled with water to the extent achieved by submerging in water for the prescribed period of time, but without free water on the surface of the particles.

3.1.6 For definitions of other terms related to aggregates see Terminology C 125.

4. Summary of Test Method

4.1 A sample of aggregate is immersed in water for 24 ± 4 h to essentially fill the pores. It is then removed from the water, the water is dried from the surface of the particles, and the mass determined. Subsequently, the sample (or a portion of it) is placed in a graduated container and the volume of the sample is determined by the gravimetric or volumetric method. Finally, the sample is oven-dried and the mass determined again. Using the mass values thus obtained and formulas in this test method, it is possible to calculate density, relative density (specific gravity), and absorption.

5. Significance and Use

5.1 Relative density (specific gravity) is the characteristic generally used for calculation of the volume occupied by the aggregate in various mixtures containing aggregate including portland cement concrete, bituminous concrete, and other mixtures that are proportioned or analyzed on an absolute

volume basis. Relative density (specific gravity) is also used in the computation of voids in aggregate in Test Method C 29/C 29M. Relative density (specific gravity) (SSD) is used in the determination of surface moisture on fine aggregate by displacement of water in Test Method C 70. Relative density (specific gravity) (SSD) is used if the aggregate is wet, that is, if its absorption has been satisfied. Conversely, the density or relative density (specific gravity) (OD) is used for computations when the aggregate is dry or assumed to be dry.

5.2 Apparent density and apparent relative density (apparent specific gravity) pertain to the solid material making up the constituent particles not including the pore space within the particles that is accessible to water. This value is not widely used in construction aggregate technology.

5.3 Absorption values are used to calculate the change in the mass of an aggregate material due to water absorbed in the pore spaces within the constituent particles, compared to the dry condition, when it is deemed that the aggregate has been in contact with water long enough to satisfy most of the absorption potential. The laboratory standard for absorption is that obtained after submerging dry aggregate for a prescribed period of time. Aggregates mined from below the water table commonly have a moisture content greater than the absorption determined by this test method, if used without opportunity to dry prior to use. Conversely, some aggregates which have not been continuously maintained in a moist condition until used are likely to contain an amount of absorbed moisture less than the 24-h soaked condition. For an aggregate that has been in contact with water and that has free moisture on the particle surfaces, the percentage of free moisture is determined by deducting the absorption from the total moisture content determined by Test Method C 566 by drying.

5.4 The general procedures described in this test method are suitable for determining the absorption of aggregates that have had conditioning other than the 24-h soak, such as boiling water or vacuum saturation. The values obtained for absorption by other test methods will be different than the values obtained by the prescribed 24-h soak, as will the density (SSD) or relative density (specific gravity) (SSD).

5.5 The pores in lightweight aggregates are not necessarily filled with water after immersion for 24 h. In fact, the absorption potential for many such aggregates is not satisfied after several days immersion in water. Therefore, this test method is not intended for use with lightweight aggregate.

6. Apparatus

6.1 *Balance*—A balance or scale having a capacity of 1 kg or more, sensitive to 0.1 g or less, and accurate within 0.1 % of the test load at any point within the range of use for this test method. Within any 100-g range of test load, a difference between readings shall be accurate within 0.1 g.

6.2 *Pycnometer (for Use with Gravimetric Procedure)*—A flask or other suitable container into which the fine aggregate test sample can be readily introduced and in which the volume content can be reproduced within $\pm 0.1\text{ cm}^3$. The volume of the container filled to mark shall be at least 50 % greater than

 C 128 – 07a

the space required to accommodate the test sample. A volumetric flask of 500-cm³ capacity or a fruit jar fitted with a pycnometer top is satisfactory for a 500-g test sample of most fine aggregates.

6.3 Flask (for Use with Volumetric Procedure)—A Le Chatelier flask as described in Test Method **C 188** is satisfactory for an approximately 55-g test sample.

6.4 Mold and Tamping for Surface Moisture Test—The metal mold shall be in the form of a frustum of a cone with dimensions as follows: 40 ± 3-mm inside diameter at the top, 90 ± 3-mm inside diameter at the bottom, and 75 ± 3 mm in height, with the metal having a minimum thickness of 0.8 mm. The metal tamping shall have a mass of 340 ± 15 g and a flat circular tamping face 25 ± 3 mm in diameter.

6.5 Oven—An oven of sufficient size, capable of maintaining a uniform temperature of 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F).

7. Sampling

7.1 Sample the aggregate in accordance with Practice **D 75**. Thoroughly mix the sample and reduce it to obtain a test specimen of approximately 1 kg using the applicable procedures described in Practice **C 702**.

8. Preparation of Test Specimen

8.1 Place the test specimen in a suitable pan or vessel and dry in the oven to constant mass at a temperature of 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F). Allow it to cool to comfortable handling temperature (approximately 50 °C), cover with water, either by immersion or by the addition of at least 6 % moisture to the fine aggregate, and permit to stand for 24 ± 4 h.

8.1.1 Where the absorption and relative density (specific gravity) values are to be used in proportioning concrete mixtures in which the aggregates will be in their naturally moist condition, the requirement in **8.1** for initial drying is optional, and, if the surfaces of the particles in the sample have been kept continuously wet until tested, the requirement in **8.1** for 24 ± 4 h soaking is also optional.

NOTE 1—Values for absorption and for relative density (specific gravity) (SSD) may be significantly higher for aggregate not oven dried before soaking than for the same aggregate treated in accordance with **8.1**.

8.2 Decant excess water with care to avoid loss of fines (see also **Appendix X1**), spread the sample on a flat nonabsorbent surface exposed to a gently moving current of warm air, and stir frequently to secure homogeneous drying. Employ mechanical aids such as tumbling or stirring to assist in achieving the saturated surface-dry condition, if desired. Continue this operation until the test specimen approaches a free-flowing condition. Follow the procedure in **8.3** to determine if surface moisture is still present on the constituent fine aggregate particles. Make the first trial for surface moisture when there is still some surface water in the test specimen. Continue drying with constant stirring and test at frequent intervals until the test indicates that the specimen has reached a surface-dry condition. If the first trial of the surface moisture test indicates that moisture is not present on the surface, it has been dried past the saturated surface-dry condition. In this case, thoroughly mix a few millilitres of water with the fine aggregate and permit the specimen to stand in a covered container for 30 min. Then

resume the process of drying and testing at frequent intervals for the onset of the surface-dry condition.

8.3 Test for Surface Moisture—Hold the mold firmly on a smooth nonabsorbent surface with the large diameter down. Place a portion of the partially dried fine aggregate loosely in the mold by filling it to overflowing and heaping additional material above the top of the mold by holding it with the cupped fingers of the hand holding the mold. Lightly tamp the fine aggregate into the mold with 25 light drops of the tamping. Start each drop approximately 5 mm above the top surface of the fine aggregate. Permit the tamping to fall freely under gravitational attraction on each drop. Adjust the starting height to the new surface elevation after each drop and distribute the drops over the surface. Remove loose sand from the base and lift the mold vertically. If surface moisture is still present, the fine aggregate will retain the molded shape. Slight slumping of the molded fine aggregate indicates that it has reached a surface-dry condition.

8.3.1 Some fine aggregate with predominately angular-shaped particles or with a high proportion of fines does not slump in the cone test upon reaching the surface-dry condition. Test by dropping a handful of the fine aggregate from the cone test onto a surface from a height of 100 to 150 mm, and observe for fines becoming airborne; presence of airborne fines indicates this problem. For these materials, consider the saturated surface-dry condition as the point that one side of the fine aggregate slumps slightly upon removing the mold.

NOTE 2—The following criteria have also been used on materials that do not readily slump:

(1) **Provisional Cone Test**—Fill the cone mold as described in **8.3** except only use 10 drops of the tamping. Add more fine aggregate and use 10 drops of the tamping again. Then add material two more times using 3 and 2 drops of the tamping, respectively. Level off the material even with the top of the mold, remove loose material from the base; and lift the mold vertically.

(2) **Provisional Surface Test**—If airborne fines are noted when the fine aggregate is such that it will not slump when it is at a moisture condition, add more moisture to the sand, and at the onset of the surface-dry condition, with the hand lightly pat approximately 100 g of the material on a flat, dry, clean, dark or dull nonabsorbent surface such as a sheet of rubber, a worn oxidized, galvanized, or steel surface, or a black-painted metal surface. After 1 to 3 s, remove the fine aggregate. If noticeable moisture shows on the test surface for more than 1 to 2 s then surface moisture is considered to be present on the fine aggregate.

(3) Colorimetric procedures described by Kandhal and Lee, Highway Research Record No. 307, p. 44.

(4) For reaching the saturated surface-dry condition on a single size material that slumps when wet, hard-finish paper towels can be used to surface dry the material until the point is just reached where the paper towel does not appear to be picking up moisture from the surfaces of the fine aggregate particles.

 C 128 – 07a

9. Procedure

9.1 Test by either the gravimetric procedure in 9.2 or the volumetric procedure in 9.3. Make all determinations of mass to 0.1 g.

9.2 Gravimetric (Pycnometer) Procedure:

9.2.1 Partially fill the pycnometer with water. Introduce into the pycnometer 500 ± 10 g of saturated surface-dry fine aggregate prepared as described in Section 8, and fill with additional water to approximately 90 % of capacity. Agitate the pycnometer as described in 9.2.1.1 (manually) or 9.2.1.2 (mechanically).

9.2.1.1 Manually roll, invert, or agitate the pycnometer (or use a combination of these actions) to eliminate visible air bubbles.

NOTE 3—About 15 to 20 min are normally required to eliminate the air bubbles by manual methods. Dipping the tip of a paper towel into the pycnometer has been found to be useful in dispersing the foam that sometimes builds up when eliminating the air bubbles. Optionally, a small amount of isopropyl alcohol may be used to disperse the foam.

9.2.1.2 Mechanically agitate the pycnometer by external vibration in a manner that will not degrade the sample. A level of agitation adjusted to just set individual particles in motion is sufficient to promote de-airing without degradation. A mechanical agitator shall be considered acceptable for use if comparison tests for each six-month period of use show variations less than the acceptable range of two results (d2s) indicated in Table 1 from the results of manual agitation on the same material.

9.2.2 After eliminating all air bubbles, adjust the temperature of the pycnometer and its contents to 23.0 ± 2.0 °C if necessary by partial immersion in circulating water, and bring

the water level in the pycnometer to its calibrated capacity. Determine the total mass of the pycnometer, specimen, and water.

9.2.3 Remove the fine aggregate from the pycnometer, dry in the oven to constant mass at a temperature of 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F), cool in air at room temperature for $1 \pm \frac{1}{2}$ h, and determine the mass.

9.2.4 Determine the mass of the pycnometer filled to its calibrated capacity with water at 23.0 ± 2.0 °C.

9.3 Volumetric (Le Chatelier Flask) Procedure:

9.3.1 Fill the flask initially with water to a point on the stem between the 0 and the 1-mL mark. Record this initial reading with flask and contents within the temperature range of 23.0 ± 2.0 °C. Add 55 ± 5 g of fine aggregate in the saturated surface-dry condition (or other measured quantity as necessary). After all fine aggregate has been introduced, place the stopper in the flask and roll the flask in an inclined position, or gently whirl it in a horizontal circle so as to dislodge all entrapped air, continuing until no further bubbles rise to the surface (Note 4). Take a final reading with the flask and contents within 1 °C of the original temperature.

NOTE 4—A small measured amount (not to exceed 1 mL) of isopropyl alcohol may be used to eliminate foam appearing on the water surface. The volume of alcohol used must be subtracted from the final reading (R_2).

9.3.2 For determination of the absorption, use a separate 500 ± 10 -g portion of the saturated surface-dry fine aggregate, dry to constant mass, and determine the dry mass.

10. Calculations

10.1 Symbols:

A = mass of oven dry specimen, g

B = mass of pycnometer filled with water, to calibration mark, g

C = mass of pycnometer filled with specimen and water to calibration mark, g

R_1 = initial reading of water level in Le Chatelier flask, mL

R_2 = final reading of water in Le Chatelier flask, mL

S = mass of saturated surface-dry specimen (used in the gravimetric procedure for density and relative density (specific gravity), or for absorption with both procedures), g

S_1 = mass of saturated surface-dry specimen (used in the volumetric procedure for density and relative density (specific gravity)), g

10.2 Relative Density (Specific Gravity):

10.2.1 *Relative Density (Specific Gravity) (Oven dry)*—Calculate the relative density (specific gravity) on the basis of oven-dry aggregate as follows:

10.2.1.1 Gravimetric Procedure:

$$\text{Relative density (specific gravity) (OD)} = A/(B + S - C) \quad (1)$$

10.2.1.2 Volumetric Procedure:

$$\text{Relative density (specific gravity) (OD)} = [S_1 (A/S)]/[0.9975 (R_2 - R_1)] \quad (2)$$

10.2.2 *Relative Density (Specific Gravity) Saturated Surface-dry*—Calculate the relative density (specific gravity) on the basis of saturated surface-dry aggregate as follows:

10.2.2.1 Gravimetric Procedure:

TABLE 1 Precision

	Standard Deviation (1s) ^A	Acceptable Range of Two Results (d2s) ^A
<i>Single-Operator Precision:</i>		
Density (OD), kg/m ³	11	13
Density (SSD), kg/m ³ ^{B1}	9.5	27
Apparent density, kg/m ³	9.5	27
Relative density (specific gravity) (OD)	0.011	0.032
Relative density (specific gravity) (SSD)	0.0095	0.027
Apparent relative density (apparent specific gravity)	0.0095	0.027
Absorption ^C , %	0.11	0.31
<i>Multilaboratory Precision:</i>		
Density (OD), kg/m ³	23	64
Density (SSD), kg/m ³	20	56
Apparent density, kg/m ³	20	56
Relative density (specific gravity) (OD)	0.023	0.066
Relative density (specific gravity) (SSD)	0.020	0.056
Apparent relative density (apparent specific gravity)	0.020	0.056
Absorption ^C , %	0.23	0.66

^A These numbers represent, respectively, the (1s) and (d2s) limits as described in Practice C 670. The precision estimates were obtained from the analysis of combined AASHTO Materials Reference Laboratory proficiency sample data from laboratories using 15 to 19-h saturation times and other laboratories using 24 ± 4-h saturation time. Testing was performed on normal weight aggregates, and started with aggregates in the oven-dry condition.

^{B1} Revised editorially to correct a typographical error in August 2003.

^C Precision estimates are based on aggregates with absorptions of less than 1 % and may differ for manufactured fine aggregates and the aggregates having absorption values greater than 1 %.

C 128 – 07a

$$\text{Relative density (specific gravity) (SSD)} = S/(B + S - C) \quad (3)$$

10.2.2.2 *Volumetric Procedure:*

$$\text{Relative density (specific gravity) (SSD)} = S_f/[0.9975 (R_2 - R_1)] \quad (4)$$

10.2.3 *Apparent Relative Density (Apparent Specific Gravity)*—Calculate the apparent relative density (apparent specific gravity) as follows:

10.2.3.1 *Gravimetric Procedure:*

$$\text{Apparent relative density (apparent specific gravity)} = A/(B + A - C) \quad (5)$$

10.2.3.2 *Volumetric Procedure:*

$$\begin{aligned} \text{Apparent relative density (apparent specific gravity)} \\ = \frac{S_1 (A/S)}{0.9975 (R_2 - R_1) - [(S_1/S)(S - A)]} \end{aligned} \quad (6)$$

10.3 *Density:*

10.3.1 *Density (Oven-dry)*—Calculate the density on the basis of oven-dry aggregates as follows:

10.3.1.1 *Gravimetric Procedure:*

$$\text{Density (OD), kg/m}^3 = 997.5 A/(B + S - C) \quad (7)$$

$$\text{Density (OD), lb/ft}^3 = 62.27 A/(B + S - C) \quad (8)$$

10.3.1.2 *Volumetric Procedure:*

$$\text{Density (OD), kg/m}^3 = 997.5 S_1 (A/S)/[0.9975 (R_2 - R_1)] \quad (9)$$

$$\text{Density (OD), lb/ft}^3 = 62.27 S_1 (A/S)/[0.9975 (R_2 - R_1)] \quad (10)$$

NOTE 5—The constant values used in the calculations in 10.3.1-10.3.3 (997.5 kg/m³ and 62.27 lb/ft³) are the density of water at 23 °C. Some authorities recommend using the density of water at 4 °C (1000 kg/m³ or 1000 Mg/m³ or 62.43 lb/ft³) as being sufficiently accurate.

10.3.2 *Density (Saturated surface-dry)*—Calculate the density on the basis of saturated surface-dry aggregate as follows:

10.3.2.1 *Gravimetric Procedure:*

$$\text{Density (SSD), kg/m}^3 = 997.5 S/(B + S - C) \quad (11)$$

$$\text{Density (SSD), lb/ft}^3 = 62.27 S/(B + S - C) \quad (12)$$

10.3.2.2 *Volumetric Procedure:*

$$\text{Density (SSD), kg/m}^3 = 997.5 S_f/[0.9975 (R_2 - R_1)] \quad (13)$$

$$\text{Density (SSD), lb/ft}^3 = 62.27 S_f/[0.9975 (R_2 - R_1)] \quad (14)$$

10.3.3 *Apparent Density*—Calculate the apparent density as follows:

10.3.3.1 *Gravimetric Procedure:*

$$\text{Apparent density (SSD), kg/m}^3 = 997.5 A/(B + A - C) \quad (15)$$

$$\text{Apparent density (SSD), lb/ft}^3 = 62.27 A/(B + A - C) \quad (16)$$

10.3.3.2 *Volumetric Procedure:*

$$\begin{aligned} \text{Apparent density (SSD), kg/m}^3 \\ = \frac{997.5 S_1 (A/S)}{0.9975 (R_2 - R_1) - [(S_1/S)(S - A)]} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{Apparent density (SSD), lb/ft}^3 \\ = \frac{62.27 S_1 (A/S)}{0.9975 (R_2 - R_1) - [(S_1/S)(S - A)]} \end{aligned} \quad (18)$$

10.4 *Absorption*—Calculate the percentage of absorption as follows:

$$\text{Absorption, \%} = 100 [(S - A)/A] \quad (19)$$

11. Report

11.1 Report density results to the nearest 10 kg/m³, or 0.5 lb/ft³, relative density (specific gravity) results to the nearest 0.01, and indicate the basis for density or relative density (specific gravity), as either oven-dry (OD), saturated-surface-dry (SSD), or apparent.

11.2 Report the absorption result to the nearest 0.1 %.

11.3 If the density and relative density (specific gravity) values were determined without first drying the aggregate, as permitted in 8.2, note that fact in the report.

12. Precision and Bias

12.1 *Precision*—The estimates of precision of this test method (listed in Table 1) are based on results from the AASHTO Materials Reference Laboratory Proficiency Sample Program, with testing conducted by this test method and AASHTO Method T 84. The significant difference between the methods is that Test Method C 128 requires a saturation period of 24 ± 4 h, and AASHTO Test Method T 84 requires a saturation period of 15 to 19 h. This difference has been found to have an insignificant effect on the precision indices. The data are based on the analyses of more than 100 paired test results from 40 to 100 laboratories. The precision estimates for density were calculated from values determined for relative density (specific gravity), using the density of water at 23 °C for the conversion.

12.2 *Bias*—Since there is no accepted reference material suitable for determining the bias for this test method, no statement on bias is being made.

13. Keywords

13.1 absorption; aggregate; apparent density; apparent relative density; density; fine aggregate; relative density; specific gravity



C 128 – 07a

APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

X1. POTENTIAL DIFFERENCES IN BULK RELATIVE DENSITY AND ABSORPTION DUE TO PRESENCE OF MATERIAL FINER THAN 75 μm

X1.1 It has been found that there may be significant differences in bulk relative density and absorption between fine aggregate samples tested with the material finer than 75 μm (No. 200) present and not present in the samples. Samples from which the material finer than 75 μm is not removed usually give a higher absorption and a lower bulk relative density compared with testing the same fine aggregate from which the material finer than 75 μm is removed following the procedures of Test Method C 117. Samples with material finer than 75 μm may build up a coating around the coarser fine aggregate particles during the surface drying process. The resultant relative density and absorption that is subsequently measured is that of the agglomerated and coated particles and not that of the parent material. The difference in absorption and relative density determined between samples from which the material finer than 75 μm have not been removed and samples from which the material finer than 75 μm have been removed

depends on both the amount of the material finer than 75 μm present and the nature of the material. When the material finer than 75 μm is less than about 4 % by mass, the difference in relative density between washed and unwashed samples is less than 0.03. When the material finer than 75 μm is greater than about 8 % by mass, the difference in relative density obtained between washed and unwashed samples may be as great as 0.13. It has been found that the relative density determined on fine aggregate from which the material finer than 75 μm has been removed prior to testing more accurately reflects the relative density of the material.

X1.2 The material finer than 75 μm , which is removed, can be assumed to have the same relative density as the fine aggregate. Alternatively, the relative density (specific gravity) of the material finer than 75 μm may be further evaluated using Test Method D 854, however, this test determines the apparent relative density and not the bulk relative density.

X2. INTERRELATIONSHIPS BETWEEN RELATIVE DENSITIES (SPECIFIC GRAVITIES) AND ABSORPTION AS DEFINED IN TEST METHODS C 127 AND C 128

X2.1 This appendix gives mathematical interrelationships among the three types of relative densities (specific gravities) and absorption. These may be useful in checking the consistency of reported data or calculating a value that was not reported by using other reported data.

X2.2 Where:

S_d = relative density (specific gravity) (OD),
 S_s = relative density (specific gravity) (SSD),
 S_a = apparent relative density (apparent specific gravity),
 and
 A = absorption, in %.

Calculate the values of each as follows:

$$S_s = (1 + A/100)S_d \quad (\text{X2.1})$$

$$S_s = \frac{1}{\frac{1}{S_d} - \frac{A}{100}} = \frac{S_d}{1 - \frac{AS_d}{100}} \quad (\text{X2.2})$$

$$\begin{aligned} \text{or } S_a &= \frac{1}{\frac{1 + A/100}{S_s} - \frac{A}{100}} \\ &= \frac{S_s}{1 - \frac{A}{100}(S_s - 1)} \end{aligned} \quad (\text{X2.3})$$

$$A = \left(\frac{S_s}{S_d} - 1 \right) 100 \quad (\text{X2.4})$$

$$A = \left(\frac{S_a - S_s}{S_a(S_s - 1)} \right) 100 \quad (\text{X2.5})$$



C 128 – 07a

SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C 128 – 07, that may impact the use of this test method. (Approved August 1, 2007)

(1) Revised 3.1.2.2.

(2) Revised 9.2.1.1.

Committee C09 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C 128 – 04a, that may impact the use of this test method. (Approved February 1, 2007)

(1) Revised 9.2.1.1.

(2) Added new **Appendix X1** and renumbered subsequent sections.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Designation: C 29/C 29M – 07

American Association of State
Highway and Transportation Officials Standard
AASHTO No.: T19/T19M

Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate¹

This standard is issued under the fixed designation C 29/C 29M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of bulk density (“unit weight”) of aggregate in a compacted or loose condition, and calculated voids between particles in fine, coarse, or mixed aggregates based on the same determination. This test method is applicable to aggregates not exceeding 125 mm [5 in.] in nominal maximum size.

NOTE 1—Unit weight is the traditional terminology used to describe the property determined by this test method, which is weight per unit volume (more correctly, mass per unit volume or density).

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard, as appropriate for a specification with which this test method is used. An exception is with regard to sieve sizes and nominal size of aggregate, in which the SI values are the standard as stated in Specification E 11. Within the text, inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore each system must be used independently of the other, without combining values in any way.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

- C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
- C 127 Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate

C 128 Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate

C 138/C 138M Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials

C 702 Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size

D 75 Practice for Sampling Aggregates

D 123 Terminology Relating to Textiles

E 11 Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes

2.2 *AASHTO Standard:*

T19/T19M Method of Test for Unit Weight and Voids in Aggregate³

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions are in accordance with Terminology C 125 unless otherwise indicated.

3.1.1 *bulk density, n*—of aggregate, the mass of a unit volume of bulk aggregate material, in which the volume includes the volume of the individual particles and the volume of the voids between the particles. Expressed in kg/m³ [lb/ft³].

3.1.2 *unit weight, n*—weight (mass) per unit volume. (Deprecated term used—preferred term **bulk density**.)

3.1.2.1 *Discussion*—Weight is equal to the mass of the body multiplied by the acceleration due to gravity. Weight may be expressed in absolute units (newtons, poundals) or in gravitational units (kgf, lbf), for example: on the surface of the earth, a body with a mass of 1 kg has a weight of 1 kgf (approximately 9.81 N), or a body with a mass of 1 lb has a weight of 1 lbf (approximately 4.45 N or 32.2 poundals). Since weight is equal to mass times the acceleration due to gravity, the weight of a body will vary with the location where the weight is determined, while the mass of the body remains constant. On the surface of the earth, the force of gravity imparts to a body that is free to fall an acceleration of approximately 9.81 m/s² [32.2 ft/s²].

D 123

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.20 on Normal Weight Aggregates.

Current edition approved Aug. 1, 2007. Published September 2007. Originally approved in 1920. Last previous edition approved in 2003 as C 29/C 29M – 97(2003).

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 444 N. Capitol St., NW, Suite 249, Washington, DC 20001, <http://www.transportation.org>.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.



3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *voids, n*—in unit volume of aggregate, the space between particles in an aggregate mass not occupied by solid mineral matter.

3.2.1.1 *Discussion*—Voids within particles, either permeable or impermeable, are not included in voids as determined by this test method.

4. Significance and Use

4.1 This test method is often used to determine bulk density values that are necessary for use for many methods of selecting proportions for concrete mixtures.

4.2 The bulk density also may be used for determining mass/volume relationships for conversions in purchase agreements. However, the relationship between degree of compaction of aggregates in a hauling unit or stockpile and that achieved in this test method is unknown. Further, aggregates in hauling units and stockpiles usually contain absorbed and surface moisture (the latter affecting bulking), while this test method determines the bulk density on a dry basis.

4.3 A procedure is included for computing the percentage of voids between the aggregate particles based on the bulk density determined by this test method.

5. Apparatus

5.1 *Balance*—A balance or scale accurate within 0.1 % of the test load at any point within the range of use, graduated to at least 0.05 kg [0.1 lb]. The range of use shall be considered to extend from the mass of the measure empty to the mass of the measure plus its contents at 1920 kg/m³ [120 lb/ft³].

5.2 *Tamping Rod*—A round, straight steel rod, 16 mm [$\frac{5}{8}$ in.] in diameter and approximately 600 mm [24 in.] in length, having the tamping end, or both ends, rounded to a hemispherical tip, the diameter of which is 16 mm [$\frac{5}{8}$ in.].

5.3 *Measure*—A cylindrical metal measure, preferably provided with handles. It shall be watertight, with the top and bottom true and even, and sufficiently rigid to retain its form under rough usage. The measure shall have a height approximately equal to the diameter, but in no case shall the height be less than 80 % nor more than 150 % of the diameter. The capacity of the measure shall conform to the limits in Table 1 for the aggregate size to be tested. The thickness of metal in the measure shall be as described in Table 2. The top rim shall be smooth and plane within 0.25 mm [0.01 in.] and shall be parallel to the bottom within 0.5° (See Note 2). The interior wall of the measure shall be a smooth and continuous surface.

TABLE 1 Capacity of Measures

Nominal Maximum Size of Aggregate		Capacity of Measure ^A	
mm	in.	m ³ [L]	ft ³
12.5	$\frac{1}{2}$	0.0028[2.8]	$\frac{1}{100}$
25.0	1	0.0093[9.3]	$\frac{1}{30}$
37.5	$1\frac{1}{2}$	0.014[14]	$\frac{1}{20}$
75	3	0.028[28]	1
100	4	0.070[70]	$2\frac{1}{2}$
125	5	0.100[100]	$3\frac{1}{2}$

^A The indicated size of measure shall be used to test aggregates of a nominal maximum size equal to or smaller than that listed. The actual volume of the measure shall be at least 95 % of the nominal volume listed.

TABLE 2 Requirements for Measures

Capacity of Measure	Thickness of Metal, min		
	Bottom	Upper 38 mm or 1½ in. of wall ^A	Remainder of wall
Less than 11 L	5.0 mm	2.5 mm	2.5 mm
11 to 42 L, incl	5.0 mm	5.0 mm	3.0 mm
over 42 to 80 L, incl	10.0 mm	6.4 mm	3.8 mm
over 80 to 133 L, incl	13.0 mm	7.6 mm	5.0 mm
Less than 0.4 ft ³	0.20 in.	0.10 in.	0.10 in.
0.4 ft ³ to 1.5 ft ³ , incl	0.20 in.	0.20 in.	0.12 in.
over 1.5 to 2.8 ft ³ , incl	0.40 in.	0.25 in.	0.15 in.
over 2.8 to 4.0 ft ³ , incl	0.50 in.	0.30 in.	0.20 in.

^A The added thickness in the upper portion of the wall may be obtained by placing a reinforcing band around the top of the measure.

NOTE 2—The top rim is satisfactorily plane if a 0.25-mm [0.01-in.] feeler gage cannot be inserted between the rim and a piece of 6-mm [$\frac{1}{4}$ -in.] or thicker plate glass laid over the measure. The top and bottom are satisfactorily parallel if the slope between pieces of plate glass in contact with the top and bottom does not exceed 0.87 % in any direction.

5.3.1 If the measure is to also be used for testing for bulk density of freshly-mixed concrete according to Test Method C 138, the measure shall be made of steel or other suitable metal not readily subject to attack by cement paste. Reactive materials, such as aluminum alloys are permitted, where as a consequence of an initial reaction, a surface film is formed which protects the metal against further corrosion.

5.3.2 Measures larger than nominal 28 L [1 ft³] capacity shall be made of steel for rigidity, or the minimum thicknesses of metal listed in Table 2 shall be suitably increased.

5.4 *Shovel or Scoop*—A shovel or scoop of convenient size for filling the measure with aggregate.

5.5 Calibration Equipment:

5.5.1 *Plate Glass*—A piece of plate glass, preferably at least 6 mm [$\frac{1}{4}$ in.] thick and at least 25 mm [1 in.] larger than the diameter of the measure to be calibrated.

5.5.2 *Grease*—A supply of water-pump, chassis, or similar grease.

5.5.3 *Thermometer*—A thermometer having a range of at least 10 to 32 °C [50 to 90 °F] and that is readable to at least 0.5 °C [1 °F].

5.5.4 *Balance*—A balance as described in 5.1.

6. Sampling

6.1 Obtain the sample in accordance with Practice D 75, and reduce to test sample size in accordance with Practice C 702.

7. Test Sample

7.1 The size of the sample shall be approximately 125 to 200 % of the quantity required to fill the measure, and shall be handled in a manner to avoid segregation. Dry the aggregate sample to essentially constant mass, preferably in an oven at 110 ± 5 °C [230 ± 9 °F].

8. Calibration of Measure

8.1 Measures shall be recalibrated at least once a year or whenever there is reason to question the accuracy of the calibration.

8.2 Determine the mass of the plate glass and measure the nearest 0.05 kg [0.1 lb].



8.3 Place a thin layer of grease on the rim of the measure to prevent leakage of water from the measure.

8.4 Fill the measure with water that is at room temperature and cover with the plate glass in such a way as to eliminate bubbles and excess water. Remove any water that may have overflowed onto the measure or plate glass.

8.5 Determine the mass of the water, plate glass, and measure to the nearest 0.05 kg [0.1 lb].

8.6 Measure the temperature of the water to the nearest 0.5 °C [1 °F] and determine its density from Table 3, interpolating if necessary.

8.7 Calculate the volume, V , of the measure. Alternatively, calculate the factor, F , for the measure.

NOTE 3—For the calculation of bulk density, the volume of the measure in SI units should be expressed in cubic metres, or the factor as $1/\text{m}^3$. However, for convenience the size of the measure may be expressed in litres.

9. Selection of Procedure

9.1 The shoveling procedure for loose bulk density shall be used only when specifically stipulated. Otherwise, the compact bulk density shall be determined by the rodding procedure for aggregates having a nominal maximum size of 37.5 mm [1½ in.] or less, or by the jiggling procedure for aggregates having a nominal maximum size greater than 37.5 mm [1½ in.] and not exceeding 125 mm [5 in.].

10. Rodding Procedure

10.1 Fill the measure one-third full and level the surface with the fingers. Rod the layer of aggregate with 25 strokes of the tamping rod evenly distributed over the surface. Fill the measure two-thirds full and again level and rod as above. Finally, fill the measure to overflowing and rod again in the manner previously mentioned. Level the surface of the aggregate with the fingers or a straightedge in such a way that any slight projections of the larger pieces of the coarse aggregate approximately balance the larger voids in the surface below the top of the measure.

10.2 In rodding the first layer, do not allow the rod to strike the bottom of the measure forcibly. In rodding the second and third layers, use vigorous effort, but not more force than to cause the tamping rod to penetrate to the previous layer of aggregate.

NOTE 4—In rodding the larger sizes of coarse aggregate, it may not be possible to penetrate the layer being consolidated, especially with angular aggregates. The intent of the procedure will be accomplished if vigorous effort is used.

TABLE 3 Density of Water

Temperature		kg/m ³	lb/ft ³
°C	°F		
15.6	60	999.01	62.366
18.3	65	998.54	62.336
21.1	70	997.97	62.301
23.0	73.4	997.54	62.274
23.9	75	997.32	62.261
26.7	80	996.59	62.216
29.4	85	995.83	62.166

10.3 Determine the mass of the measure plus its contents, and the mass of the measure alone, and record the values to the nearest 0.05 kg [0.1 lb].

11. Jiggling Procedure

11.1 Fill the measure in three approximately equal layers as described in 10.1, compacting each layer by placing the measure on a firm base, such as a cement-concrete floor, raising the opposite sides alternately about 50 mm [2 in.], and allowing the measure to drop in such a manner as to hit with a sharp, slapping blow. The aggregate particles, by this procedure, will arrange themselves in a densely compacted condition. Compact each layer by dropping the measure 50 times in the manner described, 25 times on each side. Level the surface of the aggregate with the fingers or a straightedge in such a way that any slight projections of the larger pieces of the coarse aggregate approximately balance the larger voids in the surface below the top of the measure.

11.2 Determine the mass of the measure plus its contents, and the mass of the measure alone, and record the values to the nearest 0.05 kg [0.1 lb].

12. Shoveling Procedure

12.1 Fill the measure to overflowing by means of a shovel or scoop, discharging the aggregate from a height not to exceed 50 mm [2 in.] above the top of the measure. Exercise care to prevent, so far as possible, segregation of the particle sizes of which the sample is composed. Level the surface of the aggregate with the fingers or a straightedge in such a way that any slight projections of the larger pieces of the coarse aggregate approximately balance the larger voids in the surface below the top of the measure.

12.2 Determine the mass of the measure plus its contents, and the mass of the measure alone, and record the values to the nearest 0.05 kg [0.1 lb].

13. Calculation

13.1 *Bulk Density*—Calculate the bulk density for the rodding, jiggling, or shoveling procedure as follows:

$$M = (G - T)/V \quad (1)$$

or

$$M = (G - T) \times F \quad (2)$$

where:

M = bulk density of the aggregate, kg/m³ [lb/ft³],
 G = mass of the aggregate plus the measure, kg [lb],
 T = mass of the measure, kg [lb],
 V = volume of the measure, m³ [ft³], and
 F = factor for measure, m⁻³ [ft⁻³].

13.1.1 The bulk density determined by this test method is for aggregate in an oven-dry condition. If the bulk density in terms of saturated-surface-dry (SSD) condition is desired, use the exact procedure in this test method, and then calculate the SSD bulk density using the following formula:

$$M_{ssd} = M[1 + (A/100)] \quad (3)$$

where:

M_{ssd} = bulk density in SSD condition, kg/m³ [lb/ft³], and

 C 29/C 29M - 07

A = % absorption, determined in accordance with Test Method C 127 or Test Method C 128.

13.2 *Void Content*—Calculate the void content in the aggregate using the bulk density determined by either the rodding, jigging, or shoveling procedure, as follows:

$$\% \text{ Voids} = 100[(S \times W) - M]/(S \times W) \quad (4)$$

where:

M = bulk density of the aggregate, kg/m³ [lb/ft³],

S = bulk specific gravity (dry basis) as determined in accordance with Test Method C 127 or Test Method C 128, and

W = density of water, 998 kg/m³ [62.3 lb/ft³].

13.3 *Volume of Measure*—Calculate the volume of a measure as follows:

$$V = (W - M)/D \quad (5)$$

$$F = D/(W - M) \quad (6)$$

where:

V = volume of the measure, m³ [ft³]

W = mass of the water, plate glass, and measure, kg [lb]

M = mass of the plate glass and measure, kg [lb]

D = density of the water for the measured temperature, kg/m³ [lb/ft³], and

F = factor for the measure, 1/m³ [1/ft³]

14. Report

14.1 Report the results for the bulk density to the nearest 10 kg/m³ [1 lb/ft³] as follows:

14.1.1 Bulk density by rodding, or

14.1.2 Bulk density by jigging, or

14.1.3 Loose bulk density.

14.2 Report the results for the void content to the nearest 1 % as follows:

14.2.1 Voids in aggregate compacted by rodding, %, or

14.2.2 Voids in aggregate compacted by jigging, %, or

14.2.3 Voids in loose aggregate, %.

15. Precision and Bias

15.1 The following estimates of precision for this test method are based on results from the AASHTO Materials Reference Laboratory (AMRL) Proficiency Sample Program, with testing conducted using this test method and AASHTO Method T 19/T19M. There are no significant differences between the two test methods. The data are based on the analyses of more than 100 paired test results from 40 to 100 laboratories.

15.2 Coarse Aggregate (bulk density):

15.2.1 *Single-Operator Precision*—The single-operator standard deviation has been found to be 14 kg/m³ [0.88 lb/ft³] (1s). Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on similar material should not differ by more than 40 kg/m³ [2.5 lb/ft³] (d2s).

15.2.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory standard deviation has been found to be 30 kg/m³ [1.87 lb/ft³] (1s). Therefore, results of two properly conducted tests from two different laboratories on similar material should not differ by more than 85 kg/m³ [5.3 lb/ft³] (d2s).

15.2.3 These numbers represent, respectively, the (1s) and (d2s) limits as described in Practice C 670. The precision estimates were obtained from the analysis of AMRL proficiency sample data for bulk density by rodding of normal weight aggregates having a nominal maximum aggregate size of 25.0 mm [1 in.], and using a 14-L [½-ft³] measure.

15.3 Fine Aggregate (bulk density):

15.3.1 *Single-Operator Precision*—The single-operator standard deviation has been found to be 14 kg/m³ [0.88 lb/ft³] (1s). Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on similar material should not differ by more than 40 kg/m³ [2.5 lb/ft³] (d2s).

15.3.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory standard deviation has been found to be 44 kg/m³ [2.76 lb/ft³] (1s). Therefore, results of two properly conducted tests from two different laboratories on similar material should not differ by more than 125 kg/m³ [7.8 lb/ft³] (d2s).

15.3.3 These numbers represent, respectively, the (1s) and (d2s) limits as described in Practice C 670. The precision estimates were obtained from the analysis of AMRL proficiency sample data for loose bulk density from laboratories using a 2.8-L [¼-ft³] measure.

15.4 No precision data on void content are available. However, as the void content in aggregate is calculated from bulk density and bulk specific gravity, the precision of the voids content reflects the precision of these measured parameters given in 15.2 and 15.3 of this test method and in Test Methods C 127 and C 128.

15.5 *Bias*—The procedure in this test method for measuring bulk density and void content has no bias because the values for bulk density and void content can be defined only in terms of a test method.

16. Keywords

16.1 aggregates; bulk density; coarse aggregate; density; fine aggregate; unit weight; voids in aggregates

**C 29/C 29M – 07****SUMMARY OF CHANGES**

Committee C09 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C 29/C 29M – 97(2003), that may impact the use of this test method. (Approved August 1, 2007)

(1) Revised **5.5**.

(3) Added new **13.3**.

(2) Revised Section **8**.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Designation: C 796 – 97

Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam¹

This standard is issued under the fixed designation C 796; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This specification has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method furnishes a way of measuring, in the laboratory, the performance of a foaming chemical to be used in producing foam (air cells) for making cellular concrete.

1.2 This test method includes the following:

1.2.1 Manufacture of laboratory quantities of cellular concrete.

1.2.2 Determination of the air content of the freshly prepared cellular concrete and of the hardened concrete after handling in conventional machinery.

1.2.3 Determination of the following properties of the hardened concrete: compressive strength, tensile splitting strength, density, and water absorption. It may not be necessary to study all of the above properties in all cases, depending on the proposed use of the material.

1.3 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.5 The text of this standard references notes and footnotes which provide explanatory material. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of the standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- C 88 Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate²
- C 150 Specification for Portland Cement²
- C 192 Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory²
- C 495 Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete²

C 496 Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens²

C 511 Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes²

C 869 Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete²

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *cellular concrete*—a lightweight product consisting of portland cement, cement-silica, cement-pozzolan, lime-pozzolan, or lime-silica pastes, or pastes containing blends of these ingredients and having a homogeneous void or cell structure, attained with gas-forming chemicals or foaming agents (for cellular concretes containing binder ingredients other than, or in addition to portland cement, autoclave curing is usually employed).³ In cellular concrete the density control is achieved by substituting macroscopic air cells for all or part of the fine aggregate. Normal-weight coarse aggregate is usually not used but lightweight aggregates, both fine and coarse, are often utilized in cellular concrete.

3.2 Symbols:

D_{ex1}	= experimental density of the concrete before pumping, lb/ft ³ (kg/m ³)
D_{ex2}	= experimental density of the concrete after pumping, lb/ft ³ (kg/m ³)
D_{th}	= theoretical density of the plastic mix based on absolute volume, lb/ft ³ (kg/m ³)
D_d	= design density of the test mixture, lb/ft ³ (kg/m ³)
SGC	= specific gravity of cement = 3.15
T	= time required to overfill the container, min
T_1	= time required to generate 1 ft ³ (1 m ³) of foam, min
V	= volume of foam container, ft ³ (m ³)
V_a	= volume of air required in the test batch, ft ³ (m ³)
V_c	= volume of test specimen (cylinder), ft ³ (m ³)
V_f	= volume of foam in the test batch, ft ³ (m ³)

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.23 on Chemical Admixtures.

Current edition approved Nov. 10, 1997. Published October 1998. Originally published as C 796 – 74 T. Last previous edition C 796 – 87a (1993).

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

³ ACI Committee 116, "Cement and Concrete Terminology," American Concrete Institute, Publication SP-19, 1967, p. 144.

C 796

V_w	= volume of water absorbed by test specimen in 24 h, ft ³ (m ³)
W_1	= net weight of foam in overfilled container before striking off, lb (kg)
W_2	= net weight of foam in container after striking off, lb (kg)
W_c	= weight of cement in the test batch, lb (kg)
W_f	= weight of foam in the test batch, lb (kg)
W_{TW}	= total weight of water in the test batch, including weight of foam, lb (kg)
W_{uf}	= density of foam, lb/ft ³ (kg/m ³)
W_w	= weight of water added to test batch at mixer, lb (kg)

4. Summary of Test Method

4.1 This test method includes the following:

4.1.1 Manufacture of laboratory quantities of cellular concrete.

4.1.2 Determination of the air content of freshly prepared cellular concrete and of hardened concrete after handling in conventional machinery.

4.1.3 Determination of the following properties of hardened concrete: compressive strength, tensile splitting strength, density, and water absorption. It may not be necessary to study all of the above properties in all cases, depending on the proposed use of the material.

5. Significance and Use

5.1 This test method is used to develop data for comparison or compliance with the requirements of Specification C 869.

6. Apparatus

6.1 *Mixer*—The mixer shall be a power-driven paddle-type mixer with a capacity of at least 4 ft³(0.12 m³), an operating speed of 40 to 45 r/min (0.24 to 0.27 kHz), and equipped with rubber wiper blades.

6.2 *Foam Generator*—The foam generator shall be a laboratory-sized generator approved by the manufacturer of the foam being used and shall be similar to the type used in the field.

6.3 *Pump*—The pump shall be an open or closed throat-type pump⁴ and shall be run at 450 r/min (2.7 kHz). The pump shall be equipped with a 4.5-ft³(0.13-m³)“ feed” reservoir and 50 ft (15 m) of open-end 1-in. (25-mm) inside diameter rubber hose on the pump discharge, the exit end of the hose being at the same height as the pump.

6.4 *Curing Cabinet*—The curing cabinet shall be as described in Specification C 511.

6.5 *Molds*—The cylindrical molds for compression test specimens shall be as described in the Apparatus section of Test Method C 495. The molds for all other test specimens shall conform to the cylinder molds in the Apparatus section of Method C 192.

6.6 *Strike-Off Plate for Molds*—A ¼-in. (6-mm) thick, flat steel plate at least 8 in. (200 mm) longer and 2 in. (50 mm) wider than the diameter of the mold.

6.7 *Scales*—Scales and weights shall be accurate to within 0.1 % of the weight of the material being measured.

6.8 *Compression Machines*—Compression testing machines used for compressive strength tests and tensile-splitting strength tests shall conform to the requirements of Test Methods C 495 and C 496, respectively.

6.9 *Drying Oven*—The drying oven shall be as described in Test Method C 88.

6.10 *Compressed Air*—A source of compressed air capable of maintaining pressures in the range of 60 to 100 psi (0.4 to 0.7 MPa) to ± 1 psi (± 0.007 MPa).

6.11 *Weighing Container for Concrete*—A machined-steel container of 0.5 ft³(0.014 m³) volume with a flat smooth rim.

6.12 *Strike-Off Plate for Weighing Container*—A ¼-in. (6-mm) thick, flat steel plate, at least 8 in. (200 mm) longer and 2 in. (50 mm) wider than the diameter of the rim of the weighing container.

6.13 *Stop Watch*—A stop watch graduated in seconds and minutes.

6.14 *Calipers*—Calipers to span 3, 6, and 12 in. (76, 152, and 305 mm).

6.15 *Foam Weighing Container*—A lightweight vessel of approximately 2 ft³(0.06 m³) capacity, with a smooth rim for striking off.

6.16 *Strike-Off Plate for Foam Weighing Container*—A ¼-in. (6-mm) thick, flat steel plate at least 8 in. (200 mm) longer and 2 in. (50 mm) wider than the diameter of the rim of the container.

6.17 *Small Tools*—Small tools such as a rubber-headed hammer and a trowel shall be provided.

7. Materials and Proportions

7.1 *Cement*—The cement used shall be Type I or Type III portland cement meeting the requirements of Specification C 150.

7.2 *Water-Cement Ratio*—The water requirement will vary with the type and source of cement. For the purpose of these tests, $w/c = 0.58$ for Type I cement and $w/c = 0.64$ for Type III cement shall be used. However, if a particular cement or foaming agent used with these values of w/c does not produce a satisfactory mix, a trial mix or mixes may be made using the cement and foaming agent in question. Pump the trial mix (see 8.7.1) and revise the w/c if D_{ex2} , the unit weight of the concrete after pumping, is more than 10 % different from the design unit weight of 40 lb/ft³(641 kg/m³).

7.3 *Batch Quantities*—The quantities of materials described in Table 1 shall be used in the test batch.

7.3.1 The foaming solution in the foam will be considered as part of the total mixing water. The quantities listed in Table 1 will produce concrete weighing 40 lb/ft³(641 kg/m³). The batch yield will be 3.95 ft³(0.112 m³) for the batch using Type I cement. Using the quantities for Type III cement, the yield will be 4.1 ft³(0.116 m³).

TABLE 1 Materials for the Test Batch

Type of Cement	Cement, lb (kg)	Total Water, lb (kg)	Foam, ft ³ (m ³)
I	100.0 (45.36)	58.0 (26.31)	156.62/(62.4 - W_{uf}) (71.0/(1000 - W_{uf}))
III	100.0 (45.36)	64.0 (29.03)	160.37/(62.4 - W_{uf}) (73.0/(1000 - W_{uf}))

⁴ The Moyno Type CDR, Frame 2JC4 or 2L4 pump, or equivalent, has been found satisfactory for this purpose.

 C 796

7.3.2 The density and the yields stated in Table 1 are based on the assumption that no accidentally entrapped air and no change in foam volume from the calculated value exist.

NOTE 1—The equation for foam volume required for the test batch may be derived as shown in Appendix X1.

8. Procedure

8.1 Make an aqueous solution of the foaming agent in the dilution specified by the manufacturer. If the dilution is not specified, preliminary tests are necessary to determine the required dilution. A suggested starting point for such tests is 40 parts water to 1 part foaming agent, by volume.

8.2 Charge the foam generator with the amount of foaming solution suggested by the manufacturer of the generator.

8.3 Connect the generator with the source of compressed air, adjusting the pressure to that recommended by the manufacturer of the foaming agent being tested.

8.4 Using the stop watch, calibrate the generator as follows. Weigh the empty foam container and determine its volume. Overfill the container with foam, measuring the time required using a stop watch then weigh. Strike off the excess foam, holding the strike-off plate in a horizontal position (plane of the plate horizontal) and moving it across the top of the container with a sawing action. Again weigh. Calculate the time required per cubic foot (or cubic metre) of foam using the following equation:

$$T_1 = (T \times W_2) / (W_1 \times V) \quad (1)$$

8.4.1 Calculate also the unit weight of the foam as follows:

$$W_{uf} = W_2 / V \quad (2)$$

8.4.2 Calculate the length of time required to generate the required volume of foam, $V_f T_1$, as follows:

$$V_f T_1 = 62.4 V_a T_1 / (62.4 - W_{uf}) \quad (V_f T_1 = 1000 V_a T_1 / (1000 - W_{uf})) \quad (3)$$

8.4.3 Calculate the weight, W_b , of the required volume of foam, $V_f W_{uf}$.

NOTE 2—The weight of the foam will usually range from 2 to 4 lb/ft³ (32 to 64 kg/m³) depending on the foam chemical used. Adjust the unit weight of foam, W_{uf} , to the manufacturer's recommendation if the foam generator is adjustable.

8.4.3.1 If Type I cement is used, weigh out 58.0 – W_f lb (26.31 – W_f kg) of water, W_w , and 100.0 lb (45.36 kg) of Type I cement.

8.4.3.2 If Type III cement is used, weigh out 64.0 – W_f lb (29.03 – W_f kg) of water, W_w , and 100.0 lb (45.36 kg) of Type III cement.

8.5 Wet the mixer with water and drain. Add the water, W_w , and start the mixer. Gradually add the cement (over a period of ½ min). With a trowel, break up any lumps of undispersed cement. Mix for 5 min.

8.6 While still mixing, add V_f ft³ (m³) of foam. The required foam time is $V_f T_1$. Mix for 2 min after all the foam has been added. Discharge the mixer into the pump feed reservoir. Immediately, proceed to 8.7.

8.7 *Weighing*—Fill a tared weighing container with a representative sample of the concrete in the reservoir. Before taking the sample, carefully mix the concrete in the reservoir to assure better uniformity without entrapping large air bubbles in

the mix. Use a paddle of proper size to reach the bottom of the reservoir. Use a scoop to transfer the concrete to the container and tap the sides of the container briskly with the rubber hammer during the filling operation. Overfill the container and strike off the excess concrete, holding the strike-off plate in a horizontal position (plane of plate horizontal) and moving it across the top of the container with a sawing motion. Wipe the surface of the container free of spilled concrete with a cloth. Weigh the full container. Calculate the density of the concrete and record as the density before pumping (D_{ex1}).

8.7.1 Pump the batch of concrete through the 50-ft (15-m) hose, discharging it into a sampling basin. From the sampling basin, take a second density sample as in 8.7, weigh, and record as the density after pumping (D_{ex2}).

8.8 *Molding*—Immediately, fill the cylinder molds with concrete from the sampling basin. Tap the sides of the mold with the rubber hammer while the mold is being filled. The minimum number of specimens required is four cylinders, 3 by 6 in. (76 by 152 mm) and ten cylinders 6 by 12 in. (152 by 305 mm).

8.8.1 As soon as possible after casting, strike off the top surface of each specimen and cover the specimen with a plastic bag to prevent evaporation, without marring the surface.

8.9 *Removal from Molds and Curing*—Follow the applicable requirements of the Test Specimen section of Test Method C 495. Do not oven dry specimens that are to be load-tested.

8.10 *Compressive Strength*—Test four 3 by 6-in. (76 by 152-mm) cylinders for compressive strength in accordance with Test Method C 495.

8.11 *Tensile Splitting Strength*—Test four 6 by 12-in. (152 by 305-mm) cylinders for tensile splitting strength at age 28 days in accordance with Test Method C 496, for lightweight concrete.

8.12 *Oven-Dry Weight*—Determine the oven-dry density in accordance with the section on Oven-Dry Weight of Test Method C 495. Use three 6 by 12-in. (152 by 305-mm) cylinders from 7.9 at age 28 days.

8.13 *Water Absorption*:

8.13.1 Take three 6 by 12-in. (152 by 305-mm) specimens from 8.9 at age 28 days. Take the dimensions with calipers as described in the Test Specimen Section of Test Method C 495.

8.13.2 Submerge the specimens in water for 24 h. Remove from water, allow excess water to run off (30 s) and weigh. This is the wet weight of the specimen.

9. Calculation

9.1 *Air Content*:

9.1.1 Determine the experimental density of the freshly mixed concrete at the mixer, D_{ex1} , and at the pump discharge (end of hose), D_{ex2} , by dividing the net weights of the samples from 8.7 and 8.7.1 by the volume of the container. Record to the nearest 0.5 lb/ft³ (8 kg/m³).

9.1.2 Determine the experimental density of the specimens from 8.12 before and after drying from the weights and volumes of the specimens. Use three 6 by 12-in. (152 by 305-mm) cylinders. Record to the nearest 0.5 lb/ft³ (8 kg/m³).

C 796

9.1.3 Determine the air content of the freshly mixed concrete from the experimental densities, before and after pumping, and the theoretical density, D_{th} , based on the absolute volume. Record the air content to the nearest 1 %. Calculate the theoretical density in lb/ft^3 (kg/m^3) as follows:

Inch-Pound Units:

$$D_{th} = (W_w + W_c + W_f) / [(W_w/62.4) + (W_c/(SGC \times 62.4)) + (W_f/62.4)] \quad (4)$$

SI Equivalents:

$$D_{th} = (W_w + W_c + W_f) / [(W_w/1000) + (W_c/(SGC \times 1000)) + (W_f/1000)] \quad (5)$$

9.1.3.1 Calculate the air content before pumping or the percent of air at the mixer as follows:

$$\text{Air content before pumping} = 100 [1 - (D_{ex1}/D_{th})] \quad (6)$$

9.1.3.2 Calculate the air content after pumping, or the percent of air at end of hose as follows:

$$\text{Air content after pumping} = 100 [1 - (D_{ex2}/D_{th})] \quad (7)$$

NOTE 3—Using the prescribed procedure and assuming the specific gravity of cement is 3.15 and that the total water used is 58.0 lb (26.31 kg) for Type I cement, the theoretical density is 109.9 lb/ft^3 (1761 kg/m^3). Similarly, for Type III cement the total water is 64.0 lb (29.03 kg) and the theoretical density is 106.9 lb/ft^3 (1712 kg/m^3).

9.1.4 Calculate the loss of air during pumping as the difference between the air content before and after pumping. Record to the nearest 1 %.

$$\text{Loss of air, \% by volume} = 100 [(D_{ex2} - D_{ex1})/D_{th}] \quad (8)$$

9.1.5 Calculate the design density (D_d) of the test mixture in lb/ft^3 (kg/m^3) as follows:

Inch-Pound Units:

$$D_d = (W_w + W_c + W_f) / [(W_w/62.4) + (W_c/(SGC \times 62.4)) + V_a] \quad (9)$$

SI Equivalents:

$$D_d = (W_w + W_c + W_f) / [(W_w/1000) + (W_c/(SGC \times 1000)) + V_a] \quad (10)$$

9.2 *Water Absorption:*

9.2.1 Find the average weight of water absorbed by the cylinders by subtracting the average dry weight of cylinders (see 8.12) from the average wet weight of cylinders (see 8.13). Record to the nearest 0.1 lb (or 0.05 kg).

9.2.2 Find the average volume of water absorbed by dividing the average weight of water absorbed by the density of water in lb/ft^3 (kg/m^3). Determine the water absorption using the following equation:

$$\text{absorption, \% by volume} = (V_w/V_c) \times 100 \quad (11)$$

Record absorption to the nearest 0.5 %.

10. Report

10.1 Using the degrees of precision specified in Section 9, report the following:

10.1.1 Identification of chemical tested, including manufacturer's name, brand, and lot number,

10.1.2 Water to cement ratio and type of cement used,

10.1.3 Air content before and after pumping,

10.1.4 Oven-dry density,

10.1.5 Water absorption, % by volume,

10.1.6 Compressive strength,

10.1.7 Loss of air during pumping, %,

10.1.8 Tensile splitting strength, and

10.1.9 Difference between design density and experimental densities before and after pumping.

11. Precision and Bias

11.1 This test method uses results obtained from other ASTM test methods listed in the Referenced Documents section. These documents are to be referred to for their respective precision and bias statements.

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. DERIVATION OF FORMULA FOR FOAM VOLUME

X1.1 The formula for foam volume required for the test batch may be derived as follows:

X1.1.1 Knowing the wet density, 40 lb/ft^3 (641 kg/m^3), calculate the volume of air required as follows:

Inch-Pound Units:

$$\text{Wet density, 40 } lb/ft^3 = (W_{TW} + W_c) / [(W_{TW}/62.4) + (W_c/(3.15 \times 62.4)) + V_a] \quad (X1.1)$$

SI Equivalents:

$$\text{Wet density, 641 } kg/m^3 = (W_{TW} + W_c) / [(W_{TW}/1000) + (W_c/(3.15 \times 1000)) + V_a] \quad (X1.2)$$

X1.1.2 Solving for the volume of air required in cubic feet

(or cubic metres):

Inch-Pound Units:

$$V_a = (0.359 W_{TW} + 0.7965 W_c) / 40 \quad (X1.3)$$

SI Equivalents:

$$V_a = (0.359 W_{TW} + 0.7965 W_c) / 641 \quad (X1.4)$$

X1.2 The air volumes required for the test batches are as follows:

Type of Cement	V_a , ft^3 (m^3)
Type I	2.51 (0.071)
Type III	2.57 (0.073)

X1.3 Treating the diluted foam chemical as water (sp gr = 1) the following relationships between air volume and

 C 796

foam volume may be stated:

$$V_f = V_a + (W_f/62.4)/\text{ft}^3 \quad \text{or} \quad V_f = V_a + (W_f/1000)/\text{m}^3 \quad (\text{X1.5})$$

X1.4 If W_{uf} is the unit weight of foam, then $W_f = W_{uf} \times V_f$ and the equation in X1.3 may be stated in the following manner:

$$V_f - (W_{uf}V_f/62.4) = V_a \text{ ft}^3 \quad \text{or} \quad V_f - (W_{uf}V_f/1000) = V_a \text{ m}^3 \quad (\text{X1.6})$$

$$V_f = V_a/[1 - (W_{uf}/62.4)]/\text{ft}^3 \quad \text{or} \quad V_f = V_a/[1 - (W_{uf}/1000)]/\text{m}^3, \quad \text{and} \quad (\text{X1.7})$$

$$V_f = 62.4 V_a/(62.4 - W_{uf})/\text{ft}^3 \quad \text{or} \quad V_f = 1000 V_a/(1000 - W_{uf})/\text{m}^3 \quad (\text{X1.8})$$

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (<http://www.astm.org>).

หน้า ๙
เล่ม ๑๓๐ ตอนพิเศษ ๑๒๓ ง ราชกิจจานุเบกษา ๒๕ กันยายน ๒๕๕๖

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ ๔๕๖๒ (พ.ศ. ๒๕๕๖)

ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

พ.ศ. ๒๕๑๑

เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๑๕ แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. ๒๕๑๑ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมออกประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มาตรฐานเลขที่ มอก. 2601 - 2556 ไว้ ดังมีรายการ สะเอียดต่อท้ายประกาศนี้

ทั้งนี้ ให้มีผลตั้งแต่วันประกาศในราชกิจจานุเบกษา เป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๒๖ กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๕๖

ประเสริฐ บุญชัยสุข

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ สำหรับผนังที่ออกแบบไม่รับน้ำหนัก

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ดังต่อไปนี้

- 2.1 คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า “คอนกรีตบล็อกมวลเบา” หมายถึง คอนกรีตบล็อกที่มีมวลเบากว่าคอนกรีตบล็อกที่มีขนาดเดียวกัน มีฟองอากาศเล็กๆ แทรกกระจาย ในเนื้อคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ ฟองอากาศเกิดจากการใช้สารก่อฟอง ที่ขอบด้านข้างอาจทำเป็นร่อง ผิวหน้าอาจทำเป็นผิวรอยหวี หรือผิวร่อง เหมาะสำหรับใช้ก่อผนัง
- 2.2 ผิวรอยหวี (combed finish) หมายถึง ผิวหน้าของคอนกรีตมวลเบาซึ่งทำเป็นรอยขีดหรือแนวที่ค่อนข้างขนานกัน
- 2.3 ผิวร่อง (scared finish) หมายถึง ผิวหน้าของคอนกรีตมวลเบาซึ่งทำเป็นร่อง

มอก.2601-2556

3. ชนิด

3.1 คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบ่งตามความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งออกเป็น 8 ชนิด ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

(ข้อ 3.1)

ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งเฉลี่ย (kg/m ³)
C6	501 ถึง 600
C7	601 ถึง 700
C8	701 ถึง 800
C9	801 ถึง 900
C10	901 ถึง 1 000
C12	1 001 ถึง 1 200
C14	1 201 ถึง 1 400
C16	1 401 ถึง 1 600

4. ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

4.1 ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ขนาดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาให้เป็นไปตามตารางที่ 2 โดยความสูงคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 4 mm

ความยาวคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 5 mm และความหนาคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 3 mm

การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 10.1

ตารางที่ 2 ขนาดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

(ข้อ 4.1)

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ความสูง	ความยาว	ความหนา
200	300	ให้เป็นไปตามที่ผู้ทำระบุมวลที่ตกลง
	400	
	500	
	600	

มอก.2601-2556

5. วัสดุและการทำ

5.1 วัสดุ

- 5.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตาม มอก.15 เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ
- 5.1.2 มวลผสมต้องเป็นวัสดุซิลิกา หรือทรายควอตซ์ หรือตะกรันจากเตาถลุงแบบฟั่นลม หรือถ้ำถ่านหิน หรือวัสดุอื่นใดที่ไม่มีสาร เช่น โคลน ผุ่น สารอินทรีย์ ในปริมาณที่อาจเป็นผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีตบล็อกมวลเบา
- 5.1.3 สารก่อฟอง ต้องเป็นวัสดุทำให้เกิดฟองอากาศที่มีความเสถียร และควบคุมเวลาแข็งตัว โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีตบล็อกมวลเบา
- 5.1.4 สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต(ถ้ามี)
ต้องเป็นสารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต ตาม มอก.733

5.2 การทำ

คอนกรีตบล็อกมวลเบาต้องทำโดยผสมส่วนผสมตามที่ระบุในข้อ 5.1.1 และข้อ 5.1.2 เข้าด้วยกันอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นเติมน้ำจำนวนที่เหมาะสม สารก่อฟอง และสารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต (ถ้ามี) ให้มีฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอ แล้วเทลงในแบบ

6. คุณลักษณะที่ต้องการ

6.1 ลักษณะทั่วไป

ต้องไม่แตก ไม่ร้าว ไม่บิดเบี้ยว ไม่แอ่นตัว และไม่มีตำหนิที่เป็นผลเสียต่อการใช้งาน การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ

6.2 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

เมื่อทดสอบตามข้อ 10.2 แล้ว คอนกรีตบล็อกมวลเบาต้องมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรเฉลี่ยตามตารางที่ 1 โดยคอนกรีตบล็อกมวลเบาแต่ละก้อนจะมีค่าแตกต่างจากที่กำหนดไม่เกิน $\pm 50 \text{ kg/m}^3$

6.3 ความต้านแรงอัด

เมื่อทดสอบตามข้อ 10.3 แล้ว คอนกรีตบล็อกมวลเบาต้องมีความต้านแรงอัดที่อายุ 28 d เป็นไปตาม ตารางที่ 3

มอก.2601-2556

ตารางที่ 3 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา
(ข้อ 6.3)

ชนิด	ความต้านแรงอัด ไม่น้อยกว่า MPa (kg/cm ²)
C6	2.0 (20.4)
C7	
C8	
C9	2.5 (25.5)
C10	
C12	
C14	5.0 (51.0)
C16	

6.4 อัตราการดูดซึมน้ำ

เมื่อทดสอบตามข้อ 10.4 แล้ว อัตราการดูดซึมน้ำต้องเป็นไปตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบา
(ข้อ 6.4)

ชนิด	อัตราการดูดซึมน้ำ ไม่มากกว่า % (เศษส่วน โดยมวล)
C6	25
C7	
C8	
C9	23
C10	
C12	
C14	20
C16	

มอก.2601-2556

7. การบรรจุ

- 7.1 เมื่อจะนำคอนกรีตบล็อกมวลเบาออกจำหน่าย ผู้ต้องจัดเรียงคอนกรีตบล็อกมวลเบาบนแผงรองรับที่เหมาะสม มีการป้องกันขอบไม่ให้แตกบิ่นเสียหายต่อการใช้งานทั้งในการเก็บรักษาและขนส่ง

8. เครื่องหมายและฉลาก

- 8.1 ที่คอนกรีตบล็อกมวลเบาทุกๆ 50 ก้อนอย่างน้อยต้องมี เลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย และชัดเจน
- (1) ชนิด
 - (2) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน
- 8.2 ที่ภาชนะบรรจุคอนกรีตบล็อกมวลเบา อย่างน้อยต้องมี เลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย และชัดเจน
- (1) ชนิด
 - (2) ความยาว ความกว้าง ความหนา เป็นมิลลิเมตร
 - (3) เดือน ปีที่ทำ
 - (4) จำนวนที่บรรจุในหีบห่อ
 - (5) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน
- 8.3 ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศด้วย ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

9. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

- 9.1 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสินให้เป็นไปตามภาคผนวก ก

10. การทดสอบ

10.1 ขนาด

10.1.1 เครื่องมือ

10.1.1.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 mm

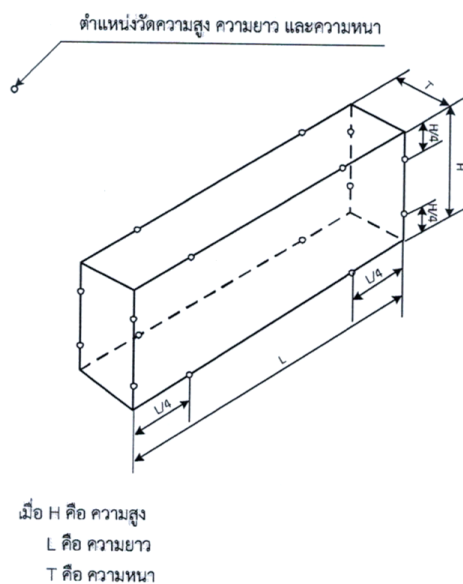
10.1.1.2 เวอร์เนียที่วัดได้ถึง 200 mm

มอก.2601-2556

10.1.2 วิธีทดสอบ

10.1.2.1 ความกว้างและความยาว

ใช้เครื่องวัดตามข้อ 10.1.1.1 วัดความกว้างและความยาวของตัวอย่าง โดยวัดที่ตำแหน่งห่างขอบเป็นระยะหนึ่งในสี่ของค่านั้น ๆ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตำแหน่งวัดความกว้าง ความยาว และความหนา
(ข้อ 10.1.2.1 และข้อ 10.1.2.2)

10.1.2.2 ความหนา

ใช้เวอร์เนียวัดความหนาของตัวอย่างที่ตำแหน่งห่างจากขอบด้านยาวของตัวอย่างเป็นระยะหนึ่งในสี่ของความยาว ดังรูปที่ 1

10.1.3 การรายงานผล

ให้รายงาน ค่าความสูง ความยาว และความหนาของตัวอย่างแต่ละก้อน

10.2 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

10.2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

หล่อชิ้นทดสอบให้มีขนาด 150 mm x 150 mm x 150 mm โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 mm

มอก.2601-2556

10.2.2 เครื่องมือ

10.2.2.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 mm

10.2.2.2 เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 g

10.2.2.3 ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$

10.2.3 วิธีทดสอบ

ให้วัดปริมาตรและชั่งน้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบที่อุณหภูมิ $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 h

10.2.4 การรายงานผล

ให้รายงานค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของชิ้นทดสอบแต่ละค่าและค่าเฉลี่ยจากสูตร

$$\rho = \frac{m}{v}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง เป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

m คือ มวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ เป็นกิโลกรัม

v คือ ปริมาตรของชิ้นทดสอบ เป็นลูกบาศก์เมตร

10.3 ความต้านแรงอัด

10.3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

หล่อชิ้นทดสอบให้มีขนาด 150 mm x 150 mm x 150 mm โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 mm

10.3.2 เครื่องมือ

10.3.2.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 mm

10.3.2.2 เครื่องกดที่อ่านได้ละเอียดถึง 100 N และสามารถควบคุมอัตราเพิ่มแรงอัดได้ระหว่าง 0.05 ถึง 0.20 N/mm²/s

10.3.3 วิธีทดสอบ

10.3.3.1 ให้กดชิ้นทดสอบด้วยวิธีตามที่ระบุใน มอก.109 จนได้ค่าแรงอัดสูงสุดเมื่อชิ้นทดสอบแตกเสียหาย

10.3.4 การรายงานผล

ให้รายงานค่าความต้านแรงอัดของชิ้นทดสอบแต่ละค่า

มอก.2601-2556

10.4 อัตราการดูดซึมน้ำ

10.4.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

หล่อชิ้นทดสอบให้มีขนาด 150 mm x 150 mm x 150 mm โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 mm

10.4.2 เครื่องมือ

10.4.2.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 mm

10.4.2.2 เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 g

10.4.2.3 ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$

10.4.3 วิธีทดสอบ

10.4.3.1 อบชิ้นทดสอบในตู้อบให้แห้งจนได้มวลคงที่เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 h ที่อุณหภูมิ $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ปลอบให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 h จากนั้นชั่งมวลแต่ละก้อนเป็นมวลชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง

10.4.3.2 แช่ชิ้นทดสอบตามข้อ 10.4.3.1 ในน้ำสะอาดให้ท่วมเป็นเวลา 24 h แล้วยกออก ใช้ผ้าชุบน้ำเช็ดที่ผิวที่ละก้อนแล้วชั่งใหม่ให้เสร็จภายใน 3 min มวลที่ชั่งได้นี้ถือเป็นมวลชิ้นทดสอบเมื่อเปียก กรณีชิ้นทดสอบไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดในตารางที่ 4 ให้ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 10.4.3.1 โดยใช้ชิ้นทดสอบเดิมกับน้ำกลั่นอีก 1 ครั้ง

10.4.4 วิธีคำนวณและการรายงานผล

10.4.4.1 การคำนวณหาอัตราการดูดซึมน้ำ

$$A = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100$$

เมื่อ A คือ อัตราการดูดซึมน้ำ เป็นร้อยละ (เศษส่วน โดยมวล)

m_1 คือ มวลของชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง เป็นกรัม

m_2 คือ มวลของชิ้นทดสอบเมื่อเปียก เป็นกรัม

10.4.4.2 การรายงานผล

ให้รายงานค่าอัตราการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบทุกก้อน

มอก.2601-2556

ภาคผนวก ก.

การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

(ข้อ 9.)

- ก.1 รุ่น ในที่นี้หมายถึง คอนกรีตบล็อกมวลเบาชนิดเดียวกัน ส่วนผสมเดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขาย ในระยะเวลาเดียวกัน
- ก.2 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่ากันทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้
- ก.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบขนาดและลักษณะทั่วไป
- ก.2.1.1 ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 ก้อน
- ก.2.1.2 ตัวอย่างทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4 และข้อ 6.1 จึงจะถือว่าคอนกรีตบล็อกมวลเบารุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด
- ก.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร
- ก.2.2.1 ให้ชักตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทำคอนกรีตบล็อกมวลเบาจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 แท่ง
- ก.2.2.2 ชั้นทดสอบทุกชั้นต้องเป็นไปตามข้อ 6.2 จึงจะถือว่าคอนกรีตบล็อกมวลเบารุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด
- ก.2.3 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบความต้านแรงอัด
- ก.2.3.1 ให้ชักตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทำคอนกรีตบล็อกมวลเบาจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 แท่ง
- ก.2.3.2 ชั้นทดสอบทุกชั้นต้องเป็นไปตามข้อ 6.3 จึงจะถือว่าคอนกรีตบล็อกมวลเบารุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด
- ก.2.4 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ
- ก.2.4.1 ให้ชักตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทำคอนกรีตบล็อกมวลเบาจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 แท่ง
- ก.2.4.2 ชั้นทดสอบทุกชั้นต้องเป็นไปตามข้อ 6.4 จึงจะถือว่าคอนกรีตบล็อกมวลเบารุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด
- ก.3 เกณฑ์ตัดสิน
- ตัวอย่างคอนกรีตบล็อกมวลเบาต้องเป็นไปตามข้อ ก.2.1.2 ข้อ ก.2.2.2 ข้อ ก.2.3.2 และข้อ ก.2.4.2 ทุกข้อ จึงจะถือว่าคอนกรีตบล็อกมวลเบารุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

ภาคผนวก ข

อัตราส่วนผสมของบล็อคมวลเบาแบบเซลลูล่าจากถั่วชานอ้อยจีโอโพลิเมอร์
ผสมถั่วลยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้งาน

ตารางที่ ข-1 อัตราส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้งานของส่วนผสม 0.50LB1.0SB10M80BA20PC

อัตราส่วนผสมของบล็อคมวลเบาจีโอโพลิเมอร์แบบเซลลูโลสที่หน่วยน้ำหนักเปียกเท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัมต่อ 10 ก้อน)							
เถ้าขานอ้อย	ปูนซีเมนต์	ทรายละเอียด	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์	สารละลายโซเดียมซิลิเกต	สารเพิ่มฟอง	น้ำสำหรับผสมกับวัสดุประสาน	น้ำสำหรับผสมกับสารเพิ่มฟอง
52	17	83	22	22	0.30	16	13

หมายเหตุ: เป็นส่วนผสมที่แนะนำในการผลิตบล็อคมวลเบาจีโอโพลิเมอร์แบบเซลลูโลส

ตารางที่ ข-2 อัตราส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้งานของส่วนผสม 0.50LB1.0SB15M80BA20PC

อัตราส่วนผสมของบล็อคมวลเบาจีโอโพลิเมอร์แบบเซลลูโลสที่หน่วยน้ำหนักเปียกเท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัมต่อ 10 ก้อน)							
เถ้าขานอ้อย	ปูนซีเมนต์	ทรายละเอียด	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์	สารละลายโซเดียมซิลิเกต	สารเพิ่มฟอง	น้ำสำหรับผสมกับวัสดุประสาน	น้ำสำหรับผสมกับสารเพิ่มฟอง
52	17	82	23	23	0.31	16	13

ตารางที่ ข-3 อัตราส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้งานของส่วนผสม 0.50LB1.0SB15M70BA30PC

อัตราส่วนผสมของบล็อคมวลเบาจีโอโพลิเมอร์แบบเซลลูโลสที่หน่วยน้ำหนักเปียกเท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัมต่อ 10 ก้อน)							
เถ้าขานอ้อย	ปูนซีเมนต์	ทรายละเอียด	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์	สารละลายโซเดียมซิลิเกต	สารเพิ่มฟอง	น้ำสำหรับผสมกับวัสดุประสาน	น้ำสำหรับผสมกับสารเพิ่มฟอง
45	25	82	23	23	0.31	14	13

ตารางที่ ข-4 อัตราส่วนผสมของมวลเบาแบบเซลลูโลสจากเถ้าขานอ้อยจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้งานของส่วนผสม 0.50LB1.0SB15M60BA40PC

อัตราส่วนผสมของบล็อคมวลเบาจีโอโพลิเมอร์แบบเซลลูโลสที่หน่วยน้ำหนักเปียกเท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัมต่อ 10 ก้อน)							
เถ้าขานอ้อย	ปูนซีเมนต์	ทรายละเอียด	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์	สารละลายโซเดียมซิลิเกต	สารเพิ่มฟอง	น้ำสำหรับผสมกับวัสดุประสาน	น้ำสำหรับผสมกับสารเพิ่มฟอง
40	33	82	23	23	0.31	12	13

ภาคผนวก ค
แผ่นพับประชาสัมพันธ์

ที่มาของงานวิจัย

วัสดุผสมเบ้าแบบเซลล์สุญญากาศจากวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกต หรือ วัสดุโพลีเมอร์มวลเบาแบบเซลล์สุญญากาศ เป็นการพัฒนาวัสดุ เพื่อประสมวัสดุใหม่ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) และกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง ๆ คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้สามารถก่อตัว และแข็งตัวทำให้มีสมบัติในการรับแรงได้ ในประเทศไทย นิยมใช้แก้วลอย วัสดุพลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัด ลำปาง ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใช้เพื่อเร่งปฏิกิริยา ภายในระบบ ขณะที่แก้วชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้ง จากกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำแก้วชานอ้อย ปูนซีเมนต์ และแก้วลอยมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการผลิตเบ้าเซลล์มวลเบาแบบเซลล์สุญญากาศเพื่อผลิต เป็นเบ้าเซลล์มวลเบาแบบเซลล์สุญญากาศที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกแบบไม่รับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 โดยออกแบบหน่วยน้ำหนักเปียกเท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามมาตรฐาน ASTM C796

วัสดุ และเครื่องมือ

1. แก้วลอย
2. แก้วชานอ้อย
3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
4. ทรายแม่น้ำ
5. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
6. สารละลายโซเดียมซิลิเกต
7. สารละลายเพิ่มฟองอากาศ
8. เครื่องผลิตโฟมเหลว
9. ไม่ผสมคอนกรีต



วัสดุที่ใช้ในการผสม



ใบผสมคอนกรีต



เครื่องผลิตโฟมเหลวรูป



สารกระจายฟองอากาศ ยี่ห้อ Sika-poro-40



เครื่องอบแห้ง



ลักษณะข้อโพลีเอสเตอร์กึ่งอัตโนมัติ



การฉีดโฟมเหลวลงในถังโพลีเมอร์



ลักษณะข้อโพลีเอสเตอร์มวลเบาแบบเซลล์สุญญากาศ



บล็อกเบ้ามวลเบาแบบเซลล์สุญญากาศ
เข้าชานอ้อยซีไอโพลีเมอร์ผสมแก้วลอย
และปูนซีเมนต์



สอบถามรายละเอียดเพิ่มเติม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร ภูเงินคำ
สาขาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
744 ถ.สุรนารายณ์ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
มือถือ: 090-360-9332
E-mail : tanakorn.ph@pmu.ac.th

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของปลั๊กมวลเบาแบบเซลล์มวลเบาจากถ้ำขานน้อยยี่ห้อไฟลิเมอร์เสริมถ้ำกลอยหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับมาตรฐานต่างๆ

สัญลักษณ์	กำลังอัด	การดูดซึมน้ำ	ค่าหดตัวแห้ง	สเป.การนำความร้อน	การประเมินวัฏจักรชีวิต	กำลังอัดของบล็อกเมื่อหล่อเป็นผนัง	ราคา	แนวทางการใช้ประโยชน์	ข้อจำกัด/หมายเหตุ
0.50LB1.0SB15M80BA20PC	✓	×	เทียบเท่า	เทียบเท่า	✓	✓	เทียบเท่า	1. บล็อกมวลเบาแบบเซลล์ลูล่า 2. บล็อกทนไฟ	ส่วนเสริมเป็นส่วนเสริมที่เหมาะสมที่จะผลิตเป็นบล็อกมวลเบาแบบเซลล์ลูล่า ถึงแม้ว่าจะมีการดูดซึมน้ำมากกว่ามาตรฐาน มอก.2601-2556 แต่ถือว่ายังคงใกล้เคียงกัน
0.50LB1.0SB15M80BA20PC	✓	✓	✓	เทียบเท่า	✓	✓	×	บล็อกทนไฟ	คุณสมบัติใกล้เคียงกันวิธีที่ผ่านมา แต่ราคาต้นทุนสูงกว่าบล็อกปกติจึงเหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นบล็อกทนไฟ
0.50LB1.0SB15M70BA30PC	✓	เทียบเท่า	✓	เทียบเท่า	✓	✓	×	บล็อกทนไฟ	คุณสมบัติใกล้เคียงกันวิธีที่ผ่านมา แต่ราคาต้นทุนสูงกว่าบล็อกปกติจึงเหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นบล็อกทนไฟ
0.50LB1.0SB15M60BA40PC	✓	×	✓	เทียบเท่า	✓	✓	×	บล็อกทนไฟ	คุณสมบัติใกล้เคียงกันวิธีที่ผ่านมาและค่าดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับ มอก.2601-2556 แต่ราคาต้นทุนสูงกว่าบล็อกปกติ จึงเหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นบล็อกทนไฟ

