อภินันทนาการ

เลขที่สัญญา R2558C060
สำนักหอสมุด

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าชานอ้อยที่เติมสารเติมแต่ง

คณะผู้วิจัย สังกัด
ดร.ทนงศักดิ์ โนไชยา สังกัดภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
นางสาวปาณิสรา ดีเสือ สังกัดภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน 18 ส.ค. 2558
เลขทะเบียน 1701553
เลขเรียกหนังสือ ว TP
693
ท๓๓๕
๒๕๕๘

สนับสนุนโดยกองทุนมหาวิทยาลัยนเรศวร

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้โดยได้รับเงินสนับสนุนจาก กองทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณรายได้ของมหาวิทยาลัยนเรศวรปีงบประมาณ 2558 เป็นอย่างยิ่ง โครงการวิจัยนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้หากผู้วิจัยไม่ได้รับการสนับสนุนจากทุนดังกล่าว นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือการวิเคราะห์ผลในการวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านการทดสอบกำลังอัด และสุดท้ายทางผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

ทนงศักดิ์ โนไชยา

กันยายน 2558

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย โดยนำเถ้าชานอ้อยมาบดด้วยเม็ดบอลเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เถ้าชานอ้อยถูกนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก ส่วนสารเติมแต่งในงานวิจัยนี้จะใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (s/b) เท่ากับ 0.5 และ 2.5 ตามลำดับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าชานอ้อย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และน้ำ จะถูกนำมาผสมรวมกันเพื่อทำเป็นชิ้นงานมอร์ตาร์ หลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกแช่ในน้ำที่เป็นด่างเข้มข้นที่ระยะเวลา 7, 28 และ 90 วัน โดยชิ้นงานมอร์ตาร์จะถูกนำไปศึกษากำลังอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความพรุน นอกจากนี้ยังมีการเตรียมชิ้นงานเป็นแบบเพสต์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 สำหรับนำไปใช้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการทดลองพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ในทุกส่วนผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้กำลังอัดของของมอร์ตาร์เถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมทุกระยะเวลาในการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของสารเติมแต่ง (สูตร 20SC5CH and 20SC10CH) จะมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 7 วัน ส่วนผลของความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุปอซโซลานมีค่าไม่ต่างจากมอร์ตาร์ควบคุม เช่นเดียวกับค่าการดูดซึมน้ำก็มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมเช่นกัน ยิ่งไปกว่านั้นค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์จะมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่าความพรุนของมอร์ตาร์ สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานเพสต์สามารถยืนยันการเกิดปฏิกิริยาของเถ้าชานอ้อยได้ซึ่งดูได้จากการเกิดการเชื่อมกันขึ้นที่ผิวของวัสดุปอซโซลาน

Abstract

This research studied effects of calcium hydroxide on physical and mechanical properties of Portland cement mortars containing sugarcane bagasse ash (SCBA). SCBA was firstly ground by ball mill for 12 hours for used as a substitute for Portland cement of 0-30 percent by weight. In this research, calcium hydroxide (CH) was used as an additive material at up to 10 wt%. Water to binder ratio (w/b) and sand to binder ratio (s/c) were 0.5 and 2.5, respectively. Portland cement, SCBA, CH, sand and water were mixed together to produce mortars and then cured in saturated lime water at 7, 28 and 90 days. The compressive strength, density, water absorption and porosity of the mortars were studied. Paste samples were also prepared with the water to binder ratio (w/b) of 0.5 for microstructure analysis using scanning electron microscope (SEM).

The results showed that compressive strength of all mixes was increased with increasing curing time. The compressive strength of the mortar mixes with 20 wt% SCBA were found to be similar to that of the PC control mix. Furthermore, the compressive strength of the mixes with additive (20SC5CH and 20SC10CH) was found to be higher than that of the control mix, especially, after curing in water at 7 days. For density results, the mortar mixes with pozzolans were found to similar to that of the PC control mix as well as the water absorption of Portland cement blended SCBA was found to be similar to the PC control. Moreover, the water absorption and porosity of all mortars were directly correlated. Microstructure of paste sample was also confirmed the reaction of pozzolans, which occurred on the pozzolan surfaces.

Executive Summary

ในประเทศไทยมีเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมากและหลากหลายชนิด แต่มีเถ้าจำนวนน้อยและมีเถ้าเพียงไม่กี่ชนิดที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตได้ เถ้าที่สามารถนาไปใช้ในงานคอนกรีตได้มักต้องมีลักษณะดังนี้ คือ "เป็นเถ้าที่มีออกไซด์ของซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาสูงซึ่งโดยทั่วไปควรมากกว่าร้อยละ 50 ของทั้งหมด มีความละเอียดสูงหรือสามารถทำให้มีความละเอียดสูงได้ และไม่เป็นผลึกคือสามารถทำปฏิกิริยากับด่าง (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) ได้" ซึ่งในแถบจังหวัดพิษณุโลกจะมีโรงงานน้ำตาลเป็นจำนวนมาก ซึ่งผลพลอยได้จากโรงงานน้ำตาลก็คือ เถ้าชานอ้อย (Sugar cane bagasse ash) ซึ่งก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำมาใช้เพราะเล็งเห็นปัญหาของขยะจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาบ โดยจะหาแนวทางการใช้งานเถ้าชานอ้อยให้หลากหลายแนวทางขึ้น โดยปกติแล้วในภาคการเกษตรได้นำเถ้าชานอ้อยไปทำปุ๋ยเพื่อปรับสภาพดินที่เป็นกรด แต่ที่เหลือส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งซึ่งต้องใช้พื้นที่และค่าใช้จ่ายในการจัดการเป็นจำนวนมาก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาเถ้าชานอ้อยมาศึกษาผลของการใช้งานสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยทำการเติมสารเติมแต่งเพื่อเร่งปฏิกิริยา เริ่มจากบดเถ้าชานอ้อยเพื่อให้มีคุณสมบัติการทำปฏิกิริยาที่ดีโดยบดให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง แล้วจึงนำไปผสมทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนโดยรวมร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก แล้วใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0-10 โดยน้ำหนัก เป็นสารเติมแต่ง และทำการเตรียมชิ้นงานเป็นมอร์ตาร์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (s/b) เท่ากับ 0.5 และ 2.5 ตามลำดับ ซึ่งโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากำลังอัด (compressive strength) และศึกษาสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์จากค่าความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความพรุน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 นอกจากนี้ยังทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอีกด้วย

ผลการทดลองพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ในทุกส่วนผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ 90 วัน มีกำลังอัดสูงที่สุด กำลังอัดของของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมทุกระยะเวลาในการบ่ม ในการศึกษาเพิ่มเติมผลของสารเติมแต่งต่อค่ากำลังอัดพบว่าการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้าไปจะช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดของของมอร์ตาร์ในช่วงต้น (7 วัน) ส่วนผลของความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมีค่าไม่ต่างจากมอร์ตาร์ควบคุมมากนัก ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมอร์ตาร์ดังกล่าวมีค่าแนวโน้มที่ลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 90 วัน มีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของมอร์ตาร์พบว่าบริเวณผิวของเถ้าชานอ้อยมีการทำปฏิกิริยาได้ดีไอมีการเติมสารเติมแต่ง

อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จในระดับหนึ่งซึ่งต้องการที่จะใช้สารเติมแต่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอของเถ้าชานอ้อย และยังเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุสาหกรรมมาใช้

ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าการใช้งานเถ้าชานอ้อยร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลได้ นอกจากนี้ยังไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์เปลี่ยนไปจากเดิมมากนัก นอกจากนี้การนำเอาเถ้าชานอ้อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเป็นการช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อีกด้วย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	3
บทคัดย่อภาษาไทย	4
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	5
Executive Summary	6
สารบัญ	8
บทที่ 1 บทนำ	9
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	19
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	28
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	42
เอกสารอ้างอิง	43
ผลลัพท์จากโครงการวิจัย	44
ภาคผนวก	45

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เถ้าชานอ้อยเกิดจากกระบวนการผลิตน้ำตาลในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งได้จากการเผาชานอ้อยเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าเอาไว้ใช้ในโรงงานน้ำตาล โดยทำการเผาชานอ้อยที่อุณหภูมิสูงจะได้เถ้าชานอ้อยซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งสีเทาดำ คละขนาด (ไมโครเมตรจนถึงหลายมิลลิเมตร) มีลักษณะเปียกชื้นเพื่อลดการฟุ้งกระจายในโรงงานและในกระบวนการกำจัดทิ้ง ซึ่งถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการผลิตน้ำตาลดังกล่าว จากข้อมูลในปี 2551 ประเทศไทยใช้อ้อยในการผลิตน้ำตาล 75 ล้านตัน และได้เถ้าชานอ้อยออกมาประมาณ 4.5 แสนตัน คิดเป็นร้อยละ 0.60 ของน้ำหนักอ้อย [1] ซึ่งเถ้าชานอ้อยมีการนำมาใช้งานเพียงบางส่วนในภาคเกษตรกรรมโดยการนำเถ้าชานอ้อยไปทำปุ๋ยเพื่อปรับสภาพดินที่เป็นกรด แต่ที่เหลือส่วนใหญ่จะถูกนำไปกำจัดทิ้งโดยวิธีการฝังกลบ ซึ่งในกระบวนการนี้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายและพื้นที่ในการกำจัด อีกทั้งยังเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็กรอบ ๆ บริเวณดังกล่าว ถือได้ว่าเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

การใช้เถ้าชานอ้อยที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำตาลในอุตสาหกรรมคอนกรีตนั้นยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก ซึ่งในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาเริ่มมีการศึกษาวิจัยการนำเถ้าชานอ้อยมาใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ โดยนำเอาเถ้าชานอ้อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากลักษณะทางเคมีของเถ้าชานอ้อยพบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันแล้วมากกว่าร้อยละ 70 [1-4] ซึ่งถือว่าเถ้าชานอ้อยมีคุณสมบัติอยู่ในกลุ่มวัสดุปอซโซลานซึ่งมีคุณสมบัติในการช่วยยืดประสานเมื่อนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์เช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลานอื่น อาทิเช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ ตะกรันเหล็ก ฯลฯ [5] นอกจากนี้มีการรายงานว่าเถ้าชานอ้อยที่มีความละเอียดสูงจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีตได้ [6-10] และการทำปฏิกิริยาของเถ้าชานอ้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก และสิ่งเจือปน [6, 9] โดยอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดเพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และยังพบอีกว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถช่วยลดค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและลดการขยายตัวของมอร์ต้าร์เนื่องจากซัลเฟตได้อีกด้วย [1, 11] จากคุณสมบัติดังกล่าวของเถ้าชานอ้อย จะเห็นได้ว่ามีนักวิจัยจากหลายแห่งในประเทศไทยเริ่มมีการศึกษาเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยตรงเพื่อเป็นการลดของเหลือใช้จากโรงงาน และเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยยังมีความคงทนเท่าเทียมกัน หรือดีกว่าคอนกรีตที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน [12] แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยไม่สามารถพัฒนาไปจนใช้ได้อย่างมีคุณภาพและเป็นกิจลักษณะอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานแต่ละแห่งนั้นมีความผันแปร

ค่อนข้างมาก และยังต้องมีการนำเอาเถ้าชานอ้อยมาปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการบดก่อน จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายของนักวิจัยภายในประเทศเป็นอย่างมากที่จะนำเอาวัสดุเหลือใช้จากโรงงานน้ำตาลมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต เช่นเดียวกับเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยปกติแล้วคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยจะแข็งแรงกว่าคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในระยะยาว (มากกว่า 28 วัน) ซึ่งการทำปฏิกิริยาของเถ้าชานอ้อยจะเกิดได้ช้ากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในช่วงก่อน 28 วัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 7 วันแรก ซึ่งทำให้เป็นอุปสรรคที่สำคัญอย่างหนึ่งต่อการใช้งานในทางปฏิบัติที่ต้องการความแข็งแรงในช่วงแรกเพื่อที่จะสามารถถอดแบบออกได้ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้สารเติมปฏิกิริยาของเถ้าชานอ้อยในปูนซีเมนต์ เช่น การใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หรือการใช้สารอื่น เช่น ซิลิกาฟูม หรือสารขนาดนาโน เพื่อเพิ่มกำลังอัด (ความแข็งแรง) ให้ดียิ่งขึ้น [13-15] ที่ผ่านมาการศึกษาดังกล่าวยังไม่ได้มีการวิจัยมากนักแต่มีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยให้ดีขึ้นได้ และสามารถนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรมคอนกรีตแบบยั่งยืนได้

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะทำการพัฒนาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยโดยการเติมสารเติมแต่งดังกล่าวมาผสม เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าชานอ้อยเพื่อใช้ในงานคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การนำเอาเถ้าชานอ้อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเป็นการช่วยลดพลังงานโดยตรงจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และยังช่วยลดปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเผา ซึ่งส่งผลให้ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะการเกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) และยังสามารถนำมาใช้งานได้จริงในภาคอุตสาหกรรมอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อกำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าชานอ้อย

1.2.2 เพื่อศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิกของปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและสารเติมแต่ง

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติความทนทานต่อซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและสารเติมแต่ง

1.2.4 สามารถนำวัสดุเหลือใช้จากโรงงานน้ำตาลมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตแบบยั่งยืนได้

1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1. ค้นคว้าวรรณกรรม
2. เก็บตัวอย่างเถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก
3. ทำการบดเถ้าชานอ้อยให้มีขนาดที่เหมาะสม
4. วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ ด้วยเทคนิค XRD, SEM และ TGA โดยส่งชิ้นงานไปทดสอบที่ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
5. ศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกล ทางกายภาพ และการต้านทานซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย โดยทดสอบชิ้นงานที่ศูนย์เครื่องมือคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

6. ศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยโดยทดสอบที่ตึกฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
7. นำข้อมูลจากการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูล
8. เขียนรายงาน สรุปผล

1.4 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

กิจกรรม	เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ												
2. เก็บตัวอย่างจากโรงงาน												
3. วิเคราะห์วัตถุดิบ												
4. เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบ												
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง												
6. นำเสนอผลงานวิจัย												
7. เขียนรายงาน สรุปโครงการ												

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล โดยได้จากการนำชานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าป้อนภายในโรงงาน ชานอ้อยถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ดีเพราะสร้างปัญหาต่อสภาพแวดล้อมน้อยเนื่องจากมีปริมาณกำมะถันต่ำจึงไม่ก่อให้เกิดฝนกรดในสิ่งแวดล้อม [16] ภายหลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลจะมีชานอ้อยเหลือประมาณร้อยละ 26 ของน้ำหนักอ้อยหรือมีชานอ้อยประมาณ 19 ล้านตัน และภายหลังจากการเผาชานอ้อยเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจะเหลือเป็นเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0.60 ของน้ำหนักอ้อย [17] หรือประมาณ 4.5 แสนตันต่อปี ซึ่งเถ้าชานอ้อยที่เหลือ เกษตรกรได้มีการนำเอาไปทำปุ๋ย หรือนำไปใช้ปรับสภาพดินเปรี้ยว แต่ก็ยังมีเถ้าที่เหลืออีกมากที่ต้องกำจัด ในส่วนนี้ต้องเสียค่าใช้จ่าย และพื้นที่อย่างมากในการจัดการ อีกทั้งถ้าระบบจัดการไม่ดีก็จะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบอีกด้วย ในหลายงานวิจัยได้มีการศึกษาการนำเถ้าชานอ้อยมาผสมรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อนำมาใช้เป็นคอนกรีตแบบยั่งยืน ซึ่งคอนกรีตประเภทนี้ถือว่าเป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดพลังงาน

วัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีต ถือเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้สำหรับงานโครงสร้างกัน ทั้งนี้เนื่องจากราคาถูก ใช้งานง่าย อีกทั้งยังมีความคงทนสูงอีกด้วย ซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติ เช่น หินปูน ดินขาว และศิลาแลง มาเผารวมกันในเตาหลอมแบบหมุน (Rotary kiln) ที่อุณหภูมิประมาณ 1,450-1,500 °C จะเห็นว่าในกระบวนการผลิตเพื่อที่จะให้ได้ปูนซีเมนต์มานั้น จำเป็นจะต้องใช้พลังงานจำนวนมาก อีกทั้งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ยังมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมาอีกด้วย ดังนั้นจึงมีหลากหลายงานวิจัยที่มีแนวคิดที่จะพัฒนาคอนกรีตแบบยั่งยืนขึ้น โดยการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง โดยนำวัสดุปอซโซลานมาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งคำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 [5] กล่าวว่าเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ [16, 18] แล้วมีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยยึดประสานในคอนกรีต โดยมากแล้ววัสดุปอซโซลานก็จะเป็นเถ้าที่เกิดจากการเผาวัสดุทางการเกษตรและถ่านหินในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งวัสดุปอซโซลานจากภาคอุตสาหกรรมได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าหนัก (Bottom ash) ตะกรันเหล็ก (Blast furnace slag) ผงฝุ่นซิลิกา (Silica fume) และวัสดุปอซโซลานจากภาคการเกษตรได้แก่ เถ้าแกลบ (Rice husk ash) และเถ้าชานอ้อย (Sugar cane bagasse ash) ซึ่งเถ้าในส่วนแรกมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งเถ้าลอย ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในการนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตแบบยั่งยืน ส่วนเถ้าที่เกิดจากภาคการเกษตรซึ่งมีมากในหลายพื้นที่ของประเทศไทย ยังไม่มีการนำเอาไปใช้กันอย่างจริงจัง อันเนื่องมาจากการศึกษาวิจัยยังมีไม่มากนัก อีกทั้งวัสดุปอซโซลานดังกล่าวต้องมีปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งเถ้าชานอ้อยก็เป็นหนึ่งในเป้าหมายของผู้วิจัยที่ต้องการจะพัฒนาเพื่อนำมาใช้งานในภาคอุตสาหกรรมคอนกรีตแบบยั่งยืน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาปูนซีเมนต์ผสมเถ้าชานอ้อยเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างแบบยั่งยืน โดยการเติมสารเติมแต่ง (ซิลิกาฟูม) แล้วทำการศึกษาผลสารเติมแต่งต่อสมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย เช่น การก่อตัว (Setting time) กำลังอัด (Compressive strength) การทำปฏิกิริยา และความทนทานต่อซัลเฟตของมอร์ตาร์

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

วัตถุชนิดนี้พบครั้งแรกที่เมืองปอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ ปูนซีเมนต์แลนด์ประกอบด้วยหินปูน (Limestone) และดินเหนียว (clay) เป็นส่วนใหญ่นอกจากนี้ก็มีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และโคโลไมต์ ($MgCO_3$) เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในบ้านเราที่ใช้กันทั่วไป (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง, ตราพยานาคเขียว, TPI (แดง) ฯลฯ ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (greenish gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 ปอนด์/ฟุต^3 เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และ เหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมี และรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ดในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	$3CaO.\ SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	$2CaO.\ SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต	$3CaO.\ Al_2O_3$	C_3A
เตตตราแคลเซียม อะลูมิโน เฟอไรต์	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

C_3S ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้เร็วภายใน 14 วัน C_2S ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้ช้า ความร้อนเกิดขึ้นบ่อย C_3A ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาเริ่มแข็งตัวเกิดความร้อนสูง มีกำลังรับแรงเร็ว C_4AF มีผลให้ความแข็งแรงเล็กน้อยเติมเข้าไปเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น

2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของคอนกรีตคือปฏิกิริยาที่สารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C_3S และC_2S) ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้ซีเมนต์เพสท์ เกิดเป็นวุ้น (Gel) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งวุ้น (Gel) เป็นตัวประสาน มีความเหนียวคล้ายกาว ก่อตัว แข็งตัว และ ยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสมปูนซีเมนต์ธรรมดาให้ความร้อนประมาณ 85 - 100 คาลอรีต่อกรัม ตามระยะเวลาภายหลังการผสม ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้บางส่วนจะหนีผ่านเนื้อคอนกรีต

ออกมา แต่บางส่วนจะอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูง คอนกรีตอาจเสียความแข็งแรงได้ และ ความร้อนนี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงต่าง ๆ ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าว ในโครงสร้างคอนกรีตที่บาง ความร้อนสามารถถ่ายเทออกไปได้ แต่ในโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่และ หนา เช่นเขื่อน จะต้องมีการออกแบบให้มีการถ่ายเทความร้อนให้เหมาะสมเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต วิธีหนึ่งอาจทำได้โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทสี่ ที่ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำ (60 - 70 คาลารีต่อ กรัม) การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะหยุดเมื่อน้ำระเหยหนีออกจากเพสท์หมดแล้ว ดังนั้นการบ่มซึ่งเป็นวิธีการป้องกันการสูญเสียน้ำในคอนกรีตจึงนับว่าเป็นสิ่งสำคัญ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ชนิดของปูนซีเมนต์ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ และ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่า 0.55 โดยน้ำหนัก จะขึ้นอยู่กับการให้น้ำจากภายนอกด้วย ถ้าบ่มคอนกรีตที่ใช้กันตามธรรมดาเป็นเวลา 1 เดือน โดยให้อยู่ในสภาวะมาตรฐานของห้องทดลอง จะพบว่าปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำกว่าร้อยละ 80 อย่างไรก็ดีตามสภาพในสนาม คอนกรีตจะแห้งภายในเวลาไม่กี่วัน หลังจากนั้นปูนซีเมนต์ยังคงทำปฏิกิริยากับน้ำต่อไปได้โดยอาศัยน้ำที่ซึมจากใต้ดินหรือจากความชื้นในขณะฝนตก หรือ ในขณะที่ความชื้นในอากาศสูง ดังนั้นภายใต้ภาวะแวดล้อมธรรมดาการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำจะยังคงมีต่อไปอีกหลายปี

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น ระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) สารประกอบ C_3S และ C_2S ที่อยู่ในผงปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้สารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ($3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O$ หรือ C-S-H) ดังสมการ (2.1) และ (2.2)

<u>ปฏิกิริยาไฮเดรชัน</u>

$$2[3CaO{\cdot}SiO_2] + 6H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 3Ca[OH]_2 \qquad (2.1)$$

$$2[2CaO{\cdot}SiO_2] + 4H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + Ca[OH]_2 \qquad (2.2)$$

2.4 วัสดุปอซโซลาน

ในปัจจุบันมีการนำวัสดุประเภทปอซโซลานมาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมซีเมนต์และอุตสาหกรรมก่อ สร้างกันอย่างแพร่หลายโดยวัสดุประเภทปอซโซลานนี้ถือว่าเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious Material) ชนิดหนึ่ง คำว่าวัสดุเชื่อมประสานนี้หมายถึงวัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานองค์ประกอบต่างๆหรือวัสดุอื่นเข้าด้วยกันซึ่งในอดีตวัสดุเชื่อมประสานในงานก่อสร้างมีเพียงอย่างเดียวคือ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมาตรฐาน ASTM C618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติทำให้ได้สารประ กอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน วัสดุจำพวกนี้ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม เป็นต้น ซึ่งเป็นของเหลือใช้ (Waste) จากโรงงานอุตสาหกรรม

2.5 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เกิดจากปฏิกิริยาที่สารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้ซีเมนต์เพสท์เกิดเป็นวุ้น (Gel) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ซีเมนต์เพสท์มีคุณสมบัติเป็นด่าง (ช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม) แคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปอีกกับวัสดุที่มีธาตุซิลิกาและอลูมิน่าผสมอยู่ เช่น วัสดุปอซโซลาน เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic)

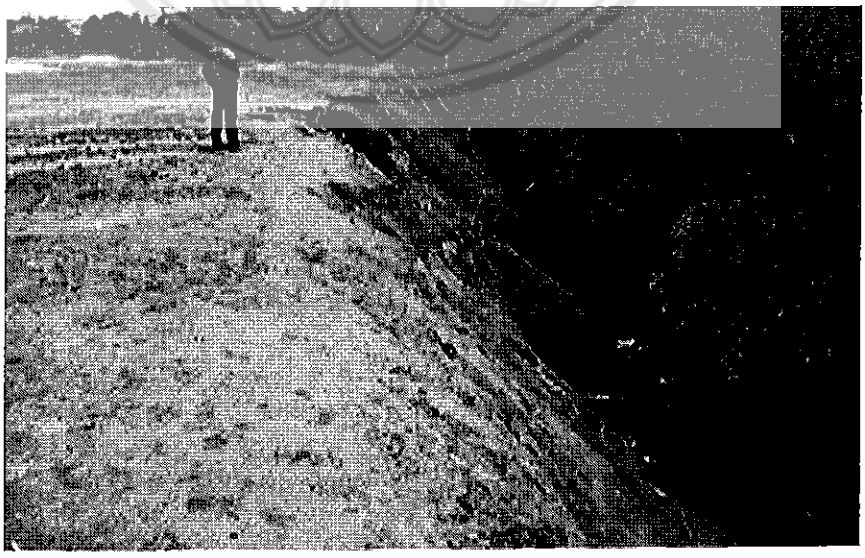
$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \longrightarrow xCaO \cdot ySiO_2 \cdot zH_2O \qquad (2.3)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow xCaO \cdot yAl_2O_3 \cdot zH_2O \qquad (2.4)$$

สำหรับการใช้งานเถ้าลอยซึ่งถือเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานจะเป็นไปตามสมการ (2.3) และ (2.4) สำหรับค่า x, y เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับซิลิกาและอลูมินา

2.7 เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash)

เถ้าชานอ้อย เป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งใช้ชานอ้อย และใบอ้อย เผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะนำไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมภายในโรงงาน และส่วนที่เหลือสามารถขายให้แก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในปี พ.ศ.2545 พบว่าประเทศไทยมีผลผลิตอ้อยทั้งหมดประมาณ 74 ล้านตัน และหลังจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วพบว่าได้เถ้าชานอ้อยประมาณ 0.8 ล้านตัน เถ้าชานอ้อยที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีการนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เช่น เกษตรกรนำไปใช้เป็นปุ๋ย เพื่อปรับสภาพดินในงานเกษตรกรรมแต่ส่วนใหญ่ของเถ้าชานอ้อยต้องนำไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์ (รูป 2.2)



รูป 2.2 เถ้าชานอ้อยที่ถูกนำมาทิ้งบริเวณหลุมฝังกลบ [8]

เถ้าชานอ้อยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูพรุนสูง โดยมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอนขึ้นไปเมื่อบดเถ้าชานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นลักษณะอนุภาคคล้ายกันกับเถ้าแกลบหรือเถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากผ่านการบดทั่วไป สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยพบว่าเถ้าชานอ้อยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนเถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด อยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 มีปริมาณ SO_3 ต่ำ แต่มีปริมาณของ LOI ค่อนข้างสูงซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 20-30 การที่ LOI ของเถ้าชานอ้อยมีค่าค่อนข้างสูงมักเกิดขึ้นเช่นเดียวกับเถ้าชีวมวลทั่วไป การแทนที่เถ้าชานอ้อยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพลสต์ผสมเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ คอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่มวลรวมละเอียดมีความสามารถในการงานได้ (workability) และการเยิ้มน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยมีความสามารถต้านทานการสึกกร่อน การซึมผ่านน้ำ การต้านการคลอไรด์และการเกิดคาร์บอเนชั่นเหมือนกันกับคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้ความพรุนของเถ้าชานอ้อยยังทำให้คอนกรีตต้านทานการแข็งตัวและละลายของน้ำ (freezing and thawing) สลับกัน ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

2.8 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนางานวิจัยทางด้านคอนกรีตแบบยั่งยืนเริ่มต้นโดยการใช้เถ้าลอยในการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดย Sidney [12] ได้กล่าวในเรื่องของการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่มีการทดแทนด้วยเถ้าลอยชนิด C และ F เข้าไปเพื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนพบว่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกจะยังน้อยกว่าปูนซีเมนต์ซึ่งการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยชนิด C จะพัฒนากำลังอัดได้ทัดเทียมปูนซีเมนต์ในระยะเวลาที่น้อยกว่า 28 วัน ส่วนเถ้าลอยชนิด F ต้องใช้เวลามากกว่า 28 วัน ถึงจะมีการพัฒนากำลังอัดได้ทัดเทียมกับปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้ Sidney ยังได้แนะนำให้ทำการลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลงโดยใส่สารลดน้ำจะช่วยเพิ่มกำลังอัดได้ นอกจากนี้มีการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตบด โดยที่ใช้ปริมาณสารเชื่อมประสาน 180 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และใช้เถ้าลอยลิกไนต์ จากการไฟฟ้าแม่เมาะเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ [19] พบว่าเมื่อทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นและค่ากำลังอัดลดลง นอกจากนี้ บรรจง และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาความสามารถเทได้ และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ณ ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าเมื่อนำเถ้าลอยลิกไนต์มาผสมลงในคอนกรีตในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถเทได้ของคอนกรีตสูงขึ้น ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ได้จะลดลงทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยเกิดขึ้นได้ช้ากว่าปูนซีเมนต์

นอกจากนี้งานวิจัยที่มีการนำเอาเถ้าชานอ้อยไปใช้ในงานโครงสร้างมีดังนี้ Cordeiro และ คณะ [3] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาชานอ้อยในช่วง 400-800 องศาเซลเซียส ว่ามีผลต่อสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าชานอ้อยหรือไม่ พบว่าอุณหภูมิของการเผาเถ้าชานอ้อยที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุด เพราะทั้งค่าสูญเสียน้ำเนื่องจากการเผา (Loss of ignition; LOI) มีค่าที่ต่ำ และค่าดัชนีการทำปฏิกิริยาปอซโซลานก็บ่งชี้ว่ามีค่าสูงที่สุดด้วย ต่อมา Morales [4] ได้ศึกษาในลักษณะ

เดียวกันแต่แตกต่างกันที่ช่วงอุณหภูมิของการเผา พบว่าที่อุณหภูมิในการเผาที่สูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ความเป็นอสัณฐานของเถ้าชานอ้อยจะมีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้การทำปฏิกิริยาของเถ้าชานอ้อยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ลดลง นอกจากอุณหภูมิของการเผาจะมีผลต่อการทำปฏิกิริยาของเถ้าชานอ้อยแล้ว ยังมีการรายงานว่าความละเอียดของวัสดุปอซโซลานมีผลต่อการทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน [7-8, 18]

Singh และ Chusilp [7, 9] ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในการผลิตคอนกรีต พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 10-20 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียด และยังพบอีกว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถช่วยลดค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและลดการขยายตัวของมอร์ต้าร์เนื่องจากซัลเฟตได้อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกนอกจากจะช่วยเพิ่มเฟสที่ช่วยในการยึดประสานจึงทำให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้นอีกด้วย

รัฐพล และคณะ [2] ได้พัฒนาคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยโดยนำเอาเถ้าชานอ้อยไปบดให้ละเอียดแล้วนำไปใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่ามาเป็นมวลรวมหยาบ พบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดของการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าเพื่อให้ได้ทั้งกำลังอัดในช่วงอายุปลาย ความทึบน้ำ และความต้านทานการ แทรกซึมของคลอไรด์ที่สูง คือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุมประมาณ 2 ถึง 3 เท่า นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตเก่าให้สูงขึ้นได้อย่างชัดเจน

Akram [10] ได้นำเอาเถ้าชานอ้อยมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อผลิต Self-compacting concrete (SCC) ต้นทุนต่ำ โดยศึกษาผลของเถ้าชานอ้อยต่อการไหลของคอนกรีต (slump) และกำลังอัด ผลการวิจัยพบว่าการคอนกรีตชนิด SCC ที่ผสมขี้เถ้าชานอ้อยที่ 28 วันมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุม การวิเคราะห์ต้นทุนพบว่าต้นทุนของวัตถุดิบของคอนกรีต SCC ตัวที่ผสมเถ้าชานอ้อยคิดเป็น 35.63% ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมโดยคิดตัวที่มีแรงอัดเท่ากันที่ 34 MPa นอกจากนี้ Sales [20] ได้นำเอาเถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลมาผสมปูนซีเมนต์เพื่อผลิตเป็นคอนกรีตโดยนำเอาเถ้าชานอ้อยมาแทนทราย ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่าเถ้าชานอ้อยมีสมบัติทางกายภาพเหมือนกับทรายทั่วไป ซึ่งการนำเอาเถ้าชานอ้อยมาทดแทนทรายสามารถทำให้สมบัติเชิงกลของคอนกรีตมีเพิ่มขึ้น กล่าวโดยสรุปคือเถ้าชานอ้อยสามารถนำมาใช้แทนทรายในงานโครงสร้างได้จริง

Corderio และคณะ [11] ได้นำวัสดุปอซโซลานสองชนิด ได้แก่เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต พบว่าการใช้เถ้าชานอ้อยและเถ้าแกบในคอนกรีตสามารถปรับปรุงคุณสมบัติการไหล (slump) ของคอนกรีตสดได้ เมื่อทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อย

ละและเถ้าแกลบรวมกันร้อยละ 40 สามารถเพิ่มค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้ 1.2 เท่า อีกทั้งในการใช้เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยยังเป็นการช่วยลดความร้อนเนื่องจากการทำปฏิกิริยา และยังลดปริมาณรูพรุนของคอนกรีตอีก นอกจากนี้ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล [16] ได้เสนอแนะเกี่ยวกับการใช้งานเถ้าชานอ้อยในงานคอนกรีตว่า ควรใช้เถ้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ 15 มีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วันไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ความละเอียดของเถ้าชานอ้อยควรค้างตะแกรงขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตรไม่เกินร้อยละ 5 รวมทั้งเถ้าชานอ้อยต้องไม่มีน้ำตาลหรือน้ำอ้อยปะปนอยู่ เพราะน้ำตาลหรือน้ำอ้อยเป็นสารหน่วงการก่อตัวที่รุนแรงด้วย

Rafael และคณะ [21] ได้นำเถ้าชานอ้อยมาผสมกับปูนขาวเพื่อผลิตอิฐบล็อกดินอัด แล้วทำการทดสอบกำลังอัดและสมบัติการรับแรงดัดงอ ซึ่งถือเป็นสมบัติทางกลของบล็อกดินอัด ผลการศึกษาพบว่าบล็อกที่ผลิตจาก 10% ของปูนขาวผสมกับ 10% ของเถ้าชานอ้อยมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่าอิฐที่ผลิตจากปูนขาวเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามปูนขาวก็ยังสามารถใช้ในการปรับปรุงความแข็งแรงของบล็อก กล่าวโดยสรุปว่าการใช้เถ้าชานอ้อยร่วมกับปูนขาวแทนปูนซีเมนต์จะช่วยในการคงเสถียรภาพของบล็อกดินอัดเมื่อพิจารณาประเด็นของการใช้พลังงานและมลพิษ

จากการศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ผสมวัสดุปอซโซลานได้มีหลายงานวิจัยที่ได้รายงานไว้ดังนี้ ในปี 2008, Yazici [13] พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีการผสมซิลิกาฟูมร่วมกับเถ้าลอยและซิลิกาฟูมร่วมกับตะกรันเหล็กมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน ในปี 2010 Chaipanich [14] ได้พบว่าการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยในปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นได้ช้ามากในช่วงต้น จึงได้เติมซิลิกาฟูมเข้าไปเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าซิลิกาฟูมสามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยได้จริงโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระยะเวลาก่อน 28 วัน นอกจากนี้ยังช่วยเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยให้เร็วขึ้นอีกด้วย ส่วน Wongkeo และคณะ [21] พบว่าการเติมซิลิกาฟูมเข้าไปในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมทั้งเถ้าหนักและเถ้าลอย จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล และลดการหดตัวของมอร์ตาร์ โดยเพิ่มความทนทานของมอร์ตาร์ให้เพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้การเติมซิลิกาฟูมจะช่วยปรับปรุงกำลังอัด และการก่อตัวระยะเริ่มต้นให้แก่ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแล้ว ซิลิกาฟูมยังทำให้โครงสร้างในเนื้อของซีเมนต์มอร์ตาร์มีความแน่นตัวสูง ลดปริมาณรูพรุนของมอร์ตาร์ [22]

ในปัจจุบันงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้งานเถ้าชานอ้อยในงานคอนกรีตให้มีประสิทธภาพก็ยังมีไม่มากนักเมื่อเทียบกับวัสดุปอซโซลานอื่น ๆ เช่น เถ้าลอยจนถึงในระดับที่มีมาตรฐานในการควบคุมสำหรับการนำไปใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาการใช้เถ้าชานอ้อยเพื่อให้สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตแบบยั่งยืน โดยจะทำการศึกษาผลกระทบของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ ความทนทาน และการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

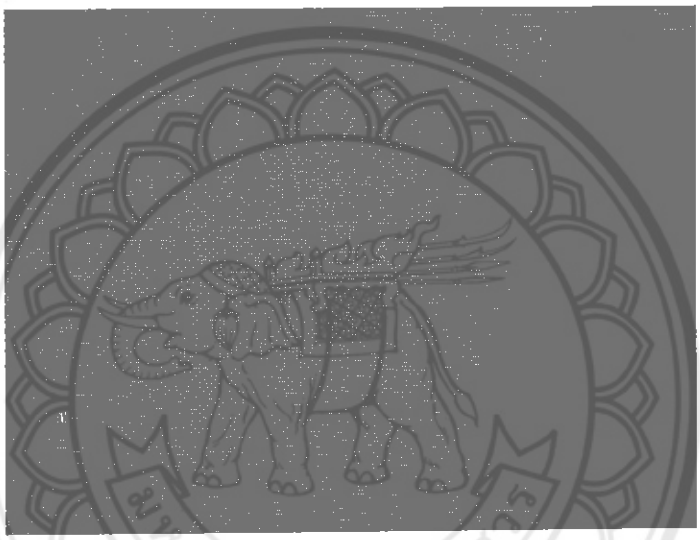
3.1.1 เถ้าชานอ้อย (รูปที่ 3.1)

3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

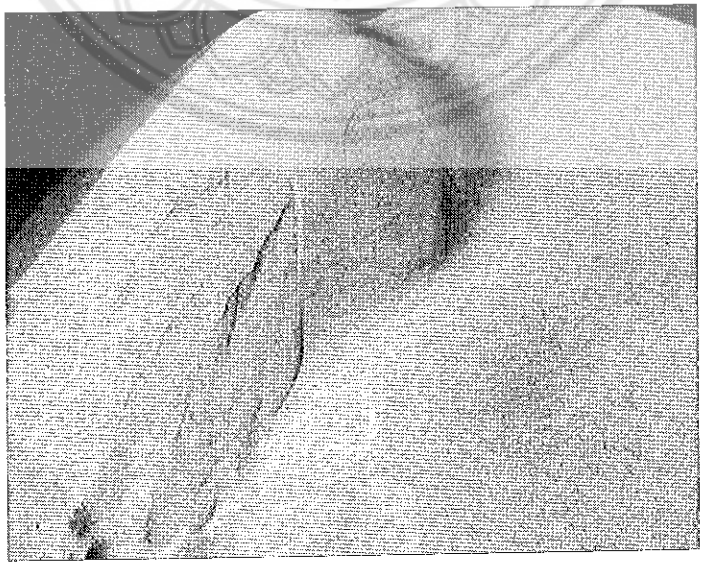
3.1.3 แคลเซียมไฮดรอกไซด์

3.1.4 ทราย (รูปที่ 3.2)

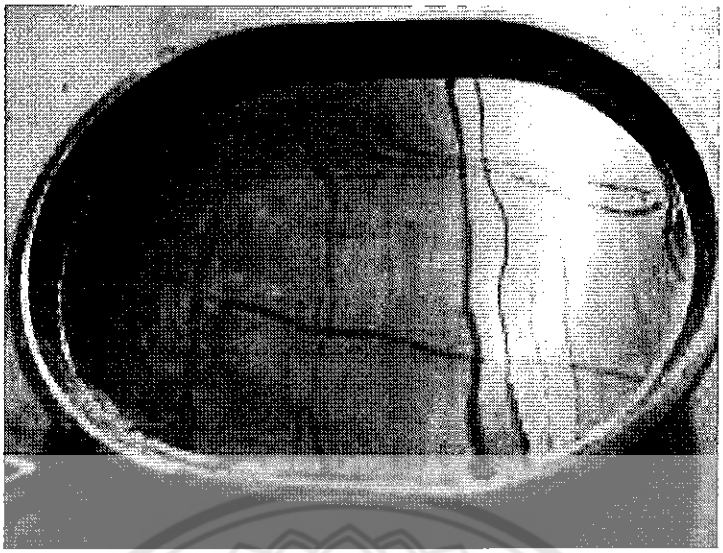
3.1.5 น้ำ (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.1 เถ้าชานอ้อยที่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์ 600 °C



รูปที่ 3.2 ทรายแม่น้ำ



รูปที่ 3.3 น้ำสะอาด

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องชั่งอ่านได้ละเอียดไม่น้อยกว่า 1 กรัม

3.2.2 ตะแกรงลวด

3.2.3 ขวดปากกว้าง (รูปที่ 3.4)

3.2.4 เครื่องบดสาร (รูปที่ 3.5)

3.2.5 ฟรอยด์

3.2.6 ภาชนะสำหรับตวงซีเมนต์ ทราย และน้ำ (รูปที่ 3.6)

3.2.7 เครื่องผสมปูน (รูปที่ 3.7)

3.2.8 ถุงมือยาง และแมสปิดจมูก

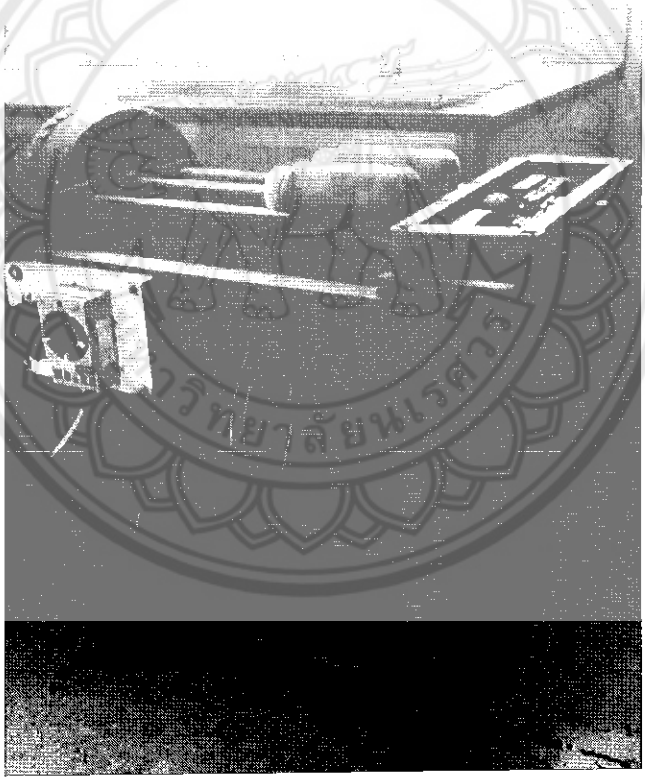
3.2.9 แบบหล่อมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 cm^3 (รูปที่ 3.8)

3.2.10 เกรียงเหล็กโป้ว (รูปที่ 3.9)

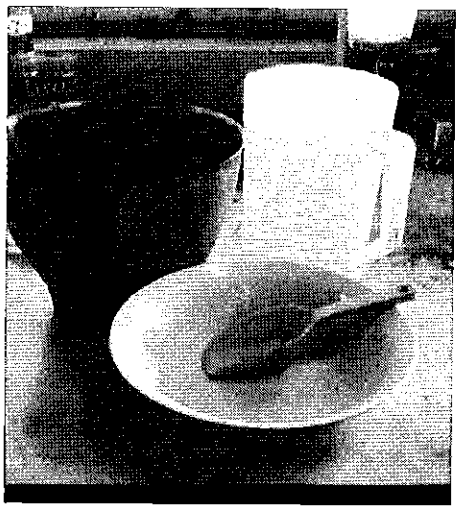
3.2.11 แท่งกระทุ้ง (รูปที่ 3.10)

3.2.12 พลาติกหุ้มอาหาร และปากกา permanent

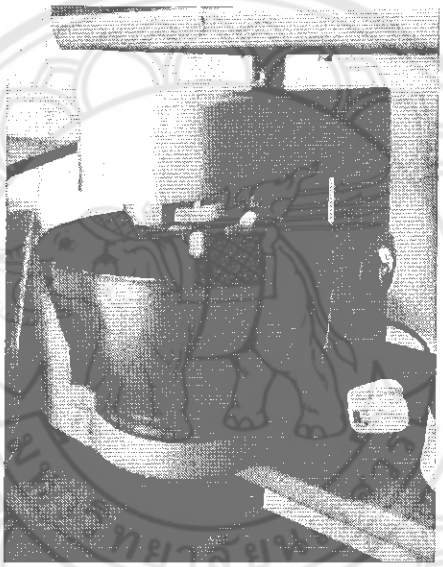
รูปที่ 3.4 ขวดปากกว้าง



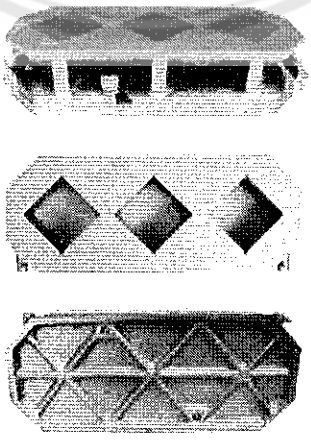
รูปที่ 3.5 เครื่องบดสาร



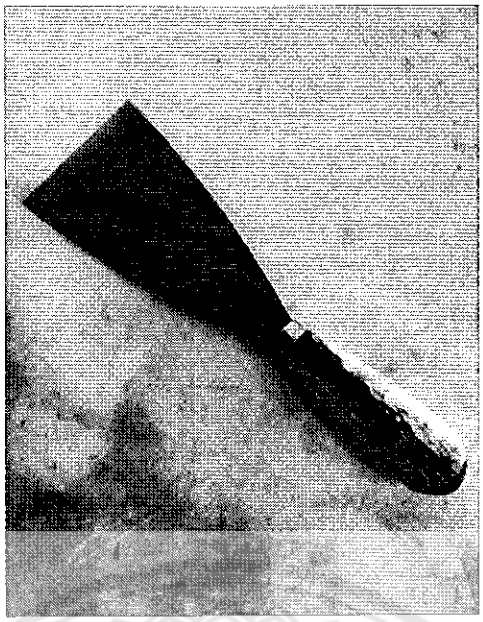
รูปที่ 3.6 ภาชนะสำหรับตวง ซีเมนต์ ทราย และน้ำ



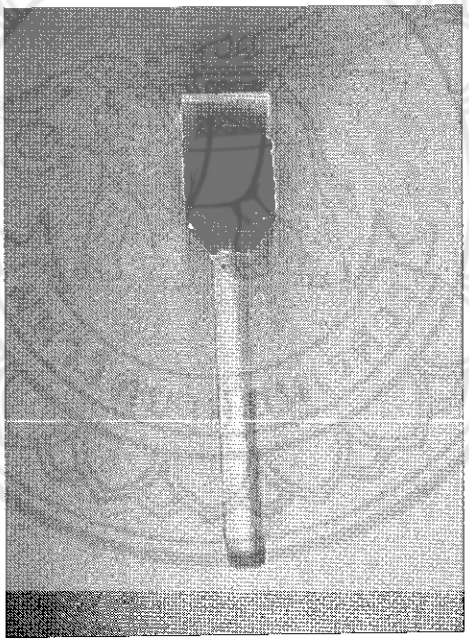
รูปที่ 3.7 เครื่องผสมปูน



รูปที่ 3.8 แบบหล่อมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 cm^3



รูปที่ 3.9 เกรียงเหล็กโป้ว



รูปที่ 3.10 แท่งกระทุ้ง

3.3 การเตรียมและศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัตถุดิบ

1. นำเถ้าชานอ้อยมาร่อนด้วยตะแกรงลวด เพื่อคัดเอาเถ้าชานอ้อยที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.5 มิลลิเมตร ออก
2. ชั่งเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการเผาแคลไซน์แล้ว 100 กรัม ต่อเม็ดบดเซอร์โคเนีย 500 กรัม
3. นำสารตั้งต้นมาใส่ในขวดพลาสติกปากกว้างที่มีเม็ดบดเซอร์โคเนียบรรจุอยู่ แล้วนำไปวางบนเครื่องบดสาร เพื่อบดย่อยผสมสารแบบ ball-milling ทำการบดย่อยผสมสารเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

4. เมื่อบดย่อยเถ้าหนักครบ 12 ชั่วโมงแล้ว ทำการแยกเม็ดบดออกจากผงเถ้าขานอ้อยแล้วนำเถ้าชาน้อยที่ได้ไปทดแทนปูนซีเมนต์ในขั้นตอนต่อไป
5. นำเถ้าชานอ้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มาศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron spectroscope; SEM) และวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคการกระเจิงพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray spectrometer; EDS)

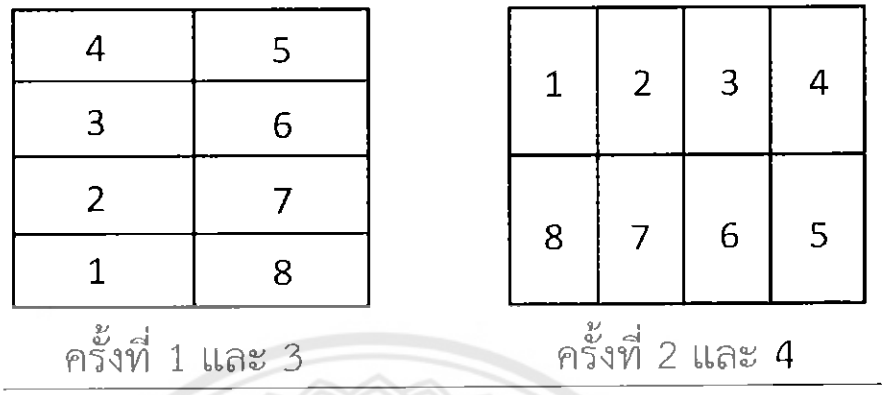
3.4 การเตรียมชิ้นงาน

3.4.1 การผสมซีเมนต์มอร์ตาร์

1. เตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ ให้สะอาดและแห้ง
2. เทน้ำที่เตรียมไว้ลงในอ่างผสม
3. เติมปูนซีเมนต์ลงไปในน้ำ และเดินเครื่องเกียร์ 1 (140±5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที
4. ในขณะเดินเครื่องผสมเกียร์ 1 ให้เติมทรายลงไปในอ่างผสมอย่างช้าๆให้หมด ภายในเวลา 30 วินาที
5. หยุดเครื่องผสม และเปลี่ยนอัตราความเร็วเป็นเกียร์ 2 (285±10 รอบต่อนาที) แล้วเดินเครื่องผสมต่อไปอีก 30 วินาที
6. หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 1:30 นาที แล้วให้รีบขูดปูนมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ข้างๆอ่างผสมให้เสร็จ ภายในเวลา 15 วินาที แล้วใช้ฝาปิดอ่างผสม
7. เดินเครื่องผสมต่อไปอีก 1 นาที ด้วยอัตราความเร็วเป็นเกียร์ 2 (285±10 รอบต่อนาที) เป็นอันเสร็จการผสม

3.4.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

1. ผสมปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ตามสูตร ดังแสดงในตารางที่ 3.1
2. นำปูนซีเมนต์มอร์ตาร์มาหล่อในแบบหล่อขนาด 50 x 50 x 50 cm^3 ที่สะอาดและทาน้ำมันบางๆไว้เรียบร้อยแล้ว (สาเหตุที่ทาน้ำมันเพื่อทำให้เวลาแกะปูนออกจากแบบเป็นไปได้สะดวก)



รูปที่ 3.13 ลักษณะการกระทุ้งมอร์ตาร์

3. เอาปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ใส่ในช่องแบบหล่อหนาประมาณ 1 ใน 3 ของแบบหล่อ กระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้งช่องละ 32 ครั้ง ภายใน 10 วินาที โดยกระทุ้งเป็น 4 รอบ แต่ละครั้งกระทุ้งให้ตั้งฉากให้ทั่วแบบหล่อดังรูป 3.13
4. ใส่มอร์ตาร์ในช่องแบบหล่ออีก 2 ใน 3 แล้วกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก
5. ใส่มอร์ตาร์ที่เหลือในช่องแบบหล่อให้นูนสูงกว่าขอบ แล้วกระทุ้งเช่นเดียวกัน เมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วมอร์ตาร์ควรสูงกว่าขอบเล็กน้อย
6. ใช้เกรียงปาดมอร์ตาร์ให้มีผิวหน้าที่เรียบ วิธีปาดควรเอียงเกรียงเล็กน้อยและค่อยๆปาดจะทำให้ผิวเรียบเร็วขึ้น และ เพื่อให้ผิวหน้าแบบหล่อเรียบดียิ่งขึ้นให้ใช้เกรียงปาดเบาๆอีก 1ครั้งตลอดความยาวของแบบหล่อ โดยใช้ขอบเกรียงวางทำมุมเล็กน้อย แล้วขยับเกรียงไปมาตลอดความยาวของแบบหล่อ
7. หลังจากหล่อแบบเรียบร้อยแล้วให้คลุมด้วยพลาสติกหุ้มอาหารคลุมไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบ และนำชิ้นงานมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำสะอาดที่ระยะเวลา 7, 28 และ90 วัน จึงจะนำไปทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่อง Compressive strength tester

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมที่ได้ทำการทดลอง

สูตร	ร้อยละการแทนที่		ร้อยละการเติม
	ปูนซีเมนต์	เถ้าชานอ้อย	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
PC	100	0	0
20SC	80	20	0
20SC5CH	80	20	5
20SC10CH	80	20	10
30SC	70	30	0
30SC5CH	70	30	5
30SC10CH	70	30	10

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน = 0.5, ทรายต่อวัสดุประสาน = 2.5

3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

3.4.1 การทดสอบกำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

โดยใช้มอร์ตาร์ขนาด 50 x 50 x 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อทดสอบกำลังอัด โดยใช้ระยะเวลาการบ่มที่ 7, 28 และ 90 วัน เมื่อครบกำหนดดังกล่าว ชิ้นงานมอร์ตาร์จะถูกนำไปทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 โดยเครื่อง compressive strength tester และใช้แรงในการกด (dF/dT) อยู่ในช่วง 0.9-1.8 KN/s (ในงานวิจัยนี้ใช้แรงในการกด = 1.2 KN/s) ในการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ในแต่ละสูตรจะใช้มอร์ตาร์จำนวน 3 ก้อน จากนั้นนำกำลังอัดที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบกับซีเมนต์ควบคุม (สูตรที่ใช้ PC 100%) การคำนวณค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของซีเมนต์มอร์ต้าร์หาได้จากสมการ (3.1)

$$f_c = \frac{P}{A} \qquad (3.1)$$

โดยที่

f_c = กำลังรับแรงอัดประลัย มีหน่วยเป็น กก/ตร.ซม. หรือ ปอนด์/ตร.นิ้ว

P = แรงอัด มีหน่วยเป็น กก. หรือ ปอนด์

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง มีหน่วยเป็น ตร.ซม. หรือ ตร.นิ้ว

3.4.2 การทดสอบหาความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 642-06 โดยจะใช้มอร์ตาร์ชิ้นเดียวกันกับการทดสอบกำลังอัด โดยค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบสัดส่วนละ 3 ก้อนตัวอย่าง ซึ่งหลังจากที่ทดสอบกำลังอัดเรียบร้อยแล้ว จะนำชิ้นส่วนมอร์ตาร์ที่เหลือมาอบที่อุณหภูมิ 110±5 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่ามอร์ตาร์นั้นแห้งสนิท นำมาชั่งน้ำหนัก (มวลแห้ง) และจดบันทึก (A) จากนั้นนำมอร์ตาร์ที่ชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้วนำไปแช่ไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และจึงทำการชั่งน้ำหนักในน้ำ (มวลเปียก) และจดบันทึก (C) จากนั้นนำมอร์ตาร์ที่ชั่งน้ำหนักในน้ำแล้ว นำขึ้นมาซับน้ำ และชั่งน้ำหนัก (มวลหมาด) และจดบันทึก (B) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความพรุน ดังสมการ (3.2) – (3.4) ตามลำดับ

- การดูดซึมน้ำหลังจากการบ่ม

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \left|\frac{(B-A)}{A}\right| \times 100 \qquad (3.2)$$

- ความหนาแน่นปรากฏ

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm}^3\text{)} = \left|\frac{A}{(A-C)}\right| \times \rho \qquad (3.3)$$

- ความพรุน

$$\text{ความพรุน (\%)} = \left|\frac{(B-A)}{(B-C)}\right| \times 100 \qquad (3.4)$$

โดยที่

A = มวลแห้งชั่งในอากาศ (g)

B = มวลหมาดที่ผ่านการแช่ในน้ำ (g)

C = มวลชั่งในน้ำ (g)

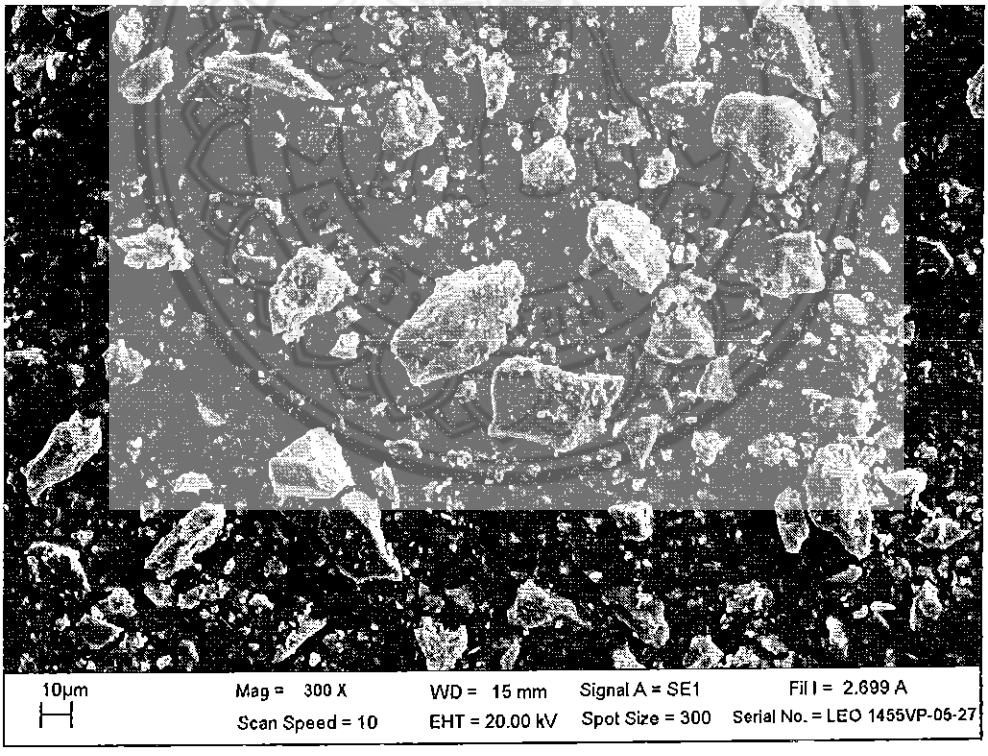
ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (1 g/cm^3)

บทที่ 4

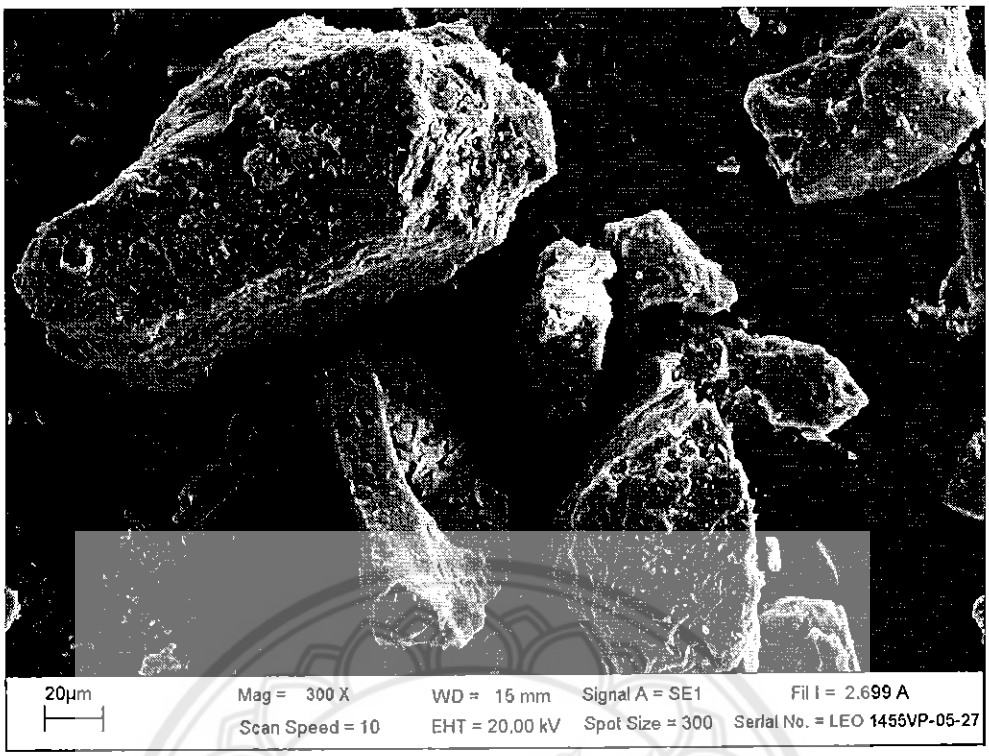
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 โครงสร้างทางจุลภาคของวัตถุดิบ

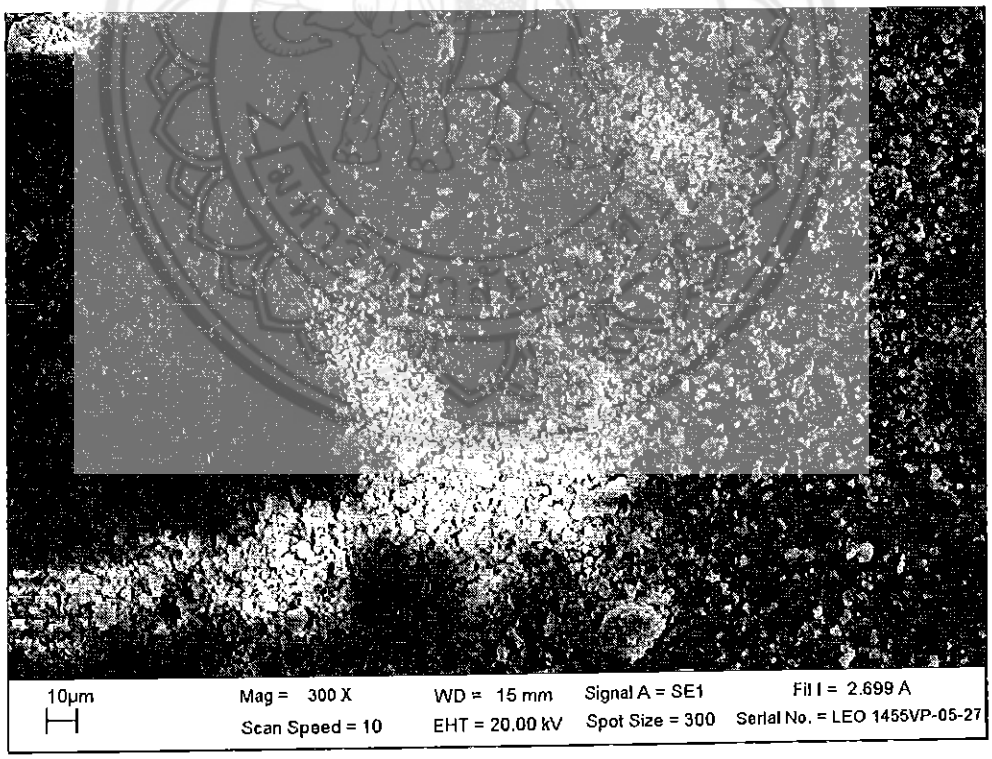
การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1ก พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุม มีพื้นผิวที่ขรุขระ มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคประมาณ 1-50 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวของอนุภาคค่อนข้างดี ซึ่งขนาดที่เล็กของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นี้จะช่วยให้ปูนซีเมนต์มีการทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ในส่วนอนุภาคเถ้าชานอ้อย ซึ่งได้จากโรงงานน้ำตาลในจังหวัดพิษณุโลก เมื่อผ่านการเผาไล่ความชื้นแล้วนำไปบดด้วยเม็ดบนดปั่นเวลา 12 ชั่วโมง (ดังรูป 4.1ข) พบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าชานอ้อยมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม เกาะกันอยู่อย่างหลวม ๆ โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ เล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ถึงขนาด 100 ไมโครเมตร และโครงสร้างทางจุลภาคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำมาใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าชานอ้อย ดังแสดงดังรูปที่ 4.1(ค) พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน มีขนาดอนุภาคประมาณ 1-15 ไมโครเมตร



(a)



(b)

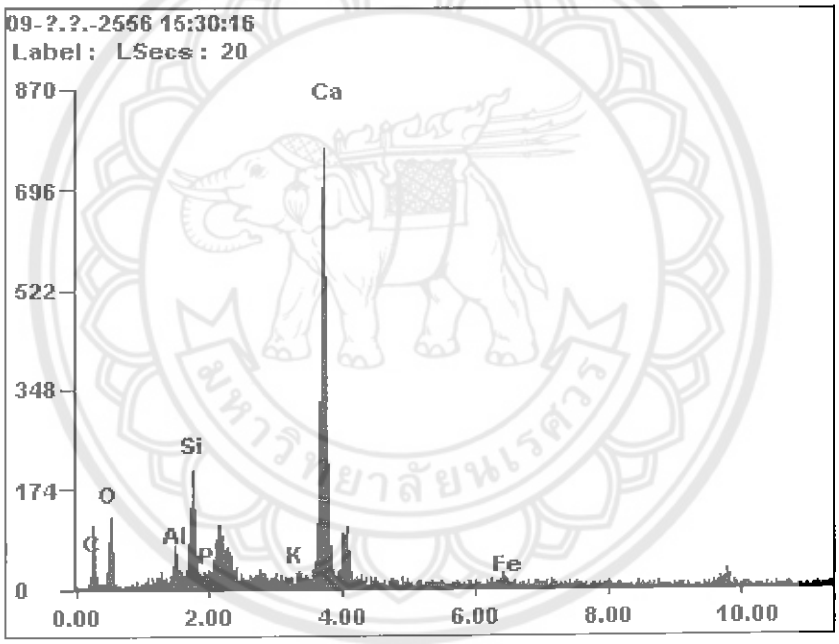


(c)

รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของ (ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ข) เถ้าชานอ้อยบดละเอียด 12 ชั่วโมง และ (ค) แคลเซียมไฮดรอกไซด์

4.2 องค์ประกอบทางเคมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าชานอ้อย

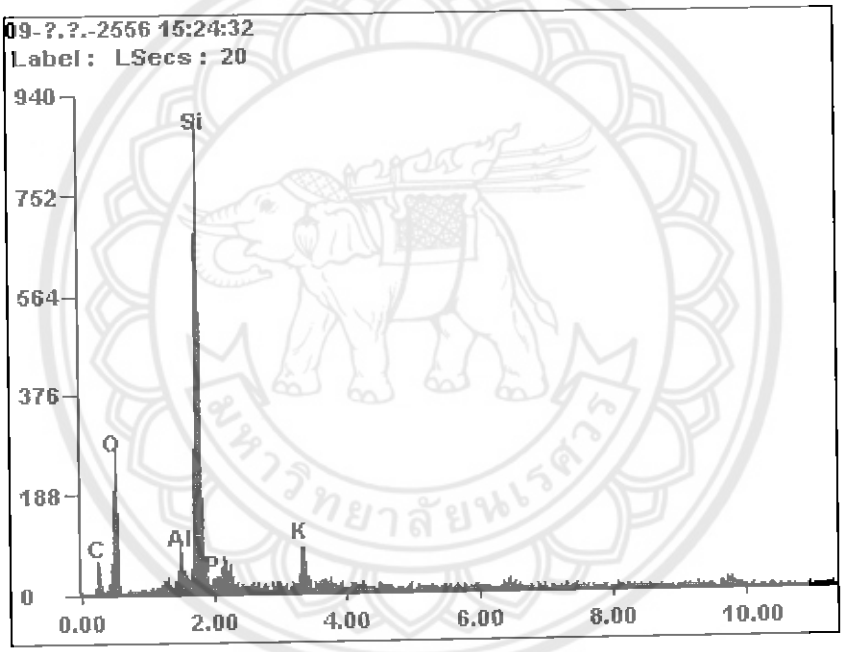
จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคการกระเจิงพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray spectrometer; EDS) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), อะลูมินัม (Al), ซิลิกอน (Si), ฟอสฟอรัส (P), โปแทสเซียม (K), แคลเซียม (Ca) และ เหล็ก (Fe) ซึ่งธาตุที่พบมากที่สุดคือแคลเซียม พบร้อยละ 41.60 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือออกซิเจนพบร้อยละ 26.88 โดยน้ำหนัก คาร์บอนพบร้อยละ 18.23 โดยน้ำหนัก และพบซิลิกอน เหล็กและอะลูมินัม ร้อยละ 6.88, 3.47 และ 2.06 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS จะสอดคล้องเฟสที่มีอยู่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [12] คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$; C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$; C_2S), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$.; C_3A) และเฟสเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอรไรท์ ($4CaO.\ Al_2O_3.Fe_2O_3$; C_4AF) ในส่วนของการวิเคราะห์ที่พบธาตุออกซิเจนเป็นปริมาณมากนั้นเนื่องจากว่าองค์ประกอบทางแร่นั้นจะเป็นเฟสที่อยู่ในรูปของออกไซด์



Element	Wt%	At%
C	18.23	32.66
O	26.88	36.15
Al	02.06	01.64
Si	06.88	05.27
P	00.50	00.35
K	00.67	00.37
Ca	41.60	22.34
Fe	03.17	01.22

รูปที่ 4.2 รูปแบบการการกระเจิงพลังงานรังสีเอกซ์ (EDS) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคการกระเจิงพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray spectrometer; EDS) ของเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการบดด้วยเม็ดบดเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), อะลูมินัม (Al), ซิลิกอน (Si), โปแทสเซียม (K) และ ฟอสฟอรัส (P) ซึ่งธาตุที่พบมากที่สุดคือออกซิเจน พบร้อยละ 35.56 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือซิลิกอนพบร้อยละ 30.54 โดยน้ำหนัก คาร์บอนพบร้อยละ 26.02 โดยน้ำหนัก ส่วนอะลูมินัม โปแทสเซียมและฟอสฟอรัส พบรวมกันร้อยละ 7.89 โดยน้ำหนัก ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS จะสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [23] ที่พบในเถ้าชานอ้อยจะอยู่ในรูปสารประกอบ ควอร์ต ซึ่งเป็นเฟสหนึ่งของซิลิกา (SiO_2) ส่วนปริมาณคาร์บอนที่พบในปริมาณที่สูงนั้น เนื่องจากเกิดการเผาไม่สมบูรณ์ของเถ้าชานอ้อยในกระบวนการเอานั่นเองทำให้เถ้าชาอ้อยนั้นมีค่าสูญเสียเนื่องจากการเผา (Loss of Ignition) ที่สูง

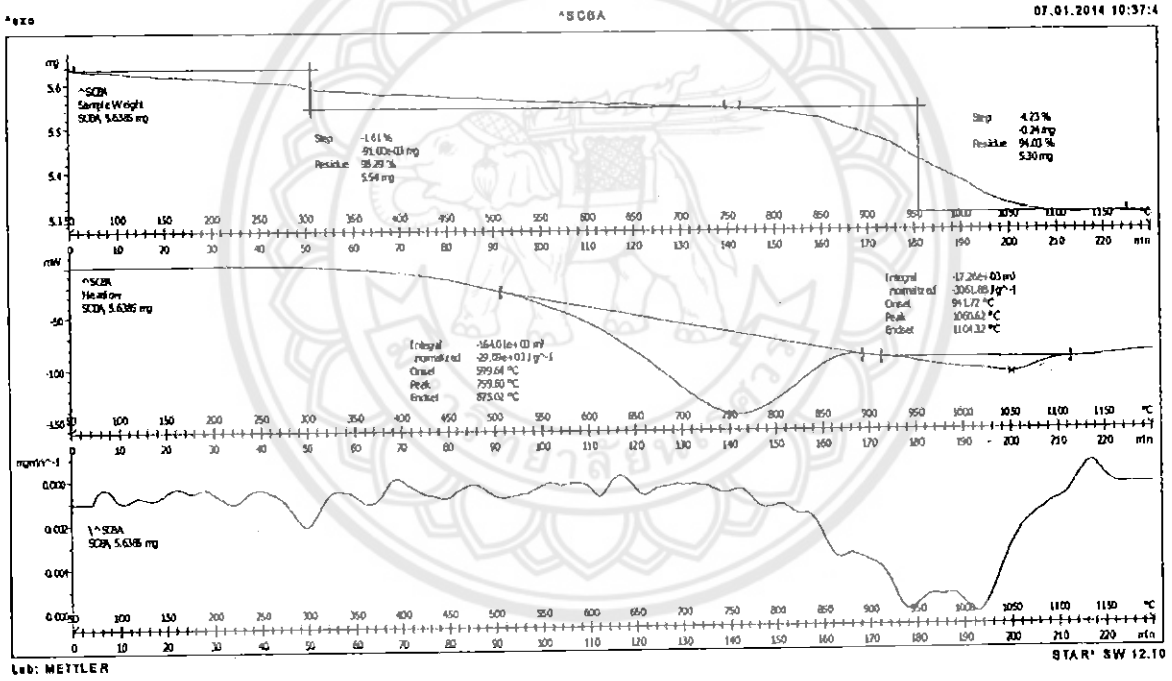


Element	Wt%	At%
C	26.02	37.91
O	35.56	38.89
Al	02.44	01.58
Si	30.54	19.03
P	01.23	00.69
K	04.22	01.89

รูปที่ 4.3 รูปแบบการการกระเจิงพลังงานรังสีเอกซ์ (EDS) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

4.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของเถ้าชานอ้อย

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของเถ้าชานอ้อยบดละเอียด ด้วยเทคนิค thermal gravimetric analysis (TGA) ดังแสดงในรูป 4.4 จากการเผาเถ้าชานอ้อยจำนวน 5.6385 กรัม โดยให้ความร้อนตั้งแต่ 50-1,200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนด้วยอัตรา 20 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการวัดน้ำหนักของที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ จะสังเกตเห็นว่าน้ำหนักของเถ้าชานอ้อยมีการหายไปเป็น 2 ช่วง (กราฟบน) โดยช่วงแรกอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มเผาจนถึงประมาณ 750 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเนื่องจากการระเหยของความชื้นที่มีอยู่ในเถ้าชานอ้อย โดยในช่วงนี้น้ำหนักมีการหายไป 1.61% และอีกช่วงหนึ่งซึ่งมีการหายไปของน้ำหนักเป็นจำนวนมาก คิดเป็น 4.23% อุณหภูมิระหว่าง 750-1100 องศาเซลเซียส ซึ่งน่าจะเกิดจากการสลายตัวไปของคาร์บอน โดยออกมาในรูปของ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งคาร์บอนนี้มีอยู่ในเถ้าชานอ้อยเป็นจำนวนมาก เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ในกระบวนการเผาชานอ้อยในการผลิต



รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของเถ้าชานอ้อยด้วยเทคนิค TGA

ว วท
ส63
ท113ร
2559

1701553

18 ส.ค. 2559

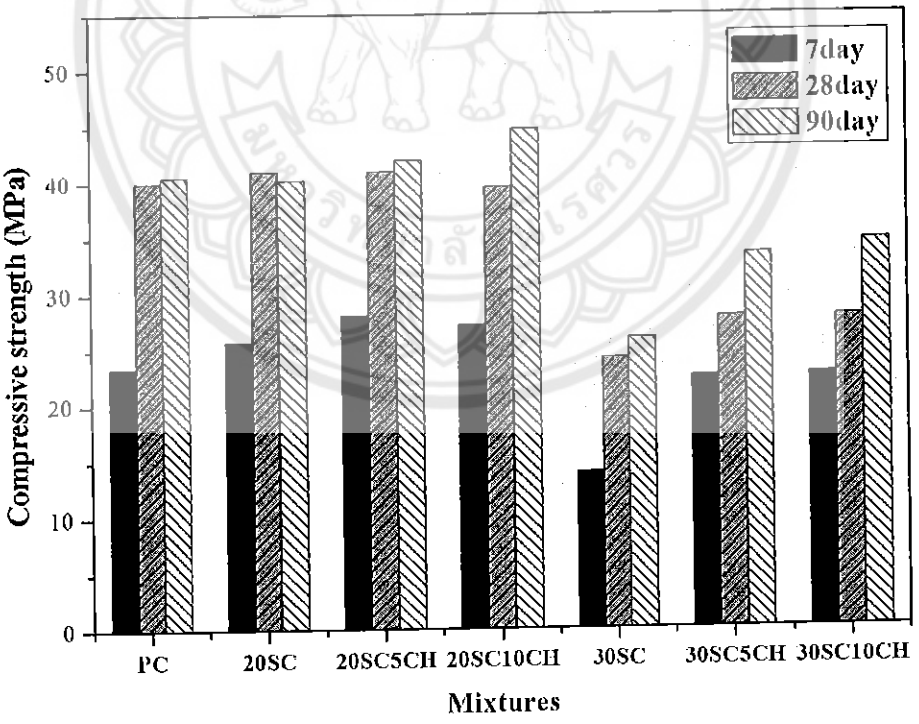
สำนักหอสมุด

4.4 กำลังอัด

การศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อการพัฒนากำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการบดที่ 12 ชั่วโมง โดยทำการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก โดยทำการคำนวณค่ากำลังอัดเฉลี่ยจากตัวอย่างชิ้นงานละ 3 ก้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 90 วัน จะมีค่าสูงที่สุดในทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำต้องอาศัยเวลาในการเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้ได้เฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) ซึ่งเป็นเฟสที่ช่วยในการยึดประสานของเนื้อคอนกรีต โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดค่อนข้างสูงที่ระยะการบ่มนาน ๆ นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 20 ทั้งที่เติมและไม่ได้เติมสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนที่เหมาะสมไม่มาก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 30 ทุกส่วนผสมจะมีค่ากำลังอัดต่ำกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (สูตร PC) ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 4.1 และปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างซิลิกาในเถ้าชานอ้อยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 4.2 [12, 16, 23]

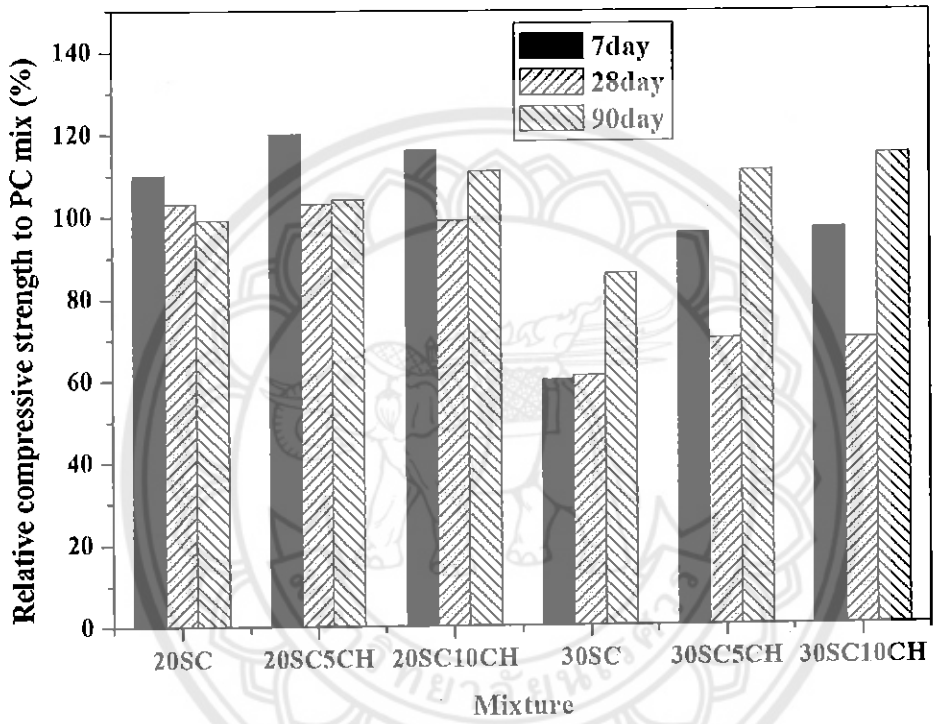
$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6\,H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad (4.1)$$

$$SiO_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O \qquad (4.2)$$



รูปที่ 4.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่เติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 90 วัน

เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดสัมพัทธ์เทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ล้วน (ดังแสดงรูปที่ 4.6) ได้จากการนำเอาค่ากำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยหารด้วยกำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนแล้วคำนวณออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ พบว่าค่ากำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทั้งที่เติมและไม่ได้เติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ส่วนในสูตรที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก 60-110 % ซึ่งค่ากำลังอัดสัมพัทธ์นี้ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้ระบุอาไว้ต้องไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 อย่างไรก็ตามในการใช้เถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยในงานคอนกรีตสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ไม่เกินร้อยละ 20



รูปที่ 4.6 กำลังอัดสัมพัทธ์เทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 90 วัน

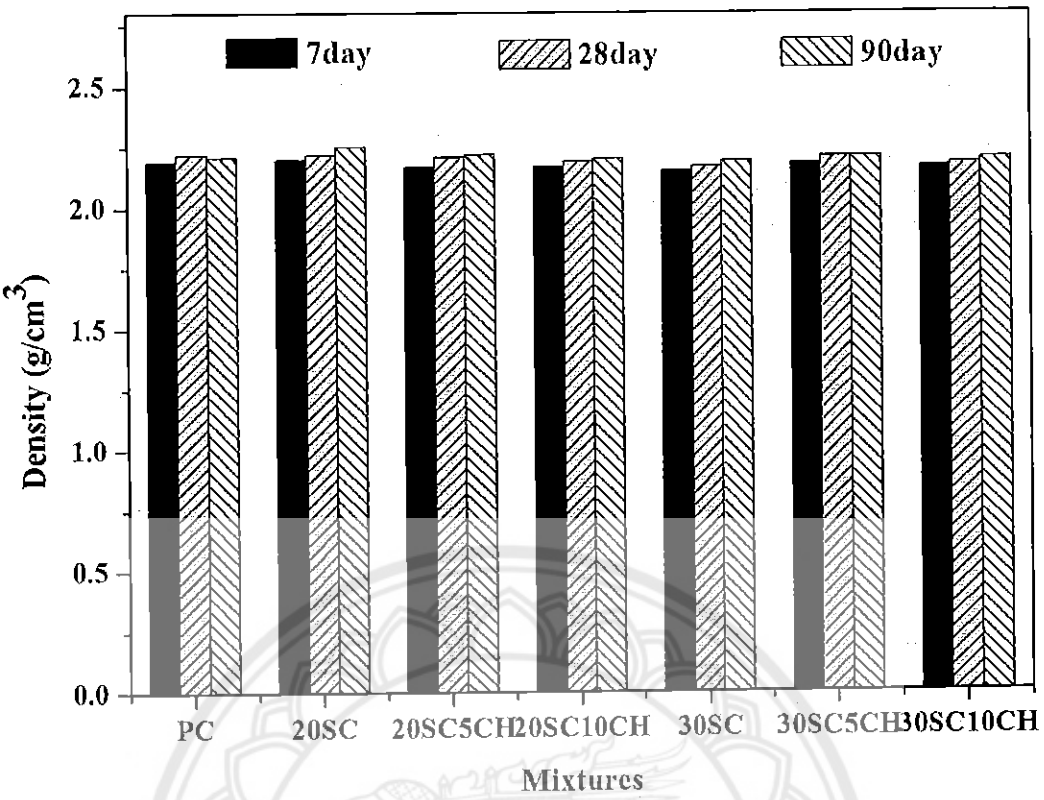
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของสารเติมแต่ง (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยทำการเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ได้ใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วคำนวณออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าในการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้าไป เป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ โดยสังเกตจากค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ได้เติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยในสูตรที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 9% ในช่วง 7 วันแรก

ตารางที่ 4.1 กำลังอัดสัมพัทธ์เทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 90 วัน

สูตร	กำลังอัดสัมพัทธ์เทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง (%)		
	7 วัน	28 วัน	90 วัน
20SC	100	100	100
20SC5CH	109	100	104
20SC10CH	106	97	111
30SC	100	100	100
30SC5CH	161	115	129
30SC10CH	162	115	133

4.5 ความหนาแน่น

จากการตรวจสอบผลของสารเติมแต่ง (แคลซียมไฮดรอกไซด์) ต่อความหนาแน่นของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความหนาแน่นของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม (PC) ที่ผ่านการบ่มในน้ำมีค่าประมาณ 2.19-2.22 g/cm^3 ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20-30 และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5-10 ในทุกๆระยะเวลาการบ่ม นั้นมีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของมอร์ตาร์ควบคุมซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.15-2.25 g/cm^3 ซึ่งค่าความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยานั้นจะมีค่าเท่ากับ 3.15 g/cm^3 แต่เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำและปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าชานอ้อยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วจะเกิดเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท และเฟสอื่นๆ โดยมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ 2.26-2.40 g/cm^3 [12] จากการทดสอบความหนาแน่นของมอร์ตาร์จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของเถ้าชานอ้อยที่ผสมทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ไม่ได้ทำให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์เปลี่ยนแปลงไปแต่อย่างใด ยังคงสภาพความเป็นมอร์ตาร์อย่างเดิม



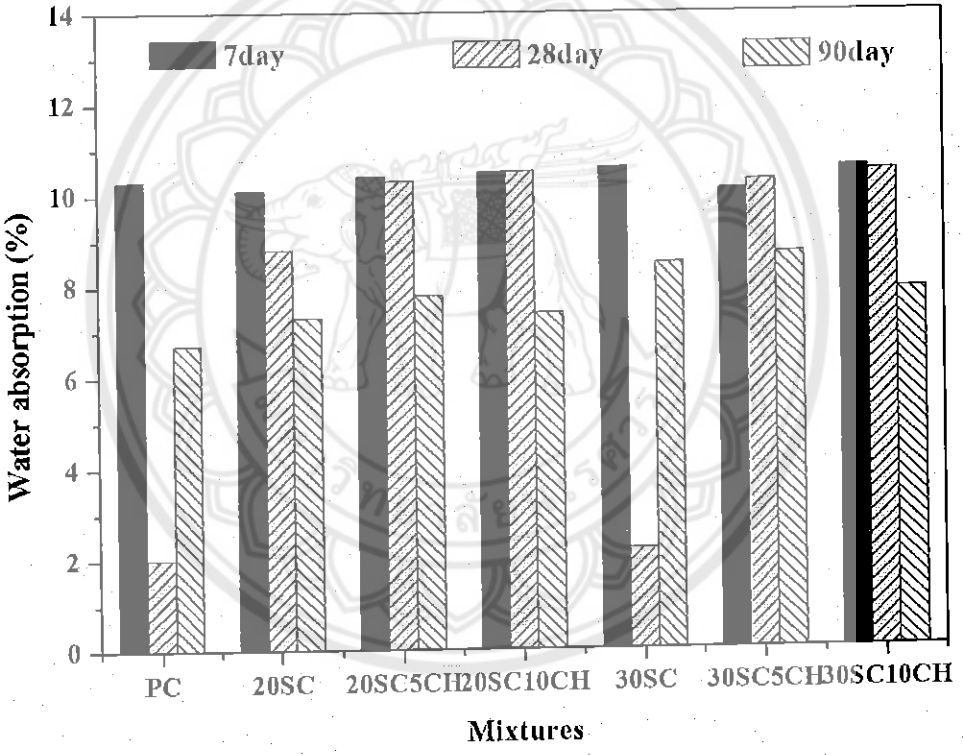
รูปที่ 4.7 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์เถ้าชานอ้อยที่ผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ บ่มในน้ำ 7, 28 และ 90 วัน

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและสารเติมแต่ง บ่มในน้ำ 7, 28 และ 90 วัน

สูตร	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)		
	7วัน	28 วัน	90 วัน
PC	2.19	2.22	2.21
20SC	2.20	2.22	2.25
20SC5CH	2.17	2.21	2.22
20SC10CH	2.17	2.19	2.2
30SC	2.15	2.17	2.19
30SC5CH	2.18	2.21	2.21
30SC10CH	2.17	2.18	2.20

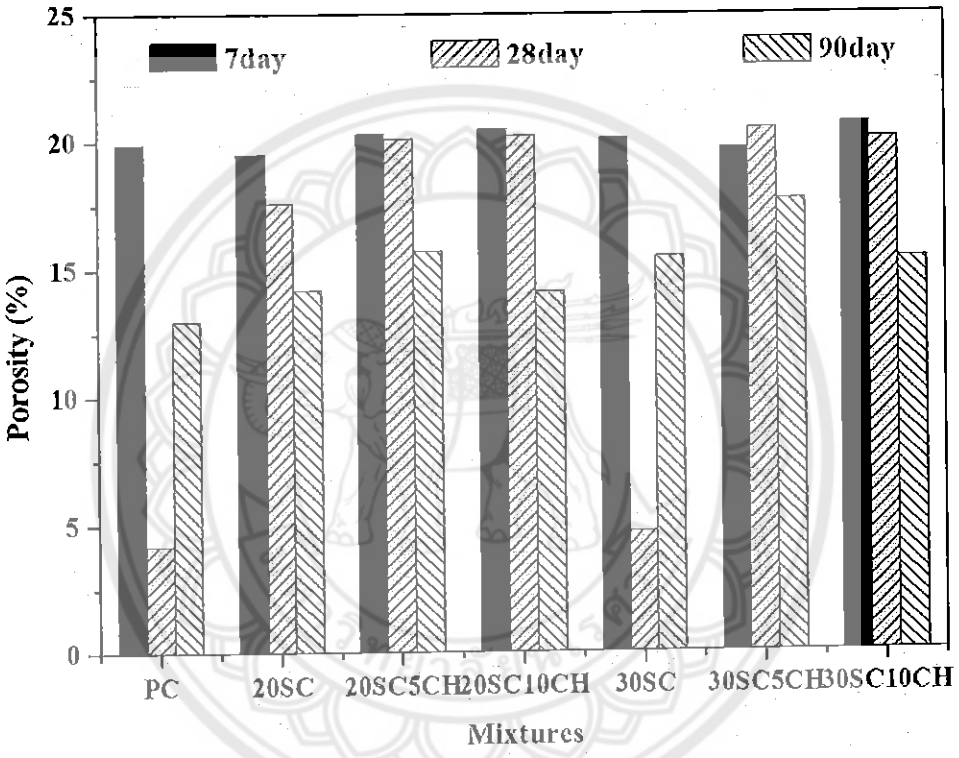
4.6 การดูดซึมน้ำและความพรุน

ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่ง (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642-06 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนผสมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น (7, 28 และ 90 วัน) โดยมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 2.2-10.2 % โดยพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ทั้งที่ผสมเถ้าชานอ้อยและไม่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยจะมีค่าน้อยที่สุดที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 90 วัน ในส่วนความพรุนของมอร์ตาร์ (ดังแสดงในรูปที่ 4.9) จะแปรผันตรงกับค่าการดูดซึมน้ำ โดยค่าความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ณ ระยะเวลาในการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน จะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการบ่มอย่างเห็นได้ชัด โดยทั้งความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากในตัวของเถ้าชานอ้อยมีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน เมื่อทำการผสมเข้าไปในมอร์ตาร์จึงทำให้ความพรุนและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบ่มในน้ำเป็นเวลา 7, 28 และ 90 วัน

เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 90 วัน พบว่าค่าความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะมีความพรุนอยู่ในช่วง 15.0 – 17.5 % และค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 7.0 – 8.0 % ซึ่งทั้งค่าความพรุนและค่าการดูดซึมของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าของมอร์ตาร์ควบคุม โดยมีค่าความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 12.7 % และ 6.9 % ตามลำดับ นอกจากนี้จะพบว่าค่าความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 90 วันจะมีค่าต่ำกว่าของมอร์ตาร์ที่บ่มที่ 7 วันและ 28 วัน ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ กับเถ้าชานอ้อยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา

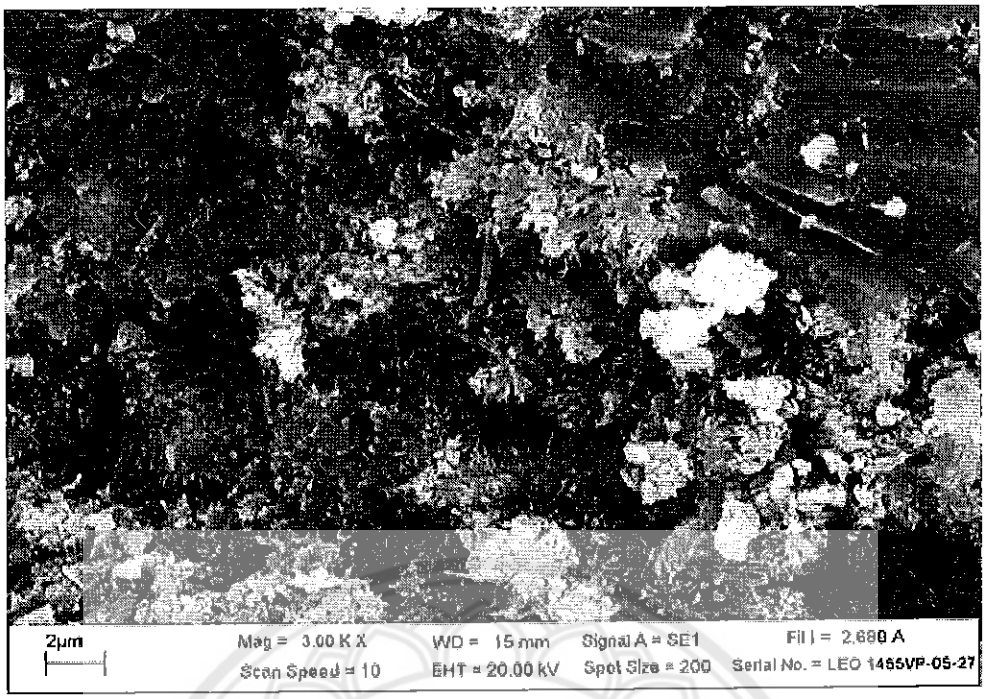


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความพรุนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการบ่มในน้ำเป็นเวลา 7, 28 และ 90 วัน

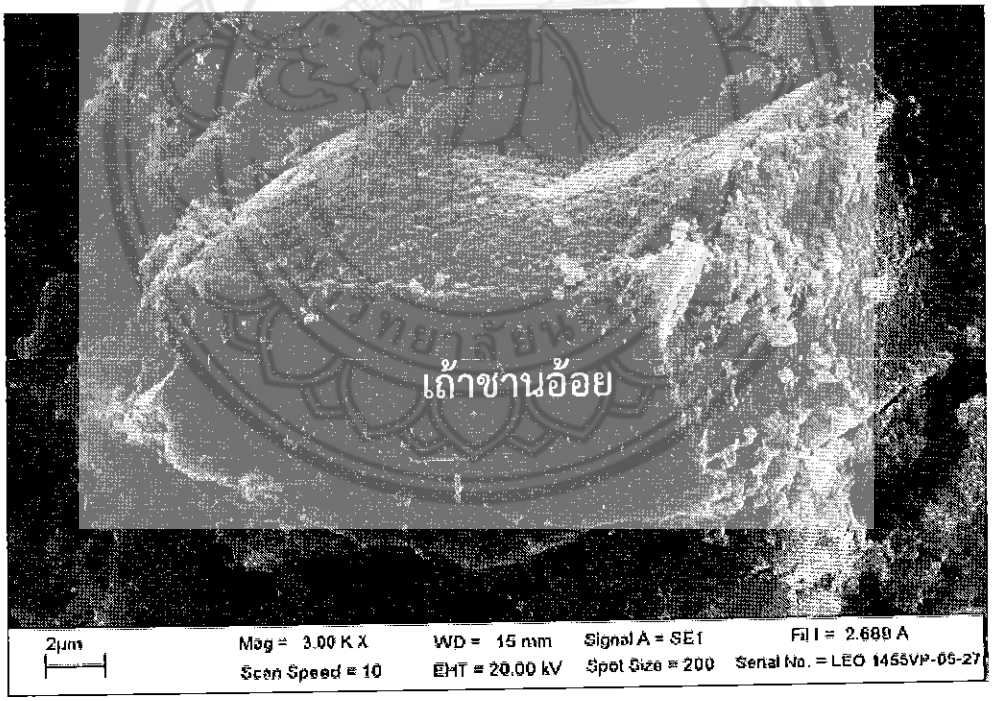
4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของปูนซีเมนต์เพสต์

การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค SEM ของปูนซีเมนต์เพสต์ PC ที่ผ่านการบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน ดังแสดงในรูป 4.10ก) จะเห็นโครงสร้างมีลักษณะแน่นทึบโดยสังเกตเห็นลักษณะของเฟสที่เหิดขึ้นมีหลายลักษณะ โดยโครงสร้างทางจุลภาพที่มีลักษณะเป็นเส้นเล็กๆหลายเส้นข้อนกันไปมาอย่างไม่เป็นระเบียบขยายออกมาจากเม็ดปูน ซึ่งคือ เฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ส่วนเฟสแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรต (ettringite) มีลักษณะเป็นเข็มยาวซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า C-S-H และ แคลเซียมไฮดรอกไซต์ ($Ca(OH_2)$) จะมีรูปร่างลักษณะเป็นแผ่นแบนมีเหลี่ยม ซึ่งเฟสทั้ง 3 นี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งเฟสทั้งสามมีผลต่อกำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นอย่างยิ่ง [22] ในรูปที่ 4.10ข) เป็นลักษณะโครงสร้างของปูนเพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะพบเฟสเหมือนกับเฟสของปูนซีเมนต์เพสต์ 100% ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์กับน้ำ และปฏิกิริยาปอซโซลาน (เถ้าชานอ้อยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์) โดยจะพบอนุภาคของเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้นมา ซึ่งมีลักษณะที่เป็นเหลี่ยมมุม เนื่องจากการเติมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 20

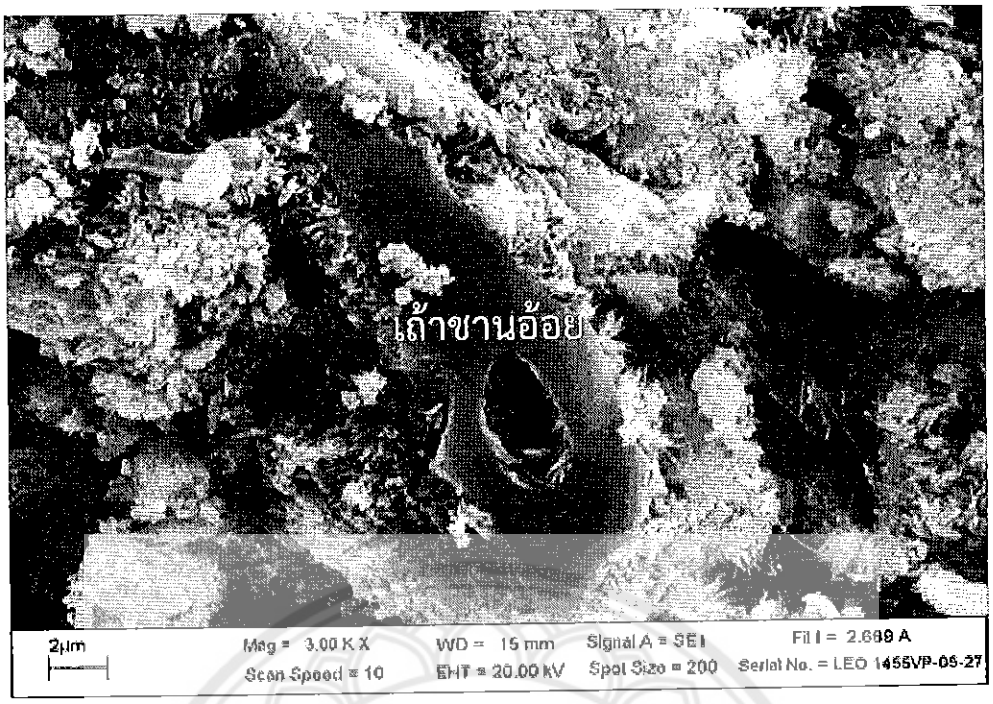
รูปที่ 4.10ค) ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของปูนเพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาจะพบว่ามีลักษณะเฟสที่เหมือนกับปูนเพสต์ 100% แต่จะมีการพบอนุภาคของเถ้าชานอ้อยและเฟสต่างๆของซีเมนต์เพสต์เพิ่มมากขึ้น โดยมีการทดแทนในอัตราส่วนของเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20% และอัตราส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 5% และรูปที่ 4.10ง) โครงสร้างทางจุลภาคของปูนเพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาจะพบว่ามีลักษณะโครงสร้างเฟสที่คล้ายกับปูนเพสต์ 100% และพบพบอนุภาคของเถ้าชานอ้อยและเฟสต่างๆของซีเมนต์เพสต์เพิ่มมากขึ้น โดยมีการทดแทนในอัตราส่วนของเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20% และอัตราส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 10% เมื่อสังเกตบริเวณขอบของอนุภาคเถ้าชานอ้อยจะเห็นว่ามีเฟสที่มีลักษณะเหมือนกับเฟส C-SH เกิดขนายออกมาจากอนุภาคของเถ้าชานอ้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้าไปในระบบ จึงเป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาของเฟสซิลิกาที่มีอยู่ในเถ้าชานอ้อยให้เกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของกำลังอัดในสูตรที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีกำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ในสูตรที่ไม่ได้เติม


2µm
Mag = 3.00 K X
WD = 15 mm
Signal A = SE1
Fil I = 2.689 A
Scan Speed = 10
EHT = 20.00 kV
Spot Size = 200
Serial No. = LEO 1455VP-05-27

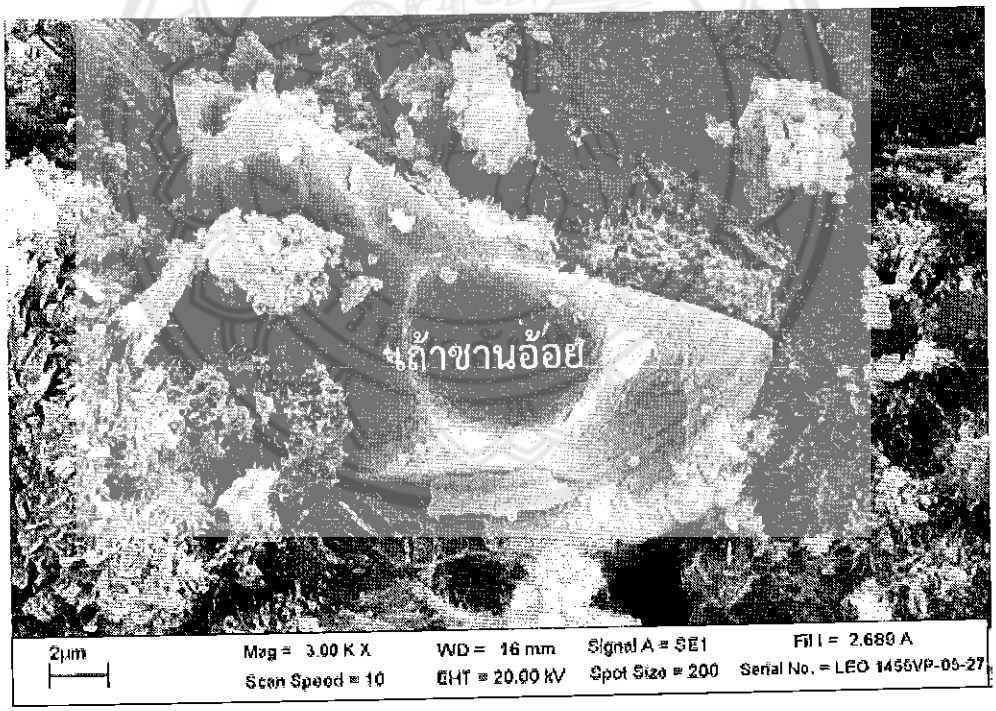
(ก)


เถ้าชานอ้อย
2µm
Mag = 3.00 K X
WD = 15 mm
Signal A = SE1
Fil I = 2.689 A
Scan Speed = 10
EHT = 20.00 kV
Spot Size = 200
Serial No. = LEO 1455VP-05-27

(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.10 รูปลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของปูนเพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สูตร ก) ปูนเพสต์ล้วน ข) เพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย 20% ค) เพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย 20% และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 5% และ ง) เพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย20% และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 10%

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชาน สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. เถ้าชานอ้อยประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟสที่มีซิลิกอน อลูมินัม และคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และการนำเถ้าชานอ้อยมาใช้ต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดก่อน
2. การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เติมสารเติมแต่ง พบว่ามีค่ากำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ได้ผสมสารเติมแต่ง แต่อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าชานอ้อยที่เหมาะสมกับการใช้งานควรใช้ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม ณ ทุกระยะเวลาในการบ่ม
3. ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและสารเติมแต่งมีค่าไม่แตกต่างจากมอร์ตาร์ควบคุม
4. การใช้สารเติมแต่งมีผลต่อการดูดซึมน้ำและความพรุนของมอร์ตาร์เล็กน้อย โดยค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและสารเติมแต่งพบว่ามีค่าต่ำกว่าที่สุดที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 90 วัน และค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์จะมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่าความพรุนของมอร์ตาร์เช่นเดียวกัน
5. มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยที่เติมสารเติมแต่งมีการปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยสามารถดูได้จากโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณผิวของเถ้าชานอ้อยมี การทำปฏิกิริยาออกมาจากอนุภาคของเถ้าชานอ้อย

เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย

[1] G. Cordeiro, R.D.T Filijp, E.M.R. Fairbairt and *et al.*, *In: Proceedings of the International Conference on Use of Recycled Materials in Building and Structure*, Barcelona; 2004. p. 1-9.

[2] รัฐพล สมนา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล,*วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.*, ปีที่ 34 ฉบับที่ 4 (2554) หน้า 369-381.

[3] G.C. Carderio, R.D. Teledo Filho and E.M.R. Fairbairt, *Constr. Buil. Mater.*, 23 (2009) 3301-3303.

[4] E.V. Morales, E. Villar-Cocina and *et al.*, *Cem. Concr. Compos.*, 31 (2009) 22-28.

[5] ASTM C 618-08a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete1. American Society for Testing and Materials, Philadelphia; 2008.

[6] บรรจง แสงแก้ว และคณะ, "การศึกษาความสามารถเทได้ และกำลังของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยลิกไนต์", รายงานการค้นคว้าอิสระวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2536.

[7] N.B. Singh, V.D. Singh, and S. Rai, *Cem. Concr. Res.*, 30 (2000) 1485-1488.

[8] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, and *et al.*, *Cem. Concr. Compos.*, 30 (2008) 410-418.

[9] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul and *et al.*, *Constr. Buil. Mater.*, 23 (2009) 3523-3531.

[10] T. Akram, S.A. Memon, H. Obaid, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 703–712.

[11] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho and et al., *Constr. Buil. Mater.*, 29 (2012) 641-646.

[12] S. Mindess, J.F. Young and D. Darwin, *Concrete; 2nd Edition*, Prentice Hall (2002).

[13] H. Yazici, H. Yigiter, A.S. Karabulut and B. Baradan, *Fuel* 87 (2008) 2401–2407.

[14] A. Chaipanich, T. Nochaiya, *J Therm. Anal. Calorim.* 99 (2010) 487–493.

[15] A. Chaipanich, T. Nochaiya, W. Wongkeo and P. Torkittikul, *Mater. Sci. Eng. A* 527 (2010) 1063–1067.

[16] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, การใช้งานเถ้าชานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต, *วารสารคอนกรีต*, ฉบับที่ 16 ประจำเดือนสิงหาคม (2555) หน้า 1-7.

[17] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, กองอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย, กระทรวงอุตสาหกรรม , 2550, สรุปสถานการณ์อ้อยและน้ำตาลทรายของประเทศประจำปีการผลิต 2549/50, เล่มที่2, หน้า 1-3

[18] V.M. Malhotra and P.K. Mehta, Pozzolanic and cementitious materials, Gordon and Breach Publishers, Netherlands, 1996

[19] สันติ รุจิธนพานิช, "การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตบดอัดที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นส่วนผสม", รายงานการค้นคว้าอิสระวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2538.

[20] A. Sales, S.A. Lima, *Waste Management* 30 (2010) 1114–1122.

[21] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn and A. Chaipanich, *Mater. Design* 36 (2012) 655–662.

[22] T. Nochaiya, W. Wongkeo and A. Chaipanich, *Fuel* 89 (2010) 768–774.

[23] Nattawong Phosuphanan, Savanee Vanaleesin, Phongthorn Julphunthong and Thanongsak Nochaiya, ***Effect of Calcinations Temperature on Pozzolanicity of Sugarcane Bagasse Ash***, Proceedings The 6th National Science Research Conference,(20-21 March 2014), Burapha University, pp. 205-210.

ผลลัพท์จากโครงการวิจัย

ความรู้ที่ได้จากโครงงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยเพื่อใช้งานในทางวิศวกรรมก่อสร้างได้ โดยได้นำเสนอในการประชุมวิชาการดังต่อไปนี้

1. นำเสนอแบบโปสเตอร์ในการประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัยครั้งที่ 7 วันที่ 30-31 มีนาคม 2558 ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก
2. นำเสนอแบบปากเปล่า ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11 วันที่ 17 - 19 มิถุนายน 2558 ณ โรงแรมบางแสน เฮอริเทจ จังหวัดชลบุรี

ได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่ Proceeding จำนวน 2 เรื่อง ได้แก่

1. Chutinathon Sukkasem, Suparut Supa-uan, Pincha Torkittikul, Panisara Disuea and Thanongsak Nochaiya, ***Effect of fly ash and ground sugarcane bagasse ash on compressive strength of Portland cement mortar***, Proceedings The 7th National Science Research Conference, (30-31 March 2015), Naresuan University, Pithsanulok, pp. 1-7.
2. Nattawong Phosuphanan, Pongthorn Julphunthong, Watcharapong Wongkeo, Panisara Disuea and Thanongsak Nochaiya, ***Utilization of Sugarcane Bagasse Ash and Fly Ash in Concrete***, Proceedings 11th Conference on Energy Network of Thailand, (17-19 June 2015), Bangsaen Heritage Hotel, Chonburi, pp. 1166-1173.

ภาคผนวก

ผลของเถ้าลอยและเถ้าซานอ้อยบดละเอียดต่อค่ากำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

Effect of fly ash and ground sugarcane bagasse ash on compressive strength of Portland cement mortar

จุตินธร สุขเกษม[1], ศุภรัตน์ สุภาอ่วน[1], ปิญชาน์ ต่อกิตติกุล[2], ปาณิสรา ดีเสือ[1]และ ทนงศักดิ์ โนไชยา[1,3],

ChutinathonSukkasem[1], SuparutSupa-uan[1], Pincha Torkittikul[2], Panisara Disuea[1]andThanongsakNochaiya[1,3],

[1]ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธาคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

[3]สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของเถ้าลอยและเถ้าซานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และโรงงานน้ำตาลตามลำดับ ต่อค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เถ้าซานอ้อยที่ผ่านกระบวนการบดเป็นเวลา 12 ชั่วโมงและเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ10 และ 20 โดยน้ำหนัก โดยทำการศึกษาค่ากำลังอัดการดูดซึมน้ำ ความพรุนและความหนาแน่นที่ระยะเวลาในการบ่ม7, 14, 28 และ 90 วัน และเปรียบเทียบกับชุดควบคุม จากการทดลองพบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเถ้าซานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกับชุดมอร์ตาร์ควบคุมที่ทุก ๆ ระยะเวลาในการบ่ม นอกจากนี้ค่าการดูดซึมน้ำและความพรุนของมอร์ตาร์ก็มีค่าลดลงตามระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการใช้งานเถ้าลอยร่วมกับเถ้าซานอ้อนบดละเอียดสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้

คำสำคัญ: กำลังอัด / เถ้าซานอ้อยบดละเอียด / เถ้าลอย /ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

Abstract

The purpose of this study is to examine the effect of fly ash and sugarcane bagasse ash, by-products of coal fired electric generating and sugar factories respectively, on the compressive strength of Portland cement mortar. In this research, sugar cane bagasse ash after grinding for 12 hours (GSCBA) and fly ash (FA) were used as cement replacement at 10 and 20 percent by weight. Compressive strength, water absorption, porosity and density of the mortars blended with ashes after curing in water at 7, 14, 28 and 90 days were investigated and then compared to the control mortar. The compressive strength result showed that the mortar with 5 wt% FA and 5 wt% GSCBA was found to be closed to the control mix for all aging times. Moreover, the water absorption and the porosity of the mortars were presented to decrease with increasing curing time. Therefore, the combination of fly ash and ground sugarcane bagasse ash would use as cement replacement in concrete production.

Keywords: Compressive strength/ Ground sugarcane bagasse ash/ Fly ash / Pozzolanic reaction

*Corresponding author. E-mail:thanongsakno@nu.ac.th

1. บทนำ

อ้อยเป็นวัสดุดิบหลักในการผลิตน้ำตาลทราย โดยหลังจากกระบวนการผลิตจะเหลือชานอ้อยซึ่งจะถูกนำมาผ่านกระบวนการเผาเพื่อนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล และหลังจากกระบวนการการเผาแล้วจะเหลือเป็นเถ้าชานอ้อย (Sugarcane bagasse ash; SCBA) โดยเถ้าชานอ้อยส่วนใหญ่จะถูกนำมาทิ้งในหลุมฝังกลบซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก[1-2]

เถ้าลอย (Fly Ash; FA) เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับไฟฟ้าสถิตจะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อเก็บไว้ไปใช้ต่อไป ในบางกรณีที่เผาถ่านหินด้วยอุณหภูมิซึ่งสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าถ่านหิน (ประมาณ 1500°C หรือ สูงกว่า) เถ้าถ่านหินจะหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้นทำให้มีน้ำหนักมาก และตกลงสู่ก้นเตา จึงเรียกกว่าเถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom Ash) การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ภาคที่เหลือจากการเผาถ่านหินนี้ประกอบด้วย เถ้าลอยประมาณร้อยละ 80 และเถ้าหนักอีกประมาณร้อยละ 20

ทั้งเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยต่างก็มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งในทางวิศวกรรมโยธาถือได้ว่าเหมาะสมจะนำมาใช้ทำเป็นวัสดุปอซโซลานในการทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง ซึ่งในการผลิตปูนซีเมนต์จะใช้พลังงานค่อนข้างสูงและยังปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นก๊าซที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกทำให้โลกร้อนขึ้นด้วย[3]แต่อย่างไรก็ตามเถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรงยังไม่เหมาะสมจะนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเถ้าชานอ้อยมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการบด เพื่อเพิ่มศักยภาพของเถ้าชานอ้อยในการนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ได้โดยที่ไม่ทำให้สมบัติของปูนซีเมนต์ด้อยลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาอิทธิพลของการใช้งานเถ้าลอยร่วมกับเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในงานคอนกรีต

2. วิธีการศึกษา

2.1การเตรียมวัสดุและอัตราส่วนผสม

นำเถ้าลอยที่ได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะมาเก็บไว้ในภาชนะให้มิดชิด และนำเถ้าชานอ้อยมาบดด้วยเม็ดบด (Ball mill) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการบดนำไปเก็บในภาชนะแล้วปิดให้มิดชิดเพื่อป้องกันความชื้นซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าชานอ้อยที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติโดยวิธีการบดเป็นเวลา 12 ชั่วโมง, เถ้าลอย มาทดแทนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก แล้วทำการผสมทั้งที่เป็นปูนซีเมนต์เพสส์ และมอร์ตาร์(มอร์ตาร์ เป็นส่วนผสมระหว่าง ทราย น้ำ ปูนซีเมนต์และน้ำยาผสมคอนกรีตโดยจะถูกนำไปใช้สำหรับงานเทพื้น และงานฉาบ ที่ไม่ต้องการกำลังอัดที่สูงมาก[4])แล้วนำไปบ่มในน้ำที่7, 14, 28 และ90วันโดยสัดส่วนผสมแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนการผสมสูตรต่างๆ

สูตร	วัสดุประสาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			อัตราส่วนน้ำต่อ	อัตราส่วนทราย
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าชานอ้อยบด	เถ้าลอย	วัสดุประสาน	ต่อวัสดุประสาน
PC	100	0	0	50	250
20FA	80	0	20	50	250
15FA/5GSCBA	80	5	15	50	250
10FA/10GSCBA	80	10	10	50	250
5FA/15GSCBA	80	15	5	50	250
20GSCBA	80	20	0	50	250

10FA	90	0	10	50	250
5FA/5GSCBA	90	5	5	50	250
10GSCBA	90	10	0	50	250

2.2การเตรียมชิ้นงานเพสต์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหล่อชิ้นงานที่เป็นเพสต์ (ปูนซีเมนต์ผสมน้ำ) ด้วยแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตรและสูง3.5 เซนติเมตร ซึ่งส่วนผสมที่ใช้ในการผสมเพสต์โดยจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5:1 ทุกสัดส่วนการผสม ชิ้นงานหลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมงแล้ว จะถูกถอดจากแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำที่ 7 วันและ 28 วันเมื่อครบระยะเวลาในการบ่ม ชิ้นงานจะถูกนำมาแช่ไว้ในอะซีโตน 24 ชั่วโมงเพื่อหยุดปฏิกิริยาหลังจากนั้นก็นำไปอบให้แห้งเป็นระยะเวลา 1-2 วันแล้วทำการบดตัวอย่างเพสต์ให้ละเอียดเพื่อที่จะนำไปตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction;XRD)

2.3 การเตรียมชิ้นงานที่เป็นมอร์ตาร์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหล่อชิ้นงานที่เป็นมอร์ตาร์โดยการใช้แบบหล่อขนาด 5×5×5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งส่วนผสมที่ใช้ในการหล่อมอร์ตาร์โดยการหล่อมอร์ตาร์จะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)เท่ากับ 0.5 :1และ อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1:2.5 (ดังแสดงในตาราง 1) ชิ้นงานที่หล่อเสร็จแล้วจะถูกถอดออกจากแบบเมื่อผ่านไปแล้ว 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7,14,28 และ 90 วัน ตามลำดับเมื่อครบกำหนดเวลาที่กำหนดแล้วชิ้นงานมอร์ตาร์จะถูกนำไปทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 และทดสอบความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความพรุนตามมาตรฐาน ASTM C 642-06 โดยค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบสัดส่วนละ 3 ก้อนตัวอย่าง

3. ผลและอภิปราย

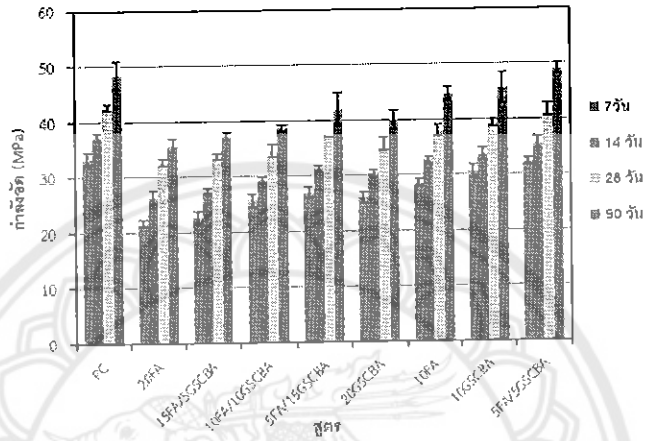
3.1 ค่ากำลังอัด

ในการทดลองการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมเถ้าฉานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอย(รูปที่ 1) โดยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมซึ่งพบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าฉานอ้อยบดละเอียดจะมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนเดียวกันทุกระยะการบ่ม และเมื่อพิจารณามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าฉานอ้อยบดละเอียดร่วมกับเถ้าลอย ในอัตราการผสมเท่าๆกันพบว่ามีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าฉานอ้อยบดละเอียดในอัตราการผสมร้อยละ 5 และเถ้าลอยในอัตราการผสมร้อยละ 5(สูตร5FA/5GSCBA) มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม ณ ทุกช่วงระยะเวลาการบ่ม และเมื่อพิจารณากำลังอัดของทุกอัตราการแทนที่ทั้งเถ้าฉานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอยจะพบว่ากำลังอัดที่ระยะเวลาในการบ่มการบ่ม 7 วันจะมีค่ากำลังอัดน้อยที่สุดแต่เมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้นค่ากำลังอัดก็จะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานนิกของเถ้าฉานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอย ซึ่งเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรง ให้กับมอร์ตาร์โดยซิลิกอนไดออกไซด์ในวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น [5-6]ซึ่งค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่มจะเพิ่มขึ้นทั้งมอร์ตาร์ควบคุมและมอร์ตาร์ที่มีการผสมเถ้าฉานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอย อย่างไรก็ตามเค่ากำลังของมอร์ตาร์ทุกตัวที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน มีค่ากำลังอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับระยะเวลาการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน

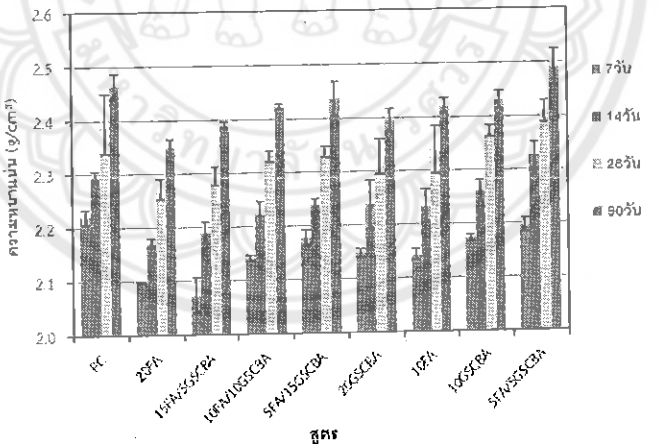
3.2 ค่าความหนาแน่น

จากการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าฉานอ้อยบดละเอียดจะมีค่าสอดคล้องและมีทิศทางเดียวกับค่ากำลังอัด คือจะมีค่าความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นทั้งนี้ความหนาแน่นที่เพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาเกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปฏิกิริยาปอซโซลานนิก[5]ของเถ้าลอยและเถ้าฉานอ้อยบดละเอียด

โดยอัตราการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 5 และเถ้าลอยร้อยละ 5 พบว่ามีความหนาแน่นที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์สูตรอื่นๆ และยังมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมโดยมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.18 - 2.47 g/cm^3(รูปที่ 2)นอกจากนี้ยังพบว่าในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุปอซโซลานร้อยละ 10 มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และในการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดและการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดร่วมกับเถ้าลอยจะมีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว



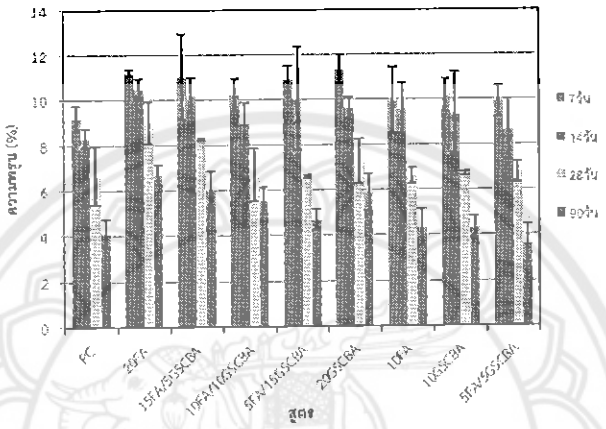
รูป1 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ต่อปริมาณการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่ระยะเวลาการบ่ม7, 14, 28 และ 90วัน



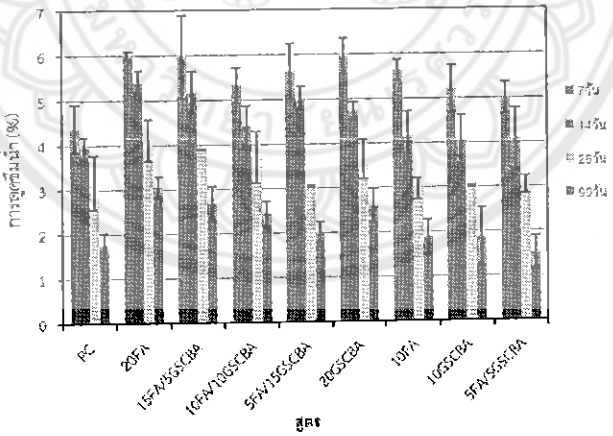
รูป2 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ต่อปริมาณการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่ระยะเวลา7, 14, 28 และ 90วัน

3.4 ความพรุนและการดูดซึมน้ำ

จากการทดลองพบว่าค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์มีค่าสอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกัน และแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นและกำลังอัด ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น(รูปที่3และ 4) ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำและปฏิกิริยาปอซโซลานนิก[5]ของซิลิกาที่มีอยู่ในเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยบดละเอียดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ10 ของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอย พบว่ามีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม และยังมีค่าที่ต่ำกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20



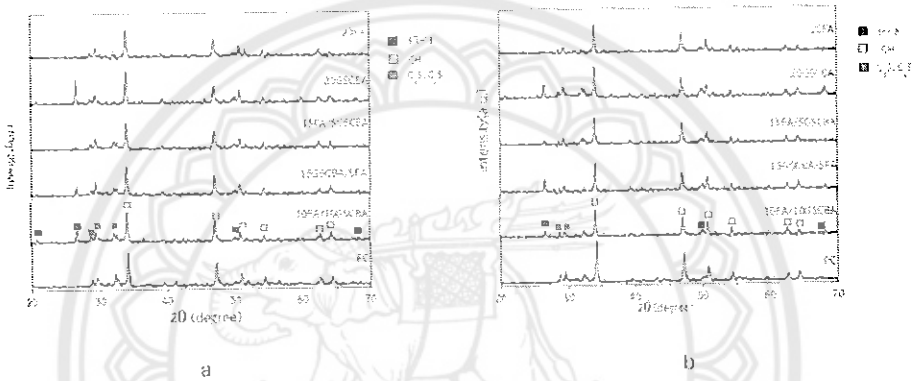
รูป 3 ค่าความพรุนของมอร์ตาร์ต่อปริมาณการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 และ 90วัน



รูป 4 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ต่อปริมาณการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ที่ระยะเวลา7, 14, 28 และ 90วัน

3.5 โครงสร้างเฟสของปูนซีเมนต์เพสต์

จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์(XRD) ของซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีเมนต์เพสต์ที่มีการผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอย ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 7และ 28 วัน พบว่าเฟสหลักของการทำปฏิกิริยาจะเป็นเฟสของแคลเซียมไฮดรอกไซด์(CH) ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยปรากฏในปูนเพสต์ทุกสูตร และสอดคล้องกับพีคแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามฐานข้อมูล JCPDF หมายเลข 04-0733 นอกจากนี้ยังพบเฟสแคลเซียมซิลิเกต(C_3S, C_2S) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ซึ่งเหลือในส่วนของปูนเพสต์ที่มีการผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอยจะพบปรากฏพีคของซิลิกาเพิ่มขึ้นมา(2θประมาณ 28 องศา) เนื่องจากมีการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นของซิลิกา(silica) แต่พิจารณาระยะเวลาในการบ่มที่ 28 วัน พบว่าปูนเพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยจะพบพีครของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) มีความเข้มที่น้อยกว่าพีคที่พบในปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาในเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้พบเฟสแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่น้อยลง (รูป 5)



รูป 5 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียดและเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 20 ณ ระยะเวลาในการบ่ม(a) 7วันและ (b)28 วัน

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาพบว่าซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดผสมกับเถ้าลอยจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยบดละเอียดเพียงอย่างเดียว ในอัตราส่วนการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัด, ความหนาแน่น, ความหรุน, และการดูดน้ำที่ใกล้เคียงกับค่าของมอร์ตาร์ควบคุม จากการทดลองหาค่า สูตร5FA/5GSCBA เป็นสูตรที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นในงานทดลองนี้ และสามารถนำไปใช้งานได้จริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้โดยได้รับเงินสนับสนุนจากเงินรายได้ มหาวิทยาลัยนเรศวร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบกำลังอัด และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยในครั้งนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] รัฐพล สมนา และ ชัย จาคุรพิทักษ์กุล(2554) "การใช้เถ้าฝานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัดการรีมผ่านน้ำและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า", วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ34.4 (2554)369-380.

[2] พัชรินทร์วรธนกุล(2550)"ฝานอ้อย", เทคโนโลยีชีวภาพ 36 (2010) 39 –43.

[3] สหลาภ หอมวุฒิวงศ์ และ นาวิน เกษุนทด"การประเมินการสึกกร่อนของคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลาน",วิศวกรรมสาร มช39.1 (2555) 23-34.

[4] วิรัชวาล เศรษฐบุตร (2540) "คอนกรีตเทคโนโลยี: พิมพ์ครั้งที่ 4", คอนกรีตผสมเสร็จ, กรุงเทพ.

[5] อาทิมา ดางจันทร์ และ สุวิมล สัจจาณิรย์(2548). "คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าฝานอ้อย", เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 2.สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ชลบุรี, 6-10.

[6] S. Mindess, J.F. Young and D.Darmin, "Concrete: 2nd Edition", Prentice Hall, Upper Saddle River, USA. 2003.

ME-6-10

การใช้ประโยชน์เถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยในงานคอนกรีต

Utilization of Sugarcane Bagasse Ash and Fly Ash in Concrete

ณัฐวงค์ โพธิ์สุภานันท์[1], พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง[2,3], วัชรพงษ์ วงค์เขียว[4], ปาณิสรา ดีเสือ[1] และ ทนงศักดิ์ โนไชยา[1,3,*]

[1] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

[3]สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านฟิสิกส์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

[4]โปรแกรมฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ: thanongsakno@nu.ac.th, Tel: 055-963524, Fax: 055-963501

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากำลังอัดและความทนทานของปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อย โดยทำการเผาแคลไซน์เถ้าชานอ้อยที่อุณหภูมิ 600°C และทำการบดด้วยเม็ดบอลเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อทำเป็นชิ้นงานมอร์ตาร์ เพื่อศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แช่ในน้ำ และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จากผลการทดลองพบว่าค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยมีค่ามากกว่าร้อยละ 75 ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 ส่วนผลของความต้านทานซัลเฟตพบว่าเถ้าลอยมีประสิทธิภาพในการต้านทานซัลเฟตมากกว่าเถ้าชานอ้อย อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตได้

คำหลัก: วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย เถ้าชานอ้อย กำลังอัด ความทนทาน

Abstract

In this research, effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and fly ash (FA) on compressive strength and durability of Portland cement mortars were investigated. In this experiment, SCBA was firstly calcined at the temperature of 600°C and then ground by ball mill for 12 hours. Both of ashes were used as cement replacement to produce cement mortar. Compressive strength of the mortars after curing in water and magnesium sulfate solution were studied. The results show that strength activity indexes of the mortars blended with SCBA and FA were higher than 75%, indicating as a good pozzolan for construction as following the standard of ASTM C618. Moreover, the sulfate resistance of fly ash is found to be more effective than bagasse ash. However, the use of SCBA and FA was appropriate to replace Portland cement in concrete.

Keywords: Pozzolan; Fly ash; Sugarcane bagasse; Compressive strength; Durability

1. บทนำ

ในงานการก่อสร้างอาคาร คอนกรีตถือได้ว่าเป็นวัสดุหลักที่จะถูกเลือกใช้อันดับแรก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีต้นทุนการผลิตต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ และยังมีสมบัติต่าง ๆ ที่ดี อย่างไรก็ตามในการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้หินปูน และพลังงานที่ใช้ในการทำให้วัตถุดิบหลอมรวมกลายเป็นปูนเม็ด [1-2] ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจะสูงถึง 1,400-1,500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สูงขนาดนี้หมายถึงพลังงานที่ต้องใช้อย่างมหาศาล จึงมีงานวิจัยหลากหลายเพื่อที่จะลดพลังงานสิ้นเปลืองเหล่านี้ เช่น การลดอุณหภูมิในการผลิต รวมถึงการหาวัสดุที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ [2-4] ซึ่งในทางวิศวกรรมจะเรียกวัสดุเหล่านี้ว่า วัสดุปอซโซลาน ได้แก่วัสดุจำพวกเถ้าจากการเผาไหม้ในโรงงานอุตสาหกรรม และเถ้าจากภาคการเกษตร ซึ่งจะมีองค์ประกอบเป็นซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เถ้าซานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการเผาซานอ้อยในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลโดยใช้ซานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซานอ้อยถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ดีเพราะส่งผลต่อมลภาวะทางอากาศน้อยมาก โดยหลังจากกระบวนการเผาแล้วเถ้าส่วนใหญ่จะถูกนำไปทิ้งหรือนำเอาไปทำปุ๋ย หรือนำไปใช้เพื่อปรับสภาพดินที่เป็นกรด ในทางวิศวกรรมโยธาเถ้าซานอ้อยถือได้ว่าเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ในงานคอนกรีตได้ เพราะเป็นเถ้าที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) สูงซึ่งโดยทั่วไปควรมีมากกว่าร้อยละ 50 มีความละเอียดสูงและไม่เป็นผลึก โดยปกติแล้วเถ้าซานอ้อยจะมีรูพรุนสูงจึงมีความต้องการน้ำมากเมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต ทำให้การใช้งานเถ้าซานอ้อยค่อนข้างลำบาก อีกทั้งยังส่งผลต่อกำลังอัดอีกด้วย ดังนั้นก่อนที่จะนำเถ้าซานอ้อยมาใช้จึงต้องลดขนาดอนุภาคด้วยกระบวนการบด (Ball mill) ก่อนเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาอีกทั้งการบดจะทำให้ความพรุนของเถ้าซานอ้อยลดลงด้วย [3, 5]

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 900-1,100°C เพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในการเผาถ่านหินเถ้าส่วนที่มีขนาดเล็กจะลอยไปกับไอร้อน เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้หลุดออกไปสู่ภายนอกเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบโรงงาน [6] ด้วยความกลมและขนาดที่เล็ก อนุภาคเถ้าลอยจึงเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่นที่ดี ในลักษณะของ Ball bearing ในการผสมคอนกรีตจึงสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าที่ใช้ในการผสมคอนกรีตปกติ นอกจากนี้คุณสมบัติที่เป็นทรงกลมขนาดเล็กของเถ้าลอยจะช่วยอุดแทรกช่องว่างระหว่างเม็ดหิน ทราย และปูนซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี ทำให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่น สารละลายต่างๆจะแทรกซึมเข้าไปทำลายเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้คอนกรีตชนิดที่ผสมกับเถ้าลอยมีความคงทนต่อการทำลายของสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนนั้น แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นของเถ้าลอยจะพัฒนาได้ช้ากว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา แต่จะมีความแข็งแรงกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดาในระยะยาว [1, 3, 6] ซึ่งในหลายงานวิจัยได้ทำการปรับปรุงคุณข้อด้วยของเถ้าลอยในส่วนนี้ เช่นการบดให้เถ้าลอยมีความละเอียดก่อนการใช้งาน [7] หรือจะใส่สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มกำลังอัดในช่วงต้นก็ตาม [8]

อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้งานเถ้าซานอ้อยร่วมกับเถ้าลอยในงานคอนกรีตยังมีไม่มากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความมุ่งหมายที่จะ

ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยต่อกำลังอัด และความทนทานต่อซัลเฟตของมอร์ตาร์ โดยใช้เถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 นอกจากนี้ผลจากการใช้เถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์จะช่วยลดพลังงานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอีกด้วย

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุเหลือใช้ (by-product) จากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ เถ้าชานอ้อยซึ่งได้จากโรงงานผลิตน้ำตาลในท้องถิ่นของอำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งได้จากการเผาชานอ้อยเพื่อให้ความร้อนแก่หม้อต้มน้ำตาลในโรงงาน โดยเถ้าชานอ้อยที่ได้ต้องนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาแคลไซน์และบด [9] และเถ้าลอยได้มาจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยนำเถ้าทั้งสองมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อผลิตคอนกรีตสำหรับโครงสร้าง

2.2 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างของวัสดุที่จะนำมาให้ดแทนปูนซีเมนต์อร์ตแลนด์ ได้แก่ เถ้าลอย และเถ้าชานอ้อย ซึ่งจะต้องนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ โดยทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง [9] แล้วนำเถ้าชานอ้อยที่ได้มาบดด้วยเม็ดบด (ball mill) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปดูลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) รุ่น LEO 1455VP

2.3 การเตรียมชิ้นงานมอร์ตาร์

เตรียมชิ้นงานมอร์ตาร์ (ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและทราย) โดยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและเถ้าลอยในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5 และใช้อัตราส่วนทรายแม่น้ำต่อวัสดุประสาน (s/b) เท่ากับ 2.5 โดยทำการหล่อในแบบหล่อมอร์ตาร์ขนาด 5X5X5 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นทำการถอดแบบหลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำสะอาด และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อไป

2.4 การศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์

ชิ้นงานมอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มในน้ำ นำไปทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลา 7, 14, 28 และ 90 วัน ด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด (compressive strength tester) โดยใช้อัตราแรงในการกดอยู่ในช่วง 0.9-1.8 kN/s ตามมาตรฐาน ASTM C109 [10] ซึ่งในแต่ละช่วงการทดสอบจะใช้มอร์ตาร์จำนวน 3 ก้อน จากนั้นนำกำลังอัดที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย และเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม (สูตร PC)

2.4 การศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

ชิ้นงานมอร์ตาร์ที่แกะออกจากแบบแล้วนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นงานมอร์ตาร์มาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 10 % เป็นระยะเวลา 60, 90 และ 120 วัน โดยจะทำการเปลี่ยนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตทุก ๆ 30 วัน เพื่อควบคุมความเข้มข้นของสารละลายลดลง เมื่อครบกำหนดเวลาจะนำชิ้นงานมอร์ตาร์มาทดสอบกำลังอัดซึ่งในแต่ละช่วงการทดสอบจะใช้มอร์ตาร์จำนวน 3 ก้อน จากนั้นนำกำลังอัดที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและทำการเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ในงานวิจัย

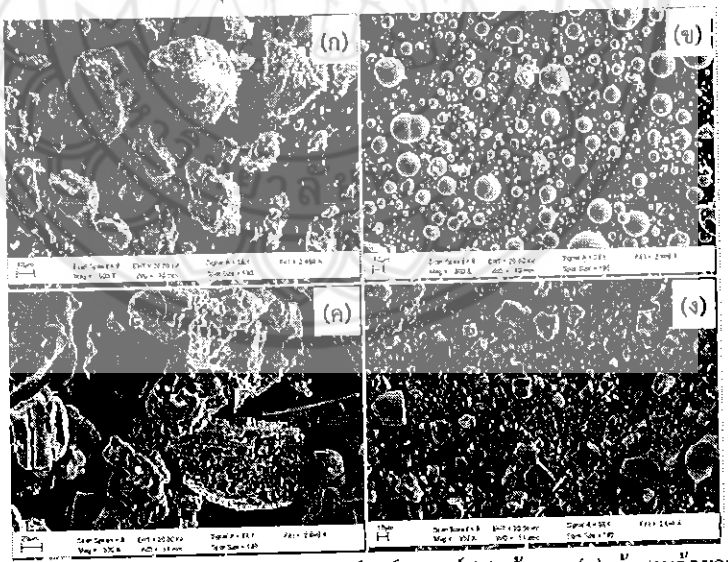
สูตร	*สัดส่วน (เปอร์เซ็นต์)				
	PC	FA	SCBA	Water	Sand
PC	100	0	0	50	250
20FA	80	20	0	50	250
10FA10SCBA	80	10	10	50	250
20SCBA	80	0	20	50	250

*คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

3. ผลการทดลอง

3.1 โครงสร้างทางจุลภาคของวัตถุดิบ

การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของวัตถุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเทคนิค SEM รูปที่ 1(ก) เป็นภาพถ่าย SEM ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเห็นว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2-50 ไมโครเมตร รูปที่ 1(ข) เป็นภาพถ่าย SEM ของอนุภาคเถ้าลอย พบว่ามีลักษณะเป็นทรงกลม ผิวเกลี้ยง และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2-40 ไมโครเมตร รูปที่ 1(ค) เป็นภาพถ่าย SEM ของเถ้าขานอ้อยที่ได้จากโรงงานพบว่าเถ้าขานอ้อยมีรูปร่างไม่แน่นอน ผิวขรุขระ มีรูพรุนค่อนข้างมาก มีขนาดอนุภาคที่หลากหลาย (ประมาณ 20 - 200 μm) ซึ่งถ้านำมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะต้องใช้ปริมาณน้ำในการผสมค่อนข้างมาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยตรง [5, 9] และรูปที่ 1(ง) ภาพถ่าย SEM ของเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และบด 12 ชั่วโมง จะเห็นว่าเถ้าขานอ้อยที่ได้มีขนาดเล็กลง และมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน โดยพบว่าความพรุนนั้นมีปริมาณที่ค่อนข้างน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด เป็นผลเนื่องมาจากการบดที่เปลี่ยนความพรุนภายในให้ไปเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสแทน



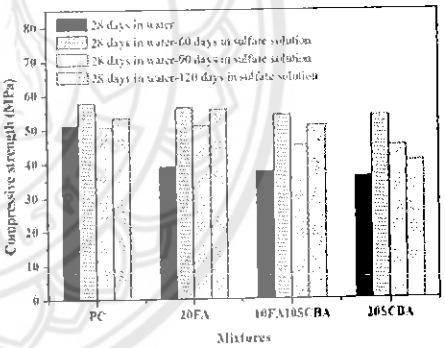
รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของ (ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ข) เถ้าลอย (ค) เถ้าขานอ้อยจากโรงงาน และ (ง) เถ้าขานอ้อยที่ผ่านการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส และบด 12 ชั่วโมง

ควบคุม (84-93%) เป็นผลมาจากช่วงระยะเวลาการบ่มนี้ ปูนซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอย [2, 8] ทำให้กำลังอัดในช่วงนี้ต่ำลง เมื่อระยะเวลาในการบ่มมากขึ้นจะเห็นว่ามีเพียงกำลังอัดสัมพัทธ์ของเถ้าลอย (20FA) มีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (103%) ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดขึ้น ซึ่งไปเพิ่มเฟสยึดประสาน (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต) ในมอร์ตาร์ จึงทำให้กำลังอัดที่ระยะยาวสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม [11-12]

3.3 ผลของเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยต่อการต้านทานซัลเฟต

ผลของความทนทานต่อซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนต่างๆ ที่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนัก โดยวัดจากค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาในการแช่ในสารละลายที่ 60, 90 และ 120 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่ามอร์ตาร์ในทุกอัตราส่วน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 40-50 เมกะปาสคาล โดยมอร์ตาร์ควบคุมมีค่ามากที่สุด และเมื่อนำชิ้นงานมอร์ตาร์ไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่ออีก 60 วัน พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกสูตรมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากซัลเฟตอิออนจากสารละลายเข้าไปทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้เป็นเฟสเอททริงไกท์ (Ettringite) ซึ่งเป็นเฟสที่ช่วยยึดประสานในมอร์ตาร์ [1, 11] แต่เมื่อแช่ชิ้นงานมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมต่ออีก 90 วัน และ 120 วัน พบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟตก่อให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายลดลง ส่งผลให้เกิดความไม่อยู่ตัวของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) โดยจะเกิดการสลายตัวแล้วเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างของ M-S-H [1, 12] ซึ่งตัวของเฟส M-S-H ไม่ใช่ตัวที่จะก่อให้เกิดการประสานกันในเนื้อมอร์ตาร์ จึงทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของกำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน (โดยคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์) โดยแช่ชิ้นงานในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่ระยะเวลา 60, 90 และ 120 วัน พบว่าค่ากำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม แต่ก็ไม่ได้ต่ำกว่า 75% ของกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม อย่างไรก็ตาม พบว่ามอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20 มีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม มีค่า 101 และ 104% ที่ระยะเวลาในการแช่ในสารละลาย 90 และ 120 วันตามลำดับ



รูปที่ 3 ผลของเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยต่อการต้านทานซัลเฟตของปูนมอร์ตาร์

ตารางที่ 3 กำลังอัดสัมพัทธ์เทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอย แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 10%

สูตร	กำลังอัดสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)		
	60 วัน	90 วัน	120 วัน
PC	100	100	100
20FA	98	101	104
10FA10SCBA	94	89	96
20SCBA	94	89	76

3.4 ผลของใช้เถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยต่อการลดการใช้พลังงาน

เถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยถือได้ว่าเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเอาเถ้าทั้งสองมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ในการผลิตคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้าง ผลที่ได้พบว่าเถ้าทั้งสองสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลและการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตได้เป็นอย่างดี ซึ่งในสภาพแวดล้อมที่พบปริมาณซัลเฟตสูงคือ บริเวณดินเค็มพบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และบริเวณชายฝั่งของประเทศไทย ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีต และยังทำให้อายุการใช้งานของคอนกรีตลดลงอีกด้วย จากปัญหาดังกล่าวการใช้เถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยสามารถลดการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากซัลเฟตได้ ผลประโยชน์ทางอ้อมอีกประการหนึ่งของการใช้งานเถ้าคือเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งก็เป็นการลดพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ลง กล่าวคือในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นต้องใช้พลังงานอย่างมหาศาล ได้แก่ พลังงานในการทำเหมืองหินปูน การบดย่อย อีกทั้งกระบวนการเผาที่ต้องการอุณหภูมิสูงถึง 1,450 องศาเซลเซียส เพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบของวัตถุดิบให้หลอมรวมกลายเป็นเฟสของปูนซีเมนต์ [1] ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านการยึดประสานเมื่อผสมกับน้ำทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยนี้ได้นำเอาวัสดุเหลือทิ้งในท้องถิ่นซึ่งได้แก่เถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ต่อกำลังอัดและความต้านทานต่อซัลเฟต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าเถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการบดหรือเผาแคลไซน์ก่อน ส่วนเถ้าลอยสามารถนำไปใช้งานได้เลย

จากการศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนต่างๆ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดพบว่ามอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนผสมมีค่าเกินกว่าร้อยละ 75 ตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งสามารถใช้ในงานก่อสร้างจริงได้

จากการศึกษาความทนทานต่อซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยที่บ่มในสารละลายซัลเฟต พบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้โดยได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ทางด้านเครื่องมือการวิเคราะห์ผลในการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบกำลังอัด และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยในครั้งนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2544), คอนกรีตเทคโนโลยี. *[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา*:http://www.cpac.co.th/techno/conbook/ch1.html, เข้าดูเมื่อวันที่ 21/04/2558.

[2] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.

[3] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร. (2554). การใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 111-117.

[4] Ferraris, C. Garboczi, E. Stutzman, P. Winpigler, J. and Clifton, J. (2000). Influence of silica fume on the stresses generated by alkali-silica reaction. Cement Concrete and Aggregate, Vol. 22. pp. 73-78.

[5] รัฐพล สมนา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554). การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า, วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ34, หน้า 369–380.

[6] ปริญญา จินดาประเสริฐ (2553), เถ้าลอยในงานคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

[7] Chindaprasirt, P. Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T. (2007). Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement pastes. Construction and building materials, Vol. 21. pp. 1534-1541.

[8] Nochaiya, T. Wongkeo, W. and Chaipanich, A. (2010). Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland-fly ash silica fume concrete. Fuel, Vol. 89. pp. 768-774.

[9] ณัฐวงศ์ โพธิ์ศุภานันท์, สวนีย์ วนาลีสิน, พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง และ ทนงศักดิ์ โนไชยา. (2557). ผลของอุณหภูมิแคลไซน์ต่อสมบัติปอซโซลานิกของเถ้าขานอ้อย. การประชุมวิชาการระดับชาติ "วิทยาศาสตร์วิจัย" ครั้งที่ 6 มหาวิทยาลัยบูรพา, วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยบูรพา, หน้า 205-210.

[10] ASTM C109 (2001). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens).

[11] Malhotra, V.M. and Mehta, P.K. (1996). Pozzolanic and cementitious materials, Gordon and Breach Publishers, Netherlands.

[12] Jayant D. Bapat. Mineral (2013), Admixtures in Cement and Concrete, Taylor & Francis Group, USA.