



รายงานการวิจัย

การพัฒนาวัสดุอีโพอที้เมอร์จากเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย

The Development of Rice husk ash and Bagasse Ash based geopolymeric Materials

สำเร็จ รักซ้อน

นายนิโรจน์ เงินพรหม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณ ประจำปี พ. ศ. 2553

รายงานการวิจัย

การพัฒนาวัสดุอีโพลีเมอร์จากเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย

The Development of Rice husk ash and Bagasse Ash based geopolymeric Materials

ดร. สำเร้ง รักซ้อน (Dr. Sumrerng Rukzon)

นายนิโรจน์ เงินพรหม (Mr. Nirojn Ngenprom)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณ ประจำปี พ. ศ. 2553



กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้อุดหนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2553 ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จตามวัตถุประสงค์ และขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ ที่ให้เกียรติเป็นที่ปรึกษางานวิจัยในการให้ความรู้ แนวทางการศึกษา ตลอดจนการชี้แนะถึงวิธีการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในขณะดำเนินการวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์ในทางที่ดีมาโดยตลอด จนทำให้มีความรู้ประสบการณ์เพิ่มขึ้นอย่างมาก และดำเนินการแล้วเสร็จในระยะเวลาต่อมา

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนสถานที่สำหรับงานวิจัย ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์ต่องานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างมาก ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำสำนักงานคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม เจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยและพัฒนา ตลอดจนหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา ในการช่วยเหลือด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ ขอขอบคุณ โรงงานน้ำตาล สิงห์บุรี ที่อนุเคราะห์ให้ช่างอ้อยในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณคุณนัยนา เทียงภักดี ผู้ช่วยวิจัยในการจัดเตรียมวัสดุ สารเคมี สำหรับทดสอบตั้งแต่ต้นจนเสร็จงาน

ดร. สำเริง รักซ้อน

หัวหน้าโครงการ

นายนิโรจน์ เงินพรหม

ผู้ร่วมวิจัย

บทคัดย่องานวิจัย

ชื่อโครงการ

(ภาษาไทย) การพัฒนาวัสดุจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย

(ภาษาอังกฤษ) The Development of Rice husk ash and Bagasse Ash based geopolymeric Materials

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปี 2553 จำนวนเงิน 605,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2552 ถึง กันยายน 2553

ชื่อผู้วิจัย

ดร. สำเริง รักซ้อน¹

นายนิโรจน์ เงินพรหม²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพในการใช้เถ้าทิ้งจากผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมเป็นวัสดุจีโอโพลีเมอร์ งานวิจัยนี้ศึกษาการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์ผสมเถ้าแกลบ (RA) และเถ้าชานอ้อย (BA) ตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์ใช้ค่าสารละลายต่อเถ้าคองที่เพื่อควบคุมการทดสอบค่าการไหลผ่าน ศึกษากำลังอัด ความพรุน การแทรกซึมคลอไรด์ ความลึกคลอไรด์แบบเร่ง สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ความลึกคลอไรด์แบบธรรมชาติ และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริก

ผลทดสอบพบว่าความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์มีค่าการไหลผ่านอยู่ระหว่างร้อยละ 110-115 โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ การเพิ่มน้ำในส่วนผสมส่งผลให้ความสามารถทำงานของมอร์ตาร์ดาร์ดีขึ้น จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์เถ้าแกลบ มีกำลังอัดสูง เมื่อใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์เถ้าแกลบใช้เท่ากับ 15 โมลาร์ อย่างไรก็ตามจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์เถ้าชานอ้อย มีกำลังอัดสูง เมื่อใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์เถ้าแกลบใช้เท่ากับ 10 โมลาร์ การใช้เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยในส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์ส่งผลดีต่อกำลังอัด ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และต้านทานกรดได้ดี การต้านทานคลอไรด์และสารละลายกรดดีขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก

คำสำคัญ: กรด, คลอไรด์, เถ้าแกลบ, เถ้าชานอ้อย, จีโอโพลีเมอร์, มอร์ตาร์ดาร์

ABSTRACT

This research studies the potential for using waste ash from industrial and agricultural by-products as a geopolymer material. This paper presents a study of the resistance to chloride penetration and resistance to sulfuric acid of geopolymer mortar containing ground rice husk ash (RA) and ground bagasse ash (BA). Geopolymer mortars with constant liquid to ash ratio and similar flow were used for the tests. Compressive strength, porosity, chloride penetration test, Rapid migration test of chloride depth, chloride ion diffusion coefficient, immersion test of chloride depth and weight loss with impressed sulfuric acid were investigated.

Test results show that the workable flow of geopolymer mortar was in the range of 110–115% and was dependent on the ratio by mass of sodium silicate to NaOH and the concentration of NaOH. Extra water was used to improve the workability. In case of rice husk ash geopolymer mortar, the geopolymer mortars with high strengths were obtained with concentration of NaOH of 15M with the sodium silicate to NaOH ratio by weight of 2.5. However, the bagasse ash geopolymer mortars with high strengths were obtained with concentration of NaOH of 10M with the sodium silicate to NaOH ratio by weight of 2.5. The use of rice husk ash and bagasse ash produces geopolymer mixes with good strength and resistance to acid and chloride penetration. The resistance to acid and chloride penetration is higher with an increase in the sodium silicate to NaOH ratio by weight of 2.5.

Keywords: Acid, Chloride, Rice husk ash, Bagasse ash, Geopolymer, Mortar

¹ ปรินญาเอก วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตดุสิต กรุงเทพฯ

โทร. 0879454133 remng197@rmutp.ac.th

² ปรินญาโท วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตดุสิต กรุงเทพฯ

โทร. 022829009

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และหรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วัสดุพอลิไซลน	5
2.2 ปฏิกิริยาพอลิไซลน	5
2.3 วัสดุอีโพลิเมอร์	6
2.4 กลไกการเกิดอีโพลิเมอร์	8
2.5 วัสดุอีโพลิเมอร์จากถ่านหิน	9
2.6 วัสดุอีโพลิเมอร์จากถ่านหิน	11
2.7 วัสดุอีโพลิเมอร์จากคิงขาวเผา	16
2.8 ความทนทานของวัสดุอีโพลิเมอร์	21
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุพอลิไซลน	25
บทที่ 3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	31
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	31
3.2 สัญลักษณ์วัสดุและตัวอย่างทดสอบ	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	46
4.1 คุณสมบัติของเก้าอี้และเก้าอี้ขานอ้อย	46
4.2 การทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์จากเก้าอี้และเก้าอี้ขานอ้อย	51
4.3 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์	55
4.4 ความพรุนของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์	62
4.5 การต้านทานคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์	64
4.9 การต้านทานการกัดกร่อนของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ในสารละลายกรด	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
5.1 สรุปผลการวิจัย	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก ก แผนงาน โครงการวิจัย	80
ภาคผนวก ข ประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตมอร์ตาร์ 1 ลบ.ม	81
ภาคผนวก ค ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์	82
ประวัติและผลงานวิจัยที่สำคัญของนักวิจัย	90

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	การสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลีเมอร์ในกรดซัลฟูริกและอะซิติก ความเข้มข้นร้อยละ 5 [23]	21
ตารางที่ 3.1	องค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	34
ตารางที่ 3.2	ตารางแสดงคุณสมบัติของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ที่ใช้ในการทดสอบ	34
ตารางที่ 3.3	ส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ ด้วย NaOH = 10M	43
ตารางที่ 3.4	ส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ ด้วย NaOH = 15M	44
ตารางที่ 3.5	ส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อย ด้วย NaOH = 10M	44
ตารางที่ 3.6	ส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อย ด้วย NaOH = 15M	44
ตารางที่ 4.1	ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของ RA-O และ BA-O	47
ตารางที่ 4.2	ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของ RA และ BA	47
ตารางที่ 4.3	องค์ประกอบทางเคมีของ Cement (CT), RA และ BA	49
ตารางที่ 4.4	ค่าการไหลแผ่ (Flowability) ของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าแกลบ 10M	52
ตารางที่ 4.5	ค่าการไหลแผ่ (Flowability) ของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าแกลบ 15M	52
ตารางที่ 4.6	ค่าการไหลแผ่ (Flowability) ของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าขานอ้อย 10M	53
ตารางที่ 4.7	ค่าการไหลแผ่ (Flowability) ของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าขานอ้อย 15M	53



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์ [14,15]	8
รูปที่ 2.2 Poly (sialate- siloxo) ซิลิกาต่ออลูมินา 2:1 [14,15]	9
รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายกำลังสูงของแผ่นนัก ก) ก่อนบด และ ข) หลังบด [16]	10
รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของแผ่นนักด้วย XRD [16]	10
รูปที่ 2.5 อิทธิพลของสารละลายต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แผ่นนัก [16]	10
รูปที่ 2.6 อิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แผ่นนัก [16]	11
รูปที่ 2.7 อิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แผ่นนัก [18]	12
รูปที่ 2.8 อิทธิพลอุณหภูมิการบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แผ่นนัก [18]	12
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แผ่นนัก [18]	13
รูปที่ 2.10 อิทธิพลของ Na_2O ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ [19]	13
รูปที่ 2.11 ผลกระทบของวัสดุมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแผ่นนัก [20]	15
รูปที่ 2.12 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แผ่นนัก [20]	15
รูปที่ 2.13 การวิเคราะห์ XRD แผ่นนักของ Gou และคณะ [19]	16
รูปที่ 2.14 การวิเคราะห์ XRD จีโอโพลิเมอร์แผ่นนักของ Gou และคณะ [19]	16
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ [15]	17
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่างในตู้อบ [15]	18
รูปที่ 2.17 XRD ของจีโอโพลิเมอร์ดินขาวเผาของ Yunsheng และคณะ [21]	19
รูปที่ 2.18 SEM ของจีโอโพลิเมอร์ดินขาวเผาของ Yunsheng และคณะ [21]	19
รูปที่ 2.19 แสดงปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ [22]	20
รูปที่ 2.20 องค์ประกอบเคมีของดินขาวเผา [22]	20
รูปที่ 2.21 กำลังอัดและแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดินขาวเผา [22]	21
รูปที่ 2.22 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบในกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 5 [23]	22
รูปที่ 2.23 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบในกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 5 [23]	22
รูปที่ 2.24 ส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของ Barharev [24]	23

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.25 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบในแมกเนเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 [24]	24
รูปที่ 2.26 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบในโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 [24]	24
รูปที่ 2.27 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 รวมกับแมกเนเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 [24]	25
รูปที่ 2.28 ขนาดอนุภาคของเถ้าซานอ้อยบด งานวิจัยของ Ganesan และคณะ [27]	26
รูปที่ 2.29 X-ray deflection ของเถ้าซานอ้อยบด งานวิจัยของ Ganesan และคณะ [27]	27
รูปที่ 2.30 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าซานอ้อยบด งานวิจัยของ Ganesan และคณะ [27]	27
รูปที่ 2.31 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าซานอ้อยบด งานวิจัยของ Ganesan และคณะ [27]	27
รูปที่ 2.32 เถ้าแกลบ ก) ก่อนบด และ ข) หลังบด 28	
รูปที่ 2.33 การต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์เถ้าแกลบ [1]	28
รูปที่ 2.34 การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์เถ้าแกลบ [30]	29
รูปที่ 2.35 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของมอร์ตาร์เถ้าแกลบ [30]	29
รูปที่ 3.1 แบบหล่อขนาด 50×50×50 มม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม.	36
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบและเถ้าซานอ้อย	36
รูปที่ 3.3 การกระทุ้งตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์	37
รูปที่ 3.4 การทำให้เนื้อจีโอโพลิเมอร์แน่นด้วยโต๊ะเขย่า (Vibrating table)	37
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่หล่อเสร็จแล้ว	38
รูปที่ 3.6 การตัดตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทดสอบคลอไรด์	39
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์การทำให้ตัวอย่างทดสอบอิมมัวด้วยน้ำ	40
รูปที่ 3.8 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ RCPT	40
รูปที่ 3.9 การทดสอบหาความลึกและหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ [1,28]	42
รูปที่ 3.10 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่จุ่มทั้งหมด [1,28]	42
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการวัดความลึกคลอไรด์ [37]	42
รูปที่ 4.1 การกระจายตัวอนุภาคของ RA และ BA	48
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายของเถ้าแกลบบดละเอียด (RA)	50
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายของเถ้าซานอ้อยบดละเอียด (BA)	50

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 XRD ของถ้ำแคลบ-เปลือกไม้ (RA)	51
รูปที่ 4.5 XRD ของถ้ำชานอ้อย (BA)	51
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Si/OH ของจีโอโพลีเมอร์ถ้ำแคลบ ที่ 10M และ 15M	55
รูปที่ 4.7 กำลังอัดจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำแคลบที่อายุ 7 วัน	56
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Si/OH ของจีโอโพลีเมอร์ถ้ำชานอ้อย ที่ 10M และ 15M	57
รูปที่ 4.9 กำลังอัดจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำชานอ้อยที่อายุ 7 วัน	57
รูปที่ 4.10 กำลังอัดจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำชานอ้อยที่อายุ 7 วัน	58
รูปที่ 4.11 กำลังอัดจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำชานอ้อยที่อายุ 7 วัน	58
รูปที่ 4.12 กำลังอัดจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำชานอ้อยที่อายุ 7 วัน	59
รูปที่ 4.13 กำลังอัดจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำชานอ้อยที่อายุ 7 วัน	59
รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิการบ่มและกำลังอัดของ MIX1-MIX3 มอร์ตาร์ถ้ำแคลบ ที่อายุ 7 วัน	60
รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิและกำลังอัดของ MIX4-MIX6 มอร์ตาร์ถ้ำแคลบที่อายุ 7 วัน	60
รูปที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของ MIX7-MIX9 มอร์ตาร์ถ้ำชานอ้อยที่อายุ 7 วัน	61
รูปที่ 4.17 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของ MIX10-MIX12 มอร์ตาร์ถ้ำชานอ้อยที่อายุ 7 วัน	62
รูปที่ 4.18 Porosity (%) ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำแคลบ	63
รูปที่ 4.19 Porosity (%) ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำชานอ้อย	63
รูปที่ 4.20 ความลึกคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำแคลบด้วยการทดสอบแบบแรง	65
รูปที่ 4.21 ความลึกคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำชานอ้อยด้วยการทดสอบ แบบแรงด้วยไฟฟ้า	65
รูปที่ 4.22 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำแคลบ	67
รูปที่ 4.23 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำชานอ้อย	68
รูปที่ 4.24 ความลึกคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำแคลบแบบธรรมชาติ	69
รูปที่ 4.25 ความลึกคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ถ้ำชานอ้อยแบบธรรมชาติ	69

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.26 น้ำหนักที่ลดลงของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์เก่าเคลบเมื่อแช่ ในสารละลายกรดซัลฟูริก 5%	71
รูปที่ 4.27 น้ำหนักที่ลดลงของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์เก่าชานอ้อยเมื่อแช่ ในสารละลายกรดซัลฟูริก 5%	71
รูปที่ 4.28 น้ำหนักที่ลดลงของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์เก่าเคลบและชานอ้อย เมื่อแช่ ในสารละลายกรดซัลฟูริก 5%	72
รูปที่ ผ1 ห้องปฏิบัติการจีโอ โพลีเมอร์	82
รูปที่ ผ2 ชุดดูดสารเคมี (Hood)	82
รูปที่ ผ3 เครื่องผสมจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์	83
รูปที่ ผ4 การเตรียมส่วนผสมจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์	83
รูปที่ ผ5 ส่วนผสมจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์	84
รูปที่ ผ6 การเทวัสดุปอซโซลาน	84
รูปที่ ผ7 วิธีเติมสารเคมีในส่วนผสม	85
รูปที่ ผ8 วิธีผสมวัสดุรวมในส่วนผสม	85
รูปที่ ผ9 การเททรายขณะเครื่องผสมทำงาน	86
รูปที่ ผ10 การจับเวลาขณะเครื่องผสมทำงาน	86
รูปที่ ผ11 เนื้อจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์เก่าเคลบ	87
รูปที่ ผ12 เนื้อจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์เก่าชานอ้อย	87
รูปที่ ผ13 การเทตัวอย่างลงแบบ	88
รูปที่ ผ14 การทำให้จีโอ โพลีเมอร์มีความแน่น	88
รูปที่ ผ15 จีโอ โพลีเมอร์ที่หล่อเสร็จแล้ว	89
รูปที่ ผ16 การห่อฟิล์มเพื่อเตรียมบ่มร้อนจีโอ โพลีเมอร์	89
รูปที่ ผ17 ตัวอย่างก้อนจีโอ โพลีเมอร์	89

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	=	การสึกกร่อน
A	=	พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างทดสอบ (m^2)
BA	=	เถาซานอ้อย
CT	=	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ (cm^2/s)
E	=	values of potential (V)
F	=	Faraday content ($C/mol, 9.65 \times 10^4$)
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
K	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (m/s)
L	=	ความหนาของตัวอย่าง (m)
L	=	ความหนาของมอร์ตาร์ (cm)
P	=	ความพรุน
P	=	แรงดันของน้ำ (Pa)
RA	=	เถาเกลบบด
R	=	gas content ($J/K mol, 8.314$)
S	=	กำลังอัด
T	=	temperature (K)
ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
Wa	=	น้ำหนักของตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ หน่วยเป็นกรัม (g)
Wd	=	น้ำหนักอบแห้งในตู้ควบคุมหลังจาก 24 ชั่วโมงที่ 100 ± 5 องศาเซลเซียส หน่วยเป็นกรัม (g)
W_w	=	น้ำหนักตัวอย่างในน้ำ หน่วยเป็นกรัม (g)
z	=	ion valence

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ทฤษฎี สมมติฐาน และหรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย ตามลำดับ

1.1 ความเป็นมา

พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช ทรงพระราชทานพระบรมราโชวาท เรื่อง เศรษฐกิจพอเพียง แก่พสกนิกรชาวไทย และทรงมีพระราชดำริว่า การพัฒนาใดๆ ที่ไม่ซับซ้อน ใช้วิธีการที่เรียบง่าย ประหยัด เหมาะสมกับสภาพท้องถิ่น จะก่อให้เกิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน งานวิจัยนี้ พัฒนาวัสดุเหลือทิ้งจากผลพลอยได้ด้านอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม มาใช้เป็นวัสดุประสาน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีต ทำให้ประหยัดการใช้ปูนซีเมนต์ ลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต เป็นไปตามแนวทางเศรษฐกิจพอเพียง ในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด และรวมทั้งการใช้ถ้ำทิ้งจากผลพลอยได้ในโรงงานอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมให้เกิดคุณค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด

การผลิตปูนซีเมนต์มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศซึ่งส่งผลทำให้โลกร้อน สภาพภูมิอากาศแปรปรวน และเกิดภัยพิบัติมากมาย ปัจจุบันการศึกษาวิจัยพยายามนำวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งบางประเภทมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ทั้งนี้เพื่อลดปริมาณการผลิตและการใช้ปูนซีเมนต์ให้มากที่สุด วัสดุเหลือทิ้งในประเทศไทยที่รู้จัก เช่น ถ้ำถ่านหิน ถ้ำถ่านหิน ถ้ำถ่านหิน และ ถ้ำถ่านหิน เป็นต้น เราเรียกวัสดุเหล่านี้ว่า วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material) วัสดุดังกล่าวนี้เป็นวัสดุที่มีสารจำพวกซิลิกา (Silica) หรือซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ ซึ่งสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น อีกทั้งการนำปูนซีเมนต์มาผสมกับวัสดุปอซโซลานในสัดส่วนที่เหมาะสม หรือทำเป็นวัสดุอิโพลีเมอร์ โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เลย อาจทำให้มีกำลังรับแรงที่ใกล้เคียงหรือสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตในด้านความคงทนและลดปัญหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและลดพื้นที่การกำจัดทิ้งถ้ำถ่าน [1-3]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม เช่น ปลูกข้าวและปลูกอ้อย เป็นต้น จากนั้นได้ผลพลอยได้ที่เหลือจากกระบวนการผลิตเป็นถ้ำถ่านและถ้ำถ่านอ้อย ตามลำดับ อีกทั้งบางพื้นที่ของประเทศมีโรงไฟฟ้าพลังงานถ้ำถ่านและโรงงานน้ำตาลที่ใช้ถ้ำถ่านและถ้ำถ่านอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าและได้ส่วนที่เหลือทิ้งคือถ้ำถ่านและถ้ำถ่านอ้อย ซึ่งไม่ได้ใช้ประโยชน์ ส่งผล

กระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ้นเปลืองพื้นที่กำจัดทิ้ง อีกทั้งการกำจัดทิ้งนั้นกระทำได้ยาก หากมีการนำเอาทั้งดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเป็นวัสดุโพลิเมอร์ชนิดใหม่สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างจะทำให้ประหยัดการใช้ปูนซีเมนต์ ลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต เมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว เพิ่มมูลค่าให้เอ้าท์ในชุมชน อีกทั้งเพื่อเป็นแนวทางในการประกอบอาชีพในวิสาหกิจชุมชนสำหรับการผลิตวัสดุชนิดใหม่ได้ในอนาคตอย่างยั่งยืน

ถ้าแกลบและเอ้าท์ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมแก่ชุมชนใกล้เคียง ดังนั้นหากสามารถสร้างทางเลือกใหม่ที่จะนำเอ้าท์เหล่านี้มาใช้ประโยชน์ จะเป็นการป้องกันและลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากเอ้าท์ดังกล่าว และยังเป็น การเพิ่มมูลค่าแก่เอ้าท์แกลบและเอ้าท์ และทำให้เพิ่มรายได้จากการขายเอ้าท์ที่เป็นผลพลอยได้ และเปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งจากเกษตรกรรมที่ไม่มีมูลค่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีราคาในตัวเองได้อย่างยั่งยืน มีงานวิจัยที่ผ่านมาใช้เอ้าท์หินสำหรับผลิตเป็นคอนกรีต [4-6] ส่วนการนำเอ้าท์หินมาผลิตเป็นจีโพลิเมอร์เริ่มมีอย่างกว้างขวางขึ้น และเป็นที่ยอมรับว่าการผลิตจีโพลิเมอร์จากเอ้าท์หินจะให้คุณสมบัติที่ดี แต่มีงานวิจัยเกี่ยวกับเอ้าท์แกลบและเอ้าท์เพื่อทำเป็นวัสดุโพลิเมอร์น้อยมาก จึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษารายละเอียดเพิ่มเติม เนื่องจากเอ้าท์แกลบและเอ้าท์มีคุณสมบัติแตกต่างเอ้าท์หิน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาและพัฒนาเอ้าท์แกลบและเอ้าท์ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุโพลิเมอร์ โดยอาจจะนำมาผลิตเป็นอิฐบล็อก หรือชิ้นส่วนก่อสร้าง เช่น เสา คาน ผนังและพื้นสำเร็จรูป เป็นต้น โดยใช้กระบวนการทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายที่มีความเป็นเบสสูง และศึกษาอิทธิพลของปัจจัยของสารเคมีและกระบวนการผลิตต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และความทนทานต่อสารเคมี จากนั้นพัฒนาเทคโนโลยีในการนำเอ้าท์แกลบและเอ้าท์ไปใช้ในงานอย่างมีประสิทธิภาพ และทำให้เกิดความมั่นใจแก่อุตสาหกรรมก่อสร้างไทยที่จะนำเอาเอ้าท์แกลบและเอ้าท์ไปประยุกต์ใช้กับโครงการก่อสร้าง ทั้งยังช่วยลดปัญหามลภาวะและปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นผลจากการผลิตปูนซีเมนต์และลดพื้นที่การกำจัดทิ้ง ดังนั้นวัสดุโพลิเมอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับงานคอนกรีต ที่สามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

การพัฒนาวัสดุโพลิเมอร์จากเอ้าท์แกลบและเอ้าท์ มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อศึกษาการทำวัสดุโพลิเมอร์จากเอ้าท์แกลบและเอ้าท์ โดยทำการศึกษาความสามารถต่อการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์จีโพลิเมอร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย จากโรงไฟฟ้าพลังงานแกลบและโรงงานน้ำตาล โดยใช้เถ้าถ่านที่ได้โดยตรงจากส่วนของเตาเผา

การปรับปรุงคุณภาพของเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย โดยวิธีการบดให้มีขนาดลดลง

สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต

ทำการศึกษาค่าสมบัติของสารเคมีและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย ต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ทางกลของมอร์ต้าร์ โดยทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค กลไกปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นของจีโอโพลิเมอร์ ทดสอบหาปริมาณโพรง ทดสอบหาการหดตัวและขยายตัวของจีโอโพลิเมอร์ในสภาพสด ทดสอบหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะของจีโอโพลิเมอร์ และทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทำการศึกษาคงทนและความทนทานของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย โดยทดสอบคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและการแทรกซึมคลอไรด์ ทั้งนี้เพื่อความเชื่อมั่นในการใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และหรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย

แกลบ และชานอ้อย เป็นผลผลิตจากเกษตรกรรมที่มีอยู่ทั่วไปของประเทศไทย ซึ่งมีการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าและได้ส่วนที่เหลือเป็นเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยตามลำดับ เถ้าทั้งสองสามารถนำมาทำเป็นสารปอซโซลานได้เนื่องจากมีสารจำพวกซิลิกา (Silica) หรือซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ [1,7] ซึ่งสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักที่มีส่วนสำคัญต่อการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และเมื่อนำเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยมาปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพให้เหมาะสม โดยการบดให้มีขนาดอนุภาคลดลงด้วยเครื่องบด เมื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุประสานและทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส บ่มภายใต้ความร้อน และใช้เวลาบ่มที่เหมาะสม จะทำให้ได้วัสดุที่มีโครงสร้างที่แข็งแรง มีลักษณะเหมือนคอนกรีต และสามารถนำมาใช้งานคอนกรีตได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) นำเถ้าทิ้งจากการวิจัยไปผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์สำหรับงานคอนกรีต ลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตเนื่องจากไม่ใช้ปูนซีเมนต์ อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ลดปัญหาโลกร้อนจากผลกระทบการ

ผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนั้นยังสามารถนำผลงานวิจัยเผยแพร่บทความวิชาการเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

2) เป็นการบริหารสิ่งเหลือใช้ให้เป็นประโยชน์ สร้างความสมดุลของสังคมและสิ่งแวดล้อม ลดพลังงานขยะ ลดสภาวะโลกร้อน ทำให้มีคุณค่าจากปัจจุบันสู่อนาคต

3) งานวิจัยนี้เป็นการกระตุ้นเศรษฐกิจชุมชนหรือวิสาหกิจชุมชนได้เป็นอย่างดี เนื่องจาก แกลบและขานอ้อยเป็นทรัพยากรจากธรรมชาติมีอยู่ในประเทศ ทำให้เงินค่าเชื้อเพลิงหมุนเวียนอยู่ในชุมชนท้องถิ่น ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อเนื่องในการจ้างงานและส่งเสริมระบบเศรษฐกิจของท้องถิ่นอย่างยั่งยืน



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

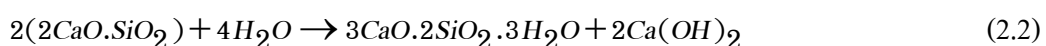
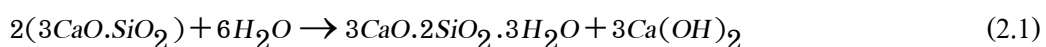
บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีทั่วไปและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ โดยมุ่งเน้นในเรื่องของวัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาปอซโซลาน วัสดุจีโอโพลีเมอร์ การแทรกซึมของคลอไรด์ และการต้านทานกรดของจีโอโพลีเมอร์ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงชนิดของวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย แกลบ (Rice husk ash) และเถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาวิจัยที่มีคุณภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดต่องานวิจัย

2.1 วัสดุปอซโซลาน

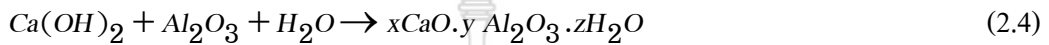
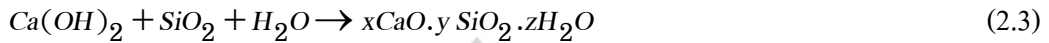
ในอดีตที่ผ่านมาประมาณ 2,300 ปีก่อน ชาวโรมันได้นำเถ้าภูเขาไฟจากเมืองนี้มาใช้ในการผลิตไฮดรอลิกซีเมนต์ [8,9] และใช้สารนี้ผสมกับปูนขาวทำเป็นปูนก่อในการก่อสร้างสถานที่หรืออาคารต่างๆ มากมาย เช่น อาคาร โคลิเซียมในกรุงโรม เป็นต้น ดังนั้นเถ้าภูเขาไฟจึงนับว่าเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan material) ธรรมชาติชนิดแรกที่มีมนุษย์รู้จักและได้นำมาใช้ในงานก่อสร้างต่างๆ วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในประเทศไทยและเรารู้จัก ได้แก่ เถ้าถ่านหิน, เถ้าแกลบ-เปลือกไม้, เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น วัสดุปอซโซลาน เป็นวัสดุที่มีสารจำพวกซิลิกาหรือซิลิกาและอลูมินาปนอยู่เป็นส่วนใหญ่ [1,7] โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานน้อยมาก อย่างไรก็ตามเมื่อวัสดุปอซโซลานอยู่ในรูปผงละเอียดและมีความชื้นเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิปกติ จากนั้นได้สารประกอบตัวใหม่ที่มีคุณสมบัติคล้ายกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงและยึดเกาะกันได้ดี ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อนำปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ดังแสดงในสมการที่ (2.1) และ (2.2) [9]



ปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.1) และ (2.2) ยังไม่สิ้นสุด หากส่วนผสมของคอนกรีตมีสารจำพวก ปอชโซลานผสมอยู่ นั่นคือซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งมีอยู่ในวัสดุจำพวก ปอชโซลานจะเข้าทำปฏิกิริยากับต่าง คือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)



จากปฏิกิริยาในสมการที่ (2.3) คือ $x\text{CaO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ หรือเรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ค่า x , y และ z เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ผลที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (4) คือ $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ หรือแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต (CAH) โดยทั้ง CSH และ CAH จะทำให้กำลังอัดคอนกรีตหรือปูนซีเมนต์สูงขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

2.3 วัสดุจีโอโพลิเมอร์

วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (geopolymer materials) เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลีไซอะเลต (polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอลูมิเนียม (Al) ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต หรือ Si-O-Al-O [4] และเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี อัตราส่วนอะตอมของซิลิกอนต่ออลูมิเนียม (Si:Al) จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทการใช้งานของวัสดุนั้นๆ สำหรับงานวิจัยนี้จะเน้นการใช้เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ในสมการที่ (2.5) เป็นสมการทั่วไปของโพลิเมอร์ [10]



โดย	M	เป็นธาตุอัลคาไล
	-	เป็นการยึดเกาะ (bond)
	Z	เป็นจำนวนโมเลกุลของ Si - O ₂ เท่ากับ 1, 2 หรือ 3
	n	บ่งบอกปริมาณของการทำโมเลกุลลูกโซ่
	w	เป็นจำนวนโมเลกุลของน้ำ

กระบวนการผสมและการบ่มจีโอโพลิเมอร์เป็นสองปัจจัยหลักที่สำคัญที่ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติแข็งแรง เนื่องจากอุณหภูมิการบ่มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในจีโอโพลิเมอร์และมีผลกระทบต่อกำลัง รวมทั้งระยะเวลาการบ่มและชนิดของของเหลวต่างที่ใช้ เช่น อุณหภูมิการบ่มที่สูงและบ่มเป็นระยะเวลานานทำให้กำลังสูงขึ้น และของเหลวต่างที่ประกอบด้วยสารละลายซิลิกेटจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายต่างที่มีไฮดรอกไซด์เท่านั้น [11] สำหรับการติดตามกลไกกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเพื่ออธิบายโครงสร้างของสารประกอบที่เกิดขึ้นจะใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือบางอย่าง เช่น XRD, MIP, FTIR และ SEM/EDX เป็นต้น

เป็นที่ทราบดีว่าวัสดุปอซโซลานสำหรับงานคอนกรีตนอกเหนือจากเถ้าถ่านหินซึ่งเรารู้จักดีแล้ว ยังมีอีกมากที่ปรากฏอยู่ในหลายประเทศทั่วโลกโดยที่เรามักเรียกกันว่า วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) โดยการพิจารณาความเป็นวัสดุปอซโซลานด้วยการดูจากองค์ประกอบทางด้านเคมีเป็นสำคัญ ยกตัวอย่างเช่น วัสดุปอซโซลานจากผลผลิตของเกษตรกรรมซึ่งได้จากแกลบเมื่อเผาแกลบในอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ แต่จุดสำคัญในการนำมาใช้ในงานคอนกรีตหรือมอร์ตาร์คือผลของขนาดความละเอียดซึ่งมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ตลอดทั้งผลด้านกำลังอัดและอื่นๆ ของคอนกรีต ปกติแล้วเถ้าแกลบใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเนื่องจากเถ้าแกลบมีศักยภาพสูงในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี สามารถปรับปรุงโครงสร้างภายในเพสต์ ขนาดรูปร่างจะเข้าไปแทรกระหว่างเพสต์ของซีเมนต์และวัสดุมวลรวม เถ้าแกลบสามารถปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตด้วยการเข้าไปอัดตัวภายในโครงสร้างคอนกรีตส่งผลให้ลดความพรุนและแทรกตัวเข้าไปในระหว่างช่องว่างภายในโครงสร้างคอนกรีตได้ดี [12]

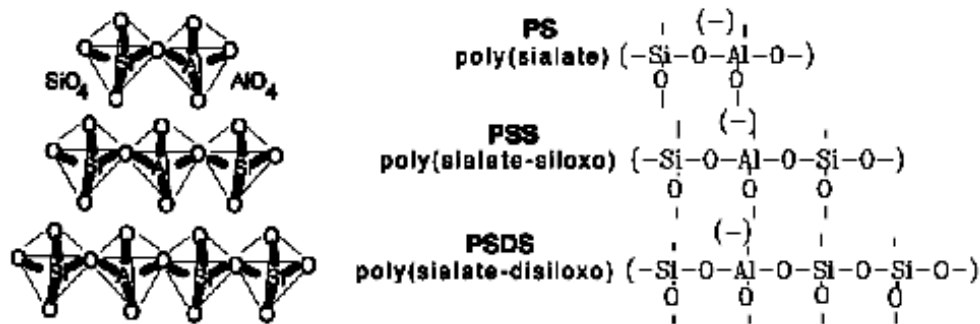
เถ้าชานอ้อย คือวัสดุปอซโซลานเริ่มนำมาใช้ในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ [7,13] ในประเทศไทยมีการปลูกอ้อยสำหรับผลิตน้ำตาลมากกว่า 6 ล้านไร่ ซึ่งมีผลผลิตประมาณ 60 ล้านตันต่อปี [13] กระบวนการผลิตน้ำตาลจะได้ส่วนที่เหลือเป็นชานอ้อยถึงประมาณ 13 ล้านตัน ปัจจุบันได้มีการนำชานอ้อยไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งได้ส่วนที่เหลือเป็นเถ้าชานอ้อยในปริมาณมากที่ต้องนำไปทิ้ง ซึ่งการกำจัดทิ้งนั้นก็ยากมากเพราะต้องใช้พื้นที่ในการทิ้งมาก กระทั่งได้มีการพยายามนำเถ้าชานอ้อยมาใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีต [7,13] เพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตเพื่อช่วยแก้ปัญหาการกำจัดเถ้าชานอ้อยและลดปัญหาสภาวะแวดล้อมอันเนื่องจากการทิ้งเถ้าชานอ้อยทั้งนี้เนื่องจาก เถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบหลักทางเคมีคือ ซิลิกา [7,13] งานวิจัยพบว่า การนำเถ้าชานอ้อยมาบดละเอียดสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีตได้ [7]

แกลบ และชานอ้อย เป็นผลผลิตจากเกษตรกรรมที่มีอยู่ทั่วไปของประเทศไทย และมีการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าและได้ส่วนที่เหลือเป็นเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยตามลำดับ เถ้าทั้งสองสามารถนำมาทำเป็นสารปอซโซลานได้เนื่องจากมีสารจำพวกซิลิกา (Silica)

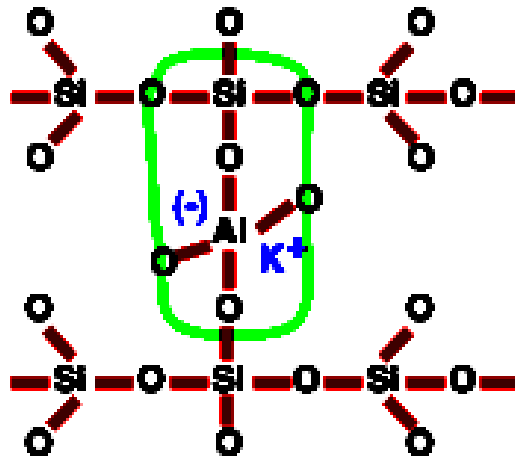
หรือซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ ซึ่งสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักที่มีส่วนสำคัญต่อการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และเมื่อนำเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อยมาปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพให้เหมาะสม โดยการบดให้มีขนาดอนุภาคลดลงด้วยเครื่องบด เมื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุประสานและทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส บ่มภายใต้ความร้อน และใช้เวลากบ่มที่เหมาะสม จะทำให้ได้วัสดุที่มีโครงสร้างที่แข็งแรง มีลักษณะเหมือนคอนกรีต และสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้

2.4 กลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์

กลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์เกิดได้โดยวัสดุที่ใช้จำเป็นต้องมีสารจำพวกซิลิกา (Silica) หรือซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) เป็นองค์ประกอบหลักจะถูกกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง เพื่อที่จะไปกระตุ้น ซิลิกาและอลูมินาจากวัสดุดังกล่าว จากนั้นก็จะใช้โซเดียมซิลิเกตเข้าไปเป็นตัวทำให้รวมตัวกันในลักษณะของโครงสร้างแบบสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งถ้าเกิดซิลิกาต่ออลูมินา 1 ต่อ 1 จะเรียกโครงสร้างเป็น Poly (sialate) และถ้าเกิดซิลิกาต่ออลูมินา 2:1 เรียกโครงสร้างเป็น Poly (sialate-siloxo) ซึ่งในการจะให้ได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังที่ดีก็ต้องให้อยู่ในอัตราส่วน ซิลิกาต่ออลูมินา 2:1 ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์ [14,15]

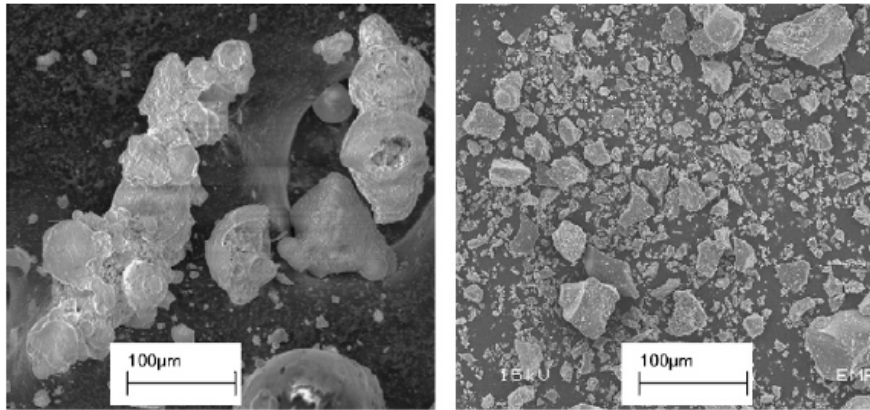


รูปที่ 2.2 Poly (sialate- siloxo) ซิลิกาต่ออลูมินา 2:1 [14,15]

2.5 วัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนัก

เถ้าหนัก (Bottom ash) เป็นวัสดุถมทิ้งจากผลพลอยได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีการนำเอาถ่านหินมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แหล่งใหญ่ของเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาจากการผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยอยู่ที่ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากนั้นได้ส่วนที่เหลือคือเถ้าทิ้ง

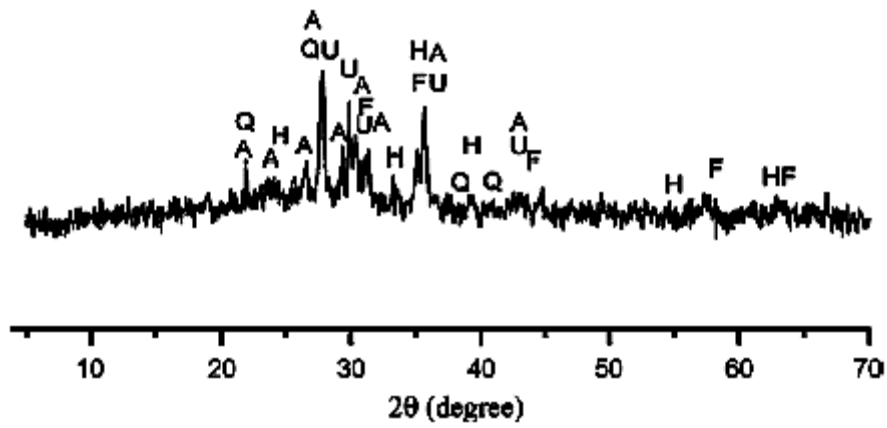
ในรูปที่ 2.1 เป็นภาพถ่านกำลังสูงของเถ้าหนักที่ได้จากโรงไฟฟ้าของประเทศไทย และนำมาพัฒนาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ [16] เถ้าหนักถูกนำปรับปรุขนาดโดยการบดให้มีขนาดที่เล็กลง พบว่า ในรูปที่ 2.3 ก) เป็นเถ้าหนักก่อนบด มีขนาดค่อนข้างใหญ่และมีความพรุนสูง ส่วนในรูปที่ 2.3 ข) เป็นเถ้าหนักหลังการบด พบว่ามีขนาดอนุภาคเล็กลง และความพรุนลดลงด้วย พิจารณาด้วยการเปรียบเทียบด้วยการถ่ายภาพกำลังขยาย SEM ขนาด 100 ไมครอน (μm) งานวิจัยที่ผ่านมาของ Sathonsaopark และคณะ [16] ได้นำเถ้าหนักซึ่งเป็นวัสดุถมทิ้งจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ในภาคเหนือของประเทศไทยมาศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าหนัก ผลทดสอบพบว่าเถ้าหนักมีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งตามมาตรฐานของ ASTM C618 [17] ถือว่าเป็นวัสดุปอชโซลานได้ และเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีในการศึกษาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ส่วนผลการทดสอบกำลังอัดพบว่าที่อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าหนักระหว่าง 0.429-0.709 กำลังอัดมีค่าระหว่าง 42-52 MPa และกำลังอัดลดลงเมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าหนักอยู่ที่ 0.325 แสดงว่าอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าหนักมีผลต่อกำลังอัด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [16]



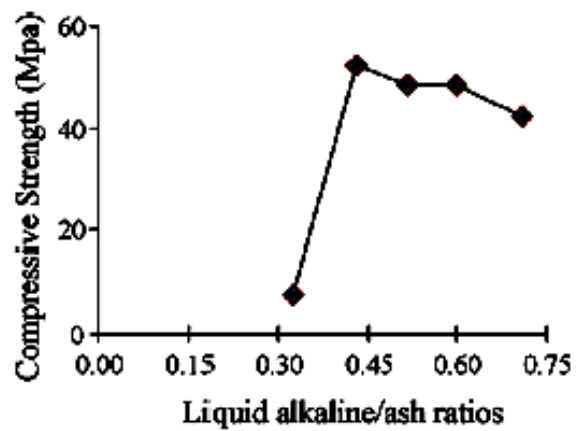
ก)

ข)

รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายกำลังสูงของเถ้าหนัก ก) ก่อนบด และ ข) หลังบด [16]

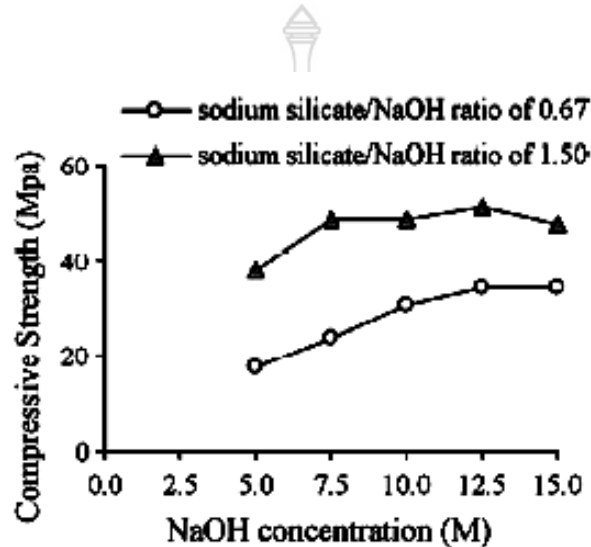


รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักด้วย XRD [16]



รูปที่ 2.5 อิทธิพลของสารละลายต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าหนัก [16]

นอกจากอิทธิพลของอัตราส่วนของสารละลายต่อแผ่นกึ่งผลต่อกำลังอัดแล้ว ปริมาณของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แผ่นกึ่งผล กล่าวคือ ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 12.5 โมลาร์ (M) ให้ค่ากำลังอัดสูง เมื่อเทียบกับที่ 5, 7.5 และ 10 โมลาร์ (M) ส่วนที่ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15.0 โมลาร์ (M) กำลังอัดมีแนวโน้มที่ต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [16]

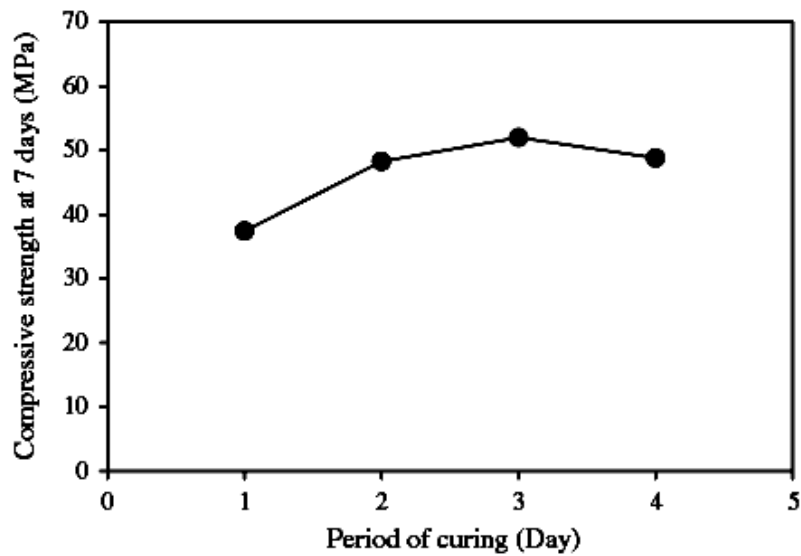


รูปที่ 2.6 อิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แผ่นกึ่งผล [16]

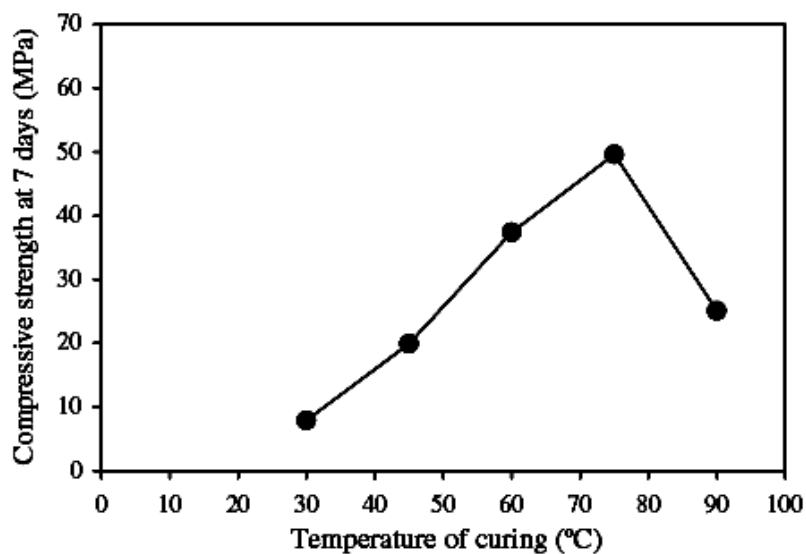
2.6 วัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถาถ่านหิน

เถาถ่านหิน เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดที่เริ่มนำมาใช้ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ในรูปที่ 2.7 [18] เป็นการนำเถาถ่านหินมาผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และศึกษาอิทธิพลของการบ่ม กล่าวคือบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 วัน ตามลำดับ พบว่า มอร์ตาร์มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ระยะการบ่ม 3 วัน และเริ่มลดลงที่ระยะเวลา 4 วัน การเพิ่มระยะเวลาการบ่มไม่เพิ่มกำลังอัด ส่วนในรูปที่ 2.8 [18] จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาถ่านหินให้ค่ากำลังอัดที่สูงเมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม กำลังอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส การบ่มที่อุณหภูมิ 30-75 องศาเซลเซียส กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในรูปที่ 2.9 [18] เป็นการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถาถ่านหิน โดยใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.5 และ 3.00 ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ (M) และใกล้เคียงกับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถาถ่านหินที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.00 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20 โมลาร์ (M) ขณะที่กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

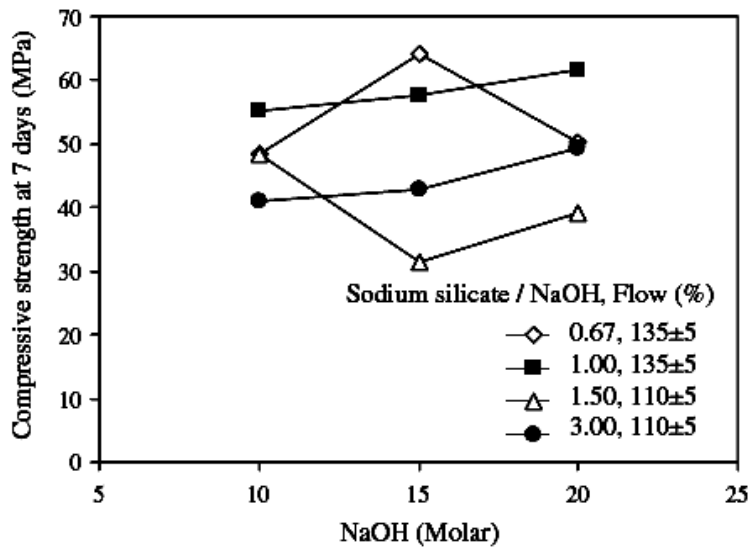
มอร์ตาร์เถ้านหินที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.50 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ (M) ให้ค่ากำลังอัดต่ำสุด การเพิ่มปริมาณโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ลดค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ Chindaprasirt และคณะ [16] พบว่าอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมคือ เท่ากับ 0.67-1.00 ให้ค่ากำลังอัดที่สูง เนื่องจากผลของความเป็นด่าง ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 และ 20 โมลาร์ (M) มีผลต่อกำลังอัดน้อยมาก



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้านหิน [18]

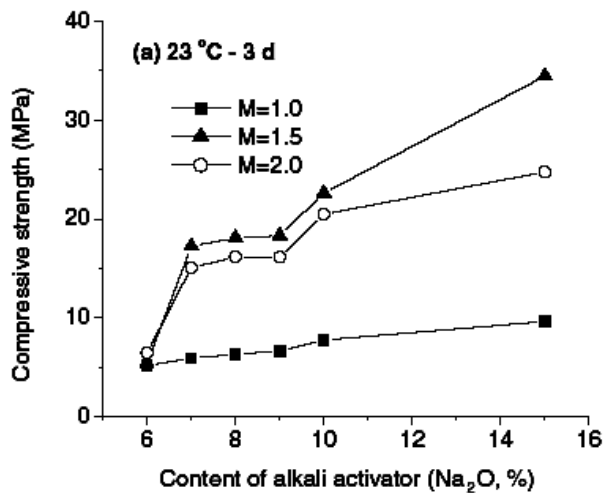


รูปที่ 2.8 อิทธิพลอุณหภูมิการบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้านหิน [18]

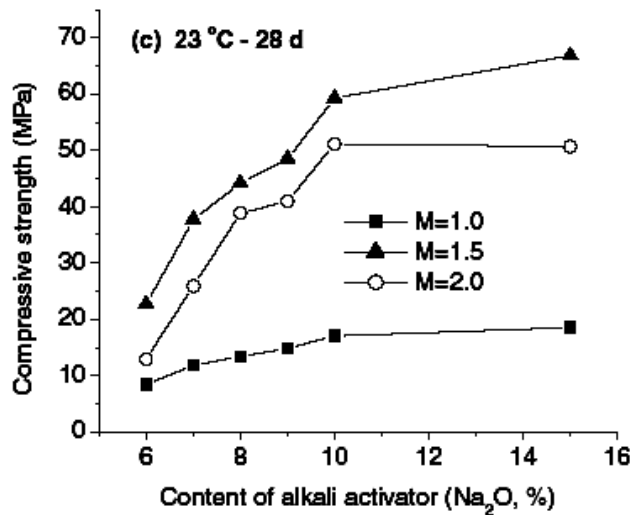
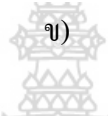
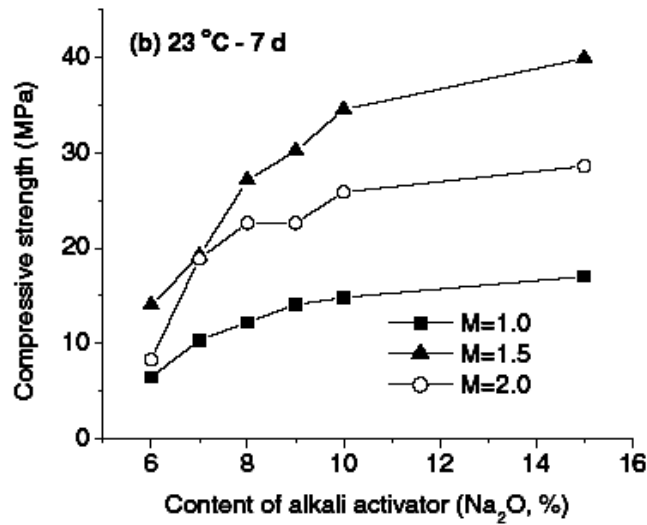


รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าถ่านหิน [18]

งานวิจัยของ Guo และคณะ [19] ในรูปที่ 2.10 ศึกษาอิทธิพลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าถ่านหิน Class C ที่มีองค์ประกอบ ซิลิกา (SiO₂) ร้อยละ 38 และอลูมินา (Al₂O₃) ร้อยละ 19 ที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ ตัวอย่างบ่มในอุณหภูมิห้อง 23 องศาเซลเซียส ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ผลทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.5 มีค่ากำลังอัดสูงสุด ตามด้วยอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2 และ 1 ตามลำดับ กำลังอัดพัฒนาตามอายุการบ่ม Guo และคณะ [19] รายงานว่ากำลังอัดของตัวอย่างมีค่าสูงถึง 63 MPa เมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงบ่มต่อที่อุณหภูมิห้อง 23 °C ที่ 28 วัน



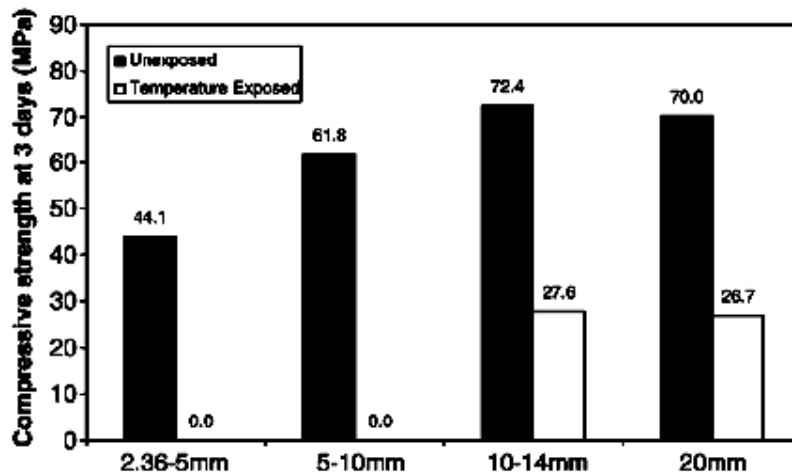
ก)



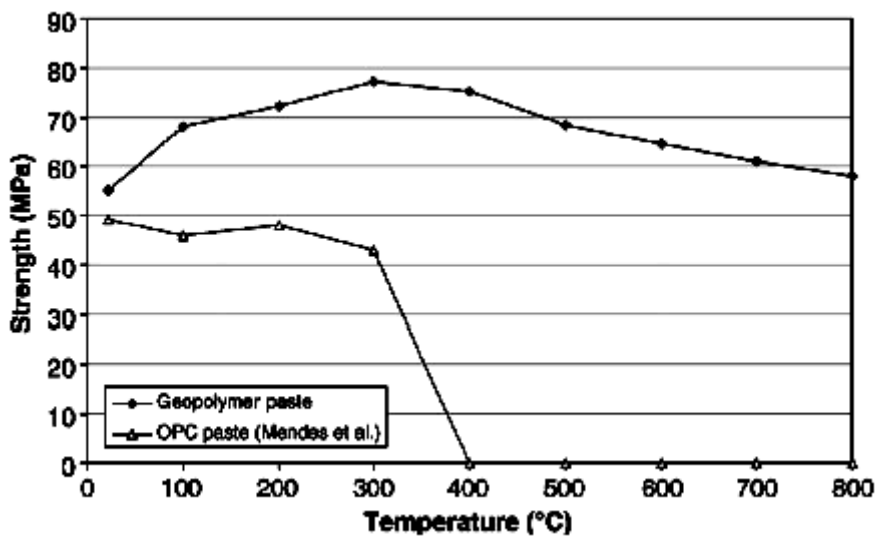
ค)

รูปที่ 2.10 อิทธิพลของ Na₂O ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ [19]

นอกจากการศึกษาใช้วัสดุปอซโซลานในงานจีโอโพลิเมอร์แล้ว มีงานวิจัยบางชิ้นศึกษาถึงผลกระทบของวัสดุมวลรวมต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเก่าถ่านหิน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 [20] ซึ่งพบว่าเมื่อใช้วัสดุมวลรวมขนาด 10-14 มิลลิเมตร ให้ค่ากำลังที่สูงเมื่อเทียบกับวัสดุมวลรวมขนาด 2.36-5 และ 5-10 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตาม กำลังอัดคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์เก่าถ่านหินที่ใช้วัสดุมวลรวมขนาด 20 มิลลิเมตร มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์เก่าถ่านหินที่ใช้วัสดุมวลรวมขนาด 10.14 มิลลิเมตร การบ่มในอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัด ดังในรูปที่ 2.12 [20] ขนาดของมวลรวมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

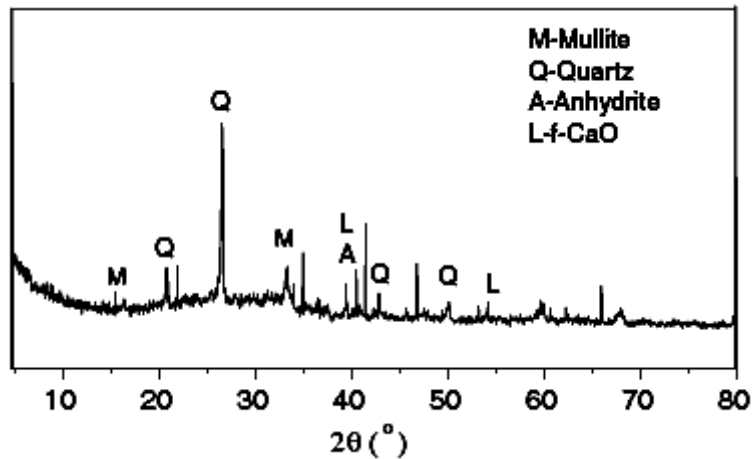


รูปที่ 2.11 ผลกระทบของวัสดุมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเก่าผ่านหิน [20]

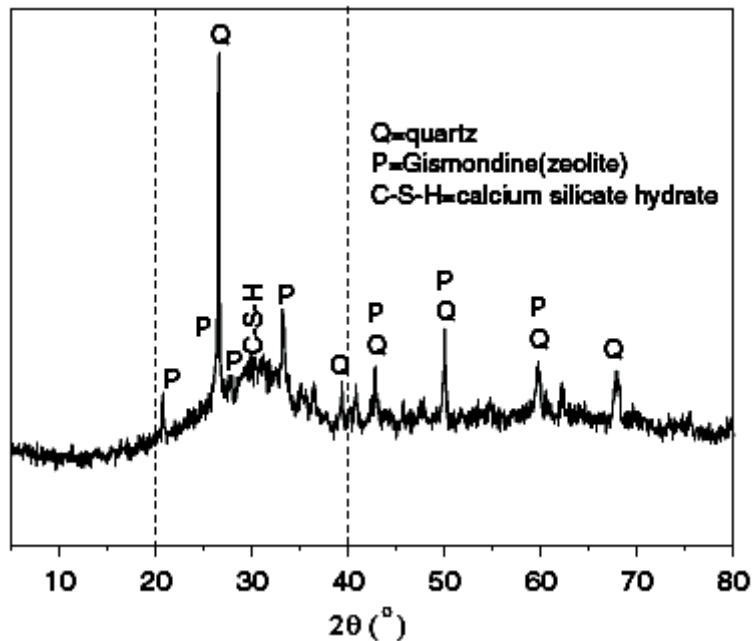


รูปที่ 2.12 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์เก่าผ่านหิน [20]

ในรูปที่ 2.13 [19] แสดงการวิเคราะห์ที่เก่าผ่านหินเพื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีพบว่า องค์ประกอบหลักคือ Mullite, Quartz, Anhydrite และ f-CaO ตามลำดับ ซึ่งตามมาตรฐานของ ASTM C618 [17] ถือว่าเป็นวัสดุพอซโซลานได้ ส่วนในรูปที่ 2.14 [19] พิจารณาผลการวิเคราะห์จีโอโพลีเมอร์ในช่วง 20-40 ของ 2θ °C พบว่าเมื่อตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง บ่มต่อที่อุณหภูมิห้อง 23 °C ที่ 28 วัน มีผลของปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CHS) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากผลึกของ Quartz ได้จากวัสดุพอซโซลานในองค์ประกอบของ ซิลิกา



รูปที่ 2.13 การวิเคราะห์ XRD แก้วถ่านหินของ Gou และคละ [19]

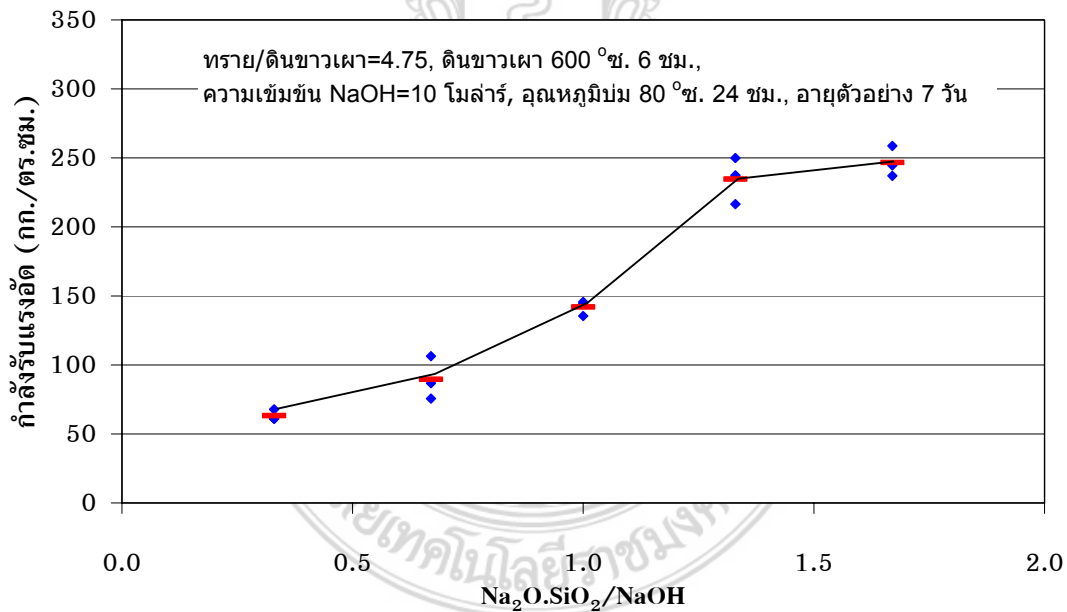


รูปที่ 2.14 การวิเคราะห์ XRD จีโอโพลิเมอร์แก้วถ่านหินของ Gou และคละ [19]

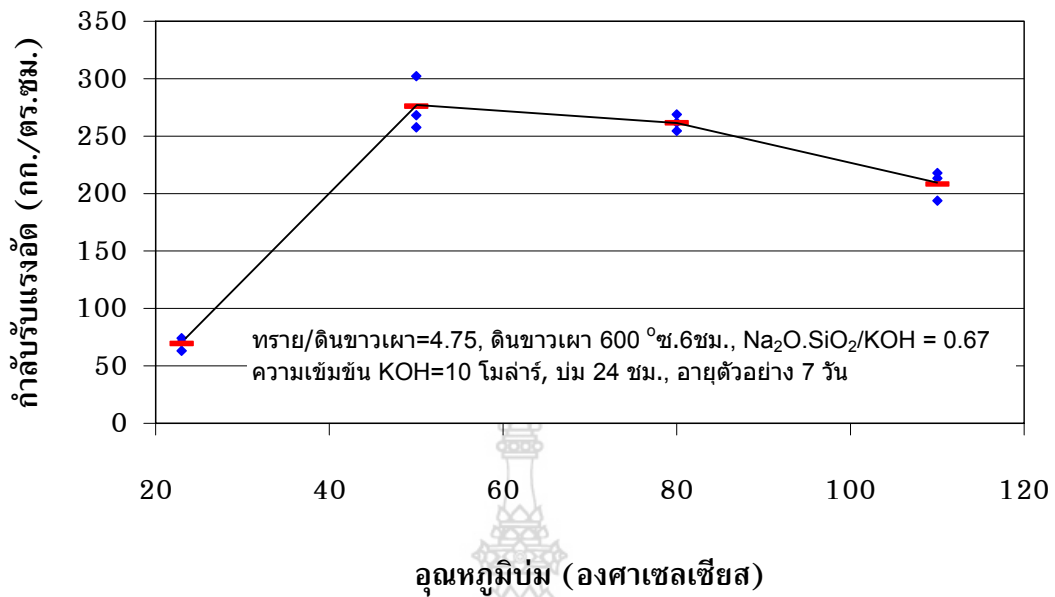
2.7 วัสดุจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวเผา

งานวิจัยของเจริญชัย ฤทธิรุทธ [15] ศึกษาการใช้ดินขาวเผาเป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่าใช้อัตราส่วนทรายต่อดินขาวเท่ากับ 4.75 โดยน้ำหนัก ใช้ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาการเผา 6 ชั่วโมง ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลลาร์ อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.33, 0.67, 1.00, 1.33 และ 1.67 โดยน้ำหนัก หลังจากผสมเสร็จ 1 ชั่วโมงทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องและหุ้มด้วยพลาสติกห่ออาหารก่อนจะทำ

การบ่มตัวอย่าง อุณหภูมิในการบ่มเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาบ่ม 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นถอดแบบและนำมาบ่มที่ห้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส ทดสอบที่ 7 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 2.15 และพบว่าที่อัตราส่วนของ โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.67 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดที่สูง นอกจากนั้นงานวิจัยเจริญชัย ฤทธิรุท [15] ใช้สารละลาย โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลลาร์ อัตราส่วนของ โซเดียมซิลิเกตต่อ โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.67 โดยที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมงและหุ้มด้วยพลาสติกห่ออาหารก่อนจะทำการบ่มตัวอย่าง อุณหภูมิในการบ่มเท่ากับ 23, 30, 50, 80 และ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นถอดแบบและนำมาบ่มที่ห้องควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส ทดสอบที่อายุ 7 วัน ผลการทดสอบในรูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำอิโพลีเมอร์ มอร์ตาร์จากดินขาวเผา นั้นจะอยู่ประมาณ 50-70 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงมากกว่า 70 องศาเซลเซียสแล้ว ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง อาจเกิดจากโครงสร้างภายในแห้งไม่มีความชื้นอยู่จากการสูญเสียความชื้นหรือการให้อุณหภูมิสูงอย่างทันทีทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วมาก ทำให้โครงสร้างภายในเกิดการยึดเหนี่ยวกันอย่างไม่แข็งแรง [15]



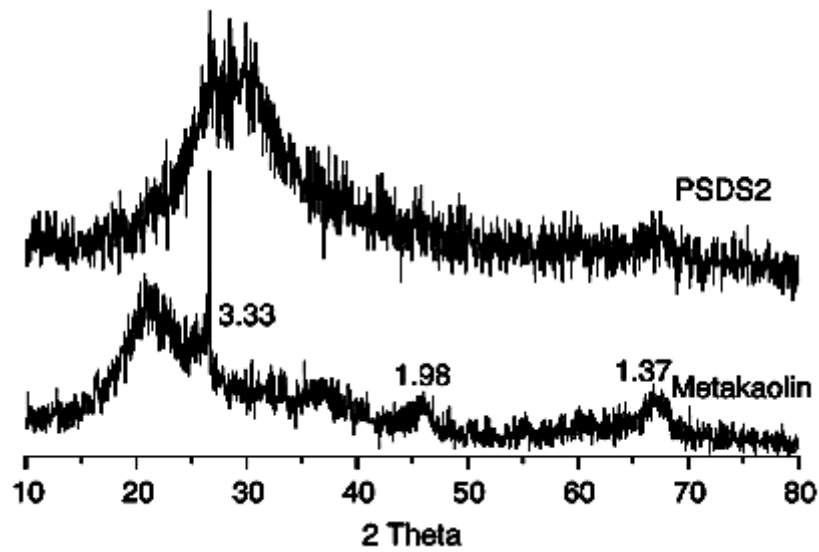
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O.SiO}_2/\text{NaOH}$ [15]



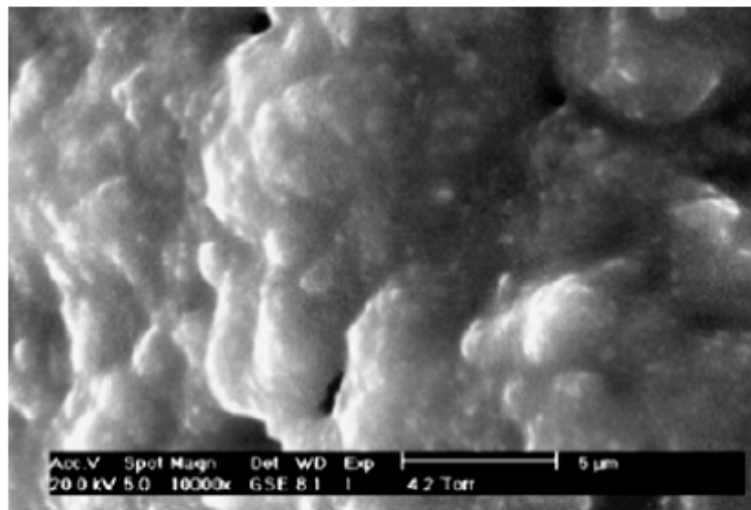
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่างในตู้อบ [15]

งานวิจัยที่ผ่านมาของ Yunsheng และคณะ [21] ใช้ดินขาวเผาเป็นวัสดุจีโอโพลีเมอร์ โดยดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่ 12 ชั่วโมง ใช้อัตราส่วน โซเดียมซิลิเกต SiO_2 ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH เท่ากับ 3.2 ตัวอย่างทดสอบหุ้มด้วยพลาสติกห่ออาหารก่อนจะทำการบ่มตัวอย่าง หลังจากนั้นถอดแบบและนำมาบ่มที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทดสอบที่อายุ 28 วัน ในรูปที่ 2.17 [21] เป็นการวิเคราะห์ XRD ของจีโอโพลีเมอร์ในช่วง 2θ ° C องศาประกอบทางเคมีพบว่าองค์ประกอบหลักคือ Quartz หากพิจารณาตามมาตรฐานของ ASTM C618 [17] ถือว่าเป็นวัสดุปอซโซลานได้ ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CHS) ที่ได้มาเนื่องจากซิลิกาและอลูมินา และคล้ายกับปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานที่ได้ปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้ได้ซึ่งวัสดุยึดประสานเช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ในรูปที่ 2.18 เป็นภาพถ่ายกำลังขยายของจีโอโพลีเมอร์ดินขาวเผาของ Yunsheng และคณะ [21] ซึ่งเป็นการพิจารณาปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) พบว่าองค์ประกอบหลักของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 6.3 และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1.1 ซึ่งใกล้เคียงกับทฤษฎี คือ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 6.0 และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1.0 ตามลำดับ

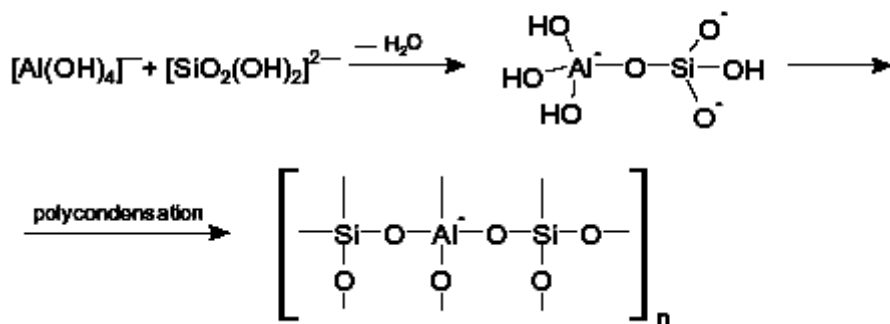


รูปที่ 2.17 XRD ของจีโอโพลิเมอร์ดินขาวเผาของ Yunsheng และคณะ [21]



รูปที่ 2.18 SEM ของจีโอโพลิเมอร์ดินขาวเผาของ Yunsheng และคณะ [21]

Rovnanik [22] ศึกษาผลกระทบของการบ่มของการใช้ดินขาวเผาในงานจีโอโพลิเมอร์ และ ได้แสดงปฏิกิริยาการเกิดจีโอโพลิเมอร์ ได้ดังรูปที่ 2.19 ส่วนในรูปที่ 2.20 เป็นองค์ทางเคมีของดินขาวเผา พบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 ร้อยละ 55.01 และ Al_2O_3 ร้อยละ 40.94 ตามลำดับ ซึ่งเป็นองค์ที่เหมาะสมกับทำเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์บ่มที่อุณหภูมิเท่ากับ 10, 20, 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และศึกษากำลังอัด แรงคัต การกระจายตัวของโพรง และ โครงสร้างโพรง ในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวเผา



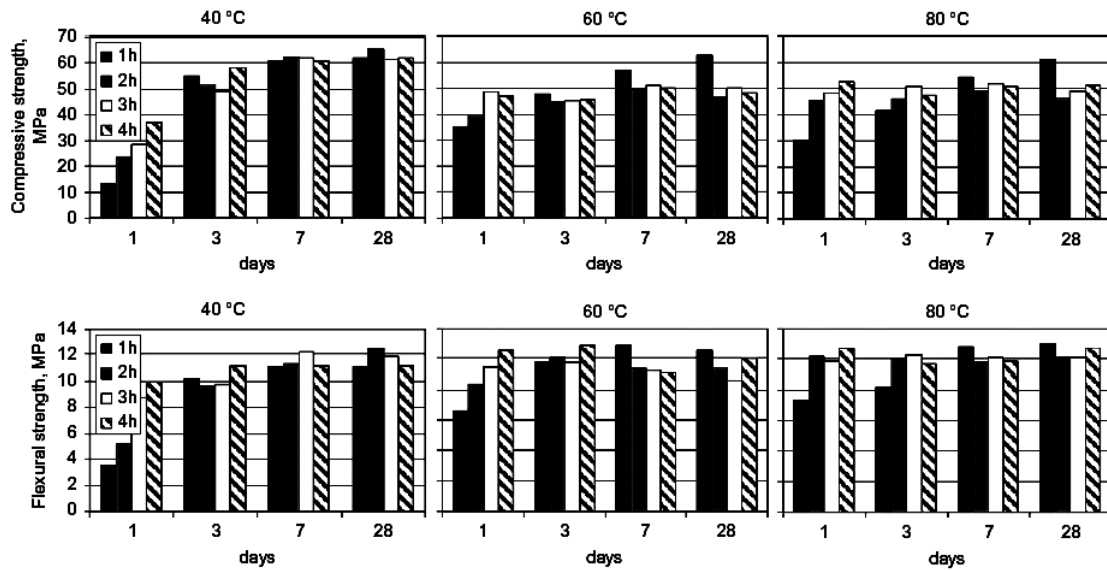
รูปที่ 2.19 แสดงปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ [22]

Chemical composition of starting materials.

Component (%)	Metakaolin	Alkaline silicate solution
Al ₂ O ₃	40.94	-
SiO ₂	55.01	24.9
K ₂ O	0.60	-
Na ₂ O	0.09	18.5
CaO	0.14	-
MgO	0.34	-
Fe ₂ O ₃	0.55	-
TiO ₂	0.55	-
LOI	1.54	-
H ₂ O	-	56.6

รูปที่ 2.20 องค์ประกอบเคมีของดินขาวเผา [22]

ในรูปที่ 2.21 [22] แสดงผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดินขาวเผา บ่มที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่ละอุณหภูมิบ่มเวลา 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ จากนั้นทดสอบกำลังอัดและแรงดัดที่อายุทดสอบ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ผลทดสอบพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดินขาวเผา มอร์ตาร์มีการพัฒนากำลังอัดตามอายุการทดสอบในทุกอุณหภูมิของการบ่ม ที่อายุทดสอบ 7 และ 28 วัน พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิอื่นๆ ที่อายุทดสอบ 28 วัน พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 1 วัน มีค่ากำลังอัดที่สูงเกิน 60 MPa หากพิจารณาอายุทดสอบที่ 28 วัน พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด โดยเฉพาะการบ่มที่ระยะเวลา 1 วัน การทดสอบแรงดัดให้ผลเป็นในแนวโน้มเดียวกับกำลังอัดแตกต่างกันเพียงหน่วยการวัดเท่านั้น



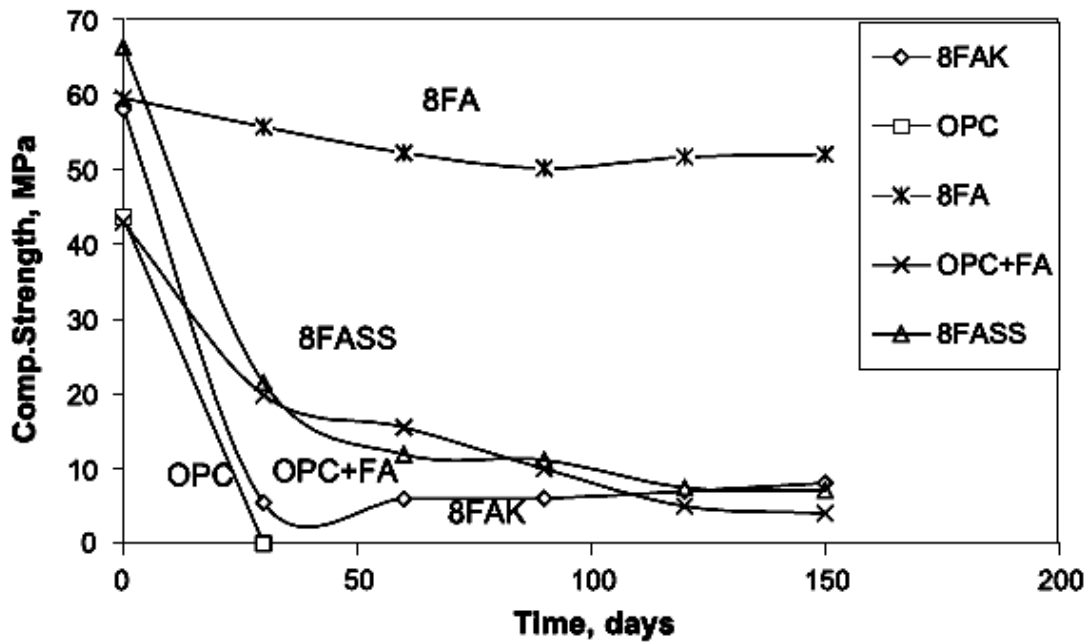
รูปที่ 2.21 กำลังอัดและแรงคดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดาร์ดินขาวเผา [22]

2.8 ความทนทานของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

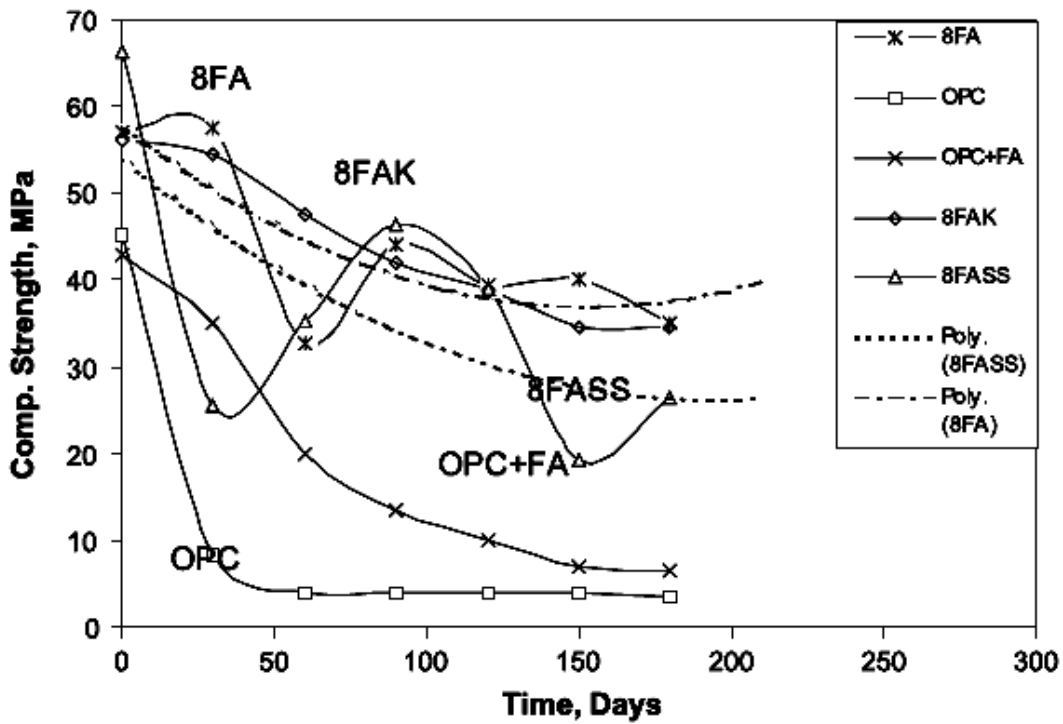
งานวิจัยของ Barharev [23] ใช้แก้วนำหินเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ในการศึกษาการต้านทานต่อกรด แก้วนำหินที่ใช้มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา (Silica, SiO₂) ประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างทดสอบแช่ในกรดซัลฟูริกและอะซิติคความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 2 เดือน ซึ่งผลทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 8 ผสมโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 1 (8FAK) ต้านทานกรดอะซิติคได้ดี และมีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 1.15 ขณะที่การสูญเสียน้ำหนักในกรดซัลฟูริกมีค่าร้อยละ 12.43 ส่วนกำลังอัดแช่ในกรดซัลฟูริกพบว่าตัวอย่างทดสอบที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 8 (8FA) มีค่าสูงสุด (รูปที่ 2.22) ส่วนรูปที่ 2.23 เป็นผลทดสอบการต้านทานกรดอะซิติค

ตารางที่ 2.1 การสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์ในกรดซัลฟูริกและอะซิติคความเข้มข้นร้อยละ 5 [23]

ตัวอย่าง	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%) ในกรดซัลฟูริก	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%) ในกรดอะซิติค
OPC	>40	-10
OPC+FA	19.15	-5.47
8FA	-1.96	-0.45
8FASS	-2.56	3.83
8FAK	-12.43	-1.15



รูปที่ 2.22 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบในกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 5 [23]



รูปที่ 2.23 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบในกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 5 [23]

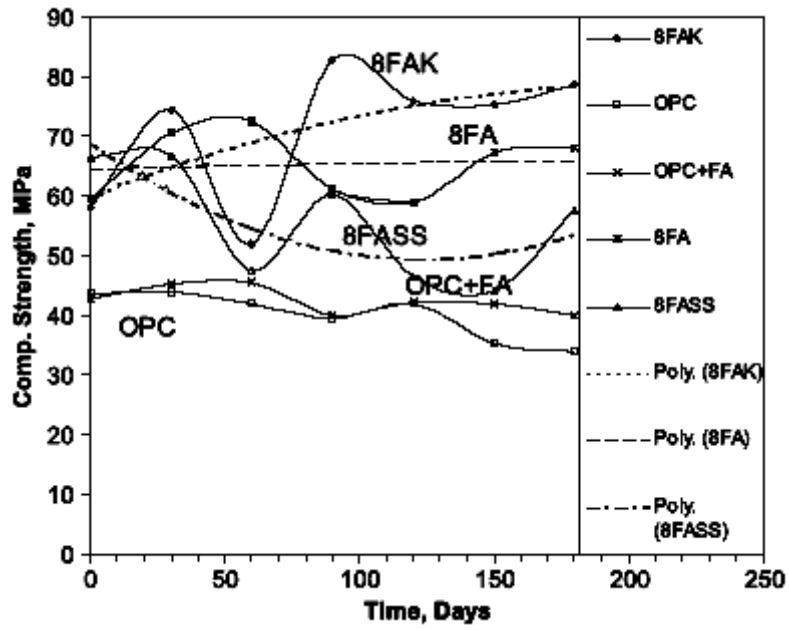
งานวิจัยของ Barharev [24] ศึกษาวัสดุจีโอโพลีเมอร์เถ้าถ่านหิน Class F ต่อการต้านทานสารละลายโซเดียมและแมกเนเซียมซัลเฟต ส่วนผสมของเพสต์แสดงในรูปที่ 2.24 การทดสอบมี 3 วิธี ประกอบด้วย แซ่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ในระยะเวลา 5 เดือน แซ่ตัวอย่างในสารละลายแมกเนเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ในระยะเวลา 5 เดือน และแซ่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ร่วมกับแมกเนเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ในระยะเวลา 5 เดือน ผลทดสอบในรูปที่ 2.25-2.27 แสดงกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่แช่ในสารละลายแมกเนเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ในระยะเวลา 5 เดือน และแซ่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ร่วมกับแมกเนเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ในระยะเวลา 5 เดือน ตามลำดับ

ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าตัวอย่าง 8FA กำลังอัดสูงกว่าตัวอย่าง 8FAK และ 8FASS ขณะที่การทดสอบในสารละลายแมกเนเซียมซัลเฟต พบว่าตัวอย่าง 8FAK กำลังอัดสูงกว่าตัวอย่าง 8FA และ 8FASS ส่วนผลการทดสอบตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ร่วมกับแมกเนเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ตัวอย่าง 8FA กำลังอัดสูงกว่าตัวอย่าง 8FAK และ 8FASS ตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีความแตกต่างกันในด้านความทนทาน ความทนทานเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อทดสอบตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ร่วมกับแมกเนเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ความทนทานของตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนแปลงมากเมื่อทดสอบในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกเนเซียมซัลเฟต พิจารณารูปที่ 2.25 ทดสอบในสารละลายแมกเนเซียมซัลเฟต พบว่ากำลังอัดสูงเนื่องจากอัลคาไลแพร่เข้าไปในส่วนของผิวตัวอย่าง จึงส่งผลต่อกำลังอัด ขณะที่ใน รูปที่ 2.26 ทดสอบในสารละลายโซเดียมซัลเฟตการแพร่ของอัลคาไลเข้าไปลึกกว่าจึงให้ผลตรงกันข้าม กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ร่วมกับแมกเนเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 แสดงในรูปที่ 2.7 [24]

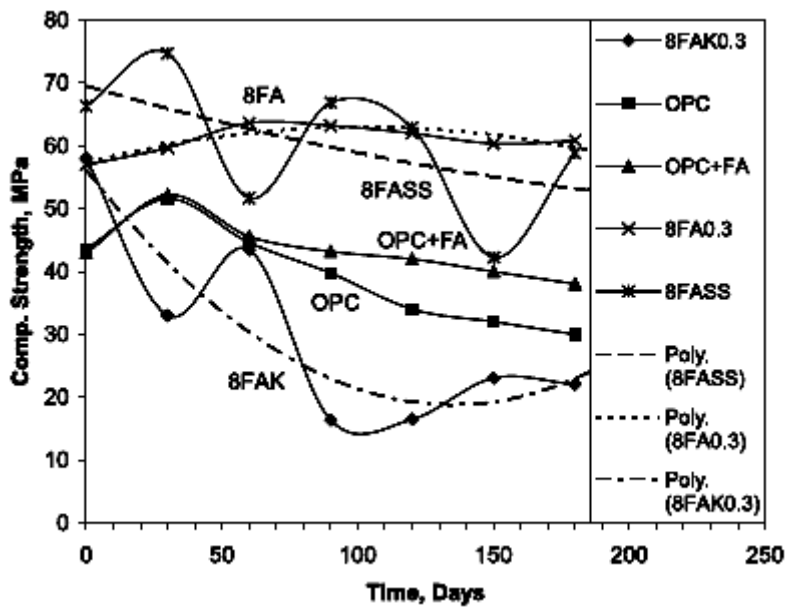
Geopolymer samples

Sample ID	Type of activator and w/b ratio	Concentration	Curing conditions
8FASS	Sodium silicate, w/b=0.3	8% Na	
8FA	Sodium hydroxide, w/b=0.3	8% Na	24 h at room temp., 24 h at 95 °C for all cases
8FAK	Sodium hydroxide+ Potassium hydroxide, w/b=0.3	8% Na +1%K	

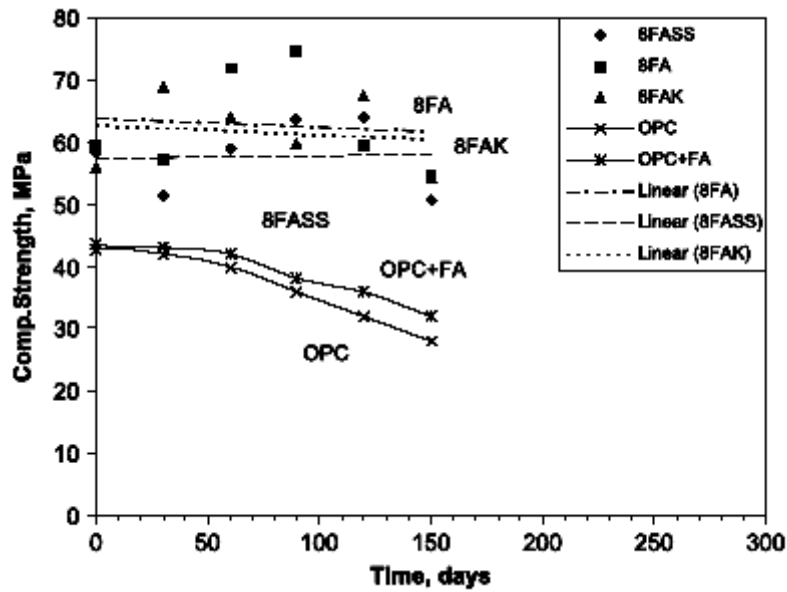
รูปที่ 2.24 ส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบจีโอโพลีเมอร์เพสต์ของ Barharev [24]



รูปที่ 2.25 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบในเมกนเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 [24]



รูปที่ 2.26 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบในโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 [24]



รูปที่ 2.27 กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบในสารละลายโซเดียมซิลิเกตความเข้มข้นร้อยละ 5 ร่วมกับแมกเนซียมซิลิเกตความเข้มข้นร้อยละ 5 [24]

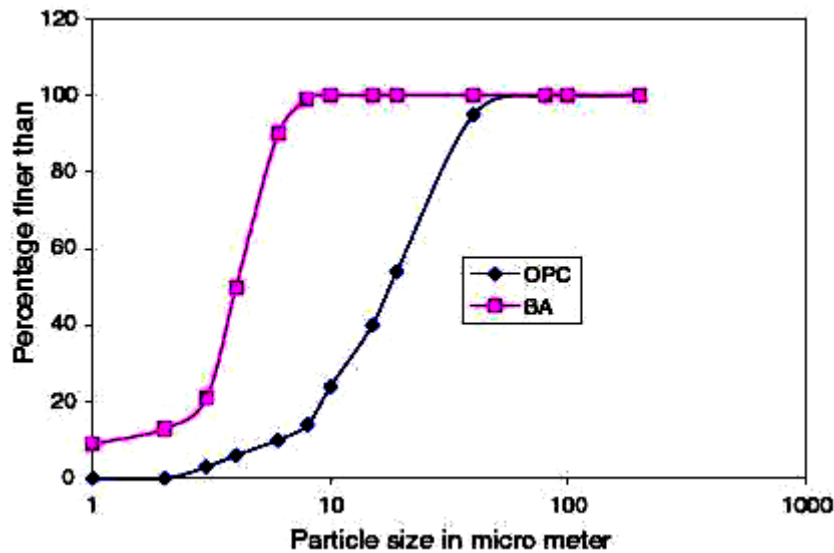
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุปอซโซลาน

2.9.1 งานวิจัยเกี่ยวกับเถ้าชานอ้อย

ปัจจุบันมีการนำวัสดุปอซโซลานจากผลพลอยได้ในโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ เช่น เถ้าถ่านหิน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังมีวัสดุเหลือทิ้งจากผลพลอยได้ในเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมอีกจำนวนหนึ่งที่นักวิจัยเริ่มนำมาศึกษาเพื่อใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ เช่น เถ้าแกลบ และเถ้าชานอ้อย เป็นต้น [25,26,27] โดยพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมี กล่าวคือ วัสดุปอซโซลานต้องมีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกา [9,28] และเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 [17] ซึ่งองค์ประกอบเคมีดังกล่าวทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันคือปฏิกิริยาปอซโซลานได้ผลผลิตเป็นโซเดียมซิลิเกตไฮเดรต [9,29]

ประเทศไทยมีโรงงานน้ำตาลอยู่โดยทั่วไป และประชาชนส่วนหนึ่งมีอาชีพปลูกอ้อยเพื่อส่งผลิตเป็นน้ำตาล ผลที่ได้จากกระบวนการผลิตดังกล่าวคือชานอ้อย ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการบีบเอาน้ำตาล โดยทั่วไปแล้วชานอ้อยไม่ได้ประโยชน์ใดๆ ดังนั้นจึงได้มีการใช้ชานอ้อยเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานขนาดเล็ก จากนั้นได้ส่วนที่เหลือเป็นเถ้าชานอ้อย ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ใกล้เคียงและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้ง หากมีการนำเถ้าชานอ้อยมาใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีต โดยใช้เป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนหรือทั้งหมดสำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างจะทำให้ประหยัดการใช้ปูนซีเมนต์ อีกทั้ง

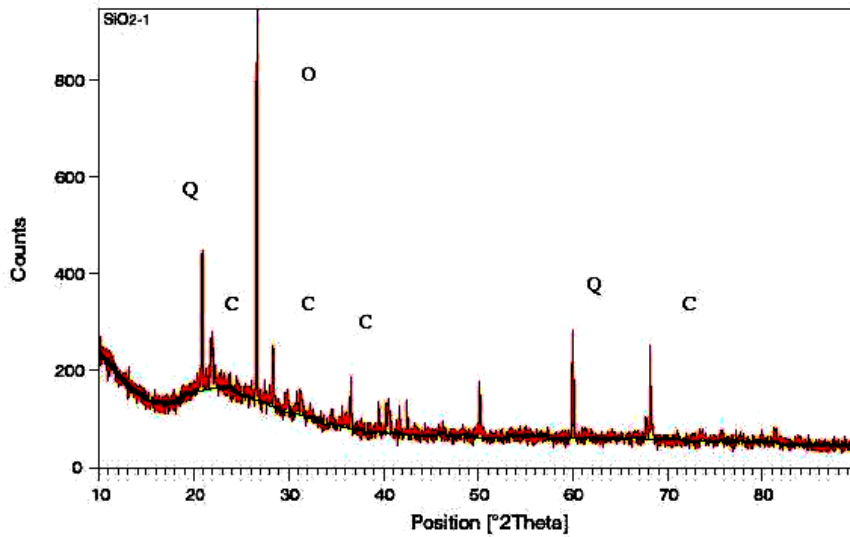
กระบวนการเผาสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ในรูปที่ 2.28 [27] เป็นขนาดอนุภาคของขานอ้อย ที่เผาด้วยการควบคุมที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ภายใน 1 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคพบว่าเมื่ออบเผ้าขานอ้อยให้มีความละเอียดมากขึ้น (BA) ส่งผลให้ขนาดอนุภาคเล็กลงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ (OPC)



รูปที่ 2.28 ขนาดอนุภาคของเผ้าขานอ้อยอบ งานวิจัยของ Ganesan และคณะ [27]

ในรูปที่ 2.29 เป็นผลทดสอบ X-ray deflection ของเผ้าขานอ้อยอบ งานวิจัยของ Ganesan และคณะ [27] พบว่าองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา สอดคล้องกับตามมาตรฐาน ASTM C618 [17] จึงถือว่าเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง สอดคล้องกับรูปที่ 2.30 ซึ่งเป็นผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีของเผ้าขานอ้อยด้วย X-ray fraction ส่วนในรูปที่ 2.31 เป็นผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเผ้าขานอ้อยบดละเอียด ในปริมาณร้อยละ 5 10 15 20 25 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 14 28 และ 90 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงที่การแทนที่เผ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และหลังจากนั้นกำลังอัดเริ่มลดลงเมื่อแทนที่เผ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุ 7 วัน กำลังอัดของคอนกรีตผสมเผ้าขานอ้อยมีค่าสูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วนในทุกส่วนผสม ที่อายุ 28 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเผ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน เช่นเดียวกับอายุการทดสอบที่ 90 วัน ที่อายุ 14 28 และ 90 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเผ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 25 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน การที่คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์

ด้วยเถ้าชานอ้อยมีค่ากำลังอัดสูงอาจเนื่องจากความละเอียดของเถ้าชานอ้อย และองค์ประกอบเคมีของซิลิกาที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี [29]

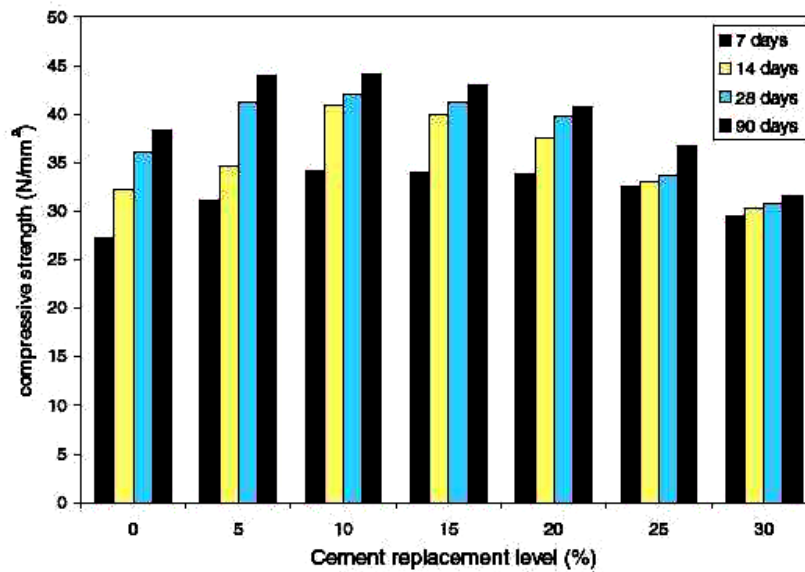


รูปที่ 2.29 X-ray deflection ของเถ้าชานอ้อยบด งานวิจัยของ Ganesan และคณะ [27]

Chemical composition of OPC and BA (%)

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Loss on ignition
OPC	19.25	5.04	3.16	63.61	4.56	0.08	0.51	3.12
BA	64.15	9.05	5.52	8.14	2.85	0.92	1.35	4.90

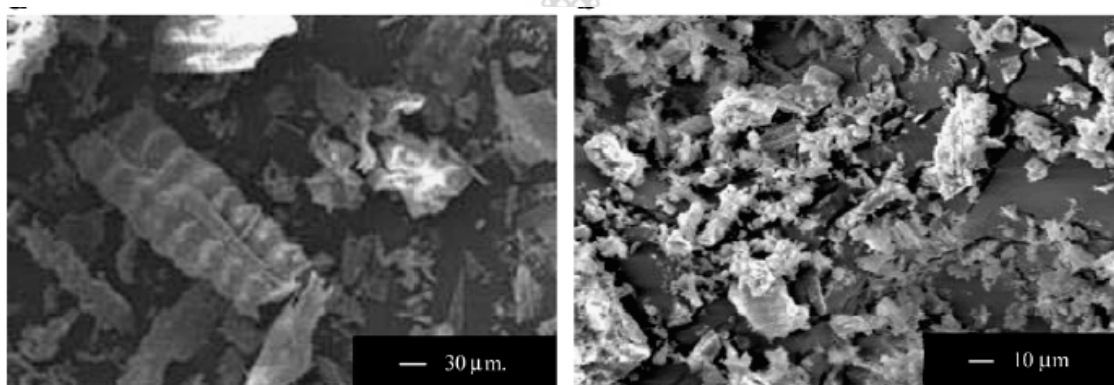
รูปที่ 2.30 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยบด งานวิจัยของ Ganesan และคณะ [27]



รูปที่ 2.31 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยบด งานวิจัยของ Ganesan และคณะ [27]

2.9.2 งานวิจัยเกี่ยวกับเถ้าแกลบ

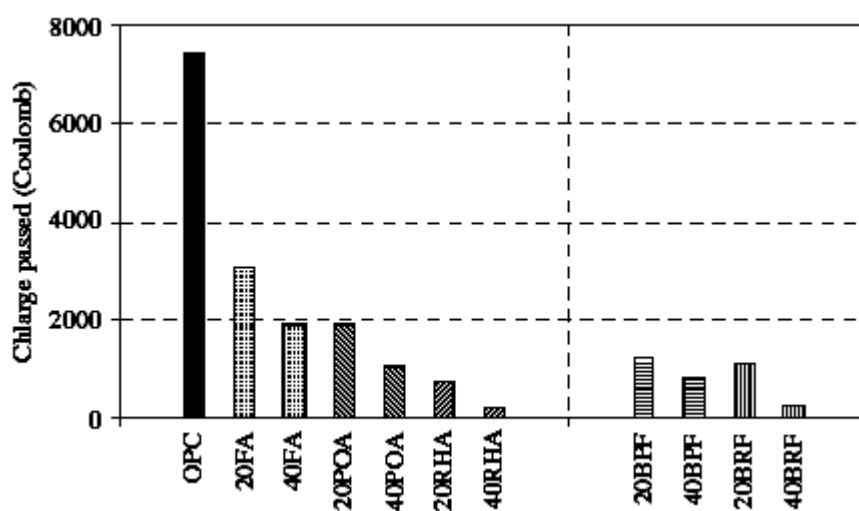
งานวิจัยของ Chindapasirt และคณะ [1] ใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อศึกษากำลังอัดและการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์พิจารณาในรูปที่ 2.32 พบว่าเถ้าแกลบก่อนบดมีขนาดใหญ่และมีความพรุนสูง หลังจากบดเถ้าแกลบพบว่ามีขนาดเล็กลงและความพรุนลดลง อย่างไรก็ตามความพรุนอาจยังเหลืออยู่บ้างในอนุภาคของเถ้าแกลบ ในรูปที่ 2.33 แสดงให้เห็นว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ผสมด้วยปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากผลของปริมาณซิลิกาในเถ้าแกลบ [1,29]



ก)

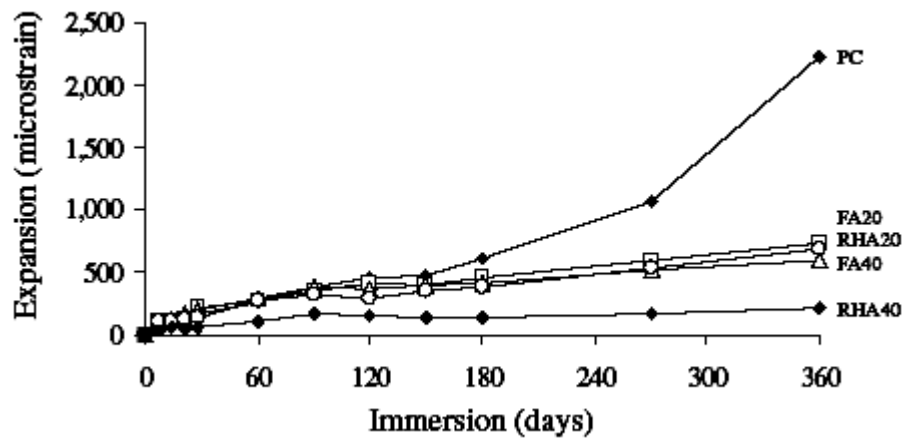
ข)

รูปที่ 2.32 เถ้าแกลบ ก) ก่อนบด และ ข) หลังบด

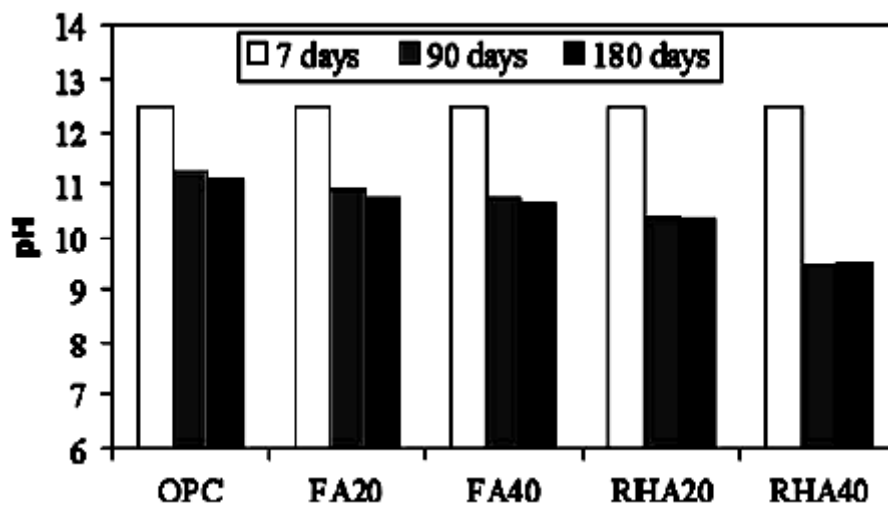


รูปที่ 2.33 การต้านทานคลอไรด์ของมอร์ต้าร์เถ้าแกลบ [1]

งานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [30] ศึกษาเกี่ยวกับผลของปริมาณแฉะตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 วัดการขยายตัวและความเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในรูปที่ 2.34 การดำนทานซัลเฟตให้ผลในทางที่ดีเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สำหรับรูปที่ 2.35 แสดงให้เห็นว่าที่อายุทดสอบ 7 วัน ค่า pH เปลี่ยนแปลงไม่มาก ขณะที่ที่อายุทดสอบ 90 และ 180 วัน ค่า pH ลดลง การแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ค่า pH ต่ำสุด เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์อื่นๆ



รูปที่ 2.34 การดำนทานซัลเฟตของมอร์ตาร์เถ้าแกลบ [30]



รูปที่ 2.35 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของมอร์ตาร์เถ้าแกลบ [30]

งานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เพื่อปรับปรุงคุณภาพและคุณสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ หรือคอนกรีต และการศึกษาส่วนใหญ่เป็นการใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ในบางส่วน ส่วนการศึกษาการใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนผลิตเป็นวัสดุอิโพลีเมอร์ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ กล่าวคือใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุประสานล้วนโดยไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสม งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเก้าอี้จากผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมเป็นวัสดุอิโพลีเมอร์ประกอบไปด้วยเก้าอี้กลมและเก้าอี้ขานอ้อยบดละเอียด ทำการศึกษาความคงทนและความทนทานของวัสดุอิโพลีเมอร์จากเก้าอี้กลมและเก้าอี้ขานอ้อย โดยทดสอบคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและการแทรกซึมคลอไรด์ ทั้งนี้เพื่อความเชื่อมั่นในการใช้วัสดุอิโพลีเมอร์ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

นอกจากนั้นยังสามารถนำผลงานวิจัยเผยแพร่บทความวิชาการเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ นอกจากนี้ยังเป็นการบริหารสิ่งเหลือใช้ให้เป็นประโยชน์ สร้างความสมดุลของสังคมและสิ่งแวดล้อม ลดพลังงานขยะลดสภาวะโลกร้อน ทำให้มีคุณค่าจากปัจจุบันสู่ออนาคต สร้างช่องทางจำหน่ายเก้าอี้กลมและเก้าอี้ขานอ้อยได้อีกหนึ่งช่องทาง ซึ่งงานวิจัยนี้จะพัฒนาและใช้งานเก้าอี้กลมและเก้าอี้ขานอ้อยให้เกิดประโยชน์ และเพิ่มมูลค่าหรือเปลี่ยนจากของไม่มีมูลค่าให้มีมูลค่าขึ้น

ผลงานวิจัยนี้จะเกิดแนวทางการใช้ประโยชน์ทั้งในด้านอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะการนำเก้าอี้ขานอ้อยไปใช้งานวัสดุคอนกรีต จะสร้างความมั่นคงในการจำหน่ายเก้าอี้และเป็นการสร้างทางเลือกให้แก่ผู้ประกอบการที่สนใจ เป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งได้ ลดปัญหาโลกร้อนจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และเมื่อคำนึงถึงความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ของการพัฒนาอิโพลีเมอร์ขึ้นใช้งานจริงในตลาดก่อสร้าง พบว่ากระบวนการผลิตอิโพลีเมอร์จะใช้ต้นทุนต่ำ เนื่องจากใช้ของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นวัสดุอิโพลีเมอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับงานคอนกรีตที่สามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้

หากพิจารณาถึงอนาคตของวัสดุอิโพลีเมอร์จึงมีความน่าจะเป็นที่จะสามารถใช้งานเชิงพาณิชย์เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากประเทศไทยมีเก้าอี้กลมและเก้าอี้ขานอ้อย จากผลพลอยได้ในกระบวนการอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการผลิตอิโพลีเมอร์ ดังนั้นการจัดตั้งโรงงานผลิตวัสดุอิโพลีเมอร์จึงมีความเป็นไปได้สูง

บทที่ 3

ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้ได้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการเตรียมวัสดุ วิธีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุพอลิโพรพิลีน การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ การทดสอบการซึมผ่านน้ำ การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำ การทดสอบหาค่าความพรุนหรือปริมาณโพรง การทดสอบกำลังอัด การทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration) และการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion) ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

1. ทำการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. กำหนดแหล่งเก็บและเก็บตัวอย่างที่จะใช้วิจัย และจัดหาจัดซื้ออุปกรณ์ ครุภัณฑ์
3. เก็บตัวอย่างเก็บและเก็บตัวอย่าง ทำการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างเก็บทั้งดังกล่าวสำหรับผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์
4. ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของเก็บและเก็บตัวอย่างโดยการบดให้มีขนาดเล็กลง ก่อนนำมาใช้ผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์
5. ทำการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเก็บและเก็บตัวอย่าง ประกอบด้วย ตรวจสอบหาค่าประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง x-ray fluorescence, ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ, ทดสอบหาปริมาณของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C 430, ทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบรอน ตามมาตรฐาน ASTM C 204, ถ่ายภาพขยายกำลังสูง ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope, ทดสอบการกระจายตัวและขนาดอนุภาคเฉลี่ย ด้วยเครื่อง Mastersizer และวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ด้วยเครื่อง x-ray diffraction ทั้งทางคุณภาพและปริมาณ
6. ทำการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ใช้แบบหล่อขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม.³ เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเคมีต่อกระบวนการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเก็บและเก็บตัวอย่างปัจจัยที่ศึกษา คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายเบสต่อเก็บตัวอย่าง อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ ระยะเวลาการบ่ม และปริมาณการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

7. เลือกอัตราส่วนและกระบวนการผลิตที่เหมาะสม ทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค กลไกปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นของเพสต์ซีโอ โพลีเมอร์ด้วยเครื่องมือ XRD, FTIR และ SEM/EDX และวิเคราะห์ปริมาตรโพรงของเพสต์ซีโอ โพลีเมอร์ด้วยเครื่องมือ MIP

8. ทำการทดสอบการต้านทานสารละลายกรดซัลฟูริกและการแทรกซึมผ่านของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ซีโอ โพลีเมอร์จากถ้ำเกลบและถ้ำซานอ้อย จากนั้นประมวลผล วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบในรายละเอียดเชิงลึก เพื่ออธิบายคุณสมบัติความทนทานของวัสดุซีโอ โพลีเมอร์จากถ้ำเกลบและถ้ำซานอ้อย

3.1.2 สถานที่ทำการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และรวมทั้งห้องปฏิบัติการของนักวิจัยร่วมโครงการ

3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์

1. Compressive machine
2. Sieve analysis
3. Mold cube
4. Flow table
5. อุปกรณ์ชั่งตวงวัดวัสดุ
6. เครื่องแก้ว
7. สารเคมี HCl-AgNO₃- Superplasticizer-NaOH- BufferpH- NaCl
8. แผ่นทองเหลืองขนาดหนา 0.5 มิลลิเมตร
9. แผ่นตะแกรงทองเหลืองเบอร์ 20
10. แผ่นสะแตนเลสขนาดหนา 0.5 มิลลิเมตร
11. แผ่นตะแกรงสะแตนเลสเบอร์ 20
12. หม้อผสมมอร์ตาร์
13. ใบบายผสมมอร์ตาร์
14. ถู่มือกั้นสารเคมี
15. แวนตากั้นสารเคมี
16. สายไฟฟ้าสำหรับชุดมาตรฐาน ASTM C1202

17. Epoxy
18. ซิลิโคน
19. น้ำกลั่น
20. ทราย
21. วัสดุพอลิเอทิลีน
22. ปูนซีเมนต์
23. เหล็กเสริมคอนกรีต
24. บีกเกอร์ขนาด 1000 ml
25. ขวดสีชาสำหรับ AgNO_3
26. ขวด Funnel ขนาด 500 ml
27. ใบมีดตัดคอนกรีต / มอร์ต้าร์

3.1.4 การออกแบบส่วนผสมของมอร์ต้าร์และรายละเอียดการทดสอบ

ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ใช้เถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ อัตราส่วนวัสดุจีโอโพลิเมอร์ต่อทรายใช้เท่ากับ 1: 2.75 โดยน้ำหนัก

1. ความสามารถทำงานได้

การทดสอบความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ทำได้โดยการวัดค่าการไหลผ่าน ปริมาณน้ำที่เติมเพิ่มจะใช้ในกรณีที่ต้องการให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีความสามารถทำงานได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการไหลปกติเท่ากับ $110 \pm 5\%$ สำหรับส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อยนั้น ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 10 และ 15 โมลาร์ ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์แตกต่างกันคือ 0.50, 1.50 และ 2.50 ตามลำดับ ปริมาณน้ำที่เติมเพิ่มจะใช้ในสัดส่วนร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนักของเถ้า หลังจากนั้นจะทำการทดสอบกำลังรับแรงโดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109-95 ปริมาณน้ำที่เหมาะสม พิจารณาจากค่าความสามารถทำงานได้ที่เท่ากันและที่ให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุ 7 วันสูงที่สุด

2. สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การวิจัยครั้งนี้ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเกล็ด ตาม มอก. 150-2518 โดยจะผสมเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 10 และ 15 โมลาร์ ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)	ร้อยละโดยน้ำหนัก		ความหนาแน่น (กรัม/ซีซี)	ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร	
	Na ₂ O	H ₂ O		NaOH (กรัม)	H ₂ O (กรัม)
10	30.40	69.60	1.317	400	917
15	42.50	57.50	1.413	600	813

3. สารละลายโซเดียมซิลิเกต

ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตชนิดที่ 2 ตาม มอก. 433-2539 ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงคุณสมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกต	
Sodium Oxide (Na ₂ O) %	15.32
Silicon Dioxide (SiO ₂) %	32.87
Water (H ₂ O) %	51.81
Specific Gravity (At 20 °C)	1.598
Density Baume	54.2

4. ทราย

ทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายแม่น้ำที่ใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป ล้างน้ำเพื่อเอาส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ ดินเหนียว และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออก แล้วนำมาอบแห้ง และนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 การเก็บตัวอย่างออกจากกอง ทำตามมาตรฐาน ASTM D 75-87

5. น้ำ

เพื่อลดตัวแปรเนื่องจากสารเจือปนจำพวกคลอรีนและไอออนอื่นๆในน้ำที่ใช้ในการผสมมอร์ตาร์ จึงใช้เป็นน้ำกลั่น

6. การเตรียมสารเคมี

ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมชนิดและปริมาณของน้ำยาเคมีประเภทเดียวกัน เพื่อลดตัวแปรอื่นๆให้มากที่สุด น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate solution) (Na_2O 15.32%, SiO_2 32.87% และน้ำ 51.81% โดยมวล) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide solution) ที่ความเข้มข้น 10 และ 15 โมลาร์ เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากสิ่งปนเปื้อนในน้ำที่ใช้ผสมจึงได้นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ในรูปของเกล็ด (Flake) มาละลายในน้ำกลั่นและสารละลายที่จะนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นนั้นจะต้องทำการเตรียมไว้อย่างน้อย 1 วันก่อนจะนำมาใช้

7. การเตรียมมวลรวม

ใช้ทรายหยาบปานกลางที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus; FM) เท่ากับ 2.64 ทรายที่ใช้จะต้องอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry; SSD) โดยทรายจะต้องแช่ในน้ำจนอิ่มตัวไปด้วยน้ำ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำทรายมาผึ่งลมและเช็ดผิวด้วยผ้าสะอาด ตรวจสอบสภาพอิ่มตัวผิวแห้งด้วยกรวยทดสอบ (Cone Test)

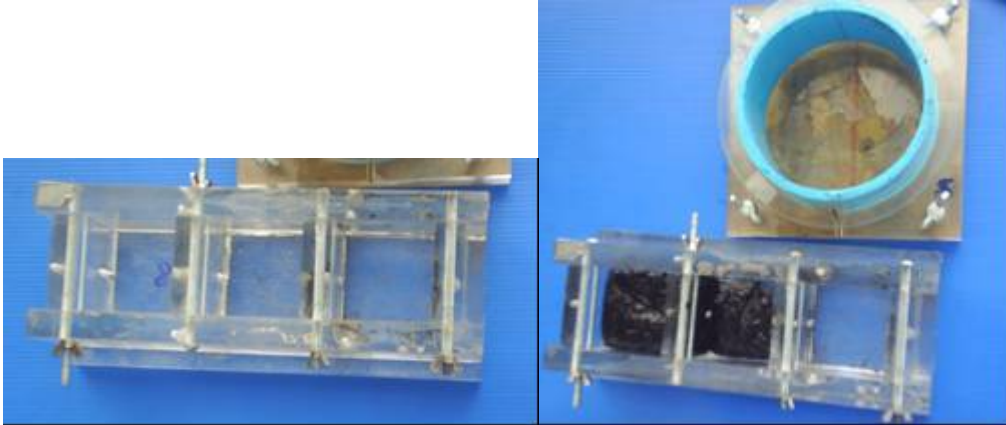
8. การผสมจีโอโพลิเมอร์

1. ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ครั้งนี้ ใช้อัตราส่วนทรายต่อเถ้าแกลบหรือเถ้าขานอ้อยใช้เท่ากับ 2.75

2. ขั้นตอนการผสมทำโดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และน้ำกลั่น ลงในเครื่องผสมเพื่อไปผสมกับเถ้าแกลบหรือเถ้าขานอ้อยและผสมในเครื่องผสมมอร์ตาร์ (Pan Mixture) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นมวลรวมละเอียดจะถูกนำมาผสมรวมกันแล้วคลุกเคล้าเป็นเวลา 5 นาที และจึงเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต แล้วผสมต่ออีกเป็นเวลา 5 นาทีสุดท้าย จนส่วนผสมที่ได้เข้ากันดี เนื้อจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จะมีความเหนียวเสมอดันเสมอปลาย

3. ทำการทดสอบค่าการไหลแต่ละตาม ASTM C124

4. เตรียมแบบหล่ออะคิลิกใสสำหรับหล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เช่น ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. หรือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบหล่อขนาด 50×50×50 มม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม.

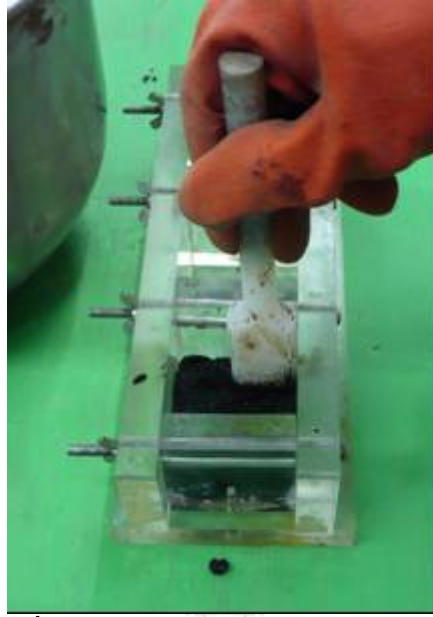
5. เทวัสดุโพลีเมอร์เถ้าแกลบหรือเถ้าชานอ้อยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในหม้อผสม จากนั้นเติมมวลรวมละเอียด และสารละลายโซเดียมซิลิเกตในขั้นตอนสุดท้าย ดังในรูปที่ 3.2

6. ทำตัวอย่างลงในแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มม. ดังแสดงรูปที่ 3.3

7. ทำตัวอย่างให้แน่น โดยวิธีการทำให้แน่นทำได้โดยแบ่งชั้นการกระทุ้งเป็น 2 ชั้น ในแต่ละชั้นกระทุ้งจำนวน 32 ครั้งและสั่นสะเทือน (Vibrate) เป็นเวลา 10 วินาทีบนโต๊ะเขย่า (Vibrating table) ดังรูปที่ 3.4 ใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ก้อนเพื่อหาค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์ผลของกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผสมจีโอโพลีเมอร์เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย



รูปที่ 3.3 การกระทุ้งตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์



รูปที่ 3.4 การทำให้เนื้อจีโอโพลิเมอร์แน่นด้วยโต๊ะเขย่า (Vibrating table)

8. ทันทีที่หล่อตัวอย่างเสร็จให้หุ้มตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติกไวนิล (Vinyl film) หรือฟิล์มพลาสติกห่ออาหาร ทั้งนี้เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำจากการระเหยในระหว่างการก่อตัว และบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ตัวอย่างที่หล่อเสร็จ แสดงในรูปที่ 3.5

9. เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องที่ระยะเวลาก่อนการบ่มร้อน (Delay time) ที่แตกต่างกัน คือ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างเข้าบ่มร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิจำเพาะเป็นเวลาหนึ่ง และที่ระยะเวลาจำเพาะที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างอีโพลีเมอร์ที่หล่อเสร็จแล้ว

10. ในช่วงสุดท้ายของการบ่มตามระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างออกจากตู้อบและเก็บรักษาในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องต่อไปจนกระทั่งได้เวลาทดสอบกำลังรับแรงอัด หรือความทนทานอื่นๆ

3.1.5 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ใช้ก้อนตัวอย่างทดสอบขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. โดยวิธีการเตรียมตัวอย่าง การหล่อ การบ่ม ทำตามมาตรฐาน ASTM C 109-95 อัตราส่วนของทรายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก เมื่อหล่อตัวอย่างอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์เสร็จแล้วนำตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนการบ่มร้อนคือ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างเข้าบ่มร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 45, 65, และ 90 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างออกจากตู้อบและเก็บรักษาในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวอย่างเย็นตัวลง หลังจากนั้นตัวอย่างยังคงถูกทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องต่อไปจนกระทั่งตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน จึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบกำลังรับแรงอัดจะทดสอบตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 อายุการทดสอบ

3.1.6 การทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำ

ในการทดสอบความพรุน (Porosity, %) ครั้งนี้ใช้ประยุกต์ด้วยการใช้ระบบ Vacuum porosity วิธีการทดสอบนี้ใช้ได้ดีในการหาค่าร้อยละความพรุนของวัสดุซีเมนต์มีงานวิจัยหลายงานวิจัยใช้การทดสอบวิธีนี้เช่นกัน [25,32-35] ส่วนการดูดซึมน้ำ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642

3.1.7 การทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์

1. เตรียมตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ออกแบบไว้ในส่วนผสมต่างๆ
2. เตรียมตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ มอร์ตาร์ในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร และสูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C39 เมื่อหล่อตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เสร็จแล้วนำตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนการบ่มร้อนคือ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างเข้าบ่มร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 45, 65, และ 90 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างออกจากตู้อบและเก็บรักษาในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวอย่างเย็นตัวลง หลังจากนั้นตัวอย่างยังคงถูกทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องต่อไปจนกระทั่งตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน จากนั้นนำมาทดสอบคลอไรด์ โดยตัดตัวอย่างทดสอบที่บริเวณกึ่งกลางคือประมาณ 100 มิลลิเมตร โดยให้มีความหนาประมาณด้านละ 50 มิลลิเมตร จะได้ตัวอย่าง 2 ชิ้นเพื่อนำไปทดสอบ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การตัดตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ทดสอบคลอไรด์

3. หลังเคลือบผิวตัวอย่างทดสอบโดยรอบด้วยอีพอกซี 1 วัน นำตัวอย่างทดสอบวางในโถแก้ว (Desiccator) จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในกรวยแก้ว (Separatory funnel) เปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อให้ระบบโพรงของตัวอย่างทดสอบมีเฉพาะอากาศ จนครบเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเปิดวาล์วทางเดินน้ำกลั่นจากกรวยแก้วลงโถแก้ว และเดินเครื่องปั๊มสุญญากาศต่อไปอีก 1 ชั่วโมง แล้วปิดเครื่องและแช่ตัวอย่างทดสอบในน้ำกลั่นเป็นเวลา 16 ถึง 20 ชั่วโมง ชุดทดสอบการอิมมิดีด้วยน้ำแสดงในรูปที่ 3.7

4. ทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ โดยอ้างอิงปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมอร์ตาร์ ทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ของมอร์ตาร์โดยใช้แรงดันในการทดสอบเท่ากับ 60 โวลต์ ระยะเวลาในการทดสอบ 6 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังแสดงในรูปที่ 3.8

การคำนวณการต้านทานคลอไรด์สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (3.1)

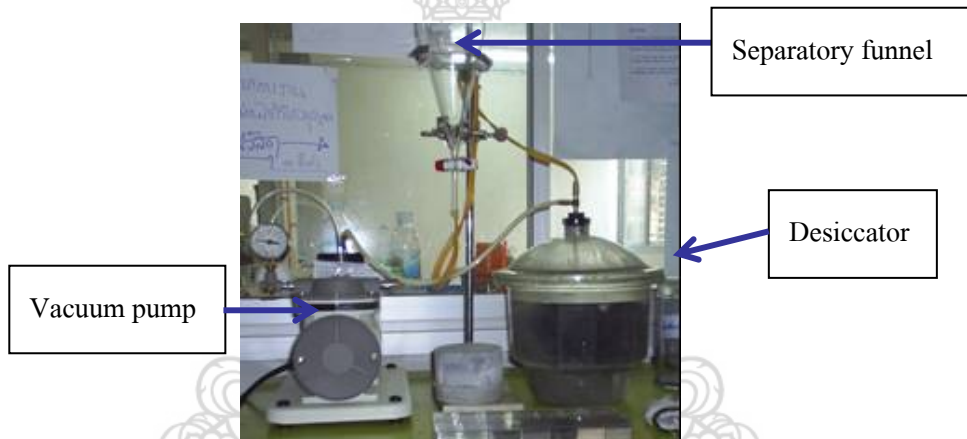
$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + 2I_{120} + 2I_{150} + 2I_{180} + 2I_{210} + 2I_{240} + 2I_{270} + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3.1)$$

เมื่อกำหนดให้

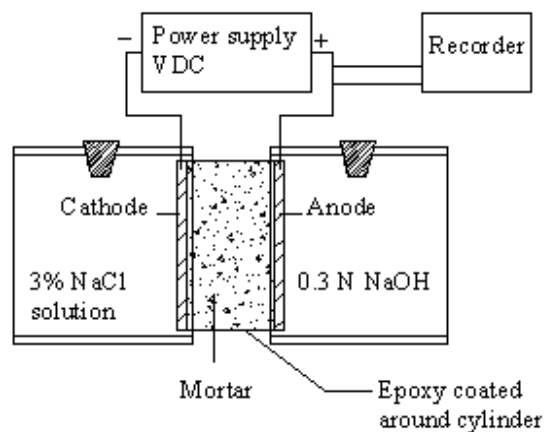
Q = กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างทดสอบหรือ Charge passed (Coulombs)

I_0 = ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหลังจากให้แรงดันไฟฟ้า (Amperes)

I_t = ค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างที่ระยะเวลา t นาที



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์การทำให้ตัวอย่างทดสอบอิมมัวด้วยน้ำ



รูปที่ 3.8 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ RCPT

5. นอกจากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202 (RCPT) ในรูปที่ 3.8 แล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ ยังได้ศึกษาความลึกของคลอไรด์ วิธีการทดสอบหาความลึกคลอไรด์ประกอบด้วย การทดสอบแบบเร่งด้วยแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.9 หาสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ โดยใช้รูปที่ 3.9 และการหาความลึกคลอไรด์ด้วยการแช่แบบธรรมชาติในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งมีงานวิจัยที่ผ่านมายังขึ้นทดสอบด้วยวิธีเหล่านี้ [1,28] รายละเอียดการทดสอบ มีดังนี้

1. การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งด้วยแรงดันไฟฟ้า (Rapid migration test, RMT) ทดสอบด้วยการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และสูง 50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.6

2. ที่การทดสอบ 7 วัน นำไปทดสอบหาความลึกของคลอไรด์แบบเร่งการทดสอบในโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ให้เป็นขั้วของ Cathode และให้ขั้วของ Anode อยู่ใน limewater ในกล่องพลาสติกยาว 370 กว้างเท่ากับ 270 และสูงเท่ากับ 280 มิลลิเมตรตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.9 จากนั้นให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 30 โวลต์ (dc) ระหว่างขั้ว Cathode และ Anode ทดสอบที่อายุ 30 วัน หลังการทดสอบ หักตัวอย่างมอร์ตาร์ดาร์แล้วฉีดด้วย 0.1 M AgNO₃ โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบของ Otsuki และคณะ [36] ความลึกคลอไรด์ในที่นี้สามารถนำไปหาสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของ คลอไรด์ด้วยสมการของ Nernst—Plank equation ซึ่งแสดงในสมการที่ (3.2)

$$D = \frac{RTL}{zFE} \times \frac{x_f}{t} \quad (3.2)$$

เมื่อกำหนดให้

D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ (Chloride ion diffusion coefficient) หน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที (cm²/s)

R = gas content (J/K mol, 8.314)

T = temperature (K)

L = ความหนาของมอร์ตาร์ดาร์ (cm)

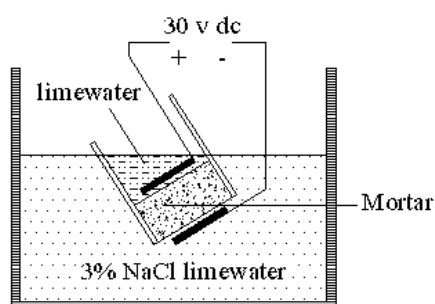
z = ion valence (1)

F = Faraday content (C/mol, 9.65×10⁴)

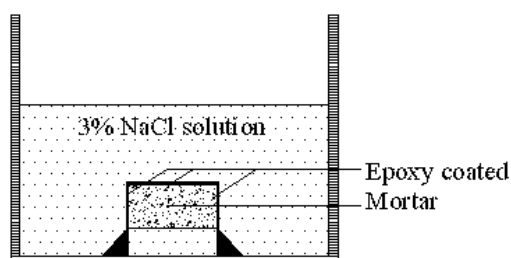
E = values of potential (V)

x_f = inflection point ของ chloride ion profiles that needs to be related to the depth given by the colorimetric technique และ t คือ เวลาในการทดสอบ (s)

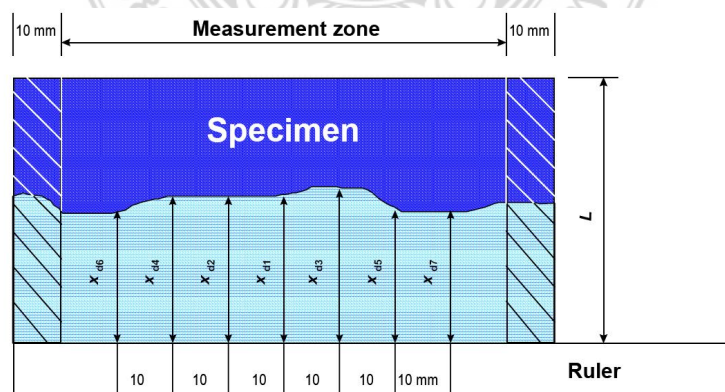
3. ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร ที่ตัดมาจากมอร์ตาร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร หลังจากบ่มที่ 7 วัน นำไปทดสอบหาความลึกของคลอไรด์แบบแช่ในโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยแช่จุ่มทั้งหมด (IMT) กล่องพลาสติกยาว 370 มิลลิเมตร กว้างเท่ากับ 270 มิลลิเมตรและสูงเท่ากับ 280 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 59 อ้างอิงมาตรฐาน RTA T362 [37] หลังจากแช่ตัวอย่างทดสอบครบ 30 วัน หักตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากนั้นฉีดหรือพ่นด้วย 0.1 M AgNO_3 ตามวิธีของ Otsuki และคณะ [36] การวัดความลึกใช้แบบรูปที่ 3.11 [37]



รูปที่ 3.9 การทดสอบหาความลึกและหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ [1,28]



รูปที่ 3.10 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่จุ่มทั้งหมด [1,28]



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการวัดความลึกคลอไรด์ [37]

3.1.8 การทดสอบการต้านทานกรดซัลฟูริก

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก จะใช้ตัวอย่างทดสอบเช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัดคือ ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. จำนวน 3 ตัวอย่าง อัตราส่วนของทรายต่อเถ้าใช้เท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก ภายหลังจากที่หล่อตัวอย่างเสร็จ นำตัวอย่างมาหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกไวนิล (Vinyl film) หรือพลาสติกห่ออาหาร เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำจากการระเหยในระหว่างการบ่มร้อน เก็บตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิห้องที่ระยะเวลาก่อนการบ่มร้อน (Delay time) 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างเข้าบ่มร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดเวลา ทิ้งตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้องต่ออีก 24 ชั่วโมง และแกะตัวอย่างออกจากแบบ ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก ที่อายุ 7 วัน นำตัวอย่างไปแช่ในน้ำ และสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่า pH ประมาณ 0.5 ภาชนะใส่สารละลายกรดซัลฟูริกจะหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อไม่ให้ไอระเหย แล้วนำไปเก็บไว้ในห้องทดสอบที่มีอุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส เมื่อตัวอย่างมีอายุภายหลังการแช่ครบ 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90, 105, 120 และ 180 วัน ทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยทำความสะอาดและเช็ดผิวให้แห้ง วัดขนาดพื้นที่หน้าตัด ความสูง และน้ำหนักของตัวอย่าง ปริมาณสารละลายกรดซัลฟูริกที่ใช้เท่ากับ 4 เท่าของปริมาตรตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง (1 ตัวอย่างมีปริมาตรเท่ากับ 125 มิลลิลิตร) และทำการเปลี่ยนสารละลายทุกๆ 1 เดือน

3.2 สัญลักษณ์วัสดุและตัวอย่างทดสอบ

ในตารางที่ 3.3 และ 3.4 แสดงส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ (10M) และ 15 โมลาร์ (15M) ตามลำดับ ในตารางที่ 3.5 และ 3.7 แสดงส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อย ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ (10M) และ 15 โมลาร์ (15M) ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ ด้วย NaOH = 10M

Mix. No.	Mix. Symbol	Na ₂ SiO ₃ /NaOH
Mix1	0.5Si/OH	0.5
Mix2	1.5Si/OH	1.5
Mix3	2.5Si/OH	2.5

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าเคลบ ด้วย NaOH = 15M

Mix. No.	Mix. Symbol	Na ₂ SiO ₃ /NaOH
Mix4	0.5Si/OH	0.5
Mix5	1.5Si/OH	1.5
Mix6	2.5Si/OH	2.5

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าขานอ้อย ด้วย NaOH = 10M

Mix. No.	Mix. Symbol	Na ₂ SiO ₃ /NaOH
Mix7	0.5Si/OH	0.5
Mix8	1.5Si/OH	1.5
Mix9	2.5Si/OH	2.5

ตารางที่ 3.6 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าขานอ้อย ด้วย NaOH = 15M

Mix. No.	Mix. Symbol	Na ₂ SiO ₃ /NaOH
Mix10	0.5Si/OH	0.5
Mix11	1.5Si/OH	1.5
Mix12	2.5Si/OH	2.5

สัญลักษณ์วัสดุและตัวอย่างทดสอบ โดยทั่วไป เป็นดังนี้

RB = เถ้าเคลบบดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดความละเอียดสัดส่วนข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ปริมาณร้อยละ 0-5 (liquid/ash = 1.2)

BA = เถ้าขานอ้อยบดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดความละเอียดสัดส่วนข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ปริมาณร้อยละ 0-5 (liquid/ash = 1.2)

MIX1 = 0.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ Na₂SiO₃/NaOH เท่ากับ 0.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสม เถ้าเคลบ ด้วย NaOH = 10M (liquid/ash = 1.2)

MIX2 = 1.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ Na₂SiO₃/NaOH เท่ากับ 1.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสม เถ้าเคลบ ด้วย NaOH = 10M (liquid/ash = 1.2)

MIX3 = 2.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ Na₂SiO₃/NaOH เท่ากับ 2.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสม เถ้าเคลบ ด้วย NaOH = 10M (liquid/ash = 1.2)

MIX4 = 0.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ทำกับ 0.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสม เถ้าแกลบ ด้วย $\text{NaOH} = 15\text{M}$ (liquid/ash = 1.2)

MIX5 = 1.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ทำกับ 1.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสม เถ้าแกลบ ด้วย $\text{NaOH} = 15\text{M}$ (liquid/ash = 1.2)

MIX6 = 2.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ทำกับ 2.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสม เถ้าแกลบ ด้วย $\text{NaOH} = 15\text{M}$ (liquid/ash = 1.2)

MIX7 = 0.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ทำกับ 0.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสม เถ้าขานอ้อย ด้วย $\text{NaOH} = 10\text{M}$ (liquid/ash = 1.2)

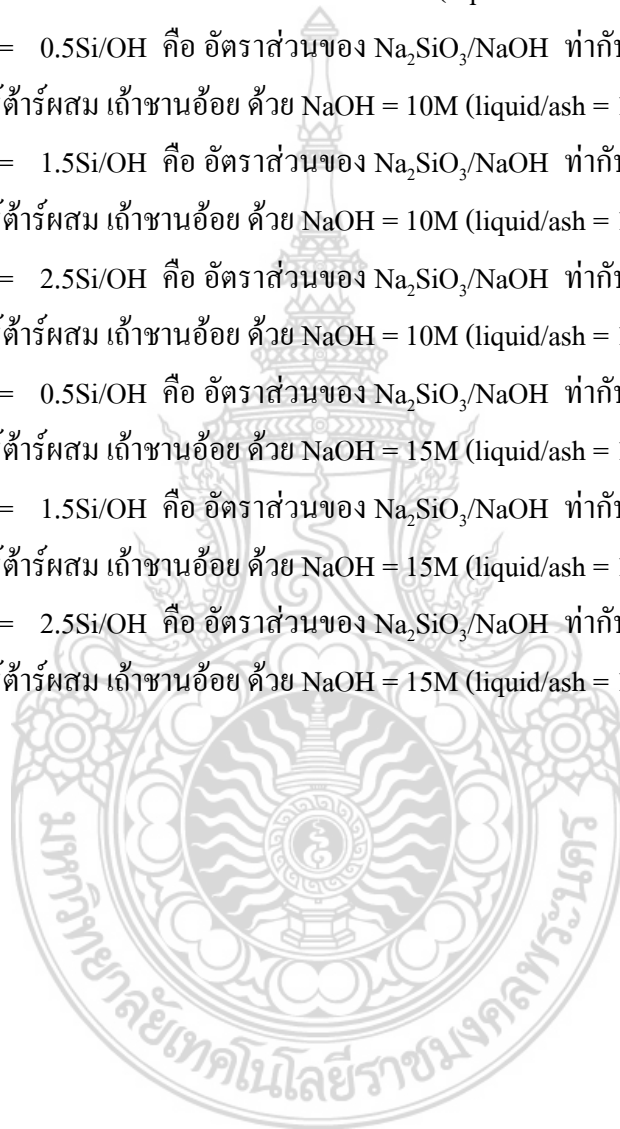
MIX8 = 1.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ทำกับ 1.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสม เถ้าขานอ้อย ด้วย $\text{NaOH} = 10\text{M}$ (liquid/ash = 1.2)

MIX9 = 2.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ทำกับ 2.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสม เถ้าขานอ้อย ด้วย $\text{NaOH} = 10\text{M}$ (liquid/ash = 1.2)

MIX10 = 0.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ทำกับ 0.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสม เถ้าขานอ้อย ด้วย $\text{NaOH} = 15\text{M}$ (liquid/ash = 1.2)

MIX11 = 1.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ทำกับ 1.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสม เถ้าขานอ้อย ด้วย $\text{NaOH} = 15\text{M}$ (liquid/ash = 1.2)

MIX12 = 2.5Si/OH คือ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ทำกับ 2.5 และเป็นส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสม เถ้าขานอ้อย ด้วย $\text{NaOH} = 15\text{M}$ (liquid/ash = 1.2)



บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่ใช้ผลิตเป็นจีโอโพลีเมอร์ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตัวอย่างทดสอบ วิเคราะห์ขนาดรูปร่างของอนุภาค วัสดุ วิเคราะห์ภาพกำลังขยายด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย และนำมาวิเคราะห์ผลในด้านของกำลังอัด ความพรุน การต้านทานคลอไรด์ และการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

4.1 คุณสมบัติของเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพโดยรวมของของเถ้าแกลบ (RA) และเถ้าชานอ้อย (BA) แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้วิธีการทดลองคัดเลือกมา หลังการพบพบว่า เถ้าแกลบบดละเอียด RA มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 11,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 0-5 ส่วนเถ้าชานอ้อยบดละเอียด BA มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.24 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 12,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 ร้อยละ 0-5 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1,38]

ตารางที่ 4.1 เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบก่อนบด (RA-O) และเถ้าชานอ้อยก่อนบด (BA-O) จากตารางที่ 4.1 พบว่า เถ้าแกลบ RA-O และเถ้าชานอ้อย BA-O มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.96 และ 1.85 ตามลำดับ เถ้าแกลบ RA-O และเถ้าชานอ้อย BA-O มีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 75 และ 58 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบบดละเอียด (RA) และเถ้าชานอ้อยบดละเอียด (BA) ผลทดสอบพบว่า พบว่า เถ้าแกลบบดละเอียด RA มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 11,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 0-5 ส่วนเถ้าชานอ้อยบดละเอียด BA มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.24 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 12,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 ร้อยละ 0-5 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1,38]

การศึกษาชี้ให้เห็นว่าการบดเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย ทำให้ความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [39,40] จากคุณสมบัติดังกล่าวจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน [41] อนุภาคที่ล้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยลงเนื่องจากส่วนละเอียดปริมาณมากที่ผ่านตะแกรงซึ่งมีขนาดเล็กกว่าและอนุภาคที่ถูกบดจนแตกและมีขนาดเล็กของ RA และ BA ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น และเมื่อพิจารณา BA ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า RA เล็กน้อย จึงทำให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เช่นกัน ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น Chindaprasirt et al. [5]

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของ RA-O และ BA-O

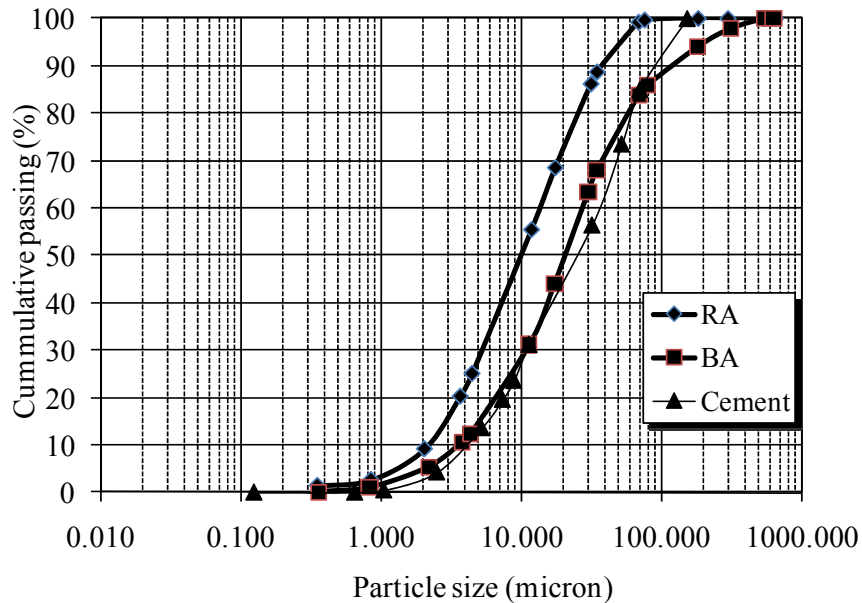
Physical properties	RA-O	BA-O
Retained on a sieve No. 325 (%)	75	58
Specific Gravity	1.96	1.85
Blaine Fineness (cm ² /gm) - ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	-	-

ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของ RA และ BA

Physical properties	RA	BA
Median particle size (µm), d ₅₀ - ไมครอน	15	19.5
Retained on a sieve No. 325 (%)	0-5	0-5
Specific Gravity	2.25	2.24
Blaine Fineness (cm ² /gm) - ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	11,000	12,000

รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ RA และเถ้าชานอ้อย BA ซึ่งเส้นกราฟของวัสดุทั้งสองสูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (Cement) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบ RA และเถ้าชานอ้อย BA เมื่อผ่านการแยกขนาดและผ่านการบดทำให้มีความละเอียดที่มากขึ้นเนื่องจากขนาดอนุภาคเล็กกว่าเดิม เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sata et al. [1,38] หากพิจารณาขนาดอนุภาคเฉลี่ยจากน้อยที่สุดไปหามากที่สุดได้ว่า RA, BA และ Cement มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 15.0, 19.5 และ 21.5 ไมครอน (µm) ตามลำดับ RB, BA และ Cement มีการกระจายตัวร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 1–30, 1–25 และ 3–40 ไมครอน ตามลำดับ ดังนั้น เถ้าที่ถึงจากผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ในงานวิจัยนี้จัดเป็นวัสดุปอซ

โพลีเมอร์ชนิดหนึ่ง สามารถใช้เป็นวัสดุพอลิโพลีเมอร์ได้ เมื่อพิจารณาตามผลการทดสอบมาตรฐานทางกายภาพ ดังกล่าวข้างต้น อย่างไรก็ตามวัสดุพอลิโพลีเมอร์ที่ใช้ในการวิจัยดังกล่าวนี้ เป็นคนละชนิดกัน



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของอนุภาคของ RA และ BA

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (CT) มีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 65 ในส่วนขององค์ประกอบหลักของ เถ้าขานอ้อย BA คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 65 นอกจากนี้การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) มีค่าเท่ากับร้อยละ 18 ผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับร้อยละ 73 พบว่ามากกว่าร้อยละ 70 ผลทดสอบคล้ายกับงานวิจัยของ Ganesan et al. [7] เมื่อวิเคราะห์ด้านองค์ประกอบทางเคมีแล้วสามารถเข้าใจได้ว่า เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเป็นวัสดุพอลิโพลีเมอร์ทั่วไปโดยอยู่ใน Class N เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานของ ASTM C618 [17]

เถ้าแกลบ RA ได้จากการเผาแกลบที่อุณหภูมิเท่ากับ 600-650 องศาเซลเซียส เผาด้วยการใช้ปริมาณกองละ 20 กิโลกรัม ผลจากการทดสอบเถ้าแกลบบดละเอียดมีปริมาณ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 93 และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบเคมีแล้วพบว่าเป็นวัสดุพอลิโพลีเมอร์ชนิดทั่วไปโดยพิจารณาตามมาตรฐานของ ASTM C618 [17] นอกจากนี้ผลทดสอบยังพบว่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on

Ignition, LOI) มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.5 แสดงว่ามีการเผาที่เหมาะสมและสมบูรณ์ นอกจากนั้นผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ คือร้อยละ 93.5 และมี CaO เพียงร้อยละ 1.5 งานวิจัยนี้ได้ผลใกล้เคียงกันกับงานวิจัยของ Asavapisit & Ruengrit [42] ซึ่งเผาแกลบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และนำไปบดละเอียด ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีพบว่าได้ปริมาณของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 90.2 [42]

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของ Cement (CT), RA และ BA

Oxides (%)	Cement	RA	BA
CaO (%)	65	1.5	9
SiO_2 (%)	25	93	65
Al_2O_3 (%)	6	0.4	5
Fe_2O_3 (%)	6	0.1	3
MgO (%)	3.4	0.1	0
K_2O (%)	0.5	1.3	2
SO_3 (%)	5	0.9	0
LOI (%)	0.9	3.5	17
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	—	93.5	73

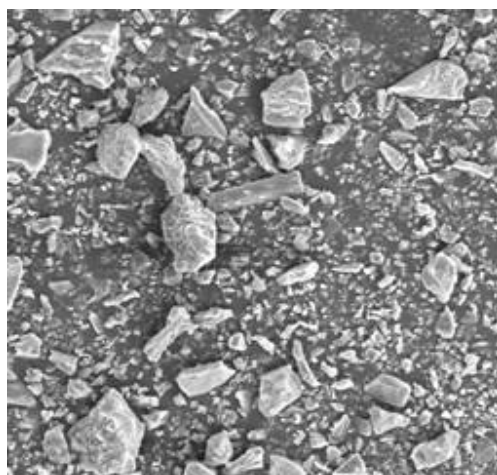
4.1.3 รูปร่างของอนุภาค

รูปที่ 4.2 และ 4.3 เป็นภาพถ่ายกำลังขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ของ แฉาบบดละเอียด (RA) และแฉาบอ้อยบดละเอียด (BA) ตามลำดับ จากภาพกำลังขยายในรูปที่ 4.2 พบว่าหลังจากการบดแฉาบด้วยเครื่องบดส่งผลทำให้แฉาบมีขนาดเล็กงูรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) ความพรุนยังมีอยู่บ้างแต่อาจน้อยกว่าก่อนการบด

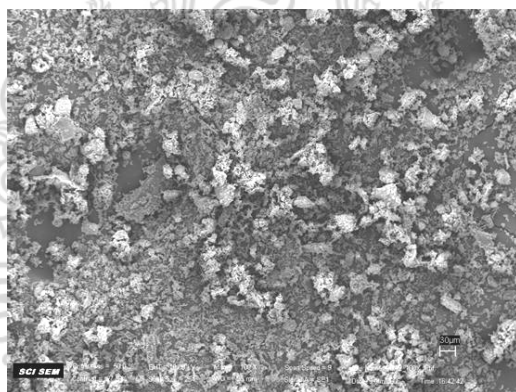
ส่วนในรูปที่ 4.3 เป็นภาพถ่ายกำลังขยายกำลังสูงของแฉาบอ้อย (SEM) เมื่อผ่านการบดแล้วส่งผลทำให้แฉาบอ้อยมีรูปร่างเล็กงู ความพรุนลดลง มีความเป็นเหลี่ยมมุม คล้ายกับผลของการบดแฉาบ ผลทดสอบครั้งนี้เหมือนกับงานวิจัยที่ผ่านมามากมาย [7,13]

รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแฉาบอ้อยด้วย X-ray diffraction (XRD) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่าองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลานทั้งสองมีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อพิจารณาผลการทดสอบทางเคมีดังกล่าวนี้พบว่าแฉาบทั้งจาก

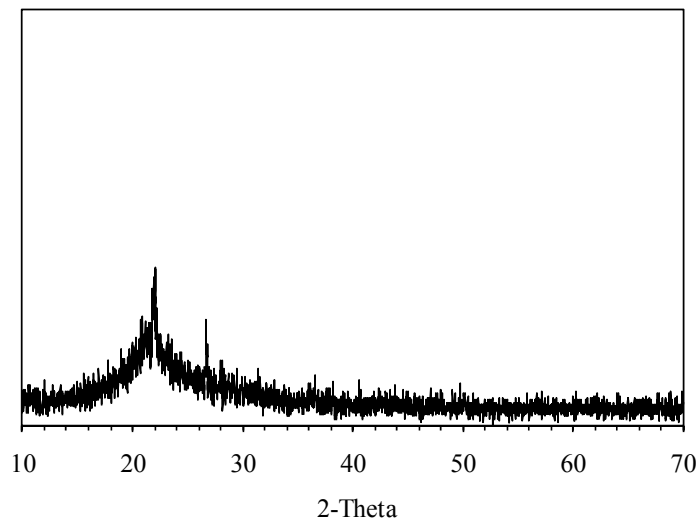
ผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ในงานวิจัยจึงสามารถใช้เป็นวัสดุพอชโซลานได้และสามารถนำไปเป็นวัสดุอีโพลีเมอร์ได้ เมื่อพิจารณาตามผลการทดสอบมาตรฐานทางกายภาพ ดังกล่าวข้างต้น



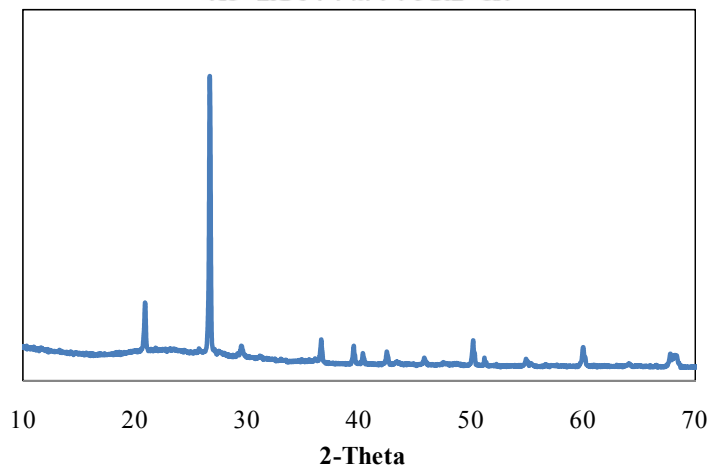
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายของถ้ำเกลบบดละเอียด (RA)



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายของถ้ำชานอ้อยบดละเอียด (BA)



รูปที่ 4.4 XRD ของถ้ำแกลบ-เปลือกไม้ (RA)



รูปที่ 4.5 XRD ของถ้ำชานอ้อย (BA)

4.2 การทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำแกลบและถ้ำชานอ้อย

ตารางที่ 4.4-4.5 แสดงผลการทดสอบค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 และ 15 โมลาร์ ส่วนตารางที่ 4.6-4.7 แสดงผลการทดสอบค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำชานอ้อยที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 และ 15 โมลาร์ ผลทดสอบพบว่าค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำแกลบในตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่ามีค่าอยู่

ในช่วงระหว่างร้อยละ 109-115 โดยมีอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยน้ำหนัก อยู่ในช่วง 0.50-2.50 การทดสอบครั้งนี้ใช้ควบคุมอัตราส่วนสารละลายต่อเกลือเท่ากับ 1.2 (หรือค่า W/B = 1.2) และได้ค่าการไหลแผ่ในข้างต้น ในตารางที่ 4.4 พบว่าการใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50 (10M) มอร์ต้าร์มีความแข็งแรงเข้าแบบยากจึงจำเป็นต้องเติมน้ำปริมาณร้อยละ 1.5 ของเกลือกลงในส่วนผสมเพื่อให้สามารถทำงานและเทเข้าแบบได้ โดยมีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 113 การใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.50 (10M) ทำงานได้ยากเล็กน้อยเนื่องจากมอร์ต้าร์มีความเหนียวจึงต้องเติมน้ำปริมาณร้อยละ 2.5 ของเกลือกลงในส่วนผสมเพื่อให้สามารถทำงานและเทเข้าแบบได้ โดยมีค่าการไหลแผ่เท่ากับ ร้อยละ 112 ขณะที่การใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.50 (10M) สามารถทำงานได้ยากมากเนื่องจากมอร์ต้าร์มีเนื้อเหนียวมากขึ้นจึงจำเป็นต้องเติมน้ำในส่วนผสม และมีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ส่วนในตารางที่ 4.5 การใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50-2.5 (15M) ได้ผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกับ 10M

ตารางที่ 4.4 ค่าการไหลแผ่ (Flowability) ของจีโอโพลิเมอร์จากเกลือแกลบ 10M

อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(โมลาร์)	ค่าการไหล (%)	น้ำ (% ของเกลือ)
0.50	10	113	1.5
1.50	10	112	2.5
2.50	10	110	3.2

ตารางที่ 4.5 ค่าการไหลแผ่ (Flowability) ของจีโอโพลิเมอร์จากเกลือแกลบ 15M

อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(โมลาร์)	ค่าการไหล (%)	น้ำ (% ของเกลือ)
0.50	15	115	1.2
1.50	15	113	2.0
2.50	15	110	2.8

ผลทดสอบพบว่าค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์จากเก้าชานอ้อยในตารางที่ 4.6 และ 4.7 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 109-115 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 และ 15 โมลาร์ ได้ผลการทดสอบที่คล้ายกัน กล่าวคือ ใช้ค่าอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยน้ำหนัก เท่ากับ 0.50-2.50 ในตารางที่ 4.6 พบว่าการใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50 (10M) ทำงานได้ยากเนื่องจากมอร์ต้าร์มีเนื้อแข็งจึงต้องเพิ่มน้ำปริมาณร้อยละ 2.0 ของเก้าชานอ้อยลงในส่วนผสมเพื่อให้สามารถทำงานได้ โดยมีค่าการไหลแก่เท่ากับร้อยละ 114 การใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.50 (10M) ทำงานได้ยากเล็กน้อยเนื่องจากความเหนียวของเนื้อมอร์ต้าร์ จึงต้องเพิ่มน้ำปริมาณร้อยละ 2.8 ของเก้าชานอ้อยลงในส่วนผสมเพื่อให้สามารถทำงานได้ โดยมีค่าการไหลแก่เท่ากับร้อยละ 111 ขณะที่การใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.50 (10M) สามารถทำงานได้ยากมากเนื่องจากมอร์ต้าร์มีเนื้อเหนียวมากจำเป็นต้องเติมน้ำในส่วนผสม และมีค่าการไหลแก่เท่ากับร้อยละ 109 ส่วนในตารางที่ 4.7 การใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50-2.5 (15M) ได้ผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกับ 10M

ตารางที่ 4.6 ค่าการไหลแก่ (Flowability) ของจีโอโพลิเมอร์จากเก้าชานอ้อย 10M

อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(โมลาร์)	ค่าการไหล (%)	น้ำ (% ของเก้า)
0.50	10	114	2.0
1.50	10	111	2.8
2.50	10	109	3.5

ตารางที่ 4.7 ค่าการไหลแก่ (Flowability) ของจีโอโพลิเมอร์จากเก้าชานอ้อย 15M

อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(โมลาร์)	ค่าการไหล (%)	น้ำ (% ของเก้า)
0.50	15	115	2.5
1.50	15	110	3.3
2.50	15	110	3.8

ความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [18] ดังตารางที่ 4.4-4.7 สำหรับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ มีแนวโน้มค่าการไหลแผ่ลดลง เมื่อเทียบกับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยสามารถทำงานได้ง่ายเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น

การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในส่วนผสมจะส่งผลทำให้ค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [18] เนื่องจากโดยตัวของสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะมีความหนืดอยู่สูง และหากยังใช้ในส่วนผสมมากย่อมเป็นการเพิ่มค่าความหนืด (Viscosity) ของสารละลายและลดค่าการไหลในที่สุด [18] ผลการทดสอบยังพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 โมลาร์ ส่งผลให้ส่วนผสมมีความเหนียวขึ้นขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเติมน้ำเพิ่มเติม (Extra water) ลงไปในส่วนผสมเพื่อให้สามารถทำงานได้ ผลการทดสอบยังพบอีกว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมจะส่งผลทำให้ค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นเป็นการเพิ่มค่าความหนืด (Viscosity) ของสารละลายและลดค่าการไหลของส่วนผสม กล่าวคือ การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะลดความสามารถในการทำงานได้ของส่วนผสมทั้งสิ้น และในการเพิ่มความความสามารถในการทำงานได้จึงทดลองด้วยวิธีการเติมน้ำเพิ่มเติม (Extra water) ลงไปในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

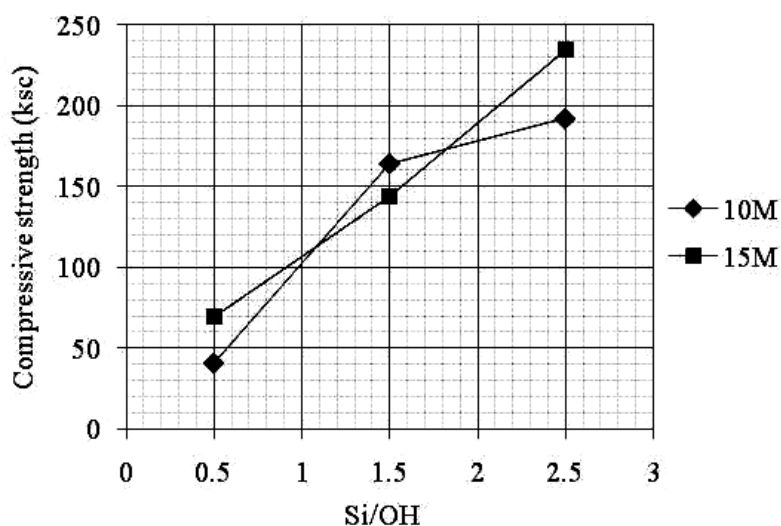
ในผลการทดสอบข้างต้น นอกจากการเติมน้ำเพื่อให้มอร์ตาร์มีความสามารถทำงานได้แล้ว สังเกตได้ว่าอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนักมอร์ตาร์ไม่มีความเหนียว แต่เนื้อของมอร์ตาร์มีความแข็ง จึงเพิ่มความความสามารถในการเทด้วยการเติมน้ำเพื่อผลของค่าการไหลแผ่ เนื่องจากเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยมีความพรุนแม้จะผ่านการบดมาแล้ว จึงส่งผลให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นผลเนื่องจากความละเอียดของวัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ [5,9]

4.3 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

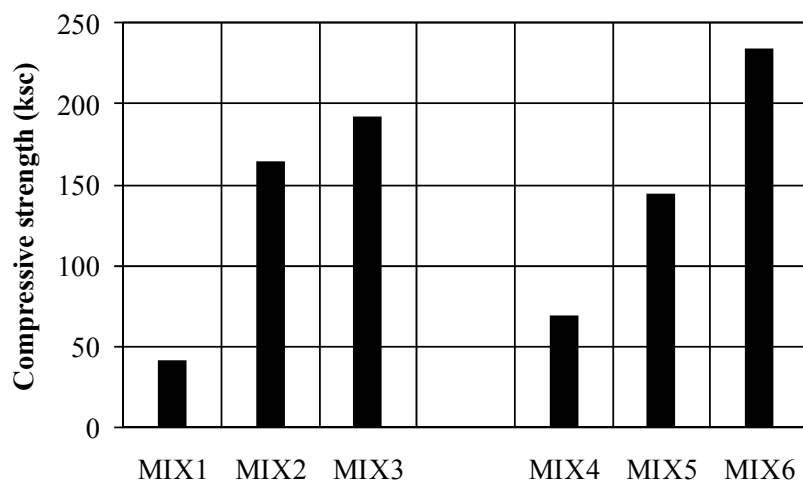
4.3.1 อัตราส่วนของ Si/OH ต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

รูปที่ 4.6 แสดงผลของอัตราส่วนของ Si/OH ต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ ที่อายุ 7 วัน ที่อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 และ 2.5 ที่ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M ขณะที่อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 1.5 ที่ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M ค่ากำลังอัดต่ำกว่า 10M อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาแนวโน้มของกำลังอัดแล้ว พบว่าที่ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M และกำลังอัดลดลงตามอัตราส่วนของ Si/OH ที่ลดลง

ในรูปที่ 4.7 กำหนดให้ MIX1 MIX2 และ MIX3 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M ที่อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ และกำหนดให้ MIX4 MIX5 และ MIX6 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M ที่อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ MIX1 MIX2 และ MIX3 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 41.3 161.3 และ 192.02 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ขณะที่ MIX4 MIX5 และ MIX6 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 69.2 142.1 และ 234.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ที่อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 2.5 และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M ทดสอบที่อายุ 7 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Si/OH ของจีโอโพลีเมอร์เถ้าแกลบที่ 10M และ 15M

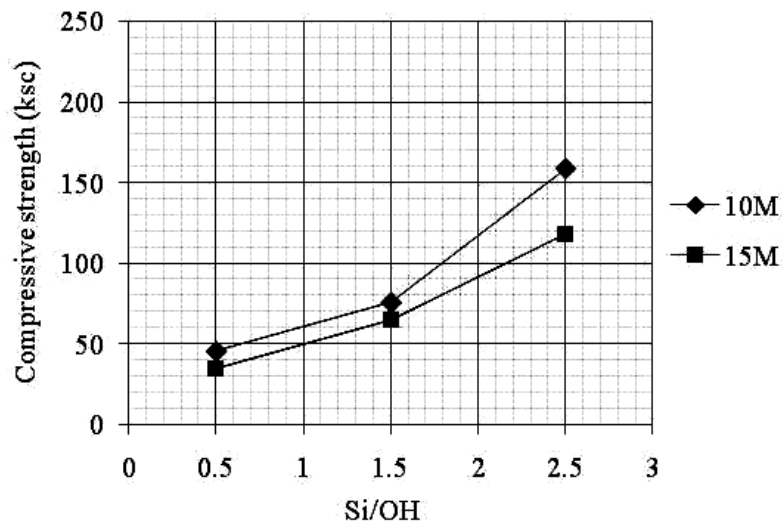


รูปที่ 4.7 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เก่าแกลบที่อายุ 7 วัน

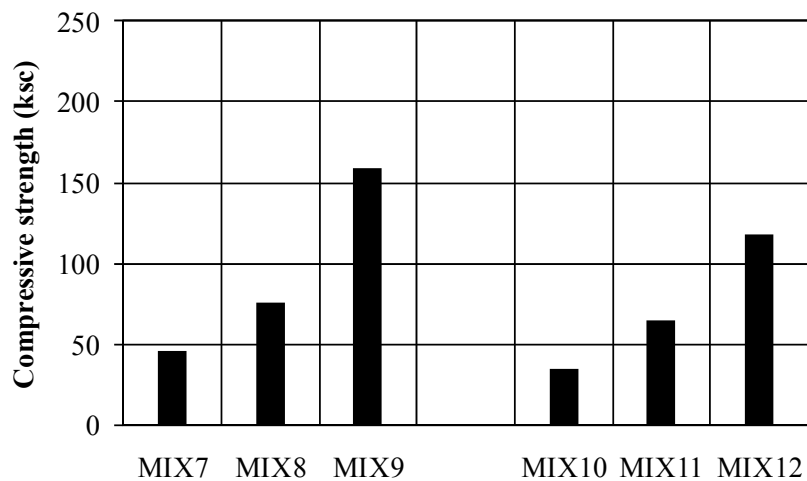
รูปที่ 4.8 แสดงผลของอัตราส่วนของ Si/OH ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเก่าขานอ้อย ที่อายุ 7 วัน มีผลการทดสอบตรงข้ามกับแกลบ กล่าวคือ ที่อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ที่ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M และกำลังอัดลดลงตามอัตราส่วนของ Si/OH ที่ลดลงด้วย

รูปที่ 4.9 กำหนดให้ MIX7 MIX8 และ MIX9 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเก่าขานอ้อยที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ ส่วน MIX10 MIX11 และ MIX12 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเก่าแกลบที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ ผลทดสอบพบว่า MIX7 MIX8 และ MIX9 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 45.5 75.6 และ 158.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ขณะที่กำลังอัดของ MIX10 MIX11 และ MIX12 มีค่าเท่ากับ 34.6 65.2 และ 118.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 และ 4.8 แสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเก่าขานอ้อยมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเก่าแกลบ เนื่องจากซิลิกาในเก่าแกลบที่มีค่อนข้างสูงกว่าจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้มากโดยเฉพาะผลิตผลแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) [29]

สรุปได้ว่า การใช้อัตราส่วน Si/OH ที่ต่ำส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่สูงและมีกำลังอัดที่ต่ำลงเนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตน้อยเกินไป ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันลดลง ทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ไม่แข็งตัว



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Si/OH ของจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อยที่ 10M และ 15M

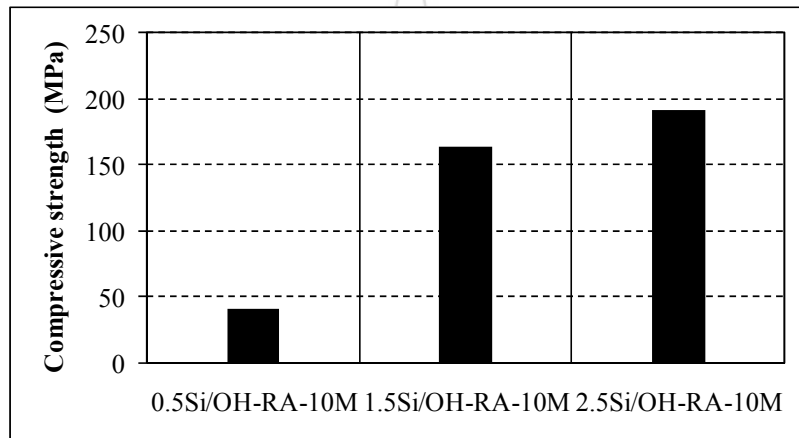


รูปที่ 4.9 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าชานอ้อยที่อายุ 7 วัน

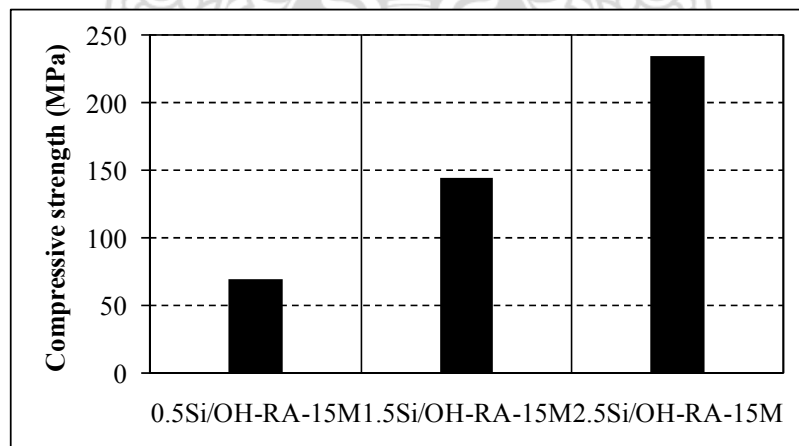
4.3.2 ผลของ OH ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

รูปที่ 4.10-4.13 แสดงผลของ OH ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ และเถ้าชานอ้อย ที่อายุ 7 วัน กำหนดให้ 0.5Si/OH-RA-10M, 1.5Si/OH-RA-10M, 2.5Si/OH-RA-10M คือ จีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10 โมลาร์ ที่อัตราส่วนของ Si/OH ต่างกัน และ 0.5Si/OH-RA-15M, 1.5Si/OH-RA-15M, 2.5Si/OH-RA-15M คือ จีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบ

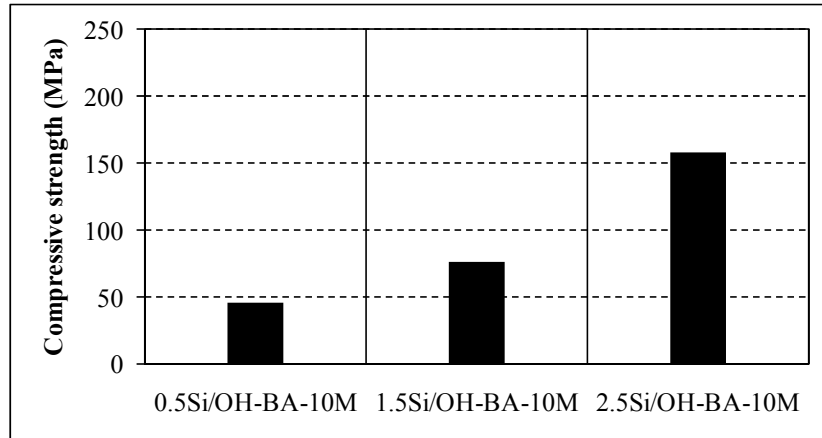
ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลาร์ ที่อัตราส่วนของ Si/OH ต่างกัน จนกระทั่ง 0.5Si/OH-RA-10M, 1.5Si/OH-BA-10M, 2.5Si/OH-BA-10M คือ จีโอโพลิเมอร์เก้าชานอ้อย ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10 โมลาร์ ที่อัตราส่วนของ Si/OH ต่างกัน 0.5Si/OH-BA-15M, 1.5Si/OH-BA-15M, 2.5Si/OH-BA-15M คือ จีโอโพลิเมอร์เก้าชานอ้อย ที่ความเข้มข้นของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลาร์ ที่อัตราส่วนของ Si/OH ต่างกัน ผลทดสอบจีโอโพลิเมอร์เก้าชานพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ OH ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น เนื่องจากเก้าชานมีซิลิกาและลูมินาที่ชะละลายที่ผิวมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลทดสอบตรงกันข้ามจีโอโพลิเมอร์เก้าชานอ้อย ซึ่งจะได้ศึกษาเพิ่มเติม



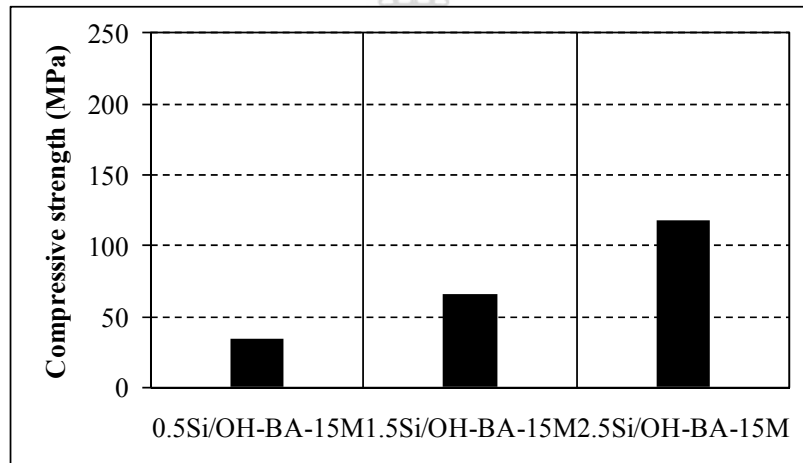
รูปที่ 4.10 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เก้าชานที่อายุ 7 วัน 10M



รูปที่ 4.11 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เก้าชานที่อายุ 7 วัน 15M



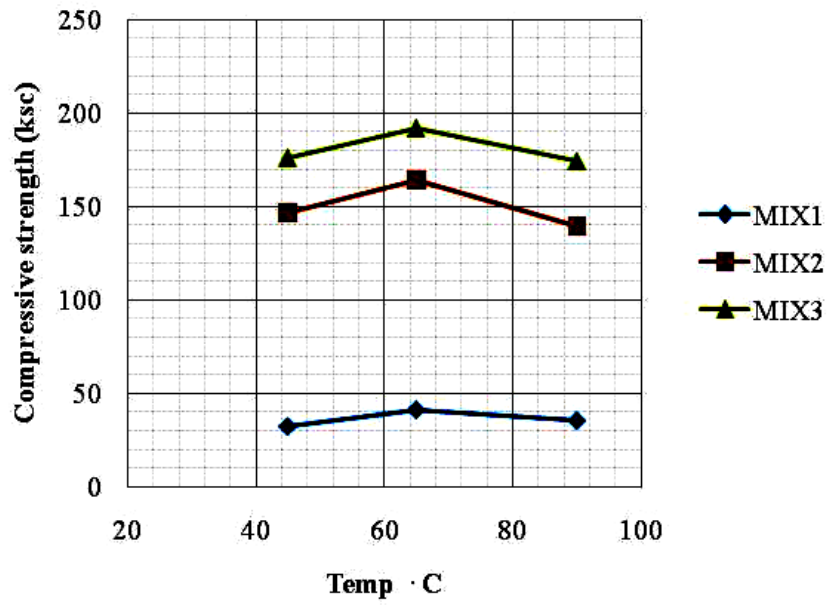
รูปที่ 4.12 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าชานอ้อยที่อายุ 7 วัน 10M



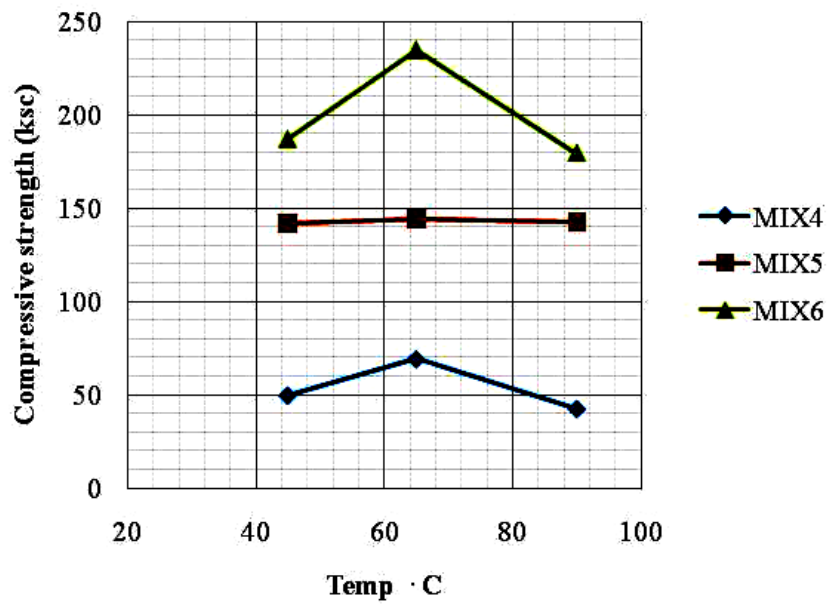
รูปที่ 4.13 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าชานอ้อยที่อายุ 7 วัน 15M

4.3.3 ผลของอุณหภูมิที่สัมพันธ์กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 กำหนดให้ MIX1 MIX2 และ MIX3 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ ส่วน MIX4 MIX5 และ MIX6 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ โดยผลการทดสอบพบว่า เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 45 และ 90 องศาเซลเซียส ในทุกส่วนผสม



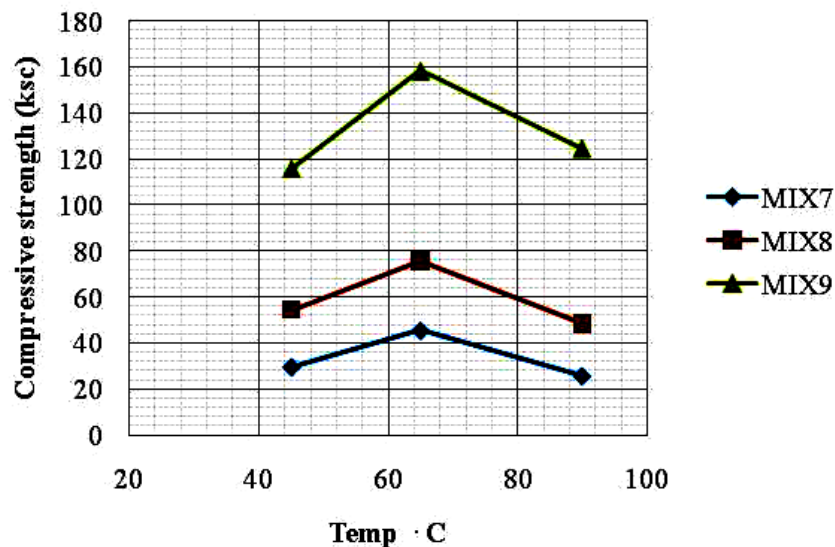
รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิการบ่มและกำลังอัดของ MIX1-MIX3 มอร์ตาร์เถ้ากลบที่อายุ 7 วัน



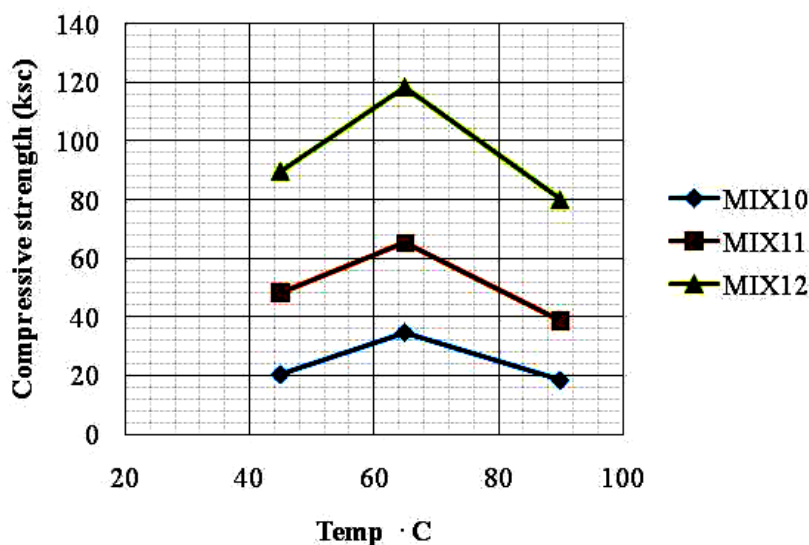
รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิและกำลังอัดของ MIX4-MIX6 มอร์ตาร์เถ้ากลบที่อายุ 7 วัน

ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อยแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 กำหนดให้ MIX7 MIX8 และ MIX9 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อยที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ ส่วน MIX10 MIX11 และ MIX12 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อยที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ โดยผลการทดสอบพบว่า การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อยสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 45 และ 90 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ นอกจากนี้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิการบ่มส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์

อุณหภูมิการบ่มมีผลต่อกำลังอัดเนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส เนื่องจากการระเหยไปอย่างรวดเร็วของความชื้นอย่างต่อเนื่องที่ภายใต้สภาวะความร้อนสูงมาก สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24] ดังนั้น การผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อย ควรบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของ MIX7-MIX9 มอร์ตาร์เถ้าขานอ้อยที่อายุ 7 วัน

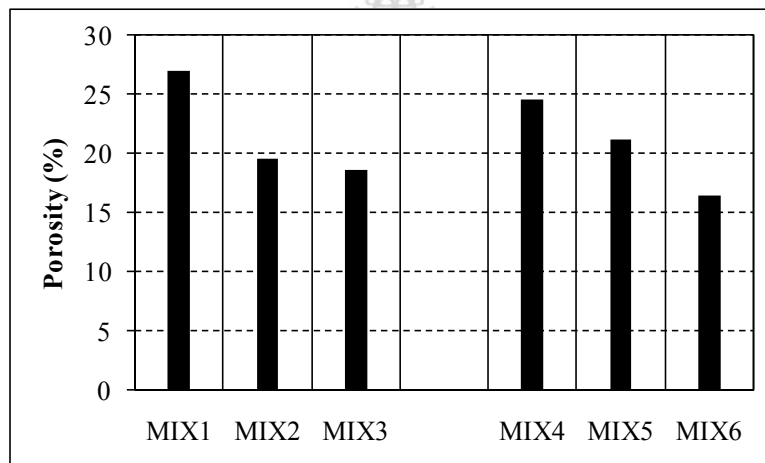


รูปที่ 4.17 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของ MIX10-MIX12 มอร์ตาร์เถ้าขานอ้อยที่อายุ 7 วัน

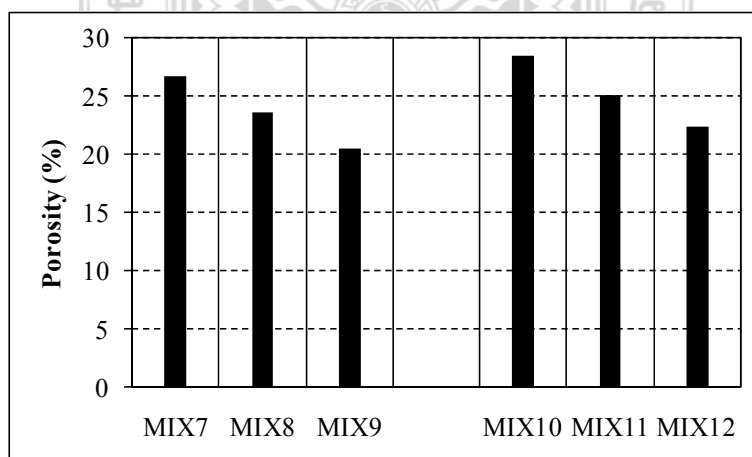
4.4 ความพรุนของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

ในการทดสอบความพรุน (Porosity, %) ครั้งนี้ใช้ประยุกต์ด้วยการใช้ระบบ Vacuum porosity เพื่อหาค่าร้อยละความพรุนของวัสดุจีโอโพลีเมอร์ ผลการทดสอบความพรุนที่อายุ 7 วัน ของจีโอโพลีเมอร์เถ้าแกลบ แสดงไว้ในรูปที่ 4.18 กำหนดให้ MIX1 MIX2 และ MIX3 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ ส่วน MIX4 MIX5 และ MIX6 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ จากผลทดสอบพบว่าจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เถ้าแกลบ MIX6 มีความพรุนน้อยกว่าทุกส่วนผสม กล่าวคือจีโอโพลีเมอร์ที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 มีความพรุนน้อยเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ สอดคล้องกับค่าการไหลที่มีค่าน้อยและมีค่ากำลังอัดที่สูง ความพรุนลดลงตามอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อกำลังอัดและความพรุนของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เถ้าแกลบ การที่ตัวอย่างมีกำลังอัดที่สูงเพราะมอร์ตาร์มีเนื้อที่แน่น เนื่องจากอนุภาคที่เล็กของเถ้าแกลบที่ผ่านการบดละเอียดเข้าไปอุดและแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของโพรงและทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาและเร่งปฏิกิริยา [8,9,29] โดยผลิตผลที่ได้คือ CSH และ CAH ทำให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นขึ้น [29]

พิจารณาในรูปที่ 4.19 กำหนดให้ MIX7 MIX8 และ MIX9 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสม จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ ส่วน MIX10 MIX11 และ MIX12 หมายถึงสัญลักษณ์ใช้แทนส่วนผสม จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M อัตราส่วนของ Si/OH เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ ผลทดสอบจีโอโพลีเมอร์เถ้าชานอ้อยตรงกันข้ามกับจีโอโพลีเมอร์จาก เถ้าแกลบ อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบความพรุนมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ความพรุนของ จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เถ้าชานอ้อยลดลงเมื่ออัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ลดลง



รูปที่ 4.18 Porosity (%) ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เถ้าแกลบ



รูปที่ 4.19 Porosity (%) ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เถ้าชานอ้อย

4.5 การต้านทานคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

การศึกษาการต้านทานคลอไรด์ครั้งนี้ได้ใช้มาตรฐานการทดสอบของ ASTM และประยุกต์การทดสอบบางวิธีของมาตรฐานต่างๆ เพื่อนำผลทดสอบเปรียบเทียบกันและสรุปผล

4.5.1 การแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์

หัวข้อนี้กล่าวถึงการทดสอบการต้านทานคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1202 [43] เรียกว่าการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) ปกติแล้วการใช้ทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าจะไม่มีปัญหาในด้านความร้อนเมื่อใช้กับตัวอย่างที่เป็นมอร์ตาร์หรือคอนกรีต แต่ในการศึกษาครั้งนี้ตัวอย่างที่ใช้มีปัญหาในด้านอุณหภูมิความร้อนในตัวอย่างทดสอบที่สูงจึงไม่สามารถทดสอบด้วยวิธีนี้ เนื่องจากเป็นจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จึงควรได้มีการศึกษาต่อไป อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ของการทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ จึงได้ใช้วิธีการทดสอบอื่นๆ ต่อไป และได้กล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

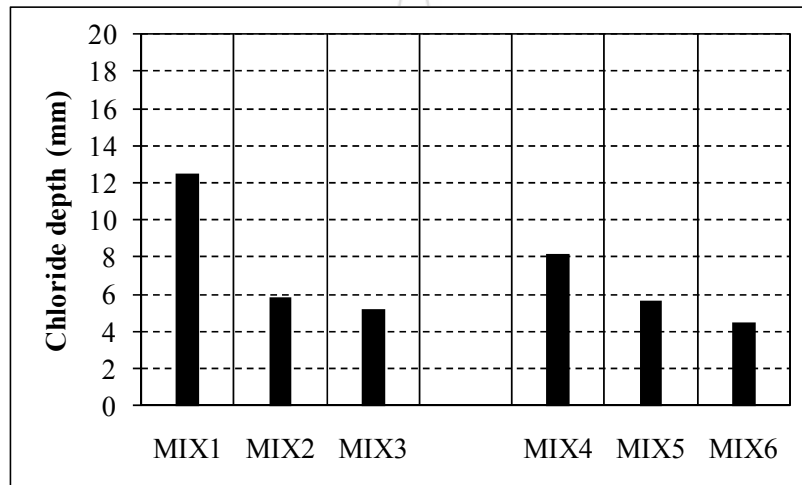
4.5.2 ความลึกคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์แบบเร่ง

ความลึกคลอไรด์หัวข้อนี้ทดสอบด้วยการเร่งการแพร่กระจายคลอไรด์ หรือเรียกว่า Rapid migration test of chloride depth และเพื่อหลีกเลี่ยงผลของความร้อนเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.5.1 จึงใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 12 โวลต์ ดี ซี (12 Volt DC) ใช้เวลาเพียง 4 ชั่วโมง (ปกติใช้ 8 ชั่วโมง) งานวิจัยที่ผ่านมาใช้วิธีนี้เป็นการทดสอบ [1] และผลการทดสอบความลึกคลอไรด์จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.20 พบว่ามอร์ตาร์ MIX1, MIX2 และ MIX3 มีความลึกคลอไรด์เท่ากับ 12.5, 5.8 และ 5.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมอร์ตาร์ MIX4, MIX5 และ MIX6 มีความลึกคลอไรด์เท่ากับ 5.2, 5.6 และ 4.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ การทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ถ้ำเกลือ ความลึกคลอไรด์มอร์ตาร์ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ มีค่าน้อยกว่าความลึกคลอไรด์มอร์ตาร์ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ นอกจากนั้นผลการทดสอบยังพบว่าความลึกคลอไรด์ของมอร์ตาร์ลดลงเมื่ออัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น

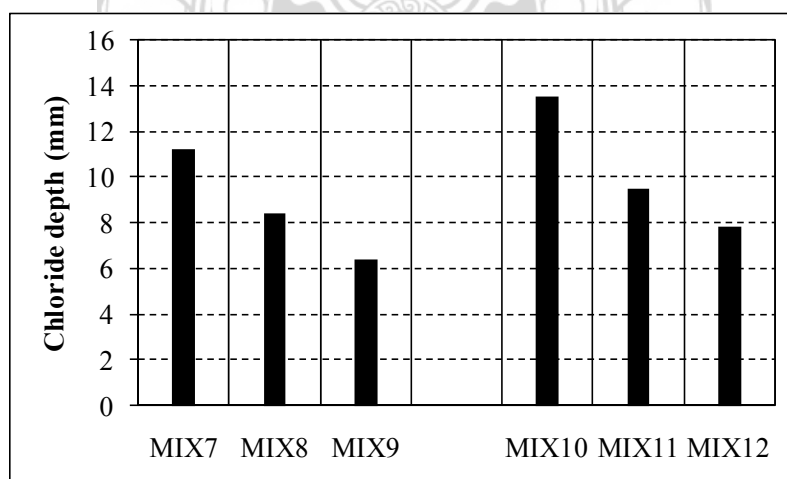
ผลการทดสอบความลึกคลอไรด์จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.21 พบว่ามอร์ตาร์ MIX7, MIX8 และ MIX9 11.2, 8.4 และ 6.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมอร์ตาร์ MIX10, MIX11 และ MIX12 มีความลึกคลอไรด์เท่ากับ 13.5, 9.5 และ 7.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ การทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ถ้ำชานอ้อย ความลึกคลอไรด์มอร์ตาร์ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์

มีค่าน้อยกว่าความลึกคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ นอกจากนั้นผลการทดสอบยังสอดคล้องกับผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบ กล่าวคือ ความลึกคลอไรด์ของมอร์ตาร์ลดลงเมื่ออัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น

จีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบต้านทานคลอไรด์ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์เถ้าขานอ้อย เนื่องจากเถ้าแกลบมีปริมาณ SiO_2 ที่สูงกว่าเถ้าขานอ้อย และสามารถทำปฏิกิริยากลายเป็น CSH [29] เพิ่มความทึบแน่นในเนื้อ มอร์ตาร์ และ CSH สามารถดูดซับไอออนคลอไรด์ไว้ได้อีกด้วย [44,45] การทดสอบหาความลึกคลอไรด์ทำโดยการฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างทดสอบที่อายุ 7 วัน



รูปที่ 4.20 ความลึกคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าแกลบด้วยการทดสอบแบบแรง



รูปที่ 4.21 ความลึกคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าขานอ้อยด้วยการทดสอบแบบแรงด้วยไฟฟ้า

4.5.3 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์

ความลึกคลอไรด์ในมอร์ตาร์สามารถนำมาหาสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ได้โดยใช้หลักการคำนวณของ Nernst–Planck equation [46] ซึ่งแสดงในสมการที่ (4.1)

$$D = \frac{RTL}{zFE} \times \frac{x_f}{t} \quad (4.1)$$

เมื่อกำหนดให้

D = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ (Chloride ion diffusion coefficient) หน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที (cm^2/s)

R = gas content (J/K mol, 8.314)

T = temperature (K)

L = ความหนาของมอร์ตาร์ (cm)

z = ion valence

F = Faraday content (C/mol , 9.65×10^4)

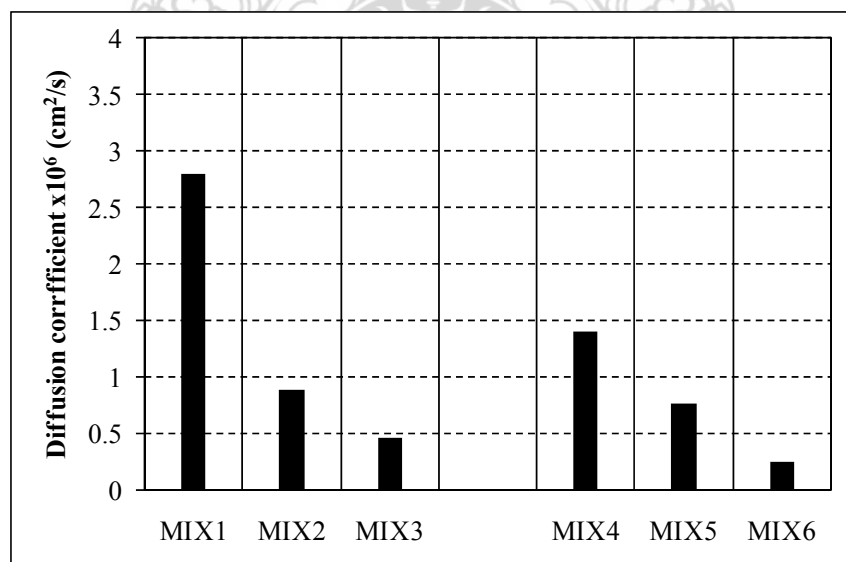
E = values of potential (V)

x_f = inflection point ของ chloride ion profiles that needs to be related to the depth given by the colorimetric technique และ t คือ เวลาในการทดสอบ (s)

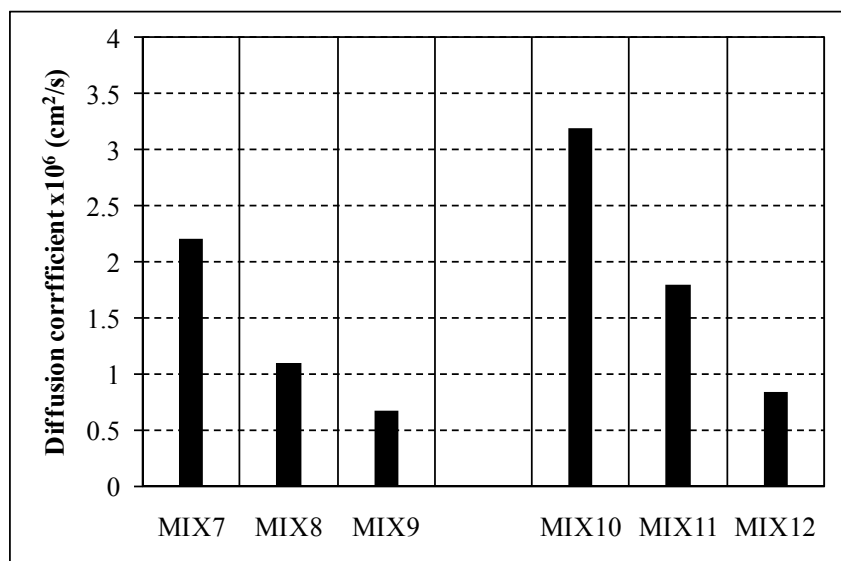
ผลทดสอบได้ค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้วเคลือบ แสดงไว้ในรูปที่ 4.22 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้วเคลือบอยู่ในช่วงประมาณ 0.25×10^{-6} – 2.8×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตัวอย่าง MIX1, MIX2 และ MIX3 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ประมาณเท่ากับ 2.8×10^{-6} , 0.88×10^{-6} และ 0.46×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที MIX4, MIX5 และ MIX7 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ประมาณเท่ากับ 1.4×10^{-6} , 0.77×10^{-6} และ 0.25×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์สอดคล้องกับผลการทดสอบความลึกคลอไรด์ในหัวข้อ 4.5.2 จีโอโพลิเมอร์แก้วเคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ไม่สูงมากเนื่องจากแก้วเคลือบมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 [1,30] ผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง $\text{Ca}(\text{OH})_2$ กับ SiO_2 คือ CHS [29] ซึ่งเพิ่มความทึบแน่นให้กับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ลดการซึมผ่านได้ดี

ผลทดสอบได้ค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เถ้าขานอ้อย แสดงไว้ในรูปที่ 4.23 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เถ้าขานอ้อยอยู่ในช่วงประมาณ 0.84×10^{-6} - 3.2×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตัวอย่าง MIX7, MIX8 และ MIX9 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ประมาณเท่ากับ 2.2×10^{-6} , 1.1×10^{-6} และ 0.68×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที MIX10, MIX11 และ MIX12 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ประมาณเท่ากับ 3.2×10^{-6} , 1.8×10^{-6} และ 0.84×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์สอดคล้องกับผลการทดสอบ ความลึกคลอไรด์ในหัวข้อ 4.5.2 จีโอโพลิเมอร์ ผลทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบมีค่า สัมประสิทธิ์ การแพร่กระจาย คลอไรด์น้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์เถ้าขานอ้อย อาจเนื่องจากเถ้าแกลบมีองค์ประกอบหลัก คือ SiO_2 สูงกว่าเถ้าขานอ้อย ผลผลิตจากปฏิกิริยา คือ CHS [29] ซึ่งเพิ่มความทึบแน่นให้กับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ลดการซึมผ่านได้ดี การใช้อัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อส่งผลให้ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ลดลงด้วย ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ กล่าวคือ ในกรณีของเถ้าแกลบ พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามในกรณีของ เถ้าขานอ้อยพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.22 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าแกลบ

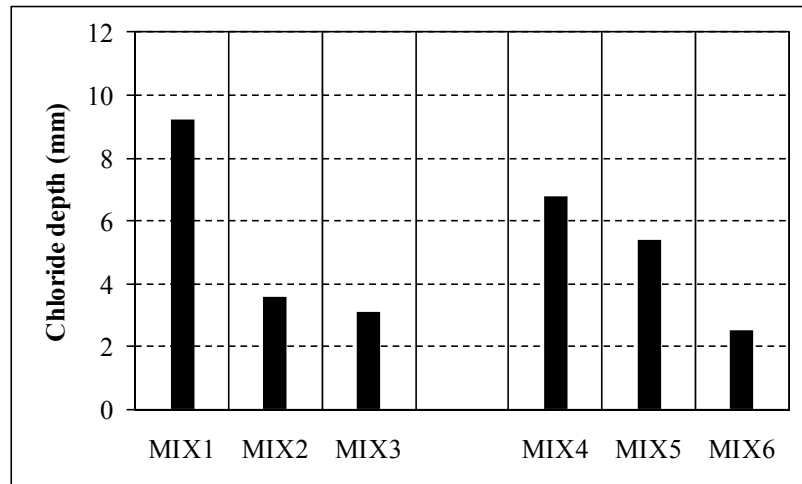


รูปที่ 4.23 สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เก้าชานอ้อย

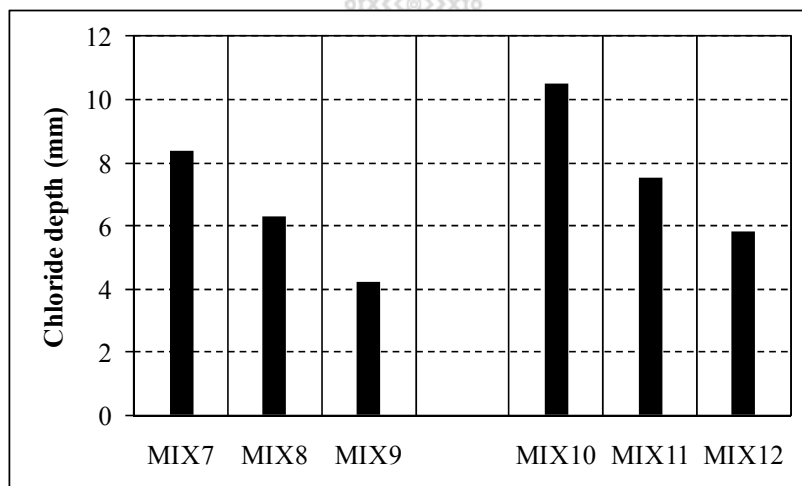
4.5.4 ความลึกคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แบบธรรมชาติ

การทดสอบความลึกคลอไรด์ทำด้วยการนำตัวอย่างมอร์ตาร์แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 เรียกวิธีนี้ว่าแบบแช่ขมทั้งหมดหรือ Immersion test และทดสอบที่ระยะเวลา 30 วัน หลังจากบ่มตัวอย่างในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ผลของความลึกคลอไรด์แสดงไว้ในภาพรูปที่ 4.24 และ 4.25 ผลทดสอบเหมือนกันกับการทดสอบในหัวข้อ 4.5.2 และ 4.5.3 กล่าวคือ การใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อส่งผลให้ความลึกคลอไรด์ลดลงด้วย ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายคลอไรด์ กล่าวคือ ในกรณีของเก้าแกลบ พบว่าความลึกคลอไรด์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของเก้าชานอ้อย พบว่าความลึกคลอไรด์สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุปอชโซลานบดละเอียดสามารถลดการซึมผ่านได้ดีด้วยการ ลดขนาดเฉลี่ยของโพรงช่องว่างในซีเมนต์เพสต์คล้ายงานวิจัยที่ผ่านมา [9,29] และหากพิจารณาผลการทดสอบทั้งในหัวข้อ 4.5.2, 4.5.3 และ 4.5.4 พบว่ามีความสอดคล้องกัน ดังนั้นการทดสอบโดยวิธีแบบเร่งอาจเป็นวิธีการทดสอบการต้านทานคลอไรด์แบบเร่งที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ในห้องปฏิบัติการเพื่อประหยัดเวลาในการทดสอบได้อีกวิธีหนึ่ง



รูปที่ 4.24 ความลึกคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เถ้ากลบแบบธรรมชาติ



รูปที่ 4.25 ความลึกคลอไรด์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เถ้าขานอ้อยแบบธรรมชาติ

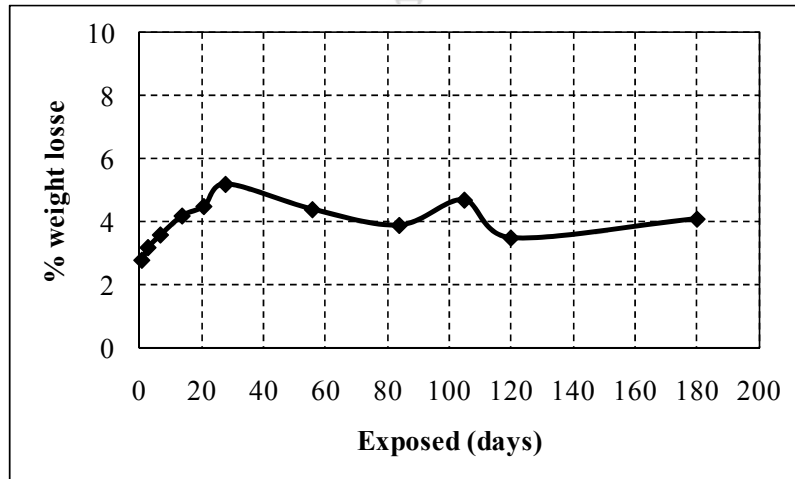
4.9 การต้านทานการกัดกร่อนของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ในสารละลายกรด

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 50×50×50 มม. จำนวน 3 ตัวอย่าง อัตราส่วนของทรายต่อเถ้าใช้เท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก ภายหลังจากที่หล่อตัวอย่างเสร็จ นำตัวอย่างมาหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกไวนิล (Vinyl film) หรือพลาสติกห่ออาหาร เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำจากการระเหยในระหว่างการบ่มร้อน เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องที่ระยะเวลาก่อนการบ่มร้อน (Delay time) 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างเข้าบ่มร้อนในตู้อบที่

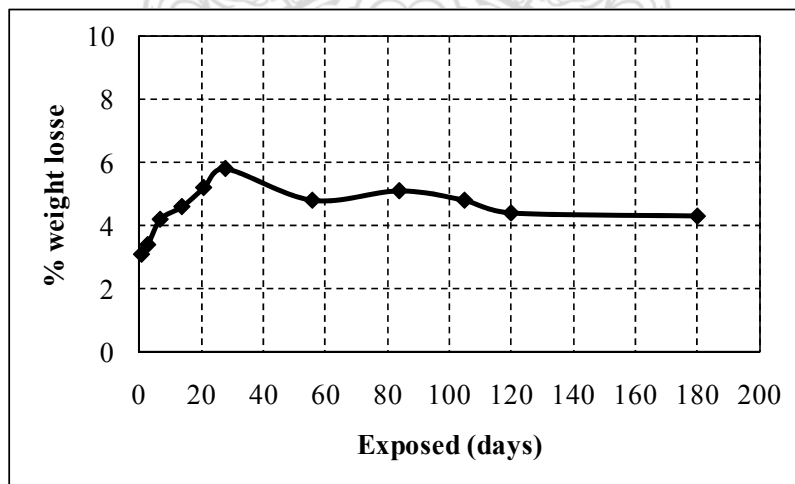
อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดเวลา ทิ้งตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้องต่ออีก 24 ชั่วโมง และแกะตัวอย่างออกจากแบบ ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก ที่อายุ 7 วัน นำตัวอย่างไปแช่ในน้ำ และสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่า pH ประมาณ 0.5 ภาชนะใส่สารละลายกรดซัลฟูริกจะหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อไม่ให้ไอระเหย แล้วนำไปเก็บไว้ในห้องทดสอบที่มีอุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส เมื่อตัวอย่างมีอายุภายหลังการแช่ครบ 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90, 105, 120 และ 180 วัน ทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยทำความสะอาดและเช็ดผิวให้แห้ง วัดน้ำหนักของตัวอย่าง ปริมาณสารละลายกรดซัลฟูริกที่ใช้เท่ากับ 4 เท่าของปริมาตรตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง และเปลี่ยนสารละลายทุกๆ 1 เดือน ในการเลือกตัวอย่างทดสอบในการต้านทานกรดนี้ ได้นำผลการทดสอบที่ดีในหัวข้อที่ผ่านมาเพื่อศึกษา กล่าวคือ ในส่วนของจีโอโพลิเมอร์ เถ้าแกลบ นำส่วนผสมที่มีโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 ที่ 15 โมลาร์ หรือส่วนผสมใน MIX6 มาใช้ในการทดสอบ ส่วนจีโอโพลิเมอร์เถ้าชานอ้อย นำส่วนผสมที่มีโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 ที่ 10 โมลาร์ หรือส่วนผสมใน MIX9 มาใช้ทดสอบ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยแสดงไว้ใน รูปที่ 4.26-4.28 ตามลำดับ ซึ่งแสดงน้ำหนักที่หายไปของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยที่บ่มที่ระยะเวลาต่างกัน ในสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก พบว่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่ออายุทดสอบเพิ่มจาก 1-28 วัน แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุทดสอบ 28 วัน ทั้งจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย ในรูปที่ 4.29 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อย พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าแกลบมีค่าน้อยกว่าในทุกอายุการทดสอบ

อุณหภูมิการบ่มร้อนอาจมีผลต่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยงานวิจัยของ ถนัดกิจ ชาริรัตน์ [47] ได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่หายไปของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยแม่เมาะที่บ่มที่อุณหภูมิต่างกันและแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าการบ่มที่อุณหภูมิสูงนั้นจะมีอัตราส่วนของ Si/Al และ Na/Al ที่ต่ำกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากโซเดียมไอออน (Na^+) ในโครงสร้างวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิสูง จะมีปริมาณน้อยกว่าที่มีในโครงสร้างวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิต่ำ โครงสร้างของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิต่ำจะมีปริมาณของโซเดียมไอออน (Na^+) เกินกว่าความต้องการในการคลุมประจุของอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ดังนั้นเมื่อถูกจุ่ม โจม ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก โซเดียมไอออน (Na^+) ที่เกินจะสามารถถูกชะออกมาได้ง่าย ในขณะที่โซเดียมไอออน (Na^+) ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิสูงจะถูกตรึงอยู่กับอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+})

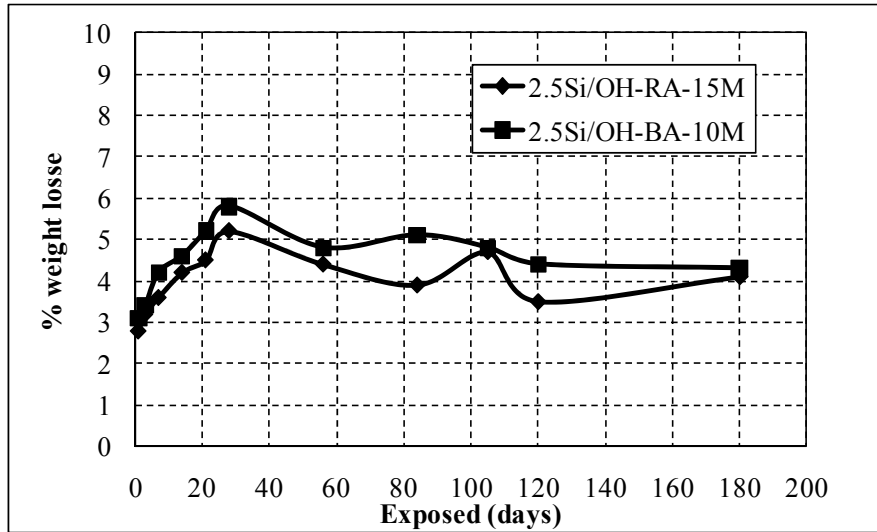
ได้อย่างหนาแน่นจึงถูกชะออกมาได้น้อย จึงทำให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิสูงมีน้ำหนักที่หายไปน้อยกว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิต่ำ โซเดียมไอออน (Na^+) เป็นแคทไอออนที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่สูง (High mobility) เนื่องจากว่ามีขนาดไอออนเล็กมาก ดังนั้นจึงสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายกรดได้ง่ายที่สุดเมื่อเทียบกับแคทไอออนชนิดอื่น



รูปที่ 4.26 น้ำหนักที่ลดลงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เส้นแกลบเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก 5%



รูปที่ 4.27 น้ำหนักที่ลดลงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เส้นชานอ้อยเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก 5%



รูปที่ 4.28 น้ำหนักที่ลดลงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ท้าแก่เคลือบและชานอ้อย เมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก 5%



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ และแนวทางต่อการวิจัยอย่างต่อเนื่องในการนำเอาเกลือและเถาซานอ้อยมาใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หรือจีโอโพลิเมอร์ในงานคอนกรีตสำหรับการพัฒนาวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ผลการทดสอบในแต่ละหัวข้อการทดสอบ และนำมาสรุปได้ดังนี้

1. ค่าความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจากเถาเกลือและเถาซานอ้อย ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตจะลดค่าความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลง ค่าการไหลที่ดีของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อยู่ในช่วงร้อยละ 110 ถึง 115

2. จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถาเกลือ มีกำลังอัดสูง เมื่อใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถาเกลือใช้เท่ากับ 15 โมลาร์

3. จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถาซานอ้อย มีกำลังอัดสูง เมื่อใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถาเกลือใช้เท่ากับ 10 โมลาร์

4. จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถาเกลือและเถาซานอ้อย ด้านทานคลอไรด์ได้ดี เมื่อใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก

5. อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ให้ได้กำลังอัดที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานในโครงสร้าง

6. อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถาเกลือและเถาซานอ้อย คือ 65 องศาเซลเซียส

7. การการเปลี่ยนแปลงหรือสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริก พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักอย่างต่อเนื่องที่อายุทดสอบ 1-28 วัน และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุทดสอบเลย 28 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาผลของการใช้เถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อยเพื่อผลิตจีโอโพลิเมอร์ในด้านความทนทานต่อสภาวะการกัดกร่อนจากสารเคมีอื่นๆ เช่น การต้านทานซัลเฟต และการต้านทานต่อสารละลายกรดไฮโดรคลอริก การต้านทานก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการคาร์บอนเซชัน เป็นต้น โดยอาจทดสอบในแบบเร่งควบคู่กับแบบธรรมชาติในระยะเวลาที่นานขึ้น

2. ควรมีการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคและในระดับนาโนสเกลของลักษณะโครงสร้างผลึกในจีโอโพลิเมอร์เถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อย

3. ควรมีการศึกษาในด้านการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากวัสดุปอซโซลานอื่นๆ ที่มีอยู่ในประเทศไทย และศึกษารายละเอียดเชิงลึกเพื่อการใช้งานในเชิงพาณิชย์ และสร้างความมั่นใจแก่อุตสาหกรรมก่อสร้าง ทั้งนี้เพื่อการพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์อย่างต่อเนื่อง



เอกสารอ้างอิง

- [1] Chindaprasirt, P., Rukzon, S., and Sirivivatnanon, V., 2007. "Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash," *Construction and Building Materials*, 22: 932–938.
- [2] Poon, C.S., Wong, Y.L., and Lam, L., 1997. "The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly ash cement pastes and mortars," *Construction and Building Materials*, 11(7–8):383–393.
- [3] Rukzon, S., and Chindaprasirt, P., 2006. "Strength of ternary blended cement mortar containing Portland cement, rice husk ash and fly ash," *Journal of Engineering Institute of Thailand*, 17(2):33–38.
- [4] Poon, C.S., Wong, Y.L., Lam, L., 1997. "The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly ash cement pastes and mortars," *Construction and Building Materials*, 11: 383-393.
- [5] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C, Sinsiri, T., 2005. "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste," *Cement and Concrete Composites*, 27(4): 425-428.
- [6] Kuroda, M., Watanabe, T., Terashi, N., 2000. "Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash," *Cement and Concrete Research*, 30(2): 253-258.
- [7] Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K., 2007. "Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material," *Cement and Concrete Composites*, 29: 515–524.
- [8] Rukzon, S., Chindaprasirt, P., 2008. "Use of waste ash from various by-product materials in increasing the durability of mortar," *Journal of The Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 5(1): 75-88.
- [9] สำเร็จ รักซ้อน., 2550. "คาร์บอนเข้ันและการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ผสมวัสดุ ปอชโซลาน [วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาคุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา]. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] Dias, D.P., Thaumaturgo, C., 2005. "Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalts fibers," *Cement and Concrete Composite*, 27: 49–54.
- [11] Palomo, A., Grutzeck, M. W., Blanco, M. T., 1999. "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future," *Cement and Concrete Research*, 8(29): 1323-1329.
- [12] Bui, D.D., Hu, J., Stroeven, P. 2005. "Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete," *Cement and Concrete Composites*, 27(3): 357-366.
- [13] สาโรจน์ ดำรงศีล, สุวิมล สัจจวานิชย์. ผลกระทบของการใช้เถ้าขานอ้อยร่วมกับเถ้าลอยต่อกำลังอัดและการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2, อุดรธานี. หน้า MAT98–103.
- [14] Davidovits, J., James, C., 1999. "Chemistry of Geopolymeric Systems Terminology in Geopolymer '99," *International Conference, France*, 1(1), 9-40.
- [15] เจริญชัย ฤทธิรุท., 2550. "การศึกษาอิโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากดินขาวระนองเผา [วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา]. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [16] Sathonsapark, Apha., Chindaprasirt, P., Pimraksa, K., 2009. "Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar," *Journal of Hazardous Materials*, 168: 45-50.
- [17] ASTM C618., 2001. "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete," *Annual Book of ASTM Standard*, 04.02: 310-313.
- [18] Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon., V., 2007. "Workability and strength of coars high calcium fly ash geopolymer mortar," *Cement and Concrete Composite*, 29: 224-229.
- [19] Guo, X., Shi, H., Dick, W.A., 2010. "Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer," *Cement and Concrete Composite*, 32: 142-147.
- [20] Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., 2010. "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete." *Cement and Concrete Research*, 40: 334-339.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

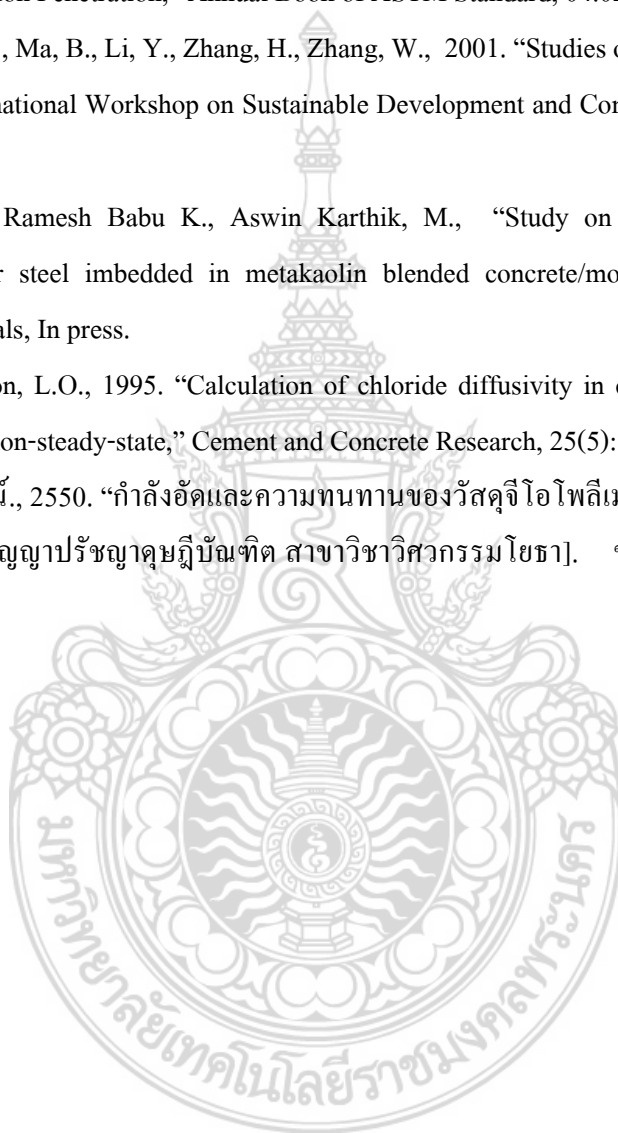
- [21] Yunsheng, Z., Wei, S., Zongjin., Li., 2010. "Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-base geopolymer cement," *Applied Clay Science*, 47: 271-275.
- [22] Rovnanik, P., 2010. "Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer," *Construction and Building Materials*, 24: 1176-1183.
- [23] Barharev, T., 2005. "Resistance of geopolymer materials to acid attack," *Cement and Concrete Research*, 35: 658-670.
- [24] Barharev, T., 2005. "Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions," *Cement and Concrete Research*, 35: 1233-1246.
- [25] Chindapasirt, P., Rukzon, S., 2008. "Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar," *Construction and Building Materials*, 22: 1601-1606.
- [26] Gastaldini, A.L.G., Isaia, G.C., Gomes, N.S., Sperb, J.E.K., "Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators," *Cement and Concrete Composites*, In press.
- [27] Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K., 2007. "Evaluation of bagasse as supplementary cementitious material," *Cement and Concrete Composites*, 29:515-524.
- [28] สำเร็จ รักซ้อน., 2551. "ทฤษฎีและการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี," กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [29] Neville AM. *Properties of concrete*. 4th and Final Edition. Malaysia: Longman Group Limited; 1995.
- [30] Chindapasirt, P., Kanchanda, P., Sathonsoawaphak, A., Cao, H.T., 2007. "Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash," *Construction and Building Materials*, 21: 1356-1361.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [31] Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., Jarutapitakkul, C., 2007. "Strength and water permeability of concrete containing fly ash and rice husk ash," *Construction and Building Materials*, 21: 1492–1499.
- [32] Gonen, T., Yazicioglu, S., 2007. "The influence of compaction pore on sorptivity and carbonation of concrete," *Construction and Building Materials*, 21(5): 1040-1045.
- [33] Papadakis, V.G., Fardis, M.N., Veyenas, C.G., 1992. "Hydration and carbonation of pozzolanic cements," *ACI Materials Journal Technical Paper*, 89:2.
- [34] Cabrera, J.G., Lynsdale, C.J., 1998. "A new gas parameter for measuring the permeability of mortar and concrete," *Magazine of Concrete Research*, 40: 177-182.
- [35] Rossignolo, J.A., Agnesini, M.V., 2004. "Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete," *Cement and Concrete Composites*, 26(4): 375-380.
- [36] Otsuki N, Nagataki S, Nakashita K. Evaluation of AgNO_3 solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. *Construction and Building Materials* 1993; 7(4): 195-201.
- [37] Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.. Nordtest method NT Built 492 – Concrete, mortar and cement –bases repair materials. 1999. p. 1-8.
- [38] Sata, V., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., 2004. "Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(6): 623-628.
- [39] Coutinho, J.S., 2003. "The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures," *Cement and Concrete Composites*, 25(1): 51-59.
- [40] Awal, A.S.M., Hussin, M., 1997. "The effectiveness of palm oil fuel ash in preventing expansion due to alkali-silica reaction," *Cement and Concrete Composites*, 19(4): 367-372.
- [41] Fu, X., Wang, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y., Wu, X., 2002. "Studies on blended cement with a large amount of fly ash," *Cement and Concrete Research*, 32(7): 1153-1159.
- [42] Asavapisit, S., Ruengrit, N. 2005. "The role of RHA-blended cement in stabilizing metal-containing waste," *Cement and Concrete Composites*, 27(7-8):782-787.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [43] ASTM C1202., 2001. “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration,” Annual Book of ASTM Standard, 04.02: 646-651.
- [44] He, X., Chen, Y., Ma, B., Li, Y., Zhang, H., Zhang, W., 2001. “Studies on small ionic diffusivity concrete,” International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, 319-331.
- [45] Parande, A.K., Ramesh Babu K., Aswin Karthik, M., “Study on strength and corrosion performance for steel imbedded in metakaolin blended concrete/mortar,” Construction and Building Materials, In press.
- [46] Tang, L., Nilsson, L.O., 1995. “Calculation of chloride diffusivity in concrete from migration experiments in non-steady-state,” Cement and Concrete Research, 25(5): 1133-1137.
- [47] ถนัดกิจ ชาริรัตน์., 2550. “กำลังอัดและความทนทานของวัสดุอิโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแอมรมาะ [วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา]. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.



ภาคผนวก ก

แผนงาน โครงการวิจัย

ตารางที่ ๗๑ แผนงาน โครงการวิจัย (ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี)

ลำดับ	แผนการดำเนินงาน	เดือนที่											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	วางแผนการทดสอบ	-											
2	การเตรียมวัสดุตัวอย่างทดสอบ	-											
3	การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของวัสดุ		-										
4	วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของวัสดุ			-									
5	ออกแบบส่วนผสมตัวอย่างทดสอบ			-									
6	หลอมอัดรีดตัวอย่างทดสอบ				-								
7	การทดสอบ				-	-							
8	สรุปผลวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนที่แล้วเสร็จ				-	-	-	-					
9	จัดทำรายงาน ถ่ายทอดเทคโนโลยีและเผยแพร่ผลงาน								-	-	-	-	-

ภาคผนวก ข

ประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตมอร์ตาร์ 1 ลบ.ม

ตารางที่ ผ2 ประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตมอร์ตาร์ 1 ลบ.ม ของเจ้าแกลบ

รายละเอียด	มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์		มอร์ตาร์เจ้าแกลบ	
	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (155 บาท/50 กก.)	640	1984	-	-
ใช้เจ้าแกลบ (100 บาท/1000กก.)	-	-	640	64
ค่าบดเจ้าแกลบ (0.50 บาท/กก.)	-	-	640	320
น้ำ (10 บาท/1000 กก.)	320	3.20	160	1.60
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (15 บาท/ กก.)	-	-	35	525
โซเดียมซิลิเกต (5 บาท/กก.)	-	-	125	625
ทราย (225 บาท/ 1000 กก.)	1760	396	1760	396
ราคา		2383		1931
ค่าการปล่อยก๊าซ CO ₂ (0.56 บาท/กก.)	640	358	128	71
รวมทั้งสิ้น		2741		2002

ตารางที่ ผ3 ประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตมอร์ตาร์ 1 ลบ.ม ของเจ้าชานอ้อย

รายละเอียด	มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์		มอร์ตาร์เจ้าชานอ้อย	
	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)	ปริมาณ (กก.)	ราคา (บาท)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (155 บาท/50 กก.)	640	1984	-	-
ใช้เจ้าชานอ้อย (100 บาท/1000กก.)	-	-	640	64
ค่าบดเจ้าชานอ้อย (0.50 บาท/กก.)	-	-	640	320
น้ำ (10 บาท/1000 กก.)	320	3.20	160	1.60
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (15 บาท/ กก.)	-	-	35	525
โซเดียมซิลิเกต (5 บาท/กก.)	-	-	125	625
ทราย (225 บาท/ 1000 กก.)	1760	396	1760	396
ราคา		2383		1931
ค่าการปล่อยก๊าซ CO ₂	640	358	128	71
รวมทั้งสิ้น		2741		2002

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์



รูปที่ ผ1 ห้องปฏิบัติการจีโอโพลีเมอร์



รูปที่ ผ2 ชุดดูดสารเคมี (Hood)



รูปที่ ผ3 เครื่องผสมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์



รูปที่ ผ4 การเตรียมส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์



รูปที่ ผ5 ส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์



รูปที่ ผ6 การเทวัสดุปอชโซลาน





รูปที่ ๗7 วิธีเติมสารเคมีในส่วนผสม



รูปที่ ๗8 วิธีผสมวัสดุรวมในส่วนผสม



รูปที่ ผ9 การเททรายขณะเครื่องผสมทำงาน



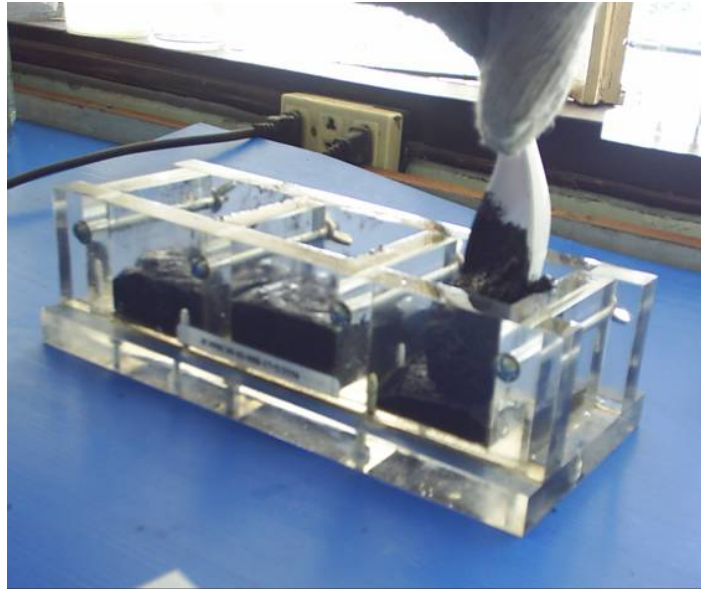
รูปที่ ผ10 การจับเวลาขณะเครื่องผสมทำงาน



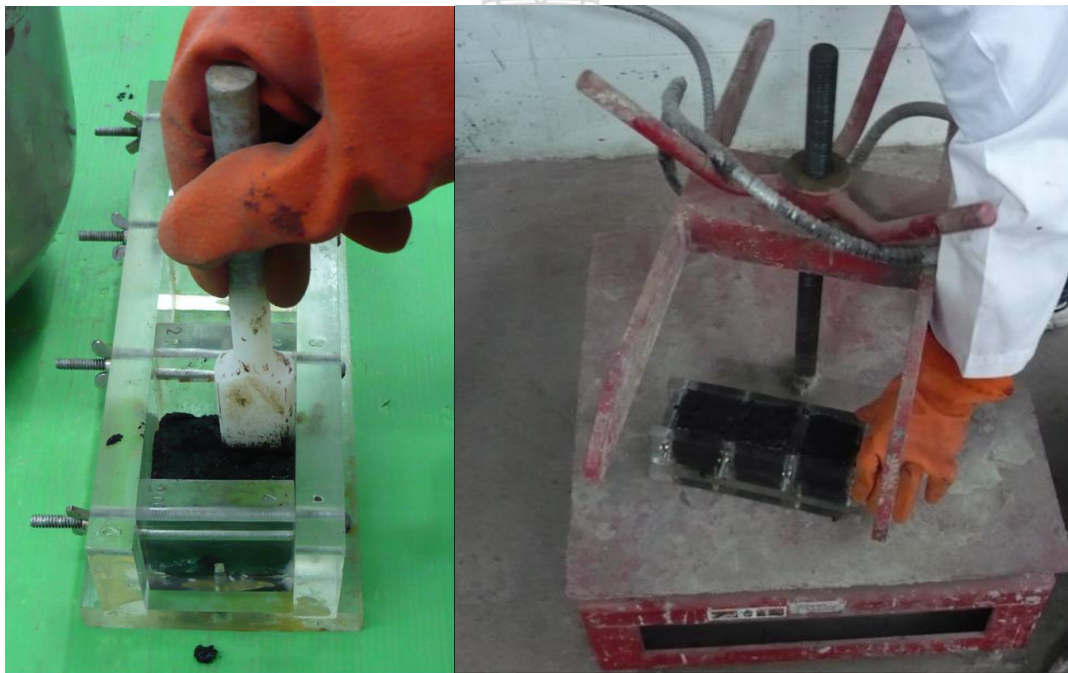
รูปที่ ๗1 เนื้อจิโอะโพลีเมอร์มอร์ตาร์เก่าเคลบ



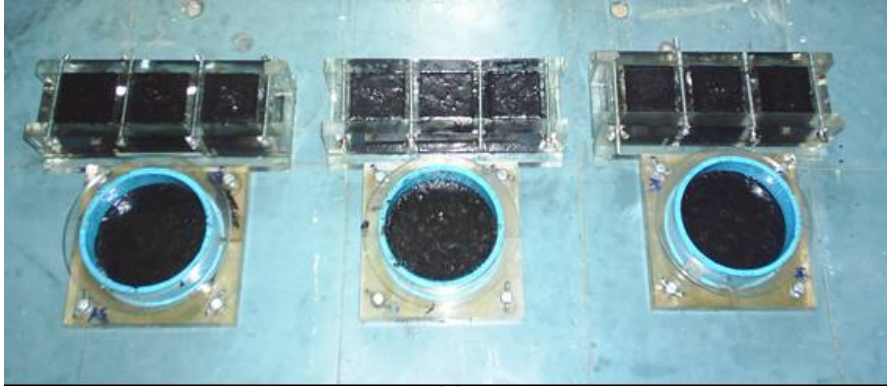
รูปที่ ๗2 เนื้อจิโอะโพลีเมอร์มอร์ตาร์เก่าชานอ้อย



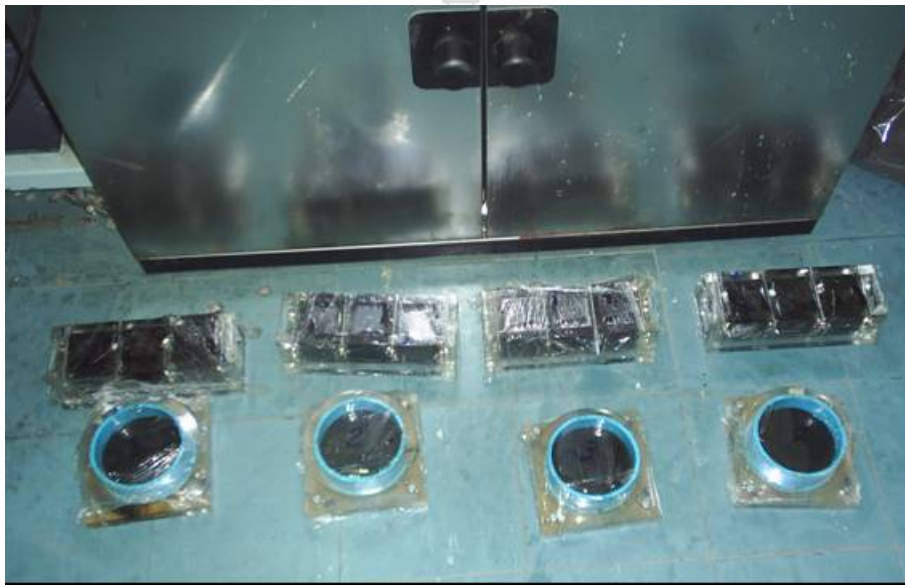
รูปที่ ผ13 การเทตัวอย่างลงแบบ



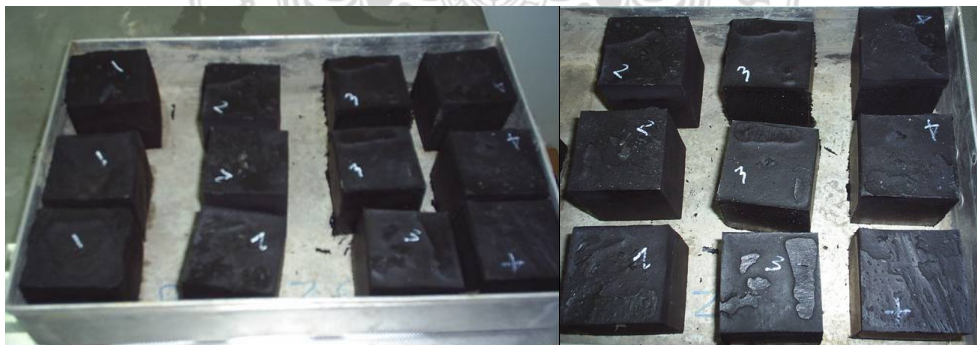
รูปที่ ผ14 การทำให้จีโอโพลีเมอร์มีความแน่น



รูปที่ ๑๕ จีไอโพลีเมอร์ที่หล่อเสร็จแล้ว



รูปที่ ๑๖ การห่อฟิล์มเพื่อเตรียมบ่มร้อนจีไอโพลีเมอร์



รูปที่ ๑๗ ตัวอย่างก้อนจีไอโพลีเมอร์

ประวัติและผลงานที่สำคัญของนักวิจัย

1. ชื่อ นามสกุล ดร. สำเร็จ รักซ้อน

1.1 คุณวุฒิ/การศึกษา

ปี พ. ศ.	ปริญญา	สาขา	ชื่อสถาบัน/ประเทศ
2537-2539	ปริญญาตรี	วิศวกรรมโยธา	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (เทเวศร์) ประเทศไทย
2543-2545	ปริญญาโท	วิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประเทศไทย
2547-2550	ปริญญาเอก	วิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย

1.2 สถานที่ทำงาน

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
เลขที่ 399 ถนนสามเสน แขวงวชิระ เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

โทรศัพท์ 087 9454133 โทรสาร 02628 9191-3 ต่อ 412 มือถือ 087 9454133

Email address: rerng197@rmutp.ac.th, Email address: 4770400031@kku.ac.th

1.3 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

- 1 Chindaprasirt P, **Rukzon S**, Sirivivatnanon V. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. Journal of Construction and Building Materials. 2008 22(5): 932-938.
- 2 Chindaprasirt P, **Rukzon S**, Sirivivatnanon V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar. Journal of Construction and Building Materials. 2008 22(8): 1701-1707.
- 3 Chindaprasirt P, **Rukzon S**. Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blended Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. Journal of Construction and Building Materials. 2008 22(8): 1601-1606.
- 4 **Rukzon S**, Chindaprasirt P. Development of classified fly ash as a pozzolanic material. Journal of Applied Sciences. 2008 8 (6): 1097-1102.
- 5 **Rukzon S**, Chindaprasirt P. Mathematical model of strength and porosity of ternary blend Portland rice husk ash and fly ash cement mortar. Journal of Computers and Concrete. 2008.5(1): 75-88.
- 6 **Rukzon S**, Chindaprasirt P. Use of disposed waste ash from landfills to replace Portland cement. Waste Management and Research. Accepted 2009,

- 7 **Rukzon S**, Chindapasirt P. Use of waste ash from various by-product materials in increasing the durability of mortar. *Journal of The Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2008.5(1): 75-88.
- 8 **Rukzon S**, Chindapasirt P, Mahachai R. Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash. *Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2009.16(2): 242-247.
- 9 **Rukzon S**, Chindapasirt P. Microstructure changes of blended cement paste containing fly ash, rice husk ash and palm oil fuel ash caused by carbonation. *Journal of ASCE. Materials in Civil Engineering*. Accepted 2009,
- 10 **Rukzon S**, Chindapasirt P. An experimental investigation of carbonation of blended Portland cement palm oil fuel ash mortar in indoor environment. *Indoor and Built Environment*. Accepted 2009
- 11 **Rukzon S**, Chindapasirt P. Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash. *Journal of University of Science and Technology Beijing* 2009

1.4 ผลงานวิชาการอื่นๆ และงานเขียนตำรา (บางส่วน) การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- 1 **Rukzon S**, Chindapasirt P. Strength of ternary blended Portland cement rice husk ash and fly ash cement mortar. In: *Technology and innovation for sustainable development Conference*. Khon Kaen University; January 25-26, 2006; Khon Kaen, Thailand; 2006. pp. 105.
- 2 **Rukzon S**, Chindapasirt P. Strength and carbonation of ternary blended Portland cement rice husk ash and fly ash cement mortar. In: *Proceedings of the Eighth International Symposium and workshop on Ferro cement and thin reinforced cement composites*. Bangkok; February 6-8, 2006; Thailand; 2006. pp. 525-33.

วารสารระดับชาติ

- 1 **Rukzon S**, Chindapasirt P. Strength of ternary blended cement mortar containing Portland cement, rice husk ash and fly ash. *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand* 2006; 17(2): 30-8.
- 2 **Rukzon S**, Chindapasirt P. Compressive strength of mixture proportioning in ternary cementitious system. *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand*. 2007; 18(4): 32-38
- 3 สำเร็จ รักซ้อน. การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในงานคอนกรีต. *KKU. Engineering Journal*. 2005; 32(3): 429-429

- 4 สำเร็จ รักซ้อน และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. กำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมในระบบวัสดุประสานสามชนิด. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.

การประชุมวิชาการระดับชาติ

- 1 **Rukzon S, Chindaprasirt P.** Strength and carbonation of Portland cement rice husk ash. In: Conference on concrete and geopolymer. Khon Kaen University; October 31, 2005; Thailand; 2005. pp. 98-105.
- 2 **Rukzon S, Chindaprasirt P.** Effect of the fly ash fineness on carbonation. ใน: การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 6; 13-14 ตุลาคม 2549; กรุงเทพมหานคร. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2549. หน้า 98-105.
- 3 สำเร็จ รักซ้อน. การใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดในงานคอนกรีต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10. ชลบุรี 2-4 พฤษภาคม 2548
- 4 **Rukzon S, Chindaprasirt P.** A modification of ASTM C1202 for rapid test for sulfate ingress. ในการประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ ครั้งที่ 2; 5-6 กันยายน 2551; ขอนแก่น. มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2551. หน้า 98-105.

ตำรา

- 1 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก : วิธีกำลังและหน่วยแรงใช้งาน
- 2 การออกแบบโครงสร้างไม้และเหล็ก
- 3 ทฤษฎีและการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี

1.5 รางวัลที่เคยได้รับ

- 1) รางวัลศิษย์เก่าดีเด่น สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา วิทยาลัยเทคนิคชัยนาท
- 2) รางวัลนักวิจัยดีเด่น ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- 3) รางวัลวิทยานิพนธ์ดี ประจำปี 2551 ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น
- 4) รางวัลนักวิจัยที่มีผลงานวิจัยดีเด่น ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

- 5) สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร เครื่องมือบดวัสดุปอชโซลานประหยัดพลังงาน Petty Patent No. 3674 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ชื่อ นามสกุล นายนิโรจน์ เงินพรหม

2.1 คุณวุฒิ/การศึกษา

ปี พ.ศ.	ปริญญา	สาขา	ชื่อสถาบัน/ประเทศ
2547	ปริญญาตรี	วิศวกรรมโยธา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2549	ปริญญาโท	วิศวกรรมโยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2.2 สถานที่ทำงาน

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เลขที่ 399 ถนนสามเสน แขวงวชิระ เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

โทรศัพท์ 022809009 ต่อ 6083 โทรสาร 022802905

E-mail: kim98766@hotmail.com

2.3 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

- 1 การประเมินค่า CBR ของดินลูกรังโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Estimation of CBR of Lateritic Soil using Neural Network) ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในเอกสารการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 เล่มที่ 3 หน้า GTE 422-428 ปี 2550

