



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนทะเล
ด้วยจีโอโพลีเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง

Feasibility study of improvement of dredge soil properties
by geopolymer for use as highway material

สยาม ยิ้มศิริ

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 23816
สัญญาเลขที่ 55/2562

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนทะเล
ด้วยจีโอโพลีเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง
Feasibility study of improvement of dredge soil properties
by geopolymer for use as highway material

สยาม ยิ้มศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ตุลาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 55/2562 ขอพระคุณ กนกเนตร ชื่นนาคุ่ม ในการปฏิบัติกรทดลอง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังด้วยจีโอโพลีเมอร์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในงานทางที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมถึง 2 ต่อ คือ (i) เป็นการนำวัสดุขุดลอกซึ่งเป็นขยะให้เกิดประโยชน์ และ (ii) เป็นการใช้ fly ash ซึ่งเป็นขยะในการผลิต geopolymer โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนทะเลดังนี้ (i) ปริมาณ fly ash, (ii) ความเข้มข้นของ NaOH, (iii) สัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$, และ (iv) ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง และคุณสมบัติของดินที่ปรับปรุงแล้วที่สนใจคือ California bearing ratio และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับมาตรฐานโครงสร้างชั้นทางของกรมทางหลวง

ABSTRACT

This research studies the feasibility of improving properties of marine dredged soil from Laem Chabang Port by geopolymerization for use as an environmental-friendly pavement material. This research has benefits to environment in 2 folds. Firstly, it makes use of marine dredged soil which is a waste material. Secondly, in its process, it uses fly ash which is another waste material. This research studies factors that affecting improvement of marine dredged soil, i.e. (i) amount of fly ask, (ii) concentration of NaOH, (iii) proportion of $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$, and (iv) curing time. The properties of improved soil which is of interest is California Bearing Ratio (CBR). The resulting CBRs are compared with standards for pavement materials of the Department of Highway.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
สารบัญ	iii
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1-2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	1-3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1-4
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	
2.1 บทนำ	2-1
2.2 จีโอโพลิเมอร์	2-3
2.3 ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์	2-5
2.3.1 สารตั้งต้น (Precursor)	2-6
2.3.2 Alkali activator	2-8
2.3.3 Aggregate	2-13
2.4 ดินตะกอนทะเล	2-15
2.5 การปรับปรุงดินด้วยจีโอโพลิเมอร์	2-15
2.5.1 อัตราส่วนแก้ลยต่อดินเหนียว	2-16
2.5.2 อัตราส่วน Alkalie activator	2-17
2.5.3 สภาวะความร้อน	2-19
2.5.4 Molding moisture content	2-21
2.6 การวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน	2-22
2.6.1 Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX หรือ EDS)	2-22
2.6.2 X-ray fluorescence (XRF)	2-23
2.6.3 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)	2-24
2.6.4 X-ray diffraction (XRD)	2-25
2.6.5 Thermogravimetric Analyser (TGA)	2-26
2.7 มาตรฐานวัสดุงานทาง	2-27

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1	บทนำ	3-1
3.2	วัสดุการทดลอง	3-2
3.2.1	ดินตะกอนทะเล	3-2
3.2.2	เถ้าลอย	3-4
3.2.3	Alkali activator	3-7
3.3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	3-8
3.3.1	ปัจจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์จากดินตะกอนทะเล - เถ้าลอย	3-8
3.3.2	ขั้นตอนการทดสอบ	3-9

บทที่ 4 ผลการทดสอบการบดอัด

4.1	บทนำ	4-1
4.2	ผลทดสอบการบดอัดของอัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์	4-1

บทที่ 5 ผลทดสอบ California bearing ratio

5.1	การเตรียมตัวอย่าง CBR ในสภาวะ Soak	5-1
5.2	ผลการทดสอบ CBR	5-3
5.2.1	อัตราส่วน Soil:FA	5-4
5.2.2	อัตราส่วน Alkali activator	5-5
5.2.3	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH	5-7
5.2.4	ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง	5-7
5.3	การบวมตัวจากสภาวะ Soaked ของดินตะกอนทะเลจีโอโพลิเมอร์	5-10
5.3.1	อัตราส่วน Soil:FA	5-13
5.3.2	อัตราส่วน Alkali activator	5-14
5.3.3	ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH	5-15
5.3.4	ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง	5-15

บทที่ 6 การวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน

6.1	บทนำ	6-1
6.2	ผลทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค	6-2
6.3	ผลทดสอบองค์ประกอบของธาตุ	6-9
6.4	ผลการตรวจสอบความเป็นผลึกของโครงสร้าง	6-11
6.5	ผลทดสอบขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุล	6-15

บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง

7-1

เอกสารอ้างอิง

R-1

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ชั้นทางมักประกอบด้วยชั้นพื้นทางและรองพื้นทางที่ต้องก่อสร้างด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสม เมื่อไม่มีวัสดุที่เหมาะสมในพื้นที่และสิ้นเปลืองเกินไปในการนำวัสดุที่เหมาะสมมาจากแหล่งที่อยู่ห่างไกล มักแก้ไขปัญหาด้วยการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุที่มีในพื้นที่ด้วยสารผสมเพิ่ม เช่น ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม การผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานจำนวนมาก โดยประมาณแล้วทุกๆ 1 ตันของปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 1 ตัน โดยกิจกรรมสำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์ที่ทำให้เกิด CO_2 คือ (i) จากการ decarbonation ของหินปูน, (ii) จากการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผา, และ (iii) จากยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งระหว่างการผลิตและจำหน่าย (Davidovits, 2002) CO_2 ที่ผลิตนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (McCaffrey, 2002)

ทางเลือกในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าคือการใช้จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) เป็นสารผสมเพิ่ม โดย geopolymer เป็น inorganic polymer ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย alkali และวัสดุ aluminosilicate (วัสดุที่มี alumina (Al_2O_3) และ silica (SiO_2) จำนวนมาก) แล้วเกิดการ polycondensate (Davidovits, 1991) ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานและปลดปล่อย CO_2 น้อยกว่า นอกจากนี้การสังเคราะห์ geopolymer ยังสามารถใช้ fly ash เป็นวัสดุ aluminosilicate โดย fly ash เป็นของเสียที่ได้จากโรงงานไฟฟ้าถ่านหินจากการเผาไหม้ของถ่านหินและมีเป็นจำนวนมาก (Van Jaarsveld et al., 1998) สำหรับประเทศไทยมีการใช้ fly ash เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตประมาณ 1.8 ล้านตัน/ปี (Chindaprasert et al., 2009)

ปัจจุบันพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกเป็นฐานการผลิตอุตสาหกรรมหลักของประเทศ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมปิโตรเคมี, พลังงาน, และยานยนต์ ซึ่งมีผลิตภัณฑ์มวลรวมคิดเป็นสัดส่วน 1 ใน 5 ของประเทศ อีกทั้งยังเป็นศูนย์กลางการขนส่งทางเรือของอาเซียน นอกจากนี้รัฐบาลได้ริเริ่มโครงการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor Development) เพื่อพัฒนาพื้นที่ภาคตะวันออกให้เป็นเขตเศรษฐกิจชั้นนำของอาเซียน โดยได้อนุมัติแผนลงทุนพัฒนาโครงข่ายคมนาคมขนส่งในพื้นที่ภาคตะวันออกครั้งใหญ่ สำหรับโครงการสำคัญในการพัฒนาโครงข่ายคมนาคมขนส่งทางเรือ เช่น โครงการท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง เฟส 3 ให้รองรับตู้สินค้าได้สูงถึง 8 ล้านที่อยู่ที่ต่อปี เพื่อลดปัญหาความแออัดของการจราจรหน้าท่า และขยายขีดความสามารถของท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังให้เป็นประตูการค้าหลักของประเทศที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงอำนวยความสะดวกการขนส่งสินค้าของท่าเรือ โดยปัจจุบันโดยท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังเป็นท่าเรือหลักของประเทศไทยในการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ มีพื้นที่ประมาณ 6,340 ไร่ เริ่มเปิดใช้เมื่อ พ.ศ. 2534 โดยมีความลึกของพื้นน้ำ 18 ม. รทก ปัจจุบันได้พัฒนาไป 2 เฟสและสามารถรองรับปริมาณตู้สินค้าได้ 10-11 ล้าน TEU/ปี (54% ของการส่งออกและนำเข้าของประเทศไทย) ซึ่งถือเป็นอันดับที่ 23 ของโลก โดยแผนการก่อสร้างเฟส 3 ตั้งเป้าหมายให้ท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังติดอันดับท่าเรือที่ทันสมัย 1 ใน 10 ของโลก

ท่าเรือต้องมีการบำรุงรักษาด้วยการขุดลอกอย่างสม่ำเสมอ (เรียกว่า maintenance dredging) เพื่อรักษาความลึกของท่าเทียบและร่องน้ำให้เรือบรรทุกสินค้าขนาดใหญ่สามารถเข้าจอดเทียบท่าเพื่อขนส่งสินค้าได้ โดยวัสดุขุดลอก (dredged material) หรือดินตะกอนทะเลเกิดจากการสะสมของวัสดุต้นกำเนิดบริเวณชายฝั่งที่ทับถมกันเนื่องจากอิทธิพลของกระแสน้ำและระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ปริมาณดินตะกอนทะเลจำนวนมากที่ได้จากการขุดลอกสามารถก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมา เนื่องจากการกำจัดวัสดุดังกล่าว ทั้งนี้ดินตะกอนทะเลภายหลังการขุดลอกถือเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่ไม่มีประโยชน์และอาจเรียกได้ว่าเป็น “ขยะทางสิ่งแวดล้อม” และวิธีการกำจัดขยะทางสิ่งแวดล้อมแบบดั้งเดิม เช่น การทิ้งในทะเลลึก ปัจจุบันถือว่ามีข้อจำกัดทางกฎหมายทั้งในและระหว่างประเทศ นอกจากนี้วิธีการกำจัดแบบอื่น เช่น การทิ้งบนบก ก็ยังคงมีข้อจำกัดทางด้านค่าดำเนินการตลอดจนปัญหาการขาดแคลนพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อใช้รองรับขยะจำนวนมาก (Dubois et al., 2009) ดังนั้นการจัดการขยะทางสิ่งแวดล้อมจึงถือเป็นเรื่องสำคัญ สำหรับการขยายท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังนั้นจะทำให้มีการขุดลอกดินตะกอนทะเลชายฝั่งเพิ่มขึ้น แต่จะมีสถานที่ในการทิ้งตะกอนดังกล่าวลดลง (ปัจจุบันทั้งในพื้นที่ที่จะก่อสร้างเฟส 3) ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญและแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างเร่งด่วน ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันผลกระทบด้านอื่นๆที่อาจเกิดขึ้นตามมาในอนาคต

งานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังด้วยจีโอโพลีเมอร์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในงานทางที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมถึง 2 ต่อ คือ (i) เป็นการใช้วัสดุขุดลอกซึ่งเป็นขยะให้เกิดประโยชน์ และ (ii) เป็นการใช้ fly ash ซึ่งเป็นขยะในการผลิต geopolymer โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนทะเลดังนี้ (i) ปริมาณ fly ash, (ii) ความเข้มข้นของ NaOH, (iii) สัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$, และ (iv) ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง และคุณสมบัติของดินที่ปรับปรุงแล้วที่สนใจคือ California bearing ratio และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับมาตรฐานโครงสร้างชั้นทางของกรมทางหลวง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังด้วยจีโอโพลีเมอร์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในงานทางที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมีวัตถุประสงค์เป็นข้อๆดังนี้

- (i) ศึกษาปริมาณ fly ash ที่เหมาะสม
- (ii) ศึกษาความเข้มข้นของ NaOH ที่เหมาะสม
- (iii) ศึกษาสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ที่เหมาะสม
- (iv) ศึกษาระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังด้วยจีโอโพลิเมอร์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในงานทางที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยขอบเขตเป็นข้อๆดังนี้

- (i) ใช้ดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง
- (ii) ศึกษาปริมาณ fly ash ที่ 0%, 20%, และ 40% ของน้ำหนักรวม
- (iii) ศึกษาความเข้มข้นของ NaOH ที่ 5 M และ 8 M
- (iv) ศึกษาสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ที่ 100:0, 50:50, และ 0:100
- (v) ศึกษาอุณหภูมิการบ่มตัวอย่างที่ 25-35°C
- (vi) ศึกษาระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ของงานวิจัยนี้สามารถแบ่งเป็นข้อๆได้ดังนี้

- สามารถนำดินตะกอนทะเล และเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทั้งหมดมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ในงานด้านวิศวกรรม
- สามารถนำดินตะกอนทะเลมาใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้
- มีอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับ CBR ของดินที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยจีโอโพลิเมอร์ และมีความสะดวกในการดำเนินการใช้งานด้านวัสดุทางมากที่สุด

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม

2.1 บทนำ

ปัจจุบันพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกเป็นฐานการผลิตอุตสาหกรรมหลักของประเทศ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมปิโตรเคมี, พลังงาน, และยานยนต์ ซึ่งมีผลิตภัณฑ์มวลรวมคิดเป็นสัดส่วน 1 ใน 5 ของประเทศ อีกทั้งยังเป็นศูนย์กลางการขนส่งทางเรือของอาเซียน นอกจากนี้รัฐบาลได้ริเริ่มโครงการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor Development) เพื่อพัฒนาพื้นที่ภาคตะวันออกให้เป็นเขตเศรษฐกิจชั้นนำของอาเซียน โดยได้อนุมัติแผนลงทุนพัฒนาโครงข่ายคมนาคมขนส่งในพื้นที่ภาคตะวันออกครั้งใหญ่ ประกอบด้วย (i) ทางอากาศ, (ii) ทางราง, (iii) ทางถนน, และ (iv) ทางเรือ สำหรับโครงการสำคัญในการพัฒนาโครงข่ายคมนาคมขนส่งทางเรือ เช่น โครงการท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง เฟส 3 ให้รองรับตู้สินค้าได้สูงถึง 8 ล้านที่อียูต่อปี เพื่อลดปัญหาความแออัดของการจราจรหน้าท่า และขยายขีดความสามารถของท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังให้เป็นประตูการค้าหลักของประเทศที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงอำนวยความสะดวกการขนส่งสินค้าของท่าเรือ โดยปัจจุบันโดยท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังเป็นท่าเรือหลักของประเทศไทยในการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ มีพื้นที่ประมาณ 6,340 ไร่ เริ่มเปิดใช้เมื่อ พ.ศ. 2534 โดยมีความลึกของพื้นน้ำ 18 ม รทก ปัจจุบันได้พัฒนาไป 2 เฟสและสามารถรองรับปริมาณตู้สินค้าได้ 10-11 ล้าน TEU/ปี (54% ของการส่งออกและนำเข้าของประเทศไทย) ซึ่งถือเป็นอันดับที่ 23 ของโลก โดยแผนการก่อสร้างเฟส 3 ตั้งเป้าหมายให้ท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังติดอันดับท่าเรือที่ทันสมัย 1 ใน 10 ของโลก

ท่าเรือต้องมีการบำรุงรักษาด้วยการขุดลอกอย่างสม่ำเสมอ (เรียกว่า maintenance dredging) เพื่อรักษาความลึกของท่าเทียบและร่องน้ำให้เรือบรรทุกสินค้าขนาดใหญ่สามารถเข้าจอดเทียบท่าเพื่อขนส่งสินค้าได้ โดยวัสดุขุดลอก (dredged material) หรือดินตะกอนทะเลเกิดจากการสะสมของวัสดุต้นกำเนิดบริเวณชายฝั่งที่ทับถมกันเนื่องจากอิทธิพลของกระแสน้ำและระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามปริมาณดินตะกอนทะเลจำนวนมากที่ได้จากการขุดลอกสามารถก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมาเนื่องจากการกำจัดวัสดุดังกล่าว ทั้งนี้ดินตะกอนทะเลภายหลังการขุดลอกถือเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่ไม่มีประโยชน์และอาจเรียกได้ว่าเป็น “ขยะทางสิ่งแวดล้อม” และวิธีการกำจัดขยะทางสิ่งแวดล้อมแบบดั้งเดิม เช่น การทิ้งในทะเลลึก ปัจจุบันถือว่ามีข้อจำกัดทางกฎหมายทั้งในและระหว่างประเทศ นอกจากนี้วิธีการกำจัดแบบอื่น เช่น การทิ้งบนบก ก็ยังคงมีข้อจำกัดทางด้านค่าดำเนินการตลอดจนปัญหาการขาดแคลนพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อใช้รองรับขยะจำนวนมาก (Dubois et al., 2009) ดังนั้นการจัดการขยะทางสิ่งแวดล้อมจึงถือเป็นเรื่องสำคัญ สำหรับการขยายท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังนั้นจะทำให้มีการขุดลอกดินตะกอนทะเลชายฝั่งเพิ่มขึ้น แต่จะมีสถานที่ในการทิ้งตะกอนดังกล่าวลดลง (ปัจจุบันทั้งในพื้นที่ที่จะก่อสร้างเฟส 3) ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญและแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างเร่งด่วน ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันผลกระทบด้านอื่นๆที่อาจเกิดขึ้นตามมาในอนาคต

วัสดุที่ถูกขุดลอก คือ ดินตะกอนเนื้อละเอียด (อาจเป็นทรายถึงทรายปนซิลต์ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ทำการขุดลอก) ที่เกิดจากการสะสมบริเวณชายฝั่งของวัสดุต้นกำเนิดจากอิทธิพลของกระแสน้ำและระดับน้ำทะเลที่

เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเป็นสาเหตุให้ชายฝั่งตื้นเขินส่งผลกระทบต่อ การเข้าเทียบท่าของเรือบรรทุกสินค้า และมีความจำเป็นต้องขุดลอกออกเป็นระยะๆ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว มีงานวิจัยต่างๆ ที่นำวัสดุที่ถูกขุดลอก จากชายฝั่งทะเลมาใช้ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมโยธา, เกษตรกรรม, และอุตสาหกรรมเพื่อลดปัญหาการ กำจัดทิ้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าขยะทางสิ่งแวดล้อมและประหยัดแหล่งทรัพยากรธรรมชาติสำหรับอุตสาหกรรม ด้วย หากพิจารณาการใช้ประโยชน์จากวัสดุที่ถูกขุดลอกจากชายฝั่งในงานทางวิศวกรรมโยธาพบว่าประเทศ ญี่ปุ่นมีการใช้สูงสุดเป็นอันดับ 1 โดยปริมาณดินที่ถูกขุดลอกมากถึงร้อยละ 90 จะถูกปรับปรุงคุณภาพโดย ซีเมนต์และนำมาใช้ในการก่อสร้างสนามบินและงานป้องกันการกัดเซาะชายฝั่ง อันดับสองคือประเทศสเปน โดยร้อยละ 76 ของดินที่ถูกขุดลอกถูกนำมาใช้ในการป้องกันการกัดเซาะชายฝั่งและงานถม อันดับสาม, สี่, และห้าคือ ประเทศสหรัฐอเมริกา (ร้อยละ 20-30), ประเทศเนเธอร์แลนด์ (ร้อยละ 23), และประเทศ ไอร์แลนด์ (ร้อยละ 20) ตามลำดับ (Sheehan et al., 2009) จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับแนวทางการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากดินที่ถูกขุดลอกจากชายฝั่งพบว่าสามารถจำแนกตามประเภทของงานได้ 4 ประเภทดังนี้

- (i) การใช้งานทางวิศวกรรม (engineering uses) คือการใช้เป็นวัสดุถมเพื่อการก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธา (land reclamation) เช่น สนามบิน Kansai International Airport ในประเทศญี่ปุ่น ใช้ดินตะกอนทรายที่ถูกขุดลอกประมาณ 180 ล้านลูกบาศก์เมตรเพื่อถมทะเลเป็นเกาะขนาดกว้าง 1.23 กิโลเมตร ยาว 4.37 กิโลเมตร (Arai, 1991; Kanda et al., 1991) และ โครงการ Changi East reclamation project ในประเทศสิงคโปร์ ใช้ดินตะกอนทรายที่ถูกขุดลอกประมาณ 200 ล้านลูกบาศก์เมตรเพื่อถมทะเลพื้นที่ 3,000 ha (Arulrajah et al., 2009)
- (ii) การใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม (environmental enhancement) ได้แก่ (i) การสร้างหาดทรายเพื่อป้องกันการกัดเซาะของชายฝั่งทะเลและลดพลังงานของคลื่นที่มากกระทบ (coastal protection) (Hanson et al., 2002) Van der Wal et al. (2010) พบว่าการนำดินที่ถูกขุดลอกมาถมบริเวณปากน้ำขึ้น-น้ำลง ส่งผลดีอย่างมากต่อการลดการกัดเซาะของหาดโคลน (mudflats) และ (ii) การใช้เป็นวัสดุเพื่อบรรจุใน geotube เพื่อป้องกันการกัดเซาะของชายฝั่งทะเล (Sheehan, 2012)
- (iii) การใช้งานด้านเกษตรกรรม (agricultural uses) ดินที่ถูกขุดลอกสามารถนำมาใช้เป็นดินชั้นบนเพื่อการปลูกพืชโดยการผสมกับขยะอินทรีย์ในสัดส่วนที่เหมาะสม Sheehan et al. (2010) ได้นำดินตะกอนที่ถูกขุดลอกจาก Port of Waterford ผสมกับขยะอินทรีย์และพบว่าดินที่ได้มีคุณสมบัติที่ดี คือ ระบายน้ำได้ดี, มีความสามารถในการเก็บกักสารอาหารและน้ำที่เพียงพอ, และมีปริมาณสารอาหารที่สูงกว่ามาตรฐานดินชั้นบน
- (iv) การใช้เป็นวัสดุทดแทนในงานก่อสร้าง (substituted product uses) ได้แก่ (i) การใช้เพื่อเป็นวัสดุทดแทนในงานทาง เช่น การปรับปรุงดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือ Dunkirk ประเทศฝรั่งเศส โดยวิธีต่างๆ คือ การผสมทรายเพื่อเพิ่มคุณสมบัติขนาดคละและความแข็งแรง และการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลัง โดยการผสมซีเมนต์, ปูนขาว, และวัสดุพอลิโพรพิลีน เพื่อใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทาง (Bernard et al., 2002; Zentar et al., 2005; Zentar et al., 2008; Siham et al., 2008; Dubois et al., 2009;

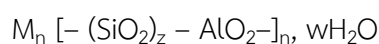
Wang et al., 2017), (ii) การใช้เป็นวัสดุบดในงานอุตสาหกรรมการผลิตอิฐและเซรามิก Hamer & Karius (2002) พบว่าโลหะหนักและสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดินที่ถูกขุดลอกจะถูกทำลายด้วยความร้อนสูงในกระบวนการผลิตอิฐและเซรามิก ซึ่งเป็นข้อดีอย่างยิ่งสำหรับการใช้ประโยชน์จากดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก, (iii) การใช้เป็นวัสดุในงานคอนกรีต Limeira et al. (2010) และ Wang (2008) พบว่าดินเนื้อละเอียดที่ได้จากการขุดลอกมีศักยภาพเป็นวัสดุบดในการผลิตคอนกรีตทั่วไป, คอนกรีตมวลเบา, และคอนกรีตสมรรถนะสูง และยังพบว่าคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ทรายหินปูนบด (crushed limestone raw sand) ด้วยดินเนื้อละเอียดที่ถูกขุดลอกจาก Port of Barcelona มีลักษณะเช่นเดียวกับคอนกรีตมาตรฐาน, และ (iv) การใช้เป็นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ ดินเนื้อละเอียดที่ถูกขุดลอกสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ (landfill liner) (Giroud et al., 1997; Zhang & Wu, 2005; Riordan, 2008; และ Stefan & Fokke, 2013) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุปิดทับหน้าขยะมูลฝอยในแต่ละวัน (daily capping layer) หรือวัสดุชั้นปิดทับหน้าชั้นสุดท้ายในบ่อฝังกลบขยะ (landfill final cover) (Nolan, 2009)

2.2 จีโอโพลิเมอร์

Geopolymer ได้มาจากความสำเร็จจากงานวิจัยวัสดุทนไฟ เป็นกระบวนการเกิดโพลิเมอร์โดยอะลูมิโนซิลิเกต (silico-aluminates) เช่น แกาลีไนท์ ถูกเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่ำในช่วงระยะสั้นหรือการทำหินเทียมซึ่งเป็นผลจากการตกผลึก การออกแบบจีโอโพลิเมอร์จึงขึ้นอยู่กับวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตโครงสร้าง 3 มิติแบบออสซิลานและกิ่งออสซิลานของประเภท

โพลีไซอะเลต (Polysialate, PS)	(-Si-O-Al-O-)
โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate-siloxo, PSS)	(-Si-O-Al-O-Si-O-)
โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (Polysialate-disiloxo, PSD)	(-Si-O-A-O- Si-O-Si-O-)

ไซอะเลต (sialate) เป็นตัวย่อของ silicon-oxo-aluminate ไซอะเลตประกอบไปด้วยการเชื่อมโยงกับอะลูมินาต (AlO_4) และซิลิเกต (SiO_4) เกิดรูปร่างโมเลกุลทรงสามเหลี่ยมสี่หน้าเตตระฮีดรอน (Tetrahedral) กับการใช้ออกซิเจน (oxygens) ร่วมกันทั้งหมดของไอออนบวก (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , H_3O^+) ต้องสมดุลกับไอออนลบของ Al^{3+} + ใน 4-fold coordination โพลีไซอะเลตมีสูตรดังนี้

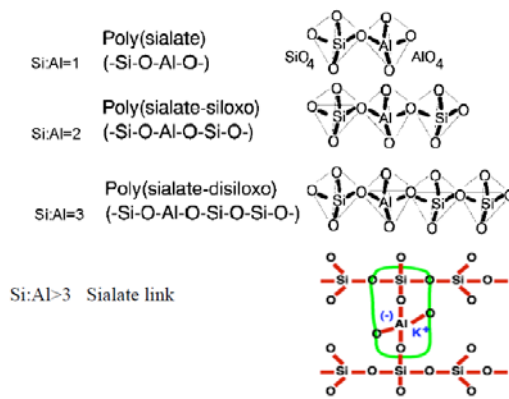


โดยที่ M = ไอออนบวกตัวอย่างเช่น โพแทสเซียม, โซเดียมหรือแคลเซียม (calcium)

N = degree of polycondensation

Z = จำนวนโมเลกุล 1, 2, 3

โพลีไซอะเลตเป็นห่วงโซ่ และวงแหวนโพลิเมอร์กับ Si^{4+} และ Al^{3+} ใน 4-fold coordination กับออกซิเจนแบบออสซิลาน และกิ่งแบบออสซิลาน ประเภทของจีโอโพลิเมอร์แสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 ประเภทของจีโอโพลิเมอร์ (Davidovits, 2002)

ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เกิดจากกระบวนการทางเคมีจีโอโพลิเมอไรเซชัน การสลายโครงสร้างอสังฐานของอะลูมิโนซิลิเกตโดยสารละลายอัลคาไลก่อตัวในรูปแบบของเจลที่เกิดจากปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินาเมื่อตัวอย่างถูกละลายเกิดภาวะ polycondensation ภายในโครงสร้างอสังฐานหรือกิ่งผลึกและแข็งตัวจากการสังเคราะห์อะลูมิโนซิลิเกต ดังนั้นวัสดุที่มีโครงสร้างแบบอสังฐานหรือกิ่งผลึกจึงเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ จากการศึกษาพบว่าโดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นนั้นคือ เถ้าลอย, เกลีไนท์, เถ้ากันเตา, และเถ้าหนัก สารละลายอัลคาไลได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, สารละลายโซเดียมซิลิเกต และ Calcium carbide residue (CCR) และ ส่วนมวลรวม (Aggregate) ที่ได้รับความนิยมในการปรับปรุงคุณสมบัติได้แก่ ดินเหนียวและดินตะกอนประปา

เถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากโรงงานผลิตวัสดุนี้มีอยู่ทั่วโลกซึ่งได้มาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินทุกปีการบริโภคเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuels) เพื่อใช้สำหรับผลิตพลังงานและยังถูกใช้เพิ่มมากขึ้น และยังคงมีการผลิตเช่นนี้ไปอย่างน้อยจนถึงปี 2020 จึงเอื้อต่อโอกาสสำหรับการใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ของเทคโนโลยีนี้นำไปสู่ความต้องการในการจัดให้เป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งถูกนำไปใช้สำหรับการฝังกลบมูลฝอยเป็นกระบวนการกำจัดแบบสิ่งแวดล้อมและปัญหาด้านอื่นๆ เถ้าลอยจำนวน 1.8 ล้านตันใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ใช้แทนที่พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สำหรับการทำคอนกรีตเพื่อช่วยลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ช่วยปรับปรุงความสามารถในการทนและความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ตามเถ้าลอยสามารถแทนที่ได้แค่เพียงบางส่วนของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์จากองค์ประกอบเพียงซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในเถ้าลอยเท่านั้น และยังต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ สำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิกไปยังแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต ปัจจุบันวัสดุซีเมนต์จากด้านหนึ่งที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ ถูกพัฒนาขึ้น จีโอโพลิเมอร์นี้ปกติจะทำขึ้นมาจากเถ้าลอยซึ่งเป็นแหล่งวัสดุอะลูมิโนซิลิเกต และถูกกระตุ้นกับสารละลายอัลคาไลที่อุณหภูมิต่ำ และบางครั้งมันถูกเรียกว่า alkaline – activated fly ash เมื่อแหล่งวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตมาสัมผัสกับ

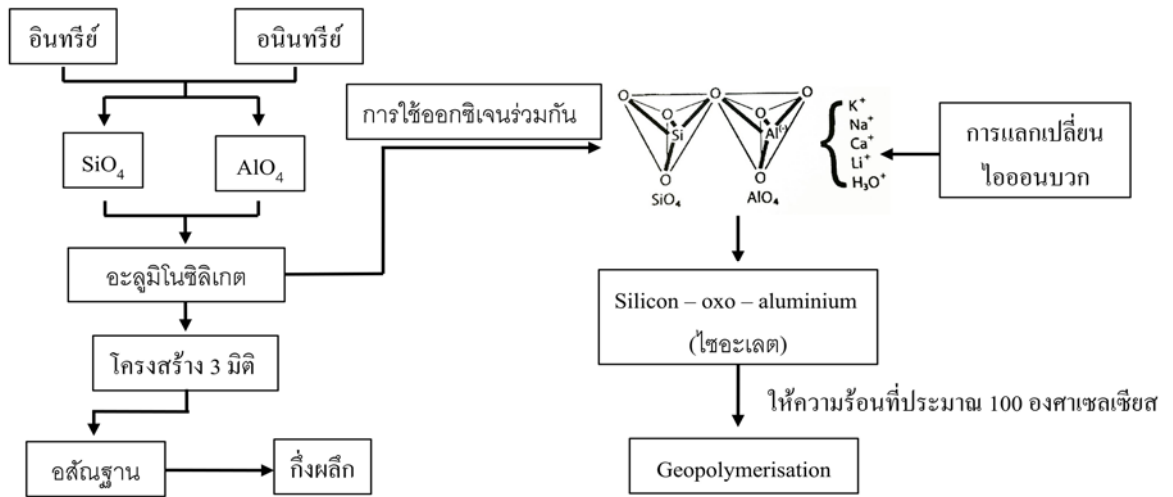
สารละลายอัลคาไล กระบวนการเคมีของโพลิเมอไรเซชันจึงเริ่มต้นขึ้น เกิดการชะล้างซิลิเกต, อะลูมิเนต และไอออนอื่นๆ ที่ผิวหน้าของเถ้าลอย และก่อตัวของอะลูมิโนซิลิเกตเจล นำไปสู่การแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์

กระบวนการเคมีของโพลิเมอไรเซชันขึ้นอยู่กับห่วงโซ่ของอะลูมิโนซิลิเกต วัสดุที่สามารถก่อให้เกิดห่วงโซ่ อะลูมิโนซิลิเกตซึ่งในงานวิจัยนี้คือเถ้าลอยโดยปกติจะถูกใช้ผสมกับ Alkali activator หรือบางครั้งถูกเรียกว่า Alkali-activated, Liquid alkaline, Liquid alkaline activator และ Alkali activation ซึ่งคือ สารที่ประกอบด้วยไอออนบวก (M) ตัวอย่างเช่น โพแทสเซียม (K^+), โซเดียม (Na^+) หรือแคลเซียม (Ca^{++}) เมื่อสัมผัสกันจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งกันและกัน การสลายตัวของซิลิเกตและอะลูมิเนตที่อยู่ในเถ้าลอยจึงเริ่มต้นขึ้น ซึ่งการสลายนี้เองจึงทำให้เกิดห่วงโซ่ของอะลูมิโนซิลิเกตสารละลายดังกล่าวที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ และโซเดียมซิลิเกตหรือเรียกอีกอย่างว่า water glass ประกอบด้วยอัตราส่วน Na_2O เท่ากับ 9%, SiO_2 เท่ากับ 30%, และ H_2O เท่ากับ 61% ซึ่งมีหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน และช่วยเสริมซิลิเกตให้เถ้าลอยหรือ aggregate เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้าทำละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น เมื่อทั้งหมดรวมตัวกันจึงได้เป็นผลผลิตของจีโอโพลิเมอร์

Aggregate คือวัสดุที่นำมาใช้เป็นมวลรวมสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์หรือบางครั้งถูกเรียกว่ามวลรวมละเอียด (fine aggregate) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกา และอะลูมินา เป็นแหล่งอะลูมิโนซิลิเกต โดยธรรมชาติเช่นเดียวกับวัสดุที่เป็นสารตั้งต้น เช่น ดินเหนียว, ดินตะกอนประปา, และดินลูกรัง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติขององค์ประกอบหลักและโครงสร้างขององค์ประกอบนั้นๆว่าจะมีความสามารถไวต่อการทำปฏิกิริยาของกระบวนการจีโอโพลิเมอไรเซชันได้มากน้อยแค่เพียงใด เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างแบบอสัณฐานหรือกึ่งผลึกดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่เป็นสารตั้งต้นซึ่งมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันได้มากกว่าเพื่อเข้ามาช่วยเติมเต็ม และปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ Aggregate ให้ดีขึ้นหรือใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติดินนั้นๆวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็น Aggregate ได้แก่ ดินเหนียว และดินลูกรัง เนื่องจากเป็นวัสดุด้วยคุณสมบัติในทางด้านวิศวกรรม

2.3 ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์

ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เกิดจากกระบวนการทางเคมีจีโอโพลิเมอไรเซชัน การสลายโครงสร้างอสัณฐานของอะลูมิโนซิลิเกตโดยสารละลายอัลคาไล ก่อตัวในรูปแบบของเจลที่เกิดจากปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินา เมื่อตัวอย่างถูกละลายเกิดภาวะ polycondensation ภายในโครงสร้างอสัณฐานหรือกึ่งผลึก และแข็งตัวจากการสังเคราะห์อะลูมิโนซิลิเกต ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ดังนั้นวัสดุที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานหรือกึ่งผลึกจึงเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ จากการศึกษาพบว่าโดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นนั้นคือ เถ้าลอย, เกลีโนท์ และเถ้ากันเตา หรือเถ้าหนัก สารละลายอัลคาไลได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, สารละลายโซเดียมซิลิเกต และ Calcium carbide residue (CCR) และวัสดุมวลรวม (Aggregate) ที่ได้รับความนิยมในการปรับปรุงคุณสมบัติได้แก่ ดินเหนียว และดินตะกอนประปา



รูปที่ 2-2 การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชัน

2.3.1 สารตั้งต้น (Precursor)

สารตั้งต้นคือวัสดุที่นิยมใช้นำมาเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชัน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักได้แก่ ซิลิกา และอะลูมินา เป็นแหล่งอะลูมิโนซิลิเกตโดยธรรมชาติ เช่น เถ้าลอย, เกาลิน, เถ้ากันเตาหรือเถ้าหนัก เศษเซรามิก และเถ้าชานอ้อย แต่เถ้าลอยนั้นเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากกว่าในการนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานสำหรับผลิตซีเมนต์ หรือใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติดิน สารตั้งต้นทำหน้าที่เป็นวัสดุควบคุมกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ บางครั้งถูกเรียกว่า วัสดุหยาบ (Raw materials), Prime Material และ Pozzolan Material สารตั้งต้นที่ได้ถูกใช้มีดังนี้

a) เถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากโรงงานผลิตวัสดุนี้อยู่ทั่วโลกซึ่งได้มาจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ทุกๆปีการบริโภคเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuels) เพื่อใช้สำหรับผลิตพลังงานและยังถูกใช้เพิ่มมากขึ้น และยังคงมีการผลิตเช่นนี้ไปอย่างน้อยจนถึงปี 2020 จึงเอื้อต่อโอกาสสำหรับการใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ของเทคโนโลยีนี้นำไปสู่ความต้องการในการจัดให้เป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งถูกนำไปใช้สำหรับการฝังกลบมูลฝอยเป็นกระบวนการกำจัดแบบสิ่งแวดล้อมและปัญหาด้านอื่นๆ เถ้าลอยจำนวน 1.8 ล้านตันใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์ใช้แทนที่พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ สำหรับการทำคอนกรีตเพื่อช่วยลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทและความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ตามเถ้าลอยสามารถแทนที่ได้แค่เพียงบางส่วนของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์จากองค์ประกอบเพียงซิลิกา และอะลูมินาที่อยู่ในเถ้าลอยเท่านั้น และยังต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ สำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิกไปยังแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต ปัจจุบันวัสดุซีเมนต์จากด้านหนึ่งที่ว่า จีโอโพลิเมอร์ ถูกพัฒนาขึ้น จีโอโพลิเมอร์นี้ปกติจะทำขึ้นมาจากเถ้าลอยซึ่งเป็นแหล่งวัสดุอะลูมิโนซิลิเกต และถูกกระตุ้นกับสารละลายอัลคาไลที่อุณหภูมิต่ำ และ

บางครั้งมันถูกเรียกว่า alkaline – activated fly ash เมื่อแหล่งวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตมาสัมผัสกับสารละลายอัลคาไล กระบวนการเคมีของโพลิเมอร์เซชันจึงเริ่มต้นขึ้น เกิดการชะล้างซิลิเกต, อะลูมิเนต และไอออนอื่นๆ ที่ผิวหน้าของแก้วลอย และก่อตัวของอะลูมิโนซิลิเกตเจล นำไปสู่การแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์ แก้วลอยมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท C และ F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 แต่ละประเภทมีองค์ประกอบของสารประกอบทางเคมีแตกต่างกันโดยประเภท C และ F มีสารประกอบทางเคมีหลักคือ ซิลิกา, อะลูมินา และเหล็กออกไซด์ มากกว่า 50% ส่วนโดยประเภท F มีส่วนประกอบหลักมากกว่า 70%

b) เกาลิน

จีโอโพลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้ในอัตรากว้างของวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตที่ต้นทุนต่ำหรือแม้แต่วัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เช่น ดินขาวเผา (Metakaolin), แก้วลอย, ตะกรันเตา, โคลนแดง, และแคลบ ในการสร้างเสถียรภาพให้แก่ดินที่ความลึกในระดับตื้น เช่น วัสดุคันทาง, วัสดุรองพื้นทาง หรือใน pavement และโครงสร้างสนามบิน, ฐานรากตื้น และเขื่อน เป็นต้น ดินขาวเผา ถูกกระตุ้นด้วยสารอัลคาไลถูกเลือกให้เป็นวัสดุรักษา lean ดินเหนียวในการใช้จีโอโพลิเมอร์สร้างเสถียรภาพ ดินขาวเผาเป็นอะลูมิโนซิลิเกตที่ปราศจากน้ำ โดยการเผาของเกาลินที่อุณหภูมิ 650-900°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับซิลิกาและอะลูมินาโดยเฉพาะ ดังนั้นจึงทำปฏิกิริยาสูงกับการกระตุ้นด้วยสารอัลคาไล แม้ว่าเกาลินไม่มีความจำเป็นมากในผลกระทบของต้นทุน หรือเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมกว่า Ordinary Portland Cement (OPC) เป็นวัสดุหยาบให้ผลในความสัมพันธ์ของการเป็นส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่บริสุทธิ์ สามารถใช้เป็นวัสดุหลักในการทำจีโอโพลิเมอร์เพื่อสร้างเสถียรภาพให้แก่ดินที่ระดับความตื้นได้ ตัวอย่างดินที่ถูกสร้างเสถียรภาพด้วยดินขาวเผาจีโอโพลิเมอร์ จะมีความเปราะน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกสร้างเสถียรภาพ ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับใช้ใน flexible pavement เป็นต้น

c) แก้วกันเตาหรือเถ้าหนัก

การบริโภคเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuels) เพื่อใช้สำหรับผลิตพลังงานใช้เพิ่มมากขึ้น โดยหลักแล้วจากอุตสาหกรรมของกระบวนการผลิตไฟฟ้า ดังนั้นที่ได้จึงเป็นวัสดุเหลือทิ้ง อย่างไรก็ตามถ่านหินที่ได้นั้นมีปริมาณมาก และมีเถ้าอยู่หลายประเภท รวมถึงแก้วลอยและเถ้ากันเตา (bottom ash) ซึ่งถูกนำไปใช้สำหรับการฝังกลบมูลฝอยเป็นกระบวนการกำจัดแบบสิ่งแวดล้อมและปัญหาด้านอื่นๆ ในประเทศไทยการเกิดแก้วลอย และเถ้ากันเตาจากโรงไฟฟ้าทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กทั้งหมด 4 ล้านตัน แก้วลอยใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์ อย่างไรก็ตามระดับการแทนที่ของแก้วลอยปกติจะถูกจำกัดอยู่ที่น้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ องค์ประกอบเถ้ากันเตาเต็มไปด้วยซิลิกา และอะลูมินา เป็นแหล่งวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการทำจีโอโพลิเมอร์เช่นเดียวกับแก้วลอย อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเถ้ากันเตา และแก้วลอย ไม่เพียงแต่ผลิตภัณฑ์แก้วลอยนั้นจะสร้างผลผลิตที่สมบูรณ์ให้แก่จีโอโพลิเมอร์ แต่ยังสามารถสร้างกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้ากันเตา แม้ว่าจะพบว่าเถ้ากันเตาและเถ้าถ่านถ่านหินมีสารประกอบเคมีที่คล้ายกัน การทำปฏิกิริยาของแก้วลอยเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้ากันเตามีปฏิกิริยาน้อยกว่าหรือเกือบจะไม่

มีความสามารถในการใช้ผลิตภัณฑ์โพลิเมอร์ได้ แก่ลดยกเกิดปฏิกิริยามากและให้ผลของดีกรีโพลิเมอร์สูงขึ้นสูงกว่าแก่กันเตา นั้นเป็นเพราะแก่ลยประกอบด้วยอนุภาคของเฟสอสัณฐานสูงกว่าแก่กันเตา

d) เศษเซรามิก

ประเทศไทยมีอุตสาหกรรมเซรามิกจำนวนมาก กระบวนการผลิตมีเศษเซรามิกเกิดขึ้นจำนวนมาก เนื่องจากรูปทรงของผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐานต้องนำไปทุบทำลาย จึงสามารถนำเศษเซรามิกเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเศษเซรามิก ผลการทดลองพบว่าดินลูกรังที่แทนที่ด้วยเศษเซรามิก 10% และผสมกับจีโอโพลิเมอร์ 25% สามารถให้กำลังอัดมากที่สุดเท่ากับ 99.105 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

e) แก้วขานอ้อย

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่ปลูกอ้อยรายใหญ่ของโลก ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลอ้อยมีกากเหลือใช้จากอ้อยจำนวนมาก และก่อปัญหาทางด้านมลภาวะ แก้วขานอ้อยเคยได้รับการวิจัยจากต่างประเทศว่ามีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับวัสดุพอสโซลาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำกากแก้วขานอ้อยมาใช้เป็นวัสดุแทนที่แก่ลยในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยจีโอโพลิเมอร์ โดยองค์ประกอบของแก้วขานอ้อยพบว่ามีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับแก้วเคลบและแก่น้ำมันปาล์มโดยอยู่ในช่วง 40 – 60% และรองลงมาคือ อะลูมินา 23.43% พบว่าสามารถใช้แก่ต่อสารละลาย 50:45, แก้วขานอ้อยต่อแก่ลย 50:50, โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5:1 ที่ความเข้มข้น 16 โมล และอัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์ผสมดินเหนียวที่ 20% ให้กำลังอัดสูงสุด 21.755 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

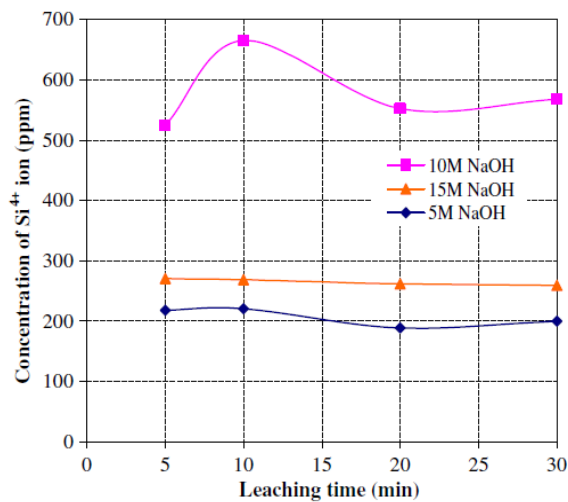
2.3.2 Alkali activator

กระบวนการเคมีของโพลิเมอร์เซชันขึ้นอยู่กับห่วงโซ่ของอะลูมิโนซิลิเกต วัสดุที่สามารถก่อให้เกิดห่วงโซ่อะลูมิโนซิลิเกตซึ่งในงานวิจัยนี้คือแก่ลยโดยปกติจะถูกใช้ผสมกับ Alkali activator หรือบางครั้งถูกเรียกว่า alkali-activated, Liquid alkaline, Liquid alkaline activator และ Alkie activation ซึ่งคือสารที่ประกอบด้วยไอออนบวก (M) ตัวอย่างเช่น โพแทสเซียม (K^+), โซเดียม (Na^+) หรือแคลเซียม (Ca^{++}) เมื่อสัมผัสกันจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งกันและกัน การสลายตัวของซิลิเกตและอะลูมิเนตที่อยู่ในแก่ลยจึงเริ่มต้นขึ้น ซึ่งการสลายนี้เองจึงทำให้เกิดห่วงโซ่ของอะลูมิโนซิลิเกต สารละลายดังกล่าวที่นิยมใช้ได้แก่โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมล และโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วน NaO_2 หรือเรียกอีกอย่างว่า น้ำแก้ว (water glass) เท่ากับ 9%, SiO_2 เท่ากับ 30% และ H_2O เท่ากับ 61% ซึ่งมีหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน และช่วยเสริมซิลิเกตให้แก่ลยหรือ aggregate เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้าทำละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น เมื่อทั้งหมดรวมตัวกันจึงได้เป็นผลผลิตของจีโอโพลิเมอร์ สาร alkali activator ที่ได้ถูกใช้มีดังนี้

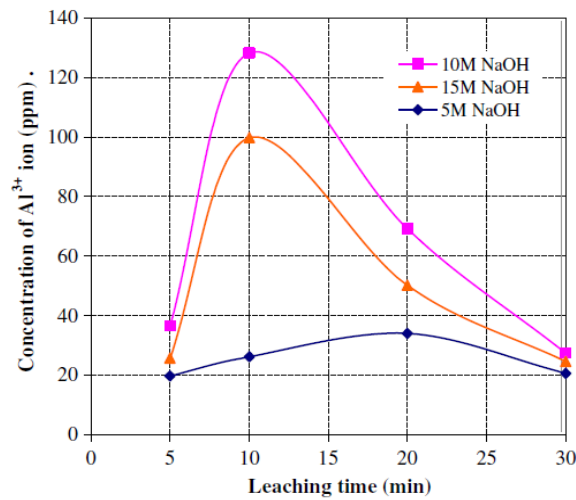
a) โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต

สารละลายอัลคาไลน์มีความหลากหลายของประเภทความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และส่งผลต่อการสลายตัวของอนุภาคซิลิเกตและอะลูมินาในแก้วลอยแตกต่างกันไป การสลายตัวของอนุภาคซิลิเกตและอะลูมินาในแก้วลอยเกิดจากการชะล้างไอออนอะลูมินา และซิลิเกต โดยปกติการชะล้างไอออน Al^{3+} และ Si^{4+} ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกตเป็นวัสดุสำหรับการยึดเกาะ ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นของ Alkali activator จึงเป็นเฟคเตอร์ (factor) ที่สำคัญในการควบคุมการชะล้างของอะลูมินา และซิลิกาจากอนุภาคของแก้วลอย หลังจากการเกิดจีโอโพลิเมอร์เซชัน และคุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์ที่แข็งตัวแล้ว

การทดสอบการชะล้างจากอนุภาคของแก้วลอยหลังจากการผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของอัลคาไลต่างๆ และช่วงเวลาของการชะล้างก่อนที่จีโอโพลิเมอร์จะก่อตัวกับสารละลายซิลิเกต เพื่อที่จะช่วยให้ความเข้าใจถึงปฏิกิริยา และการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ผลการทดสอบการชะล้างไอออนซิลิเกต แสดงค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไอออน Si^{4+} และอะลูมินา แสดงค่าเฉลี่ยของไอออน Al^{3+} กับแก้วลอยต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3:1 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5, 10 และ 15 โมล ดังแสดงในรูปที่ 2-3 และ 2-4 ตามลำดับ



รูปที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนซิลิเกตและระยะเวลาการชะ (Rattanasak et al., 2009)



รูปที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนอะลูมิเนียมและระยะเวลาการชะ (Rattanasak et al., 2009)

ขณะที่แหล่งวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตมาสัมผัสกับสารละลายอัลคาไล การชะทั้งซิลิเกต, อะลูมิเนียม และไอออนอื่นๆจะเริ่มต้นขึ้น ตัวอย่างของซิลิเกต และอะลูมิเนียมถูกกระจายเข้าไปในสารละลาย นำไปสู่การลดลงของซิลิเกต และอะลูมิเนียมที่ผิวหน้าของถ้ำลอยจึงทำให้สารละลายหนาขึ้น ช่วงเวลาการชะที่ 10 นาทีพอเพียงสำหรับการชะ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 โมล สามารถทำการชะเอาความเข้มข้นของไอออนซิลิเกตและความเข้มข้นของไอออนอะลูมิเนียมได้สูงกว่าเนื่องจากอยู่ในสภาวะความเป็นเบสสูง และถูกละลายได้สูง และจำนวนของ Al ไม่ถูกทำลายใน 10 นาที ความเข้มข้นของไอออนอะลูมิเนียมต่ำกว่าความเข้มข้นของไอออนซิลิเกตมาก เพราะอะลูมิเนียมในถ้ำลอยมีปริมาณน้อยกว่าซิลิกาครึ่งหนึ่ง และซิลิกามีความสามารถในการชะได้มากกว่าอะลูมิเนียม

ส่วนช่วง 20 ถึง 30 นาที นั้นไม่มีความสำคัญในการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนของซิลิเกต และอะลูมิเนียม และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5 และ 15 โมล เนื่องจากมีการสลายตัวต่ำในความสัมพันธ์ที่สภาวะความเป็นเบสต่ำ นอกจากนี้แล้วการก่อตัวของอะลูมิเนียมซิลิเกตเจลในระยะแรกให้ผลของอัตราระหว่างซิลิเกตและอะลูมิเนียมต่ำ ดังนั้นจึงนำไปสู่การใช้ซิลิเกตในช่วงระยะแรกต่ำ ของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5 โมล และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 โมล สารละลายถูกลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นก้อนหนาและเหนียวหนืด โดยสารละลายที่ยังคงอยู่ในช่วงแรกไปสู่การเพิ่มขึ้นของซิลิกาเจลซึ่งมีลักษณะกลมเล็กกรรมเข้าด้วยกัน และมวลเจลก่อตัวขนาดใหญ่ การก่อตัวของเจลมีผลกระทบต่อ 2 สิ่งคือ การหมดไปของไอออน ซึ่งจะกระตุ้นให้การชะไอออนออกจากอนุภาคของถ้ำลอยเพิ่มขึ้น และการทำให้สารละลายหนาขึ้น ซึ่งเป็นผลให้การเคลื่อนที่ของสารละลายช้าลง โดยเฉพาะไอออนบริเวณที่ผิวของถ้ำลอย หลังจากการชะกับจำนวนไอออนที่เพียงพอของสารละลายทั้งหมดนำไปสู่การก่อตัวของเจลซิลิสิก, เจลอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และอะลูมิเนียมซิลิเกต ดังนั้นจำนวนของการชะจึงขึ้นอยู่กับความ

เข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาสำหรับการชะ ดังนั้นระยะเวลาการชะที่ 5-10 นาทีนั้นเพียงพอสำหรับการชะ ส่วนช่วง 20 ถึง 30 นาที นั้นไม่มีความสำคัญในการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนของซิลิเกต และอะลูมินา ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ 10 โมล นั้นเพียงพอต่อการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์สูงกว่าของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5 และ 15 โมล

สำหรับอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นเช่นเดียวกัน และค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ แต่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง ที่ระยะเวลาการชะที่ 10 นาที ก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจสำหรับการทำจีโอโพลิเมอร์ ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลไม่มากนัก จีโอโพลิเมอร์ และความสัมพันธ์ที่ให้กำลังอัดสูง 60 -70 เมกกะปาสคาล ได้จากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 และ 15 โมล และอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.0

อีกด้านหนึ่งของกระบวนการแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์ สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานิกทำปฏิกิริยาและถูกกระตุ้นด้วย Alkali activator เป็นการผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากข้อสรุปข้างต้นที่ว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมล นั้นเพียงพอต่อการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์สูงกว่าของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5 และ 15 โมล ดังนั้นการทดสอบการชะซิลิกาและอะลูมินาของดินเหนียว และเถ้าลอย ถูกผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมล โดยใช้วิธีการทดสอบด้วย XRF เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 การชะซิลิกาและอะลูมินาของดินเหนียวและเถ้าลอย (Sukmak et al., 2013)

Material	Leaching time (min)	Chemical composition (%)		
		NaO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃
FA	10	84.67	13.14	2.19
	15	80.60	16.63	2.77
	30	83.37	14.97	1.66
	60	82.90	15.39	1.71
Clay	10	96.17	3.77	0.06
	15	95.06	4.89	0.05
	30	96.98	3.00	0.02
	60	96.40	3.53	0.07

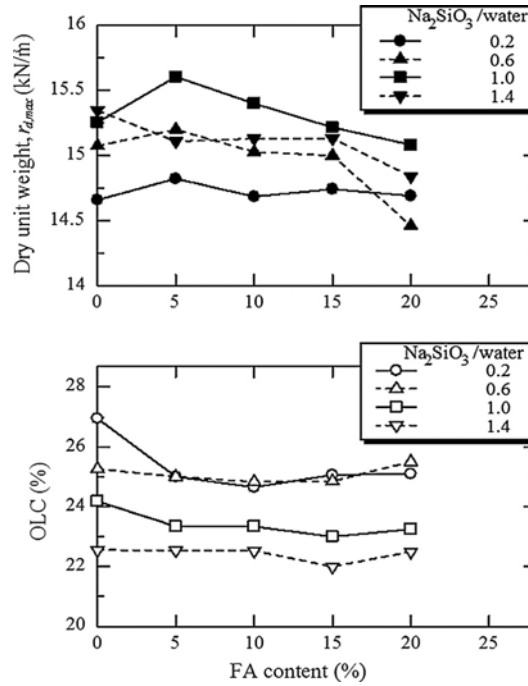
พบว่าค่าซิลิกา และอะลูมินาถูกชะออกสูงสุดที่ 15 นาที ผลจากการชะซิลิเกต และอะลูมินา ในดินเหนียวและเถ้าลอย ดินเหนียวมีพฤติกรรมการชะซิลิเกต และอะลูมินาที่อยู่ภายในอนุภาคน้อยกว่าเถ้าลอย เพราะซิลิกาและอะลูมินาในเถ้าลอยส่วนใหญ่มีรูปร่างแบบอสัณฐาน หลังจากการชะที่เพียงพอของจำนวนไอออน การก่อตัวของเจลจะเริ่มต้นขึ้น เจลซิลิสิก และเจลอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ การก่อตัวของอะลูมิโนซิลิเกตถูกก่อตัวขึ้น ผลทำให้สารละลายหนาขึ้น และของอนุภาคไอออนเคลื่อนตัวได้ช้ากว่า

b) Calcium carbide residue (CCR)

การปรับปรุงดินด้วยวิธีการผสมต่างๆส่งผลต่อกำลังอัดที่มีต่อจีโอโพลิเมอร์ ด้วย Calcium carbide residue (CCR) เป็นของเสียและผลพลอยได้จากแก๊สอะเซทิลีน ถูกใช้สร้างเสถียรภาพของดินเหนียวทรายแข็ง เนื่องจากมีจำนวนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 มีกำลังอัด ความคงทนสูง สามารถใช้ประโยชน์เป็นสารกระตุ้นอัลคาไลเช่นเดียวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยวิธีการนำดินเหนียวผสมกับ (CCR) และเถ้าลอยให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที และผสมสารกระตุ้นโซเดียมซิลิเกต และน้ำ ผสมเข้าด้วยกันอีก 5 นาที โดยบ่มที่อุณหภูมิ 40°C และอุณหภูมิห้องที่ ($27\text{-}30^\circ\text{C}$) โดยอุณหภูมิ 40°C ได้จากการจำลองค่าเฉลี่ยของ pavement subgrades ในประเทศกับภูมิอากาศเขตร้อน ซึ่งรวมไปถึงประเทศไทยด้วย ทำการทดสอบ liquid limit (LL) และ plastic limit (PL) ของดินเหนียว-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ หลังจากการผสมทั่วถึงแล้วภายใน 15 นาที หลังจากการผสมเพื่อหลีกเลี่ยงการแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์ และทำการบดอัดด้วยวิธี modified Proctor energy ผลการทดสอบ Compression (UC) ภายใต้สภาวะ unsoak และ soak

ผลการทดสอบพบว่าค่า PL ของดินเหนียว-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์นั้นไม่มีความสำคัญกับอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำ แต่ค่า LL นั้นมีความสำคัญในการควบคุมคุณลักษณะการบดอัดทำให้การบวมตัวของดินเหนียวต่ำลง เพราะเมื่อใส่โซเดียมซิลิเกต liquid limit ของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์จะลดลง ค่า optimum liquid content (OLC) ของดินเหนียวผสมกับเถ้าลอยลดลงกับการเพิ่มขึ้นอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำ การลดลงของ OLC มีส่วนให้ค่า maximum dry unit weight (γ_{dmax}) เพิ่มขึ้น การใส่เถ้าลอยเล็กน้อยทำให้พฤติกรรมของ LL ดีขึ้น LL กำหนดค่า water content ในขณะที่ดินเริ่มมีพฤติกรรมเป็นวัสดุเหลวไปสู่พฤติกรรมพลาสติก

ดังนั้นค่า OLC และ γ_{dmax} จึงเป็นปัจจัยหลักเหมือนกับการเพิ่มขึ้นของอัตราการแทนที่ของเถ้าลอย ค่า γ_{dmax} เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำ จนถึงค่า optimum ดังแสดงในรูปที่ 2-5 สำหรับตัวอย่างในสภาวะ soak ตัวอย่างถูกจุ่มน้ำเวลา 2 ชั่วโมง ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงประเทศไทย DH-S 204/2533 (DH-S, 1990) ค่ากำลังอัดของสภาวะ soak ต่ำกว่าค่ากำลังอัดของสภาวะ unsoak สำหรับทุกส่วนผสม และสภาวะการบ่ม ค่ากำลังอัดสูงสุดสำหรับ 7 วันของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่สภาวะ soak พบที่ 2154 กิโลปาสคาล อุณหภูมิการบ่ม 40°C นั้นให้กำลังสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องทั้งสภาวะ unsoak และ soak



รูปที่ 2-5 γ_{dmax} และ OLC ของดินเหนียว-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ ที่ความแตกต่างของอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอย (Phetchuay et al., 2014)

2.3.3 Aggregate

Aggregate คือวัสดุที่นำมาใช้เป็นมวลรวมสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ หรือบางครั้งถูกเรียกว่า มวลรวมละเอียด (fine aggregate) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกา และอะลูมินา เป็นแหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกตโดยธรรมชาติเช่นเดียวกับวัสดุที่เป็นสารตั้งต้น เช่น ดินเหนียว, ดินตะกอนประปา และดินลูกรัง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติขององค์ประกอบหลักและโครงสร้างขององค์ประกอบนั้นๆว่าจะมีความสามารถไวต่อการทำปฏิกิริยาของกระบวนการจีโอโพลิเมอไรเซชันได้มากน้อยแค่ไหนเพียงใด เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบอสันฐานหรือกิ่งผลึกดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่เป็นสารตั้งต้นซึ่งมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันได้มากกว่า เพื่อเข้ามาช่วยเติมเต็มและปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ Aggregate ให้ดีขึ้นหรือใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติดินนั้นๆ วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็น Aggregate ได้แก่ ดินเหนียว และดินลูกรัง เนื่องจากเป็นวัสดุด้วยคุณสมบัติในทางด้านวิศวกรรม aggregate ที่ถูกใช้มีดังนี้

a) ดินเหนียว

ดินเหนียวเป็นพื้นฐานที่ใช้ทำอิฐบล็อก ส่วนใหญ่นำมาจากเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ตามสถานที่ก่อสร้าง วัสดุสำหรับการก่อสร้างอิฐบล็อกเหล่านี้เป็นส่วนผสมของซีเมนต์และดินเหนียว ดังนั้นอิฐบล็อกเหล่านี้จึงไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ (การพังทลาย, การบวมตัวกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่อยู่ภายใน) และดินเหนียวปนทรายแฉ่งเป็นวัสดุที่ไม่เป็นที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้ดินเหนียวปนทรายแฉ่งนี้จึงถูกนำมาใช้เป็น Aggregate สำหรับการผลิตดินเหนียว-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ แร่หลักๆของดินเหนียว

ทรายแป้งคือ Quartz ซึ่งประกอบไปด้วยอะลูมิโนซิลิเกตทั้งชั้นภายในองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกอน และ อะลูมิเนียม เป็นก่อดัวในรูปของผลึก และภายนอกของพื้นผิวเป็นลบ โดยแสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์ที่สูงของ cation exchange capacity (CEC) เท่ากับ 31.5 meq ต่อ 100 กรัม ด้วยพื้นผิวที่เป็นลบจับตัวเป็น ไอออนลบจำนวนมาก และการจับกลุ่มของไอออนบวก เช่น Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , และ Mg^{2+} เกิดการแลกเปลี่ยน ไอออนขึ้น ดังนั้นการใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำการชะซิลิเกต และอะลูมิเนียมในเฟสออสซิลอนของเถ้าลอยจึง ถูกดูดซับโดยการแลกเปลี่ยนของไอออนลบระหว่างชั้นดินเหนียว โดยการแพร่กระจายไปทั้งสองชั้นของดิน เหนียว และก่อดัวเป็นไอออนิกฝังอยู่ภายในชั้นดิน เพราะเหตุนี้ดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์จึงต้องการ โซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการทำให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้น มากกว่าเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นค่า อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงต่ำกว่า และนั่นจึงเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมในการ ผลิตจีโอโพลิเมอร์จึงจำเป็นต้องทำการผสมเถ้าลอยด้วย

b) ดินตะกอนประปา

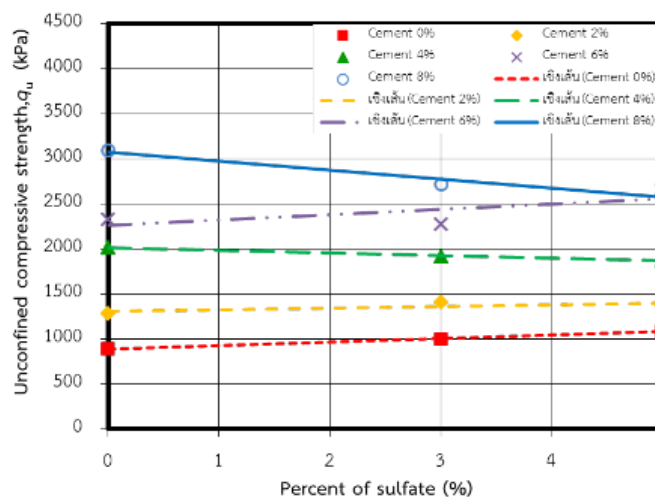
กากตะกอนที่ได้จากการผลิตน้ำประปา (Sludge Lagoons) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำประปา ดินตะกอนมีสภาพที่แห้งแล้วสามารถใช้ประโยชน์ในการถมที่ดินในรัศมีโดยรอบโรงผลิตน้ำ เนื่องจากปริมาณ การผลิตน้ำประปายังคงมีอย่างสม่ำเสมอและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ปัญหาปริมาณดินตะกอนประปาจึงมี แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระบวนการผลิต เนื่องจากลานตากตะกอนด้วยวิธีธรรมชาติของโรงผลิตมีพื้นที่ จำกัดในการรองรับ จึงนำมาสู่การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต น้ำประปามาผลิตวัสดุก่อสร้างรูปแบบบล็อกและอิฐก่อสร้างชนิดจีโอโพลิเมอร์ โดยการผสมดินตะกอนกับสาร Alkali activator และเถ้าลอย โดยให้ความร้อนในปริมาณที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบค่ากำลังสูงสุด โดยประมาณที่ 20 เมกกะปาสคาล และตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลส โดยเป็นการ เพิ่มปริมาณฟองอากาศผสมเข้ากับตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ เพื่อให้มวลของตัวอย่างดังกล่าวมี ขนาดเบาขึ้น และรับกำลังอัดได้ โดยสามารถรับกำลังอัดสูงสุดที่ 20 เมกกะปาสคาล และผลการวิเคราะห์กำลัง อัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ นำมาสู่แผนภูมิการออกแบบส่วนผสมภายใต้การเปลี่ยนแปลง ของปัจจัยอิทธิพลของหน่วยน้ำหนัก และกำลังอัด ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการประมาณปริมาณฟองอากาศ และหน่วยน้ำหนักที่ต้องการ

c) ดินลูกรัง

เนื่องจากปัญหาการนำดินลูกรังมาใช้ในการก่อสร้างคันทางของประเทศไทยมาเป็นเวลานาน จึงทำให้ เป็นการทำลายธรรมชาติ ดังนั้นปัจจุบันแหล่งดินลูกรังคุณภาพดีถูกขุดค้นทำลายเหลือแต่ดินลูกรังคุณภาพแย การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยส่วนผสมที่ต่างกันด้วยจีโอโพลิเมอร์ เพื่อศึกษาการรับกำลังแบกทานของดิน ตามวัฏจักรเปียกสลับแห้ง และพบว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยจีโอโพลิเมอร์ให้ความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างลดลง อย่างไรก็ดีตามตัวอย่างดินลูกรังที่ผสมจีโอโพลิเมอร์สามารถต้านทานกำลังที่ละจากผลกระทบของวัฏจักรเปียก สลับแห้งได้อย่างน่าพอใจ

2.4 ดินตะกอนทะเล

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ให้ความสำคัญกับการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งจากทางธรรมชาติ หรือวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงดินตะกอนทะเลมาใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมโยธา หรือแม้แต่ในด้านอุตสาหกรรมเองก็ตามมากขึ้น มีการศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมปฐพีถึงผลกระทบของปริมาณอินทรีย์วัตถุที่อยู่ในมวลดิน พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ปะปนในมวลดินสูงเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่ากำลังเฉือนของดินลดลง แต่ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่ลดลงส่งผลให้ขีดจำกัดแอดเตอร์เบิกของดินลดลง การนำดินตะกอนทะเลและดินทรายมาปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อให้เกิดทางเลือกใหม่ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทาง โดยออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย พบว่าตัวอย่างทรายผสมดินตะกอนทะเลในอัตราส่วน 100:0, 95:5, 90:10 และ 85:15 ทุกอัตราส่วนสามารถนำไปใช้เพิ่มความเชื่อมแน่น และความแข็งแรงในชั้นรองพื้นทางได้ และยังสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนในชั้นวัสดุค้ำเลือก “ก” และ “ข” ชั้นดินถมคันทางและทรายถมคันทางได้ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลกระทบของแมกนีเซียมต่อการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลด้วยซีเมนต์ต่อกำลังอัดรับแรงอัดแกนเดียว พบว่าปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลที่ผสมซีเมนต์ลดลง แต่มีอัตราการลดลงในแนวโน้มที่ลดลงเมื่อมีส่วนผสมของซีเมนต์เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2-6



(ข) ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

รูปที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์และความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟต (อดิศร และคณะ, 2559)

2.5 การปรับปรุงดินด้วยจีโอโพลิเมอร์

มีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาเกี่ยวกับการใช้ geopolymer เพื่อเป็นวัสดุทดแทนคอนกรีต แต่ยังมี การศึกษาจำนวนไม่มากในการใช้ geopolymer ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน Zhang et al. (2013) ได้ ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ geopolymer เป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงดิน โดยนำ lean clay มา ปรับปรุงโดย metakaolin-based geopolymer (MKG) ที่สัดส่วนต่างๆ และพบว่าค่า unconfined

compressive strength (UCS) ของดินที่ปรับปรุงด้วย MKG มีค่ามากกว่าดินเดิมและดินที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามพบว่าผลของการบ่มจาก 7 วันและ 28 วันมีไม่มาก เมื่อปริมาณ geopolymer เพิ่มขึ้นค่า UCS, failure strain, และ Young's modulus จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า shrinkage strain จะลดลง Yi (2014) ศึกษาการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนด้วย alkali-activated ground-granulated blast furnace slag (GGBS) เทียบกับดินที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ โดยศึกษาประสิทธิภาพของ activator หลากชนิด คือ NaOH, Na₂CO₃, carbide (CS), NaOH-CS, Na₂CO₃-CS, และ Na₂SO₄-CS ผลการศึกษาพบว่า Na₂SO₄-CS-GGBS เป็น binder ที่ดีที่สุดสำหรับดินเหนียวอ่อนที่ทดสอบ โดยให้ UCS มากกว่า 2 เท่า ของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ Sukmak et al (2013) ปรับปรุง silty clay โดยใช้ FA-based geopolymer เพื่อใช้เป็นอิฐก่อสร้าง Phetchuay et al. (2014) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ calcium carbide residue (CCR) เป็น alkaline activator และ FA เป็น precursor เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของ silty clay เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง Phummiphan et al (2015) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ FA-based geopolymer เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของ lateritic soil เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง

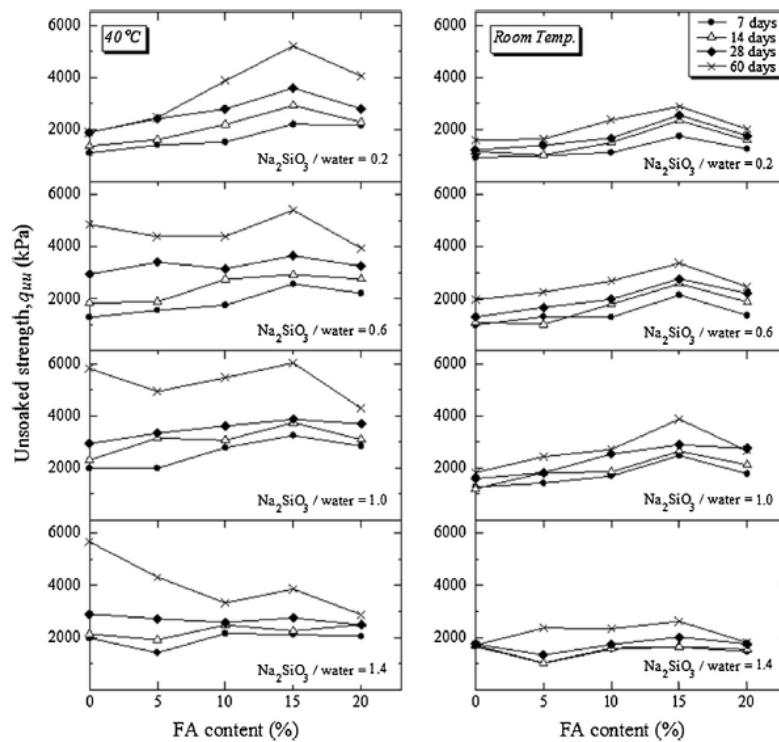
ปัจจุบันได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุหยาบ และดินเหนียวเป็นวัสดุละเอียด ในการพัฒนาดินเหนียว-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ โดยใช้ Alkali activator ผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมซิลิเกต การศึกษาการพัฒนากำลังอัดที่ถูกควบคุมอยู่ด้วยกัน 4 เฟคเตอร์ ได้แก่ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินเหนียว, อัตราส่วน Alkalie activator, สภาวะความร้อน และ molding moisture content เนื่องจาก อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินเหนียว มีความต้องการอัตราส่วนของ Alkalie activator ที่แตกต่างกัน การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน Alkalie activator ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น แต่หากมากเกินไปความต้องการต่อการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้น ในทางตรงกันข้ามก็จะทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ลดลงได้เช่นเดียวกัน สภาวะความร้อน และ molding moisture content มีความสัมพันธ์ต่อระยะเวลา หากให้ความร้อนที่นานเกินไปความต้องการทำให้เกิดรอยแตกภายในตัวอย่าง และจะส่งผลกระทบต่อกำลังอัด

2.5.1 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินเหนียว

ความแตกต่างของส่วนผสม อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.3, 0.5 และ 0.7 สำหรับส่วนผสมที่ถูกพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ในการผลิตดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดินเหนียวแต่ละชั้นประกอบด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกต ทั้งภายในและภายนอกพื้นผิวเป็นลบ ถูกแสดงด้วยความสัมพันธ์ของ CEC ที่สูงถึง 31.5 meq/100g ชั้นผิวที่เป็นลบแสดงการเกาะกลุ่มของไอออนลบ และการเอาแลกเปลี่ยนของไอออนบวก (เช่น Na, K, Ca, and Mg) การแลกเปลี่ยนไอออนทำให้จำนวนชั้นผิวดินเหนียวลดลงซึ่งก็คืออัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินเหนียวเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มของอสมฐานอะลูมิเนียมซิลิเกต และส่งผลให้สารละลายอัลคาไล (L) ลดลงจากการถูกใช้สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนบวก และเป็นการเพิ่ม degree สำหรับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้น ดังนั้นค่า optimum ของอัตราส่วน L ต่อ FA จะลดลงเมื่อเถ้าลอยเพิ่มขึ้น

ความแตกต่างของส่วนผสม ที่จำนวนเถ้าลอยจาก 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักของดินแห้งในการผลิตดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ในสภาวะตัวอย่าง unsoak และ soak ดังแสดงในรูปที่ 2-7 การใช้

CCR เป็นสารกระตุ้นอัลคาไล พบว่าการแทนที่ของเถ้าลอยเท่ากับ 5% และ 15% ค่า γ_{dmax} ของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำ ในอีกด้านหนึ่งการควบคุมความหนาแน่นของกำลังอัดในสภาวะ unsoak ค่ากำลังอัดสูงสุดพบที่การแทนที่ของเถ้าลอยที่ 15% การใส่เถ้าลอยมากกว่า 15% มีความเป็นไปได้ที่จะไม่เกิดผลเนื่องจากเถ้าลอยที่ล้อมรอบอนุภาค CCR มากเกินไปจะทำให้ขัดขวางปฏิกิริยาเคมีระหว่างเกรนของ CCR และน้ำ การแยกตัวออกที่น้อยกว่าของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไปสู่สารละลายซิลิเกต และอะลูมิเนียมเนตจากเถ้าลอย จึงทำให้ผลการเกิดจีโอโพลิเมอร์เข้มข้นน้อยกว่าอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

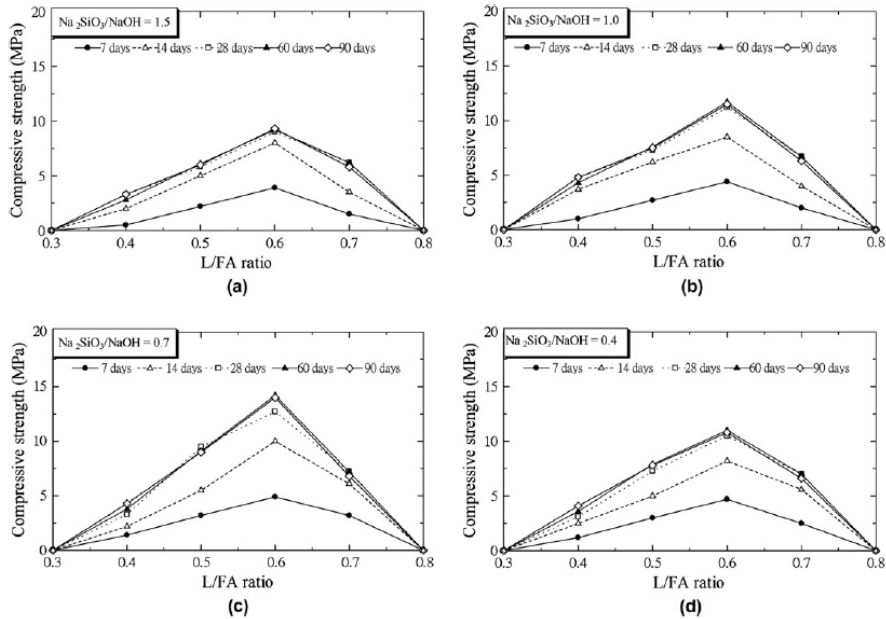


รูปที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะ unsoak ของดินเหนียว- เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์และการแทนที่ของเถ้าลอย (Phetchuay et al., 2014)

2.5.2 อัตราส่วน Alkalie activator

อิทธิพลของ Alkalie activator ผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมล อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.4, 0.7, 1.0 และ 1.5 โดยการทดสอบหาค่ากำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนของ L/FA ต่างๆ ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 2-8 ผลคืออัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.7 ถูกพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ในการผลิตดินเหนียว- เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ สำหรับทุกอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียว จากจำนวน OH^- จากสารอัลคาไลที่มากเกินไปความต้องการสำหรับกระบวนการจีโอโพลิเมอร์เข้มข้นทำให้ค่ากำลังอัดลดลง เนื่องจากการตกผลึกในช่วงแรกก่อนกระบวนการ polycondensation ในจีโอโพลิเมอร์เข้มข้น ทำให้เกิดการแตกร้าวที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคเถ้าลอย ส่วนผลของการผสมระหว่างดินเหนียว- เถ้า

ลอย และดินเหนียว- เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ ไม่มีความสำคัญต่อการปรับเปลี่ยนสารอัลคาไล เนื่องจากค่าดัชนีของคุณสมบัติมีความคล้ายคลึงกัน



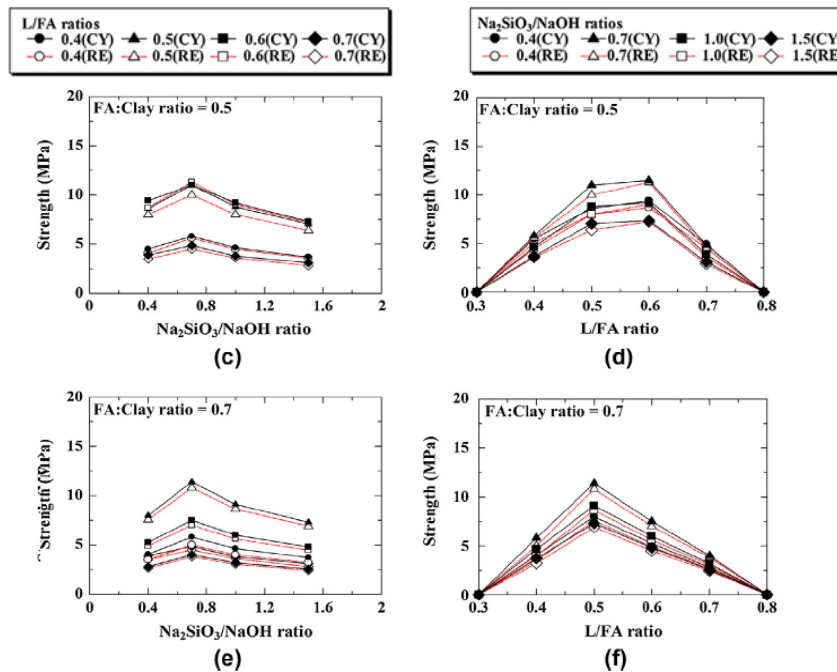
รูปที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์และอัตราส่วนของ L/FA (Sukmak el al., 2013)

a) อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำ

อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 0.2, 0.6, 1.0 และ 1.4 โดยน้ำหนักของดินแห้งโดยน้ำหนักของดินแห้ง โดยใช้ CCR กำหนดที่ 7% เป็นสารกระตุ้นอัลคาไลในการผลิตดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ในสภาวะตัวอย่าง unsoak และ soak พบว่าการพัฒนากำลังอัดของทั้งสภาวะ soak และ unsoak จะขึ้นอยู่กับจำนวน CCR และเถ้าลอย อัตราค่ากำลังอัดของสภาวะ soak ไปจนถึงกำลังอัดของสภาวะ unsoak มีความคล้ายกันเกือบจะทั้งหมดสำหรับ CCR และเถ้าลอยทุกจำนวน ค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่า optimal และลดลงเมื่ออัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเพิ่มขึ้น สำหรับดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 1.0 สำหรับทุกระยะเวลาการบ่มในสภาวะตัวอย่าง unsoak สำหรับในสภาวะตัวอย่าง soak อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 1.0 นั้นแสดงค่ากำลังอัดเท่ากับศูนย์ ค่ากำลังอัดสูงสุดของสภาวะ soak พบที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 0.6 ที่กำลังอัด 2154 กิโลปาสคาล อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำที่สูงเท่ากับ 1.4 โซเดียมซิลิเกตที่มากเกินไปจะไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาซึ่งชัดเจนบนอนุภาคของเถ้าลอย ดังนั้นตัวอย่างที่แสดงค่ากำลังอัดของสภาวะ soak สูงสุด อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 0.6 ซึ่งตัวอย่างที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 1.4 ค่ากำลังอัดเท่ากับ 0 เนื่องจากขอบเขตของการเป็นวัสดุซีเมนต์ต่ำ

b) อัตราส่วน alkali activator ต่อเถ้าลอย หรือ L/FA

อัตราส่วน alkali activator ต่อเถ้าลอย หรืออัตราส่วนของ L ต่อ FA เท่ากับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 ที่ค่า optimum ดังแสดงในรูปที่ 2-9 ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 สำหรับอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.3 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.5 สำหรับอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.7 อัตราส่วนของ L/FA ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียว อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวเพิ่มขึ้น ค่า L ที่ต้องการสำหรับปฏิกิริยาก็จะลดลง อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน L/FA จนถึงค่า optimum ค่ากำลังอัดจะลดลงพร้อมกับอัตราส่วน L/FA และการลดลงของค่ากำลังอัดในอัตราส่วน L/FA ที่สูง โดยอัตราส่วน L/FA ที่น้อยกว่า 0.3 และมากกว่า 0.8 ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดมีค่าต่ำมาก ไม่ทำให้เกิดการพัฒนาที่ค่ากำลังอัด เพราะจำนวนสารอัลคาไลไม่เพียงพอในการชะซิลิกอน และอะลูมิเนียมในโครงสร้างเฟสอสัณฐานของเถ้าลอย และการแตกตัวของผิวหน้าของอนุภาคเถ้าลอยได้เกิดขึ้นจากการที่อะลูมิเนียมซิลิเกตเจลดน้อย และอัตราส่วน L/FA ที่สูง เป็นเพราะจำนวน OH⁻ จากสารอัลคาไลที่สูงเกินความต้องการสำหรับการกระบวนการจีโอโพลิเมโรไลเซชัน



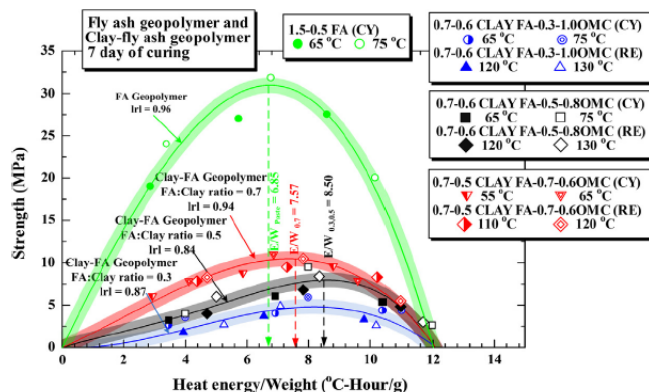
รูปที่ 2-9 ค่ากำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (Sukmak et al., 2013)

2.5.3 สภาวะความร้อน

สภาวะความร้อน (การรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิ และความคงทน) จากการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 27°-30°C ที่ 24 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 55°- 140°C ที่ 24-168 ชั่วโมง (7 วัน) น้ำหนักและขนาดของตัวอย่าง cylindrical โมลขนาด 50 x 100 มิลลิเมตร, rectangular โมลขนาด 230x90 มิลลิเมตร และโมลขนาด

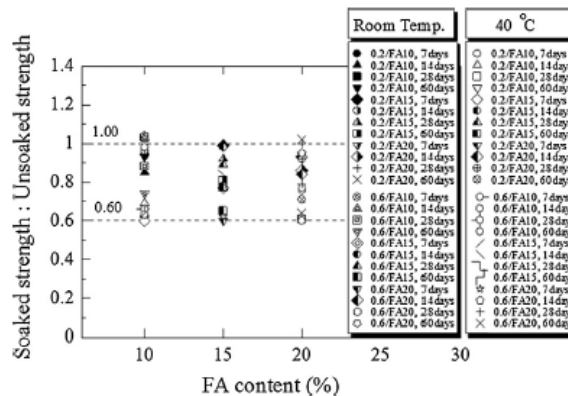
230x75 มิลลิเมตร ที่ค่า optimum (อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์, อัตราส่วนของ L ต่อ FA และ molding moisture content) โดยไม่คำนึงถึงขนาดของตัวอย่างขนาดเล็กค่ากำลังอัดสูงสุดที่อุณหภูมิความร้อนระหว่าง 65 และ 75°C ที่ 48 ชั่วโมง ขณะที่ตัวอย่างขนาดใหญ่ถูกให้ความร้อนที่ 130°C ที่เวลา 120 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2-10 สำหรับตัวอย่างที่ขนาดใหญ่กว่า น้ำหนักที่มากกว่า ต้องการอุณหภูมิความร้อนที่สูงกว่า สำหรับความคงทนระยะยาวสำหรับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์เซชัน อุณหภูมิที่ค่า optimum สำหรับอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.3 และ 0.5 และที่อุณหภูมิ 65°C เวลา 48 ชั่วโมง สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก สำหรับที่อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.7 ซึ่งอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 55 และ 65°C สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก และที่อุณหภูมิระหว่าง 110 และ 120°C สำหรับตัวอย่างขนาดใหญ่ค่ากำลังอัดของขนาดตัวอย่างทั้งคู่กับระยะเวลาการบ่มค่อยๆเพิ่มขึ้น และค่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ 60 วัน

อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงสำหรับตัวอย่างขนาดเล็กกับระยะเวลาการบ่มกับตัวอย่างที่ได้รับความร้อนสูงเกินไปเช่น 85°C และสำหรับตัวอย่างขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิ 140°C ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.3 และ 0.5 สำหรับอุณหภูมิที่สูงมากดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ได้ทนต่อการสูญเสียความชื้น การแสดงการสูญเสียความชื้นโดยหลักมาจากการเกิด crack-free ของจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นการแห้งอย่างรวดเร็วระหว่างการบ่มควรหลีกเลี่ยง ในขณะที่การบ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะดีกว่า และความสัมพัทธ์ระหว่างค่ากำลังอัดในรูปแบบที่สามารถรวบรวมบทบาทของอุณหภูมิความร้อน ความคงทน และน้ำหนักของตัวอย่าง พลังงานความร้อนต่อน้ำหนัก E/W ค่า optimum ที่กำลังสูงสุดประมาณ 8.50°C ชั่วโมงต่อกรัม สำหรับอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.3 และ 0.5 และประมาณ 7.57°C ชั่วโมงต่อกรัม สำหรับอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.7 ดังนั้นตัวอย่างอัตราส่วนของเถ้าถ่านต่อดินเหนียวที่สูงต้องการ E/W ที่ต่ำ ความสัมพันธ์นี้ถูกใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสำหรับการประมาณอุณหภูมิความร้อนและเป้าหมายของกำลังอัดที่ต้องการสำหรับน้ำหนักของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อก



รูปที่ 2-10 การพัฒนากำลังอัดกับความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนและน้ำหนักสำหรับระยะการบ่มของดินเหนียว- เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ 7 วัน (Sukmak et al., 2013)

จากการจำลองค่าเฉลี่ยของ pavement subgrades ในประเทศกัมพูชามีอากาศเขตร้อน ซึ่งรวมไปถึงประเทศไทยด้วย ของอัตราส่วนของกำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ค่าอัตราส่วนระหว่าง 0.6 และ 1.0 โดยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.8 ที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำระหว่าง 0.6 และ 0.2 สำหรับอุณหภูมิ 40°C เปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้องที่ (27-30°C) และระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง 7, 14, 28 และ 60 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2-11 พบว่าตัวอย่างที่อุณหภูมิการบ่มที่ 40°C แสดงค่ากำลังอัดสูงสุดสูงกว่าการบ่มอุณหภูมิห้องทั้งตัวอย่างในสถานะ unsoak และ soak ค่าการพัฒนา กำลังอัดหลังจาก 7 วัน ของระยะเวลาการบ่มจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 40°C นั้นไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการบ่มที่อุณหภูมิห้องค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างต่ำกว่า 28 วัน จึงไม่มีความจำเป็นสำหรับระยะเวลาการบ่มที่มากกว่า 28 วัน



รูปที่ 2-11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์และอุณหภูมิการบ่ม (Phetchuay et al., 2014)

2.5.4 Molding moisture content

ความแตกต่างของ molding moisture content การบดอัดต่อปริมาณน้ำที่ได้จากการทดสอบ compaction modified proctor ระหว่าง 0.6 ถึง 1.2 OMC molding moisture ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 1.0 OMC, 0.8 OMC และ 0.6 OMC สำหรับอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.3, 0.5 และ 0.7 การเพิ่มขึ้นของ molding moisture content เนื่องจากการลดลงในความเข้มข้นของสารอัลคาไล ค่า moisture content ที่ต่ำมาก สารอัลคาไลนั้นไม่มีความสำคัญสำหรับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน เพราะนำมาจากอนุภาคของดินเหนียวสำหรับการพัฒนาโครงสร้างดิน ดังนั้นจึงทำให้กำลังอัดต่ำจากการมีส่วนร่วมของส่วนประกอบของเคมี (จีโอโพลิเมอไรเซชัน) ลดลงกับค่า molding moisture content ที่มากเกินไปเนื่องจากการลดลงของความเข้มข้น

การทดสอบ Unconfined Compression (UC) ภายใต้สภาวะ unsoak และ soak สำหรับตัวอย่างในสภาวะ soak ตัวอย่างถูกจุ่มน้ำเวลา 2 ชั่วโมง ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงประเทศไทย DH-S 204/2533

(DH-S, 1990) ความสำคัญของค่ากำลังอัดในสภาวะ soak ต่ำกว่าค่ากำลังอัดในสภาวะ unsoak การดูดซับของน้ำ และการทดสอบ oedometer ของตัวอย่างสภาวะ soak พบว่าการดูดซับน้ำนั้นมีส่วนให้เกิดการบวมตัวมากขึ้นในแนวตั้งและแรงดันทำให้เกิดการบวมตัว แรงดันที่ทำให้เกิดการบวมตัวนำไปสู่การเกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคดินเหนียวที่เป็นซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังอัดในสภาวะ soak ต่ำกว่า เนื่องจากความสัมพันธ์ที่มีแรงผลักรสูงและขอบเขตการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่ำ ตัวอย่างในสภาวะ soak ที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำเท่ากับ 1.0 และ 1.4 แสดงค่ากำลังอัดเท่ากับศูนย์เนื่องจากขอบเขตของการเป็นวัสดุซีเมนต์ต่ำ

2.6 การวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน

ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันสามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายรูปแบบตั้งแต่การวิเคราะห์ในรูปแบบภาพ, องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างทั้งระหว่างก่อนและหลังจากเกิดปฏิกิริยาวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน การศึกษารูปร่างโครงสร้างระดับจุลภาพที่พื้นผิวและสารประกอบถูกกำหนดโดยการทดสอบ Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX หรือ EDS) การศึกษาองค์ประกอบของธาตุในเชิงปริมาณ X-ray fluorescence (XRF) Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) เป็นเครื่องมือใช้สำหรับการระบุขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุลพันธะ Si-O-Si และ Al-O โดยเฉพาะ ซึ่งใช้นิยาม degree of polysialation ดีกรี (degree) ความซับซ้อนของจีโอโพลิเมอร์ สามารถอนุมานได้โดยการสังเกตลักษณะการกระจายตัวจากการเอกซเรย์ของ diffraction pattern ในสภาวะการไม่เป็นผลึกของโครงสร้างสามารถตรวจสอบได้โดย X-ray diffraction (XRD) ศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนเพื่อใช้อธิบายอัตราการระเหยของน้ำในโครงสร้างต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างภายใต้การควบคุมความร้อน Thermogravimetric Analyser (TGA) อย่างไรก็ตามการทดสอบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันนั้นยังสามารถทำได้หลากหลายวิธีซึ่งบางวิธีสามารถให้ผลการวิเคราะห์ได้ในทิศทางเดียวกัน

2.6.1 Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX หรือ EDS)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องที่ใช้ส่องวัตถุที่มีขนาดเล็กมากโดยเพิ่มขนาดวัตถุได้ถึงสองแสนเท่า มีประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาลักษณะภายนอกของตัวอย่างให้ภาพเป็นแบบ 3 มิติ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวิทยาการแขนงต่างๆ ทั้งทางด้านงานวิจัยการวินิจฉัยโรค และในทางวิชาการต่างๆใช้ในการศึกษาการสะสมของธาตุ ซึ่งภายใน Specimen Chamber จะติดตั้งอุปกรณ์พิเศษ (EDAX) เพื่อตรวจหาธาตุในตัวอย่างโดยใช้หลักการของ X-ray แสดงผลในรูปแบบของตัวเลขและกราฟ วิเคราะห์ปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ หลักการทำงานของ SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน โดยใช้อำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าบังคับกระแสอิเล็กตรอนให้พุ่งไปรวมกันที่จุดใดจุดหนึ่ง หลังจากลำแสงอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบน

จอตระทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอจอตระทัศน์ได้เลย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างขนาดเล็กมากๆของตัวอย่างทางชีวภาพและอนินทรีย์ที่หลากหลายรวมทั้งจุลินทรีย์ เซลล์ชีวะ โมเลกุลขนาดใหญ่ ตัวอย่างขึ้นเนื้อ โลหะ และคริสตัล ด้านอุตสาหกรรมกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน มักจะใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพและการวิเคราะห์ความล้มเหลว ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2-12 ของการวิเคราะห์โครงสร้างแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์

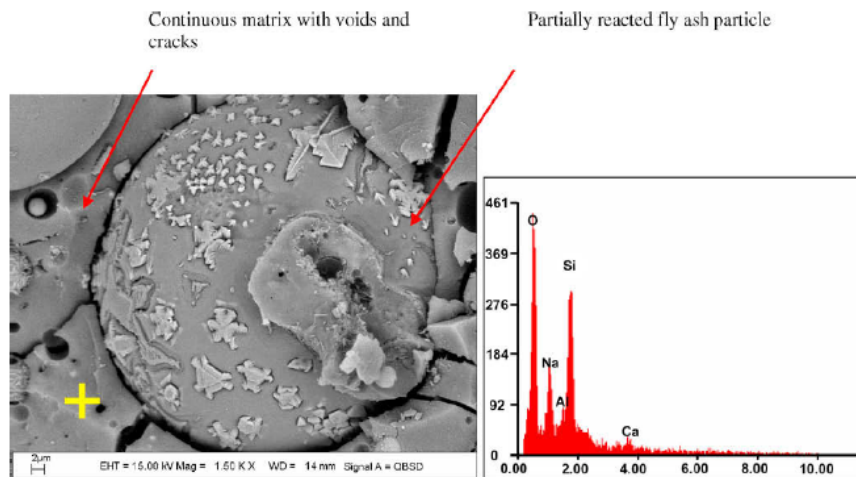


Fig. 4. SEM-EDX analysis of fly ash geopolimer.

รูปที่ 2-12 SEM/ EDX ของแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์ (Chindaprasirt el al., 2009)

2.6.2 X-ray fluorescence (XRF)

เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ชนิดของธาตุ (Qualitative) และปริมาณธาตุ (Quantitative) สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งของแข็ง, ของเหลว และสารแขวนลอยได้ ไม่ว่าจะเป็นงานด้านสิ่งแวดล้อม ด้านธรณีวิทยา เช่น การวิเคราะห์แร่ ดิน หิน ด้านชีววิทยา ด้านการแพทย์ การตรวจวัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นพิษในน้ำมันดิบ และอื่นๆ อีกมากมาย โดยไม่ทำลายตัวอย่าง มีการเตรียมตัวอย่างเพียงเล็กน้อย สามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องมีการเตรียมผิวมาก่อนก็ได้และให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ประมาณ 15 นาที โดยทั่วไปแล้วเครื่อง X-ray Spectrometer จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสี (X-ray Tube) และเครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นเมื่อ X-ray Tube เร่งอิเล็กตรอนให้มีศักย์สูงพุ่งเข้าชนกับเป้าโลหะแล้วให้รังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มสูงออกมา ทั้งนี้การเลือกชนิดของเป้าขึ้นกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งโดยทั่วไปจะ ใช้ทั้งสแตน โรเดียม โมลิบดีนัม หรือโครม ส่วนไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ Fe-55, Co-57, Cd-109 และ Am-241 เครื่องตรวจวัดแบบสถานะของแข็ง (Solid-State) เหมาะสำหรับการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็น Si(Li) และ HPGe ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว ข้อจำกัดคือ ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มี atomic number น้อยกว่า 11 ได้ (H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne and Na) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะออกมาในรูปแบบของจำนวนเปอร์เซ็นต์ธาตุแต่ละชนิดของตัวอย่างที่วิเคราะห์ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางเคมีของดินเหนียวทรายแป้ง, เถ้าลอย และ CCR (Phetchuay et al., 2014)

Chemical composition (%)	Silty clay	Fly ash	CCR
CaO	26.15	30.24	70.78
SiO ₂	20.10	47.51	6.49
Al ₂ O ₃	7.55	13.14	2.55
Fe ₂ O ₃	32.89	6.66	3.25
MgO	0.47	ND	0.69
SO ₃	4.92	ND	0.66
NaO ₂	ND	0.41	ND
K ₂ O	3.17	1.63	7.93
LOI	3.44	0.42	1.35

ND = not detected.

2.6.3 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันในสาร นิยมใช้เป็นเทคนิคสำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น สารที่วิเคราะห์อาจจะมี หมู่ hydroxyl (-OH), methyl (-CH₃) หรือ carbonyl (-CO) การประยุกต์ใช้งานสามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน และวิเคราะห์หาสารที่มาปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างได้

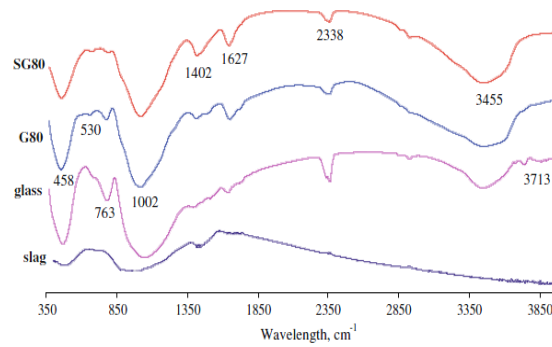
หลักการทำงานรังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) (IR) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความถี่อยู่ระหว่างช่วงของรังสีไมโครเวฟและแสงที่ตามองเห็นได้ การอ้างอิงถึงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงนี้จะใช้ค่าที่เรียกว่า เวฟนัมเบอร์ (wave number) ซึ่งมีหน่วยเป็น cm⁻¹ (reciprocal centimeter) ซึ่งหมายถึงจำนวนคลื่นต่อหน่วยเซนติเมตร ตัวอย่างเช่น รังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ 3000 cm⁻¹ หมายถึงในระยะทาง 1 เซนติเมตรที่คลื่นนี้เดินทางไปจะมีจำนวนลูกคลื่นทั้งหมด 3000 ลูกคลื่น ดังนั้นตัวเลขยิ่งมากย่อมหมายถึงพลังงานของรังสีก็ยิ่งมากด้วย ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่เป็นประโยชน์ต่อนักเคมีจะอยู่ในช่วง 4000-400 cm⁻¹ กราฟที่ได้จะเรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม ช่วงการดูดกลืนช่วงกลางของสเปกตรัม ตั้งแต่ 1300-900 cm⁻¹ ซึ่งมักเรียกกันว่าเป็นบริเวณลายนิ้วมือ (fingerprint region) จะเป็นช่วงสเปกตรัมที่ดูซับซ้อน สเปกตรัมช่วงนี้จะมีประโยชน์มากเมื่อใช้ในการยืนยันโดยการเปรียบเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิงว่าสารที่สนใจเป็นสารเดียวกันกับสารอ้างอิงหรือไม่ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2-13

ลักษณะของผลที่ได้

1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านของแสง (% Transmittance) กับเลขคลื่น (Wave numbers)
2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับเลขคลื่น (Wave numbers)

ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

1. กรณีตัวอย่างเป็นของแข็ง จำเป็นจะต้องทำให้สารตัวอย่างมีลักษณะบางมาก ๆ เพื่อให้แสงผ่านได้
2. กรณีตัวอย่างเป็นของเหลว สามารถนำมาใส่เซลล์สำหรับของเหลวได้

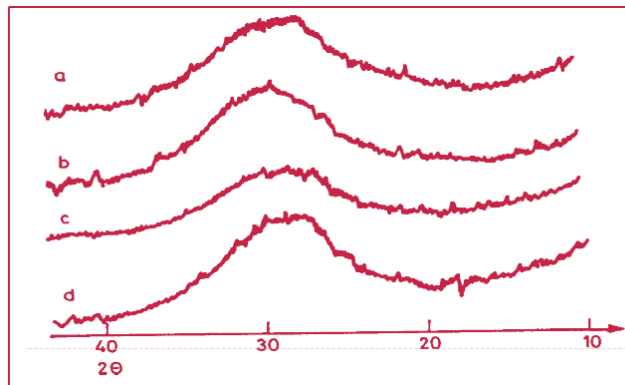


รูปที่ 2-13 FTIR spectra ของกาก, แก้ว และอนินทรีย์พอลิเมอร์ (Zaharaki et al., 2009)

2.6.4 X-ray diffraction (XRD)

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน หรือ เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสี X มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง โดยไม่ทำลายตัวอย่าง โดยการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่น (λ) ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ กันโดยมีห้วัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสี X จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้น ของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย

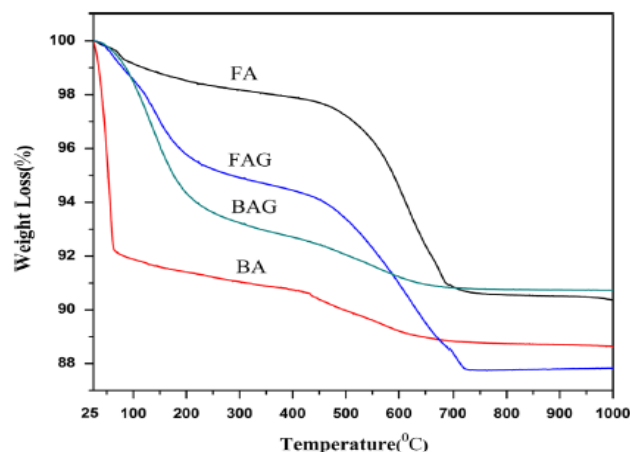
ดีกรี (degree) ความซับซ้อนของจีโอโพลิเมอร์ สามารถอนุมานได้จากลักษณะการกระจายตัวจากการเอกซเรย์ของ diffraction pattern (XRD) ในกรณีที่สภาวะไม่เป็นผลึกผลจากการเอกซเรย์ X-ray diffraction ในลักษณะการกระจายตัวกว้าง รัศมีค่อนข้างแคบกว่า diffraction ที่จุดสูงสุดในลักษณะแหลม ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 2-14 วัสดุที่หลากหลายของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับผลประโยชน์ที่ได้จากการไม่เป็นผลึก สภาวะการไม่เป็นผลึกของโครงสร้างไม่เพียงแต่สามารถตรวจสอบได้จาก X-ray diffractograms ได้เพียงอย่างเดียว แต่ยังสามารถตรวจสอบได้จาก Nuclear Magnetic Resonance (MAS-NMR) อีกด้วย



รูปที่ 2-14 X-ray diffractograms (Davidovits 1991)

2.6.5 Thermogravimetric Analyser (TGA)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพหรือทางเคมี เมื่อได้รับความร้อนโดยน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนในแต่ละช่วง ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 2-15 โดยที่มีการควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น ออกซิเจน เมื่อให้ความร้อนเครื่องจะบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องซึ่งที่มีความไวสูง และมีความละเอียดมาก วิธีนี้เหมาะสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซหรือระเหยของน้ำ การตกผลึกอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) และให้ผลการวิเคราะห์เกี่ยวกับสมบัติทางความร้อน ความเสถียรของวัสดุต่อความร้อน ความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การรีดักชัน และลักษณะกระบวนการทางความร้อนของวัสดุ โดยทำการศึกษา น้ำหนักที่หายไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความร้อนที่วัสดุดูดหรือคายเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลาเทคนิคนี้จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุต่างๆ เช่น พอลิเมอร์ สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เซรามิกส์ โลหะ และวัสดุทั่วไป



รูปที่ 2-15 Thermogravimetric analysis ของถ่านหิน และจีโอโพลิเมอร์ (Haq et al., 2013)

2.7 มาตรฐานวัสดุงานทาง

การออกแบบชนิดของถนนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะการใช้งาน, ปริมาณการจราจร, น้ำหนักบรรทุก, อายุการใช้งาน, และกำลังแบกทานของดินคันทาง โดยนิยมออกแบบผิวจราจร 2 ประเภท คือ (i) ผิวทางจราจรแบบหยุ่นตัว (flexible pavement) เช่น ถนน asphalt concrete (รูปที่ 2-16) และ (ii) ผิวทางจราจรแบบแข็ง (rigid pavement) เช่น ถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก (รูปที่ 2-17) โครงสร้างถนนทั้งสองประเภทมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ คือ ชั้นพื้นทาง (base course), ชั้นรองพื้นทาง (subbase course), ชั้นวัสดุคัดเลือก (selected material), และชั้นดินถม (subgrade) วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมตามความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแต่ละชั้นดังแสดงในตารางที่ 2-3 โดยในการก่อสร้างถนนต้องทำการบดอัดดินให้มีหน่วยน้ำหนักและคุณสมบัติทางด้านกำลัง คือ ซี บี อาร์ (CBR) ตามมาตรฐานที่กำหนด นอกจากนี้ต้องพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพและดัชนีอื่นๆเพิ่มเติม เช่น ขนาดคละ (ตารางที่ 2-4), ค่าความสึกหรอของ coarse aggregate (LAA), ค่าความคงทน (soundness), ค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL), และดัชนีพลาสติก (Plasticity index, PI)

ตารางที่ 2-3 ข้อกำหนดของคุณสมบัติของวัสดุสำหรับโครงสร้างทางตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

โครงสร้างทาง	LL (%)	PI (%)	CBR (%)	การบวมตัว (%)	การบดอัด	LAA (%)	Soundness (%)
พื้นทางหินคลุก ¹	≤ 25	≤ 6	≥ 80	-	95% Modified Proctor	≤ 40	≤ 9
รองพื้นทาง ²	≤ 35	≤ 11	≥ 25	-	95% Modified Proctor	≤ 60	-
วัสดุคัดเลือก ก ³	≤ 40	≤ 20	≥ 10	≤ 3	95% Modified Proctor	-	-
วัสดุคัดเลือก ข ⁴			≥ 6		Proctor		
ดินถมคันทาง ⁵	-	-	≥ 4*	≤ 4	95% Standard Proctor	-	-

¹ ทล.ม. 201/2544 มาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุก

² ทล.ม. 205/2532 มาตรฐานชั้นรองพื้นทางวัสดุมวลรวม

³ ทล.ม. 208/2532 มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ก

⁴ ทล.ม. 209/2532 มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ข

⁵ ทล.ม. 102/2532 มาตรฐานดินถมคันทาง

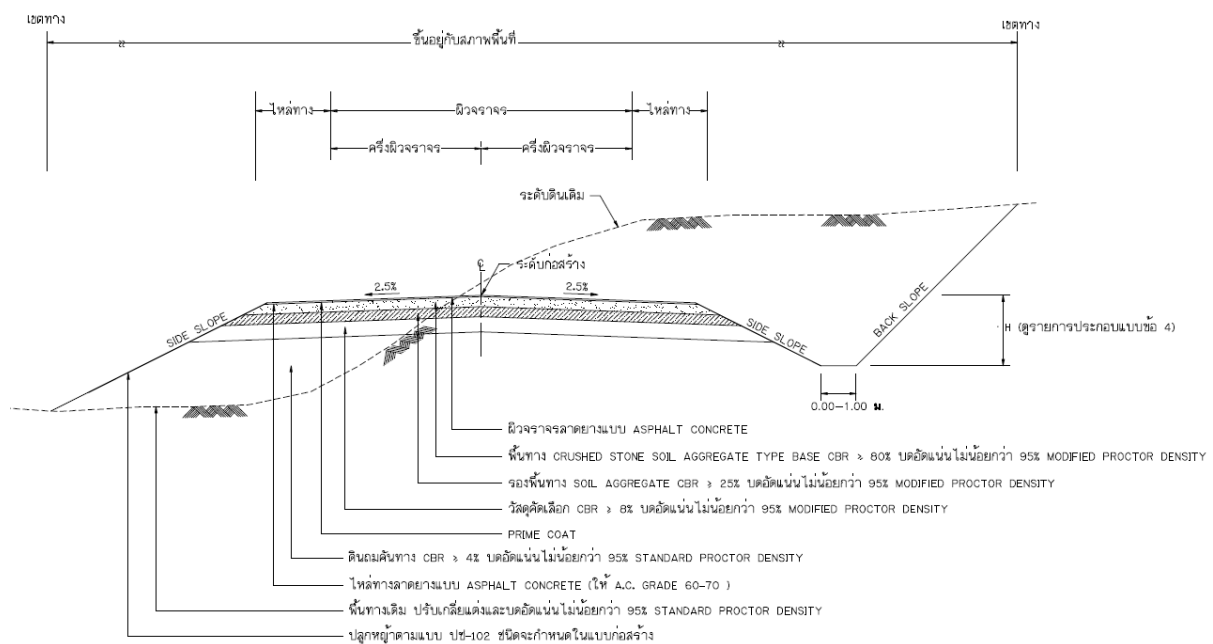
* มยผ. 2203-57 มาตรฐานวัสดุถมคัน

ตารางที่ 2-4 ข้อกำหนดของขนาดคละของชั้นพื้นทางหินคลุกและชั้นรองพื้นทางวัสดุมวลรวม

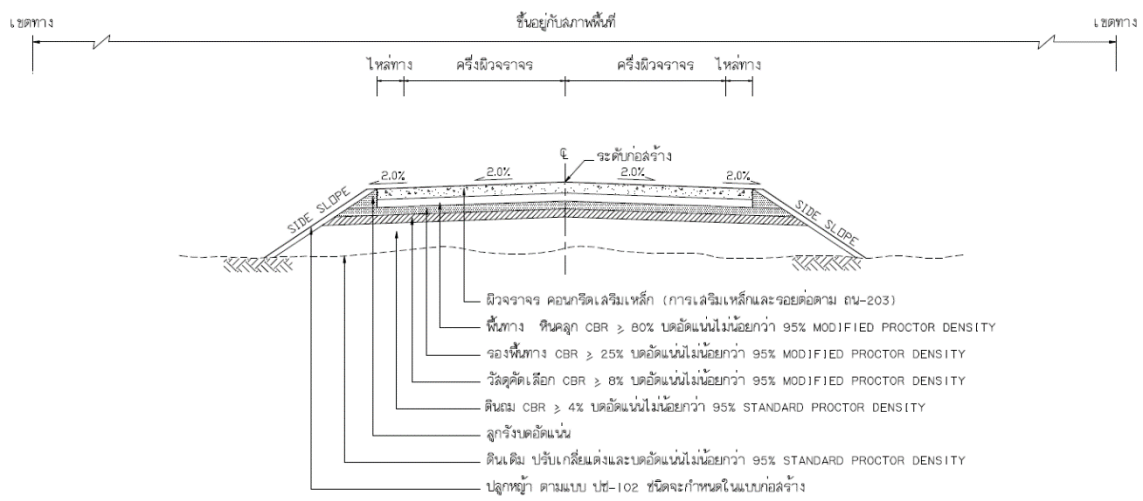
ขนาดตะแกรง (มม)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก						
	ชั้นพื้นทางหินคลุก ¹		ชั้นรองพื้นทางวัสดุมวลรวม ²				
	A	B	A	B	C	D	E
50 (2 นิ้ว)	100	100	100	100	-	-	-
25 (1 นิ้ว)	-	75-95	-	-	100	100	100
9.5 (3/8 นิ้ว)	30-65	40-75	30-65	40-75	50-85	60-100	-
4.75 (เบอร์ 4)	25-55	30-60	-	-	-	-	-
2 (เบอร์ 10)	15-40	20-45	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
0.425 (เบอร์ 40)	8-20	15-30	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
0.075 (เบอร์ 200)	2-8	5-20	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20

¹ ทล.ม. 201/2544 มาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุก

² ทล.ม. 205/2532 มาตรฐานชั้นรองพื้นทางวัสดุมวลรวม



รูปที่ 2-16 โครงสร้างถนนผิวจราจร asphalt concrete (กรมทางหลวงชนบท, 2556)



รูปที่ 2-17 โครงสร้างถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก (ชั้นพื้นทางหินคลุก) (กรมทางหลวงชนบท, 2556)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำดินตะกอนทะเล ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการขุดลอก เพื่อบำรุงรักษาความลึกของท่าเทียบเรือมาใช้เป็นวัสดุดิบหลักในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ผู้วิจัยจึงได้นำรูปแบบงานวิจัยและค่าอัตราส่วนผสมต่าง ๆ มาใช้ในการออกแบบงานวิจัย โดยมีเฟคเตอร์ที่สำคัญอยู่ด้วยกัน 4 เฟคเตอร์ คือ อัตราส่วนของ alkali activator ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, ดินต่อเถ้าลอย, ความเข้มข้นของ NaOH และระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง จากผลของกำลังอัดในงานวิจัยของ Phummiphan et al. (2015) ซึ่งผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงทั้ง Light และ Heavy traffic โดยได้ศึกษาอัตราส่วนการผสมเพื่อใช้กำหนดจำนวนสารละลายระหว่างไอออน $Al(OH)_4^-$ และ $^-OSi(OH)_3$ ซึ่งช่วยในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ และเข้าใจถึงกลไกของปฏิกิริยาในการผลิตผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามความต้องการในช่วงสุดท้ายจากการละลายของอะลูมิเนียมซิลิเกตในความเข้มข้นของสารละลาย alkali activator โดยอัตราส่วนหลักคือ $SiO_2:Al_2O_3$ ระหว่าง 4.5 – 5.8 ซึ่งสรุปในตารางที่ 3-1 ตามอัตราส่วนระหว่าง $Na_2SiO_3:NaOH$ เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20 และ 50:50 โดยทำการปรับแก้บางอัตราส่วนในสอตคล้องกับงานวิจัยโดยการยัดสารละลาย NaOH เป็นหลักเนื่องจากอัตราส่วนที่ $Na_2SiO_3:NaOH$ เท่ากับ 50:50 นั้นเป็นอัตราส่วนที่แนะนำ เพราะ NaOH มีราคาถูกกว่า Na_2SiO_3 และยิ่งค่ากำลังอัดยังคงสูงกว่าระดับ Light และ Heavy traffic ภายใต้อการทดสอบ USC แต่อัตราส่วนดินต่อเถ้าลอยผู้วิจัยจะทำการปรับแก้อีกครั้งตามความเหมาะสมขององค์ประกอบและคุณสมบัติดินและเถ้าลอยสำหรับการทำจีโอโพลิเมอร์ สำหรับอุณหภูมิการบ่มตัวอย่าง ตามงานวิจัยของ Phetchuay et al. (2014) มีการให้อุณหภูมิแก่ตัวอย่างที่ 40 องศา เพื่อจำลองอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของ pavement subgrades ในประเทศ และระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ โดยรวมพบว่าระยะเวลาหลังจาก 28 วันการพัฒนา กำลังอัดจะไม่มีผลแต่อย่างใด

ตารางที่ 3-1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของอัตราส่วน LS-FA geopolymers

Sample	$Na_2O: SiO_2$	$SiO_2:Al_2O_3$	$H_2O:Na_2O$	$Na_2O: Al_2O_3$	$SiO_2:Al_2O_3:Na_2O$
1	0.174	5.800	11.250	1.008	5.798:1:1.008
2	0.179	5.535	11.818	0.993	5.535:1:0.993
3	0.183	5.258	12.375	0.963	5.258:1:0.963
4	0.188	4.500	13.985	0.845	4.501:1:0.845

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานทางโครงสร้างและทางกายภาพของดินตะกอนทะเล และ เ ถ า ล อ ย ได้ แก่ Scanning electron microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX หรือ EDS), X-ray fluorescence (XRF), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD) และ Thermogravimetric Analyzer (TGA) เพื่อให้ได้

อัตราส่วนที่เหมาะสมสะดวกต่อการใช้งาน และมีค่า CBR เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM เพื่อพัฒนาให้วัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้เป็นวัสดุที่มีคุณค่าคุณประโยชน์เพื่อพิจารณาใช้เป็นวัสดุในงานทาง และสามารถพัฒนาต่อไปได้ในอนาคต

3.2 วัสดุการทดลอง

3.2.1 ดินตะกอนทะเล

วัสดุที่ถูกขุดลอกที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง บริเวณเฟส 3 ดังรูปที่ 3-1 โดยท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังเป็นท่าเรือหลักของประเทศไทยในการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ ตั้งอยู่ชายฝั่งตะวันออกของอ่าวไทยที่ ต.ทุ่งสุขลา อ.ศรีราชา และ อ.บางละมุง จ.ชลบุรี ประมาณ 120 กม ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของกรุงเทพฯ ท่าเรือมีพื้นที่ประมาณ 6,340 ไร่และมีความลึกของพื้นน้ำ 18 ม รถก เริ่มเปิดใช้เมื่อ พ.ศ. 2534 ปัจจุบันได้พัฒนาไป 2 เฟส และสามารถรองรับปริมาณตู้สินค้าได้ 10-11 ล้าน TEU/ปี (54% ของการส่งออกและนำเข้าของประเทศไทย) ซึ่งถือเป็นอันดับที่ 23 ของโลก และมีแผนการก่อสร้างเฟส 3 โดยตั้งเป้าหมายให้ท่าเรือแหลมฉบังติดอันดับท่าเรือที่ทันสมัย 1 ใน 10 ของโลก



รูปที่ 3-1 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดินตะกอนทะเล

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

- i. จากการทดสอบดินตะกอนทะเลตามมาตรฐาน ASTM D4318 และD472 พบว่าค่าพิกัดเหลว ค่าพิกัดพลาสติก และค่าดัชนีพลาสติกของดินตะกอนทะเลมีค่าเท่ากับ 74%, 28% และ 46% ตามลำดับ
- ii. การจำแนกประเภทของดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ค่าดินตัวอย่างจัดเป็นดินตะกอนที่มีสภาพความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) ดินมีขนาดคละกันดี (Well-

graded Soil) โดยมีค่า C_u มากกว่า 4 แต่การกระจายตัวของเม็ดดินขาดช่วง (Gap Graded) โดยมีค่า C_c ไม่อยู่ในช่วง 1-3 มีค่าความตามลำดับ ทดสอบขนาดคละของเม็ดดิน ดังแสดงในรูปที่ 3-2

- iii. ค่าความชื้นมวลดินในสนามเท่ากับ 95.2%
- iv. การบดอัดดินตามมาตรฐาน และสูงกว่ามาตรฐาน ASTM D698 และ D1557 ค่า γ_{dmax} เท่ากับ 13.83 และ 14.90 กิโลนิวตันต่อ ลบ.ม. และค่า OWC เท่ากับ 31.9 และ 22.1%

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

- i. ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.64
- ii. การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยวิธี Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX หรือ EDS) แสดงในรูปที่ 3-3(a) สังเกตได้ว่ารูปร่างของดินตะกอนทะเลจะมีขนาดไม่แน่นอน และมีลักษณะมุมแหลมผสมกับมุมโค้ง จับตัวกันจากขนาดเล็กไปเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้น
- iii. การทดสอบองค์ประกอบของธาตุในเชิงปริมาณ ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) ตารางที่ 3-2 ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของดินตะกอนทะเลประกอบด้วย SiO_2 และ Al_2O_3 ถึง 85.75% ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ต้องการในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ แต่อย่างไรก็ตามความไวต่อการทำปฏิกิริยาไม่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 แต่เพียงอย่างเดียว
- iv. การศึกษารูปแบบการไม่เป็นผลึกหรือความเป็นอสัณฐานของโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD) แสดงในรูปที่ 3-4 สังเกตได้ว่าการจัดเรียงตัวของดินตะกอนไม่มีความเป็นระเบียบในระยะยาวหรือมีปริมาณความเป็นผลึก (crystallinity) ต่ำ รูปแบบการเลี้ยวเบนไม่ชัดเจน โดยธาตุที่ให้ความสนใจได้แก่ Q, quartz (Silicon oxide) และ M, mullite (Aluminum Silicon oxide)
- v. การทดสอบขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุลโดยซึ่งใช้นิยาม degree of geopolymerization หรือดีกรี (degree) ความซับซ้อนของจีโอโพลิเมอร์ด้วยวิธี Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) แสดงช่วงความสำคัญมีลักษณะ broad ของพันธะ O-H stretching ช่วงสเปกตรัม 3600 cm^{-1} สำหรับพันธะ Si-O-Si stretching อยู่ในช่วงสเปกตรัม $1200\text{-}950\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพันธะที่แสดง degree of geopolymerization ซึ่งมักเรียกกันว่าเป็นบริเวณลายนิ้วมือ (fingerprint region) และในลักษณะ sharp ช่วงสเปกตรัม 450 cm^{-1} ใช้สำหรับอธิบายพันธะ O-Si-O bending แสดงในรูปที่ 3-5
- vi. ศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน Thermogravimetric Analyser (TGA) แสดงในรูปที่ 3-6 แสดงพฤติกรรมการสูญเสียน้ำหนัก 4% จนถึงอุณหภูมิ 110°C เนื่องจากการระเหยของน้ำ จากนั้น $110\text{-}400^\circ\text{C}$ มีการสูญเสียน้ำหนักเกิดขึ้นอย่างช้า การสูญเสียน้ำหนักอีกครั้งสังเกตได้ที่อุณหภูมิ $400\text{-}530^\circ\text{C}$ เนื่องจากการระเหยออกของทางองค์ประกอบเคมีประเภทสารอินทรีย์ โดยการสูญเสียน้ำหนัก 4% และการสูญเสียน้ำหนักเกิดขึ้นอย่างช้าๆอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไปจนถึง 800°C

3.2.2 แก้วลอย

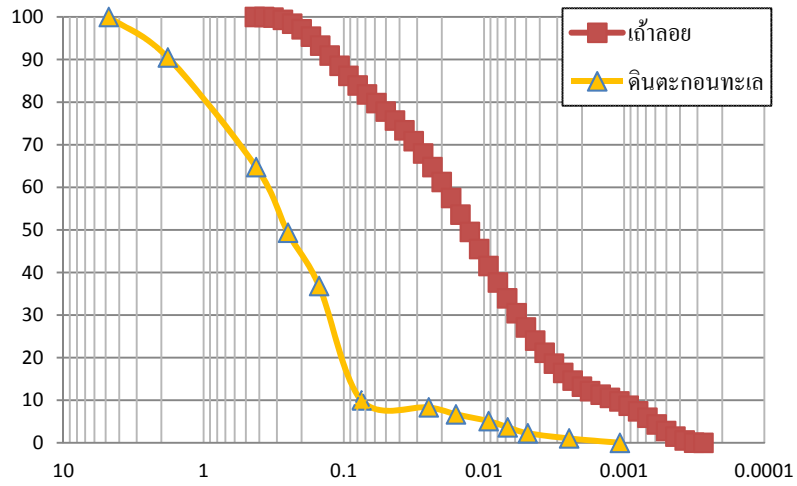
แก้วลอยจากแพลนปูน ต.ป๋อวีน อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ซึ่งนำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ชลบุรีกันยง จำกัด แก้วลอยใช้เป็นวัตถุดิบ precursor สำหรับการผลิตจีโอโพลีเมอร์ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีโดยหลักคือ ซิลิกา และอะลูมินา เมื่อสัมผัสกับสารกระตุ้นอัลคาไลจะเกิดกระบวนการเคมีของโพลีเมอร์เรซิน และก่อตัวของอะลูมิโนซิลิเกตเจล นำไปสู่การแข็งตัวของจีโอโพลีเมอร์

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

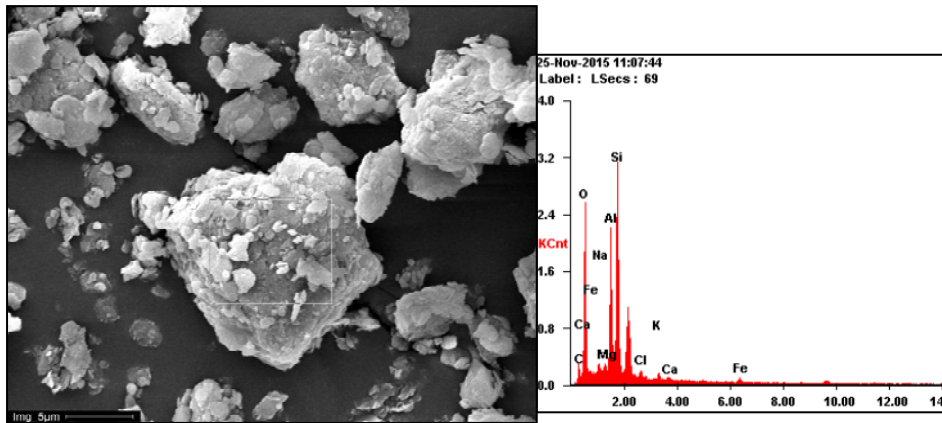
- i. ทดสอบขนาดคละของแก้วลอยด้วยวิธี Laser diffraction technique ดังแสดงในรูปที่ 3-2

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

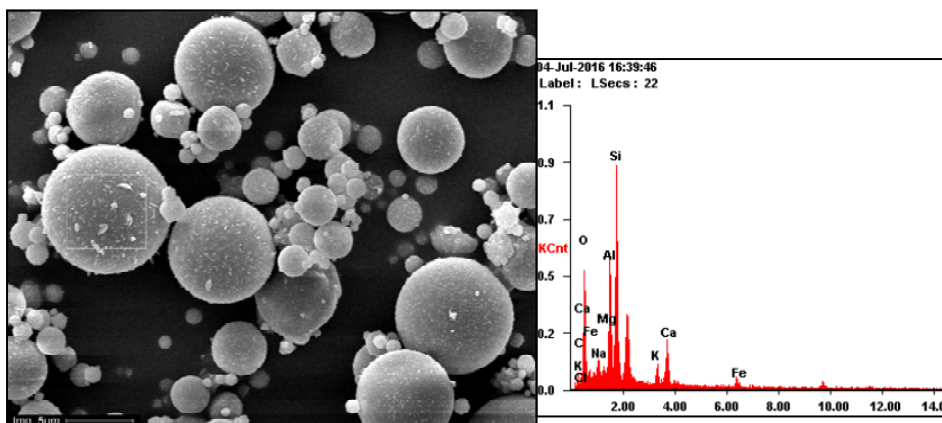
- i. มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65
- ii. การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยวิธี Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX หรือ EDS) ดังแสดงในรูปที่ 3-3(b) รูปร่างของแก้วลอยจะมีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดไม่แน่นอน ซึ่งเป็นลักษณะของแก้วลอยที่มาจากอำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง
- iii. การทดสอบองค์ประกอบของธาตุในเชิงปริมาณ ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) ดังแสดงตารางที่ 3-2 องค์ประกอบของแก้วลอยประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมเท่ากับ 61.47% ตามมาตรฐาน ASTM C168 หากมากกว่า 50% จัดเป็นแก้วลอยประเภท C
- iv. ศึกษาารูปแบบสถานะการไม่เป็นผลึกของโครงสร้างด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 3-4 การจัดเรียงตัวของแก้วลอยไม่มีความเป็นระเบียบในระยะยาวหรือมี crystallinity ต่ำ รูปแบบการเลี้ยวเบนไม่ชัดเจนเช่นเดียวกับดินตะกอนทะเล โดยธาตุที่ให้ความสนใจคือ M, mullite (Aluminium Silicon oxide)
- v. การทดสอบขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุลโดยซึ่งใช้นิยาม degree of geopolymerization หรือดีกรี (degree) ความซับซ้อนของจีโอโพลีเมอร์ด้วยวิธี Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) แสดงช่วงความสำคัญมีลักษณะ broad ของพันธะ Si-O-Si stretching อยู่ในช่วงสเปกตรัม $1200-950 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพันธะที่แสดง degree of geopolymerization ช่วงสเปกตรัม 450 cm^{-1} ใช้สำหรับอธิบายพันธะ O-Si-O bending แสดงในรูปที่ 3-5
- vi. ศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน Thermogravimetric Analyser (TGA) ดังแสดงในรูปที่ 3-6 แสดงพฤติกรรมของแก้วลอยแทบจะไม่เกิดการสูญเสียน้ำหนักเลย อาจเนื่องมาจากแก้วลอยเกิดการสูญเสียน้ำหนักจากกระบวนการเผาไหม้เกือบทั้งหมดมาก่อนหน้านี้แล้ว และมีการดูดซับความชื้นโดยรอบต่ำ ทำให้เมื่อนำมาทำการทดสอบ TGA จึงไม่เกิดการสูญเสียน้ำหนักทั้งจากการระเหยของน้ำ และองค์ประกอบของสารอินทรีย์ นั่นจึงเป็นเหตุผลให้แก้วลอยคงเหลือน้ำหนักถึงประมาณ 99% ซึ่งมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยมากหรือแทบไม่มีการสูญเสียน้ำหนักเลย



รูปที่ 3-2 ขนาดคละของเม็ดดินตะกอนทะเล และเถ้าลอย



(a) ดินตะกอนทะเล

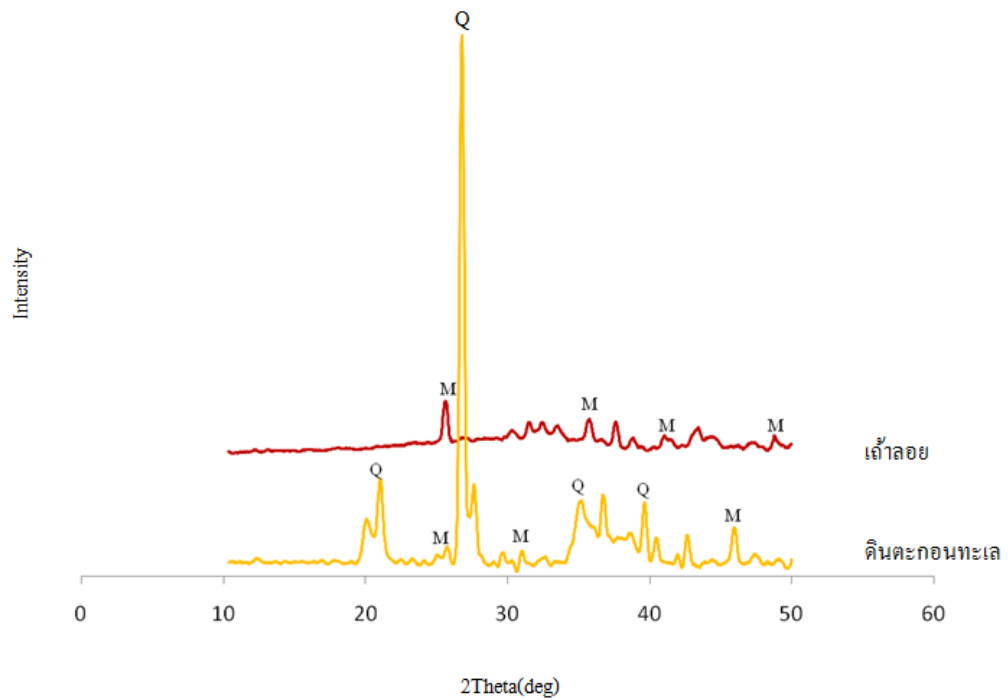


(b) เถ้าลอย

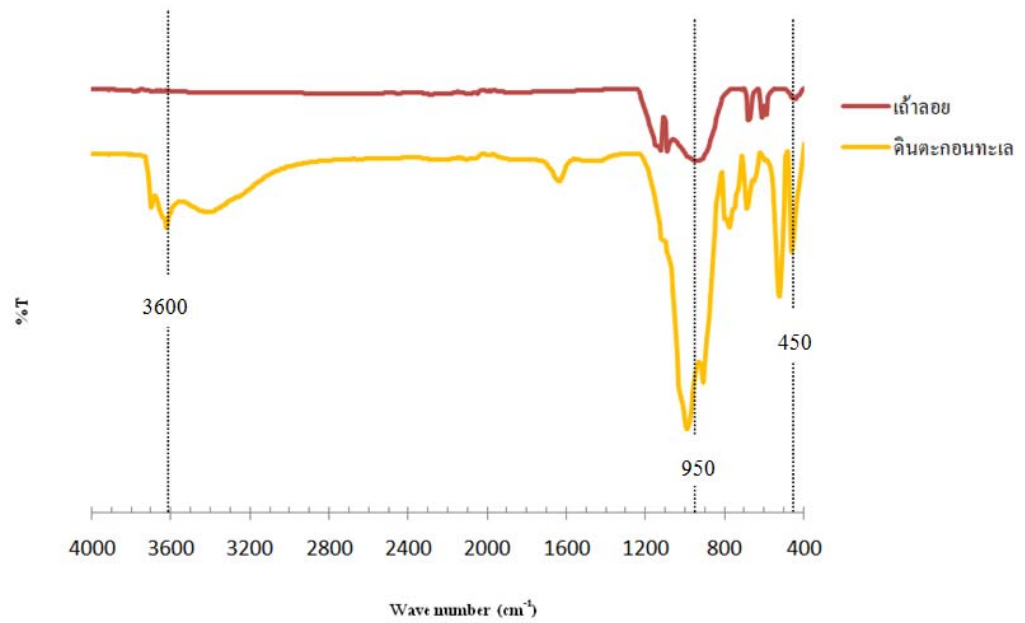
รูปที่ 3-3 โครงสร้างระดับจุลภาค SEM/ EDX

ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบธาตุ (XRF) ของดินตะกอนทะเลและเถ้าลอย

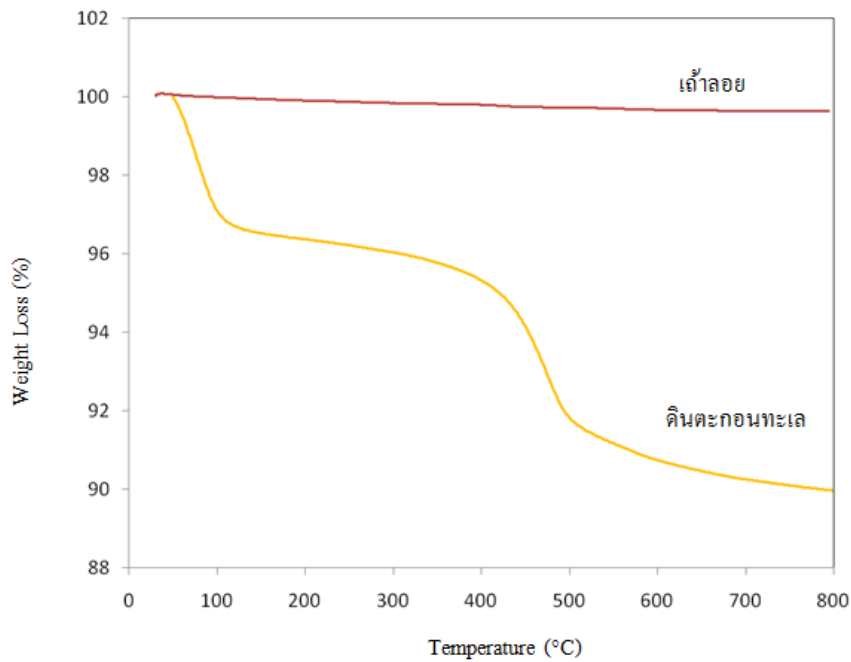
องค์ประกอบธาตุ (%)	ดินตะกอนทะเล	เถ้าลอย
SiO ₂	63.56	32.27
Al ₂ O ₃	22.19	15.43
Fe ₂ O ₃	3.67	13.77
CaO	1.02	21.95
K ₂ O	3.04	1.64
Na ₂ O	2.07	2.86
Cl	1.68	0.02
MgO	1.34	2.44
SO ₃	0.25	8.57



รูปที่ 3-4 X-ray diffraction ของดินตะกอนทะเล และเถ้าลอย Q, quartz และ M, mullite



รูปที่ 3-5 FT-IR spectra ของดินตะกอนทะเล และเถ้าลอย

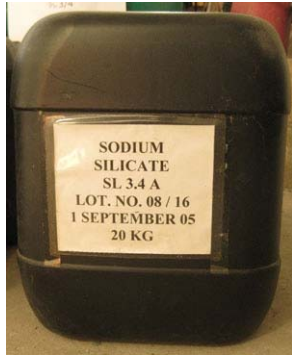


รูปที่ 3-6 Thermogravimetric ของดินตะกอนทะเล และเถ้าลอย

3.2.3 Alkali activator

Alkali activator ที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยโซเดียมซิลิเกตมีองค์ประกอบของ Na_2O 9% และ SiO_2 30% โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานสำหรับงานอุตสาหกรรม มอก. 433-2539 แสดงดังรูปที่ 3-7 และพิจารณาโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15 และ 8 โม

ลาร์ ปรับความเข้มข้นโดยการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ดปริมาณ 400 กรัม ลงในน้ำกลั่นที่ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร คนให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายโดยทั่วถึง และทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง เนื่องจากระหว่างละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะคลายความร้อนออกมาทำให้สารละลายมีอุณหภูมิสูง แสดงดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-7 โซเดียมซิลิเกต



รูปที่ 3-8 โซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ปัจจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์จากดินตะกอนทะเล - ถ้ำลอย

จากงานวิจัยของ Phummiphan et al. (2015) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จึงทำให้ผู้วิจัยโดยทำการปรับแก้อัตราส่วนในสอดคล้องกับงานวิจัย และ ได้ค่าพารามิเตอร์ของเฟลคเตอร์ที่สำคัญดังนี้

สารละลาย alkali activator ตามอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20 และ 50:50 ทำการปรับแก้โดยการยัดสารละลาย NaOH เป็นหลัก ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 นั้นเป็นอัตราส่วนที่แนะนำนั้น อัตราส่วนที่ทำการปรับแก้คือ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 60:40, 50:50 และ 40:60 เนื่องจากผู้วิจัยต้องการทราบถึงการเพิ่มปริมาณ NaOH นั้นยังสามารถให้ค่า compressive strength เกินค่าที่กำหนดตามมาตรฐานกรมทางหลวงหรือไม่ และหากปริมาณ NaOH น้อยกว่าที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 60:40 จะมีความแตกต่างกับสองอัตราส่วนที่เหลือเล็กน้อยเพียงใด

อัตราส่วนดินตะกอนทะเลต่อถ้ำลอยหรือ Soil:FA งานวิจัยของ Phetchuay et al. (2014) ได้กำหนดค่าที่อัตราส่วน 70:30 เพียงค่าเดียว ผู้วิจัยจึงทำการปรับแก้อีกครั้งตามความเหมาะสมขององค์ประกอบของธาตุ และคุณสมบัติของดินทั้งสอง เนื่องจากปริมาณองค์ประกอบของธาตุบ่งบอกถึงความเหมาะสมของวัสดุที่นำมาผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และเปรียบเทียบคุณสมบัติดินตะกอนทะเลและดินลูกรังด้วยคุณภาพว่ามีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะสามารถมาใช้เทียบเคียงค่าอัตราส่วนได้เหมาะสมยิ่งขึ้น โดยใช้อัตราส่วน Soil:FA เท่ากับ 80:20, 70:30 และ 60:40 เพื่อใช้เปรียบเทียบกับอัตราส่วน 70:30 เนื่องจากองค์ประกอบธาตุ SiO_2 และ Al_2O_3 ของดินตะกอนทะเลและดินลูกรังด้วยคุณภาพ มีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะองค์ประกอบของธาตุ SiO_2 และคุณสมบัติของดินก็มีความแตกต่างกันเช่นเดียว ส่วนถ้ำลอยทั้งสองมีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 ไม่ต่างกันมากนัก เนื่องจากเป็นถ้ำลอยประเภทเดียวกันซึ่งก็ประเภท C ผู้วิจัยจึงเพิ่มอัตราส่วนขึ้นอีกสองอัตราส่วนเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

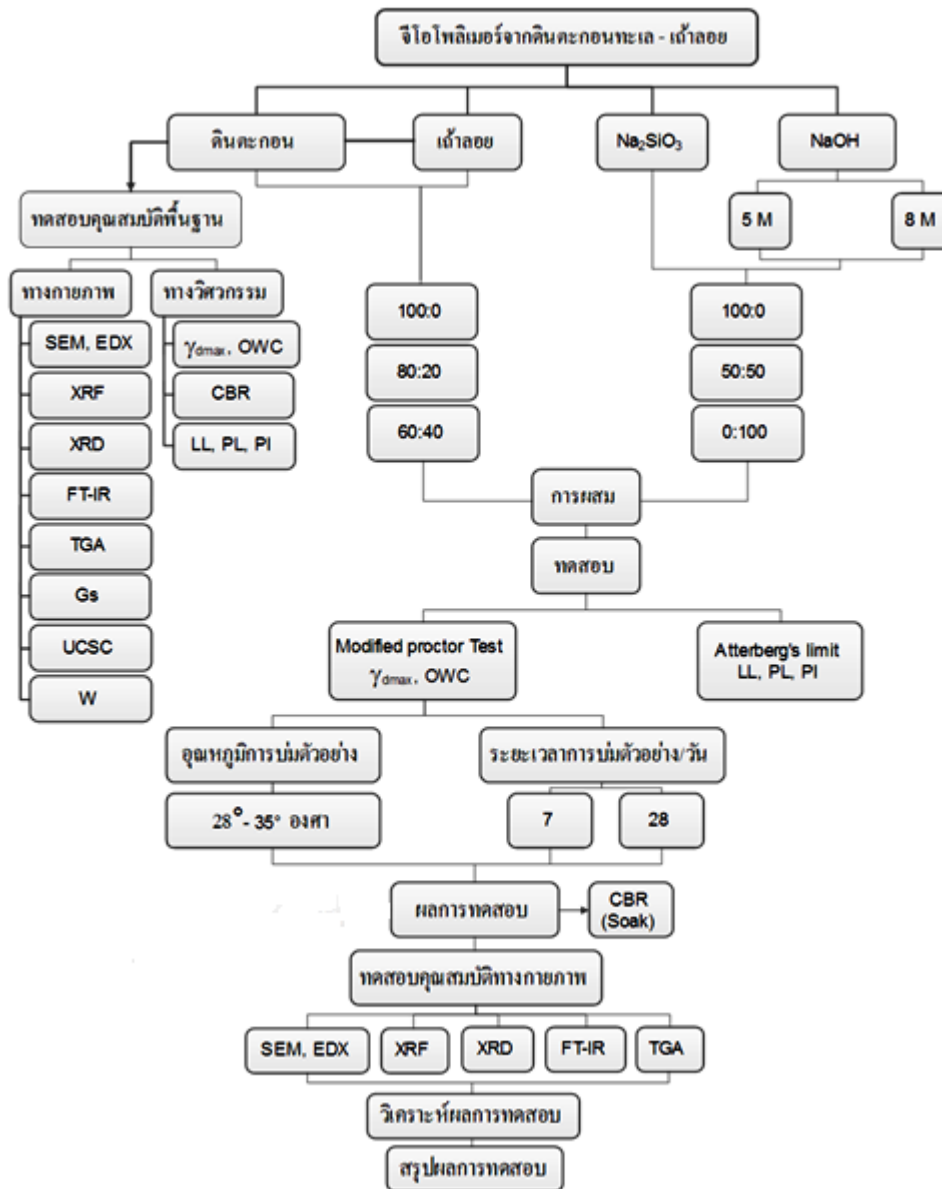
สำหรับอุณหภูมิการบ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้ใช้อุณหภูมิตามงานวิจัยของ Phetchuay et al. (2014) ซึ่งมีการให้อุณหภูมิแก่ตัวอย่างที่ 40°C เพื่อจำลองอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของ pavement subgrades ในประเทศ งานวิจัยของ Phetchuay et al. (2014) ได้ศึกษาระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7, 14, 28 และ 60 วัน พบว่าระยะเวลาหลังจาก 28 วันการพัฒนากำลังอัดจะไม่มีมีความสำคัญแต่อย่างใด ผู้วิจัยจึงได้เลือกระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7, 14 และ 28 วัน และได้สรุปค่าอัตราส่วนของเฟคเตอร์ที่สำคัญทั้ง 4 เฟคเตอร์ไว้ในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 อัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบ

อิทธิพลต่อกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์	อัตราส่วน
ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH	3, 5 และ 7
Na ₂ SiO ₃ : NaOH	100:0 50:50 0:100
Soil : FA	80:20 70:30 60:40
อุณหภูมิการบ่มตัวอย่าง	35-40°C
ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง	7, 14 และ 28 วัน

3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษารูปแบบงานวิจัยของ Phummiphan et al. (2015) ซึ่งมีลักษณะของรูปแบบที่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยของผู้วิจัย และมีผลการทดสอบที่สอดคล้องตามมาตรฐานกรมทางหลวง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ปรับแก้รูปแบบขั้นตอนการทดสอบของงานวิจัย Phummiphan et al. (2015) ให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของผู้วิจัยยิ่งขึ้น โดยการเพิ่มการทดสอบทางด้านกายภาพหรือทางด้านเคมี เพื่อเป็นการศึกษาคุณสมบัติของดินตะกอนทะเลสำหรับเป็นวัสดุ aggregate ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ และเพื่อเป็นประโยชน์ต่อไปกับงานวิจัยในอนาคต ดังแสดงในรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 วิธีการดำเนินการวิจัย

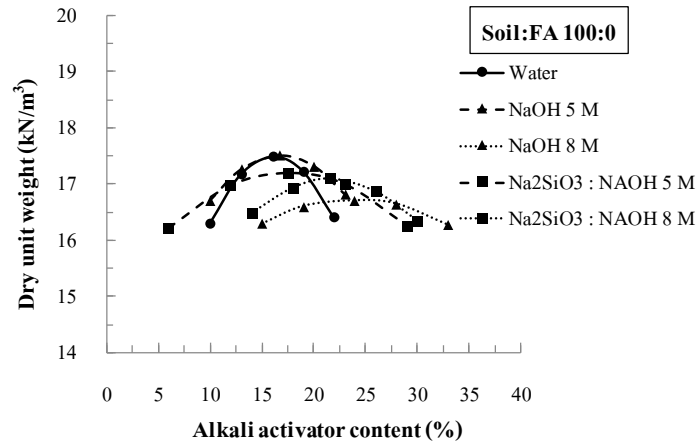
บทที่ 4 ผลการทดสอบการบดอัด

4.1 บทนำ

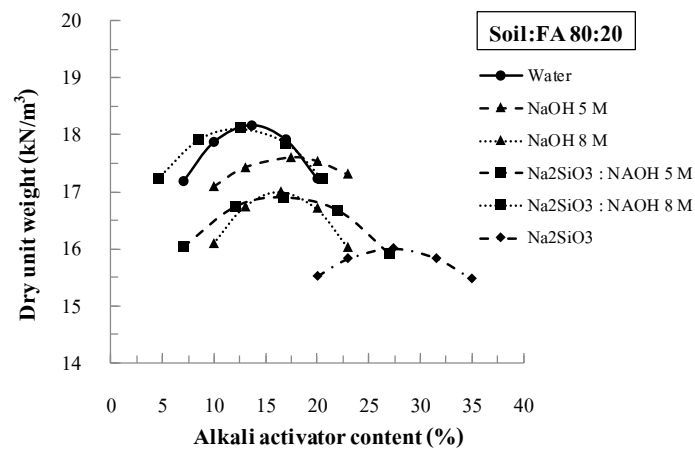
การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำดินตะกอนทะเลมาปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุสำหรับจีโอโพลิเมอร์ เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวงซึ่งได้กำหนดให้ค่า California bearing ratio อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดภายใต้การบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน Modified proctor energy ดังนั้นเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง งานวิจัยนี้จึงได้เริ่มจากการทดสอบ Modified compaction จากนั้นค่า Optimum alkali activator content (OAC) จะถูกนำมาใช้ในการเตรียมตัวอย่าง CBR ที่ปริมาณ OAC เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ต้องการ

4.2 ผลทดสอบการบดอัดของอัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์

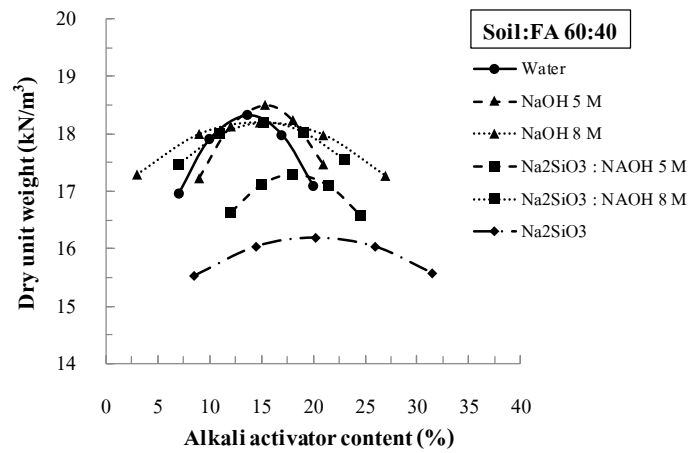
การทดสอบ Modified compaction ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ดินตะกอนทะเล-เถ้าลอยแคลเซียมสูงแต่ละอัตราส่วนโดยเทียบระหว่างดินตะกอนทะเล และดินตะกอนทะเลผสมเถ้าลอยที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ตามอัตราส่วน Soil:FA เท่ากับ 100:0, 80:20 และ 60:40 ตามลำดับ สำหรับดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์แต่ละอัตราส่วนจะผสมสารละลาย Alkali activator ตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 0:100, 50:50 และ 100:0 Compaction curve ของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ได้ถูกแสดงในรูปที่ 4-1 (ก-ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) กับ OAC ของอัตราส่วนที่ผสมสาร Alkali activator และน้ำเปล่า พบว่าเมื่อเพิ่มเถ้าลอยมีผลให้ค่า OAC มีแนวโน้มลดลงเป็นผลให้ $\gamma_{d,max}$ ที่ได้จากการบดอัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นความแตกต่างของความสัมพันธ์ระหว่างการบดอัด $\gamma_{d,max}$ และ OAC จึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วน Soil:FA การเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยจะมีผลให้ค่า $\gamma_{d,max}$ มีแนวโน้มสูงกว่าการใช้ดินตะกอนทะเลอย่างเดียวเพียงเล็กน้อย อาจเพราะการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดกลมจะเข้าแทรกแซงการจัดเรียงอนุภาคของเม็ดดินที่มีลักษณะเป็นมุมแหลม ช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดิน นอกจากนี้การที่เถ้าลอยไม่เป็นพลาสติกมีส่วนในการส่งเสริมการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินระหว่างการบดอัด ส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น (Sukmak et al., 2013 และ Horpibulsuk et al., 2015)



(ก) Soil:FA 100:0

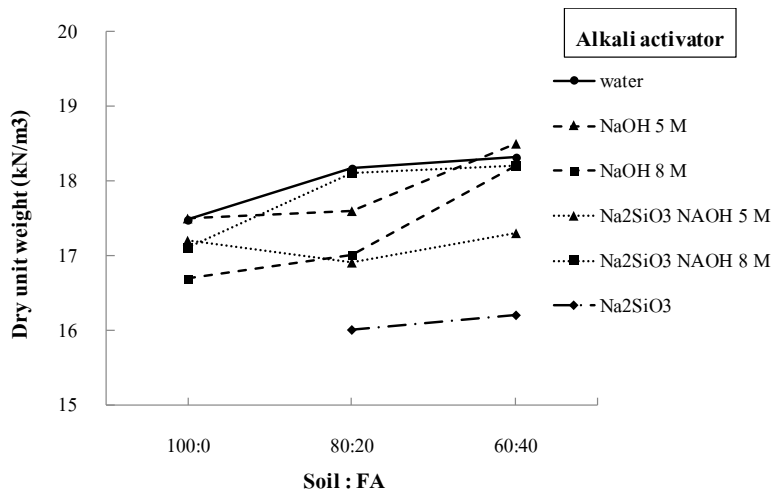


(ข) Soil:FA 80:20

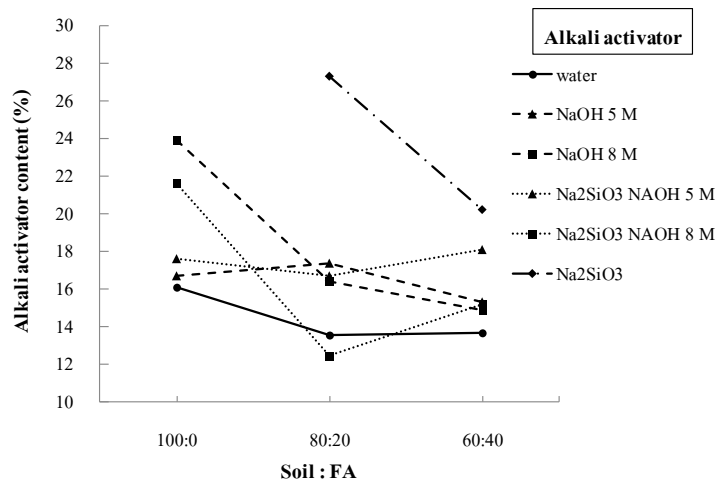


(ค) Soil:FA 60:40

รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\gamma_{d,max}$ กับ Alkali activator content ที่อัตราส่วนต่างๆ



(ก) $\gamma_{d,max}$



(ข) OAC

รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\gamma_{d,max}$ และ OAC ที่อัตราส่วน Soil: FA 100:0, 80:20 และ 60:40

รูปที่ 4-2 (ก-ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\gamma_{d,max}$ และ OAC ต่ออัตราส่วน Soil:FA การผสมสารละลาย Alkali activator มีผลให้ค่า $\gamma_{d,max}$ มีแนวโน้มต่ำลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วน Na₂SiO₃:NaOH 100:0 ผลจากการผสมสารละลาย Na₂SiO₃ กับดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียว (Soil:FA 100:0) ไม่สามารถหาค่า $\gamma_{d,max}$ ได้ เนื่องจากลักษณะของสารละลาย Na₂SiO₃ เมื่อผสมกับดินตะกอนทะเลจะไม่ค่อยจับตัวกัน มีลักษณะแห้งและแข็งตัวทันทีที่สัมผัสกัน และด้วยสาร Na₂SiO₃ มีความหนืดมากกว่า NaOH และน้ำ แม้ว่าจะใช้ Na₂SiO₃ ในปริมาณที่มากเท่าไรก็ตามยังคงทำให้การผสมให้เข้ากันได้นั้นเป็นเรื่องยาก จึงทำให้ไม่สามารถทำการบดอัดเพื่อหาค่า OAC ได้ การเพิ่มเถ้าลอยเป็นการเพิ่มความสามารถในการบดอัดและมีผลให้ค่า OAC ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย นั้นจึงเป็นเหตุค่า $\gamma_{d,max}$ ที่ได้ต่ำกว่าอัตราส่วนอื่น สำหรับอัตราส่วนที่เพิ่ม

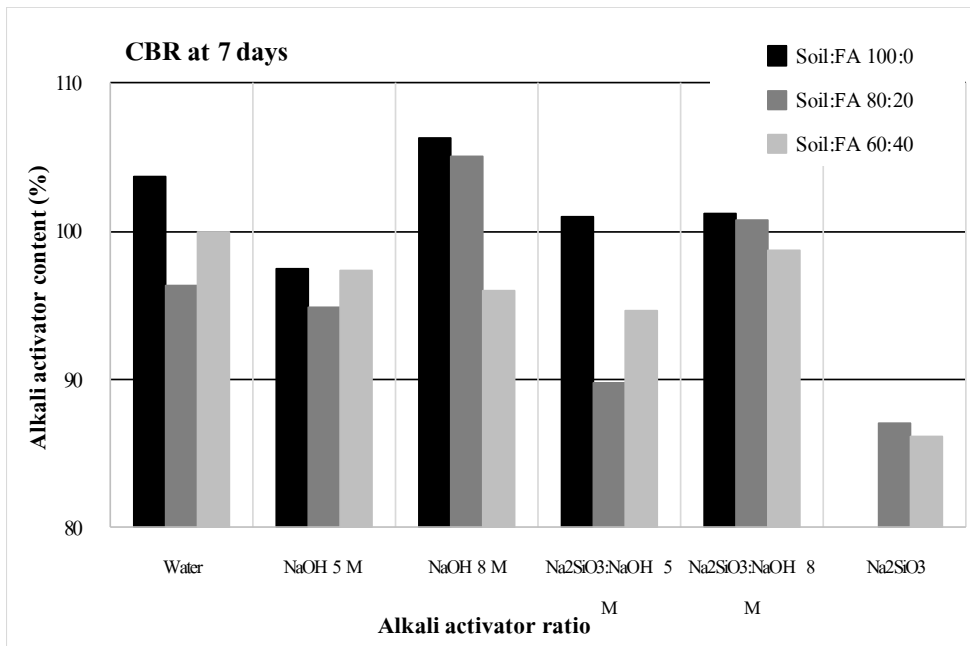
สารละลาย NaOH โดยรวมแล้วจะให้ค่า $\gamma_{d,max}$ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแก่ตัวอย่าง โดยค่า $\gamma_{d,max}$ สูงสุดคือ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 0:100 ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ เนื่องจากสารละลายดังกล่าวมีผลต่อเถ้าลอยมากกว่าดินตะกอนทะเล สามารถทำการชะซีลิกาและอะลูมินากับเถ้าลอยได้มากกว่าดินตะกอนทะเล แม้ว่าดินตะกอนทะเลจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบธาตุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ แต่สารละลาย Alkali activator นั้นไม่สามารถชะองค์ประกอบเหล่านั้นได้เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นความเป็นอสัณฐานต่ำ สำหรับดินตะกอนทะเลแล้วสารละลาย Alkali activator จึงมีหน้าที่เพียงเพื่อการแลกเปลี่ยนประจุไอออนลบระหว่างอนุภาคผิวดินเท่านั้น (Sukmak et al., 2013) ดังนั้นนอกจากการเพิ่มเถ้าลอยจะทำให้ค่า $\gamma_{d,max}$ สูงขึ้นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น การเพิ่มเถ้าลอยยังเป็นการลดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างดินตะกอนทะเลและสารละลาย Alkali activator เป็นการลดความต้องการสารละลาย Alkali activator ทำให้ดินตะกอนทะเลผสมเถ้าลอยมีค่า OAC ลดลง

การเพิ่มขึ้นของค่า $\gamma_{d,max}$ ที่อัตราส่วน Soil:FA 60:40 นั้นเหมาะสมกับการใช้สารละลาย Alkali activator ประเภทสารละลาย NaOH ซึ่งให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดแก่ตัวอย่างสูงกว่าการผสมน้ำเปล่า เกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันระหว่างสารละลาย NaOH และเถ้าลอย ส่งผลให้ตัวอย่างเชื่อมประสานกันและเพิ่มความหนาแน่นแก่ตัวอย่างยิ่งขึ้น

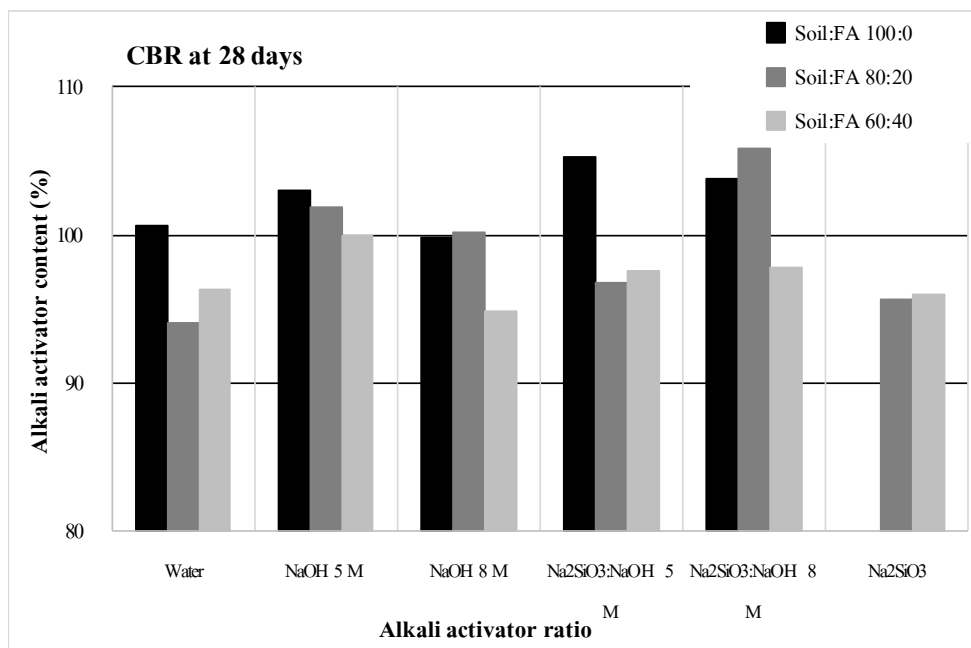
บทที่ 5 ผลทดสอบ California bearing ratio

5.1 การเตรียมตัวอย่าง CBR ในสถานะ Soak

หลังการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะได้ค่า OAC และ $\gamma_{d,max}$ และค่าเหล่านี้ถูกใช้ในการกำหนดปริมาณสารละลาย Alkali activator และวัสดุดิบต่าง ๆ ให้ได้ความหนาแน่นตามค่าการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานตามที่ได้ทดสอบไว้เช่นเดียวกับการทดสอบ CBR การเปรียบเทียบค่า OAC และ $\gamma_{d,max}$ ระหว่างจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และจากการทดสอบ CBR ดังแสดงในรูปที่ 5-1 (ก-ข) โดยแสดงอัตราส่วนสารละลาย Alkali activator ratio ที่ระยะการบ่ม 7 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยค่า Alkali activator content จากการเตรียมตัวอย่าง CBR ต่างกับค่า OAC จากการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานพบว่าที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 86.1–106.3 % และที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 94.1–105.8% รูปที่ 5-2 (ก-ข) แสดงค่า $\gamma_{d,max}$ จากการเตรียมตัวอย่าง CBR ต่างกับการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานพบว่าที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 95.6–104.5% และที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 94.1–100%

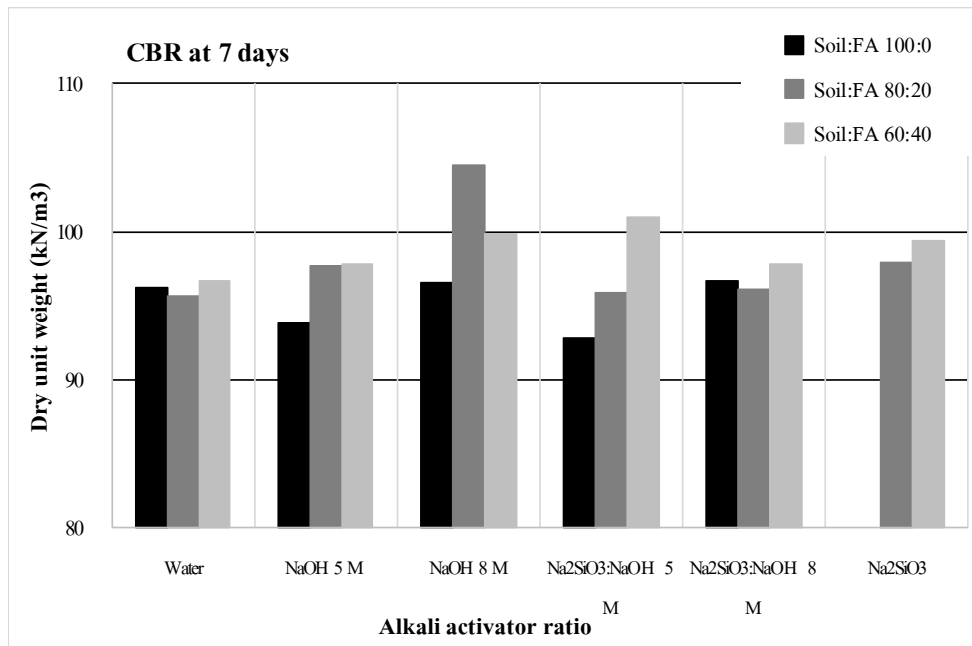


(ก) ระยะการบ่ม 7 วัน

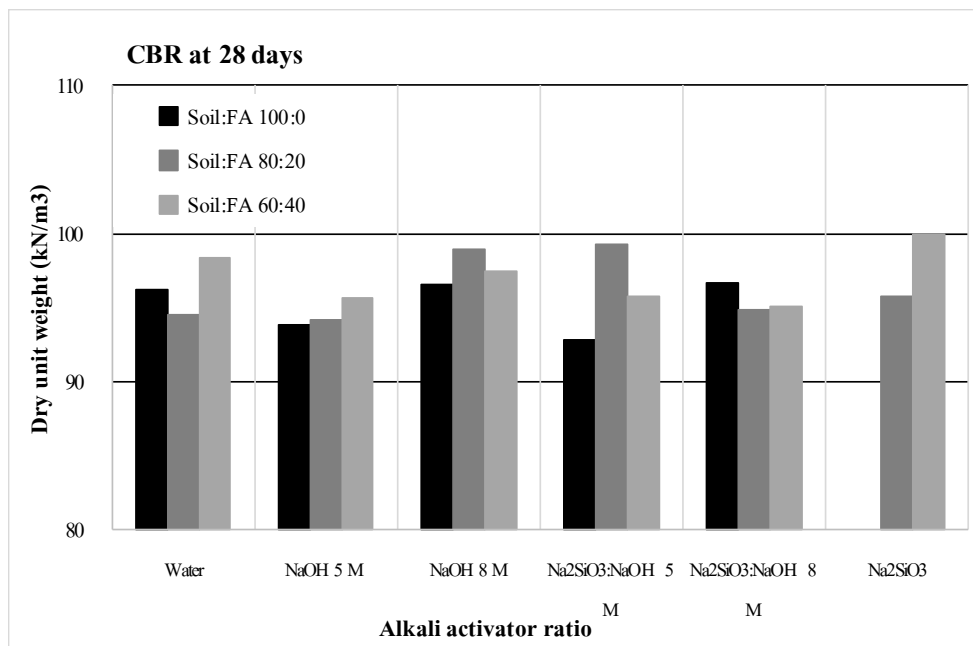


(ข) ระยะการบ่ม 28 วัน

รูปที่ 5-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator ratio และ Alkali activator content



(ก) ระยะการบ่ม 7 วัน



(ข) ระยะการบ่ม 28 วัน

รูปที่ 5-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator ratio และ $\gamma_{d,max}$

5.2 ผลการทดสอบ CBR

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนา ค่า CBR ภายใต้สภาวะแช่น้ำ ได้มีการศึกษาการเพคเตอร์ที่สำคัญต่อการพัฒนา ค่า CBR พบว่าค่า CBR ถูกควบคุมอยู่ด้วยกัน 4 เพคเตอร์ ได้แก่

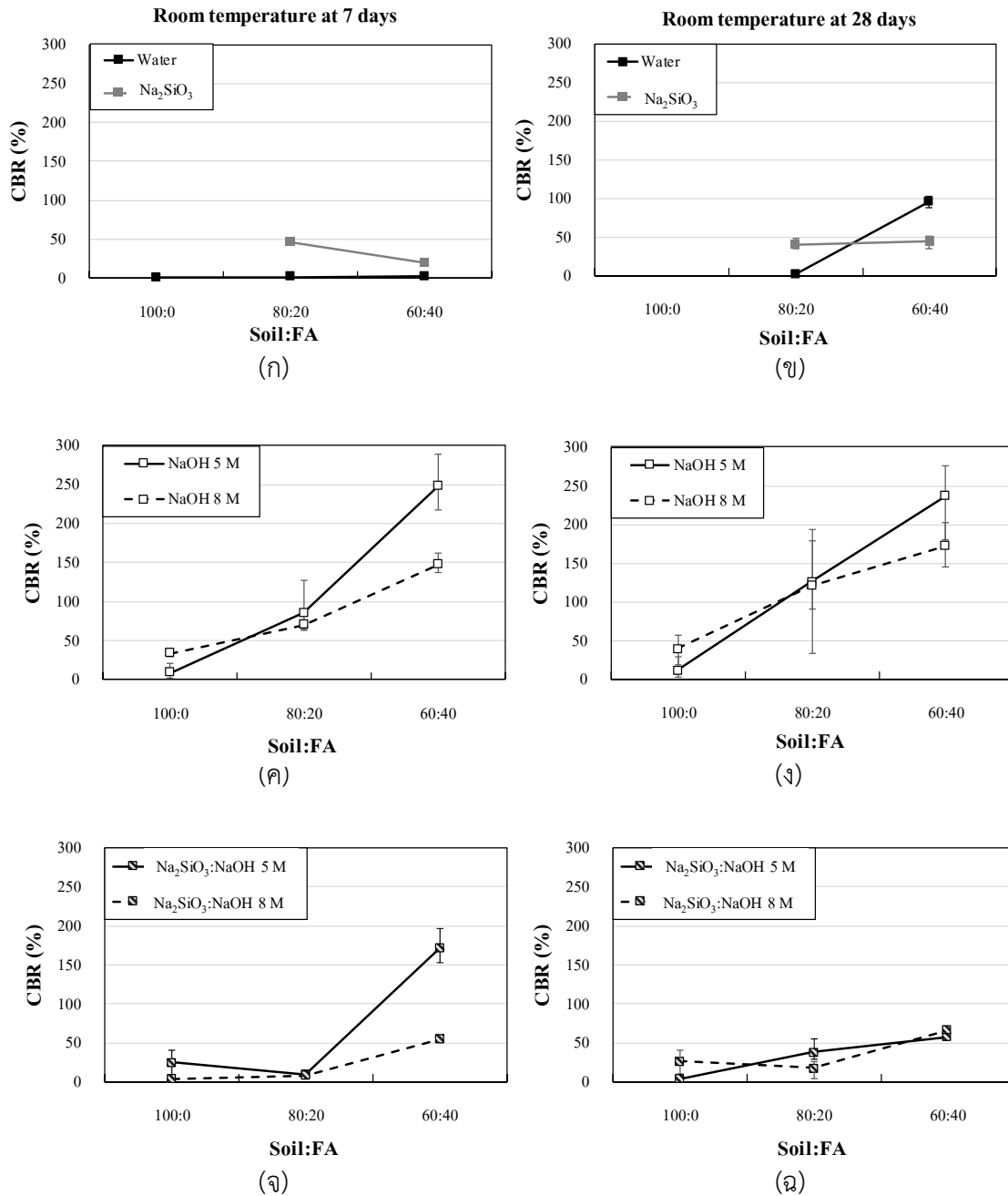
1. อัตราส่วนดินเหนียวต่อเถ้าลอย Soil: FA 100:0, 80:20 และ 60:40

2. อัตราส่วน Alkali activator ระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH 0:100, 50:50 และ 100:0
3. ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 และ 8 โมลาร์
4. ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน โดยใช้อุณหภูมิห้อง
ตามมาตรฐานชั้นพื้นทางกรมทางหลวงชั้นพื้นทางหินคลุกและหินคลุกผสมซีเมนต์ CBR มีค่า $\geq 80\%$
พื้นทางกรวดใหม่และตะกรันกรวดใหม่ CBR มีค่าเท่ากับ $\geq 90\%$

5.2.1 อัตราส่วน Soil:FA

การพัฒนา ค่า CBR เนื่องจากปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์เกิดขึ้นเกิดจากการเพิ่มขึ้นของแคลอย ซึ่งเป็นการเพิ่มออสซิลลูมินอนซิลิเกตแก่ตัวอย่าง ส่งผลต่อการพัฒนา ค่า CBR เพิ่มขึ้นในอัตราส่วน Soil:FA เท่ากับ 60:40 ดังแสดงในภาพที่ 5-3 (ก-จ) แสดงผลของค่า CBR ที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Soil:FA เท่ากับ 100:0, 80:20 และ 60:40 ต่ออัตราส่วนของตัวอย่างที่ถูกผสมด้วยน้ำเปล่า และสารละลาย Alkali activator ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ภายใต้ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

รูปที่ 5-3 บ่งชี้ว่าระยะเวลาการบ่มตัวอย่างทั้ง 7 และ 28 วัน ค่า CBR เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Soil:FA 60:40 อย่างชัดเจนในอัตราส่วนที่ถูกผสมด้วยสารละลาย NaOH เนื่องจากความสามารถจากการชะซิลิกาและอลูมินาในแคลอยของสารละลาย Alkali activator ทำให้โอกาสการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นมากกว่าดินตะกอนทะเล การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์พัฒนาไปสู่โครงสร้าง N-A-S-H และ C-S-H เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้ตามจำนวนแคลอยที่เพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีส่วนทำให้ค่า CBR สูงขึ้น สามารถรับกำลังแบกทานได้แม้ตัวอย่างจะอยู่ในสถานะแช่แข็ง สำหรับอัตราส่วน Soil:FA 100:0 ยังคงมีค่า CBR ที่ไม่แน่นอน เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผสมด้วยแคลอยแล้ว ดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียวนั้นไม่ช่วยในการพัฒนา ค่า CBR แต่อย่างใด เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นออสซิลลูมินอนต่ำการเข้าชะของสารละลาย Alkali activator จึงไม่เป็นผล และไม่เกิดการพัฒนา ค่า CBR



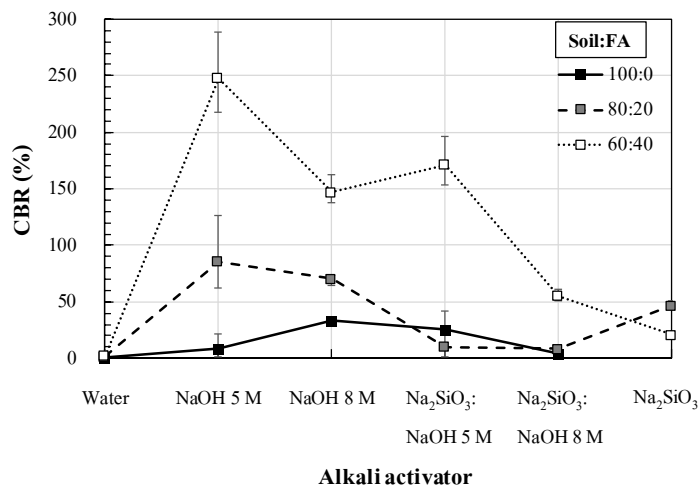
รูปที่ 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Soil: FA ต่ออัตราส่วนที่ผสมน้ำเปล่า และ อัตราส่วนที่ผสม Alkali activator

5.2.2 อัตราส่วน Alkali activator

อัตราส่วน Alkali activator นั้นมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาค่า CBR โดยสารละลาย Alkali activator แต่ละประเภทจะให้ผลต่อความสามารถในการรับแรงแบกทานที่แตกต่างกันไปดังแสดงในรูปที่ 5-4 (ก-ข) ค่า CBR ทั้งที่ระยะการบ่ม 7 และ 28 วัน สารละลาย Alkali activator มีผลต่อเถ้าลอยมาก โดยอัตราส่วน Soil:FA 60:40 เป็นอัตราส่วนที่ให้ค่า CBR สูงสุดดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม สารละลาย Alkali activator มีผลต่อค่า CBR ที่แตกต่างกัน โดยพบว่าอัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH

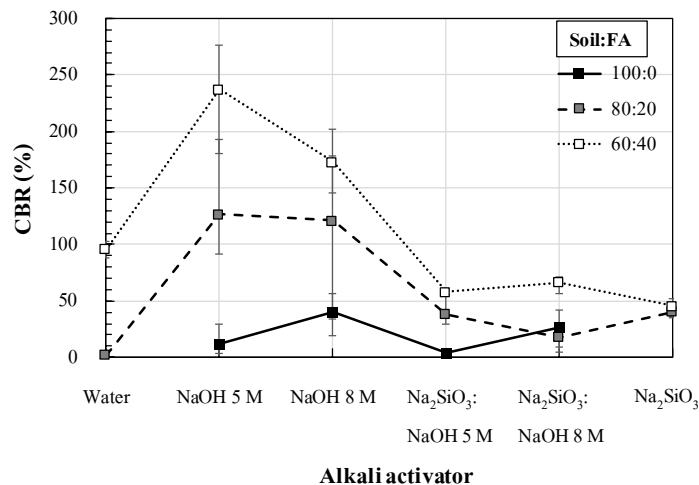
จะทำให้ค่า CBR มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วยการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันจากการสร้างผลิตภัณฑ์ N-A-S-H แต่ในทางตรงข้ามการเพิ่มสารละลาย Na_2SiO_3 กลับทำให้ค่า CBR มีแนวโน้มต่ำลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจากสารละลาย Na_2SiO_3 มาจาก CaO ที่อยู่ในอนุภาคเถ้าลอยซึ่งมีมากในเถ้าลอย class C ถูกชะออกมาและทำปฏิกิริยากับสารละลาย Na_2SiO_3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงอยู่ในรูปแบบของ C-S-H (Phummiphan et al., 2015) เป็นปฏิกิริยาที่ช่วยให้ตัวอย่างที่ผสมด้วยสารละลาย Na_2SiO_3 เชื่อมประสานกันแต่ไม่เพียงพอสำหรับสภาวะ Soaked แม้การพัฒนาค่า CBR นั้นจำเป็นที่จะต้องประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์ N-A-S-H และ C-S-H สารละลาย NaOH ซึ่งให้ผลผลิต N-A-S-H มากกว่า C-S-H ช่วยเพิ่มค่า CBR ให้มีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนสารละลาย Na_2SiO_3 ให้ผลผลิต C-S-H มากกว่า N-A-S-H นั้นไม่ช่วยให้เกิดการพัฒนาค่า CBR แต่อย่างใด

Room temperature at 7 days



(ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน

Room temperature at 28 days



(ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน

รูปที่ 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารละลาย Alkali activator และระยะการบ่มตัวอย่าง

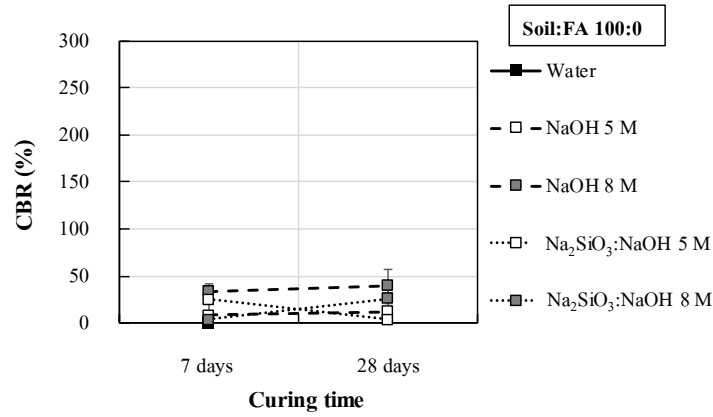
5.2.3 ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

รูปที่ 5-4 ผลทดลองพบว่าสารละลาย NaOH แสดงให้เห็นการมีอิทธิพลต่อค่า CBR เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ซึ่งแสดงค่า CBR สูงกว่าที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทั้งอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 0:100 และ 50:50 ในอัตราส่วนที่ผสมแล้ว และเกือบทุกช่วงระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง จึงกล่าวได้ว่าการพัฒนาค่า CBR นั้นเกิดขึ้นจากการเพิ่มเถ้าลอยซึ่งมีผลต่อสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ และอัตราส่วนที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (Soil:FA 100:0) มีผลต่อสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะการพัฒนาค่า CBR เกิดจากผลของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจากการผลิต N-A-S-H และปฏิกิริยาไฮเดรชันจากการผลิต C-S-H สารละลาย NaOH โดยทั้งสองความเข้มข้นให้ผลผลิต N-A-S-H เช่นเดียวกัน แต่สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์นั้นจะทำให้ CaO ที่อยู่ในอนุภาคเถ้าลอยซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของผลิตภัณฑ์ C-S-H เกิดการตกผลึกเสียก่อนโดยรูปแบบดังกล่าวจะสามารถพบได้ในสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง (>7.5 โมลาร์) (C.K. Yip et al., 2005) ความเป็นผลึกของโครงสร้างทำให้ตัวอย่างสามารถรับแรงแบกทานได้ต่ำกว่าโครงสร้างของตัวอย่างที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เชื่อมประสานกันอย่างซับซ้อนและไม่เป็นระเบียบจึงสามารถรับแรงได้มากกว่า โดยคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งต้องการโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานสำหรับกระบวนการ Polycondensation (การควบแน่นของจีโอโพลิเมอร์) สาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ C-S-H ที่ได้จากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มีน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ การพัฒนาค่า CBR จึงน้อยกว่า ส่วนสาเหตุที่การผสมดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียวกับสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทำให้ค่า CBR สามารถพัฒนาได้สูงกว่าความเข้มข้น 5 โมลาร์ อาจเป็นเพราะโครงสร้างที่มีความเป็นอสัณฐานต่อนั้นต้องการสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่าในการชะลิกาและอลูมินาที่อยู่ภายในอนุภาคเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ จึงไม่มีผลต่อการพัฒนาค่า CBR ของอัตราส่วนที่ผสมดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมีความเข้มข้นที่ต่ำเกินกว่าจะสามารถชะลิกาและอะลูมินาในอนุภาคดินตะกอนทะเลในการใช้ทำปฏิกิริยาได้

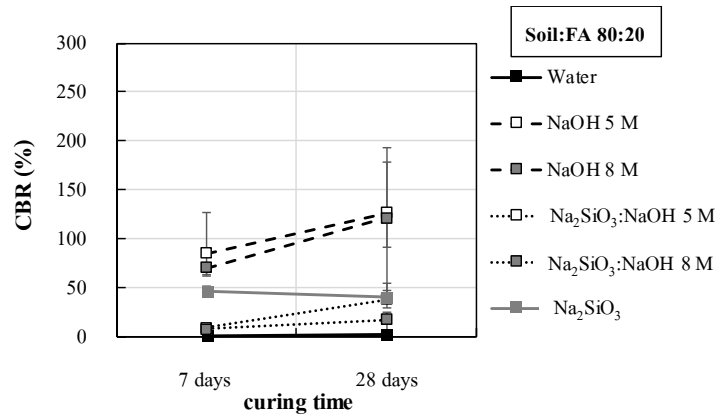
5.2.4 ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

การพัฒนาค่า CBR จากการบ่มตัวอย่างที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5-5 (ก-ค) พบว่าค่า CBR เกือบทุกอัตราส่วน ที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่นานขึ้นช่วยส่งเสริมค่า CBR ให้มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย โดยเถ้าลอยที่ผสมกับสารละลาย Alkali activator นั้นมีการพัฒนาค่า CBR ไม่มากนักเมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่ผสมน้ำเปล่า ส่วนอัตราส่วน Soil:FA 100:0 มีการพัฒนาค่า CBR ที่สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์มีมากกว่า 5 โมลาร์ สาเหตุที่อัตราส่วนที่ผสมเถ้าลอยกับน้ำมีการพัฒนาค่า CBR สูงขึ้น อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยา CaOH ต้องการระยะเวลาที่นานขึ้นสำหรับการพัฒนาปฏิกิริยา ส่วนการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจากเถ้าลอยที่ผสมกับสารละลาย Alkali activation มีการพัฒนาค่า CBR เล็กน้อย เนื่องจากมีการพัฒนาปฏิกิริยาในช่วงแรกสูง การพัฒนาในระยะต่อไปอาจต้องการสารละลาย Alkali activation มากกว่าค่า Optimum เพื่อใช้สำหรับการพัฒนาปฏิกิริยาที่มากขึ้น สำหรับการทำให้ปฏิกิริยาของสารละลาย NaOH ที่

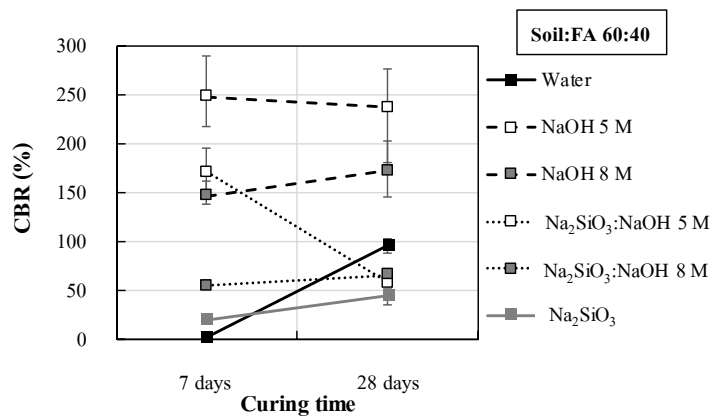
ความเข้มข้น 8 โมลาร์ผสมดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียว เป็นการพัฒนาต่อเนื่องจากความสามารถในการชะ
ซิลิกาและอลูมินาในเฟสอสัณฐานได้สูงทำให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันสามารถดำเนินมาได้เรื่อย ๆ ในระยะ
การบ่มที่ยาวนาน



(ก) Soil:FA เท่ากับ 100:0



(ข) Soil:FA เท่ากับ 80:20



(ค) Soil:FA เท่ากับ 60:40

รูปที่ 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR และอัตราส่วนของสารละลาย

การปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วยจีโอโพลิเมอร์ให้เป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวงโดยกำหนดค่า CBR ตามมาตรฐานชั้นพื้นทางกรมทางหลวง โดยชั้นพื้นทางหินคลุก และชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 80 % ชั้นพื้นทางกรวดโม้ และชั้นพื้นทางตะกรันโม้ CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 90 % ผลการทดลองและเกณฑ์ตามมาตรฐานกรมทางหลวงได้แสดงในรูปที่ 5-6 พบว่า

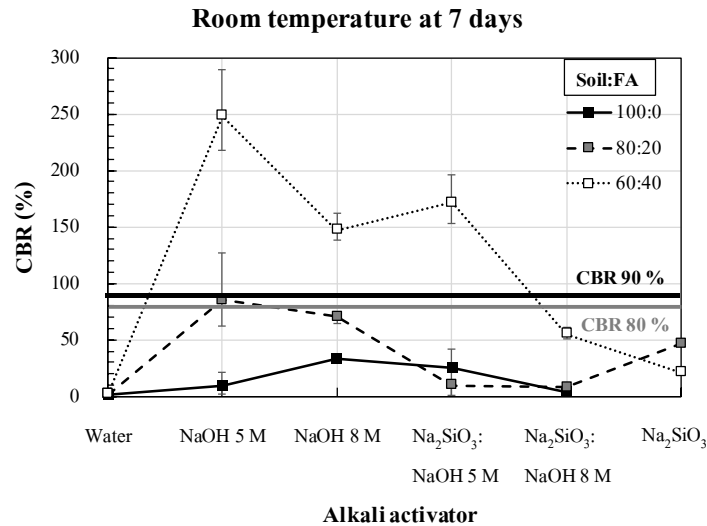
CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 80 % อัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์คือ

อัตราส่วน Soil:FA 80:20 ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 0:100 ที่ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

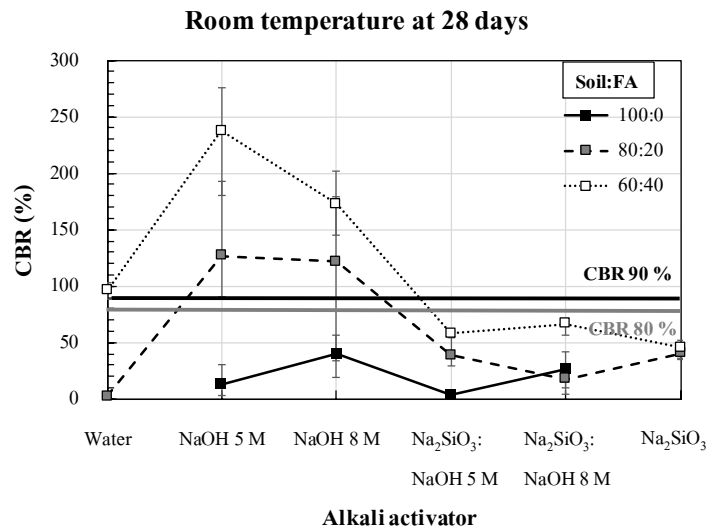
CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 90 % อัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์คือ

อัตราส่วน Soil:FA 80:20 ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 0:100 ที่ความเข้มข้นของ NaOH 5 และ 8 โมลาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

อัตราส่วน Soil:FA 60:40 ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 0:100 ที่ความเข้มข้นของ NaOH 5 และ 8 โมลาร์ ทั้งระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน และ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 50:50 ที่ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



(ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน



(ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน

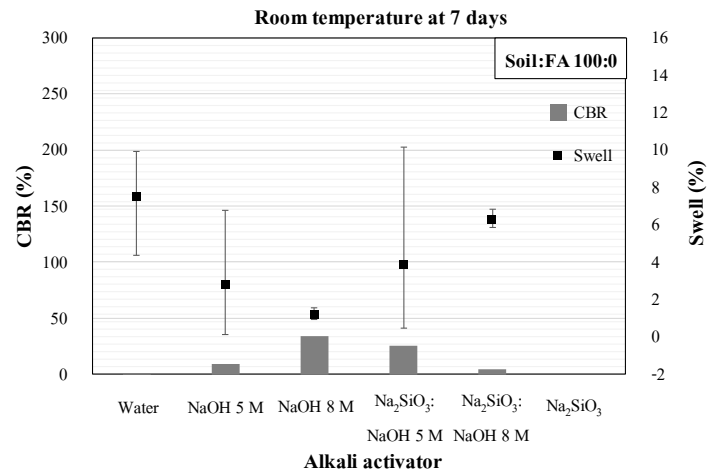
รูปที่ 5-6 ความสัมพันธ์ค่า CBR ตามเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง

5.3 การบวมตัวของดินจากสถานะ Soaked ของดินตะกอนทะเลจีโอโพลิเมอร์

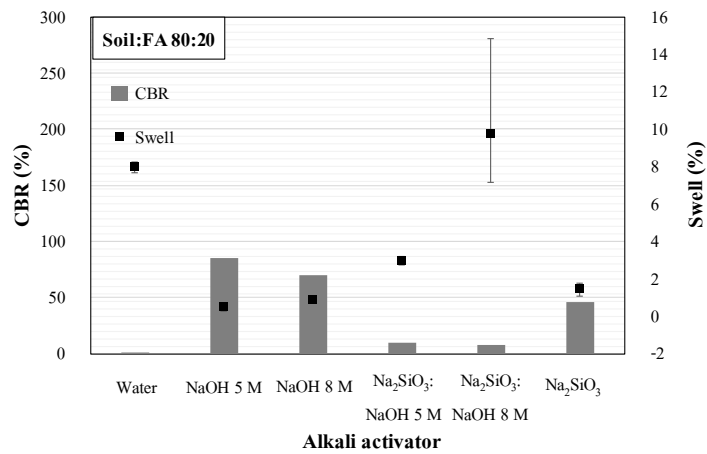
หลังจากตัวอย่าง CBR ที่ได้รับการบ่มเรียบร้อยแล้วจะถูกนำมาแช่น้ำ เพื่อศึกษาการบวมตัวของดิน (Swell) ได้พื้นทางเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำและการสูญเสียกำลังของดินเมื่อเกิดการอิ่มตัวในสนาม ผลการทดสอบการ Swell ตัวของตัวอย่าง CBR ดังแสดงในรูปที่ 5-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และค่า Swell พบว่าค่า Swell มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นกับค่า CBR ที่ต่ำ ดังนั้นค่า Swell จึงอิทธิพลต่อค่า CBR ซึ่งค่า CBR นั้นมีความแตกต่างกันจากหลายเฟคเตอร์ตามหัวข้อ 5.1 เช่นเดียวกันกับค่า Swell อิทธิพลที่มีผลต่อค่า Swell ได้แก่

1. อัตราส่วนดินเหนียวต่อเถ้าลอย Soil: FA 100:0, 80:20 และ 60:40
2. อัตราส่วน Alkali activator ระหว่าง Na₂SiO₃: NaOH 0:100, 50:50 และ 100:0
3. ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 และ 8 โมลาร์

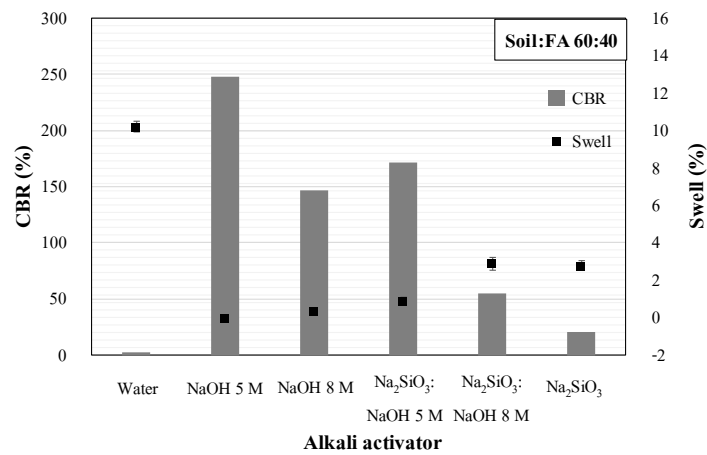
4. ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน โดยใช้อุณหภูมิห้อง



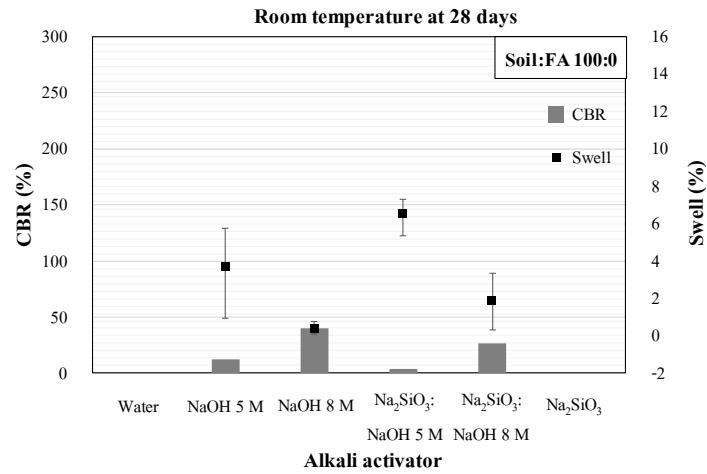
(ก) อัตราส่วน Soil: FA 100:0 ที่ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง 7 วัน



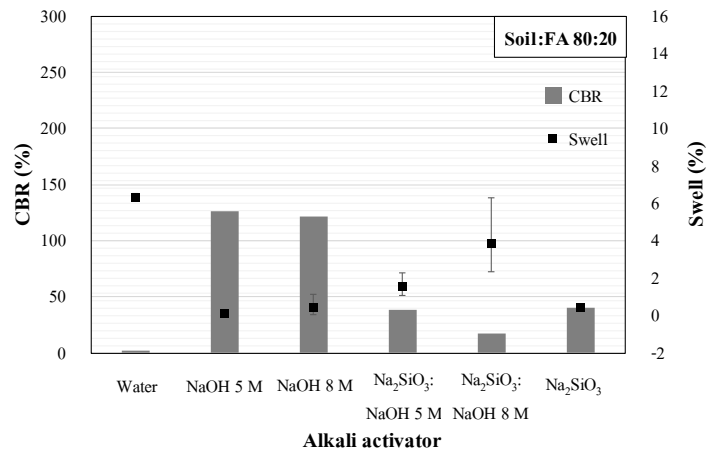
(ข) อัตราส่วน Soil: FA 80:20 ที่ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง 7 วัน



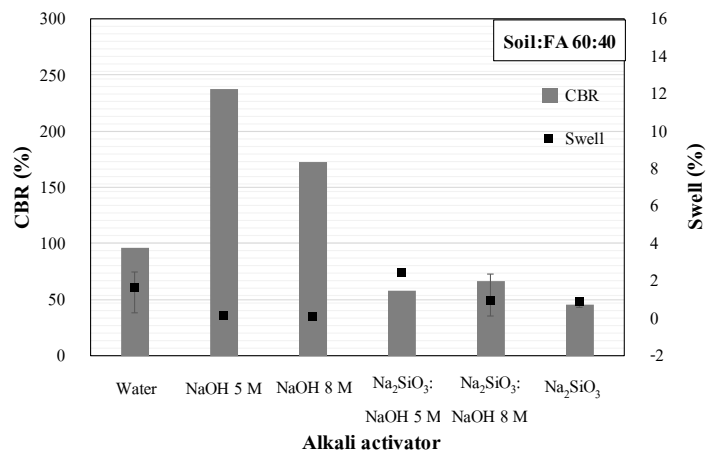
(ค) อัตราส่วน Soil: FA 60:40 ที่ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง 7 วัน



(ง) อัตราส่วน Soil: FA 100:0 ที่ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน



(จ) อัตราส่วน Soil: FA 80:20 ที่ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน

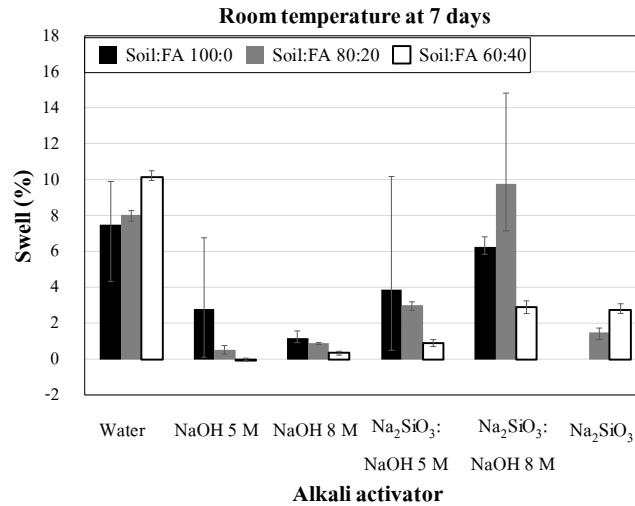


(ฉ) อัตราส่วน Soil: FA 60:40 ที่ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน

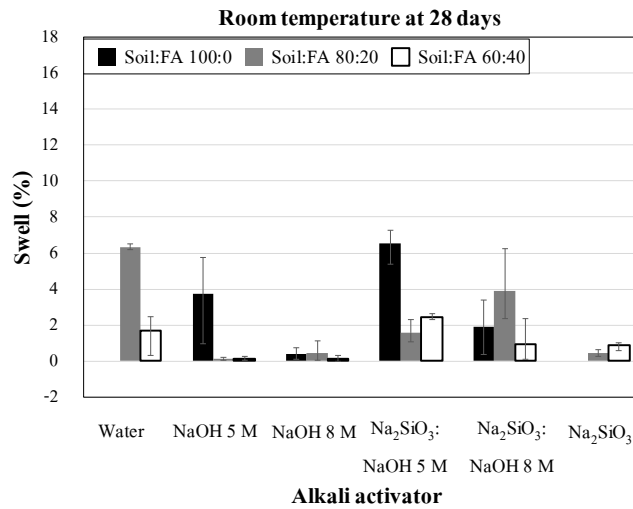
รูปที่ 5-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และค่า Swell

5.3.1 อัตราส่วน Soil: FA

เมื่อนำค่า Swell ของแต่ละอัตราส่วน Soil: FA มาเปรียบเทียบกับที่แสดงในรูปที่ 5-8 (ก-ข) พบว่าอัตราส่วนที่ผสมเถ้าลอยมากขึ้นจะทำให้ค่า Swell มีแนวโน้มลดลง เมื่อผสมสารละลาย Alkali activator แสดงให้เห็นว่านอกจากการเกิดปฏิกิริยาของซีโอโพลิเมอร์จะให้ค่า CBR ที่สูงขึ้น ยังช่วยลดการบวมตัวของตัวอย่างได้ ส่วนอัตราส่วน Soil: FA 60:40 กับน้ำ พบว่ามีค่า Swell สูงสุด และยังให้ค่า Swell ที่สูงกว่าอัตราส่วน Soil: FA 100:0 แม้ว่าอัตราส่วน Soil: FA 60:40 ที่ผสมกับน้ำจะให้ค่า CBR สูงกว่าการผสมดินตะกอนอย่างเดียวกก็ตาม อาจเนื่องจากแม้ว่าการผสมเถ้าลอยกับน้ำจะให้ผลผลิต CaOH ที่ทำให้ตัวอย่างสามารถรับกำลังแบกทานได้ แต่การแทนที่ดินตะกอนทะเลของเถ้าลอยเป็นการลดความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างดินตะกอนทะเลและน้ำลง ความสามารถในการยึดเหนี่ยวกันของตัวอย่างจึงต่ำลงด้วย และเมื่อดินตะกอนมีจำนวนไม่เพียงพอสำหรับการแลกเปลี่ยนประจุ การบวมตัวจากการอิมมัตด้วยน้ำและดันอนุภาคของเถ้าลอยขึ้น ในทางตรงกันข้ามการผสมน้ำกับดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียวทำให้อนุภาคของดินตะกอนทะเลล้วนสามารถแลกเปลี่ยนประจุได้อย่างเต็มที่ ในระยะเวลาการบ่มเดียวกันดินตะกอนทะเลมีแรงยึดเหนี่ยวจากการแลกเปลี่ยนประจุมากกว่า ดังนั้นค่า Swell จึงต่ำกว่าดินตะกอนทะเลที่ผสมเถ้าลอย แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่นานขึ้นการเพิ่มเถ้าลอยกลับทำให้ค่า Swell ต่ำลง อย่างที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ผลจาก CaO ต้องการระยะเวลาที่นานขึ้นสำหรับการทำปฏิกิริยาที่ดีกว่านั้นช่วยลดค่า Swell ให้แก่ตัวอย่างได้



(ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน



(ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน

รูปที่ 5-8 ความสัมพันธ์ของค่า Swell ต่ออัตราส่วน Soil: FA

5.3.2 อัตราส่วน Alkali activator

รูปที่ 5-8 พบว่าการสารถละลาย Alkali activator ช่วยให้ค่า Swell ของตัวอย่างลดลง โดยเฉพาะตัวอย่างที่ผสมสารถละลาย NaOH ยกเว้นอัตราส่วน Na₂SiO₃:NaOH 50:50 ซึ่งให้ค่า Swell ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับการผสมน้ำอย่างเดียว อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจำนวนมากที่ที่เกิดจากสารถละลาย NaOH และผลผลิต N-A-S-H และปฏิกิริยาไฮเดรชันจากการผลิต C-S-H จากสารถละลาย Na₂SiO₃ ทำให้ค่า Swell ทั้งระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน ลดลง ส่วนอัตราส่วน Na₂SiO₃:NaOH 50:50 มีค่า Swell สูงสุดในอัตราส่วนที่ผสมสารถละลาย Alkali activator อาจเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันและปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ บางส่วนทั้งอนุภาคดินตะกอนทะเลและเถ้าลอยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาดังกล่าว โดยเฉพาะดินตะกอนทะเลที่มีจำนวนมากกว่าและยังทำปฏิกิริยาน้อยกว่าตัวอย่างจึงไม่เชื่อมประสานกัน

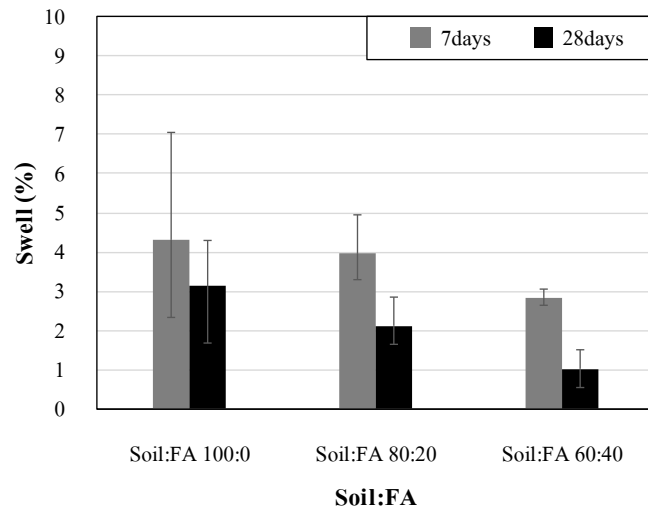
เพียงพอ การอิมมิดีจากน้ำที่ได้จากการแช่ในระยะเวลาที่นานขึ้น ทำให้ดินตะกอนทะเลวมตัวและดันอนุภาค
 ใต้อลอยออกมาได้ง่ายขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำอยู่แล้วไม่ช่วยในการยึดเกาะกันของระหว่างอนุภาค
 เท่าที่ควร

5.3.3 ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

ดังแสดงในรูปที่ 5-8 จากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่แสดงค่า Swell ต่ำสุด เมื่อถูก
 ผสมกับเถ้าลอยที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่สูงกว่าความเข้มข้น 8 โมลาร์ การ
 เชื่อมประสานกันจากปฏิกิริยาดังกล่าวให้ค่า Swell ที่ต่ำสุด และยังให้ค่า CBR ที่สูงสุดเช่นเดียวกัน ดังนั้นการ
 ผสมเถ้าลอยจึงเหมาะสมกับสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ซึ่งช่วยลดค่า Swell แก่ตัวอย่างได้
 แต่การผสมสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ เหมาะสมสำหรับการลดค่า Swell แก่ตัวอย่างที่ผสม
 ดินตะกอนทะเล ซึ่งช่วยลดค่า Swell แก่ตัวอย่างได้มากกว่าสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์
 เนื่องจากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์นั้นเข้าทำปฏิกิริยากับ CaO ที่อยู่ในอนุภาคเถ้าลอยซึ่ง
 เป็นแหล่งกำเนิดของผลิตภัณฑ์ C-S-H เกิดการตกผลึกจึงไม่ได้เชื่อมประสานกันในรูปแบบอสัณฐาน โครงสร้าง
 ของตัวอย่างจึงถูกน้ำเข้าแทรกซึมทำลายโครงสร้างได้ง่ายกว่าการแลกเปลี่ยนประจุจากดินตะกอนทะเลเพียง
 อย่างเดียว

5.3.4 ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

ผลทดลองของตัวอย่างทุกอัตราส่วนถูกแยกออกเป็นอัตราส่วน Soil: FA เนื่องจากการปรับปรุงดิน
 ตะกอนทะเลด้วยจีโอโพลิเมอร์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของจำนวนเถ้าลอยมากที่สุด เพื่อให้เกิดความแตกต่างที่
 ชัดเจนมากขึ้นจึงแยกระหว่างระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5-9 พบว่าระยะเวลาการบ่ม
 ตัวอย่างที่ 28 วัน ช่วยส่งเสริมให้ค่า Swell ของตัวอย่างลดลงได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะการเพิ่มปริมาณเถ้า
 ลอยมากขึ้น การทำปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยและสารละลาย Alkali activator ซึ่งได้ผลผลิตเป็น N-A-S-H
 และ C-S-H หรือแม้แต่ CaOH จากการทำปฏิกิริยากับน้ำ ต้องการระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่นานเพื่อการทำ
 ปฏิกิริยาที่สมบูรณ์มากขึ้น



รูปที่ 5-9 ความสัมพันธ์ของค่า Swell ต่อระยะเวลาการบ่มตัวอย่างของอัตราส่วน Soil: FA

บทที่ 6 การวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน

6.1 บทนำ

ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันสามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายรูปแบบตั้งแต่การวิเคราะห์ในรูปแบบภาพ, องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งใช้ศึกษาการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างก่อนและหลัง การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน การศึกษารูปร่างโครงสร้างระดับจุลภาคที่พื้นผิวและองค์ประกอบของ สารเคมี ไปจนถึงศึกษาองค์ประกอบของธาตุในเชิงปริมาณ การระบุขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุลพันธะ Si-O-Si และ Al-O ที่ใช้นิยาม Degree of polycondensation ความซับซ้อนของจีโอโพลิเมอร์ ในสภาวะการเป็น ผลึกหรือไม่เป็นผลึกของโครงสร้าง จากผลจากทดสอบ CBR ของอัตราส่วนที่ถูกปรับปรุงใหม่ของอัตราส่วน NaOH ความเข้มข้น 5 และ 8 โมลาร์ เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ให้ผลการทดสอบผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานกรม ทางหลวง สามารถรับกำลังอัดได้ภายใต้สภาวะ Soaked ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน และให้กำลังอัดสูงในระยะเวลา การบ่มที่ 28 วัน ซึ่งเป็นที่น่าสนใจสำหรับอัตราส่วน N-A-O-H เพียงอัตราส่วนเดียวที่สามารถให้กำลังอัดภายใต้ สภาวะ Soaked ได้ อัตราส่วนที่ถูกนำมาวิเคราะห์รวมไว้ในรูปที่ 6-1 โดยแบ่งการทดสอบตามระยะเวลาการ บ่มที่ 7 และ 28 วัน โดยใช้สัญลักษณ์

00 แทน อัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำ

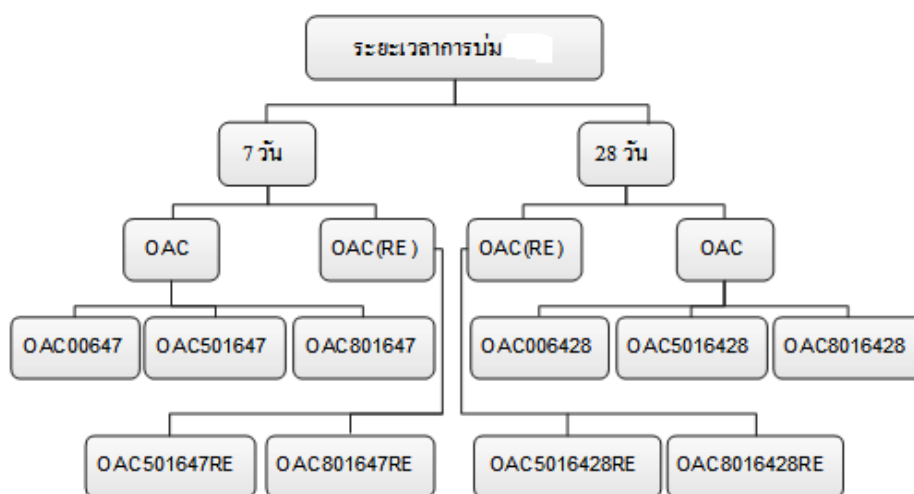
501 แทน อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH 0:100 ที่สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์

801 แทน อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH 0:100 ที่สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์

64 แทน อัตราส่วน Soil: FA 60:40

7 และ 28 แทน ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

ตัวอย่างเช่น OAC5016428RE คืออัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH 0:100 ที่สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ Soil: FA 60:40 ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน ของอัตราส่วนที่ถูกปรับปรุงใหม่



รูปที่ 6-1 ผังอัตราส่วนถูกนำมาวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน

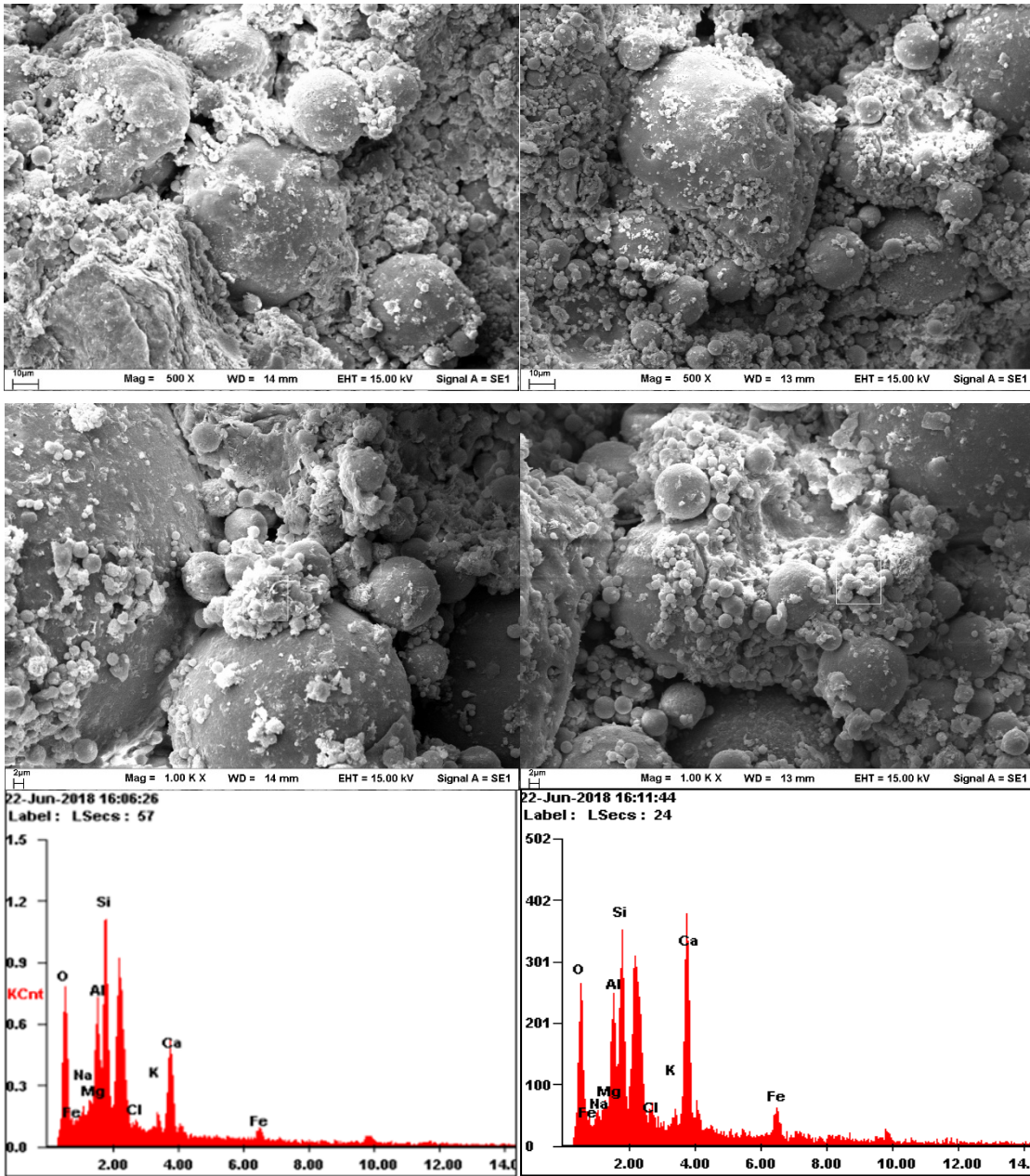
6.2 ผลทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

การทดสอบเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX หรือ EDS) เป็นการสำรวจการเติบโตของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันที่เชื่อมต่อกันของแก้วลอยและดินตะกอนทะเลเข้าด้วยกันด้วย N-A-S-H เกิดขึ้นบริเวณโดยรอบและผิวหน้าของอนุภาคดินตะกอนทะเลและแก้วลอย หลังจากทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันการชะละลายของ NaOH ที่ความเข้มข้น 5 และ 8 โมลาร์ และปฏิกิริยาจาก C-S-H ของอัตราส่วน Soil: FA 60:40 ที่ถูกผสมด้วยน้ำเปล่า ดังแสดงในรูปที่ 6-2 (a-e) โดยพบว่า

- (a) อัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำแสดงการเชื่อมประสานกันด้วยองค์ประกอบของ CaOH จากการละลายแคลเซียมในแก้วลอยและดินตะกอนทะเลของน้ำ เมื่อรวมกับสารประกอบซิลิกาและอะลูมินา ผลที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และปอซโซลานิกที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน จากผลผลิต C-S-H และ C-A-H (Chindaprasirt et al. 2009)
- (b) อัตราส่วน NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่ OAC แสดงการเชื่อมประสานกันระหว่างอนุภาคดินและแก้วลอยด้วยเจล N-A-S-H จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชัน สังเกตได้จาก EDX ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีจำนวนซิลิกาจากองค์ประกอบของเจล N-A-S-H จำนวนมากและมีจำนวนแคลเซียมน้อยกว่าจากระยะการบ่มที่ 7 วัน เนื่องจากแคลเซียมถูกใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของจากผลผลิต C-S-H ไปแล้ว จึงสังเกตได้ว่าตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคที่แน่นกว่าระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันพัฒนาดียิ่งขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม
- (c) รูปแบบการเจริญเติบโตของปฏิกิริยาคลายคลึงกับภาพ (b) แต่การเพิ่มปริมาณ NaOH เป็นการเพิ่มความสามารถในการชะซิลิกาและอะลูมินาที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคแก้วลอยมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้เจล N-A-S-H ที่เชื่อมประสานระหว่างอนุภาคมีมากขึ้น สังเกตได้ว่าตัวอย่างในภาพ (C) จะมีความหนาแน่น ความขรุขระและเจลเกาะที่บริเวณผิวมากกว่าภาพ (b) เล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของเจล N-A-S-H โดยตัวอย่างที่มีระยะเวลาการบ่ม 28 วันนั้นมีองค์ประกอบของโซเดียมมากกว่า ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันของอัตราส่วนนี้สูงที่สุด
- (d) แสดงการเข้าทำลายที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคแก้วลอยของสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ชัดเจนกว่า 5 โมลาร์ การเข้าทำลายนั้นได้ชะแคลเซียมที่อยู่ในอนุภาคแก้วลอยมาทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaOH จับตัวกันเป็นก้อน และเกิดการแตกหัก จากการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วเกินไปของ NaOH ที่ความเข้มข้นสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งพบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน จะพบแคลเซียมมากกว่าโซเดียม และแคลเซียมจะลดลงตามระยะเวลาบ่มที่มากขึ้น เจลที่เชื่อมประสานระหว่างอนุภาคจึงเป็นเจลประเภท C-S-H มากกว่า N-A-S-H ในระยะเวลาบ่มที่ 7 วันแรก โครงสร้างที่เป็นผลึกจากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทำให้ตัวอย่างมีร่องรอยของการ Crack และจับตัวเป็นก้อน เกิดขึ้นเป็นระยะที่บริเวณผิวหน้าของตัวอย่าง ตัวอย่างจึงดูไม่หนาแน่นเท่าตัวอย่างที่ได้จากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ลักษณะเช่นนี้มีผลให้อัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มี

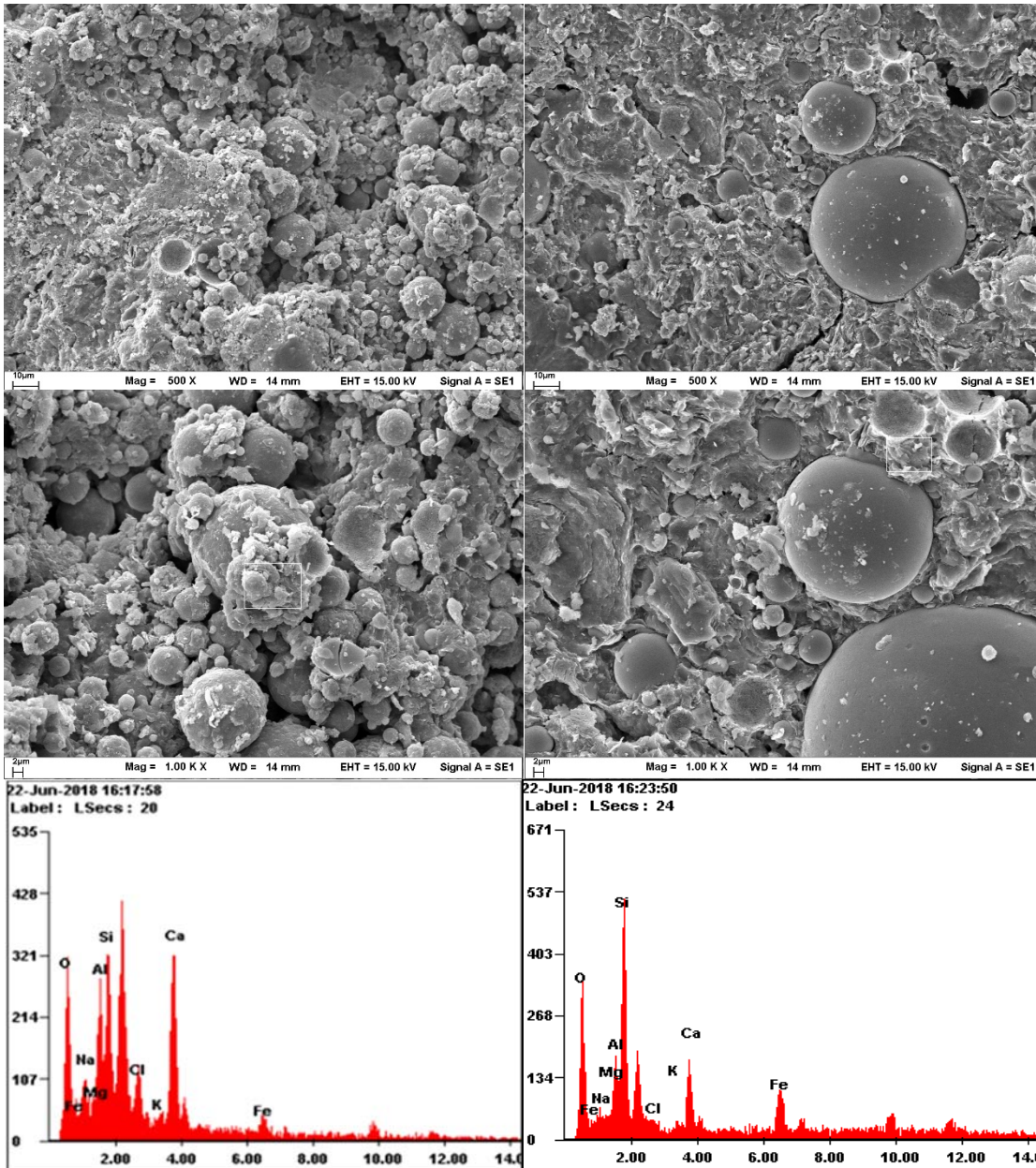
กำลังอัดที่ต่ำ เมื่ออยู่ในสถานะ Soaked จึงพังทลายลง เนื่องจากน้ำที่เข้าไปแทรกซึมและสลายโครงสร้างอัตราส่วนนี้จึงไม่สามารถให้กำลังอัดได้

- (e) การเพิ่มจำนวนสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มีรูปแบบของปฏิกิริยาที่คล้ายคลึงกับอัตราส่วนเดิม (OAC) แต่จำนวนสารละลาย NaOH มากขึ้นทำให้ตัวอย่างมีร่องรอยของการชะละลายบริเวณผิวหน้ามากขึ้น การชะแคลเซียมที่มากขึ้นจึงเกิดขึ้นเช่นเดียวกับการชะซิลิกาและอะลูมินาในถ้ำล่อยทำให้ค่ากำลังอัดที่เกิดจากเจล N-A-S-H แม้ว่าสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ จะทำให้แคลเซียมตกผลึก และส่งผลต่อกำลังอัด แต่อย่างไรก็ตามจำนวนซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในอนุภาคถ้ำล่อยมีมากกว่าแคลเซียม ดังนั้นเมื่อการชะแคลเซียมจบลงสารละลาย NaOH ที่เหลือก็จะทำการชะซิลิกาและอะลูมินาที่ยังไม่ได้ถูกชะ ปฏิกิริยาจีโพลิเมอไรเซชันนี้จึงถูกพัฒนาต่อเนื่องที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



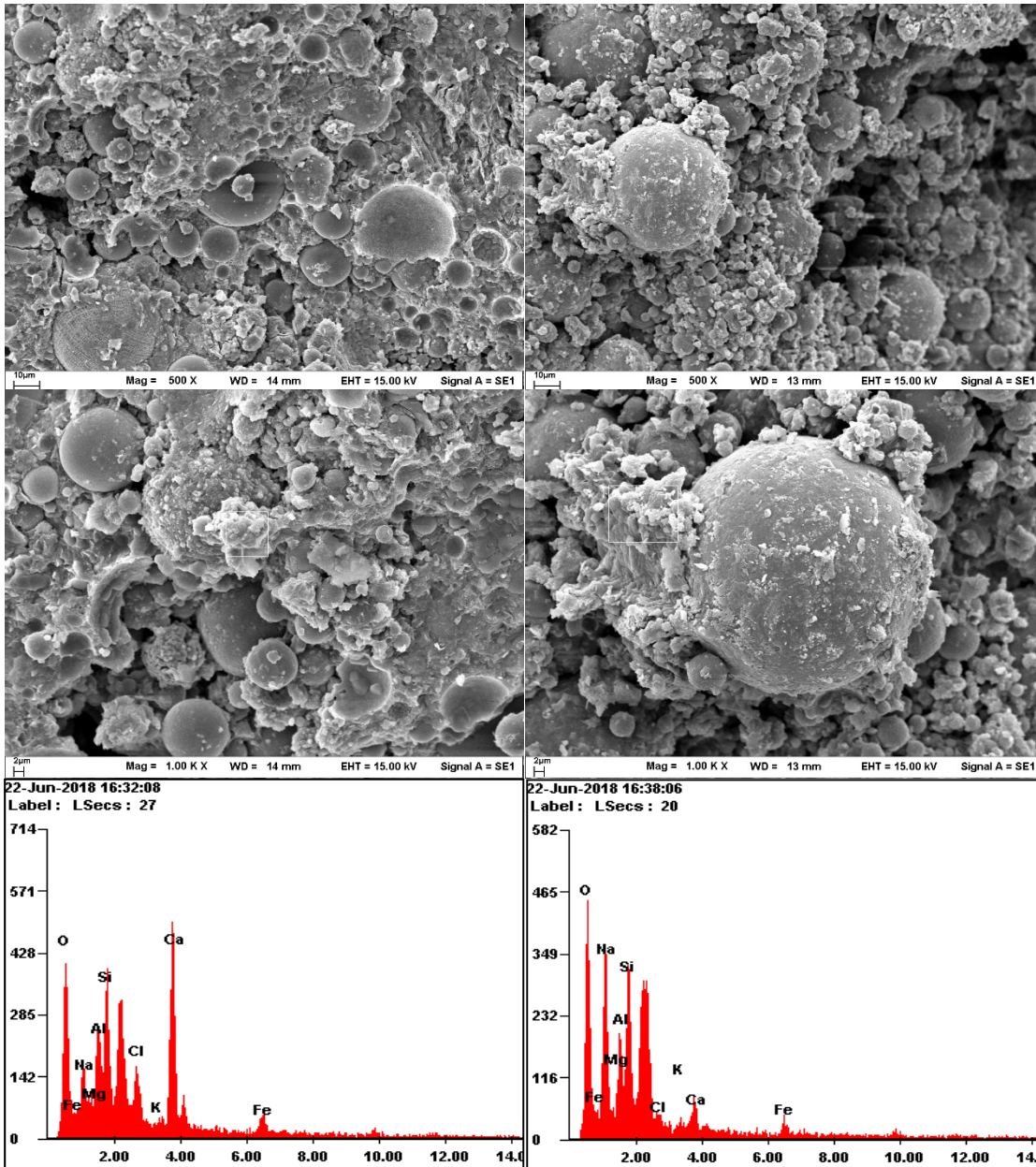
(a) OAC00647

(a) OAC006428



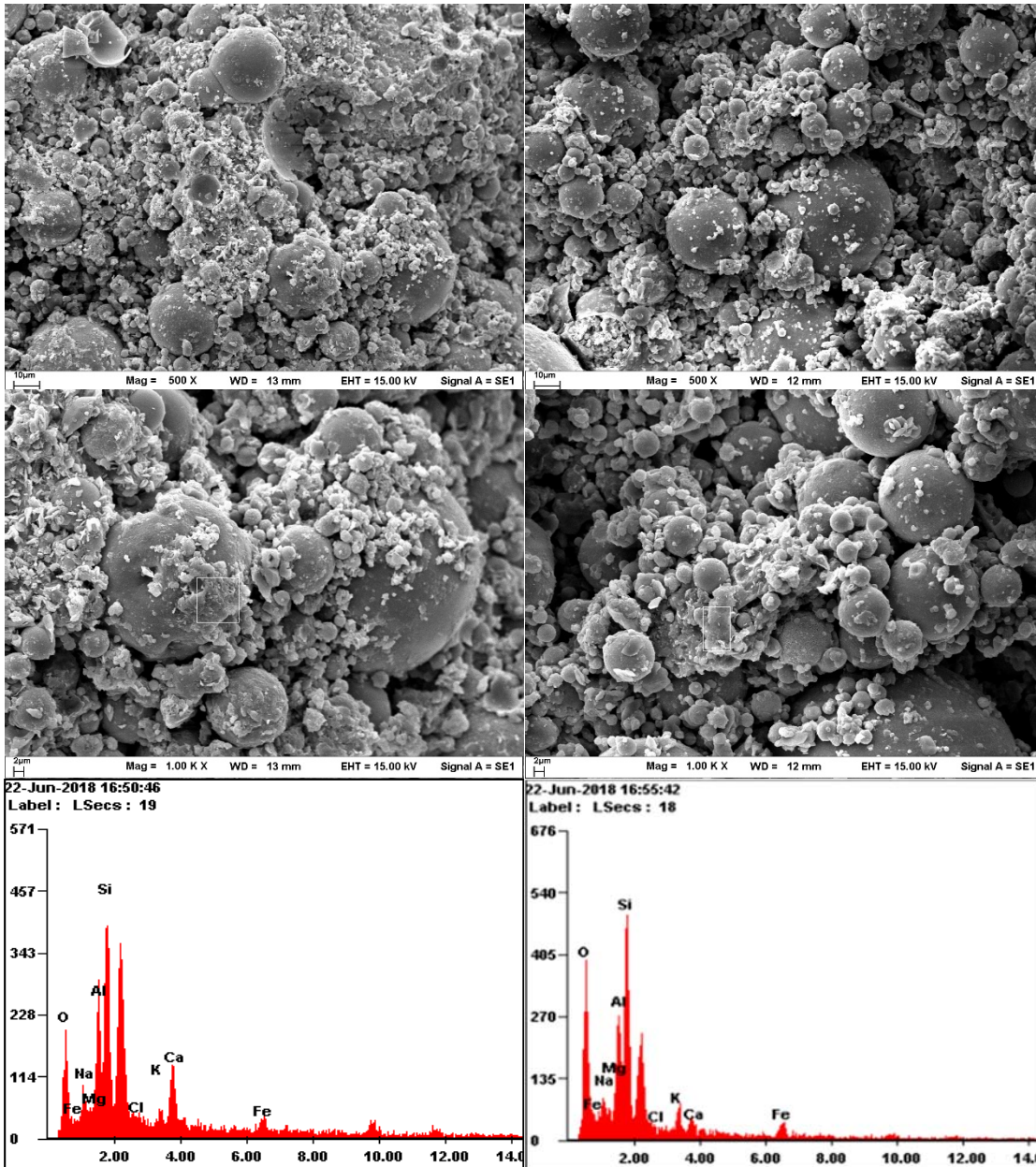
(b) OAC501647

(b) OAC5016428



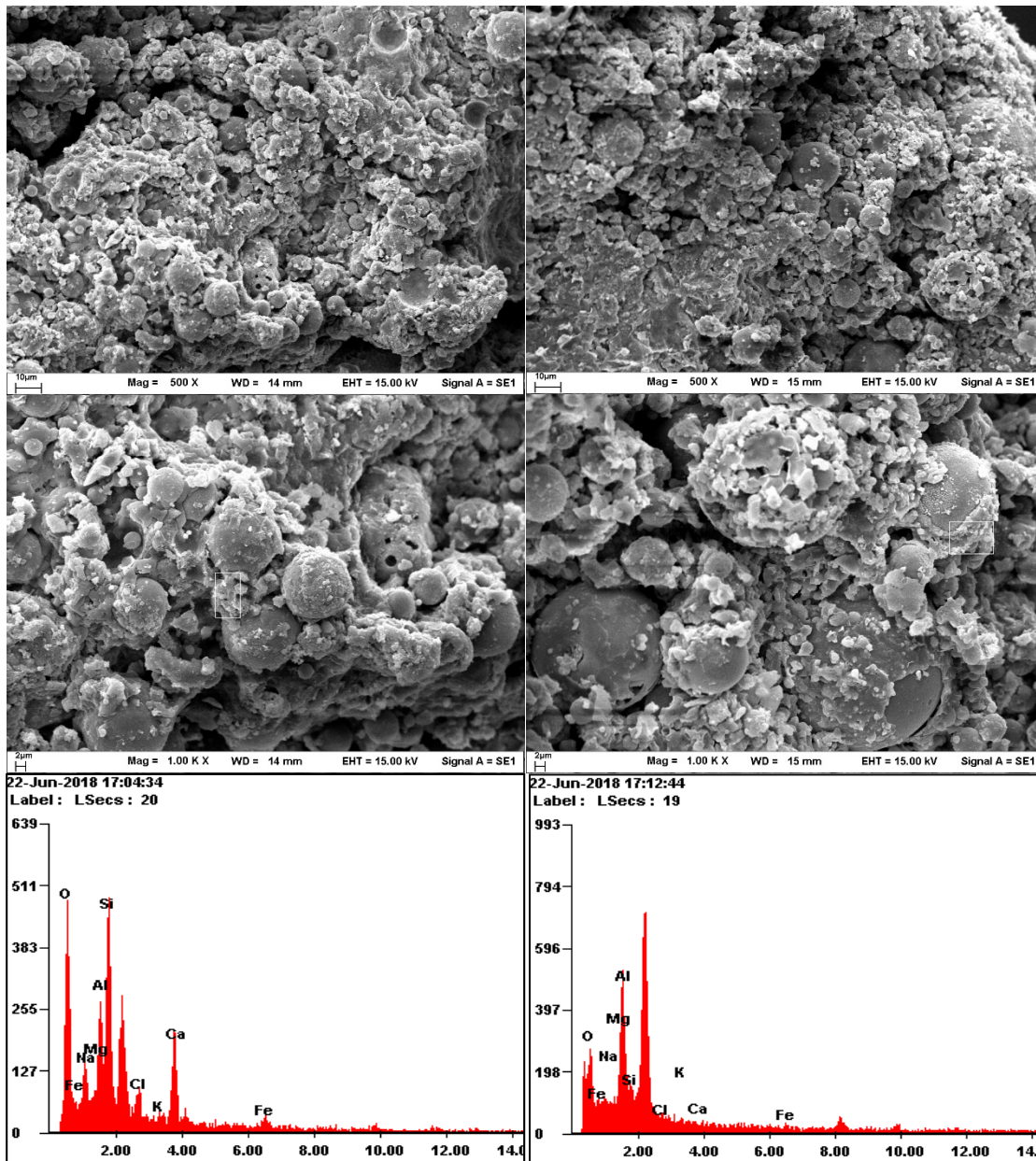
(c) OAC501647RE

(c) OAC5016428RE



(d) OAC801647

(d) OAC8016428



(e) OAC801647RE

(e) OAC8016428RE

รูปที่ 6-2 โครงสร้างทางจุลภาพจากการทดสอบ SEM และ EDX

สรุปผลทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

1. กำลังอัดที่เกิดขึ้นเกิดจากผลของ C-S-H และ N-A-S-H โดย C-S-H เกิดจากแคลเซียม, ซิลิกเกต และน้ำ ส่วน N-A-S-H เกิดจาก โซเดียมซิลิกเกต อะลูมินา ซิลิกา
2. แคลเซียมนั้นจะถูกชะมาและทำปฏิกิริยาจากสารละลาย NaOH แต่สารละลาย NaOH ที่สูงเกินไปจะทำให้แคลเซียมที่ชะออกมาแล้วจับตัวเป็นก้อนเกิดการตกผลึกอย่างรวดเร็ว เนื่องจากจากแรงปฏิกิริยาที่สูงขึ้นจาก

NaOH ที่ความเข้มข้นสูง ดังนั้น NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ จึงส่งผลให้ตัวอย่างมีกำลังอัดต่ำลงจากการตกผลึกของแคลเซียม ตัวอย่างมีลักษณะของร่องรอยการ Crack ที่เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก

3. C-S-H จะเกิดขึ้นที่ระยะ 7 วันแรกของการบ่มตัวอย่าง โดยจะส่งผลต่อกำลังอัดของตัวอย่างที่สูงขึ้น แต่ N-A-S-H จะเกิดการพัฒนาและให้กำลังอัดสูงที่ระยะการบ่ม 28 วัน

4. แม้ C-S-H และ N-A-S-H จะมีผลต่อกำลังอัดทั้ง 2 ปฏิกิริยา แต่พบว่าปฏิกิริยาที่สามารถทำให้ตัวอย่างรับกำลังหลังจากสถานะ Soaked ได้คือตัวอย่างที่มีโครงสร้างของ N-A-S-H ที่มากกว่า และตัวอย่างมีกำลังอัดที่สูงขึ้นตามปริมาณ N-A-S-H ที่มากขึ้น

6.3 ผลทดสอบองค์ประกอบของธาตุ

การทดสอบองค์ประกอบธาตุที่แตกต่างกันหลังจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรซินด้วยวิธี XRF โดยตารางที่ 6-1 แสดงอัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำ ตารางที่ 6-2 แสดงอัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ และตารางที่ 6-3 แสดงอัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ โดยองค์ประกอบธาตุที่ได้รับความสนใจได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , CaO และ Na_2O ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิด C-S-H และ N-A-S-H ผลทดสอบตารางที่ 6-1 ถึง 6-3 มีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันนักโดยมีจำนวน SiO_2 , Al_2O_3 , CaO และ Na_2O แต่ละอัตราส่วนใกล้เคียงกัน จำนวน SiO_2 (45.30-47.80), (45.80-47.90) และ(43.90-45.00) จำนวน Al_2O_3 (19.10-19.50), (18.6-19.20) และ(17.50-18.00) จำนวน CaO (10.90-10.70), (9.80-10.60) และ(10.90-12.20) และจำนวน Na_2O (1.55-1.64), (4.07-5.07) และ(5.05-6.98) ซึ่งอัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำ และอัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทั้งสองอัตราส่วนนี้พบปริมาณ CaO ใน % ที่สูงกว่าอัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ เนื่องจาก CaO นั้นทำปฏิกิริยากับน้ำและสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทำให้ CaO ที่ชะได้จากเถ้าลอยนั้นตกผลึกลง จึงพบ CaO มากกว่าสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ส่วนอัตราส่วนเกิดสารประกอบ N-A-S-H สำหรับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรซินได้แก่ อัตราส่วนที่ผสมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 และ 8 โมลาร์ ทั้งสองอัตราส่วนนี้จึงพบปริมาณ Na_2O ใน % ที่สูง อัตราส่วนที่ผสมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มีความสามารถในการชะซิลิกาและอะลูมินาที่สูงทำให้ % SiO_2 และ Al_2O_3 ที่เหลืออยู่มี % ที่ต่ำกว่าอัตราส่วนที่ผสมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์

ตารางที่ 6-1 องค์ประกอบธาตุของอัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำ

องค์ประกอบธาตุ	OAC00647	OAC006428
SiO ₂	45.30	47.80
Al ₂ O ₃	19.10	19.50
Fe ₂ O ₃	7.81	7.68
CaO	10.90	10.70
K ₂ O	3.06	2.97
Na ₂ O	1.55	1.64
Cl	0.89	1.00
MgO	1.85	2.10
SO ₃	3.42	3.52

ตารางที่ 6-2 อัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์

องค์ประกอบธาตุ (%)	OAC501647	OAC5016428	OAC5016427RE	OAC5016428RE
SiO ₂	47.70	47.00	45.80	47.90
Al ₂ O ₃	18.90	18.60	18.80	19.20
Fe ₂ O ₃	7.57	7.29	7.42	7.28
CaO	10.60	10.1	10.20	9.80
K ₂ O	2.93	2.98	2.91	2.98
Na ₂ O	4.07	4.15	5.05	5.07
Cl	1.14	1.20	1.41	1.36
MgO	1.81	1.78	1.86	1.87
SO ₃	2.41	2.42	2.56	2.47

ตารางที่ 6-3 อัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์

องค์ประกอบธาตุ (%)	OAC801647	OAC8016428	OAC8016427RE	OAC8016428RE
SiO ₂	43.90	44.10	45.00	45.00
Al ₂ O ₃	18.00	17.50	17.70	17.70
Fe ₂ O ₃	8.17	7.74	7.81	7.58
CaO	12.20	11.60	11.30	10.90
K ₂ O	2.70	2.81	2.78	2.77
Na ₂ O	6.40	6.18	5.05	6.98
Cl	1.13	1.07	1.52	1.54
MgO	1.97	1.80	1.85	1.87
SO ₃	3.38	3.29	3.03	3.02

สรุปผลทดสอบองค์ประกอบของธาตุ

ปริมาณธาตุที่ C-S-H และ N-A-S-H ต้องการสำหรับการทำปฏิกิริยาได้แก่ SiO_2 และ CaO สำหรับการสร้าง C-S-H และธาตุ SiO_2 , Al_2O_3 และ Na_2O สำหรับการสร้าง N-A-S-H การแสดงองค์ประกอบธาตุสำหรับการสร้าง C-S-H และ N-A-S-H ในอัตราส่วนที่ผสม NaOH จะมีปริมาณธาตุโดยขึ้นอยู่กับปริมาณ NaOH และความเข้มข้น ซึ่งสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ สามารถชะ SiO_2 , Al_2O_3 ได้มากกว่าสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ แต่จะทำให้ชะ CaO และตกผลึกเสียก่อนจะสามารถทำปฏิกิริยาต่อได้ จึงทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์

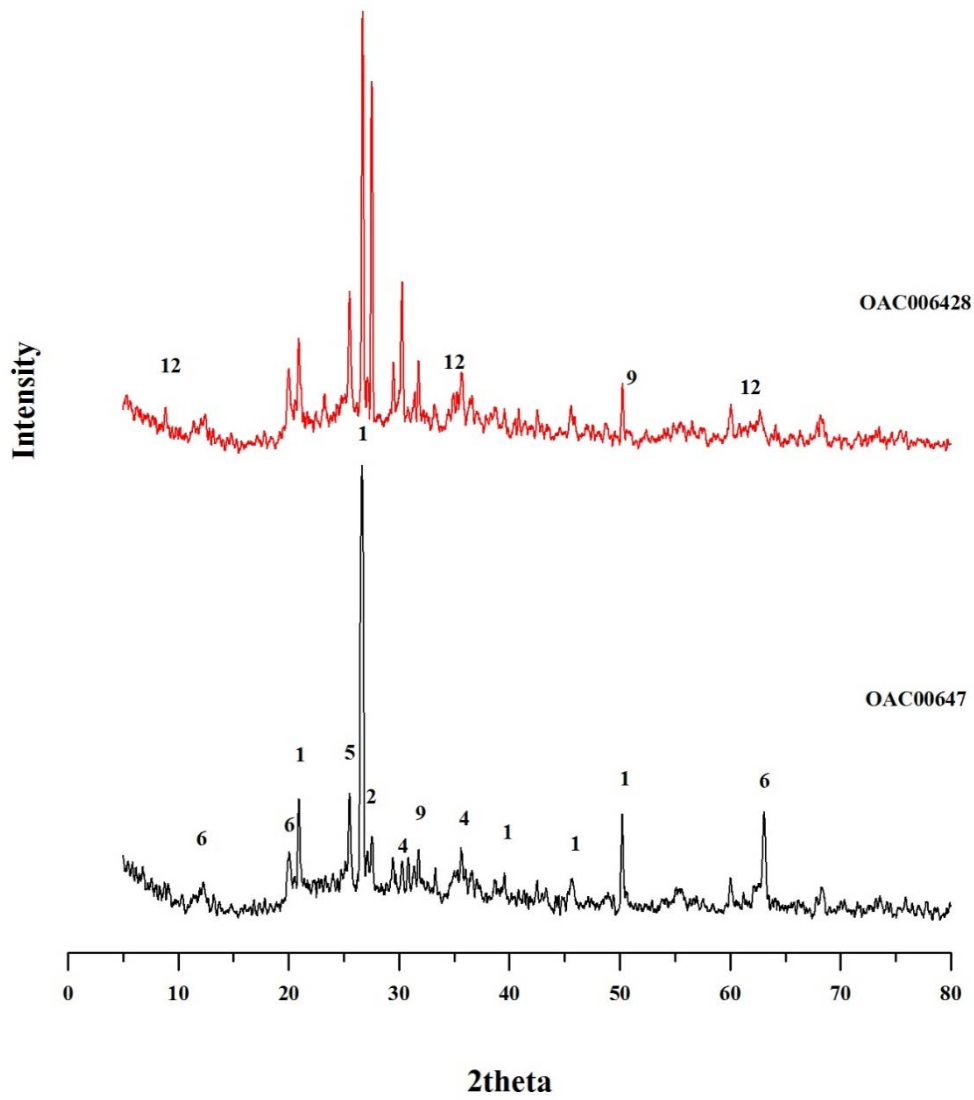
6.4 ผลการตรวจสอบความเป็นผลึกของโครงสร้าง

การตรวจสอบผลึกของโครงสร้างด้วยวิธี XRD ผลการวิเคราะห์จะถูกบันทึกเป็นพีคในช่วงมุมต่าง ๆ พีคกว้างแสดงถึงความเป็นอสัณฐาน ส่วนพีคแหลมแสดงถึงความเป็นผลึกของวัสดุ (อุบลลักษณ์, 2560) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกก่อนและหลังการเข้าปฏิกิริยาของสารละลาย NaOH แสดงในรูปที่ 6-3 (a-c) อัตราส่วนที่ถูกผสมด้วยน้ำเปล่า, ผสมด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 และ 8 โมลาร์ ตามลำดับ แสดงผลของรูปแบบการจัดเรียงตัวที่คล้ายคลึงกันทั้งอัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำเปล่าและอัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH โดยพบว่ามีลักษณะเป็นพีคแหลม และเมื่อเทียบพีคการจัดเรียงตัวจะพบว่าการจัดเรียงตัวคล้ายกันกับดินตะกอนทะเล ดังนั้นพีคแหลมเหล่านี้จึงมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น Quartz จากการผสมด้วยดินตะกอนทะเลถึง 60 % ลักษณะดังกล่าวจึงทำให้ตัวอย่างทั้งหมดมีความเป็น Crystallinity สูง อย่างไรก็ตามแม้ว่าการจัดเรียงตัวของแต่ละอัตราส่วนจะบ่งชี้ว่ามีความเป็น Crystallinity สูง แต่พบว่ามีองค์ประกอบของแร่อื่น ๆ อีกจำนวนมากที่เป็นผลจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรซิน และปฏิกิริยาไฮเดรชัน แร่ต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกแสดงในรูปแบบของตัวเลขภายในภาพแสดงผล XRD ของแต่ละอัตราส่วนได้แก่

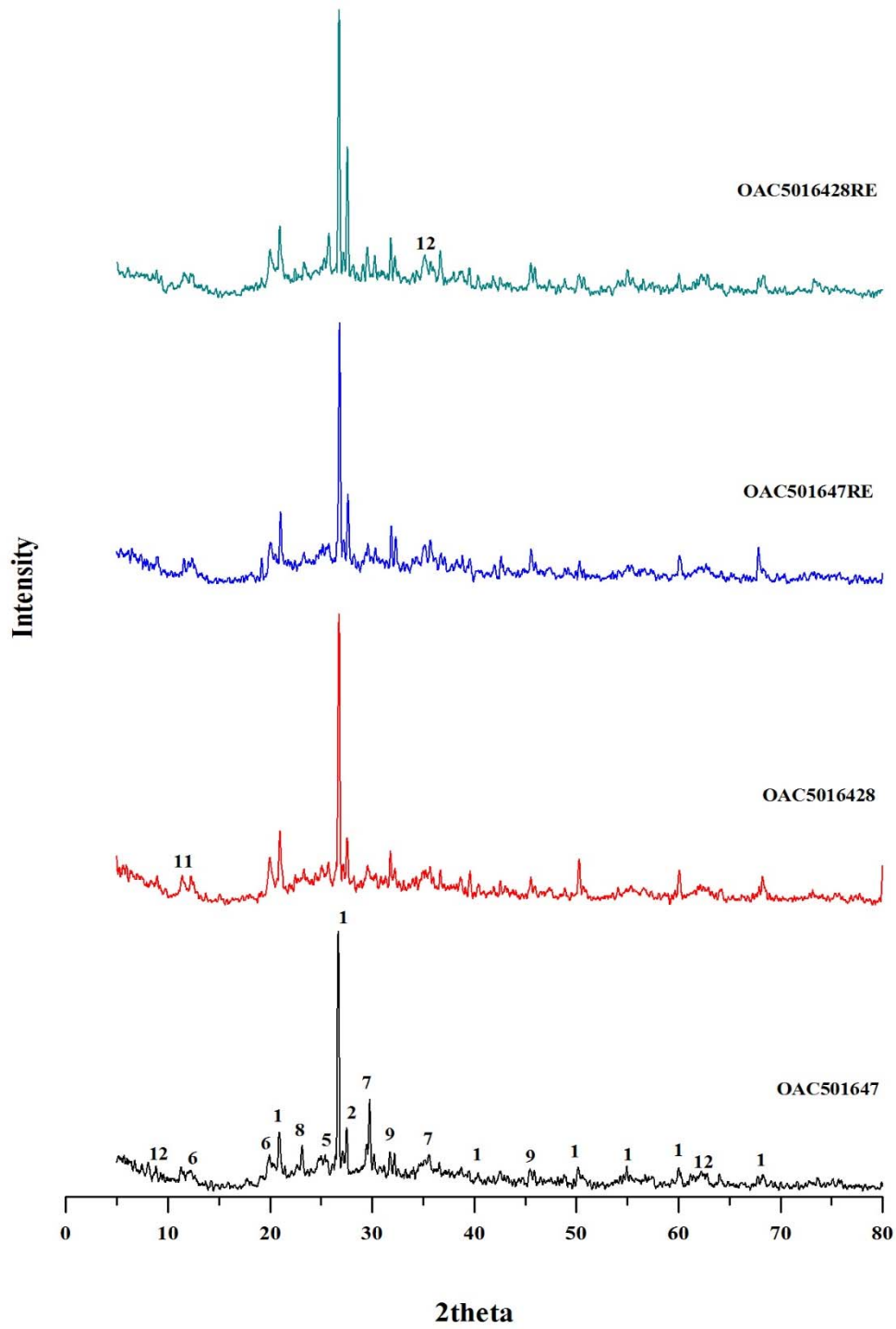
- | | |
|------------------------------|--|
| 1. Quartz | 7. Diopside |
| 2. Microcline | 8. Calcium sulfate |
| 3. Calcite magnesium | 9. Calcium silicate |
| 4. Sodium magnesium silicate | 10. Mayenite |
| 5. Anhydrite | 11. Sodium Hydrogen Silicate Hydroxide |
| 6. Halloysite | 12. Illite |
| | 13. Almandine |

โดยพีคของ Quartz อยู่ที่บริเวณ 21° , 26.7° , 36.6° , 39.5° , 50.1° และ 60° นอกจาก Quartz ยังมีพีคที่มีความเป็นผลึกที่ค่อนข้างชัดเจนคือพีคของ Microcline อยู่ที่บริเวณ 27.5° , 41.8° และ 50.6° พีคสองประเภทนี้ค่อนข้างโดดเด่นซึ่งเกิดขึ้นทุกอัตราส่วน และโดยรวมจะสังเกตได้ว่าทุกอัตราส่วนมีการจัดเรียงตัวที่เป็นพีคกว้างต่ำมาก จึงเป็นไปได้ว่าอัตราส่วนที่มีพีคที่เป็น Crystallinity น้อยกว่าจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า ซึ่งจากภาพ 7-3 นั้นยังแสดงไม่ชัดเจนนัก แต่อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่อัตราส่วนทั้งหมดที่พบจากการทดสอบนี้

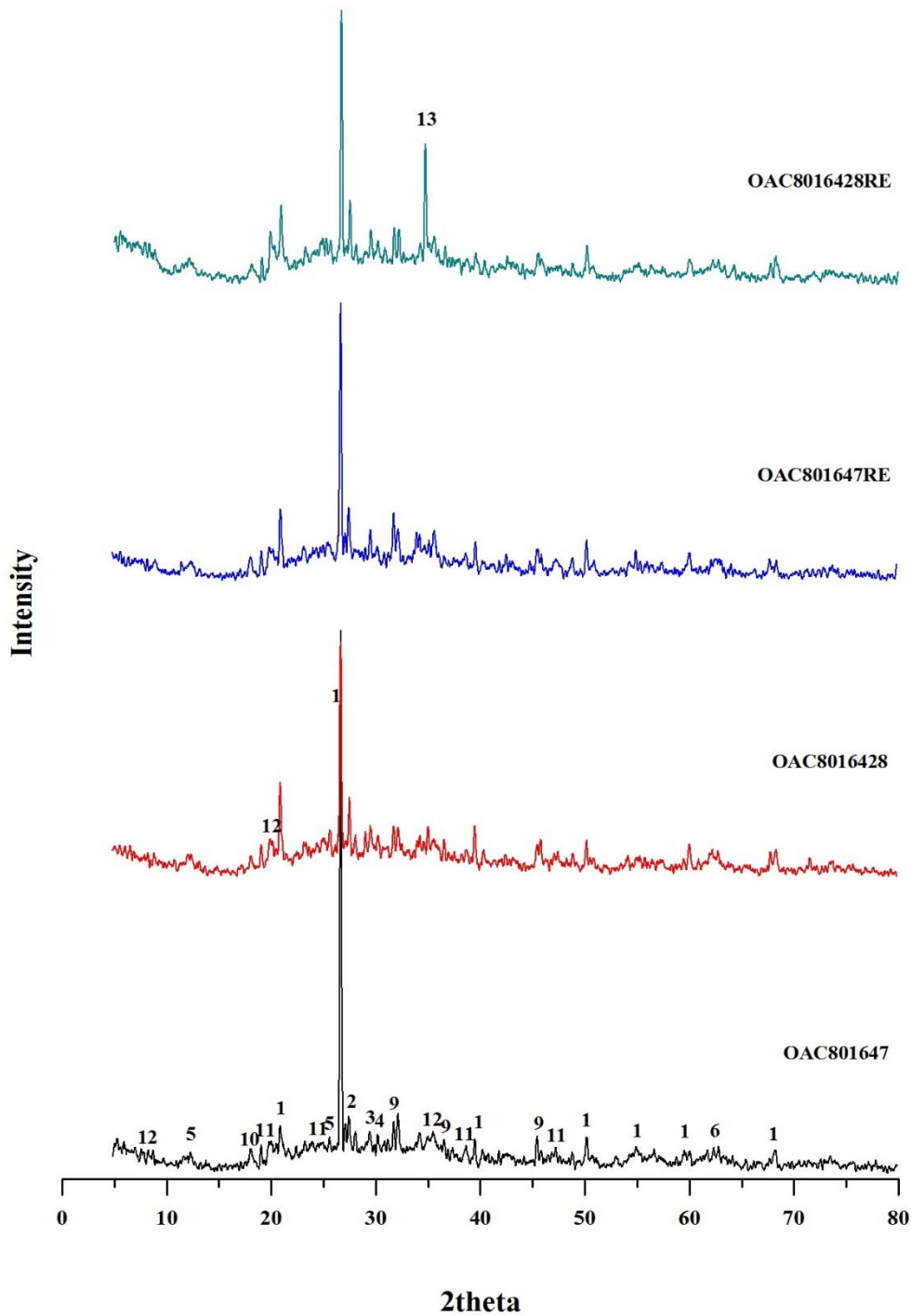
ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , CaO และ Na_2O เป็นสารประกอบจาก C-S-H และ N-A-S-H ซึ่งให้กำลังอัดแก่ตัวอย่าง



(ก)



(จ)



(ค)

รูปที่ 6-3 โครงสร้างความเป็นผลึกจากการทดสอบ XRD

สรุปผลทดสอบองค์ประกอบของธาตุ

อัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำเปล่าและอัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH มีรูปแบบการจัดเรียงตัวที่คล้ายคลึงกัน และแสดงความเป็นผลึกค่อนข้างสูงจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่เป็น Quartz และ Microcline พิกสอง

ประเภทนี้ค่อนข้างโดดเด่นและเกิดขึ้นทุกอัตราส่วน ดังนั้นค่ากำลังอัดของแต่ละอัตราส่วนนั้นจึงเกิดจากความ เป็น Crystallinity มากกว่าออสติฐาน

6.5 ผลทดสอบขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุล

การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคพบความสำคัญของ C-S-H และ N-A-S-H ซึ่งประกอบด้วย SiO_2 และ CaO สำหรับการสร้าง C-S-H และ SiO_2 , Al_2O_3 และ Na_2O สำหรับการสร้าง N-A-S-H องค์ประกอบ เหล่านี้จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มีผลให้ตัวอย่างเกิดการแตกหักจากการชะแคลเซียม มีลักษณะของร่องรอยการ Crack ที่เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกและทำให้ตัวอย่างไม่สามารถรับกำลังอัดจากการ Soaked ได้ นอกจากผลึกที่เกิดจากแคลเซียมแล้วยังมีผลึกของซิลิกาในรูปแบบของแร่ Quartz และ Microcline ซึ่งอยู่ในทุกอัตราส่วน โครงสร้างโดยรวมส่วนใหญ่จึงเป็นผลึกมากกว่าออสติฐาน อย่างไรก็ตามผลจาก C-S-H และ N-A-S-H ก็ยังสามารถทำให้ตัวอย่างรับกำลังอัดได้หลังจากสถานะ Soaked โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีโครงสร้างของ N-A-S-H ที่มากกว่า และตัวอย่างมีกำลังอัดที่สูงขึ้นตามปริมาณ N-A-S-H ที่มากขึ้นการพัฒนาปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับระยะเวลา บ่มโดยเฉพาะระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน

บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนาค่า CBR และการบวมตัวของดินจากสถานะ Soaked ได้มีเฟคเตอร์ที่สำคัญอยู่ด้วยกัน 4 เฟคเตอร์ โดยเกิดจากความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่มีต่อตัวอย่างด้วยการสร้างผลิตภัณฑ์ N-A-S-H ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของการพัฒนาค่า CBR นอกจากนี้ยังพบว่ายังมีส่วนช่วยในการลดการบวมตัวของตัวอย่าง จากการเชื่อมประสานกันที่เพียงพอ ทำให้ตัวอย่างยังคงสามารถรับกำลังแบกทานได้ดีแม้ผ่านสถานะ Soaked มาแล้วก็ตามโดยอัตราส่วนนี้ได้ให้ค่า CBR ที่สูงสุดและมีค่า Swell น้อยที่สุด ได้แก่

1. อัตราส่วนดินเหนียวต่อเถ้าลอย Soil: FA 60:40
2. อัตราส่วน Alkali activator ระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH 0:100
3. ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 โมลาร์
4. ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7

โดยอัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชั้นพื้นทางหินคลุกและหินคลุกผสมซีเมนต์ โดยมีค่า CBR ≥ 80 % คือ

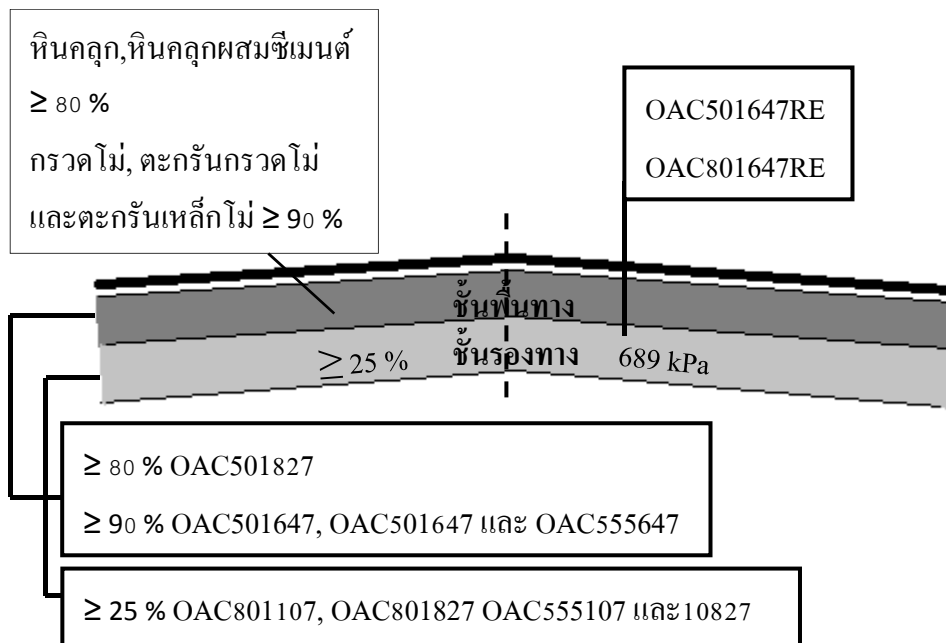
1. อัตราส่วน Soil:FA 80:20 Na_2SiO_3 : NaOH 0:100 ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน
2. อัตราส่วน Soil:FA 60:40 Na_2SiO_3 : NaOH 0:100 ที่ความเข้มข้นของ NaOH 5 และ 8 โมลาร์ ทั้งระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน
3. อัตราส่วน Soil:FA 60:40 Na_2SiO_3 : NaOH 50:50 ที่ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

ส่วนพื้นทางกรวดโมและตะกรันกรวดโม CBR มีค่าเท่ากับ ≥ 90 % คือ

1. อัตราส่วน Soil:FA 80:20 ที่อัตราส่วน Na_2SiO_3 :NaOH 0:100 ที่ความเข้มข้นของ NaOH 5 และ 8 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน
2. อัตราส่วน Soil:FA 60:40 ที่อัตราส่วน Na_2SiO_3 :NaOH 0:100 ที่ความเข้มข้นของ NaOH 5 และ 8 โมลาร์ ทั้งระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน
3. อัตราส่วน Soil:FA 60:40 Na_2SiO_3 : NaOH 50:50 ที่ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลด้วยจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยแคลเซียมสูงตามวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ด้วยการนำไปใช้เป็นวัสดุงานทาง มาตรฐานวัสดุในการทำถนนที่ครอบคลุมประเภทวัสดุแต่ละชั้นทางมากที่สุดคือ มาตรฐานจากกรมทางหลวง มาตรฐานของวัสดุที่พบคือ มาตรฐานของ CBR ประกอบไปด้วยชั้นพื้นทาง และรองพื้นทาง โดย CBR ในสถานะ Soaked มีเกณฑ์การทดสอบชั้นพื้นทางหินคลุก, หินคลุกผสมซีเมนต์ กรวดโม, ตะกรันกรวดโม และตะกรันเหล็กโม ชั้นรองพื้นทาง วัสดุมวลรวม ผลการทดสอบของ CBR ในสถานะ Soaked ผ่านเกณฑ์การทดสอบทั้งชั้นรองพื้นและชั้นพื้นทาง โดยอัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์การทดสอบจะถูกสรุปในรูปที่ 7-1

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนาค่า CBR และการบวมตัวของตัวอย่าง Soaked เกิดจากความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์เรซินที่มีต่อตัวอย่างด้วยการสร้างผลิตภัณฑ์ N-A-S-H ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของการพัฒนาค่า CBR และช่วยในการลดการบวมตัวของตัวอย่าง จากการเชื่อมประสานกันที่เพียงพอ ทำให้ตัวอย่างยังคงสามารถรับกำลังแบกทานได้ดีแม้ผ่านสภาวะ Soaked มาแล้วก็ตาม เช่นเดียวกับการทดสอบ UCS พบว่าผลกระทบต่อพัฒนาค่ากำลังอัดภายใต้สภาวะ Soaked ที่สำคัญคืออัตราส่วน Soil: FA ซึ่งจากการผลทดสอบพบว่า การเพิ่มเกลือยี่ออัตราส่วน Soil: FA 60:40 ด้วยปริมาณสารละลาย Alkali activator ที่เพียงพอ สามารถทำให้ตัวอย่างสร้างปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์เรซินได้สมบูรณ์จาก N-A-S-H ความสัมพันธ์นี้ช่วยให้ตัวอย่างทนต่อสภาวะ Soaked และรับกำลังอัดได้ดีใกล้เคียงกับสภาวะ Unsoaked การวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์เรซินทำให้เข้าใจถึงองค์ประกอบที่สำคัญต่อกำลังอัดไม่เพียงแต่ N-A-S-H ความสำคัญของ C-S-H ยังมีส่วนช่วยส่งเสริมกำลังอัดในช่วงแรกได้ดี ซึ่งประกอบด้วย SiO₂ และ CaO และสารประกอบ SiO₂, Al₂O₃ และ Na₂O สำหรับการสร้าง N-A-S-H องค์ประกอบเหล่านี้จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มีผลให้ตัวอย่างเกิดการตกผลึกจากการชะแคลเซียม มีลักษณะของร่องรอยการ Crack ที่เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกและทำให้ตัวอย่างไม่สามารถรับกำลังอัดจากการ Soaked ได้ อย่างไรก็ตามโดยรวมแล้วส่วนใหญ่พบว่าโครงสร้างเป็นผลึกมากกว่าอสัณฐานนอกจากผลึกที่เกิดจากแคลเซียมแล้วยังมีผลึกของซิลิกาในรูปแบบของแร่ Quartz และ Microcline ซึ่งอยู่ในทุกอัตราส่วน อย่างไรก็ตามผลจาก C-S-H และ N-A-S-H สามารถพัฒนาปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์เรซินได้ โดยเฉพาะระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน จะทำให้ N-A-S-H พัฒนามากกว่า C-S-H ซึ่งเกิดการพัฒนาปฏิกิริยาที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



รูปที่ 8-1 อัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวง

เอกสารอ้างอิง

- Arai Y. (1991), "Construction of an artificial offshore island for the Kansai International Airport, Special lecture", GEOCOST 91, Yokohama, 1-17.
- Arulrajah A., Nikraz H., Chu J. and Bo M.W. (2009), "Instrumentation at Changi land reclamation project, Singapore". Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering 162 (1):30-40.
- Bernard F., Abriak N.E., Damidot D. (2002), "In: Recycling of sea sands in the Civil Engineering field". Dredged symposium. Dunkrik, France.
- Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. Waste Management, 29(2), 539-543.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymer: inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis, 37, 1633-1656.
- Davidovits, J. (2002). Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications. Paper presented at the Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Australia
- Dubois V., Abriak NE., Zentar R. and Ballivy G. (2009). The used of marine sediments as a pavement base material. Waste Management 29: 774-782.
- Giroud J.P. Badu-Tweneboah K. and Soderman K.L. (1997), "Comparison of leachate flow through compacted clay liners and geosynthetic clay liners in landfill liner systems". Geosynthetics International 4 (3-2), pp. 391-431
- Hamer K. and Karius V. (2002), "Brick production with dredged harbour sediments, an industrial-scale experiment". Department of Earth Sciences, Section Geochemistry and Hydrology, University of Bremen, 330440 Bremen, Germany.
- Hanson H., Brampton A., Capobianco M., Dette H.H., Hamm L., Laustrup C., Lechuga A. and Spanhoff R. (2002). "Beac nourishment projects, practices and objectives – a European overview", Coastal Engineering 47, pp. 81-111.
- Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., & Chinkulkijniwat, A. (2015). Soil Stabilisation by Calcium Carbide Residue and Fly ash. Journal of Materials in Civil Engineers, 24(2), 184-193.
- Kanda K., Suzuki S. and Yamakata N. (1991), "Offshore soil investigation at Kansai International Airport", GEOCOST 91, Yokohama, 33-38.
- Limeira J., Agullo L. and Etxeberrir M. (2010). Dredged marine sand on concrete: an experimental section of a harbor pavement. Construction Build Material 24: 863-870.
- McCaffrey, R. (2002). Climate change and the Cement Industry. Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue), 15-19.
- Nolan C. (2009), "Cover at landfills", Office of Environmental Enforcement, EPA Waste Workshop, Athlone. October 2009.

- Phetchuay C., Horpibulsuk S, Suksiripattanapong C, Chinkulkijniwat A, Arulrajah A, and Disfani M.2014. Calcium carbide residue: Alkaline activator for clay-fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials* (69)285-294.
- Phummiphon I, Horpibulsuk S, Sukmak P, Chinkulkijniwat A, Arulrajah A, and Shen S. 2015. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*. *Road Materials and Pavement Design Volume 17, 2016 - Issue 4*
- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P. (2009), Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Journal of Minerals Engineering*, 22, 1073-1078.
- Riordan J. (2008), "Feasibility of utilizing construction and demolition waste and dredged material as landfill liner". MEng Dissertation, Cork Institute of Technology.
- Sheehan, C., Harrington, J. and Murphy, J.D. (2009), "An overview of dredging and dredge material beneficial use in Ireland", *Terra et Aqua*, June issue 2009, No. 115, pp. 3-14, The Hague, Netherlands
- Sheehan C. and Harrington J. and Murphy J.D. (2010), "An environmental and economic assessment of topsoil production from dredge material", *Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 55 (2010), pp. 209-220.
- Stefan C. and Fokke S. (2013), "Investigation of Dredged Materials in Combination with Geosynthetics Used in Dike Construction", *Procedia Engineering*, 57, pp. 213-221
- Sukmak P., Horpibulsuk S, and Shen S.Chindaprasirt P, and Suksiripattanapong C. 2013. Factor influencing strength development in clay-fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials* (47)1125-1136
- Van der Wal D. (2010). "Ecological evaluation of an experimental beneficial use scheme for dredged sediment disposal in shallow tidal waters".
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., and Lorenzen, L. (1998). Factors Affecting the Immobilization of Metals in Geopolymerized Fly ash. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 29, 283-291.
- Wang H.Y. (2008), "Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt"
- Wang D., Abroak N.E. and Zentar R. (2017), "Dredge marine sediments used as novel supply of filling materials for road construction". *Marine Georesources & Geotechnology* 35, No.4, pp. 472-480
- Yi (2014)
- Zentar R., Dubois V. and Abriak NE. (2005), "Physical and mechanical behaviour dredged marine sediments". In: *Proceeding of the Third international Conference on Remediation of Contaminated Sediments*, New Orleans, Etats-Unis (LA). 24-27 January 2005.
- Zentar R., Dubois V. and Abriak A. (2008), "Mechanical behaviour and environmental impacts of the test road built with marine dredged sediments". *Ecole des Mines de DOUAI, Department of Civil & Environmental Engineering*, 941 rue Charles Bourseul, BP 10838, 59508 Douai Cedex, France.
- Zhang P. and Wu Z. (2005), "Municipal sludges as landfill barrier material". *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, Volume 2, Number 1/2005, pp. 27-32.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2560), *วัสดุซีโอโพลิเมอร์*. กรุงเทพฯ:สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย