

การปรับปรุงคุณสมบัติดินตะกอนทะเลด้วยการใช้จีโอโพลิเมอร์ถ้ำลอยเคลือบสูง

กนกเนตร ชื่นนุกุ่ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

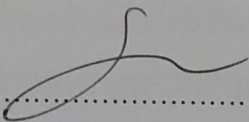
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สิงหาคม 2561

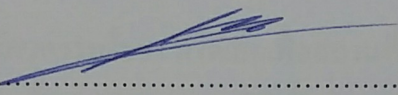
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

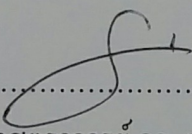
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ กนกเนตร ชื่นนกลุ่ม จบนี้แล้ว เห็นควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

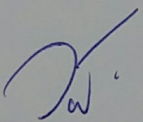
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

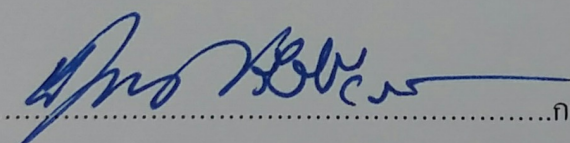
  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

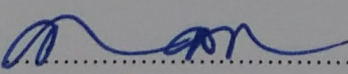
  
.....ประธาน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูลพงษ์ พงษ์วิทย์กานู)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ)

  
.....กรรมการ  
(ดร. วรรณวรงค์ รัตนานิกม)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชงชัย ศรีวิริรัตน์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา

  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 9 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2561

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ชัยศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน รวมไปถึงท่านอาจารย์อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ คณะวิทยาศาสตร์ที่ให้คำปรึกษาคำแนะนำที่เป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณ คณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ให้กับข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่มีส่วนช่วยเหลือในวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง ขอขอบคุณบริษัท ผลิตภัณฑ์คอนกรีตชลบุรี จำกัด และท่าเรือแหลมฉบัง สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลองเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์อีกทั้งขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

กนกเนตร ชื่นนกลุ่ม

56910168: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: จีโพลิเมอร์/ ดินตะกอนทะเล/ เถ้าลอย/ กำลิ่ง

กนกเนตร ชื่นนาคุ่ม: การปรับปรุงคุณสมบัติดินตะกอนทะเลด้วยการใช้จีโพลิเมอร์  
เถ้าลอยแคลเซียมสูง (STABILIZATION OF DREDGED MARINE SEDIMENTS USING HIGH  
CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์:

สยาม ยิ้มศิริ, Ph.D., 147 หน้า. ปี พ.ศ. 2561.

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำดินตะกอนทะเล (Soil) มาปรับปรุงคุณสมบัติ  
ด้วยจีโพลิเมอร์ โดยใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) เป็นสารตั้งต้นและใช้โซเดียมซิลิเกต( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารละลาย Alkali activator เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เป็น  
วัสดุงานทาง โดยศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบ California bearing ratio (CBR) ในสถานะแช่น้ำ  
และกำลิ่งอัดจากการทดสอบ Unconfined compressive strength (UCS) ในสถานะแช่น้ำ และไม่แช่น้ำ  
ผสมด้วยอัตราส่วน Soil : FA เท่ากับ 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40 ในอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH เท่ากับ  
0 : 100 50 : 50 และ 100 : 0 โดยสารละลาย NaOH มีความเข้มข้น 5 และ 8 โมลาร์ โดยตัวอย่างทั้งหมด  
จะถูกบ่มที่อุณหภูมิห้องที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน และนำมาทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี SEM/EDX  
ทดสอบองค์ประกอบธาตุ XRF ทดสอบความโครงสร้างผลึก XRD และทดสอบโครงสร้างโมเลกุล FT-IR  
ผลการทดสอบแสดงว่าปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลิ่งอัด ได้แก่ อัตราส่วน Soil : FA อัตราส่วน  
Alkali activator ความเข้มข้นสารละลาย NaOH และระยะเวลาบ่ม โดยพบว่า CBR ในสถานะแช่น้ำและ  
UCS ในสถานะไม่แช่น้ำ มีค่าการทดสอบสูงสุดที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ด้วยอัตราส่วน  
 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 โมลาร์ ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7  
ขณะเดียวกัน UCS ในสถานะแช่น้ำที่อัตราส่วนเดียวกันแต่ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน ทุกอัตราส่วนไม่สามารถ  
ให้กำลิ่งอัดได้ แต่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน ที่อัตราส่วนเดียวกันสามารถให้กำลิ่งอัดได้สูงสุด ซึ่งจากผลทดสอบ  
UCS นี้ไม่ผ่านข้อกำหนดชั้นพื้นทางและรองพื้นทางตามเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง จึงทำการปรับปรุง  
อัตราส่วนด้วยการเพิ่มสารละลาย Alkali activator ไปอีก 3% พบว่าอัตราส่วนดังกล่าวยังคงให้ค่ากำลิ่งอัด  
สูงสุด โดยระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน ในสถานะแช่น้ำ สามารถให้กำลิ่งอัดได้ และผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นรอง  
พื้นทางกรมทางหลวง แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน นั้นให้ค่ากำลิ่งอัดสูงที่กว่า สาเหตุเป็นเพราะ  
ปฏิกิริยาจีโพลิเมอเรชันของ N-A-S-H ที่ต้องการการพัฒนาปฏิกิริยาถึงระยะเวลา 28 วัน เพื่อให้  
ตัวอย่างเชื่อมประสานทนต่อภาวะการแช่น้ำและปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C-S-H ซึ่งเร่งการพัฒนากำลิ่งใน  
ระยะเวลาบ่ม 7 วัน โดยผลจากการทดสอบ SEM/EDX XRF XRD และ FT-IR บ่งชี้ถึงส่วนประกอบ  
ของ N-A-S-H และ C-S-H ในตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตามยังคงพบการเกิดปฏิกิริยาจีโพลิเมอเรชันเล็กน้อย  
โดยผลการทดสอบมีความคล้ายคลึงกันทั้งตัวอย่างที่ได้จากอัตราส่วนเดิมและอัตราส่วนที่ถูกปรับปรุงใหม่

56910168: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M. Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: GEOPOLYMER/ DREDGED MARINE SEDIMENTS/ FLY ASH/ STRENGTH

KANOKNET KUENNOKKHUM: STABILIZATION OF DREDGED MARINE  
SEDIMENTS USING HIGH CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER.

ADVISORY COMMITTEE: SIAM YIMSIRI, Ph.D. 147 P. 2018.

This research studies a possibility of improving a dredged soil by geopolymerization process to be used as a highway material. The geopolymerization process uses a fly ash (FA) as a precursor and a mixture of sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and sodium alkali (NaOH) as an alkali activator. The interested properties of the improved soils are (i) Compaction characteristics, (ii) California bearing ratio (CBR), and (iii) Unconfined compressive strength (UCS). The affecting factors which are investigated are (i) Soil:FA ratio (100 : 0, 80 : 20, and 60 : 40), (ii)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH ratio (0 : 100, 50 : 50, and 100 : 0), (iii) NaOH concentration (5 and 8 molar), and (iv) curing time (7 and 28 days). The resulting improved soils are also undertaken chemical analysis, i.e. SEM/EDX, (ii) XRF, (iii) XRD, and (iv) FT-IR. The study shows that all of the investigated affecting factors have an influence of resulting improved soils. At optimum alkali activator content (OAC), the soaked CBR and unsoaked UCS have their highest values at (i) Soil : FA ratio of 60 : 40, (ii)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH ratio of 0 : 100, (iii) NaOH concentration of 5 molar, and (iv) curing time of 7 days. In contrast, the soaked USC at these aforementioned conditions cannot be obtained due to sample disintegration. However, when the curing time is increased to 28 days, the soaked USC at these aforementioned conditions give maximum values but they still do not meet the highway standard values. Therefore, additional condition at OAC+3% is studied. It is found that, with a compaction condition of OAC+3%, the earlier conditions still give highest values and meet the highway standard values. The results from chemical analysis show the existence of N-A-S-H and C-S-H in the improved soils. However, there is small degree of geopolymerization reaction.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตการศึกษา.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
จีโอโพลิเมอร์.....	4
ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์.....	8
Precursors.....	8
Alkali activators.....	11
Aggregates.....	15
ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนาค่า USC ของดินเหนียว-แก้วลอยจีโอโพลิเมอร์.....	17
อัตราส่วนแก้วลอยต่อดินเหนียว.....	17
อัตราส่วน Alkali activator.....	19
สภาวะความร้อนและระยะเวลาการบ่ม.....	22
Molding moisture content.....	25
การวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์.....	26
Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy dispersive x-ray spectrometer (EDX หรือ EDS).....	26
X-ray fluorescence (XRF).....	27
Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR).....	29

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
X-ray diffraction (XRD).....	30
มาตรฐานวัสดุงานทาง.....	31
ปัจจัยที่ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
3 วัสดุ และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	45
บทนำ.....	45
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	45
ดินตะกอนทะเล.....	45
เถ้าลอย.....	48
Alkali activator.....	51
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	52
ปัจจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์จากดินตะกอนทะเล-เถ้าลอย.....	52
ขั้นตอนการทดสอบ.....	52
4 ผลทดสอบ Compaction ของการปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วยจีโอโพลิเมอร์.....	54
ผลทดสอบ Compaction ของอัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์.....	57
5 ผลทดสอบ California bearing ratio, CBR ของการปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วย จีโอโพลิเมอร์ภายใต้สภาวะแช่น้ำ (Soaked).....	63
การเตรียมตัวอย่าง CBR ในสภาวะ Soak.....	63
ผลการทดสอบ CBR.....	67
อัตราส่วน Soil : FA.....	71
อัตราส่วน Alkali activator.....	73
ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH.....	74
ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง.....	75
การบวมตัวจากสภาวะ Soaked ของการปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วย จีโอโพลิเมอร์.....	79
อัตราส่วน Soil : FA.....	81
อัตราส่วน Alkali activator.....	83

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH.....	84
ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง.....	84
สรุปผลการทดสอบ CBR.....	85
6 ผลการทดสอบ UCS ของการปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วยจีโอโพลิเมอร์.....	86
การเตรียมตัวอย่าง UCS ในสถานะ Unsoaked.....	86
ผลการทดสอบ UCS ในสถานะ Unsoaked.....	90
อัตราส่วน Soil : FA.....	90
อัตราส่วน Alkali activator.....	92
ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH.....	94
ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง.....	95
ผลการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง UCS ในสถานะ Unsoaked.....	97
การเตรียมตัวอย่าง UCS ในสถานะ Soaked.....	98
ผลการทดสอบ UCS ในสถานะ Soaked.....	102
สรุปผลการทดสอบ UCS.....	106
การเตรียมตัวอย่าง UCS ในสถานะ Unsoaked และ Soaked จากการออกแบบ	
อัตราส่วนใหม่.....	107
ผลการทดสอบ UCS ในสถานะ Unsoaked และ Soaked จากการออกแบบ	
อัตราส่วนใหม่.....	112
อัตราส่วน Alkali activator.....	112
ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH.....	113
ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง.....	114
ผลการสูญเสียความชื้นตัวอย่าง UCS ที่ถูกปรับปรุงใหม่ในสถานะ Unsoaked.....	115
การเปรียบเทียบตัวอย่าง UCS ที่ถูกปรับปรุงใหม่ในสถานะ Unsoaked.....	118
การเปรียบเทียบตัวอย่าง UCS ที่ถูกปรับปรุงใหม่ในสถานะ Soaked.....	119
สรุปผลการทดสอบ UCS ในสถานะ Unsoaked และ Soaked จากการออกแบบ	
อัตราส่วนใหม่.....	120



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
7 การวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์เซชัน.....	122
สรุปผลการทดสอบ โครงสร้างระดับจุลภาค.....	129
ผลการทดสอบองค์ประกอบของธาตุ.....	130
สรุปผลการทดสอบองค์ประกอบของธาตุ.....	132
ผลการตรวจสอบความเป็นผลึกของโครงสร้าง.....	132
สรุปผลการทดสอบความเป็นผลึกของโครงสร้าง.....	137
ผลการทดสอบขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุล.....	137
สรุปผลการทดสอบความเป็นผลึกของโครงสร้าง.....	140
สรุปการวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์เซชัน.....	141
8 สรุปผลการทดลอง.....	142
บรรณานุกรม.....	144
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	147

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การชะชิลิกาและอะลูมินาของดินเหนียว และเถ้าลอย.....	13
2-2 องค์ประกอบเคมีของดินเหนียว และเถ้าลอย.....	28
2-3 มาตรฐานชั้นพื้นทางกรมทางหลวง.....	32
2-4 มาตรฐานชั้นรองพื้นทางกรมทางหลวง.....	36
2-5 มาตรฐานชั้นรองพื้นทางและพื้นทางกรมทางหลวงชนบท.....	38
2-6 มาตรฐานรองพื้นทางและพื้นทางกรมโยธาธิการและผังเมือง.....	39
3-1 องค์ประกอบธาตุ XRF ของดินตะกอนทะเล และเถ้าลอย.....	50
3-2 อัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบ.....	52
4-1 ผลการทดสอบ Compaction จากสมการเส้นแนวโน้ม.....	56
4-2 OAC และ $\gamma_{d,max}$ ของอัตราส่วน Soil : FA 100 : 0.....	61
4-3 OAC และ $\gamma_{d,max}$ ของอัตราส่วน Soil : FA 80 : 20.....	61
4-4 Optimum alkali activator content และ $\gamma_{d,max}$ ของอัตราส่วน Soil : FA 60 : 40.....	62
5-1 ค่า OAC และ $\gamma_{dry,max}$ ที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน.....	63
5-2 ค่า OAC และ $\gamma_{dry,max}$ ที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน.....	64
6-1 ค่า OAC และ $\gamma_{dry,max}$ ตัวอย่าง UCS ในสภาวะ Unsoaked.....	86
6-2 ค่า OAC และ $\gamma_{dry,max}$ ตัวอย่าง UCS ในสภาวะ Soaked.....	99
6-3 ค่ากำลังอัดในสภาวะ Soaked.....	102
6-4 ค่า OAC และ $\gamma_{dry,max}$ ตัวอย่าง UCS (RE) ในสภาวะ Unsoaked.....	108
7-1 องค์ประกอบธาตุของอัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำ.....	131
7-2 อัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์.....	131
7-3 อัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์.....	132

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 ประเภทของจีโอโพลิเมอร์.....	5
2-2 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดคอนกรีตจีโอโพลิเมอริก และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.....	6
2-3 การใช้ Pyrament ในประเทศสหรัฐ เป็นวัสดุสำหรับซ่อมแซม Pavement.....	7
2-4 การใช้งานจีโอโพลิเมอร์แต่ละประเภท.....	7
2-5 การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน.....	8
2-6 การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ ไอออนซิลิเกต และอะลูมิเนียม.....	12
2-7 $\gamma_{dmax}$ และ OLC ของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์.....	14
2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะ Unsoaked ของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ต่อการ แทนที่ของเถ้าลอย.....	18
2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ต่ออัตราส่วนของ L/FA.....	19
2-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS และช่วงเวลาการบ่มตัวอย่าง.....	20
2-11 ค่ากำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ระยะการบ่ม 28 วัน.....	22
2-12 การพัฒนากำลังอัดกับความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนต่อน้ำหนัก สำหรับ ระยะบ่มของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ 7 วัน.....	23
2-13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ต่อ อุณหภูมิการบ่มทั้งสอง.....	24
2-14 SEM/EDX ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์.....	27
2-15 FTIR spectra ของถ่านหิน และจีโอโพลิเมอร์.....	30
2-16 XRD ของ (Na, K)-PSS และ K-PSS binders.....	31
2-17 รูปตัด โครงสร้างถนนผิวจราจรแบบ Asphaltic concrete.....	31
2-18 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก.....	40
2-19 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์.....	40
2-20 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางกรวดโม้.....	40
2-21 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางตะกรันเหล็กโม้.....	41
2-22 มวลคละผ่านตะแกรงแบบล้าง.....	41

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-23 ขนาดคละของวัสดุชั้นรองพื้นทาง.....	41
2-24 ขนาดคละของวัสดุชั้นทางหินคลุก.....	42
2-25 ขนาดคละของวัสดุพื้นรองทาง.....	42
2-26 ขนาดคละของวัสดุพื้นทาง.....	42
3-1 ที่ตั้งของท่าเรือแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี.....	46
3-2 ขนาดคละของเม็ดดินตะกอนทะเล และถ้ำลอย.....	49
3-3 โครงสร้างระดับจุลภาค SEM/ EDX ของ (ก) ดินตะกอนทะเลและ (ข) ถ้ำลอย.....	49
3-4 XRD ของดินตะกอนทะเล และถ้ำลอย Q (quartz) และ M (mullite).....	50
3-5 FT-IR Spectra ของดินตะกอนทะเล และถ้ำลอย.....	51
3-6 (ก) $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ และ (ข) $\text{NaOH}$ .....	51
3-7 ขั้นตอนการทดสอบ.....	53
4-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\gamma_{d,max}$ กับ Alkali activator content ที่อัตราส่วน (ก) Soil : FA 100 : 0 (ข) Soil : FA 80 : 20 และ (ค) Soil : FA 60 : 40.....	55
4-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\gamma_{d,max}$ กับ Alkali activator content จากสมการเส้นแนวโน้ม ที่อัตราส่วน (ก) Soil:FA 100 : 0 (ข) Soil:FA 80 : 20 และ (ค) Soil : FA 60 : 40.....	58
4-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) $\gamma_{d,max}$ และ (ข) OAC ที่อัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40.....	59
5-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ OAC (ก) ที่ระยะการบ่ม 7 วัน (ข) ที่ระยะการบ่ม 28 วัน.....	65
5-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ $\gamma_{d,max}$ (ก) ที่ระยะการบ่ม 7 วัน (ข) ที่ระยะการบ่ม 28 วัน.....	66
5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมน้ำต่อค่า Stress on penetration ที่ระยะการบ่ม 7 วัน (ก) อัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 (ข) อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 (ค) อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40.....	68

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมน้ำต่อค่า Stress on penetration ที่ระยะการบ่ม 28 วัน (ก) อัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 (ข) อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 (ค) อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40.....	70
5-5 (ก-จ) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Soil : FA ต่ออัตราส่วนที่ผสมน้ำเปล่า และอัตราส่วนที่ผสม Alkali activator.....	72
5-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารละลาย Alkali activator ต่อระยะการบ่ม ตัวอย่าง (ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน.....	73
5-7 (ก-ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารละลาย Soil : FA เท่ากับ 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40 ตามลำดับ ต่อระยะการบ่มที่ 7 และ 28 วัน.....	76
5-8 ความสัมพันธ์ค่า CBR ตามเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวงต่อ (ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน.....	78
5-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และค่า Swell (ก) อัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 ที่ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ข) อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 ที่ระยะการบ่ม ตัวอย่าง 7 วัน (ค) อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ที่ระยะการบ่มตัวอย่าง 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.....	79
5-10 ความสัมพันธ์ของค่า Swell ต่ออัตราส่วน Soil : FA (ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน.....	82
5-11 ความสัมพันธ์ของค่า Swell ต่อระยะการบ่มตัวอย่างของอัตราส่วน Soil : FA.....	85
6-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ OAC (ก) ระยะการบ่ม 7 วัน (ข) ที่ระยะการบ่ม 28 วัน.....	88
6-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ $\gamma_{d,max}$ (ก) ระยะการบ่ม 7 วัน (ข) ระยะการบ่ม 28 วัน.....	89
6-3 (ก-จ) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Soil : FA ต่ออัตราส่วนที่ผสมน้ำเปล่า และ อัตราส่วนที่ผสม Alkali activator.....	91

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารละลาย Alkali activator ต่อระยะการบ่มตัวอย่าง (ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน.....	93
6-5 (ก-ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารละลาย Soil : FA เท่ากับ 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40 ตามลำดับ ต่อระยะการบ่มที่ 7 และ 28 วัน.....	96
6-6 (ก-ข) ความสัมพันธ์ของการสูญเสียความชื้นของ UCS ในสถานะ Unsoaked (ก) ระยะการบ่มที่ 7 และ(ข) ระยะการบ่มที่ 28 วัน.....	97
6-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ OAC (ก) ที่ระยะการบ่ม 7 วัน (ข) ที่ระยะการบ่ม 28 วัน.....	100
6-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ $\gamma_{d,max}$ (ก) ระยะการบ่ม 7 วัน (ข) ระยะการบ่ม 28 วัน.....	101
6-9 (ก-ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Soil : FA ต่ออัตราส่วนที่ผสมน้ำเปล่า และอัตราส่วนที่ผสม Alkali activator.....	104
6-10 (ก-ข) ตัวอย่างการทดสอบ UCS ในสถานะ Soaked อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 อัตราส่วนที่ผสม Alkali activator อัตราส่วน Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 50 : 50 (ก) สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ (ข) สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์.....	105
6-11 ค่า UCS ระหว่างสถานะ Unsoaked และ Soaked อัตราส่วนผสม Alkali activator ในระยะเวลาการบ่ม 28 วัน.....	106
6-12 ค่า UCS ระหว่างสถานะ Unsoaked และ Soaked ทุกระยะเวลาการบ่ม.....	107
6-13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า OAC และ $\gamma_{d,max}$ ของการเตรียมตัวอย่าง UCS สภาวะ Unsoaked เทียบกับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ก) Alkali activator ต่อค่า OAC (ข) Alkali activator ต่อค่า $\gamma_{d,max}$ .....	109
6-14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า OAC และ $\gamma_{d,max}$ ของการเตรียมตัวอย่าง UCS สภาวะ Soaked เทียบกับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ก) Alkali activator ต่อค่า OAC (ข) Alkali activator ต่อค่า $\gamma_{d,max}$ .....	111
6-15 ความสัมพันธ์ของค่า UCS ต่ออัตราส่วน Alkali activator (ก) สภาวะ Unsoaked (ข) สภาวะ Soaked.....	113

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6-16 (ก-ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Alkali activator ต่อระยะการบ่มที่ 7 และ 28 วัน (ก) ค่า UCS ที่สภาวะ Unsoaked (ข) ค่า UCS ที่สภาวะ Soaked.....	114
6-17 (ก-ข) ความสัมพันธ์ของการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง UCS (RE) ในสภาวะ Unsoaked (ก) ระยะการบ่มที่ 7 และ(ข) ระยะการบ่มที่ 28 วัน.....	116
6-18 ค่ากำลังอัดแต่ละอัตราส่วนตามมาตรฐานกรมทางหลวง.....	117
6-19 ค่ากำลังอัดของตัวอย่าง UCS ในสภาวะ Unsoaked ระหว่าง UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC (RE) และ UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC.....	119
6-20 ค่ากำลังอัดของตัวอย่าง UCS ในสภาวะ Soaked ระหว่าง UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC (RE) และ UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC.....	120
7-1 ผังอัตราส่วนถูกนำมาวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน.....	123
7-2 โครงสร้างทางจุลภาพจากการทดสอบ SEM และ EDX.....	125
7-3 โครงสร้างความเป็นผลึกจากการทดสอบ XRD.....	134
7-4 โครงสร้างโมเลกุลจากการทดสอบ FT-IR.....	138
8-1 อัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวง.....	143

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ท่าเรือเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญของระบบการขนส่งสินค้าทางน้ำ เนื่องจากอิทธิพลของกระแสน้ำและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล จึงเกิดการทับถมกันของดินตะกอนทะเลจำนวนมากขึ้น จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาด้วยการขุดลอกอย่างสม่ำเสมอเพื่อรักษาความลึกของท่าเทียบและร่องน้ำให้เรือบรรทุกสินค้าขนาดใหญ่สามารถเข้าจอดเทียบท่าเพื่อขนส่งสินค้าได้ จึงเกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมา เนื่องจากการกำจัดวัสดุดังกล่าว ทั้งนี้ดินตะกอนทะเลภายหลังการขุดลอกถือเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่ไม่มีประโยชน์และอาจเรียกได้ว่าเป็น “ขยะทางสิ่งแวดล้อม” และวิธีการกำจัดขยะทางสิ่งแวดล้อมแบบดั้งเดิม เช่น การทิ้งในทะเลลึก ปัจจุบันถือว่ามีข้อจำกัดทางกฎหมายทั้งในและระหว่างประเทศ นอกจากนี้วิธีการกำจัดแบบอื่น เช่น การทิ้งบนบก ก็ยังคงมีข้อจำกัดทางด้านค่าดำเนินการตลอดจนปัญหาการขาดแคลนพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อใช้รองรับขยะจำนวนมาก (Dubois, Abriak, Zentar & Ballivy, 2009) ดังนั้นการจัดการขยะทางสิ่งแวดล้อมจึงถือเป็นเรื่องสำคัญ

จากปัญหาที่กล่าวมาผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดที่ว่าดินตะกอนเป็นวัสดุเหลือทิ้งของจังหวัดชลบุรี จึงมีความต้องการที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งในท้องถิ่นเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ทางด้านวิศวกรรม จึงได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์ด้านวัสดุงานทาง โดยการใช้จีโอโพลีเมอร์สำหรับปรับปรุงคุณสมบัติดินตะกอนทะเล ด้วยจีโอโพลีเมอร์มีกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ในธรรมชาติของอะลูมิเนียมซิลิเกต โดยมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิเกต และอะลูมิเนียม องค์ประกอบทั้งหมดนั้นมีอยู่ในดินตะกอนทะเล และถ้าลอย ซึ่งดินตะกอนทะเลจะถูกจัดเป็นวัสดุมวลรวม (Aggregate) ส่วนถ้าลอยจะถูกใช้เป็นสารตั้งต้น (Precursor) ในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ ด้วยถ้าลอยจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตไฟฟ้า สามารถทำปฏิกิริยากับสารกระตุ้นต่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali activator) ก่อตัวและมีความสามารถในการเชื่อมประสาน ด้วยคุณสมบัติเชิงกลในการแข็งตัวได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิปกติมีความทนทาน และมีคุณสมบัติอื่น ๆ อีกมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัดได้ เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ ทั้งนี้มีงานวิจัยที่ศึกษาการปรับคุณภาพดินด้วยซีเมนต์มาแล้วบางส่วน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติดินตะกอนทะเลด้วยจีโอโพลีเมอร์



อย่างไรก็ตามสำหรับประเทศไทย การนำจีโอโพลิเมอร์มาใช้ในการปรับปรุงดินต่าง ๆ เริ่มมีการศึกษาและวิจัยมากขึ้นเห็นได้จากการนำดินเหนียว ดินลูกรัง และดินตะกอนประปา มาศึกษาความเป็นไปได้ในการทำเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ แต่งานวิจัยที่นำดินตะกอนทะเลมาศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยใช้เป็นวัสดุการทาง (Pavement) ยังคงมีไม่มากนัก ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนทะเลทางดัชนี คุณสมบัติทางวิศวกรรม รวมไปถึงคุณสมบัติโครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมี เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบชั้นโครงสร้างทาง และสามารถประยุกต์ใช้ดินตะกอนทะเลเป็นวัสดุทางเลือกในรูปแบบของวัสดุการทางจีโอโพลิเมอร์ได้

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อนำดินตะกอนทะเลในพื้นที่จังหวัดชลบุรี มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานด้านวิศวกรรม วัสดุทั้งหมดที่ใช้เป็นวัสดุเหลือทิ้ง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
2. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำดินตะกอนทะเลมาใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์
3. ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงอัด (Unconfined compressive strength, UCS) และกำลังแบกทาน (California bearing ratio, CBR) ของดินที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยจีโอโพลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุการทาง

### ขอบเขตการศึกษา

1. ดินตะกอนทะเลที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินตะกอนจากท่าเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี
2. ภาวถาวรที่ใช้ในการศึกษาจากโรงไฟฟ้า อำเภอมะมาะ จังหวัดลำปาง
3. การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางดัชนี คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม และคุณสมบัติของโครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนทะเลและภาวถาวร
  - 3.1 คุณสมบัติทางดัชนี คือ Soil classification และ Laser diffraction technique, Specific gravity, Water content, Atterberg's limit
  - 3.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรม คือ Modified proctor compaction
  - 3.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมคือคุณสมบัติของโครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมี คือ
    - 3.3.1 Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy dispersive x-ray

3.3.2 Spectrometer (EDX หรือ EDS), X-ray fluorescence (XRF), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD) และ Thermogravimetric Analysis (TGA)

4. การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ Pavement สำหรับทุกตัวอย่าง
  - 4.1 CBR ในสถานะแช่น้ำ (Soaked)
  - 4.2 UCS ในสถานะแช่น้ำ (Soaked) และ ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)
5. Alkali activator เป็นส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ) เท่ากับ 100 : 0 50 : 50 และ 0 : 100 ที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 5 และ 8 โมลาร์ (M)
6. อัตราส่วนระหว่างส่วนผสมดินตะกอนทะเลต่อเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 100 : 0 80 : 0 และ 60 : 40
7. อุณหภูมิในการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิปกติ สำหรับทุกตัวอย่าง
8. ระยะเวลาการทดสอบตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำดินตะกอนทะเลและเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทั้งหมดมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ในงานด้านวิศวกรรม และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
2. สามารถนำดินตะกอนทะเลมาใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้
3. มีอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับ UCS และ CBR ของดินที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยจีโอโพลิเมอร์ และมีความสะดวกในการดำเนินการใช้งานด้านวัสดุการทางมากที่สุด

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

#### จีโอโพลิเมอร์

ในปี 1972 Prof. Joseph Davidovite วิศวกรเคมีชาวฝรั่งเศสได้พัฒนาวัสดุจากอนินทรีย์โพลิเมอร์ใหม่ ถูกเรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็นวัสดุที่พัฒนาจากอสัณฐาน (Amorphous) เป็นกึ่งผลึก มีโครงสร้าง 3 มิติ อะลูมิโนซิลิเกต (Silico-Aluminate) จากการสังเคราะห์เกลือในน้ำ ทำปฏิกิริยากับ NaOH ที่ 100 ถึง 150°C (Davidovite, 2002) ทำให้เกิดส่วนผสมของซีเมนต์ (Cement) จากการเกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) และแข็งตัวได้อย่างรวดเร็ว จากพื้นฐานความสัมพันธ์ของซีเมนต์ อย่างไรก็ตามนอกจาก NaOH วัสดุอะลูมิโนซิลิเกตสามารถทำปฏิกิริยากับสาร (Alkali activator) ไอออนบวกทุกประเภทรวมถึงอัลคาไลเอิร์ธ (Alkali earth) จีโอโพลิเมอร์มีการพัฒนาส่วนผสมให้มีกำลังอัดสูง สามารถต้านทานกรด แข็งตัวได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง และรับกำลังอัดได้ดีเพื่อให้สามารถใช้งานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ และสามารถทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้ การออกแบบจีโอโพลิเมอร์จึงขึ้นอยู่กับวัสดุอะลูมิโนซิลิเกต โครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน และกึ่งผลึกของประเภท

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 ประกอบไปด้วยการเชื่อมโยงระหว่างอะลูมินต (AlO<sub>4</sub>) และซิลิเกต (SiO<sub>4</sub>) กับการใช้ออกซิเจน (Oxygens) ร่วมกัน เกิดรูปร่างโมเลกุลทรงสามเหลี่ยมสี่หน้าเตตระฮีดรอน (Tetrahedral) ทั้งหมดถูกกระตุ้นด้วยสารที่ประกอบด้วยไอออนบวก (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Ba<sup>++</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) เกิดสมดุลกับไอออนลบของ Al<sub>3</sub><sup>+</sup> ใน 4-fold coordination ซึ่งโพลีไซอะเลตมีสูตรดังนี้

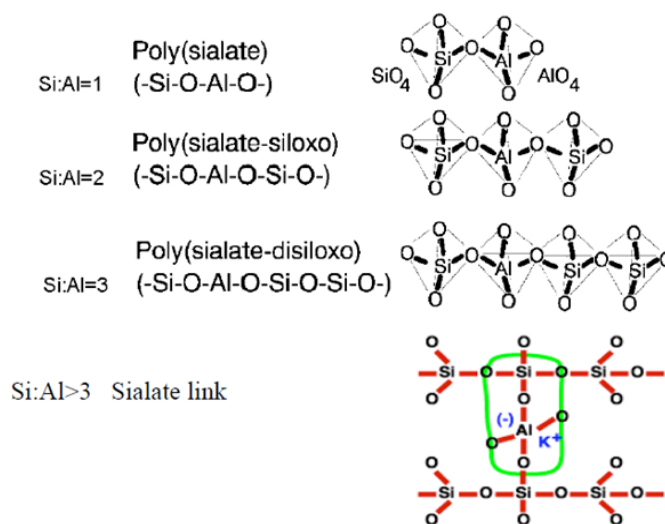


M คือ ไอออนบวก ตัวอย่างเช่น โพแทสเซียม โซเดียมหรือแคลเซียม (Calcium)

N คือ Degree of polycondensation

Z คือ จำนวนโมเลกุล 1 2 3

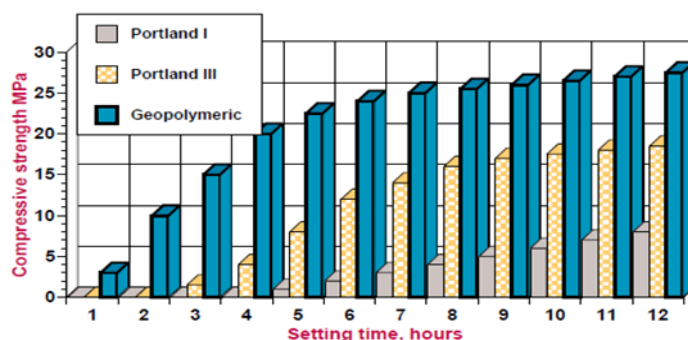
โพลิไซอะเลตเป็นห่วงโซ่ ระหว่างวงแหวนโพลิเมอร์ของ  $\text{Si}^{4+}$  และ  $\text{Al}_3^+$  ใน 4-fold coordination กับออกซิเจนแบบอสมมาตร และกึ่งแบบอสมมาตร ประเภทของจีโอโพลิเมอร์ ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 ประเภทของจีโอโพลิเมอร์ (Davidovits, 2002)

ผลการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ถูกเรียกว่า Geosynthesis (Davidovits, 2002) รูปแบบจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์มีทั้ง โครงสร้างแบบอสมมาตรหรือแบบผลึกนี้ถูกเรียกว่า ผลึกโพลิไซอะเลต และโพลิไซอะเลต ไฮดรอกโซ ซึ่งเป็นผลจากสภาวะ hydrothermal setting condition ด้วยอุณหภูมิทั่วไป โดยทั้งโครงสร้างและคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเซรามิกโดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  (Davidovits, 1991) การพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์มีขึ้นในปี 1972 และยังคงมีการดำเนินด้านการค้าอย่างต่อเนื่อง เช่น วัสดุทนความร้อนทนทานต่อไฟ ส่วนประกอบที่ทนไฟสำหรับการซ่อมแซมโครงสร้าง เสริมความแข็งแรง จีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ และคอนกรีต ไปจนถึงการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผลิตจากการผสมระหว่างจีโอโพลิเมอร์กับซีเมนต์ ถูกเปรียบเทียบค่ากำลังอัดกับคอนกรีตที่ผลิตจากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 และ 3 ก่อตัวที่อุณหภูมิห้อง ดังภาพที่ 2-2 ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่ถูกผสมด้วยจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์ (Geopolymeric) ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ถูกผสมเพียงซีเมนต์ทุกช่วงเวลา โดยพื้นฐานแล้ว จีโอโพลิเมอร์มีความสัมพันธ์คล้ายคลึงกับซีเมนต์ การเข้ามาแทนที่ซีเมนต์ของจีโอโพลิเมอร์

ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงในช่วงแรก แข็งตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง และให้กำลังอัดประมาณ 20 เมกะปาสคาล (MPa) หลังจาก 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20°C และกำลังอัดที่ 28 วัน อยู่ที่ 70 ถึง 100 MPa



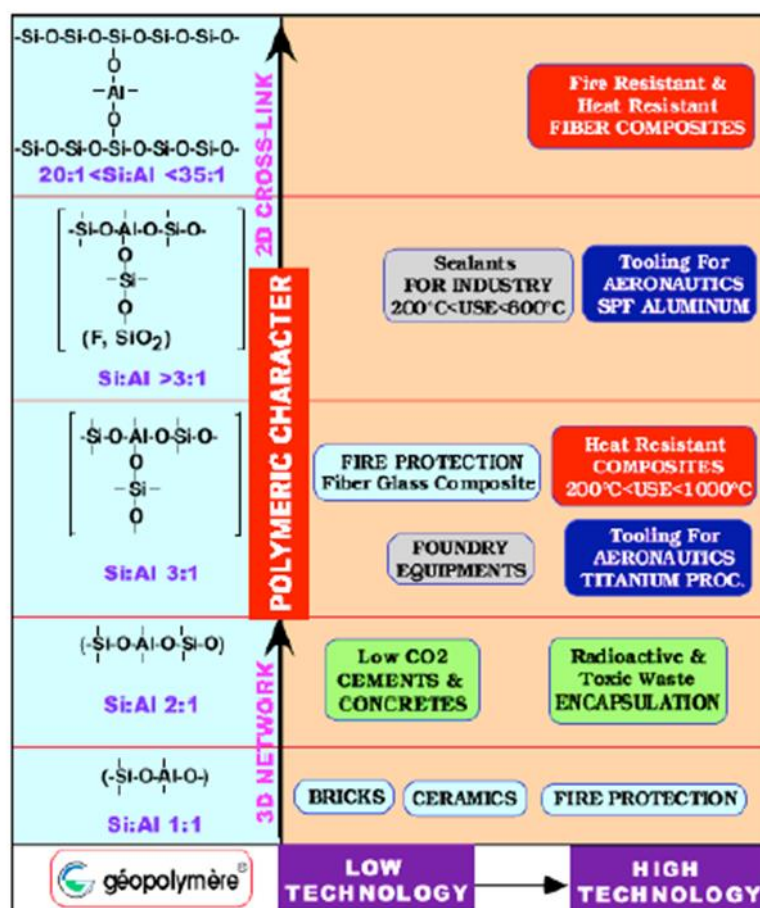
ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดคอนกรีตจีโอโพลิเมอริก และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์

(Davidovits, 1991)

Davidovits (2002) การปรับปรุงจีโอโพลิเมอริกซีเมนต์สำหรับการผลิต Precast และ prestressed concrete โดยการรักษาอุณหภูมิความร้อนซึ่งทำให้กำลังอัดพัฒนาสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ต่อมาสามารถใช้กับ Pavement ในที่ที่มีการจราจร ซึ่งการก่อสร้างนั้นก็คขวางการจราจรเพียง 4 ชั่วโมง ดังภาพที่ 2-3 และการประยุกต์ใช้สำหรับงานก่อสร้าง เทคโนโลยีใหม่ที่ประกอบด้วย จีโอโพลิเมอร์ สำหรับงานก่อสร้างสามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางในด้านการขนส่ง และโครงสร้างพื้นฐาน ระบบการซ่อมแซมสำหรับคอนกรีต อิฐ โครงสร้างดินและอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น การก่อสร้างในบริเวณที่มีแผ่นดินไหวพายุเฮอริเคน (Hurricane) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เรื่องความปลอดภัยจากความสามารถในการทนไฟมี ภาพที่ 2-4 แสดงการใช้รูปแบบ จากความสำเร็จของจีโอโพลิเมอร์แต่ละประเภทตั้งแต่ปี ค.ศ. 1979 ซึ่งสามารถออกแบบอัตราส่วน ระหว่างซิลิกาและอะลูมินาได้ตามความต้องการใช้งาน



ภาพที่ 2-3 การใช้ Pyrament ในประเทศสหรัฐ เป็นวัสดุสำหรับซ่อมแซม Pavement (Davidovits, 2002)

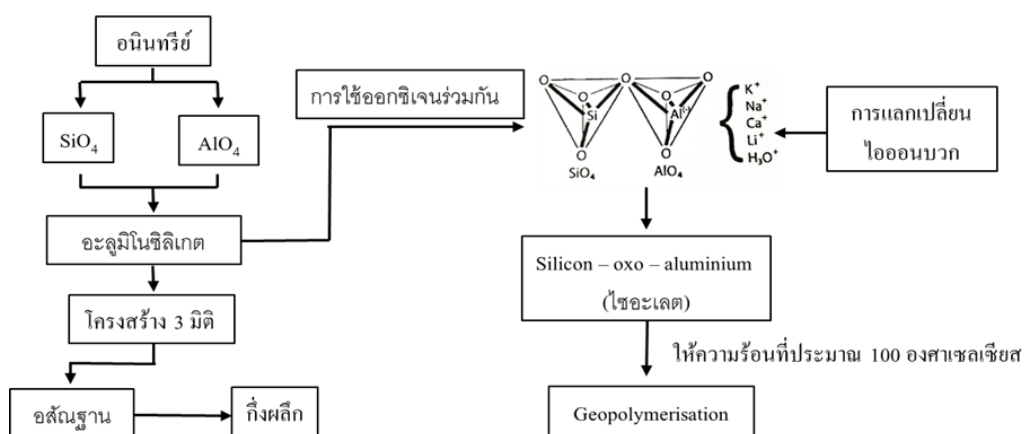


ภาพที่ 2-4 การใช้งานจีโอโพลิเมอร์แต่ละประเภท (Davidovits, 2002)

## ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์

ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ เกิดจากกระบวนการทางเคมีจีโอโพลิเมอไรเซชัน การสลายโครงสร้างอสังฐานของอะลูมิโนซิลิเกต โดยสาร Alkali activator ก่อตัวในรูปแบบของเจลที่เกิดจากการถูกสลายของซิลิกาและอะลูมินา เมื่อตัวอย่างถูกละลายเกิดภาวะ Polycondensation ภายในโครงสร้างอสังฐานหรือกิ่งผลึก และแข็งตัวจากการสังเคราะห์อะลูมิโนซิลิเกต ดังภาพที่ 2-5 ดังนั้นวัสดุที่มีโครงสร้างแบบอสังฐานหรือกิ่งผลึกจึงเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์

จากการศึกษา พบว่า โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้น (Precursors) นั้นคือ เถ้าลอย เกล็ดไนท์ และเถ้ากันเตา หรือเถ้าหนัก สาร Alkali activator เช่น สารละลาย NaOH สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ Calcium carbide residue (CCR) และวัสดุรวมรวม (Aggregate) ที่เคยได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติได้แก่ ดินเหนียว ดินตะกอนประปา และดินลูกรัง



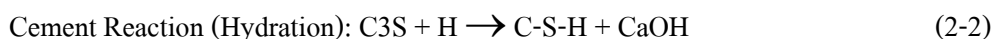
ภาพที่ 2-5 การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน

### Precursors

Precursors คือ วัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ซิลิกา และอะลูมินา และมีโครงสร้างอสังฐาน เป็นแหล่งอะลูมิโนซิลิเกตโดยธรรมชาติ เช่น เถ้าลอย เกล็ดไนท์ เถ้ากันเตาหรือเถ้าหนักเศษเซรามิก และเถ้าชานอ้อย แต่เถ้าลอยนั้นเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากกว่าในการนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานสำหรับผลิตซีเมนต์ หรือใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติดิน สารตั้งต้นทำหน้าที่เป็นวัสดุควบคุมกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ บางครั้งถูกเรียกว่า วัสดุหยาบ (Raw materials) Prime Material และ Pozzolan Material

## 1. เถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากโรงงานผลิตวัสดุนี้มีอยู่ทั่วโลกซึ่งได้มาจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ทุก ๆ ปีการบริโภคเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuels) เพื่อใช้สำหรับผลิตพลังงานและยังถูกใช้เพิ่มมากขึ้น และยังคงมีการผลิตเช่นนี้ไปอย่างน้อยจนถึงปี 2020 (Haq, Padmanabhan & Licciulli, 2014) จึงเอื้อต่อโอกาสสำหรับการใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ของเทคโนโลยีนี้ นำไปสู่ความต้องการในการจัดให้เป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งถูกนำไปใช้สำหรับการฝังกลบมูลฝอยเป็นกระบวนการกำจัดแบบสิ่งแวดล้อม เถ้าลอยจำนวนประมาณ 1.8 ล้านตันใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์ใช้แทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์อย่างน้อยกว่า 40% (Chindaprasirt, Jaturapitakkul, Chalee & Rattanasak, 2009) สำหรับการทำคอนกรีตเพื่อช่วยลดความร้อนลงจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทและความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ตามเถ้าลอยสามารถแทนที่ได้แค่เพียงบางส่วนของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จากองค์ประกอบเพียงซิลิกา และอะลูมินาที่อยู่ในเถ้าลอยเท่านั้น เนื่องจากตัวเถ้าลอยเองจะไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน และยังต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และสำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิกไปยังแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (C-A-H)



จีโอโพลิเมอร์ เริ่มถูกพัฒนาขึ้นจากการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นแหล่งวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตถูกกระตุ้นกับสารละลาย Alkali activator ที่อุณหภูมิต่ำ และบางครั้งมันถูกเรียกว่า Alkaline-activated fly ash (Rattanasak & Chindaprasirt, 2009) เมื่อแหล่งวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตมาสัมผัสกับสาร Alkali activator กระบวนการเคมีของโพลิเมอร์เซชันจึงเริ่มต้นขึ้น เกิดการระเหยซิลิเกต อะลูมินา และไฮดรอกไซด์อื่น ๆ ที่ผิวหน้าของเถ้าลอย และก่อตัวของอะลูมิโนซิลิเกตเจล นำไปสู่การแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์

อย่างไรก็ตามเถ้าลอยมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท แบ่งออกเป็นประเภท C และ F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 แต่ละประเภทมีองค์ประกอบของสารประกอบทางเคมีแตกต่างกัน โดยประเภท C และ F มีสารประกอบทางเคมีหลัก คือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็ก



ออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) มากกว่า 50% จัดเป็นเถ้าลอยประเภท C ส่วนประเภท F มีส่วนประกอบหลักดังกล่าวมากกว่า 70% เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง จัดเป็นเถ้าลอยประเภท C

## 2. เถ้าก้นเตา หรือเถ้าหนัก

ถ่านหินที่ได้จากการผลิตไฟฟ้านั้นมีปริมาณมาก และมีเถ้าอยู่หลายประเภท รวมถึงเถ้าก้นเตา (Bottom ash) เถ้าก้นเตาเต็มไปด้วยองค์ประกอบของซิลิกา และอะลูมินา เป็นแหล่งวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการทำจีโอโพลีเมอร์เช่นเดียวกับเถ้าลอย อย่างไรก็ตามแม้ว่าเถ้าก้นเตา และเถ้าลอยจะมีสารประกอบเคมีที่คล้ายกัน แต่การทำปฏิกิริยาของเถ้าก้นเตาเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอย พบว่าเถ้าก้นเตามีปฏิกิริยาน้อยกว่าหรือเกือบจะไม่มีความสามารถในการใช้ผลิตจีโอโพลีเมอร์ เถ้าลอยเกิดปฏิกิริยามากและให้ผลของดีกรีจีโอโพลีเมอร์เข้มข้นสูงกว่าเถ้าก้นเตา เนื่องจากเถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคของเฟสอสัณฐานสูงกว่าเถ้าก้นเตา จึงให้กำลังอัดจีโอโพลีเมอร์ที่สูงกว่าเถ้าก้นเตา (อุบลลักษ์ณ์ รัตนศักดิ์, 2560)

## 3. ดินขาว

วัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เช่น ดินขาวเผา (Metakaolin) มีความเป็นอสัณฐานที่ประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกตที่ปราศจากน้ำ โดยการเผาของที่อุณหภูมิ 650 ถึง 900°C สามารถทำปฏิกิริยาไวกับการถูกกระตุ้นด้วยสาร Alkali activator และเป็นวัสดุหายากที่เป็นส่วนผสมในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ที่บริสุทธิ์ ตัวอย่างดินที่ถูกปรับปรุงด้วยดินขาวเผาจีโอโพลีเมอร์จะมีความเปราะน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงด้วยจีโอโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับใช้ใน Flexible pavement ถูกเลือกให้เป็นวัสดุรักษา Lean ดินเหนียวในการใช้จีโอโพลีเมอร์สร้างเสถียรภาพ เป็นต้น (Zhang, Guo, Et-Korch, Zhang & Tao, 2013) แม้ว่าดินขาวเผาจะจัดเป็นวัสดุที่มีต้นทุนต่ำ แต่พบว่าในประเทศไทยนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษเสียมากกว่า

## 4. เศษเซรามิก

ประเทศไทยมีอุตสาหกรรมเซรามิกจำนวนมาก กระบวนการผลิตมีเศษเซรามิกเกิดขึ้นจำนวนมากเนื่องจากรูปทรงของผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐานต้องนำไปทุบทำลาย จึงสามารถนำเศษเซรามิกเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเศษเซรามิกและจีโอโพลีเมอร์ ผลการทดลองพบว่าดินลูกรังที่แทนที่ด้วยเศษเซรามิก 10% และผสมกับจีโอโพลีเมอร์เฟส 25% สามารถให้กำลังอัดมากที่สุดเท่ากับ 99.105 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( $kg/cm^2$ ) (ชัชชัย อภินันท์ติยา, พานิช วุฒิพิทย และชัยรัตน์ วีระวัฒน์สุข, 2559)

## 5. เถ้าขานอ้อย

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่ปลูกอ้อยรายใหญ่ของโลก ทำให้อุตสาหกรรม

การผลิตน้ำตาอ้อยมีกากเหลือใช้จากอ้อยจำนวนมาก และก่อปัญหาทางด้านมลภาวะ เถ้าชานอ้อย เคยได้รับการวิจัยจากต่างประเทศว่ามีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับวัสดุปอชโซลาน จึงได้นำกาก เถ้าชานอ้อยมาใช้ทดแทนเถ้าลอยในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยจีโอโพลิเมอร์ โดย องค์ประกอบของเถ้าชานอ้อยพบว่ามีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับเถ้าแกลบและ เถ้าน้ำมันปาล์ม ซึ่งอยู่ในช่วง 40 ถึง 60% และรองลงมาคือ อะลูมินา 23.43% พบว่า สามารถใช้ เถ้าชานอ้อยต่อสารละลาย 50 : 45 เถ้าชานอ้อยต่อเถ้าลอย 50 : 50  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  :  $\text{NaOH}$  2.5 : 1 ที่ความเข้มข้น 16 โมลาร์ และอัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์ผสมดินเหนียวที่ 20% ให้กำลังอัดสูงสุด  $21.76 \text{ kg/cm}^2$  (สงกรานต์ คำขอด และพานิช วุฒิพฤกษ์, 2559)

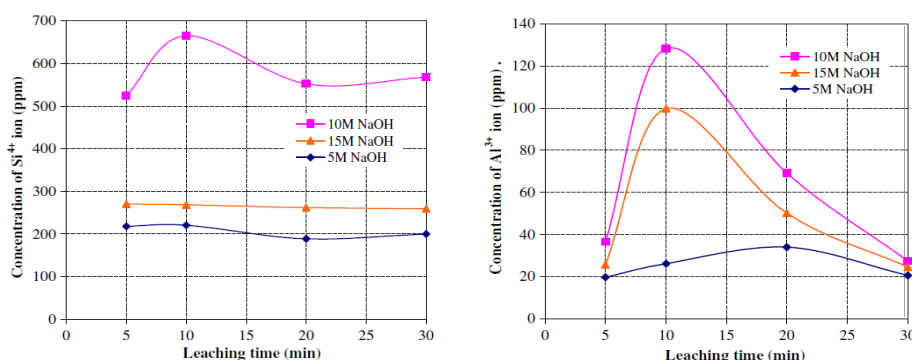
### Alkali activators

Alkali activator หรือบางครั้งถูกเรียกว่า Alkali activated, Liquid alkaline, Liquid alkaline activator และ Alkali activation ซึ่งคือ สารที่ประกอบด้วยไอออนบวก (M) ตัวอย่างเช่น โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) หรือแคลเซียม ( $\text{Ca}^{++}$ ) เมื่อสัมผัสกันจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งกันและกัน การสลายตัวของซิลิเกตและอะลูมินาที่อยู่ในเถ้าลอยจึงเริ่มต้นขึ้น ซึ่งการสลายนี้เอง จึงทำให้เกิดห่วงโซ่ของอะลูมิโนซิลิเกต สารละลายดังกล่าวที่นิยมใช้ ได้แก่  $\text{NaOH}$  ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  หรือเรียกอีกอย่างว่า น้ำแก้ว (Water glass) (Rattanasak & Chindaprasirt, 2009) ประกอบด้วยอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}$  เท่ากับ 9%  $\text{SiO}_2$  เท่ากับ 30% และ  $\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 61% ซึ่งมีหน้าที่หลักคือเป็นวัสดุเชื่อมประสาน และช่วยเสริมซิลิเกตให้เถ้าลอยหรือ Aggregate การเพิ่มขึ้นของซิลิเกตจึงเป็นการเพิ่มความสามารถในการเข้าทำละลายของ  $\text{NaOH}$  มากขึ้น เมื่อทั้งหมดรวมตัวกันจึงได้เป็นผลผลิตของจีโอโพลิเมอร์

#### 1. $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ และ $\text{NaOH}$

การเข้าสลายอนุภาคซิลิเกตและอะลูมินาในวัสดุ Precursor โดยสาร Alkali activator ด้วยการชะล้าง ไอออนของอะลูมินา และซิลิเกต โดยปกติการชะล้างไอออนดังกล่าวด้วยสารละลาย  $\text{NaOH}$  จะมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (K, Potassium) และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ความหลากหลายของประเภทความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  ส่งผลต่อการสลายตัวของอนุภาค ซิลิเกตและอะลูมินาในวัสดุ Precursor แตกต่างกันไป เหตุนี้ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  จึงเป็นเฟกเตอร์ (Factor) ที่สำคัญในการควบคุมการชะล้างอะลูมินา และซิลิกา จากอนุภาคของวัสดุ Precursor หลังจากเกิดกระบวนการจีโอโพลิเมอไรเซชัน และส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของ การแข็งตัวและการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

Rattanasak and Chindapasirt (2009) ทดสอบการชะออกจากอนุภาคของแก้วลอย หลังจากการผสมกับ NaOH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ผลการทดสอบการชะไอออนซิลิเกตแสดงค่าเฉลี่ย ความเข้มข้นของไอออน  $\text{Si}^{4+}$  และอะลูมิเนียมแสดงค่าเฉลี่ยของไอออน  $\text{Al}^{3+}$  ที่ความเข้มข้นของ NaOH ที่ 5 10 และ 15 โมลาร์ ดังภาพที่ 2-6 ขณะที่สารละลาย NaOH มาสัมผัสกับแหล่งวัสดุ อะลูมิโนซิลิเกตการชะทั้งซิลิเกต, อะลูมิเนียม และไอออนอื่น ๆ จะเริ่มต้นขึ้น ช่วงเวลาการชะที่ 10 นาที พอเพียงสำหรับการชะที่ความเข้มข้นของ NaOH ที่ 10 โมลาร์ สามารถทำการชะเอา ความเข้มข้นของไอออนซิลิเกตและความเข้มข้นของไอออนอะลูมิเนียมได้สูงกว่าเนื่องจากอยู่ใน สภาวะความเป็นเบสสูง ความเข้มข้นของ NaOH ที่ 5 โมลาร์ เนื่องจากมีสภาวะความเป็นเบสต่ำ การก่อก้อนของอะลูมิโนซิลิเกตเจลจึงต่ำ และความเข้มข้นของ NaOH ที่ 15 โมลาร์ สารละลาย NaOH ถูกลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นก้อนหนาและเหนียวหนืด นำไปสู่ การเพิ่มขึ้นของซิลิกาเจลซึ่งมีลักษณะกลมเล็กรวมเข้าด้วยกัน จากนั้นมวลเจลก่อก้อนขนาดใหญ่ขึ้น การก่อก้อนของเจลมีผลกระทบต่อ 2 สิ่ง คือ 1) การหมดไปของไอออนอย่างรวดเร็วจากการชะ อนุภาคของแก้วลอย และ 2) การทำให้สารละลาย NaOH มีความหนืดขึ้น ซึ่งเป็นผลให้การเคลื่อนที่ ของสารละลายช้าลง หลังจากการชะจำนวนไอออนที่เพียงพอของสารละลายทั้งหมดนำไปสู่ การก่อก้อนของเจลซิลิติก  $\text{Si}(\text{OH})_4$  เจลอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์  $\text{Al}(\text{OH})_3$  และอะลูมิโนซิลิเกต สำหรับอัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  ที่สูงขึ้นให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นเช่นเดียวกัน กับค่า NaOH ที่ความเข้มข้นต่ำ แต่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  สูง ที่ระยะเวลาการชะที่ 10 นาที ก็ให้ผล เป็นที่น่าพอใจสำหรับการทำอิโพลิเมอร์ ส่วน NaOH ที่ความเข้มข้นสูงอัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  มีผลไม่มากนัก จาก NaOH ที่ความเข้มข้น 10 และ 15 โมลาร์ และอัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.0 ให้ค่ากำลังอัดสูงถึง 60 ถึง 70 เมกะปาสกาล (MPa)



ภาพที่ 2-6 การเกิดปฏิกิริยาอิโพลิเมอร์เซชันความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ ไอออนซิลิเกตและอะลูมิเนียม (Rattanasak & Chindapasirt, 2009)

กระบวนการแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์ สามารถใช้เป็นวัสดุปู่อะโซลานิกทำปฏิกิริยาและถูกกระตุ้นด้วย Alkali activator เป็นการผสมระหว่างสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และสารละลาย NaOH จากข้อสรุปที่ว่า สารละลาย NaOH 10 โมลาร์ นั้นเพียงพอต่อการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์มากกว่าของ NaOH ที่ 5 และ 15 โมลาร์ ดังนั้นการทดสอบการชะ (Leaching) ซิลิกาและอะลูมินาของดินเหนียว และเถ้าลอย ถูกผสมกับ NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยใช้วิธีการทดสอบด้วย XRF เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ในตารางที่ 2-1 พบว่าค่าซิลิกาและอะลูมินาถูกชะออกสูงสุดที่ 15 นาที ผลจากการชะซิลิกาและอะลูมินาในดินเหนียวและเถ้าลอย ดินเหนียวมีพฤติกรรมการชะซิลิกาและอะลูมินา ที่อยู่ภายในอนุภาคน้อยกว่าเถ้าลอย เพราะซิลิกาและอะลูมินาในเถ้าลอยส่วนใหญ่มีรูปร่างแบบอสัณฐานหลังจากการชะที่เพียงพอของจำนวนไอออน หลังจากนั้นการก่อตัวของเจลจะเริ่มต้นขึ้น จากเจลซิลิก (Si(OH)<sub>4</sub>) และเจลอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ก่อตัวเป็นเจลอะลูมิเนียมซิลิกาเกิด ผลทำให้สารละลายหนาขึ้นและของอนุภาคไอออนเคลื่อนตัวได้ช้ากว่า (Sukmak, Horpibulsuk & Shen, 2013)

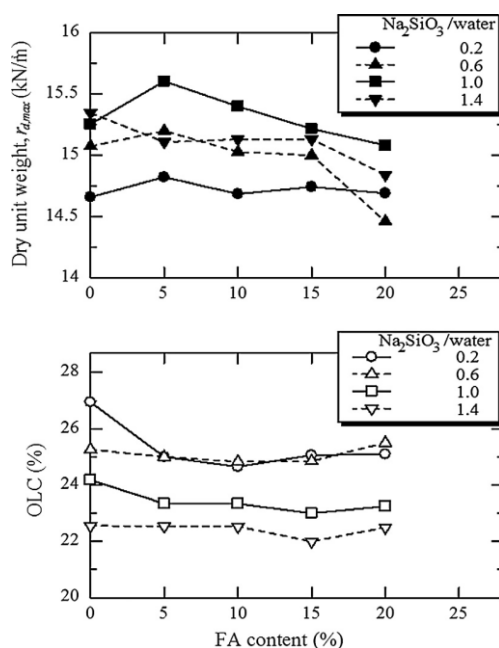
ตารางที่ 2-1 การชะซิลิกาและอะลูมินาของดินเหนียว และเถ้าลอย (Sukmak, Horpibulsuk & Shen, 2013)

Material	Leaching time (min)	Chemical composition (%)		
		Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เถ้าลอย	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
ดินเหนียว	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

## 2. Calcium carbide residue (CCR)

(Phetchuay et al., 2014) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินด้วยวิธีการผสม CCR ส่งผลต่อกำลังอัดที่มีต่อจีโอโพลิเมอร์ ด้วย CCR เป็นของเสียและผลพลอยได้จากแก๊สอะเซทิลีน ถูกใช้สร้าง

เสถียรภาพแก่ดินเหนียวทรายแป้งเนื่องจากประกอบด้วย  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  มีความสามารถในการให้กำลังอัดและมีความคงทนสูง สามารถใช้ประโยชน์เป็นสาร Alkali activator เช่นเดียวกับ NaOH ด้วยวิธีการนำดินเหนียวผสมกับ CCR และเถ้าลอยให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที และผสมสารกระตุ้น  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และน้ำ ผสมเข้าด้วยกันอีก 5 นาที โดยบ่มที่อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิห้องที่ ( $27$  ถึง  $30^\circ\text{C}$ ) โดยที่อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$  ได้จากการจำลองค่าเฉลี่ยของ Pavement subgrades ในประเทศกับภูมิอากาศเขตร้อนซึ่งรวมไปถึงประเทศไทยด้วย ทำการบดอัดด้วยวิธี Modified proctor energy ผลการทดสอบ UCS ภายใต้สภาวะ Unsoaked และ Soaked ผลการทดสอบพบว่าค่า Optimum liquid content (OLC) ของดินเหนียวผสมกับเถ้าลอยลดลงกับการเพิ่มขึ้นอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำ การลดลงของ OLC มีส่วนให้ค่า Maximum dry unit weight ( $\gamma_{\text{dmax}}$ ) เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่า OLC และ  $\gamma_{\text{dmax}}$  จึงเป็นปัจจัยหลักเหมือนกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนที่ของเถ้าลอย ค่า  $\gamma_{\text{dmax}}$  เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อน้ำจนถึงค่า Optimum ดังภาพที่ 2-7 สำหรับตัวอย่างในสภาวะ Soaked ตัวอย่างถูกจุ่มน้ำเวลา 2 ชั่วโมง ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงประเทศไทย DH-S 204/2533 (DH-S, 1990) ค่ากำลังอัดของสภาวะ Soaked ต่ำกว่าค่ากำลังอัดของสภาวะ Unsoaked สำหรับทุกส่วนผสม และสภาวะการบ่ม ค่ากำลังอัดสูงสุดสำหรับ 7 วันของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่สภาวะ Soaked พบที่ 2,154 kPa อุณหภูมิการบ่ม  $40^\circ\text{C}$  นั้นให้กำลังสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องทั้งสภาวะ Unsoaked และ Soaked



ภาพที่ 2-7  $\gamma_{\text{dmax}}$  และ OLC ของดินเหนียว-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ (Phetchuay et al., 2014)

## Aggregates

Aggregate คือ วัสดุที่นำมาใช้เป็นมวลรวมสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์หรือบางครั้งถูกเรียกว่า มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกา และ อะลูมินา เป็นแหล่งอะลูมิโนซิลิเกตโดยธรรมชาติเช่นเดียวกับวัสดุที่เป็น Precursor เช่น ดินเหนียว ดินตะกอนประปา และดินลูกรัง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติขององค์ประกอบหลักและโครงสร้างขององค์ประกอบนั้น ๆ ว่าจะมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาของกระบวนการจีโอโพลิเมอไรเซชันได้มากน้อยเพียงใด เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างแบบอสัณฐานหรือกึ่งผลึกดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่เป็นสาร Precursor ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันได้มากกว่าเพื่อเข้ามาช่วยเติมเต็ม และปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ Aggregate ให้ดีขึ้นหรือใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติดินนั้น ๆ วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็น Aggregate ได้แก่ ดินเหนียว และดินลูกรัง เนื่องจากเป็นวัสดุย่อยคุณสมบัติในทางด้านวิศวกรรม

### 1. ดินเหนียว

โดยปกติดินเหนียวแล้วถูกนำมาใช้ทำเป็นอิฐบล็อก ส่วนใหญ่นำมาจากเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยตามสถานที่ก่อสร้าง วัสดุสำหรับการก่อสร้างอิฐบล็อกเหล่านี้เป็นส่วนผสมของซีเมนต์และดินเหนียว ดังนั้นอิฐบล็อกเหล่านี้จึงไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ (การพังทลาย การบวมตัวกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่อยู่ภายใน) และดินเหนียวปนทรายแบ่งเป็นวัสดุที่ไม่เป็นที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้ดินเหนียวปนทรายแบ่งนี้จึงถูกนำมาใช้เป็น Aggregate สำหรับการผลิตดินเหนียว-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ แร่หลัก ๆ ของดินเหนียวปนทรายแบ่งคือ Quartz ซึ่งประกอบไปด้วยอะลูมิโนซิลิเกตทั้งชั้นภายในองค์ประกอบหลักก่อตัวในรูปของผลึกและภายนอกของพื้นผิวเป็นลบ ด้วยพื้นผิวที่เป็นลบจับตัวเป็นไอออนลบจำนวนมาก ทำให้จับกลุ่มกับไอออนบวกจากสารละลาย Alkali activator เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้น ดังนั้นการใส่ NaOH เพื่อทำการชะซิลิเกต และอะลูมิเนตในเฟสอสัณฐานของเถ้าลอยจึงถูกดูดซับ โดยการแลกเปลี่ยนของไอออนลบระหว่างชั้นดินเหนียวโดยการแพร่กระจายไปทั้งสองชั้นของดินเหนียว และก่อตัวเป็นไอออนิกฝังอยู่ภายในชั้นดิน เพราะเหตุนี้ดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์จึงต้องการ NaOH สำหรับการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน มากกว่าเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นค่าอัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  จึงต่ำกว่าและนั่นจึงเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์จึงจำเป็นต้องทำการผสมเถ้าลอยด้วย (Sukmak, Horpibulsuk & Shen, 2013; Sukmak, Horpibulsuk, Shen & Chindapresirt et al., 2013)

## 2. ดินตะกอนประปา

กากตะกอนที่ได้จากการผลิตน้ำประปา (Sludge lagoons) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำประปา ดินตะกอนมีสภาพที่แห้งแล้วสามารถใช้ประโยชน์ในการถมที่ดินในรัศมีโดยรอบโรงผลิตน้ำเนื่องจากปริมาณการผลิตน้ำประปายังคงมีอย่างสม่ำเสมอและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ปัญหาปริมาณดินตะกอนประปาจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระบวนการผลิตเนื่องจากลานตากตะกอนด้วยวิธีธรรมชาติของโรงผลิตมีพื้นที่จำกัดในการรองรับจึงนำมาสู่การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาผลิตวัสดุก่อสร้างรูปแบบบล็อกและอิฐก่อสร้างชนิดจีโอโพลีเมอร์โดยการผสมดินตะกอนกับสาร Alkali activator และเผาลอยโดยให้ความร้อนในปริมาณที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบค่ากำลังสูงสุดโดยประมาณที่ 20 MPa (เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์, ทิวากร ศรีจำปา และสุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2558)

เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์, สุขสันต์ หอพิบูลสุข, เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง, ภัฐพาณิช มาเจริญ และชยกฤต เพชรช่วย (2559) ได้ศึกษาการนำตะกอนดินประปา-เผาลอยจีโอโพลีเมอร์มาเคลือบผิว โดยเป็นการเพิ่มปริมาณฟองอากาศผสมเข้ากับตะกอนดินประปา-เผาลอยจีโอโพลีเมอร์เพื่อให้มวลของตัวอย่างดังกล่าวมีขนาดเบาขึ้น รับกำลังอัดได้ และผลการวิเคราะห์กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เผาลอยจีโอโพลีเมอร์ นำมาสู่แผนภูมิการออกแบบส่วนผสมภายใต้การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยอิทธิพลของหน่วยน้ำหนัก และกำลังอัด ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการประมาณปริมาณฟองอากาศและหน่วยน้ำหนักที่ต้องการ

## 3. ดินลูกรัง

จากปัญหาการนำดินลูกรังมาใช้ในการก่อสร้างคันทางของประเทศไทยมาเป็นเวลานาน จึงทำให้เป็นการทำลายธรรมชาติ ดังนั้นปัจจุบันแหล่งดินลูกรังคุณภาพดีถูกขุดค้นทำลายเหลือแต่ดินลูกรังคุณภาพแย่ การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยส่วนผสมที่ต่างกันด้วยจีโอโพลีเมอร์เพื่อศึกษาการรับกำลังแบกทานของดินตามวัฏจักรเปียกสลับแห้ง และพบว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยจีโอโพลีเมอร์ให้ความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างลดลง อย่างไรก็ตามตัวอย่างดินลูกรังที่ผสมจีโอโพลีเมอร์สามารถต้านทานกำลังที่ละจากผลกระทบของวัฏจักรเปียกสลับแห้งได้อย่างน่าพอใจ (จิตติเทพ เต่าทอง, สมิตร ส่งพิริยะกิจ, ชัยรัตน์ ชีระวัฒน์สุข และเจนจิต เอี่ยมจตุรภัทร, 2559)

## 4. ดินตะกอนทะเล

ปัจจุบันพบว่า ได้มีการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลในการกำลังอัดและวัสดุสำหรับโครงสร้างชั้นทาง แต่การใช้จีโอโพลีเมอร์ในการปรับปรุงคุณสมบัติดินตะกอนทะเลยังไม่มีการศึกษามากนัก งานวิจัยนี้จึงได้นำดินตะกอนทะเลมาใช้เป็นวัสดุ Aggregate ในการผสมสำหรับผลิตจีโอโพลีเมอร์ เพื่อศึกษาถึงการนำดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอโพลีเมอร์

ดังกล่าวไปใช้เป็นวัสดุในงานทาง โดยนำดินตะกอนทะเลมาจากบริเวณที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเรือพาณิชย์ท่าเรือแหลมฉบังเฟส 3 ตั้งอยู่ชายฝั่งตะวันออกของอ่าวไทยที่ ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ประมาณ 120 กิโลเมตร ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของกรุงเทพฯ

### **ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนาค่า USC ของดินเหนียว-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์**

ปัจจุบันได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุ Precursor และดินเหนียวเป็นวัสดุละเอียดในการพัฒนาดินเหนียว-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ โดยใช้ Alkali activator ผสมระหว่าง NaOH และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  จากอัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินเหนียว มีความต้องการอัตราส่วนของ Alkali activator ที่แตกต่างกัน การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน Alkali activator ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น แต่หากมากเกินไปความต้องการต่อการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน ในทางตรงกันข้ามก็จะทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ลดลงได้เช่นเดียวกัน สภาวะความร้อนต่อระยะเวลาการบ่มตัวอย่างและ Molding moisture content ทำให้เกิดรอยแตกภายในตัวอย่าง และจะส่งผลกระทบต่อกำลังอัดหากให้ความร้อนที่นานเกินไปความต้องการ

การศึกษาการพัฒนา กำลังอัดที่ถูกควบคุมอยู่ด้วยกัน 4 เฟคเตอร์ ได้แก่ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินเหนียว อัตราส่วน Alkali activator สภาวะความร้อนต่อระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง และ Molding moisture content

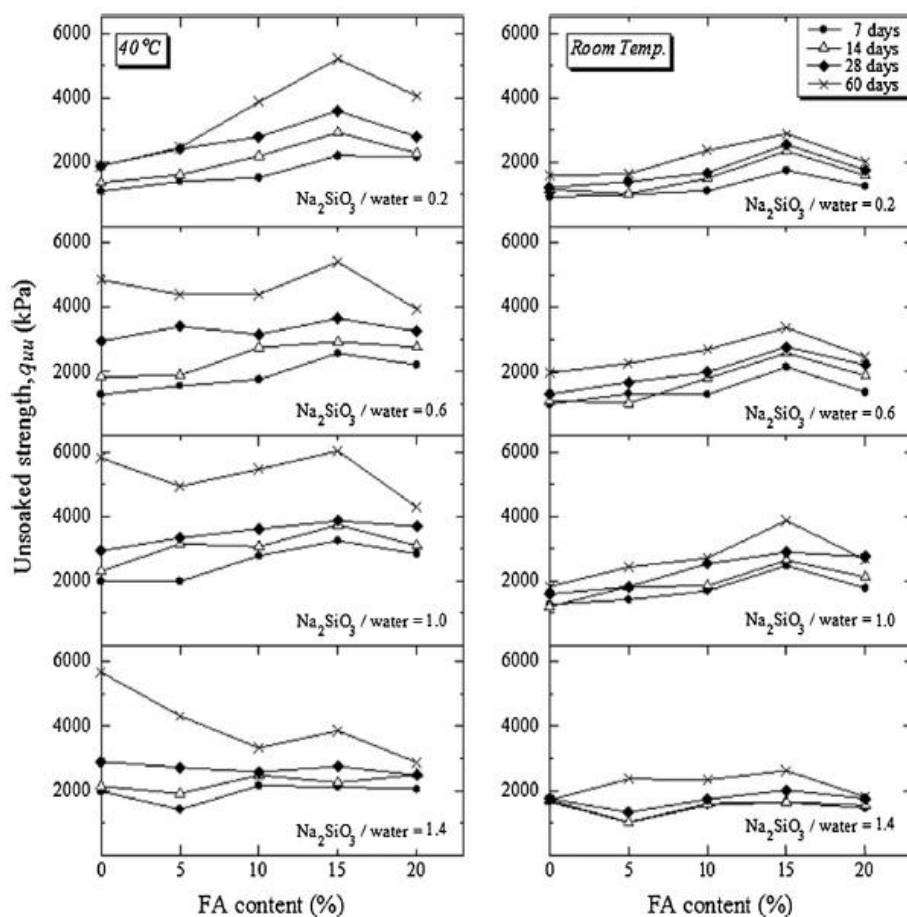
#### **อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินเหนียว**

ความแตกต่างของส่วนผสม อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.3 0.5 และ 0.7 สำหรับส่วนผสมที่ถูกพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ในการผลิตดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดินเหนียวแต่ละชั้นประกอบด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกต ทั้งภายในและภายนอกพื้นผิวเป็นลบ ถูกแสดงด้วยความสัมพันธ์ของ CEC (Cation exchange capacity) ที่สูงถึง 31.5 meq/100g ชั้นผิวที่เป็นลบ แสดงการเกาะกลุ่มของไอออนลบ และการแลกเปลี่ยนของไอออนบวก (เช่น  $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$   $\text{Ca}^+$  และ  $\text{Mg}^{2+}$ ) การแลกเปลี่ยนไอออนทำให้จำนวนชั้นผิวดินเหนียวลดลง ซึ่งก็คือ อัตราส่วนเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มของออสซิลานอะลูมิเนียมซิลิเกต และส่งผลให้สารละลาย Alkali activator (L) ลดลงจากการถูกใช้สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนบวก และเป็นการเพิ่ม Degree สำหรับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของอัตราส่วน L ต่อ FA จะลดลงเมื่อเถ้าลอยเพิ่มขึ้น (Sukmak et al., 2013; Sukmak et al., 2013)

Phetchuay et al. (2014) ได้ศึกษาความแตกต่างของส่วนผสม ที่จำนวนเถ้าลอยจาก 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนักของดินเหนียวในการผลิตดินเหนียวทรายแป้ง-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ด้วย



การใช้ CCR,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และน้ำ เป็นสาร Alkali activator ในสภาวะตัวอย่าง Unsoaked และ Soakedc  
 ดังภาพที่ 2-8 พบว่า การแทนที่ของเถ้าลอยเท่ากับ 5% และ 15% ค่า  $\gamma_{\text{dmax}}$   
 ของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ น้ำ  
 ค่ากำลังอัดสูงสุดพบที่การแทนที่ของเถ้าลอยที่ 15% การใส่เถ้าลอยมากกว่า 15% มีความเป็นไปได้  
 ที่จะไม่เกิดผลเนื่องจากเถ้าลอยที่ล้อมรอบอนุภาค CCR มากเกินไปจะทำให้ขัดขวางปฏิกิริยาเคมี  
 ระหว่างอนุภาคของ CCR และน้ำ นำมาสู่การแยกตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์  
 เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกแยกตัวออกจึงเหลือจำนวนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในการสารละลาย  
 ซิลิเกต และอะลูมินตจากเถ้าลอยน้อยลง จึงทำให้ผลการเกิดจีโอโพลิเมอร์เข้มข้นน้อยกว่า  
 อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$

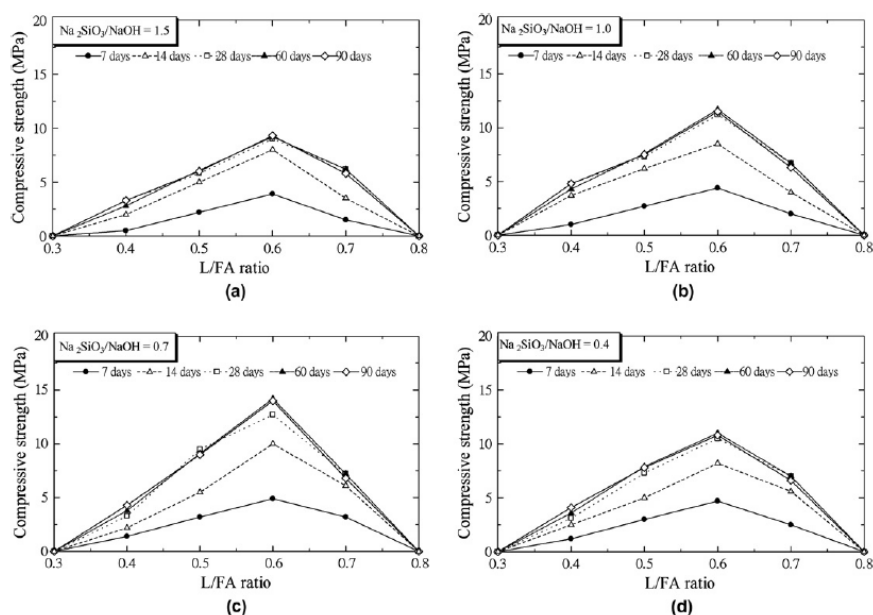


ภาพที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะ Unsoaked ของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ต่อการ  
 แทนที่ของเถ้าลอย (Phetchuay et al., 2014)

## อัตราส่วน Alkali activator

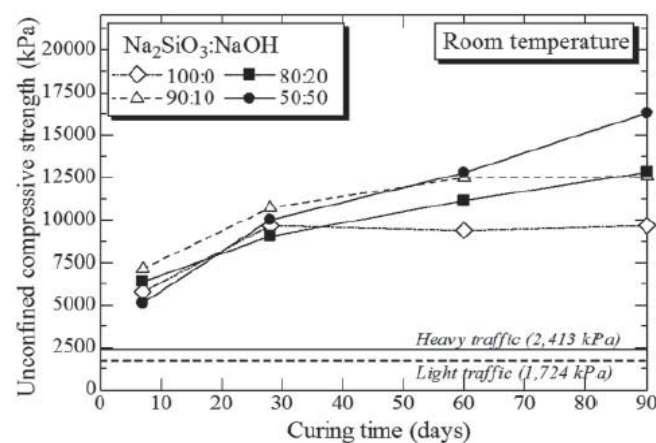
### 1. อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ : NaOH

Sukmak et al. (2013) ได้ศึกษาอิทธิพลของ Alkali activator ผสมระหว่าง NaOH และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  โดยใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH เท่ากับ 0.4 0.7 1.0 และ 1.5 โดยการทดสอบหาค่ากำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วนของ L/FA ต่าง ๆ ในตัวอย่างภาพที่ 2-9 ผลคืออัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH เท่ากับ 0.7 ถูกพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ในการผลิตดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์สำหรับทุกอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียว จากจำนวน  $\text{OH}^-$  จากสาร Alkali activator ที่มากเกินไปความต้องการสำหรับกระบวนการจีโอโพลิเมอไรเซชันทำให้ค่ากำลังอัดลดลง เนื่องจากการตกผลึกในช่วงแรกก่อนกระบวนการ Polycondensation ในจีโอโพลิเมอไรเซชัน ทำให้เกิดการแตกร้าวที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคเถ้าลอย ส่วนผลของการผสมระหว่างดินเหนียว-เถ้าลอย และดินเหนียว-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ ไม่มีความสำคัญต่อการปรับเปลี่ยนสาร Alkali activator เนื่องจากค่าดัชนีของคุณสมบัติมีความคล้ายคลึงกัน



ภาพที่ 2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ต่ออัตราส่วนของ L/FA (Sukmak, Horpibulsuk, & Shen, 2013)

Phummiphan et al. (2015) ได้ศึกษาการปรับปรุงแก้ดินลูกรังด้วยคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยประเภทแคลเซียมสูง (LS-FA geopolimer) โดยศึกษาผลกระทบของ Alkali activator และช่วงระยะเวลา ภายใต้การทดสอบ UCS และคุณลักษณะของโครงสร้างระดับจุลภาคของดินลูกรังด้วยคุณภาพที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยประเภทแคลเซียมสูง เพื่อใช้เป็นวัสดุ Pavement โดยการผสมกันของดินต่อเถ้าลอยที่อัตราส่วน 70 : 30 ผสมเข้ากับ Alkali activator ด้วยอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  :  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 100 : 0 90 : 10 80 : 20 และ 50 : 50 แต่ละอัตราส่วนของการผสมถูกนำไปทดสอบ Modified proctor energy จากนั้นนำค่า OLC และ  $\gamma_{\text{dmax}}$  ที่ได้จากการทดสอบแต่ละอัตราส่วนมาทดสอบ UCS ภายใต้สภาวะ Soaked ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ผลทดสอบ ดังภาพที่ 2-10 ผลการทดลองพบว่าการนำดินลูกรังด้วยคุณภาพมาปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยประเภทแคลเซียมสูงตามขอบเขตของวัสดุ Pavement ทั้ง Light และ Heavy traffic โดยทุกอัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  :  $\text{NaOH}$  สามารถใช้เป็นวัสดุ Pavement ได้ อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  :  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 50 : 50 เป็นอัตราส่วนที่ได้รับการแนะนำจากปฏิกิริยาการกักร้อนของ C-S-H และโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (N-A-S-H) ผลผลิตนั้นมีส่วนในการส่งเสริมค่า UCS ของจีโอโพลิเมอร์ดินลูกรังเถ้าลอย C-S-H เป็นผลจากปฏิกิริยา CaO จากเถ้าลอยและ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ขณะที่ N-A-S-H เป็นปฏิกิริยาที่ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการผลิตจีโอโพลิเมอร์



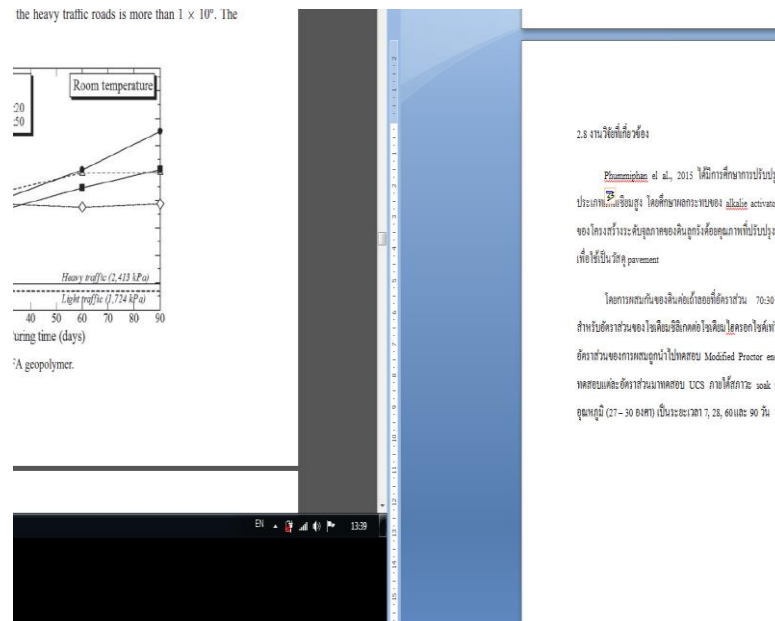
ภาพที่ 2-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS และช่วงเวลาการบ่มตัวอย่าง (Phummiphan et al., 2015)

## 2. อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ต่อ น้ำ

อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ น้ำ เท่ากับ 0.2 0.6 1.0 และ 1.4 โดยน้ำหนักของดินแห้ง ใช้ CCR กำหนดที่ 7% เป็นสาร Alkali activator ในการผลิตดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ในสภาวะ ตัวอย่าง Unsoaked และ Soaked พบว่าการพัฒนากำลังอัดของทั้งสภาวะ Soaked และ Unsoaked จะขึ้นอยู่กับจำนวน CCR และเถ้าลอย อัตราค่ากำลังอัดของสภาวะ Soaked ไปจนถึงกำลังอัดของสภาวะ Unsoaked มีความคล้ายกันเกือบจะทั้งหมดสำหรับ CCR และเถ้าลอยทุกจำนวน ค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ น้ำ เพิ่มขึ้น ไปจนถึงค่า Optimal และลดลงเมื่ออัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ น้ำ เพิ่มขึ้น สำหรับดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ น้ำ เท่ากับ 1.0 สำหรับทุกระยะเวลาการบ่มในสภาวะตัวอย่าง Unsoaked สำหรับในสภาวะตัวอย่าง Soaked อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ น้ำ เท่ากับ 1.0 นั้นแสดงค่ากำลังอัดเท่ากับ ศูนย์ ค่ากำลังอัดสูงสุดของสภาวะ Soaked พบที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ น้ำ เท่ากับ 0.6 ที่กำลังอัด 2,154 kPa อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ น้ำ ที่สูงเท่ากับ 1.4 สาร  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ที่มากเกินไปจะไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นชัดเจนบนอนุภาคของเถ้าลอย ดังนั้นตัวอย่างที่แสดงค่ากำลังอัดของสภาวะ Soaked สูงสุด อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ น้ำ เท่ากับ 0.6 ซึ่งตัวอย่างที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ น้ำ เท่ากับ 1.4 ค่ากำลังอัดเท่ากับ 0 เนื่องจากขอบเขตของการเป็นวัสดุซีเมนต์ต่ำ (Phetchuay et al., 2014)

## 3. อัตราส่วน Alkali activator ต่อ เถ้าลอย หรือ L : FA

อัตราส่วน L : FA เท่ากับ 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 ที่ ค่า Optimum ดังภาพที่ 2-11 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 อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH ที่ให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน L : FA จนถึงค่า Optimum ค่ากำลังอัดจะลดลงพร้อมกับอัตราส่วน L : FA และการลดลงของค่ากำลังอัดในอัตราส่วน L : FA ที่สูงขึ้น โดยอัตราส่วน L : FA ที่น้อยกว่า 0.3 และมากกว่า 0.8 ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดมีค่าต่ำมาก ไม่ทำให้เกิดการพัฒนา กำลังอัด เพราะจำนวนสาร Alkali activator ไม่เพียงพอในการชะลิกอน และอะลูมิเนียมในโครงสร้างเฟสอสัณฐานของเถ้าลอย และการแตกตัวของผิวหน้าของอนุภาคเถ้าลอยได้เกิดขึ้นจากการที่อะลูมิเนียมซิลิเกตเจลดน้อย และอัตราส่วน L : FA ที่สูง เป็นเพราะจำนวน  $\text{OH}^-$  จากสาร Alkali activator ที่สูงเกินความต้องการสำหรับการกระบวนการจีโอโพลิเมอไรเซชัน (Sukmak et al. 2013)



ภาพที่ 2-11 ค่ากำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอยซีโอโพลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

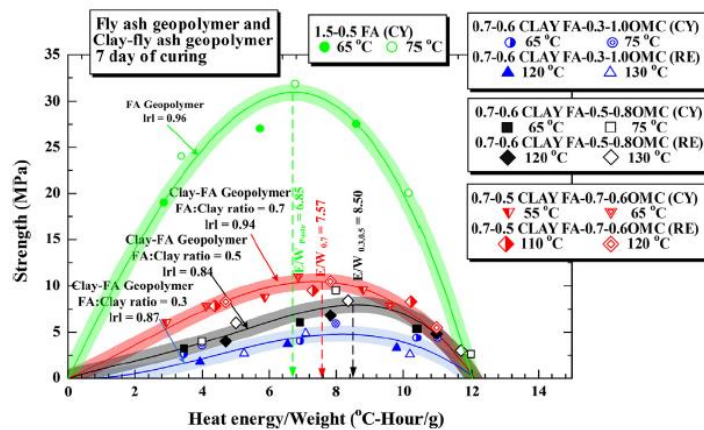
(Sukmak et al., 2013)

### สภาวะความร้อนและระยะเวลาการบ่ม

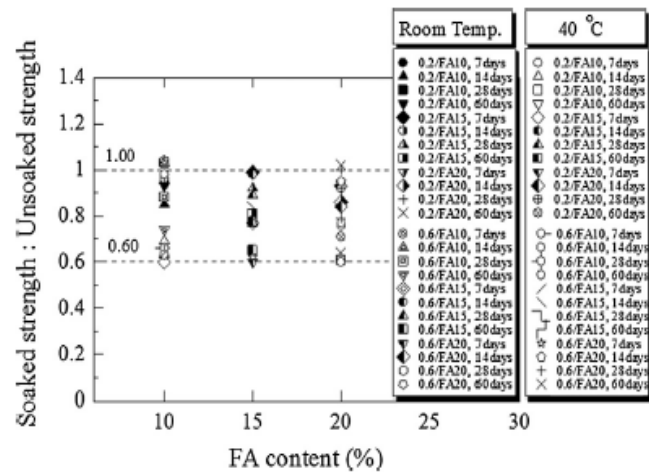
สภาวะความร้อนและระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง (การรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิและความคงทน) จากการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 27 ถึง 30°C ที่ 24 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 55 ถึง 140°C ที่ 24 ถึง 168 ชั่วโมง (7 วัน) น้ำหนักและขนาดของตัวอย่างทรงกระบอกโมลาร์ ขนาด 50 x 100 มิลลิเมตร ทรงลูกบาศก์ โมลด์ (Mold) ขนาด 230 x 90 มม. และ Mold ขนาด 230 x 75 มม. ที่ค่า Optimum (อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH, อัตราส่วนของ L : FA และ Molding moisture content) โดยไม่คำนึงถึงขนาดของตัวอย่างขนาดเล็กค่ากำลังอัดสูงสุดที่อุณหภูมิความร้อนระหว่าง 65 และ 75°C ที่ 48 ชั่วโมง ขณะที่ตัวอย่างขนาดใหญ่ถูกให้ความร้อนที่ 130°C ที่เวลา 120 ชั่วโมง ดังภาพที่ 2-12 สำหรับตัวอย่างที่ขนาดใหญ่กว่าน้ำหนักที่มากกว่า ต้องการอุณหภูมิความร้อนที่สูงกว่า สำหรับความคงทนระยะยาวสำหรับการพัฒนาซีโอโพลิเมอร์เซชัน อุณหภูมิที่ค่า Optimum สำหรับอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.3 และ 0.5 และที่อุณหภูมิ 65°C เวลา 48 ชั่วโมง สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก สำหรับที่อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.7 ซึ่งอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 55 และ 65°C สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก และที่อุณหภูมิ

ระหว่าง 110 และ 120°C สำหรับตัวอย่างขนาดใหญ่ค่ากำลังอัดของขนาดตัวอย่างทั้งคู่อายุกับระยะเวลาการบ่มค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และค่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ 60 วัน

อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงสำหรับตัวอย่างขนาดเล็กกับระยะเวลาการบ่มกับตัวอย่างที่ได้รับความร้อนสูงเกินไปเช่น 85°C และสำหรับตัวอย่างขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิ 140°C ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.3 และ 0.5 สำหรับอุณหภูมิที่สูงมากดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ได้ทนต่อการสูญเสียความชื้น การแสดงการสูญเสียความชื้นโดยหลักมาจากการเกิด Crack-free ของจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นการแห้งอย่างรวดเร็วระหว่างการบ่มควรจะหลีกเลี่ยง ในขณะที่การบ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะดีกว่าและความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดในรูปแบบที่สามารถรวบรวมบทบาทของอุณหภูมิความร้อน ความคงทน และน้ำหนักของตัวอย่างพลังงานความร้อนต่อน้ำหนัก 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 (Sukmak et al., 2013)



ภาพที่ 2-12 การพัฒนากำลังอัดกับความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนต่อน้ำหนัก สำหรับการบ่มของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ 7 วัน (Sukmak et al., 2013)



ภาพที่ 2-13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังอัดของดินเหนียว-เถ้าลอยจีโอ โพลีเมอร์ต่อ อุณหภูมิการบ่มทั้งสอง (Phetchuay et al., 2014)

Horpibulsuk, Phetchuay, & Chinkulkijniwat (2015) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพแก่ดินเหนียวด้วย CCR และเถ้าลอย เพื่อศึกษาความเป็นได้ในการใช้ CCR และเถ้าลอย มาเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ศึกษาเฟคเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Water content binder content อัตราส่วนของ CCR : FA และระยะเวลาการบ่มที่ 7 28 60 และ 120 วัน วัสดุปอชโซลานในการทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  CCR ที่มีปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  สูงกว่าสามารถบริโภคในปฏิกิริยาปอชโซลานได้ดีกว่า แต่ถ้ามักกว่า 7% ซึ่งมากเกินไปความสามารถการดูดซับของดินเหนียวดังนั้นการพัฒนาของกำลังอัดเป็นผลจาก  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่อยู่ในวัสดุปอชโซลานจำนวนมาก และวัสดุปอชโซลานแสดงบทบาทต่อการพัฒนากำลังอัดที่ระยะเวลา 28 วัน ส่วนผลกระทบของโครงสร้างระดับจุลภาคไม่มีความสำคัญต่อการพัฒนากำลังอัด

Phummiphan et al. (2015) การบ่มตัวอย่างอุณหภูมิ (27 ถึง 30°C) เป็นระยะเวลา 7 28 60 และ 90 วัน ผลทดสอบดังภาพที่ 2-10 แสดงให้เห็นว่า UCS ที่ระยะเวลา 7 วัน เป็นไปตามข้อกำหนดการจราจรแบบหนาแน่น และ UCS เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการบ่ม แม้หลังจาก 28 วัน เนื่องจากการเจริญเติบโตของผลผลิตของจีโอ โพลีเมอร์แซน (N-A-S-H) ทุกช่วงเวลา ค่า UCS สูงสุดถูกพบที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 50 : 50$  ที่ระยะเวลาการบ่ม 60 และ 90 วัน ขณะที่ระยะเวลาการบ่มนั้นมีผลมากกว่าในตัวอย่างที่ 28 วัน ค่า UCS ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 100 : 0$  เป็นอัตราส่วนพื้นฐานที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน ดีที่สุด ได้จากปฏิกิริยา

C-S-H ซึ่งเป็นผลผลิตจากวัสดุเชื่อมประสานซีเมนต์จากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาจาก  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ แคลเซียมจากเถ้าลอย เป็นการเพิ่มเจลช่วยประสานระหว่างอนุภาคดินและช่องว่างระหว่างอนุภาค ดินเข้าด้วยกัน

### Molding moisture content

(Sukmak et al., 2013) ได้ศึกษาความแตกต่างของ Molding moisture content การบดอัด ต่อปริมาณน้ำที่ได้จากการทดสอบ compaction modified proctor ระหว่าง 0.6 ถึง 1.2 OMC Molding moisture ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด คือ 1.0 OMC 0.8 OMC และ 0.6 OMC สำหรับอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินเหนียวเท่ากับ 0.3 0.5 และ 0.7 การเพิ่มขึ้นของ Molding moisture content เนื่องจากการลดลงในความเข้มข้นของสาร Alkali activator ค่า Moisture content ที่ต่ำมาก สาร Alkali activator นั้นไม่มีความสำคัญสำหรับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน เพราะนำมาจาก อนุภาคของดินเหนียวสำหรับการพัฒนาโครงสร้างดินดังนั้นจึงทำให้กำลังอัดต่ำจากการมีส่วนร่วมของ ส่วนประกอบของเคมี (จีโอโพลิเมอไรเซชัน) ลดลงกับค่า Molding moisture content ที่มากเกินไป เนื่องจากการลดลงของความเข้มข้นของสาร Alkali activator

Phetchuay et al. (2014) การทดสอบ UCS ภายใต้สภาวะ Unsoaked และ Soaked สำหรับ ตัวอย่างในสภาวะ Soak ตัวอย่างถูกจุ่มน้ำเวลา 2 ชั่วโมง ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ประเทศไทย DH-S 204/2533 (DH-S, 1990) ความสำคัญของค่ากำลังอัดในสภาวะ Soak ต่ำกว่าค่า กำลังอัดในสภาวะ Unsoaked การดูดซับของน้ำ และการทดสอบ Odometer ของตัวอย่างสภาวะ Soak พบว่าการดูดซับน้ำนั้นมีส่วนให้เกิดการบวมตัวมากขึ้นในแนวตั้งและแรงดันทำให้เกิด การบวมตัว แรงดันที่เกิดการบวมตัวนำไปสู่การเกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคดินเหนียวที่เป็น ซีเมนต์ ทำให้ค่ากำลังอัดในสภาวะ Soaked ต่ำกว่า เนื่องจากความสัมพันธ์ที่มีแรงผลัสูงและ ขอบเขตการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่ำ ตัวอย่างในสภาวะ Soaked ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อน้ำเท่ากับ 1.0 และ 1.4 แสดงค่ากำลังอัดเท่ากับศูนย์เนื่องจากขอบเขตของการเป็นวัสดุซีเมนต์ต่ำ

ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในการศึกษาการนำดินตะกอนทะเลใช้เป็นวัสดุ จีโอโพลิเมอร์ด้วยเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับเป็นวัสดุ Pavement และจากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าว มาในข้างต้นมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้เพื่อเป็นวัสดุ Pavement คือ (Phummiphon et al., 2015) และ (Phetchuay et al., 2014) ส่วนงานวิจัยอื่น ๆ เป็นการศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อกำลังอัด ซึ่งให้ ความสำคัญต่อการศึกษาเฟลคเตอร์ต่าง ๆ จึงสามารถนำค่าเฟลคเตอร์เหล่านั้นมาช่วยในการพิจารณา ถึงความสำคัญต่องานวิจัยได้โดยตรงเช่น อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ , อัตราส่วน FA : Soil อุณหภูมิต่อระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างต่อกำลังอัดความสำคัญของการทดสอบการชะ ความสำคัญ ของปฏิกิริยาการดูดซับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ตลอดจนการแลกเปลี่ยนไอออนของดินเหนียวเป็นต้น งานวิจัย



ทั้งหมดที่ใช้ศึกษานี้ล้วนแต่เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยอีโพลิเมอร์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ถูกใช้เป็นหลักในการศึกษาสำหรับวัสดุ Pavement เป็นงานวิจัยของ (Phummiphan et al., 2015) โดยมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่อยู่ในระหว่างศึกษาในเรื่องของวัตถุประสงค์และวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัย ซึ่งเป็นวัสดุประเภทที่เหลือทิ้งจากธรรมชาติ และไม่มีคุณสมบัติในการใช้งานได้ในด้านวิศวกรรม ส่วนงานวิจัยของ (Phetchuay et al., 2014) นั้นจะแตกต่างออกไปในส่วนของวัสดุที่นำมาใช้ในการทำอีโพลิเมอร์ ดังนั้นรูปแบบงานวิจัยของ (Phummiphan et al., 2015) จึงถูกนำมาใช้เป็นงานวิจัยหลักในการศึกษาครั้งนี้

### การวิเคราะห์ปฏิกิริยาอีโพลิเมอไรเซชัน

ปฏิกิริยาอีโพลิเมอไรเซชันสามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายรูปแบบตั้งแต่การวิเคราะห์ในรูปแบบภาพ องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างทั้งระหว่างก่อนและหลังจากเกิดปฏิกิริยาวิเคราะห์ปฏิกิริยาอีโพลิเมอไรเซชัน การศึกษารูปร่าง โครงสร้างระดับจุลภาคที่พื้นผิวและองค์ประกอบของสารเคมีถูกกำหนดโดยการทดสอบ Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX หรือ EDS) การศึกษาองค์ประกอบของธาตุในเชิงปริมาณ X-ray fluorescence (XRF) Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เป็นเครื่องมือใช้สำหรับการระบุขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุลพันธะ Si-O-Si และ Al-O โดยเฉพาะซึ่งใช้นิยาม Degree of polycondensation ความชื้นของอีโพลิเมอร์สามารถอนุมานได้โดยการสังเกตลักษณะการกระจายตัวจากการเอกซเรย์ของ Diffraction pattern ในสภาวะการไม่เป็นผลึกของโครงสร้างสามารถตรวจสอบได้โดย X-ray diffraction (XRD) ศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนเพื่อใช้อธิบายอัตราการระเหยของน้ำในโครงสร้างต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างภายใต้การควบคุมความร้อน Thermogravimetric Analysis (TGA) อย่างไรก็ตามการทดสอบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปฏิกิริยาอีโพลิเมอไรเซชันนั้นยังสามารถทำได้หลากหลายวิธี ซึ่งบางวิธีสามารถให้ผลการวิเคราะห์ได้ในทิศทางเดียวกัน

### Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy dispersive x-ray Spectrometer (EDX หรือ EDS)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องที่ใช้ส่องวัตถุที่มีขนาดเล็กมากโดยเพิ่มขนาดวัตถุได้ถึงสองแสนเท่า มีประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาลักษณะภายนอกของตัวอย่างให้ภาพเป็นแบบ 3 มิติสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวิทยาการแขนงต่าง ๆ ทั้งทางด้านงานวิจัย การวินิจฉัยโรค และในทางวิชาการต่าง ๆ ใช้ในการศึกษาการสะสมของธาตุซึ่งภายใน Specimen Chamber จะติดตั้ง

อุปกรณ์พิเศษ (EDAX) เพื่อตรวจหาธาตุในตัวอย่างโดยใช้หลักการของ X-ray แสดงผลในรูปแบบของตัวเลขและกราฟวิเคราะห์ปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ หลักการทำงานของ SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน โดยใช้อำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าบังคับกระแสอิเล็กตรอนให้พุ่งไปรวมกันที่จุดใดจุดหนึ่ง หลังจากลำแสงอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้แยกกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบ โครงสร้างขนาดเล็กมาก ๆ ของตัวอย่างทางชีวภาพและอนินทรีย์ที่หลากหลาย รวมทั้งจุลินทรีย์ เซลล์ชีวะ โมเลกุลขนาดใหญ่ ตัวอย่างชิ้นเนื้อ โลหะ และคริสตัล ด้านอุตสาหกรรมกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมักจะใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพและการวิเคราะห์ความชื้นเหลว ดังภาพที่ 2-14 ของการวิเคราะห์โครงสร้างแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์

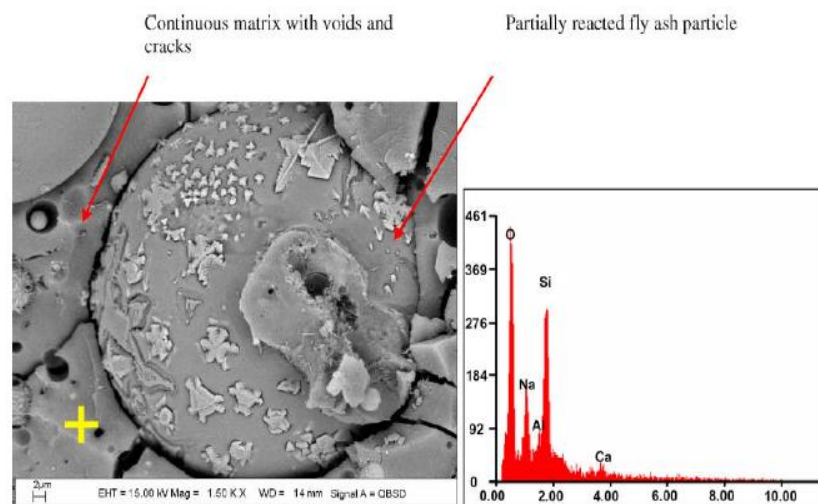


Fig. 4. SEM-EDX analysis of fly ash geopolymer.

ภาพที่ 2-14 SEM/ EDX ของแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์ (Chindapasirt et al., 2013)

### X-ray fluorescence (XRF)

เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ชนิดของธาตุ (Qualitative) และปริมาณธาตุ (Quantitative) สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และสารแขวนลอยได้ไม่ว่าจะเป็นงานด้านสิ่งแวดล้อมด้านธรณีวิทยา เช่น การวิเคราะห์แร่ดินหิน ด้านชีววิทยา ด้านการแพทย์

การตรวจวัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นพิษในน้ำมันดิบและอื่น ๆ อีกมากมายโดยไม่ทำลายตัวอย่าง มีการเตรียมตัวอย่างเพียงเล็กน้อยสามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องมีการเตรียมผิวมาก่อนก็ได้และให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วประมาณ 15 นาที โดยทั่วไปแล้วเครื่อง X-ray Spectrometer จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสี (X-ray Tube) และเครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นเมื่อ X-ray Tube เร่งอิเล็กตรอนให้มีศักย์สูงพุ่งเข้าชนกับเป้าโลหะแล้วให้รังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มสูงออกมา ทั้งนี้การเลือกชนิดของเป้าขึ้นกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ทั้งสแตน โรเดียม โมลิบดีนัม หรือโครมส่วนไอโซโทปกัมมันตรังสี ที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ Fe-55 Co-57 Cd-109 และ Am-241 เครื่องตรวจวัดแบบสถานะของแข็ง (Solid-State) เหมาะสำหรับการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของตัวอย่างซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็น Si(Li) และ HPGe ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลวข้อจำกัด คือ ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มี atomic number น้อยกว่า 11 ได้ (H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne and Na) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะออกมาในรูปแบบของจำนวนร้อยละธาตุแต่ละชนิดของตัวอย่างที่วิเคราะห์ ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบเคมีของดินเหนียว และเถ้าลอย (Phetchuay et al., 2014)

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

ND = not detected.

#### Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

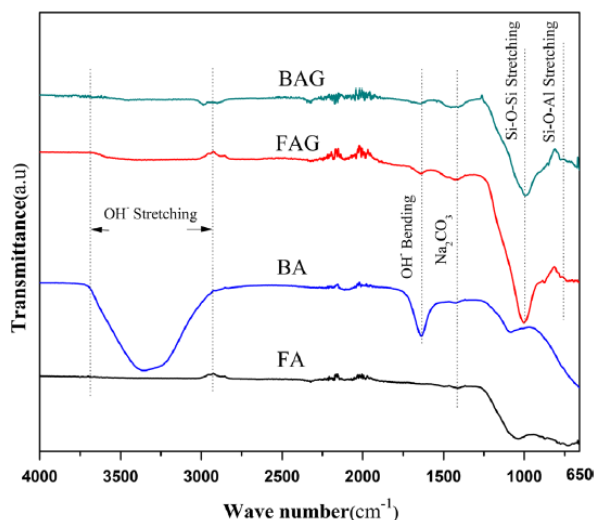
เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared light) ที่

ความยาวคลื่นต่าง ๆ เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันในสาร นิยมใช้เป็นเทคนิคสำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น สารที่วิเคราะห์อาจจะมี หมู่ hydroxyl (-OH) methyl (-CH<sub>3</sub>) หรือ carbonyl (-CO) การประยุกต์ใช้งานสามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน และวิเคราะห์หาสารที่มาปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างได้

หลักการงานรังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) (IR) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความถี่อยู่ระหว่างช่วงของรังสีไมโครเวฟและแสงที่ตามองเห็น ได้การอ้างอิงถึงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงนี้จะใช้ค่าที่เรียกว่า เวฟนัมเบอร์ (Wave number) ซึ่งมีหน่วยเป็น cm<sup>-1</sup> (Reciprocal centimeter) ซึ่งหมายถึงจำนวนคลื่นต่อหน่วยเซนติเมตร (cm.) ตัวอย่างเช่น รังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ 3,000 cm<sup>-1</sup> หมายถึง ในระยะทาง 1 cm. ที่คลื่นนี้เดินทางไปจะมีจำนวนลูกคลื่นทั้งหมด 3,000 ลูกคลื่น ดังนั้นตัวเลขยิ่งมากย่อมหมายถึงพลังงานของรังสีก็ยิ่งมากด้วยช่วงของรังสีอินฟราเรดที่เป็นประโยชน์ต่อนักเคมีจะอยู่ในช่วง 4,000 ถึง 400 cm<sup>-1</sup> กราฟที่ได้จะเรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม ช่วงการดูดกลืนช่วงกลางของสเปกตรัมตั้งแต่ 1,300 ถึง 900 cm<sup>-1</sup> ซึ่งมักเรียกกันว่าเป็นบริเวณลายนิ้วมือ (Fingerprint region) จะเป็นช่วงสเปกตรัมที่ซับซ้อน สเปกตรัมช่วงนี้จะมีประโยชน์มากเมื่อใช้ในการยืนยัน โดยการเปรียบเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิงว่าสารที่สนใจเป็นสารเดียวกันกับสารอ้างอิงหรือไม่ ดังภาพที่ 2-15 ลักษณะของผลที่ได้

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

ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบ มีดังนี้ 1) กรณีตัวอย่างเป็นของแข็ง จำเป็นจะต้องทำให้สารตัวอย่างมีลักษณะบางมาก ๆ เพื่อให้แสงผ่านได้ และ 2) กรณีตัวอย่างเป็นของเหลว สามารถนำมาใส่เซลล์สำหรับของเหลวได้

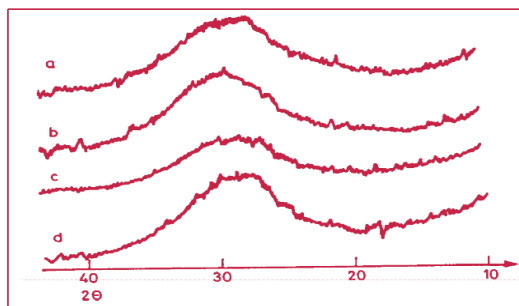


ภาพที่ 2-15 FT-IR spectra ของถ่านหิน และจีโอโพลิเมอร์ (Haq et al., 2014)

### X-ray diffraction (XRD)

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (Diffraction) หรือ เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสี X มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง โดยไม่ทำลายตัวอย่าง โดยการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสี X จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้น ของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย

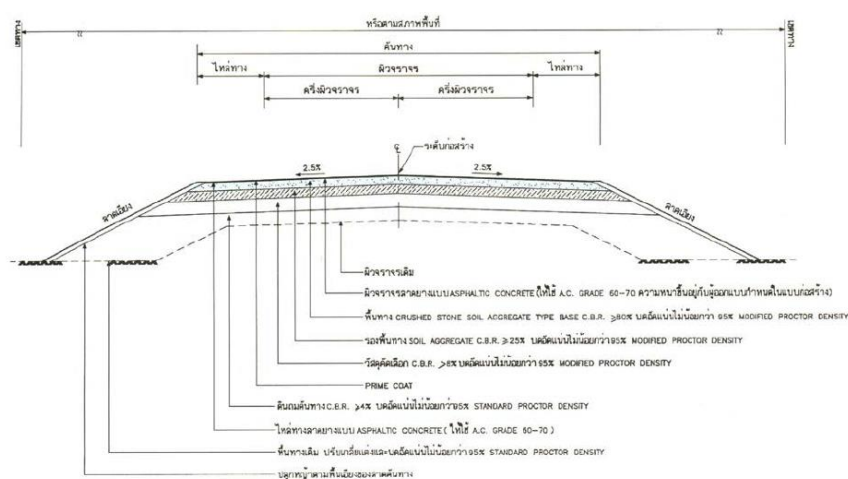
Degree ความซับซ้อนของจีโอโพลิเมอร์สามารถอนุมานได้จากลักษณะการกระจายตัวจากการเอกซเรย์ของ Diffraction pattern ในกรณีที่สภาวะไม่เป็นผลึกผลจากการเอกซเรย์ X-ray diffraction ในลักษณะการกระจายตัวกว้าง รัศมีค่อนข้างแคบกว่า Diffraction ที่จุดสูงสุดในลักษณะแหลม ดังภาพที่ 2-16 วัสดุที่หลากหลายของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับผลประโยชน์ที่ได้จากการไม่เป็นผลึก สภาวะการไม่เป็นผลึกของโครงสร้างไม่เพียงแต่สามารถตรวจสอบได้จาก X-ray diffractograms ได้เพียงอย่างเดียว แต่ยังสามารถตรวจสอบได้จาก Nuclear Magnetic Resonance (MAS-NMR) อีกด้วย



ภาพที่ 2-16 XRD ของ (Na,K)-PSS และ K-PSS binders (Davidovits., 1991)

### มาตรฐานวัสดุงานทาง

การก่อสร้างถนนตามแนวทางการปฏิบัติของการควบคุมงานก่อสร้างของสำนักงานกรมทางในประเทศไทย มีมาตรฐานของการก่อสร้างในแต่ละชั้นดังตัวอย่างแสดงภาพตัดถนนภาพที่ 2-18 โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในการใช้วัสดุให้เกิดประโยชน์สูงสุดในด้านวิศวกรรมการทาง เพื่อให้คุณสมบัติในการปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วยอิโพลิเมอร์เป็นไปตามขอบเขตหรือแนวทางเดียวกันตามมาตรฐานของวัสดุ Pavement ไม่ว่าจะเป็นมาตรฐานกรมทางหลวง โดยมาตรฐานชั้นพื้นทาง ดังตารางที่ 2-3 มาตรฐานชั้นรองพื้น ดังตารางที่ 2-4 มาตรฐานชั้นรองพื้นทางและพื้นทางกรมทางหลวงชนบท ดังตารางที่ 2-5 และมาตรฐานรองพื้นทางและพื้นทางกรมโยธาธิการและผังเมือง ดังตารางที่ 2-6



ภาพที่ 2-17 รูปตัด โครงสร้างถนนผิวจราจรแบบ Asphaltic concrete (คู่มือปฏิบัติงานควบคุมคุณภาพวัสดุ, กรมทางหลวงชนบท [มทข.](ม.ป.ป.)

ตารางที่ 2-3 มาตรฐานชั้นพื้นทางกรมทางหลวง

หมายเลข ทล.ม.	วัสดุพื้นทาง ต่าง ๆ	เกณฑ์การทดสอบ								
		Sand Equivalent	C.B.R	Liquid Limit	Plasticity Index	ความ สึกหรอ	ขนาดเม็ดของวัสดุ	ค่าของส่วนปริมาณ ที่ไม่คงที่ (Loss)	การขยายตัว	Unconfined compressive strength
(1) 201/2544	พื้นทางหิน คลุก	$\geq 80\%$		$\leq 25\%$	$\leq 6\%$	$\leq 40\%$	- มีมวลคละผ่าน ตะแกรงแบบล้าง - มีส่วนละเอียดที่ ผ่าน No. 200 $\leq$ (2/3) ของ No.40	$\leq 9\%$		
(2) 203/2556	พื้นทางหิน คลุกผสม ซีเมนต์	$\geq 80\%$		$\leq 25\%$	$\leq 6\%$	$\leq 40\%$	- มีมวลคละผ่าน ตะแกรงแบบล้าง - มีส่วนละเอียดที่ ผ่าน No. 200 $\leq$ (2/3) ของ No.40	$\leq 9\%$		ค่าเท่ากับ 2,413 กิโลปาสกาล (350 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)

ตารางที่ 2-3 (ต่อ)

หมายเลข ทล.ม.	วัสดุพื้นทาง ต่าง ๆ	เกณฑ์การทดสอบ							
		Sand Equivalent	C.B.R	Liquid Limit	Plasticity Index	ความ สึกหรอ	ขนาดเม็ดของวัสดุ ที่ไม่คงที่ (Loss)	ค่าของส่วน ปริมาณ การขยายตัว	Unconfined compressive strength
(3) 204/2556	พื้นทางดิน ซีเมนต์			$\leq 40\%$	$\leq 15\%$	$\leq 60\%$	- มีมวลละเอียดผ่าน ตะแกรงแบบล้าง - ขนาดเม็ดโตสุดไม่ เกิน 50 มม. - มีส่วนละเอียดที่ ผ่าน No. 10 $\leq 70\%$ และ No. 200 $\leq 25\%$		ค่าเท่ากับ 1,724 kPa (250 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)
(4) 202/2531	พื้นทางกรวด โม		$\geq 90\%$	$\leq 25\%$	$\leq 6\%$	$\leq 40\%$	- มีหน้าแตก จากการโม่เป็น จำนวน $\geq 75\%$ - มีมวลละเอียดที่ผ่าน		



ตารางที่ 2-3 (ต่อ)

หมายเลข ทล.ม.	วัสดุพื้นทาง ต่าง ๆ	เกณฑ์การทดสอบ							
	Sand Equivalent	C.B.R	Liquid Limit	Plasticity Index	ความ สึกหรอ	ขนาดเม็ดของวัสดุ	ค่าของส่วน ที่ไม่คงที่ (Loss)	ปริมาณ การขยายตัว	Unconfined compressive strength
						ตะแกรงแบบล้าง - มีส่วนละเอียดที่ ผ่าน No. 200 $\leq$ (2/3) ของ No.40			
(5) 210/2547	พื้นทาง ตะกรันเหล็ก ไม้	$\leq 35\%$	$\geq 90\%$	$\leq 25\%$	$\leq 4\%$	$\leq 40\%$	- มีมวลละเอียดที่ผ่าน $\leq 9\%$ ตะแกรงแบบล้าง - มีส่วนละเอียดที่ ผ่าน No. 200 $\leq$ (2/3) ของ No.40	$\leq 0.5\%$	
หมายเหตุ		- วิธีการทดสอบ Compaction	3. ในกรณีที่มี Liquid Limit หรือ Plasticity	โดยใช้ เครื่อง		1. ดังภาพที่ 2-19 2. ดังภาพที่ 2-20	ค่า ความคงทน	วิธีการ ทดสอบหา	แท่งตัวอย่างซีเมนต์ อนุโลมให้ทดสอบ

ตารางที่ 2-3 (ต่อ)

หมายเลข	วัสดุพื้นทาง	เกณฑ์การทดสอบ							
ทล.ม.	ต่าง ๆ								
	Sand Equivalent	C.B.R	Liquid Limit	Plasticity Index	ความสึกหรอ	ขนาดเม็ดของวัสดุ	ค่าของส่วนที่ไม่คงที่ (Loss)	ปริมาณการขยายตัวของวัสดุ	Unconfined compressive strength
	Test แบบสูง	Index	เกินกว่าค่าที่กำหนดจะต้องใช้ปูนขาวผสมเพื่อลดค่า	Los Angeles Abrasion	4. วิธีการทดสอบหา Soundness	ปริมาณร้อยละที่ใช้	โดยใช้	ปริมาณการขยายตัวของวัสดุรวมแบบสูงกว่ามาตรฐาน	ตัวอย่างถูกทดสอบตามวิธี Compaction Test
	กว่ามาตรฐานที่ 95%		ดังกกล่าวให้อยู่ใน		และมีความคละดัง	โซเดียม	ซัลเฟต	ที่เกิดจาก	ภายหลังบ่มในถุงเพื่อมิ
	- หากไม่ระบุวิธีใดให้ใช้วิธีการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soaked)		กำหนด แต่ทั้งนี้ต้อง $\geq 2\%$ โดยน้ำหนักของดิน		ภาพที่ 2-21	จำนวน 5	รอบ	ปฏิกิริยา Hydration	ให้ความชื้นเปลี่ยนแปลง นาน 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง
					5. ภาพที่ 2-22				

ตารางที่ 2-4 มาตรฐานชั้นรองพื้นทางกรมทางหลวง

หมายเลข ทล.ม.	วัสดุพื้นทาง ต่าง ๆ	เกณฑ์การทดสอบ						
		Durability	C.B.R	Swelling	Liquid Limit	Plasticity Index	ความ สึกหรอ	ขนาดเม็ดของวัสดุ Unconfined compressive strength
206/2532	รองพื้นทาง ดินซีเมนต์				≤40%	≤20%		- ขนาดเม็ดโตสุดไม่ค่าเท่ากับ 689 kPa เกิน 50 มม. (100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) - ผ่านตะแกรงแบบ ล่าง No.200 ≤ 40%
205/2517	รองพื้นทาง วัสดุมวลรวม	≥35%	≥25%		≤35%	≤11%	≤60%	- ผ่านตะแกรงแบบ ล่าง
หมายเหตุ			- วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่า มาตรฐานที่ 95%			โดยใช้ เครื่อง Los Angeles Abrasion	(205/2517) ดังภาพที่ 2-23	แท่งตัวอย่างซีเมนต์ อนุโลม ให้ทดสอบตัวอย่างถูก ทดสอบตามวิธี Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

ตารางที่ 2-4 (ต่อ)

หมายเลข ทล.ม.	วัสดุพื้นทาง ต่าง ๆ	เกณฑ์การทดสอบ						
		Durability	C.B.R	Swelling	Liquid Limit	Plasticity Index	ความ สึกหรอ	ขนาดเม็ดของวัสดุ Unconfined compressive strength
			- หากไม่ระบุวิธีใด ให้ใช้วิธีทดสอบ แบบแช่น้ำ (Soaked)					ภายหลังบ่มในถุงเพื่อมิให้ ความชื้นเปลี่ยนแปลงนาน 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 2-5 มาตรฐานชั้นรองพื้นทางและพื้นทางกรมทางหลวงชนบท

หมายเลข ทล.ม.	วัสดุพื้นทางต่าง ๆ	เกณฑ์การทดสอบ					
		C.B.R	Swelling	Liquid Limit	Plasticity Index	ความลึกหรือ	ขนาดเม็ดของวัสดุ
202-2545	รองพื้นทาง	$\geq 25\%$	$\leq 3\%$	$\leq 35\%$	$\leq 11\%$	$\leq 60\%$	- มีมวลคละผ่านตะแกรง
203-2545	พื้นทางหินคลุก	$\geq 80\%$		$\leq 25\%$	$\leq 6\%$	$\leq 40\%$	- มีมวลคละผ่านตะแกรง
หมายเหตุ	วิธีการทดลอง	ตามมาตรฐานการทดสอบ				202-2545	ขนาด
	Compaction Test	ค่า C.B.R					เม็ดโตสุดไม่
	แบบสูงกว่า						เกิน 50 มม.
	มาตรฐานที่ 95%						และมีมวลคละ
							ผ่านตะแกรง
							ดังภาพที่ 2-24
							(203-2545)
							ดังภาพที่ 2-25

ตารางที่ 2-6 มาตรฐานรองพื้นทางและพื้นทางกรมโยธาธิการและผังเมือง

หมายเลข มยผ.	มาตรฐานวัสดุ	เกณฑ์การทดสอบ					
		C.B.R	Swelling	Liquid Limit	Plasticity Index	ความสึกหรอ	ขนาดเม็ดของวัสดุ
2102-57	รองพื้นทาง	$\leq 25\%$		$\leq 35\%$	$\leq 11\%$	$\leq 60\%$	- ขนาดเม็ดโตสุดไม่เกิน 50 มม. - ผ่านตะแกรง
2103-57	พื้นทางชนิดหิน คลุก	$\geq 80\%$		$\leq 25\%$	$\leq 6\%$	$\leq 40\%$	- ผ่านตะแกรง
หมายเหตุ	วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่า มาตรฐานที่ 95%					โดยใช้เครื่อง Los (2102-57) Angeles Abrasion ดังภาพที่ 2-26 (2103-57) ดังภาพที่ 2-27	

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล	
	A	B
50 (2 นิ้ว)	100	100
25.0 (1 นิ้ว)	-	75-95
9.5 (3/8 นิ้ว)	30-65	40-75
4.75 (เบอร์ 4)	25-55	30-60
2.00 (เบอร์ 10)	15-40	20-45
0.425 (เบอร์ 40)	8-20	15-30
0.075 (เบอร์ 200)	2-8	5-20

ภาพที่ 2-18 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล		
	B	C	D
50.0 (2 นิ้ว)	100	-	-
25.0 (1 นิ้ว)	75-95	100	100
9.50 (3/8 นิ้ว)	40-75	50-85	60-100
4.75 (เบอร์ 4)	30-60	35-65	50-85
2.00 (เบอร์ 10)	20-45	25-50	40-70
0.425 (เบอร์ 40)	15-30	15-30	25-45
0.075 (เบอร์ 200)	5-20	5-15	5-20

ภาพที่ 2-19 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล			
	A	B	C	D
50 ( 2 ")	100	100	-	-
25.0 ( 1 ")	-	75 - 95	100	100
9.5 ( 3/8 ")	30 - 65	40 - 75	50 - 85	60 - 100
4.75 (เบอร์ 4)	25 - 55	30 - 60	35 - 65	50 - 85
2.00 (เบอร์ 10)	15 - 40	20 - 45	25 - 50	40 - 70
0.425 (เบอร์ 40)	8 - 20	15 - 30	15 - 30	25 - 45
0.075 (เบอร์ 200)	2 - 8	5 - 20	5 - 15	5 - 20

ภาพที่ 2-20 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางกรวดไม้

ขนาดตะแกรง	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล	
	A	B
50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)	100	100
25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว)	-	75-95
9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว)	30-65	40-75
4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)	25-55	30-60
2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10)	15-40	20-45
0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)	8-20	15-30
0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200)	2-8	5-20

ภาพที่ 2-21 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางตะกรันเหล็กโม

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล				
	A	B	C	D	E
50 ( 2" )	100	100	-	-	-
25.0 ( 1" )	-	-	100	100	100
9.5 ( 3/8" )	30-65	40-75	50-85	60-100	-
2.00 ( เบอร์ 10 )	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
0.425 ( เบอร์ 40 )	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
0.075 ( เบอร์ 200 )	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20

ภาพที่ 2-22 มวลคละผ่านตะแกรงแบบต่าง

ขนาดและตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ				
	ชนิด ก.	ชนิด ข.	ชนิด ค.	ชนิด ง.	ชนิด จ.
2"	100	100	-	-	-
1"	-	75-95	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-
เบอร์ 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100
เบอร์ 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
เบอร์ 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
เบอร์ 200	2-8	5-20	5-15	10-25	6-20

ภาพที่ 2-23 ขนาดคละของวัสดุชั้นรองพื้นทาง



ขนาดของตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ		
	ชนิด ก.	ชนิด ข.	ชนิด ค.
2"	100	100	-
1"	-	75-95	100
3/8"	30-65	40-75	50-85
เบอร์ 4	25-55	30-60	35-65
เบอร์ 10	15-40	20-45	25-50
เบอร์ 40	8-20	15-30	15-30
เบอร์ 200	2-8	5-20	5-15

ภาพที่ 2-24 ขนาดคละของวัสดุชั้นทางหินคลุก

ขนาดและ ตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ				
	ชนิด ก.	ชนิด ข.	ชนิด ค.	ชนิด ง.	ชนิด จ.
2"	100	100	-	-	-
1"	-	75-95	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-
เบอร์ 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100
เบอร์ 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
เบอร์ 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
เบอร์ 200	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20

ภาพที่ 2-25 ขนาดคละของวัสดุพื้นรองทาง

ขนาดของตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ		
	ชนิด ก.	ชนิด ข.	ชนิด ค.
2 นิ้ว	100	100	-
1 นิ้ว	-	75-95	100
3/8 นิ้ว	30-65	40-75	50-85
เบอร์ 4	25-55	30-60	35-65
เบอร์ 10	15-40	20-45	25-50
เบอร์ 40	8-20	15-30	15-30
เบอร์ 200	2-8	5-20	5-15

ภาพที่ 2-26 ขนาดคละของวัสดุพื้นทาง

จากมาตรฐานกรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท และกรมโยธาธิการและผังเมือง มีมาตรฐาน โดยส่วนใหญ่ไม่แตกต่างกันมากนัก มาตรฐานกรมทางหลวงสามารถแยกย่อยในส่วน ของชั้นพื้นทางและรองพื้นทางได้หลายประเภทมากกว่า และยังเป็นที่ยอมรับในการใช้เป็นมาตรฐาน ในการก่อสร้าง เพื่อให้เกิดความหลากหลายในการใช้งานของวัสดุดินตะกอนทะเลที่ถูกสร้าง เสถียรภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์มาเป็นวัสดุ Pavement จึงเป็นเหตุผลให้ขอบเขตของงานวิจัยนี้ มีการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ภายใต้มาตรฐานกรมทางหลวง

### ปัจจัยที่ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยของ (Phummiphon et al., 2015) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัย ได้ทำการปรับแก้อัตราส่วนในสอดคล้องกับงานวิจัย โดยคำนึงถึงอิทธิพลการพัฒนากำลังอัดเพื่อให้ เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง และเฟลคเตอร์ที่ถูกใช้ในงานวิจัยได้แก่อัตราส่วนระหว่าง  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  อัตราส่วน Soil : FA และอุณหภูมิและ ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

สารละลาย Alkali activator ตามอัตราส่วนระหว่าง  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  เท่ากับ 100 : 0 90 : 10 80 : 20 และ 50 : 50 ทำการปรับแก้ตามอัตราส่วนตามที่แนะนำคืออัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  เท่ากับ 50 : 50 โดยเพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของสารละลาย Alkali activator ที่ชัดเจนถึงอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัด และค่ากำลังอัดเกินมาตรฐานที่กรมทางหลวงกำหนด หรือไม่ ดังนั้นอัตราส่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  เท่ากับ 100 : 0 50 : 50 และ 0 : 100 สารละลาย Alkali activator

ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  ผู้วิจัยได้ใช้ความเข้มข้นของ  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 5 โมลาร์ ตามที่งานวิจัยของ (Phummiphon et al., 2015) ได้แนะนำซึ่งผลของกำลังอัดที่ได้นั้นเพียงพอ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง และเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{NaOH}$  ขึ้นมาที่ 8 โมลาร์ เพื่อเปรียบเทียบการพัฒนากำลังอัด และความต้องการปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  ของวัสดุที่ใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์ โดยความเข้มข้นที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดอันตรายระหว่าง การใช้งานจริงได้ และความเข้มข้นที่ต่ำเกินไปอาจทำให้สารละลาย  $\text{NaOH}$  ไม่สามารถเข้าชะงะซิลิกา และอะลูมินาเพื่อทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้ นั้นอาจเป็นสาเหตุให้ค่ากำลังอัดไม่เป็นไป ตามมาตรฐานกรมทางหลวง

อัตราส่วน Soil : FA โดยงานวิจัยของ (Phummiphon et al., 2015) ได้กำหนดค่าที่ อัตราส่วน 70 : 30 เพียงค่าเดียว ผู้วิจัยจึงทำการปรับแก้อีกครั้งตามความเหมาะสมขององค์ประกอบ ของธาตุของดินตะกอนทะเลซึ่งผลทดสอบ XRF บ่งชี้ว่าดินตะกอนทะเลมีความเหมาะสมต่อ

การผลิตจีโอโพลิเมอร์ แต่เนื่องจากจากผลทดสอบ XRD แสดงความเป็นอสัณฐานต่ำของดินตะกอนทะเล จึงจำเป็นต้องใช้เถ้าลอยซึ่งมีความเป็นอสัณฐานสูงกว่าเข้าช่วยในการเพิ่มปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน อย่างไรก็ตามผู้วิจัยจะยังคงมุ่งเน้นที่การปรับปรุงดินตะกอนทะเลเป็นหลัก เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของผลการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม จึงใช้เถ้าลอยแทนที่ดินตะกอนทะเลที่อัตราส่วน Soil : FA เท่ากับ 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40 โดยใช้อัตราส่วนที่ใกล้เคียง 70 : 30 เนื่องจากดินตะกอนทะเลและดินลูกรังคือยคุณภาพมีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะองค์ประกอบของธาตุ

สำหรับอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้พบว่าหลายงานวิจัยที่ได้ศึกษาได้แก่ (Phetchuay et al., 2014; Horpibulsuk et al., 2015; Phummiphan et al., 2015; Sukmak, Horpibulsuk, & Shen; Sukmak, Horpibulsuk, Shen & Chindapresirt et al. 2013) มีผลงานวิจัยไปในทิศทางคล้ายกัน คือ การพัฒนากำลังอัดหลังจากระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง 7 ถึง 28 วัน การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดที่ชัดเจนกว่าการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40°C และระยะเวลาหลังจาก 28 วัน การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ไม่มีความสำคัญต่อการพัฒนา กำลังอัด ผู้วิจัยจึงได้เลือกระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน โดยใช้การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากเป็นการศึกษาการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิทั่วไปนั้นง่ายต่อการใช้งานในสภาพงานจริง

## บทที่ 3

### วัสดุ และวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำดินตะกอนทะเล ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการขุดลอกเพื่อบำรุงรักษาความลึกของท่าเทียบเรือมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ผู้วิจัยจึงได้นำรูปแบบงานวิจัยและค่าอัตราส่วนผสมต่าง ๆ มาใช้ในการออกแบบงานวิจัย โดยมีเฟลคเตอร์ที่สำคัญอยู่ด้วยกัน 4 เฟลคเตอร์ คือ อัตราส่วนของสารละลาย Alkali activator ได้แก่ สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH Soil : FA อุณหภูมิการบ่มตัวอย่างและระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง จากผลของกำลังอัดในงานวิจัยของ (Phummiphon et al., 2015) ซึ่งผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงทั้ง Light และ Heavy traffic ถูกใช้เป็นแนวทางในการกำหนดขั้นตอนงานวิจัย ผลงานวิจัยของ (Phetchuay et al., 2014; Sukmak et al., 2013; Sukmak et al., 2013) เป็นแนวทางสำคัญในการกำหนดเฟลคเตอร์ในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนทะเล และถ้ำลอย ได้แก่ SEM EDX หรือ EDS XRF XRD และ FT-IR เพื่อให้เข้าใจถึงความเหมาะสมของคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์สำหรับการออกแบบงานวิจัยให้เป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวง

#### วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

##### ดินตะกอนทะเล

ดินตะกอนทะเลนำมาจากบริเวณที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเรือพาณิชย์ท่าเรือแหลมฉบังเฟส 3 ตั้งอยู่ชายฝั่งตะวันออกของอ่าวไทยที่ ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสัตหีบ ราชบุรี จังหวัดชลบุรี ประมาณ 120 กิโลเมตร ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของกรุงเทพฯ ดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ที่ตั้งของท่าเรือแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี (สยาม ยิ้มศิริ, 2561)

### 1. คุณสมบัติทางดัชนี

1.1 การจำแนกประเภทของดินตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ดังภาพที่ 3-2 ดินตะกอนทะเลสามารถจำแนกได้เป็นชนิด CH (High plasticity clay) ขนาดผละของดินตะกอน โดยพบว่า  $D_{50}$  เท่ากับ 0.0008 มม. นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายตัวของขนาดดินตะกอนทะเลมี  $C_u (D_{60}/D_{10})$  เท่ากับ 7.1

1.2 ค่าความชื้นมวลดินในสนามเท่ากับ 95.15%

1.3 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.64

### 2. คุณสมบัติทางวิศวกรรม

2.1 การบดอัดดินตามมาตรฐาน และสูงกว่ามาตรฐาน ASTM D698 และ D1557 ค่า  $\gamma_{dmax}$  เท่ากับ 14.55 และ 17.5 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ( $kN/m^3$ ) และค่า OWC เท่ากับ 31.94 และ 16.9%

2.2 การทดสอบ CBR ตามมาตรฐาน ASTM D1883 ของการบดอัดดิน ตามมาตรฐานสำหรับเปอร์เซ็นต์ CBR ในสถานะไม่แช่น้ำเท่ากับ 5.33 สำหรับในสถานะแช่น้ำเท่ากับ 0.16 และการบดอัดดินสูงกว่ามาตรฐานสำหรับเปอร์เซ็นต์ CBR ในสถานะไม่แช่น้ำเท่ากับ 14.36 สำหรับในสถานะแช่น้ำเท่ากับ 0.9 ตามลำดับ

2.3 การบวมตัวของดิน (Soil swelling) จากการทดสอบ CBR สูงกว่ามาตรฐานในสถานะแช่น้ำเท่ากับ 8.24%

### 3. คุณสมบัติของโครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมี

3.1 การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยวิธี SEM และ EDX ด้วยขนาด 1,000 เท่า ดังภาพที่ 3-3 (ก) สังเกตได้ว่ารูปร่างของดินตะกอนทะเลจะมีขนาดไม่แน่นอน และมีลักษณะมุมแหลมผสมกับมุมโค้ง จับตัวกันจากขนาดเล็กไปเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้น

3.2 การทดสอบองค์ประกอบของธาตุในเชิงปริมาณด้วยวิธี XRF ตารางที่ 3-1 ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของดินตะกอนทะเลประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ถึง 85.75% ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ต้องการในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ แต่อย่างไรก็ตามความไวต่อการทำปฏิกิริยาไม่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  แต่เพียงอย่างเดียวยังต้องศึกษาโครงสร้างความเป็นอสังฐานด้วย

3.3 การศึกษารูปแบบการไม่เป็นผลึกหรือความเป็นอสังฐานของโครงสร้างดินตะกอนทะเลด้วยวิธี XRD ดังภาพที่ 3-4 สังเกตได้ว่าการจัดเรียงตัวของดินตะกอนมีรูปแบบการเลี้ยวเบนไม่ชัดเจน และแทบจะไม่เกิดพีคในระยะยาวซึ่งบ่งบอกได้ว่ามีความเป็นผลึก (Crystallinity) ค่อนข้างสูง จึงมีโครงสร้างเป็นอสังฐานต่ำ โดยธาตุที่ให้ความสนใจ ได้แก่ Q, Quartz (Silicon oxide) และ M, Mullite (Aluminum Silicon oxide)

3.4 การทดสอบขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุลโดยซึ่งใช้นิยาม Degree of geopolymerization หรือดีกรี (Degree) ความซับซ้อนของจีโอโพลิเมอร์ด้วยวิธี FT-IR ดังภาพที่ 3-5 แสดงช่วงความสำคัญมีลักษณะ Broad ของพันธะ O-H Stretching ช่วงสเปกตรัม  $3622\text{ cm}^{-1}$  สำหรับพันธะ Si-O-Si Stretching อยู่ในช่วงสเปกตรัม 1200 ถึง  $950\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพันธะที่แสดง Degree of geopolymerization ซึ่งมักเรียกกันว่าเป็นบริเวณลายนิ้วมือ (Fingerprint region) และในลักษณะ Sharp ช่วงสเปกตรัม  $460\text{ cm}^{-1}$  ใช้สำหรับอธิบายพันธะ O-Si-O Bending

## เถ้าลอย

### 1 การทดสอบคุณสมบัติทางค้ำนี้

1.1 ทดสอบขนาดคละของเถ้าลอยด้วยวิธี Laser diffraction technique ดังภาพที่ 3-2 โดยพบว่า D50 พบว่า ขนาดของเถ้าลอยเท่ากับ 0.0126 มม. การกระจายตัวของเม็ดเถ้าลอยมีค่า Cu ( $D_{60}/D_{10}$ ) เท่ากับ 15.8

1.2 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65

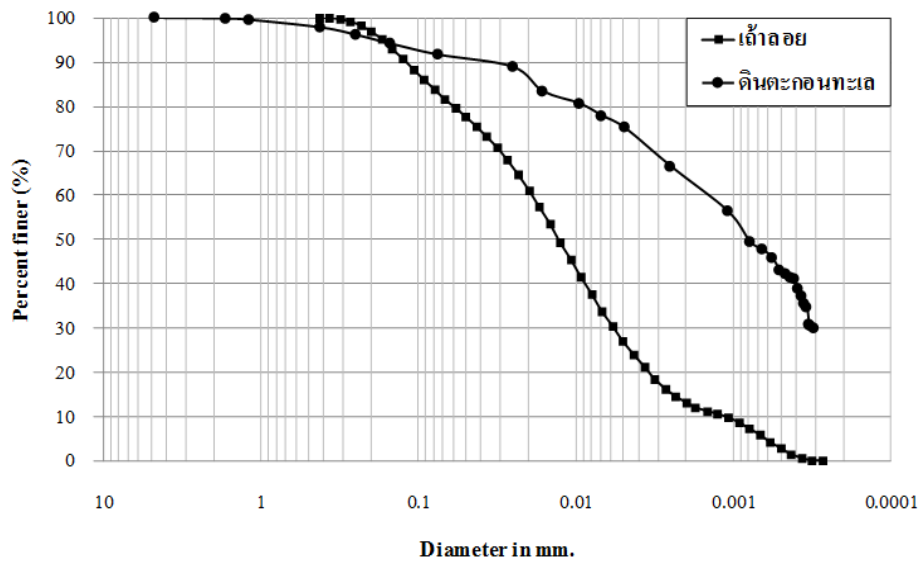
### 2. คุณสมบัติของโครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมี

2.1 ทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยวิธี SEM และ EDX ด้วยขนาด 1,000 เท่า ดังภาพที่ 3-3 (ข) รูปร่างของเถ้าลอยจะมี ลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดไม่แน่นอน ซึ่งเป็นลักษณะของเถ้าลอยที่มาจากอำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง

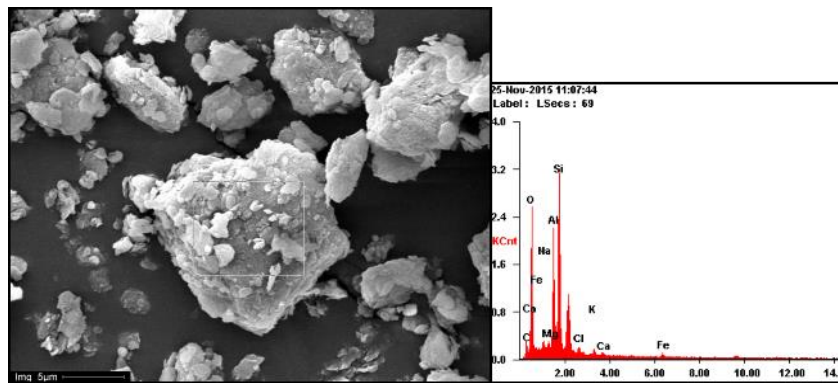
2.2 การทดสอบองค์ประกอบของธาตุในเชิงปริมาณด้วยวิธี XRF ดังตารางที่ 3-1 องค์ประกอบของเถ้าลอยประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  รวมเท่ากับ 61.47% ตามมาตรฐาน ASTM C168 จัดเป็นเถ้าลอยประเภท C

2.3 ศึกษารูปแบบสภาวะการไม่เป็นผลึกของโครงสร้างด้วยวิธี XRD ดังภาพที่ 3-4 การจัดเรียงตัวของเถ้าลอยมีรูปแบบการเลี้ยวเบนไม่ชัดเจนเกิดฟีกในระยยะยาวซึ่งมีความเป็น Crystallinity ต่ำ จึงมีโครงสร้างเป็นอสัณฐานสูง โดยธาตุที่ให้ความสนใจ คือ M, Mullite

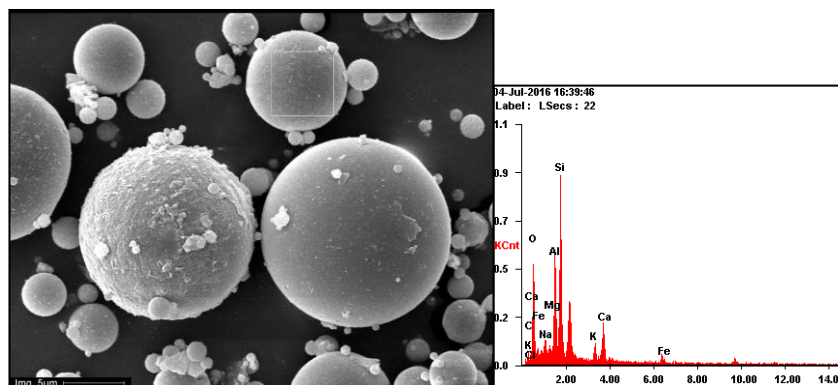
2.4 การทดสอบขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุลโดยซึ่งใช้นิยาม Degree of geopolymerization ความซับซ้อนของจีโอโพลิเมอร์ด้วยวิธี FT-IR ดังภาพที่ 3-5 แสดงช่วงความสำคัญมีลักษณะ Broad ของพันธะ Si-O-Si Stretching อยู่ในช่วงสเปกตรัม 1,200 ถึง 950  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพันธะที่แสดง Degree of geopolymerization ช่วงสเปกตรัม 460  $\text{cm}^{-1}$  ใช้สำหรับอธิบายพันธะ O-Si-O Bending



ภาพที่ 3-2 ขนาดคละของเม็ดดินตะกอนทะเล และเม็ดลอย



(ก)



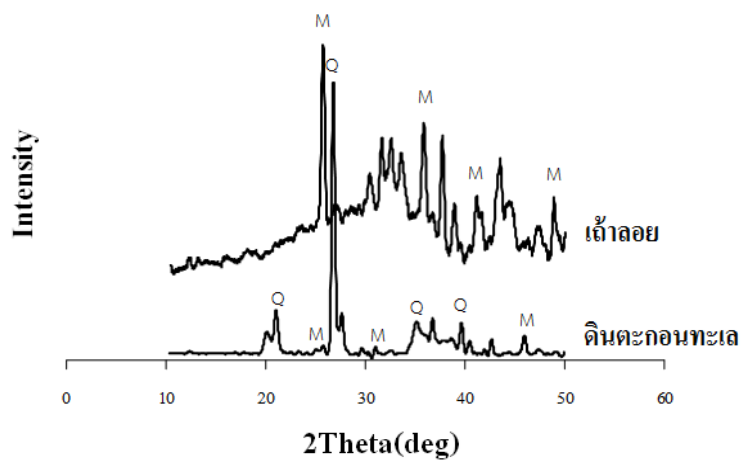
(ข)

ภาพที่ 3-3 โครงสร้างระดับจุลภาค SEM/ EDX ของ (ก) ดินตะกอนทะเลและ (ข) เม็ดลอย

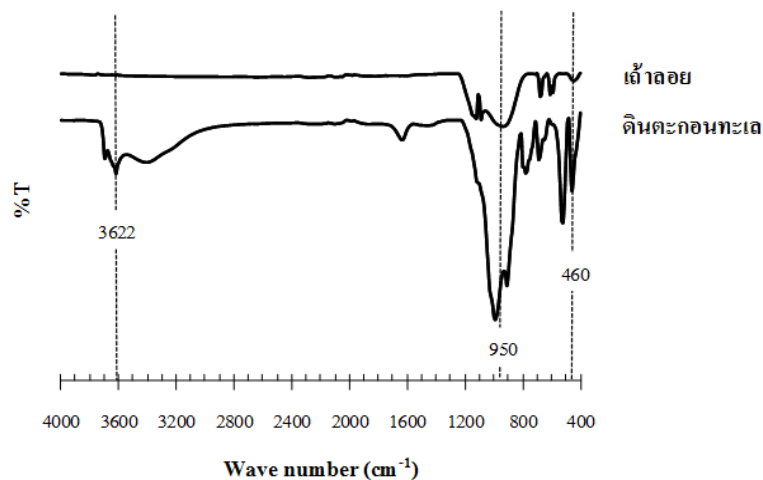


ตารางที่ 3-1 องค์ประกอบธาตุ XRF ของดินตะกอนทะเล และเถ้าลอย

องค์ประกอบธาตุ (%)	ดินตะกอนทะเล	เถ้าลอย
SiO <sub>2</sub>	63.56	32.27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.19	15.43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.67	13.77
CaO	1.02	21.95
K <sub>2</sub> O	3.04	1.64
Na <sub>2</sub> O	2.07	2.86
Cl	1.68	0.02
MgO	1.34	2.44
SO <sub>3</sub>	0.25	8.57
LOI	4.85	0.09



ภาพที่ 3-4 XRD ของดินตะกอนทะเล และเถ้าลอย Q (quartz) และ M (mullite)



ภาพที่ 3-5 FTIR Spectra ของดินตะกอนทะเล และแก้วลอย

#### Alkali activator

สารละลาย Alkali activator ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และสารละลาย  $\text{NaOH}$  ดังภาพที่ 3-6 (ก) โดย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  มีองค์ประกอบของ  $\text{Na}_2\text{O}$  9% และ  $\text{SiO}_2$  30% โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานสำหรับงานอุตสาหกรรม มอก. 433-2539

สารละลาย  $\text{NaOH}$  ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ดังภาพที่ 3-7 (ข) ปรับความเข้มข้นโดยการละลาย  $\text{NaOH}$  ชนิดเกล็ดปริมาณ 200 กรัม (g) ลงในน้ำกลั่นที่ปริมาตร 1,000 ml.

สารละลาย  $\text{NaOH}$  8 โมลาร์ ปรับความเข้มข้นโดยการละลาย  $\text{NaOH}$  ชนิดเกล็ดปริมาณ 320 g ลงในน้ำกลั่นที่ปริมาตร 1,000 ml. คนให้  $\text{NaOH}$  ละลายโดยทั่วถึง และทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง เนื่องจากระหว่างละลาย  $\text{NaOH}$  จะคลายความร้อนออกมาทำให้สารละลายมีอุณหภูมิสูง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-6 (ก)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ (ข)  $\text{NaOH}$

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

### ปัจจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์จากดินตะกอนทะเล-ถ้ำลอย

จากที่ได้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการออกแบบงานวิจัยโดยมีเฟลคเตอร์ที่สำคัญอยู่ด้วยกัน 4 เฟลคเตอร์ คือ อัตราส่วนของ Alkali activator ได้แก่ สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  Soil : FA อุณหภูมิการบ่มตัวอย่างและระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง ได้สรุปอัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบ ดังตารางที่ 3-2

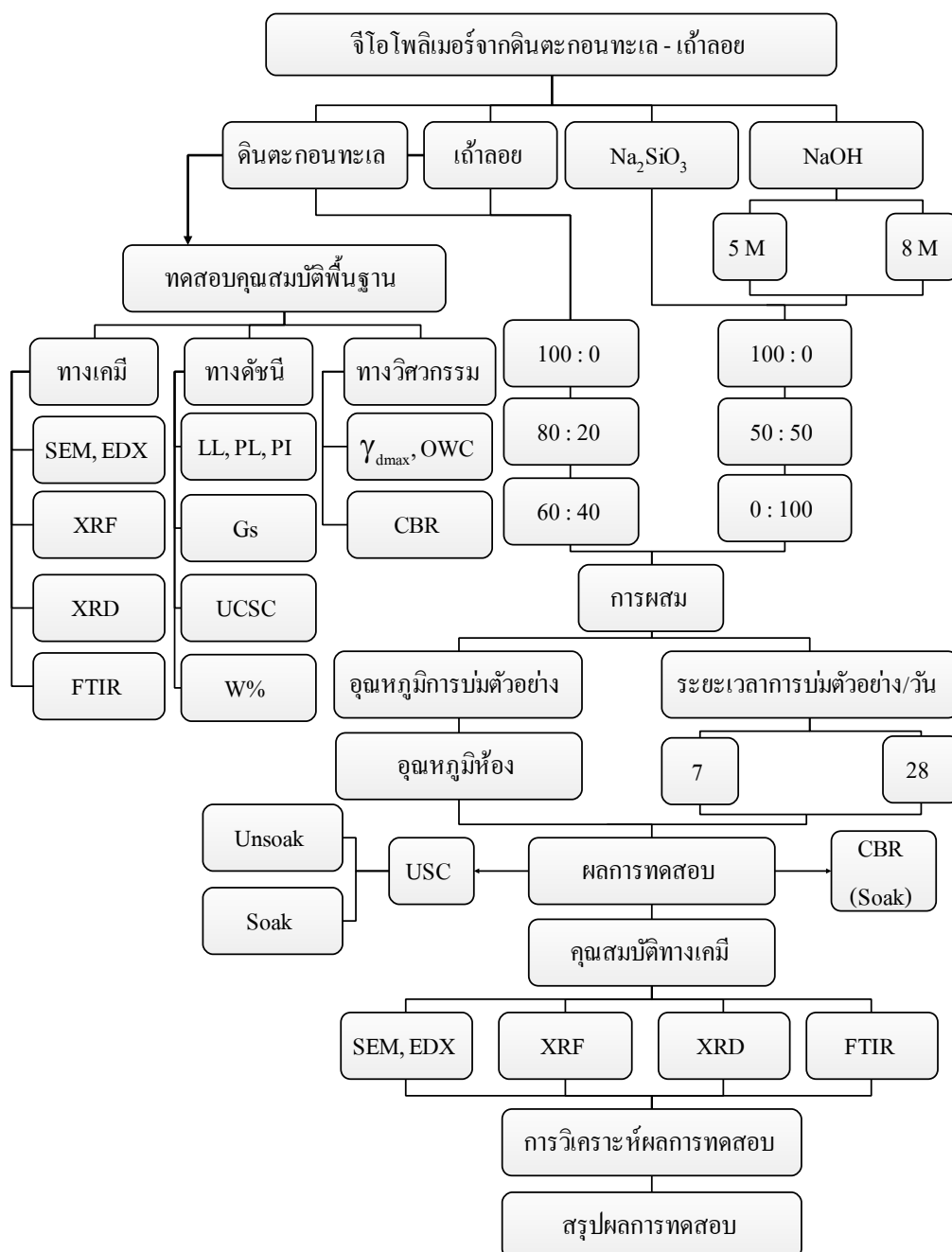
ตารางที่ 3-2 อัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบ

อิทธิพลต่อกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์	อัตราส่วน
ความเข้มข้นของสารละลาย $\text{NaOH}$	5 และ 8 โมลาร์
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$	100 : 0
	50 : 50
	0 : 100
Soil : FA	100 : 0
	80 : 20
	60 : 40
อุณหภูมิการบ่มตัวอย่าง	อุณหภูมิห้อง
ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง	7 และ 28 วัน

### ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบถูกสรุปไว้ดังภาพที่ 3-7 โดยขั้นตอนการทดสอบถูกปรับแก้จากของ (Phummiphan et al., 2015) โดยมีแนวทางที่เป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวง และเพิ่มการทดสอบคุณสมบัติของโครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ SEM EDX XRF XRD และ FT-IR เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการทดสอบจะดำเนินการกับตัวอย่างแบบเดียวกันซ้ำ 3 ครั้ง การทดสอบ UCS และ CBR ได้จากการนำค่าการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ( $\text{OAC}$  และ  $\gamma_{d,\text{max}}$ ) เพื่อใช้กำหนดปริมาณสารละลาย Alkali activator และวัสดุดิบต่าง ๆ ให้ได้ความหนาแน่นตามค่าการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานที่ได้ทดสอบไว้ภายในปริมาตร  $196.35$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{cm}^3$ ) ขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร และ

สูง 10 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบภายใต้สภาวะ Soaked หลังจากการบ่มตัวอย่างจะถูกนำไปแช่  
น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบ Unconfined compression test ตามมาตรฐานกรมทาง  
หลวง



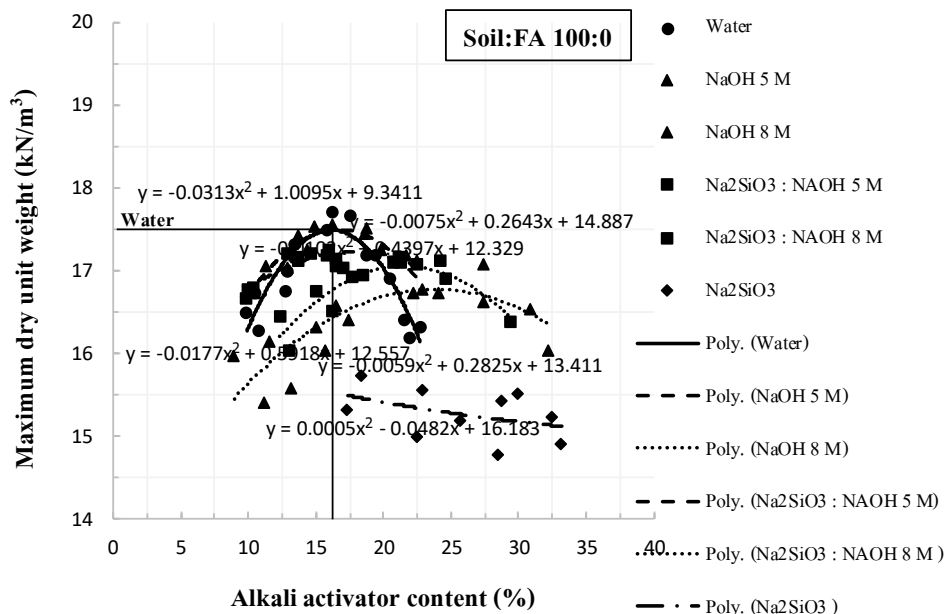
ภาพที่ 3-7 ขั้นตอนการทดสอบ

## บทที่ 4

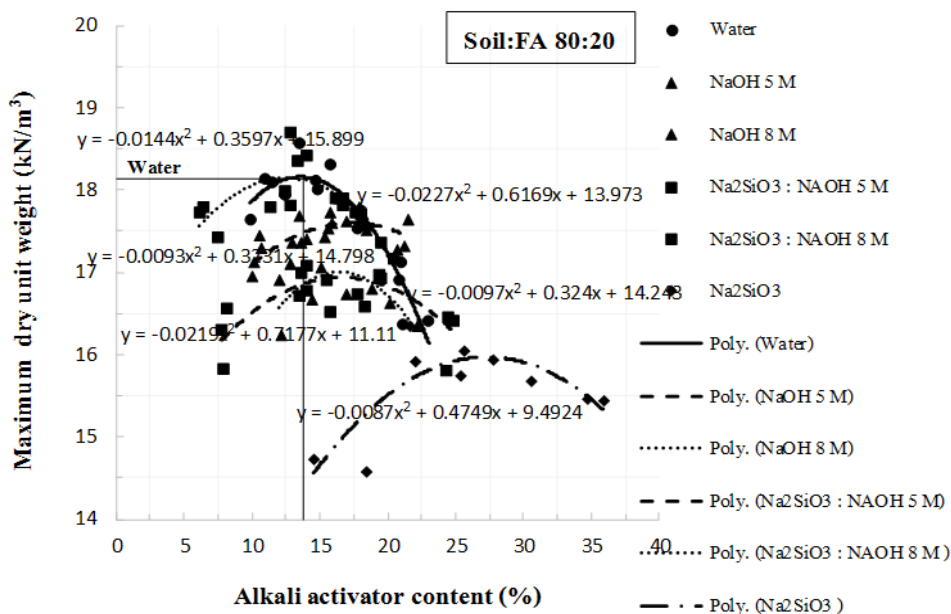
### ผลทดสอบ Compaction ของการปรับปรุงดินตะกอนทะเล ด้วยจีโอโพลิเมอร์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำดินตะกอนทะเลมาปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย แคลเซียมสูงเป็นวัสดุสำหรับจีโอโพลิเมอร์ เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวงซึ่งได้กำหนดให้ค่า California bearing ratio และ Unconfined compressive strength อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ภายใต้การบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน Modified proctor energy ดังนั้นเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

โดยผลการทดสอบ Modified compaction จะถูกแบ่งออกตามอัตราส่วน Soil : FA ดังภาพที่ 4-1 (ก-ค) โดยตัวอย่างที่ถูกทดสอบซ้ำกัน 3 ตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วน เมื่อนำผลทดสอบมาพลอตลงในกราฟ พบว่าผลการทดสอบในแต่ละอัตราส่วนโดยรวมแล้วมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากอัตราส่วนหนึ่งมีผลการทดสอบไม่ซ้ำกัน 3 ค่า เมื่อค่า Optimum alkali activator content (OAC) และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ( $\gamma_{dry,max}$ ) ที่ได้นั้น ไม่ใกล้เคียงกันนัก ทำให้ไม่สามารถสรุปค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  ได้ จึงใช้วิธีการเพิ่มเส้นแนวโน้ม ในผลทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง จะได้ค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  ที่ใกล้เคียงสำหรับทั้ง 3 ตัวอย่างเพียงค่าเดียว ดังตารางที่ 4-1 ผลของ Compaction แต่ละอัตราส่วน โดยค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  ที่ได้จากการเส้นแนวโน้มดังกล่าว ดังนั้นค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  นี้จะถูกนำมาใช้กำหนดปริมาณสารละลาย Alkali activator ต่อไปในการทดสอบ CBR และ UCS เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ต้องการ

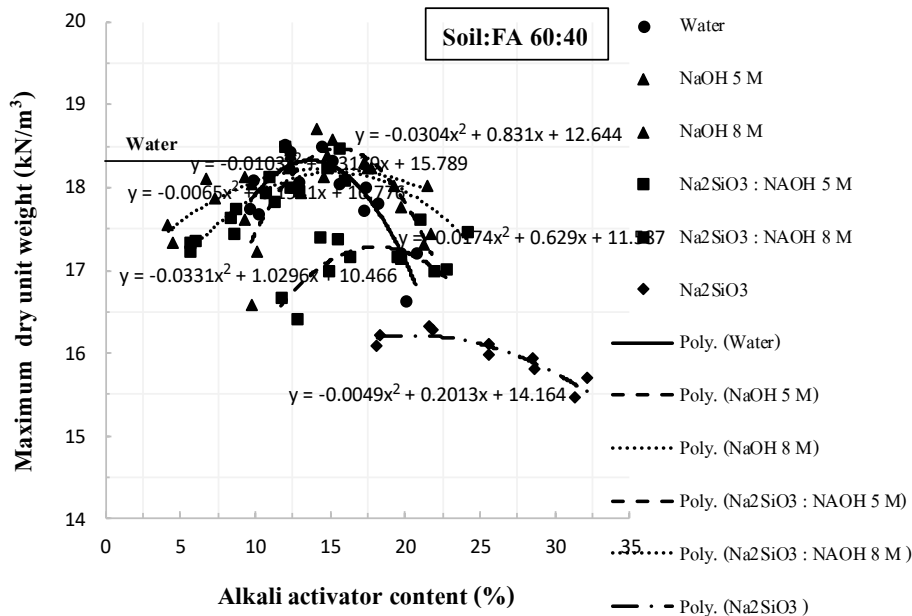


(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma_{d,max}$  กับ Alkali activator content ที่อัตราส่วน (ก) Soil : FA 100 : 0 (ข) Soil : FA 80 : 20 และ (ค) Soil : FA 60 : 40



(ค)

ภาพที่ 4-1 (ต่อ)

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบ Compaction จากสมการเส้นแนวโน้ม

Soil:FA	Alkali activator	Compaction		สมการเส้นแนวโน้ม (y)		
		x	y	$y = -a(x^2) + b(x) + c$		
		OAC (%)	$\gamma_{dry,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	a	b	c
100 : 0	water	16.1	17.5	0.0313	1.0095	9.3411
	NaOH 5 M	16.7	17.5	0.0177	0.5918	12.557
	NaOH 8 M	23.9	16.7	0.0056	0.2679	13.534
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	17.6	17.2	0.0075	0.2643	14.887
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	21.6	17.1	0.0102	0.4397	12.329
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-
80 : 20	water	13.6	18.2	0.0227	0.6169	13.973
	NaOH 5 M	17.4	17.6	0.0093	0.3231	14.798

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

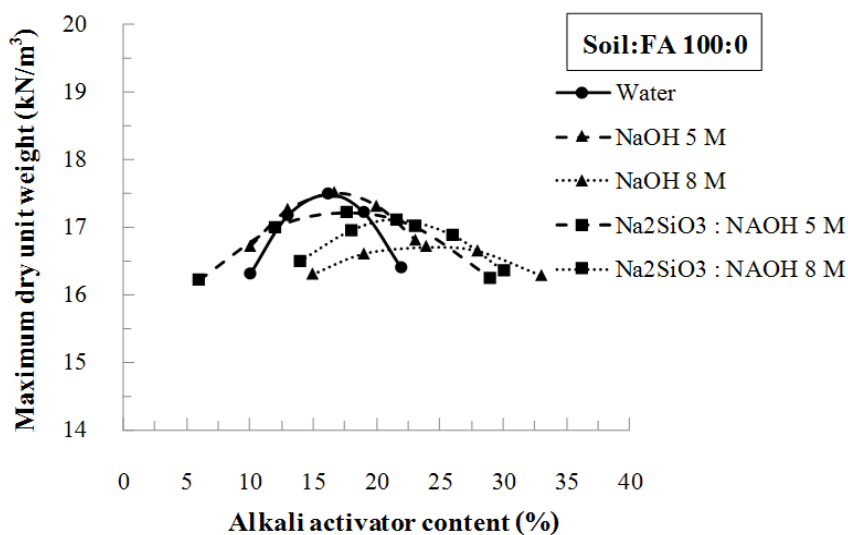
Soil : FA	Alkali activator	Compaction		สมการเส้นแนวโน้ม (y)		
		x	y	y=-a(x <sup>2</sup> ) + b(x) + c		
		OAC (%)	$\gamma_{dry,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	a	b	c
	NaOH 8 M	16.4	17.0	0.0219	0.7177	11.11
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	16.7	16.9	0.0097	0.324	14.243
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	12.5	18.1	0.0144	0.3597	15.899
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	27.3	16.0	0.0087	0.4757	9.4821
	water	13.7	18.3	0.0304	0.831	12.644
	NaOH 5 M	15.3	18.5	0.0347	1.0717	10.276
60 : 40	NaOH 8 M	14.9	18.2	0.0065	0.1942	16.777
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	18.1	17.3	0.0175	0.6352	11.531
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	15.2	18.2	0.0103	0.3138	15.791
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	20.2	16.2	0.0049	0.198	14.209

### ผลทดสอบ Compaction ของอัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์

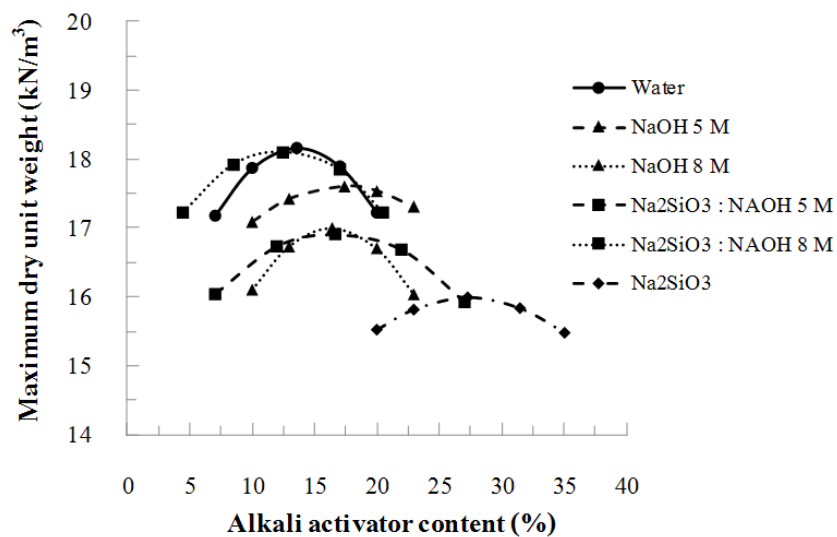
การทดสอบ Modified compaction จากตารางที่ 4-1 ถูกพลอตลง ดังภาพที่ 4-2 โดย Compaction curve จะกำหนดสารละลาย Alkali activator ด้วยปริมาณ  $\pm 3\%$  จากค่า OAC ของทุกตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ดินตะกอนทะเล-ถ้ำลอยแคลเซียมสูงแต่ละอัตราส่วน โดยเทียบระหว่างดินตะกอนทะเล และดินตะกอนทะเลผสมถ้ำลอยที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ตามอัตราส่วน Soil:FA เท่ากับ 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40 ตามลำดับ สำหรับดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์แต่ละอัตราส่วนจะผสมสารละลาย Alkali activator ตามอัตราส่วน Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> : NaOH 0 : 100 50 : 50 และ 100 : 0 ดังภาพที่ 4-2 (ก-ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma_{d,max}$  กับ OAC ของอัตราส่วนที่ผสมสาร Alkali activator และน้ำเปล่า พบว่าเมื่อเพิ่มถ้ำลอยมีผลให้ค่า OAC มีแนวโน้มลดลงเป็นผลให้  $\gamma_{d,max}$  ที่ได้จากการบดอัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นความแตกต่างของความสัมพันธ์ระหว่างการบดอัด  $\gamma_{d,max}$  และ OAC จึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วน Soil : FA อาจเพราะการเพิ่มปริมาณถ้ำลอยซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดกลมจะเข้าแทรกแซงการจัดเรียงอนุภาคของเม็ดดินที่มีลักษณะเป็นมุมแหลม ช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดิน นอกจากนี้การที่ถ้ำลอยไม่เป็น



พลาสติกมีส่วนในการส่งเสริมการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินระหว่างการบดอัด ส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น (Sukmak et al., 2013; Horpibulsuk et al., 2015)

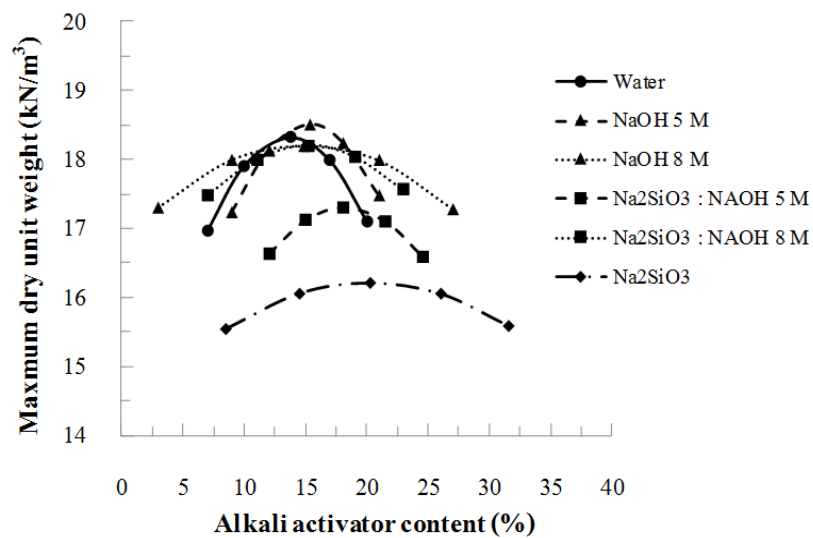


(ก)



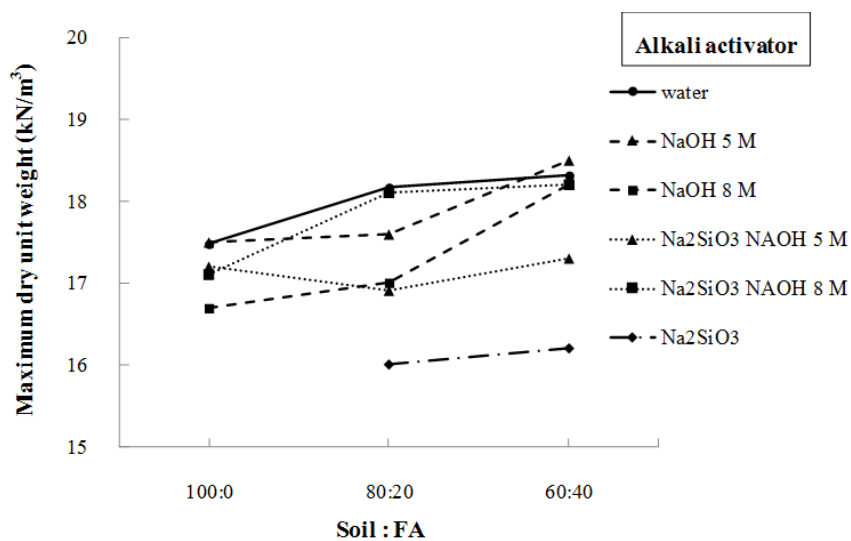
(ข)

ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma_{d,max}$  กับ Alkali activator content จากสมการเส้นแนวโน้มที่อัตราส่วน (ก) Soil : FA 100 : 0 (ข) Soil : FA 80 : 20 และ (ค) Soil : FA 60 : 40



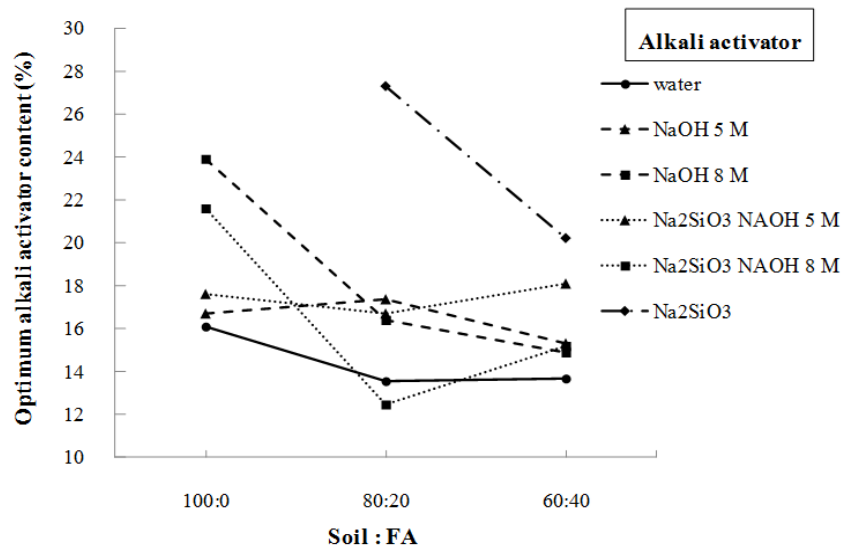
(ก)

ภาพที่ 4-2 (ต่อ)



(ข)

ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก)  $\gamma_{d,max}$  และ (ข) OAC ที่อัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40



(ข)

หมายเหตุ แกน X ไม่ได้เป็นหน่วยมาตราส่วน

ภาพที่ 4-3 (ต่อ)

ภาพที่ 4-3 (ก-ข) แสดงความความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma_{d,max}$  และ OAC ต่ออัตราส่วน Soil : FA การผสมสารละลาย Alkali activator มีผลให้ค่า  $\gamma_{d,max}$  มีแนวโน้มต่ำลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วน Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> : NaOH 100 : 0 ผลจากการผสมสารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> กับดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียว (Soil : FA 100 : 0) ไม่สามารถหาค่า  $\gamma_{d,max}$  ได้ เนื่องจากลักษณะของสารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> เมื่อผสมกับดินตะกอนทะเลจะไม่ค่อยจับตัวกัน มีลักษณะแห้งและแข็งตัวทันทีที่สัมผัสกัน และด้วยสาร Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> มีความหนืดมากกว่า NaOH และน้ำ แม้ว่าจะใช้ Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ในปริมาณที่มากเท่าไรก็ตามยังคงทำให้การผสมให้เข้ากันได้นั้นเป็นเรื่องยาก จึงทำให้ไม่สามารถทำการบดอัดเพื่อหาค่า OAC ได้ สำหรับอัตราส่วนที่เพิ่มสารละลาย NaOH โดยรวมแล้วจะให้ค่า  $\gamma_{d,max}$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแก่ตัวอย่าง โดยค่า  $\gamma_{d,max}$  สูงสุด คือ Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> : NaOH 0 : 100 ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ เนื่องจากสารละลายดังกล่าวมีผลต่อเถ้าลอยมากกว่าดินตะกอนทะเล สามารถทำการชะซึลิก้าและอะลูมินากับเถ้าลอยได้มากกว่าดินตะกอนทะเล แม้ว่าดินตะกอนทะเลจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบธาตุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ แต่สารละลาย Alkali activator นั้นไม่สามารถชะองค์ประกอบเหล่านั้นได้เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นความเป็นอสัณฐานต่ำ

การเพิ่มขึ้นของค่า  $\gamma_{d,max}$  ที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 นั้นเหมาะสมกับการใช้สารละลาย Alkali activator ในประเภทสารละลาย NaOH ซึ่งให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด

แก้ตัวอย่างและสูงกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยน้ำเปล่า เกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันระหว่าง สารละลาย NaOH และแก้วลอย ส่งผลให้ตัวอย่างเชื่อมประสานกันและเพิ่มความหนาแน่น แก้ตัวอย่างยิ่งขึ้น บ่งบอกได้ในอัตราส่วน Alkali activator ratio ดังตารางที่ 4-2 ถึง 4-4 จำนวน Alkali activator ratio ที่น้อยกว่าเมื่อเพิ่มแก้วลอย แสดงถึงความต้องการในการใช้สารละลาย Alkali activator ที่น้อยกว่าการใช้ดินตะกอนเพียงอย่างเดียว สำหรับดินตะกอนทะเลแล้วสารละลาย Alkali activator จึงมีหน้าที่เพียงเพื่อการแลกเปลี่ยนประจุไอออนลบระหว่างอนุภาคผิวดินเท่านั้น (Sukmak et al., 2013) ดังนั้นเมื่อเพิ่มแก้วลอยจึงเป็นสาเหตุให้ค่า  $\gamma_{d,max}$  สูงขึ้น เนื่องจากลดการ แลกเปลี่ยนประจุระหว่างดินตะกอนทะเลและสารละลาย Alkali activator ทำให้ดินตะกอนทะเลที่ ผสมแก้วลอยมีค่า OAC ลดลง

ตารางที่ 4-2 OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ของอัตราส่วน Soil : FA 100 : 0

Alkali activator	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH	OAC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Alkali activator ratio (g/g)
water content	-	16.1	17.5	-
NaOH 5 M	0 : 100	16.7	17.5	-
NaOH 8 M	0 : 100	23.9	16.7	-
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	50 : 50	17.6	17.2	-
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	50 : 50	21.6	17.1	-
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	100 : 0	-	-	-

ตารางที่ 4-3 OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ของอัตราส่วน Soil : FA 80 : 20

Alkali activator	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH	OAC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Alkali activator ratio (g/g)
water content	-	13.6	18.2	0.679
NaOH 5 M	0 : 100	17.4	17.6	0.870
NaOH 8 M	0 : 100	16.4	17.0	0.820
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	50 : 50	16.7	16.9	0.835

ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

Alkali activator	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH	OAC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Alkali activator ratio (g/g)
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	50 : 50	12.5	18.1	0.625
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	100 : 0	27.3	16.0	1.365

ตารางที่ 4-4 Optimum alkali activator content และ  $\gamma_{d,max}$  ของอัตราส่วน Soil : FA 60 : 40

Alkali activator	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH	OAC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Alkali activator ratio (g/g)
water content	-	13.7	18.3	0.343
NaOH 5 M	0 : 100	15.3	18.5	0.383
NaOH 8 M	0 : 100	14.9	18.2	0.373
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	50 : 50	18.1	17.3	0.453
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	50 : 50	15.2	18.2	0.380
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	100 : 0	20.2	16.2	0.505

## บทที่ 5

### ผลทดสอบ California bearing ratio, CBR ของการปรับปรุงดินตะกอนทะเล ด้วยจีโอโพลิเมอร์ภายใต้สถานะแช่น้ำ (Soaked)

#### การเตรียมตัวอย่าง CBR ในสถานะ Soak

การเตรียมตัวอย่าง CBR แต่ละอัตราส่วนแสดงค่า OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ไว้ดังตารางที่ 5-1 และ ตารางที่ 5-2 โดยค่า OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ในตารางนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังภาพที่ 5-1 (ก-ข) โดยแสดงอัตราส่วนสารละลาย Alkali activator ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยค่า OAC จากการเตรียมตัวอย่าง CBR ต่างกับค่า OAC จากการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานพบว่าที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 86.1 ถึง 106.3% และที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 94.1 ถึง 105.8% ดังภาพที่ 5-2 (ก-ข) แสดงค่า  $\gamma_{d,max}$  จากการเตรียมตัวอย่าง CBR ต่างกับการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานพบว่าที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 95.6 ถึง 104.5% และที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 94.1 ถึง 100% ซึ่งผลจากการเตรียมตัวอย่าง CBR ที่มีความแตกต่างชัดเจนที่สุดคืออัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย  $Na_2SiO_3$  ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน โดยพบว่าค่า OAC มีค่าต่ำกว่า 90% แต่เมื่อพิจารณาถึงค่า  $\gamma_{d,max}$  นั้นยังคงมีค่ามากกว่า 95% ในทางตรงกันข้ามเช่นอัตราส่วน NaOH 8 M ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีค่า OAC สูงสุดกลับมีค่า  $\gamma_{d,max}$  สูงกว่า 95% ผลการเตรียมตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง อาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลการทดลองไม่เป็นไปตามความเป็นจริงนัก

ตารางที่ 5-1 ค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  ที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน

Soil : FA	Alkali activator	OAC (%)			$\gamma_{dry,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )		
100 : 0	water	16.7			17.4		
	NaOH 5 M	17.1	15.6	16.1	16.1	16.2	16.3
	NaOH 8 M	24.9	26.6	24.7	17	16.8	17.3
	$Na_2SiO_3$ : NaOH 5 M	17.1	19.1	17.1	16.8	16.8	16.7
	$Na_2SiO_3$ : NaOH 8 M	19.2	20.9	25.5	17.7	17.2	16.8
	$Na_2SiO_3$	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 5-1 (ต่อ)

Soil : FA	Alkali activator	OAC (%)			$\gamma_{dry,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )		
80 : 20	water	13.1			17.4		
	NaOH 5 M	16.5			17.2		
	NaOH 8 M	17.6	16.9	17.2	17.7	17.8	17.8
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	15			16.2		
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	12.6			17.4		
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	25.4	22.8	23.1	15.2	15.8	16
60 : 40	water	13.7			17.7		
	NaOH 5 M	14.9			18.1		
	NaOH 8 M	14.2	14.1	14.6	17.8	18.3	18.4
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	18.6	16.7	16.1	17.2	17.5	17.7
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	15.2	13.5	16.3	17.8	18	17.6
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	17.4			16.1		

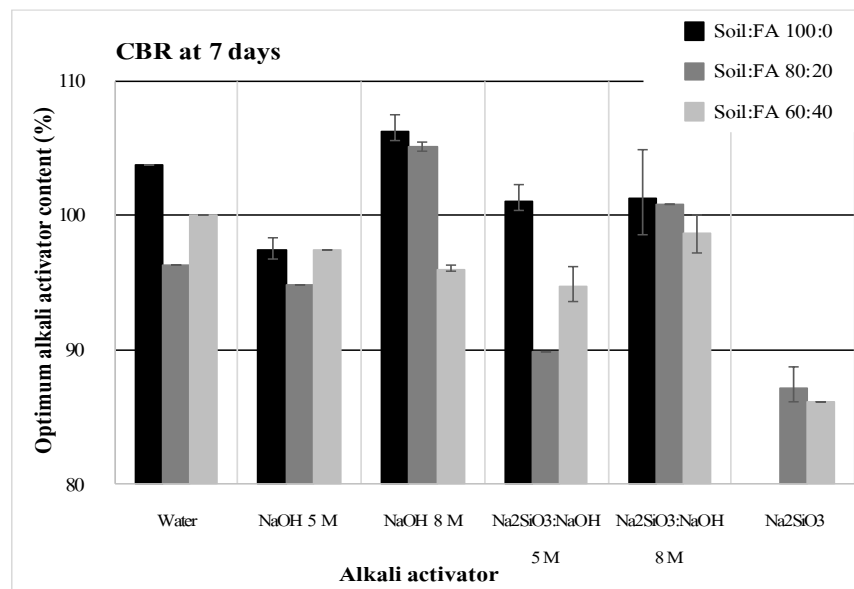
ตารางที่ 5-2 ค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  ที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน

Soil : FA	Alkali activator	OAC (%)			$\gamma_{dry,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )		
100 : 0	water	16.7			17.4		
	NaOH 5 M	16.3	18.6	16.7	17.1	16	16.2
	NaOH 8 M	21.6	24.5	25.6	16.2	16.3	15.9
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	18.1	18.6	18.9	16.3	16	15.6
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	22.4	25.8	19.1	16.6	17	16
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	-					
80 : 20	Water	12.8			17.2		
	NaOH 5 M	18.3	16.8	18.1	16.5	16.8	16.4
	NaOH 8 M	16.3	16.2	16.3	16.9	16.6	17
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	15.6	16.6	16.3	17	16.8	16.5

ตารางที่ 5-2 (ต่อ)

Soil : FA	Alkali activator	OAC (%)			$\gamma_{dry,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )		
60 : 40	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	13.5	12.4	13.8	17.1	17.3	17.1
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	26.9	27.1	24.4	15.3	15.3	15.4
	Water	13.2			18		
	NaOH 5 M	15.7	15.2	15	18	17.7	17.4
	NaOH 8 M	13.7	14.9	13.8	17.8	17.7	17.7
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	18.3	17.8	16.9	16.6	16.5	16.6
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	14.6	13.4	16.6	17.2	17.3	17.4
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	19.2	19.9	19.1	16.1	16.2	16.3

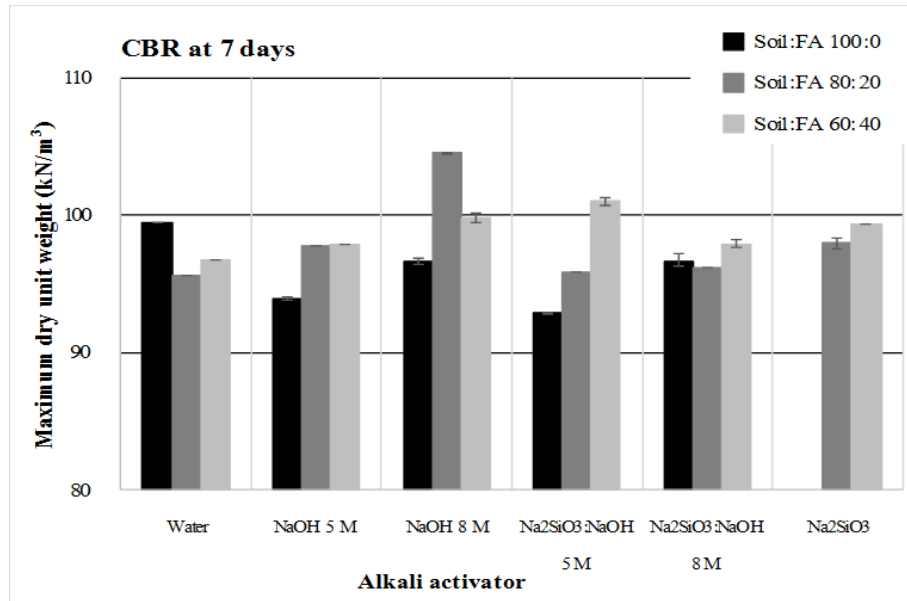
หมายเหตุ ค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  ที่มีค่าเดียวเนื่องจากตัวอย่างถูกดำเนินการผสมพร้อมกัน  
 ค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  ที่มีสามค่าเนื่องจากตัวอย่างถูกดำเนินการผสม 3 ครั้ง



(ก)

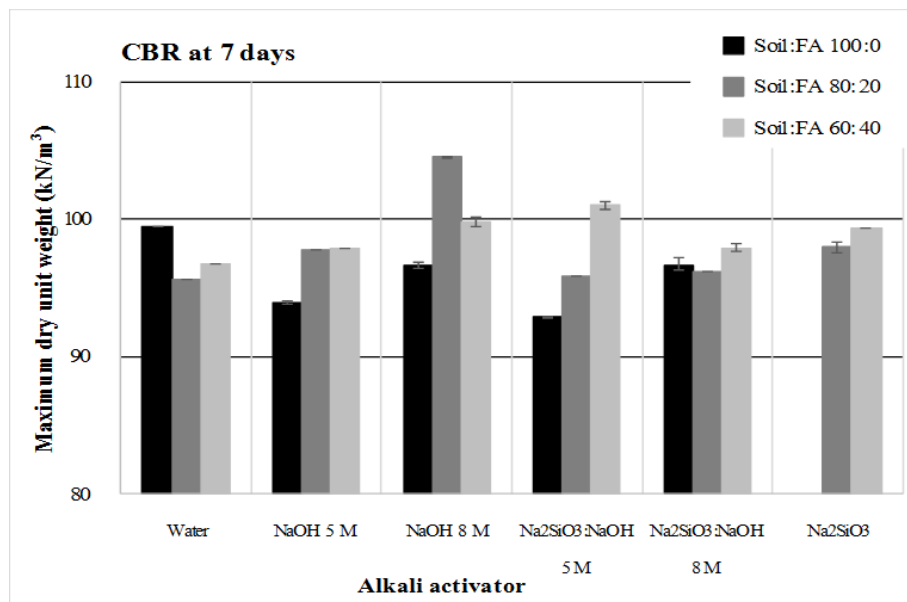
ภาพที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ OAC (ก) ที่ระยะการบ่ม 7 วัน  
 (ข) ที่ระยะการบ่ม 28 วัน





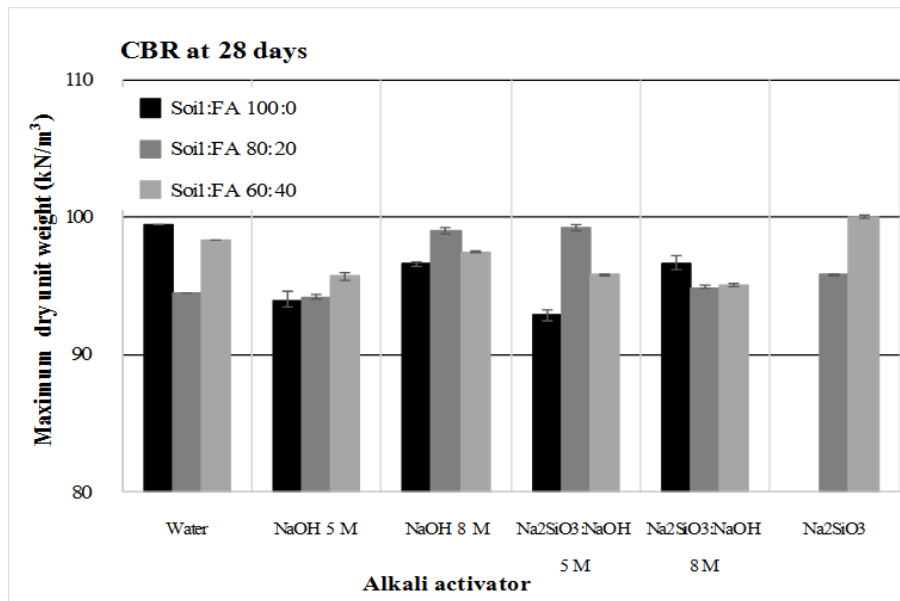
(จ)

ภาพที่ 5-1 (ต่อ)



(ก)

ภาพที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ  $\gamma_{d,max}$  (ก) ที่ระยะการบ่ม 7 วัน  
(จ) ที่ระยะการบ่ม 28 วัน



(จ)

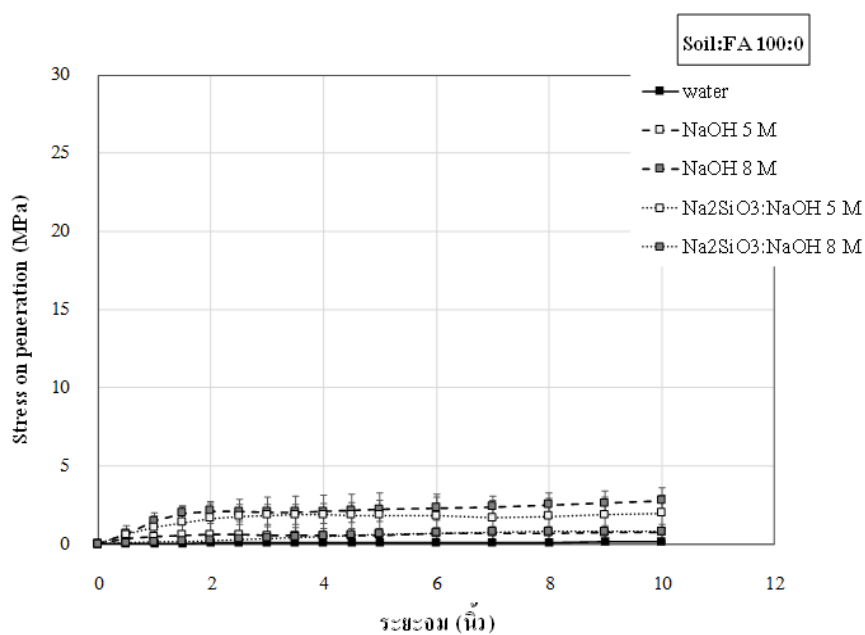
ภาพที่ 5-2 (ต่อ)

### ผลการทดสอบ CBR

ผลการทดสอบ CBR ซึ่งได้มาจากค่า Stress on penetration ในทุกอัตราส่วนที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Soil : FA เท่ากับ 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40 ดังภาพที่ 5-3 ที่ระยะการบ่ม 7 วัน และภาพที่ 5-4 ที่ระยะการบ่ม 28 วัน โดยผลการทดสอบพบว่าค่า Stress on penetration มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเกลือทั้งระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน โดยอัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ จะพบว่ามีค่า Stress on penetration ที่โดดเด่นกว่าอัตราส่วนที่ผสมน้ำเปล่าซึ่งมีค่า Stress on penetration ที่ต่ำสุดทุกเกือบทุกอัตราส่วน ยกเว้นอัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ซึ่งพบว่าอัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ให้ค่า Stress on penetration ค่อนข้างต่ำ ผลการทดสอบดังกล่าวจึงแสดงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนา ค่า CBR ภายใต้สภาวะแช่น้ำ ได้มีการศึกษาการเฟลคเตอร์ที่สำคัญต่อการพัฒนา ค่า CBR พบว่า ค่า CBR ถูกควบคุมอยู่ด้วยกัน 4 เฟลคเตอร์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนา ค่า CBR ภายใต้สภาวะแช่น้ำ ได้มีการศึกษาการเฟลคเตอร์ที่สำคัญต่อการพัฒนา ค่า CBR พบว่า ค่า CBR ถูกควบคุมอยู่ด้วยกัน 4 เฟลคเตอร์ ได้แก่

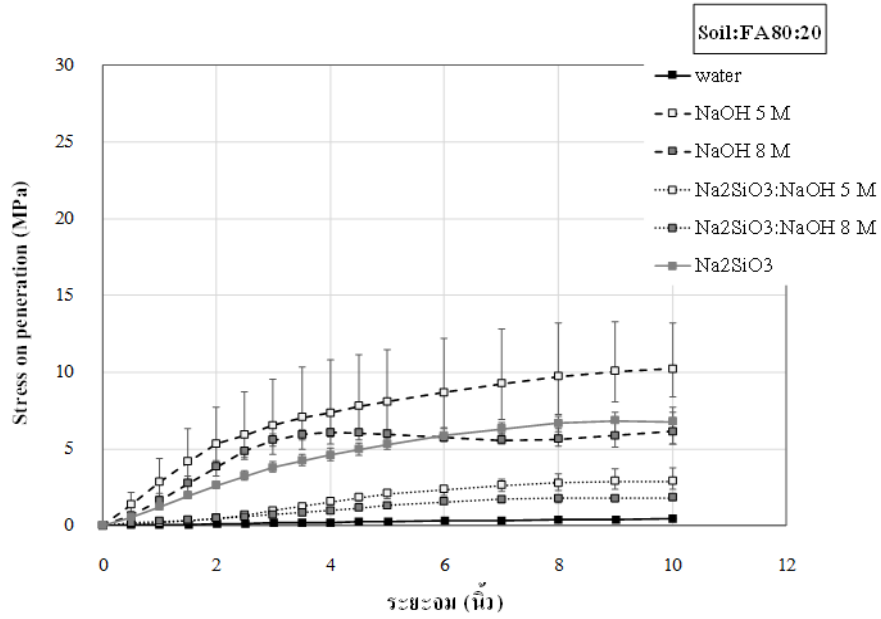
1. อัตราส่วนดินเหนียวต่อเกลือ Soil : FA 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40
2. อัตราส่วน Alkali activator ระหว่าง Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> : NaOH 0 : 100 50 : 50 และ 100 : 0

3. ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 และ 8 โมลาร์
  4. ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน โดยใช้อุณหภูมิห้อง
- ตามมาตรฐานชั้นพื้นทางกรมทางหลวงชั้นรองพื้นทางวัสดุรวม CBR มีค่า  $\geq 25\%$   
ชั้นพื้นทางหินคลุกและหินคลุกผสมซีเมนต์ CBR มีค่า  $\geq 80\%$  พื้นทางกรวดไม้และตะกรันกรวดไม้  
CBR มีค่า  $\geq 90\%$

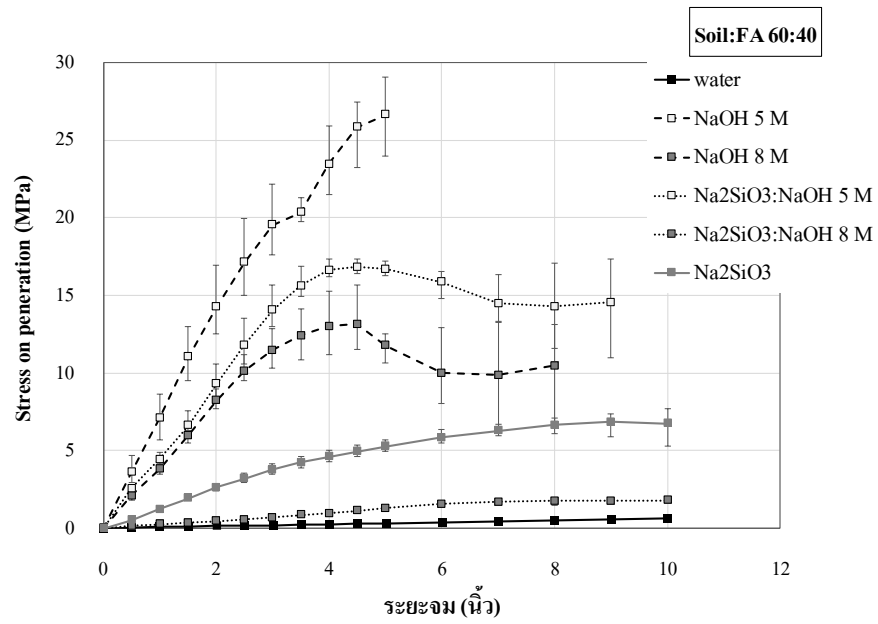


(ก)

ภาพที่ 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมต่อค่า Stress on penetration ที่ระยะการบ่ม 7 วัน  
(ก) อัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 (ข) อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 (ค) อัตราส่วน  
Soil : FA 60 : 40

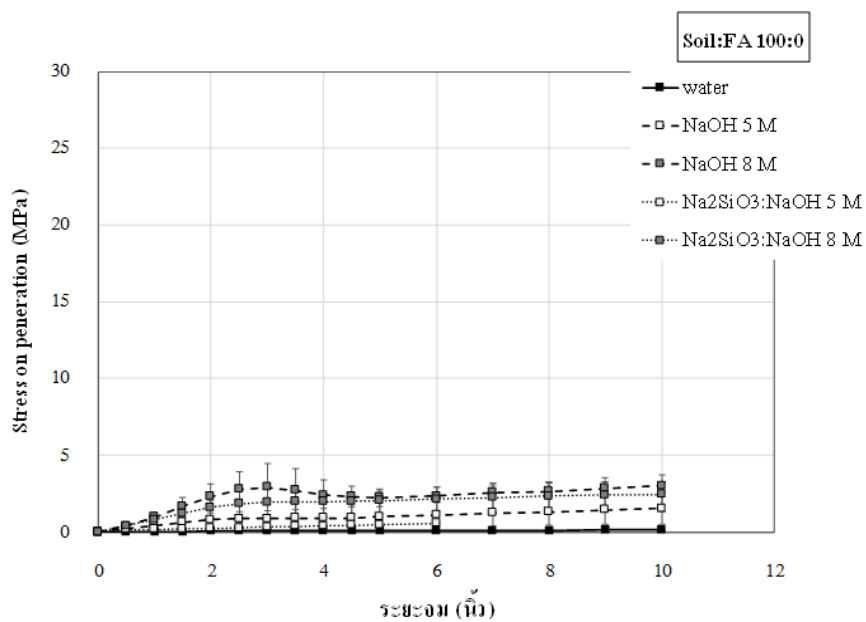


(จ)

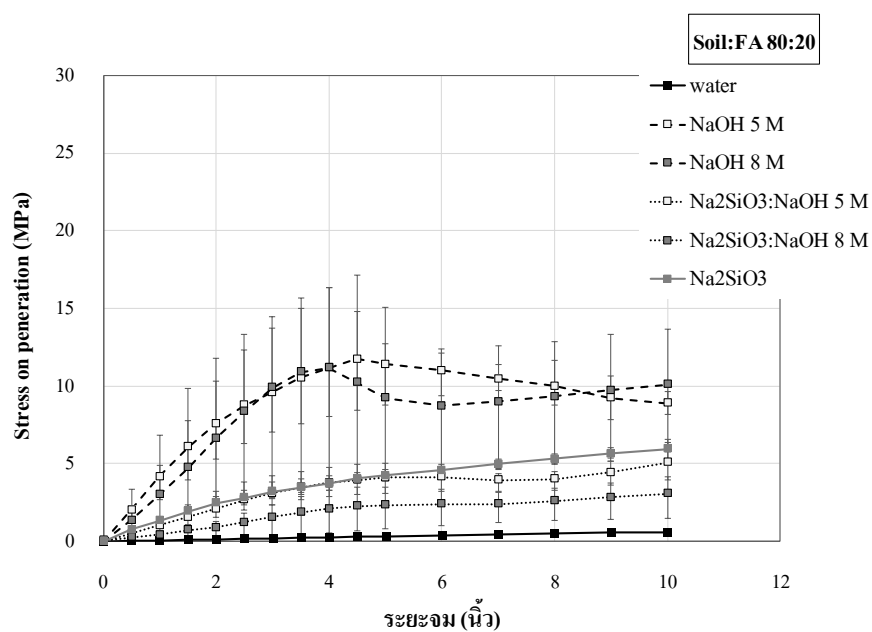


(ค)

ภาพที่ 5-3 (ต่อ)

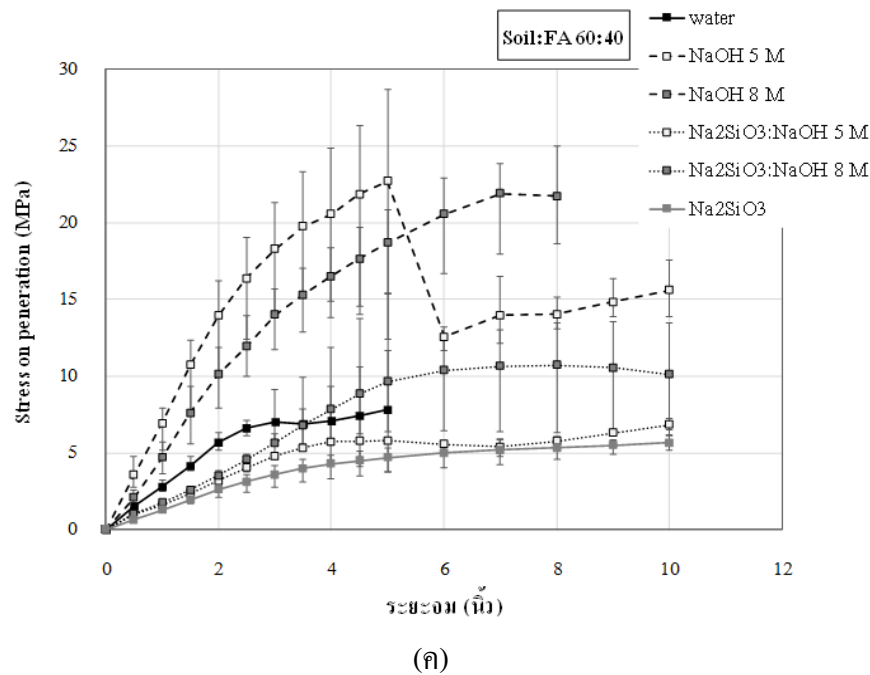


(ก)



(ข)

ภาพที่ 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมต่อค่า Stress on penetration ที่ระยะการบ่ม 28 วัน  
 (ก) อัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 (ข) อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 (ค) อัตราส่วน  
 Soil : FA 60 : 40



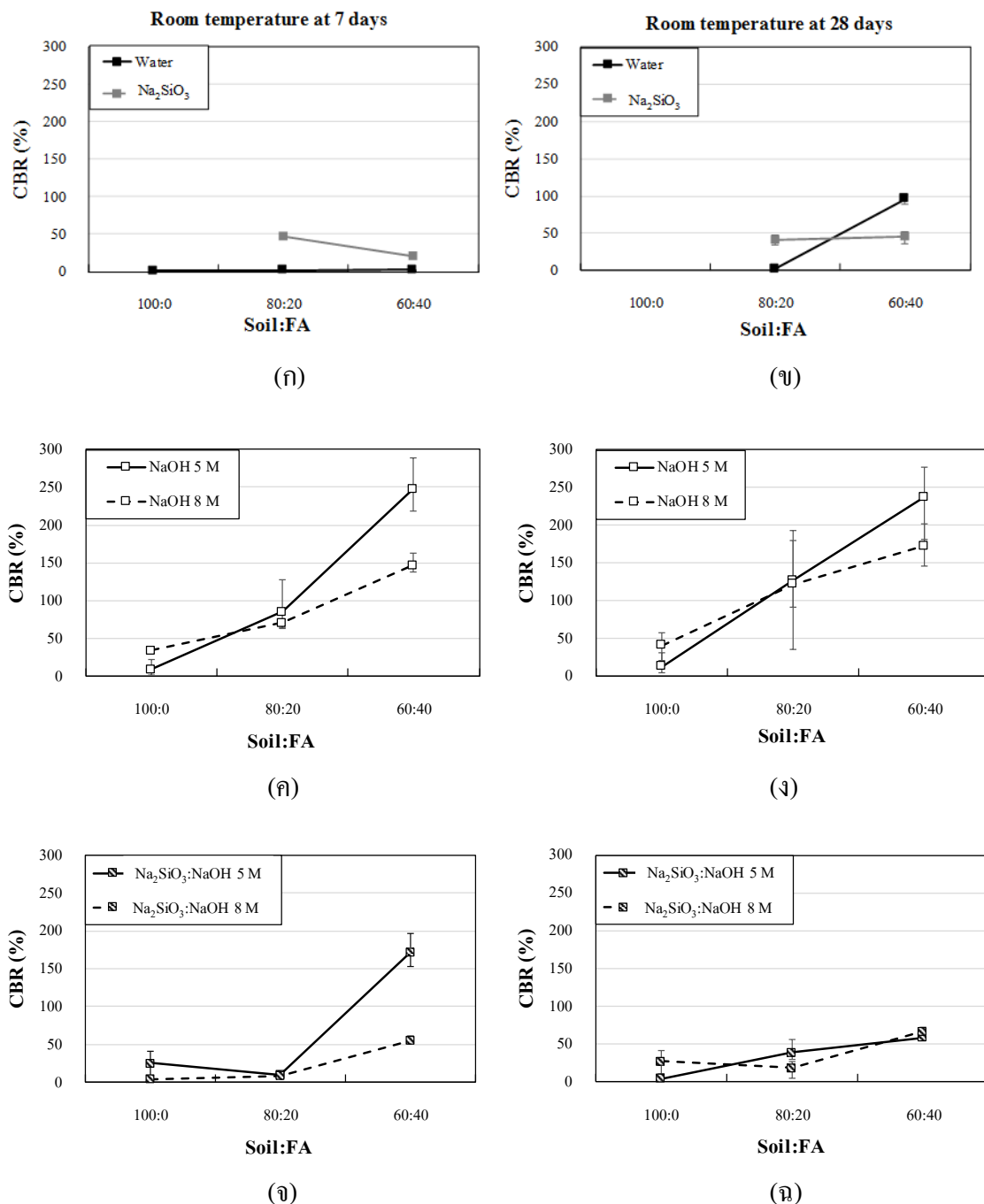
ภาพที่ 5-4 (ต่อ)

#### อัตราส่วน Soil : FA

การพัฒนาค่า CBR เนื่องจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันเกิดจากการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย ซึ่งเป็นการเพิ่มสัดส่วนอะลูมิเนียมซิลิเกตแก่ตัวอย่าง ส่งผลต่อการพัฒนาค่า CBR เพิ่มขึ้นในอัตราส่วน Soil : FA เท่ากับ 60 : 40 ดังภาพที่ 5-5 (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

ภาพที่ 5-5 บ่งชี้ว่าระยะเวลาการบ่มตัวอย่างทั้ง 7 และ 28 วัน ค่า CBR เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 อย่างชัดเจนในอัตราส่วนที่ถูกผสมด้วยสารละลาย NaOH เนื่องจากความสามารถจากการชะลิทิกและอลูมินาในเถ้าลอยของสารละลาย Alkali activator ทำให้โอกาสการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันมากกว่าดินตะกอนทะเล การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันพัฒนาไปสู่โครงสร้าง N-A-S-H และ C-S-H เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้ตามจำนวนเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีส่วนทำให้ค่า CBR สูงขึ้น สามารถรับกำลังแบกทานได้แม้ตัวอย่างจะอยู่ในสถานะแฉะน้ำ สำหรับอัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 ยังคงมีค่า CBR ที่ไม่แน่นอน เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยแล้ว ดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียวนั้นไม่ช่วยในการพัฒนาค่า CBR

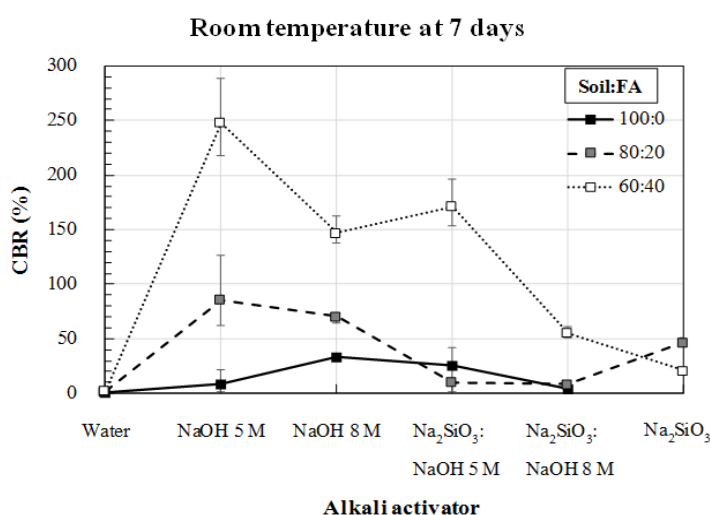
แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นอณูพื้นฐานต่อการเข้าชะของสารละลาย Alkali activator จึงไม่เป็นผล และไม่เกิดการพัฒนาค่า CBR



ภาพที่ 5-5 (ก-ฉ) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Soil : FA ต่ออัตราส่วนที่ผสมน้ำเปล่า และอัตราส่วนที่ผสม Alkali activator

### อัตราส่วน Alkali activator

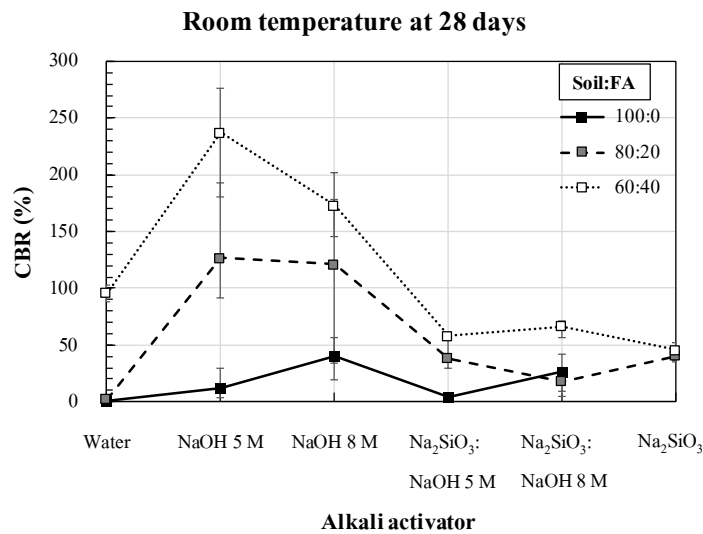
อัตราส่วน Alkali activator นั้นมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาค่า CBR โดยสารละลาย Alkali activator แต่ละประเภทจะให้ผลต่อความสามารถในการรับแรงแบกทานที่แตกต่างกันไป ดังภาพที่ 5-6 (ก-ข) ค่า CBR ทั้งที่ระยะการบ่ม 7 และ 28 สารละลาย Alkali activator มีผลต่อ ค่า CBR สูงสุด โดยอัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 เป็นอัตราส่วนที่ให้ค่า CBR สูงสุดดังที่กล่าวไว้ใน หัวข้อก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามสารละลาย Alkali activator มีผลต่อค่า CBR ที่แตกต่างกัน โดยพบว่าอัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH จะทำให้ค่า CBR มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วยการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันจากการสร้างผลิตภัณฑ์ N-A-S-H แต่ในทางตรงข้ามการเพิ่ม สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  กลับทำให้ค่า CBR มีแนวโน้มต่ำลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจากสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  มาจาก CaO ที่อยู่ในอนุภาคเถ้าลอยซึ่งมีมากในเถ้าลอย class C ถูกชะออกมา และทำปฏิกิริยากับสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงอยู่ในรูปแบบของ C-S-H (Phummiphan et al., 2015) เป็นปฏิกิริยาที่ช่วยให้ตัวอย่างที่ผสมด้วยสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เชื่อมประสานกันแต่ไม่เพียงพอสำหรับสภาวะ Soaked แม้การพัฒนาค่า CBR นั้นจำเป็น ที่จะต้องประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์ N-A-S-H และ C-S-H สารละลาย NaOH ซึ่งให้ผลผลิต N-A-S-H มากกว่า C-S-H ช่วยเพิ่มค่า CBR ให้มีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ให้ผลผลิต C-S-H มากกว่า N-A-S-H นั้นไม่ช่วยให้เกิดการพัฒนาค่า CBR แต่อย่างใด



(ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน

ภาพที่ 5-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารละลาย Alkali activator ต่อระยะการบ่ม ตัวอย่าง (ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน





(ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน

หมายเหตุ แกน X ไม่ได้เป็นหน่วยมาตราส่วน

ภาพที่ 5-6 (ต่อ)

#### ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

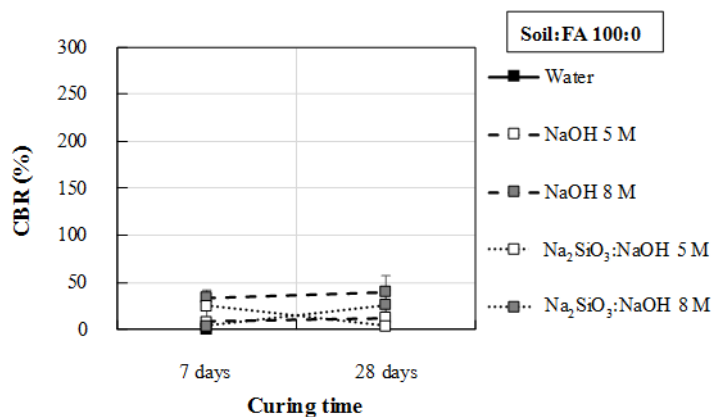
ภาพที่ 5-6 ผลทดลองพบว่าสารละลาย NaOH แสดงให้เห็นการมีอิทธิพลต่อค่า CBR เป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ซึ่งแสดงค่า CBR สูงกว่าที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทั้งอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  0 : 100 และ 50 : 50 ในอัตราส่วนที่ผสมแล้วลดย และเกือบทุกช่วงระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง จึงกล่าวได้ว่าการพัฒนาค่า CBR นั้นเกิดขึ้นจากการเพิ่มแล้วลย ซึ่งมีผลต่อสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ และอัตราส่วนที่ไม่มีแล้วลยเป็นส่วนผสม (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 ที่อยู่ในอนุภาคแล้วลยซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของผลิตภัณฑ์ C-S-H เกิดการตกผลึกเสียก่อน โดยรูปแบบดังกล่าวจะสามารถพบได้ในสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง (>7.5 โมลาร์)

(Yip, Lukey & Van Deventer, 2005) ความเป็นผลึกของโครงสร้างทำให้ตัวอย่างสามารถรับแรงแบกทานได้ต่ำกว่าโครงสร้างของตัวอย่างที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เชื่อมประสานกันอย่างซับซ้อนและไม่เป็นระเบียบจึงสามารถรับแรงได้มากกว่า โดยคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์

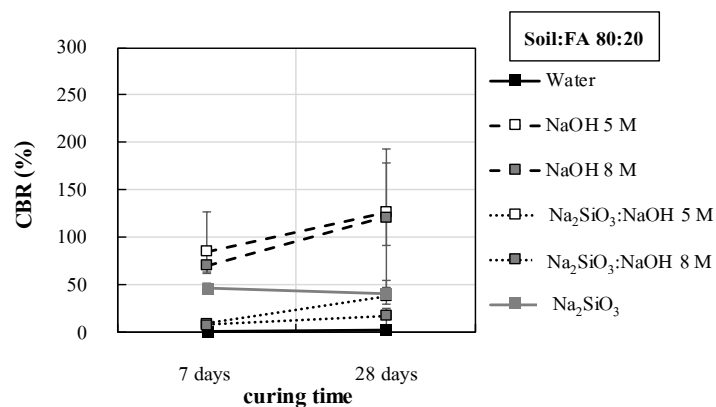
ซึ่งต้องการ โครงสร้างที่เป็นอสังฐานสำหรับกระบวนการ Polycondensation (การควบแน่นของจีโอโพลิเมอร์) สาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ C-S-H ที่ได้จากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มีน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ การพัฒนาค่า CBR จึงน้อยกว่า ส่วนสาเหตุที่การผสมดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียวกับสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทำให้ค่า CBR สามารถพัฒนาได้สูงกว่าความเข้มข้น 5 โมลาร์ อาจเป็นเพราะ โครงสร้างที่มีความเป็นอสังฐานต่ำนั้นต้องการสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงกว่าในการชะซิติกาและอะลูมินาที่อยู่ภายในอนุภาค เพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ จึงไม่มีผลต่อการพัฒนาค่า CBR ของอัตราส่วนที่ผสมดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมีความเข้มข้นที่ต่ำเกินกว่าจะสามารถชะซิติกาและอะลูมินาในอนุภาคดินตะกอนทะเลในการใช้ทำปฏิกิริยาได้

#### ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

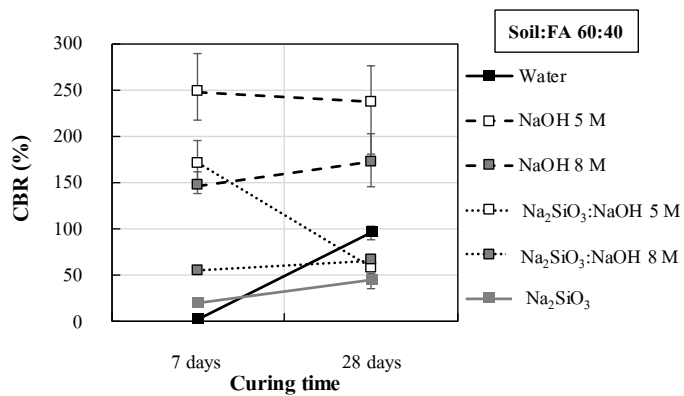
การพัฒนาค่า CBR จากการบ่มตัวอย่างที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน ผลการทดลอง ดังภาพที่ 5-7 (ก-ค) พบว่าค่า CBR เกือบทุกอัตราส่วน ที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่นานขึ้นช่วยส่งเสริมค่า CBR ให้มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย โดยถ้าลดยที่ผสมกับสารละลาย Alkali activator นั้นมีการพัฒนาค่า CBR ไม่มากนักเมื่อเทียบกับถ้าลดยที่ผสมน้ำเปล่า ส่วนอัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 มีการพัฒนาค่า CBR ที่สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์มีมากกว่า 5 โมลาร์ สาเหตุที่อัตราส่วนที่ผสมถ้าลดยกับน้ำมีการพัฒนาค่า CBR สูงขึ้น อาจเนื่องจากปฏิกิริยา CaOH ต้องการระยะเวลาที่นานขึ้นสำหรับการพัฒนาปฏิกิริยา ส่วนการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจากถ้าลดยที่ผสมกับสารละลาย Alkali activator มีการพัฒนาค่า CBR เล็กน้อย เนื่องจากมีการพัฒนาปฏิกิริยาในช่วงแรกสูง การพัฒนาในระยะต่อไปอาจต้องการสารละลาย Alkali activator มากกว่าค่า Optimum เพื่อใช้สำหรับการพัฒนาปฏิกิริยาที่มากขึ้น สำหรับการทำให้ปฏิกิริยาของสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ผสมดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียว เป็นการพัฒนาต่อเนื่องจากความสามารถในการชะซิติกาและอะลูมินาในเฟสอสังฐานได้สูงทำให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันสามารถดำเนินมาได้เรื่อย ๆ ในระยะการบ่มที่ยาวนาน



(ก)



(ข)



(ค)

หมายเหตุ แกน X ไม่ได้เป็นหน่วยมาตราส่วน

ภาพที่ 5-7 (ก-ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารละลาย Soil : FA เท่ากับ 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40 ตามลำดับ ต่อระยะเวลาการบ่มที่ 7 และ 28 วัน

การปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วยจีโอโพลิเมอร์ให้เป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวง โดยกำหนดค่า CBR ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชั้นรองพื้นทางวัสดุมวลรวม CBR มีค่า  $\geq 25\%$  ชั้นพื้นทางหินคลุก และชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 80% ชั้นพื้นทางกรวดโม และชั้นพื้นทางตะกรันโม CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 90% ผลการทดลองและเกณฑ์ตามมาตรฐานกรมทางหลวงได้ ดังภาพที่ 5-8 พบว่า

CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 25% อัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์ คือ

อัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 และ 80 : 20 ที่อัตราส่วน NaOH ที่ความเข้มข้นของ NaOH 8 โมลาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

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

อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH ที่ความเข้มข้นของ NaOH 8 โมลาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

อัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 ที่อัตราส่วน NaOH ที่ความเข้มข้นของ NaOH 8 โมลาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 และ 60 : 40 ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH ที่ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

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

อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 และ 60 : 40 ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

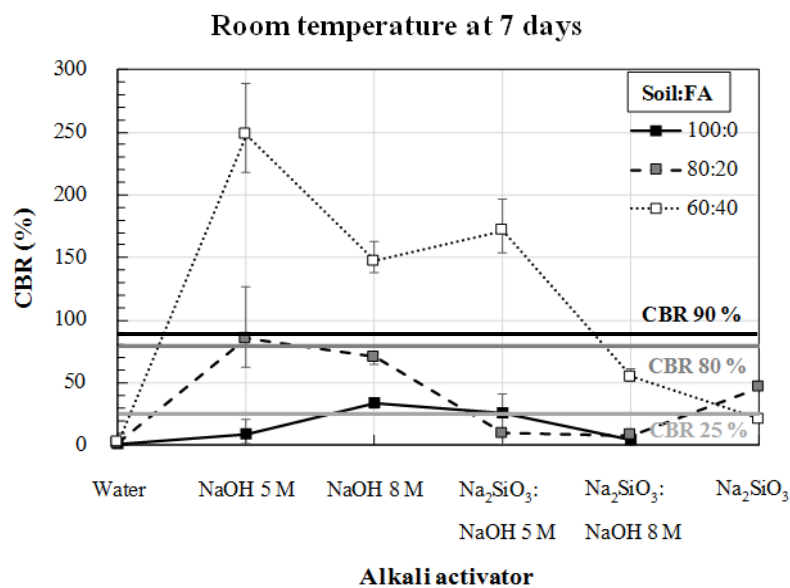
CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 80% อัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์ คือ

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

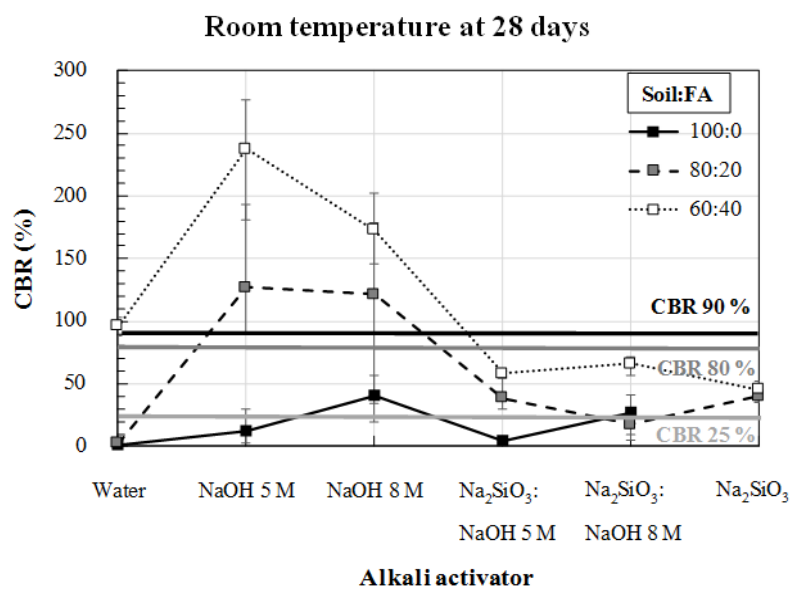
CBR มีค่าไม่น้อยกว่า 90% อัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์ คือ

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

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



(ก)



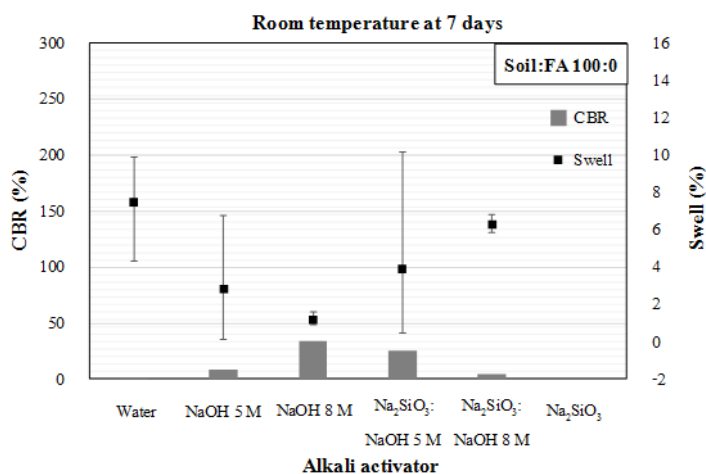
(ข)

ภาพที่ 5-8 ความสัมพันธ์ค่า CBR ตามเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวงต่อ (ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน

### การบวมตัวของดินจากสถานะ Soaked ของการปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วยจีโอโพลิเมอร์

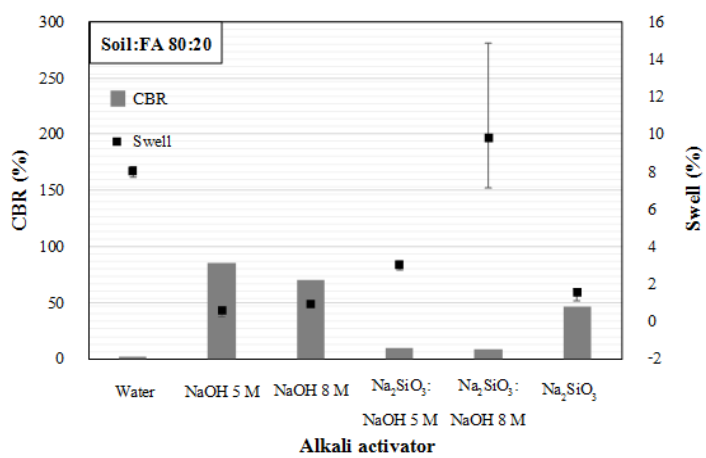
หลังจากตัวอย่าง CBR ที่ได้รับการบ่มเรียบร้อยแล้วจะถูกนำมาแช่น้ำ เพื่อศึกษาการบวมตัวของดิน (Swell) ได้พื้นทางเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำและการสูญเสียกำลังของดินที่เกิดการอิ่มตัวในสนาม ผลการทดสอบการ Swell ตัวของตัวอย่าง CBR ดังภาพที่ 5-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และค่า Swell พบว่าค่า Swell มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นกับค่า CBR ที่ต่ำ ดังนั้นค่า Swell จึงมีอิทธิพลต่อค่า CBR ซึ่งอิทธิพลที่มีผลต่อค่า Swell ได้แก่

1. อัตราส่วนดินเหนียวต่อเถ้าลอย Soil : FA 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40
2. อัตราส่วน Alkali activator ระหว่าง  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 50 : 50 และ 100 : 0
3. ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 และ 8 โมลาร์
4. ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน โดยใช้อุณหภูมิห้อง

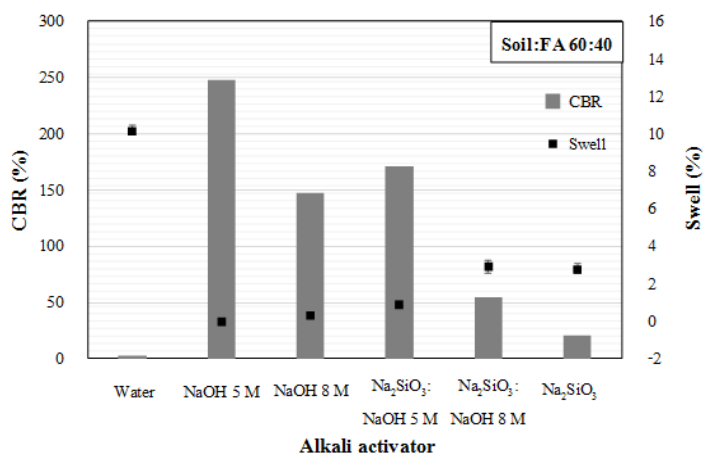


(ก)

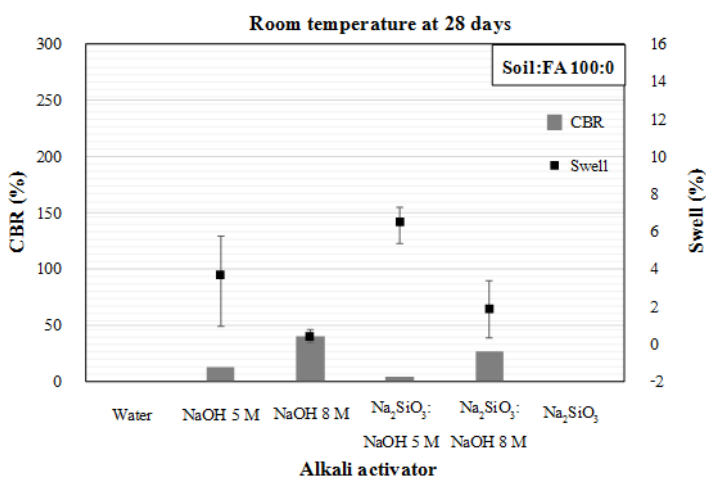
ภาพที่ 5-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และค่า Swell (ก) อัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 ที่ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ข) อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 ที่ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ค) อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ที่ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ง) อัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 ที่ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน (จ) อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 ที่ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน (ฉ) อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ที่ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน



(จ)

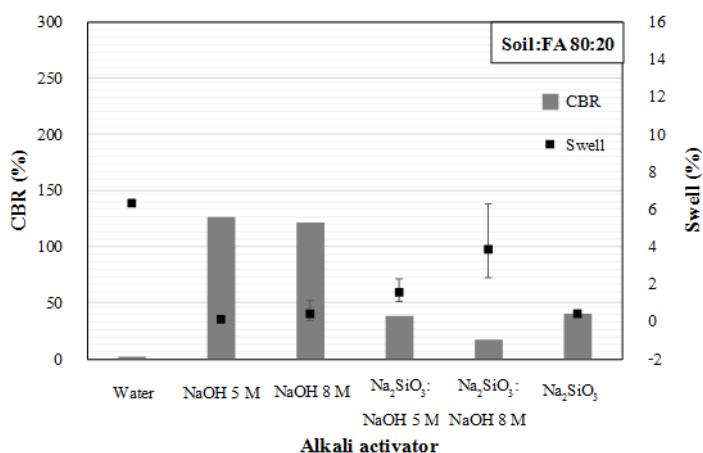


(ข)

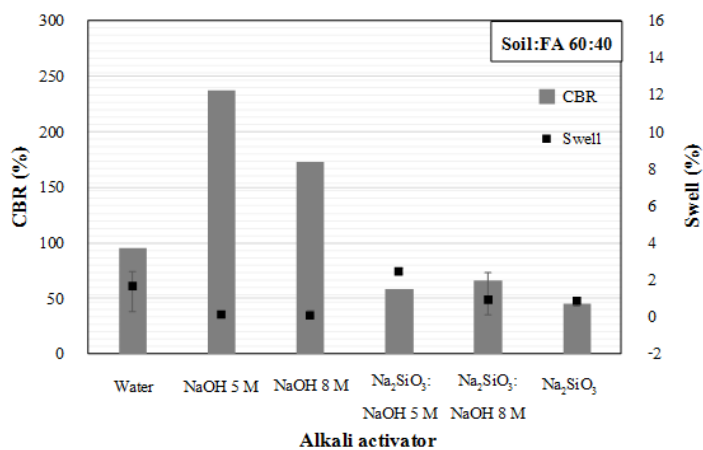


(ค)

ภาพที่ 5-9 (ต่อ)



(จ)



(ฉ)

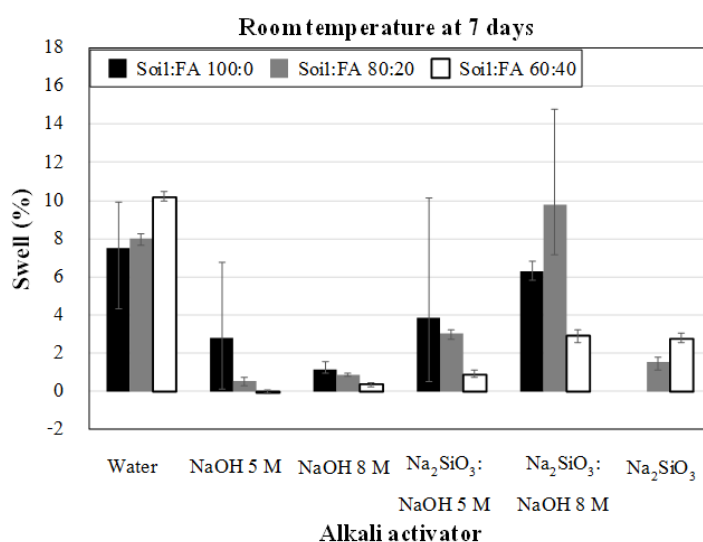
ภาพที่ 5-9 (ต่อ)

### อัตราส่วน Soil : FA

เมื่อนำค่า Swell ของแต่ละอัตราส่วน Soil : FA มาเปรียบเทียบกัน ดังภาพที่ 5-10 (ก-ข) พบว่าอัตราส่วนที่ผสมเถ้าลอยมากขึ้นจะทำให้ค่า Swell มีแนวโน้มลดลง เมื่อผสมสารละลาย Alkali activator แสดงให้เห็นว่านอกจากการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์จะให้ค่า 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 สูงกว่าการผสมดินตะกอนอย่างเดียวก็ตาม อาจเนื่องมาจากแม้ว่าการผสมเถ้าลอยกับน้ำจะให้ผลผลิต CaOH ที่ทำให้ตัวอย่างสามารถรับกำลังแบกทานได้ แต่การแทนที่

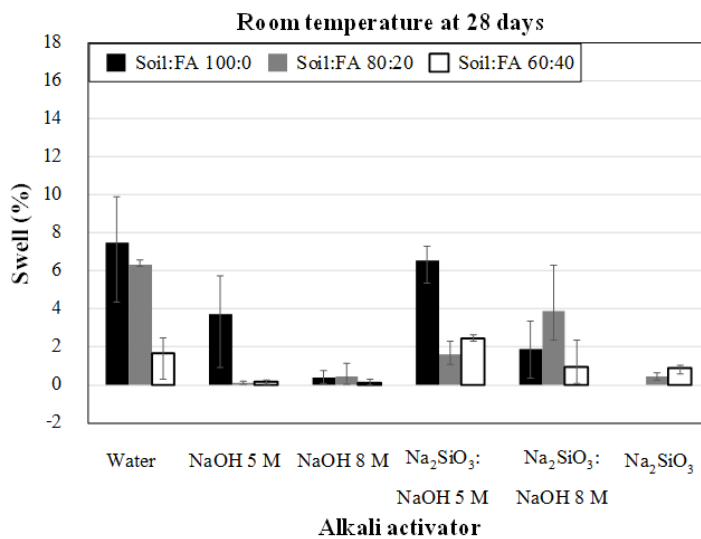


ดินตะกอนทะเลของเถ้าลอยเป็นการลดความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างดินตะกอนทะเลและน้ำลง ความสามารถในการยึดเหนี่ยวกันของตัวอย่างจึงต่ำลงด้วย และเมื่อดินตะกอนมีจำนวนไม่เพียงพอสำหรับการแลกเปลี่ยนประจุ การบวมตัวจากการอิมมัวด้วยน้ำและคัลอนูภาคของเถ้าลอยขึ้น ในทางตรงกันข้ามการผสมน้ำกับดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียวทำให้อ่อนุภาคของดินตะกอนทะเลล้วนสามารถแลกเปลี่ยนประจุได้อย่างเต็มที่ ในระยะเวลาการบ่มเดียวกันดินตะกอนทะเลมีแรงยึดเหนี่ยวจากการแลกเปลี่ยนประจุมากกว่า ดังนั้นค่า Swell จึงต่ำกว่าดินตะกอนทะเลที่ผสมเถ้าลอย แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่นานขึ้นการเพิ่มเถ้าลอยกลับทำให้ค่า Swell ต่ำลง อย่างที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ผลจาก CaO ต้องการระยะเวลาที่นานขึ้นสำหรับการทำปฏิกิริยาที่ดีกว่านั้นช่วยลดค่า Swell ให้แก่ตัวอย่างได้



(ก)

ภาพที่ 5-10 ความสัมพันธ์ของค่า Swell ต่ออัตราส่วน Soil : FA (ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน



(จ)

ภาพที่ 5-10 (ต่อ)

#### อัตราส่วน Alkali activator

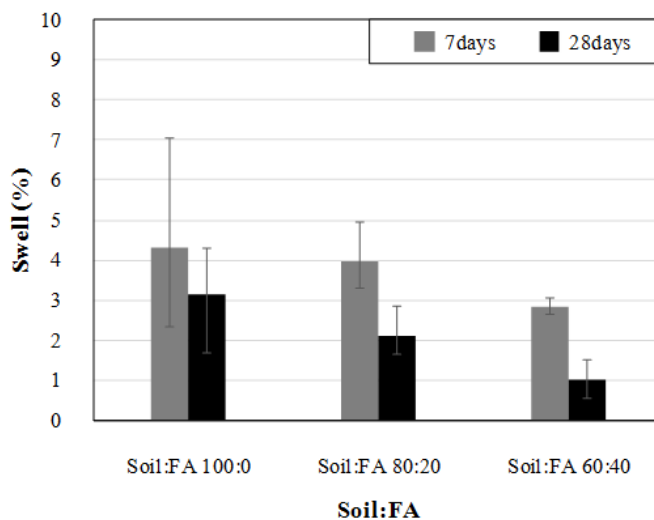
ภาพที่ 5-10 พบว่าการสารถละลาย Alkali activator ช่วยทำให้ค่า Swell ของตัวอย่างลดลง โดยเฉพาะตัวอย่างที่ผสมสารถละลาย NaOH ยกเว้นอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 50 : 50$  ซึ่งให้ค่า Swell ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับการผสมน้ำอย่างเดียวนั้น อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจำนวนมากที่ที่เกิดจากสารถละลาย NaOH และผลผลิต N-A-S-H และ ปฏิกิริยาไฮเดรชันจากการผลิต C-S-H จากสารถละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ทำให้ค่า Swell ทั้งระยะ การบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน ลดลง ส่วนอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 50 : 50$  มีค่า Swell สูงสุด ในอัตราส่วนที่ผสมสารถละลาย Alkali activator อาจเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน และปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ บางส่วนที่อนุภาคดินตะกอนทะเลและเถ้าลอยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา ดังกล่าว โดยเฉพาะดินตะกอนทะเลที่มีจำนวนมากและยังทำปฏิกิริยาน้อยกว่าตัวอย่าง จึงไม่เชื่อมประสานกันเพียงพอ การอึดตัวจากน้ำที่ได้จากการแช่ในระยะเวลาที่นานขึ้น ทำให้ดิน ตะกอนทะเลบวมตัวและดันอนุภาคเถ้าลอยออกมาได้ง่ายขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำอยู่แล้วไม่ช่วย ในการยึดเกาะกันของระหว่างอนุภาคเท่าที่ควร

### ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

ดังภาพที่ 5-10 จากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่แสดงค่า Swell ต่ำสุด เมื่อถูกผสมกับเถ้าลอยที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่สูงกว่าความเข้มข้น 8 โมลาร์ การเชื่อมประสานกันจากปฏิกิริยาดังกล่าวให้ค่า Swell ที่ต่ำสุด และยังให้ค่า CBR ที่สูงสุด เช่นเดียวกัน ดังนั้นการผสมเถ้าลอยจึงเหมาะสมกับสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ซึ่งช่วยลดค่า Swell แก่ตัวอย่างได้ แต่การผสมสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ เหมาะสมสำหรับการลดค่า Swell แก่ตัวอย่างที่ผสมดินตะกอนทะเล ซึ่งช่วยลดค่า Swell แก่ตัวอย่างได้มากกว่าสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ เนื่องจากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์นั้นเข้าทำปฏิกิริยากับ CaO ที่อยู่ในอนุภาคเถ้าลอยซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของผลิตภัณฑ์ C-S-H เกิดการตกผลึกจึงไม่ได้เชื่อมประสานกันในรูปแบบอสัณฐาน โครงสร้างของตัวอย่างจึงถูกน้ำเข้าแทรกซึมทำลายโครงสร้างได้ง่ายกว่าการแลกเปลี่ยนประจุจากดินตะกอนทะเลเพียงอย่างเดียว

### ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

ผลทดลองของตัวอย่างทุกอัตราส่วนถูกแยกออกเป็นอัตราส่วน Soil : FA เนื่องจาก การปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วยจีโอโพลิเมอร์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของจำนวนเถ้าลอยมากที่สุด เพื่อให้เกิดความแตกต่างที่ชัดเจนมากขึ้นจึงแยกแยะระหว่างระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน ดังภาพที่ 5-11 พบว่าระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน ช่วยส่งเสริมให้ค่า Swell ของตัวอย่างลดลงได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยมากขึ้น การทำปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอย และสารละลาย Alkali activator ซึ่งได้ผลผลิตเป็น N-A-S-H และ C-S-H หรือแม้แต่ CaOH จากการทำปฏิกิริยากับน้ำ ต้องการระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่นานเพื่อการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์มากขึ้น



ภาพที่ 5-11 ความสัมพันธ์ของค่า Swell ต่อระยะเวลาบ่มตัวอย่างของอัตราส่วน Soil : FA

### สรุปผลการทดสอบ CBR

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนา ค่า CBR และการบวมตัวของตัวอย่างจากสถานะ Soaked ได้มีเฟคเตอร์ที่สำคัญอยู่ด้วยกัน 4 เฟคเตอร์ โดยเกิดจากความสัมพันธ์ของปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่มีต่อตัวอย่างด้วยการสร้างผลิตภัณฑ์ N-A-S-H ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของการพัฒนา ค่า CBR นอกจากนั้นยัง พบว่า ยังมีส่วนช่วยในการลดการบวมตัวของตัวอย่าง จากการเชื่อมประสานกันที่เพียงพอ ทำให้ตัวอย่างยังคงสามารถรับกำลังเบกทานได้ดี แม้ผ่านสถานะ Soaked มาแล้วก็ตาม โดยอัตราส่วนนี้ได้ให้ค่า CBR ที่สูงสุดและมีค่า Swell น้อยที่สุด ได้แก่

1. อัตราส่วนดินเหนียวต่อเถ้าลอย Soil : FA 60 : 40
2. อัตราส่วน Alkali activator ระหว่าง  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100
3. ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 โมลาร์
4. ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่

## บทที่ 6

### ผลการทดสอบ UCS ของการปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วยจีโอโพลิเมอร์

#### การเตรียมตัวอย่าง UCS ในสถานะ Unsoaked

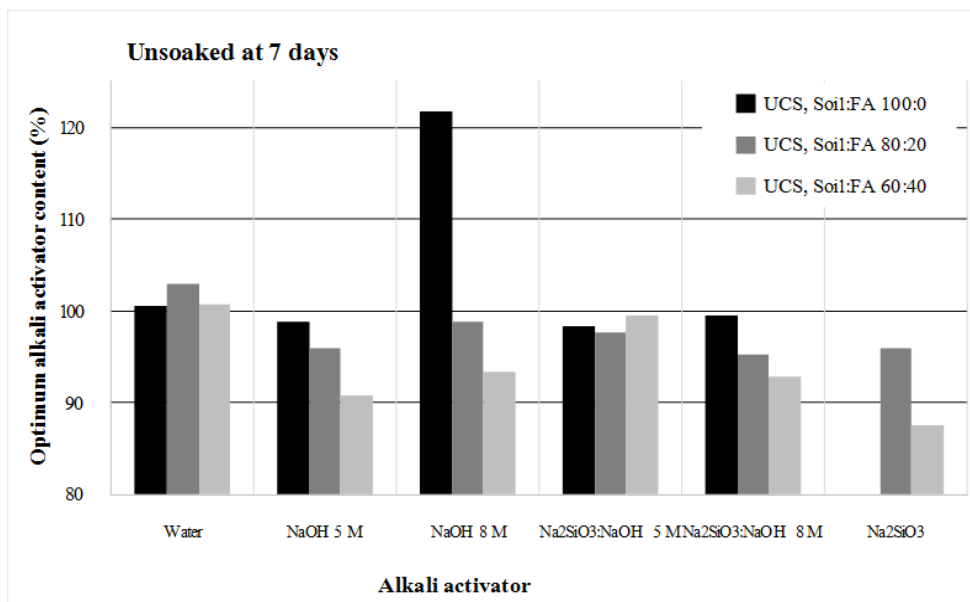
การเตรียมตัวอย่าง UCS แต่ละอัตราส่วนแสดงค่า OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ไว้ดังตารางที่ 6-1 การเปรียบเทียบระหว่างค่า OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ระหว่างจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และจากการเตรียมตัวอย่างทดสอบ UCS ดังภาพที่ 6-1 (ก-ข) โดยแสดงอัตราส่วนสารละลาย OAC ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยค่า OAC จากการเตรียมตัวอย่าง UCS ต่างกับค่า OAC จากการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน พบว่า ที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 87.6 ถึง 121.8% และที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 80.2 ถึง 109.6% ภาพที่ 6-2 (ก-ข) แสดงค่า  $\gamma_{d,max}$  จากการเตรียมตัวอย่าง UCS ต่างกับการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานพบว่าที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 87.6 ถึง 106.9% และที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 93.3 ถึง 98.4% โดยผลการเตรียมตัวอย่าง UCS พบค่า OAC ที่มีความแตกต่างสูงสุดพบที่อัตราส่วน NaOH 8 M ที่ Soil : FA 80 : 20 ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน ซึ่งมี OAC มากกว่าการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 5% ทำให้แตกต่างจาก OAC ที่ 100% ไปถึง 120.8% และเมื่อพิจารณาถึงค่า  $\gamma_{d,max}$  ต่างจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน 0.9% หรือ 94.6% จึงถือได้ว่าค่า  $\gamma_{d,max}$  ไม่ต่ำจนเกินไป ส่วนการเตรียมตัวอย่าง UCS ในอัตราส่วนอื่นมีค่า OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ทั้งในลักษณะเดียวกันและในลักษณะตรงกันข้ามอีกหลายตัวอย่าง ซึ่งมีความแปรปรวนค่อนข้างสูงจากความแปรปรวนนี้อาจส่งผลถึงค่า UCS

ตารางที่ 6-1 ค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  ตัวอย่าง UCS ในสถานะ Unsoaked

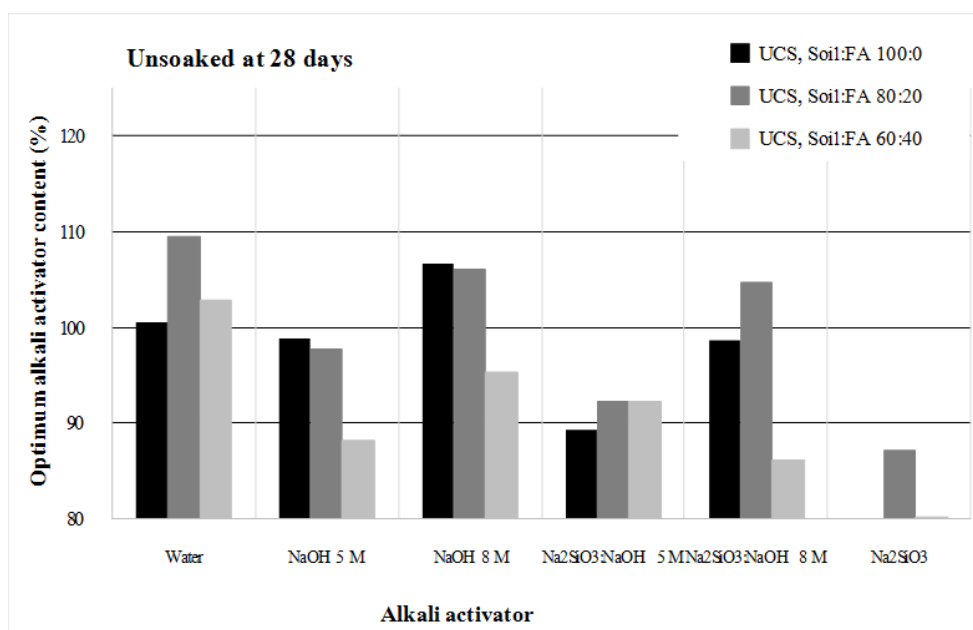
Soil : FA	Alkali activator	OAC (%)		$\gamma_{dry,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )					
		7 days	28 days	7 days		28 days			
100 : 0	water	16.2	16.2	15.4	15.2	15.4	16.8	16.6	17.1
	NaOH 5 M	16.5	16.5	17.3	17	17.2	16.6	16.8	17
	NaOH 8 M	29.1	25.5	15.7	15.8	15.8	15.9	16.1	16.3
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	17.3	17	17.4	17.3	17.7	16.3	16.7	16.6

ตารางที่ 6-1 (ต่อ)

Soil : FA	Alkali activator	OAC (%)		$\gamma_{dry,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )					
		7 days	28 days	7 days			28 days		
80 : 20	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	21.5	21.3	17.6	17.9	17.8	16.2	16.5	16.4
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
	water	14.0	14.9	17.2	17.9	17.3	17.4	17.4	17.2
	NaOH 5 M	16.7	17	17.3	17.1	16.9	17.1	16.2	16.2
	NaOH 8 M	16.2	17.4	17.5	17.2	17.3	15.9	15.8	15.9
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	16.3	15.4	17.2	17.1	17	16.1	16.1	16.5
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	11.9	13.1	18.2	18.1	18.1	17.2	17.3	17.1
60 : 40	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	26.2	23.8	17	17.2	17.1	15.6	16.2	16
	water	13.8	14.1	17.6	17.7	17.7	17	17.5	18.2
	NaOH 5 M	13.9	13.5	17.3	17.4	17.6	17.6	18	17.8
	NaOH 8 M	13.9	14.2	18.2	18.1	18.2	17.4	17.1	17.3
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	18.0	16.7	16.9	16.8	16.8	16.5	16.3	16.9
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	14.1	13.1	18.1	18.1	18.2	17.4	17.4	17.7
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	17.7	16.2	17.2	17.1	16.7	15.6	16.2	16

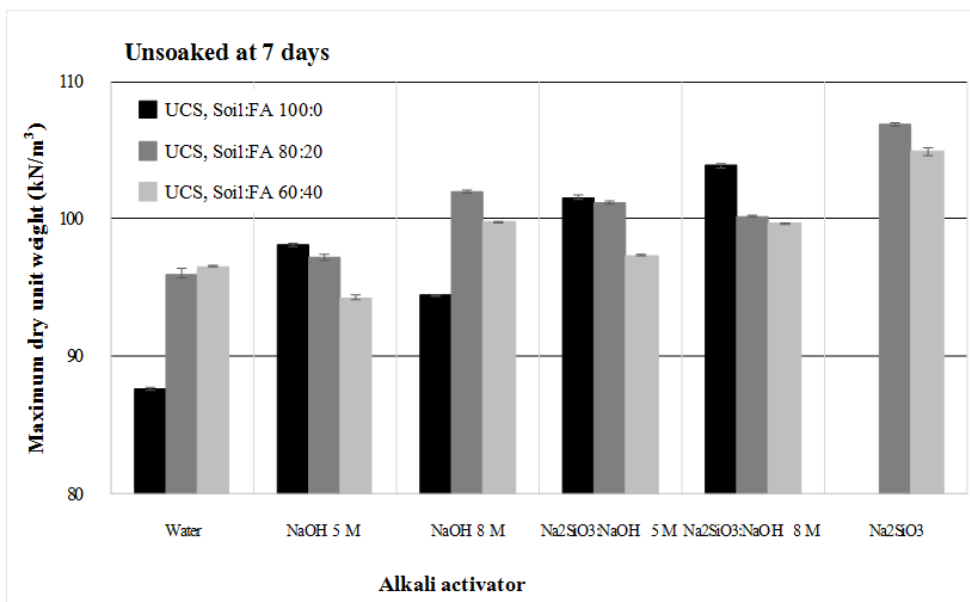


(ก)

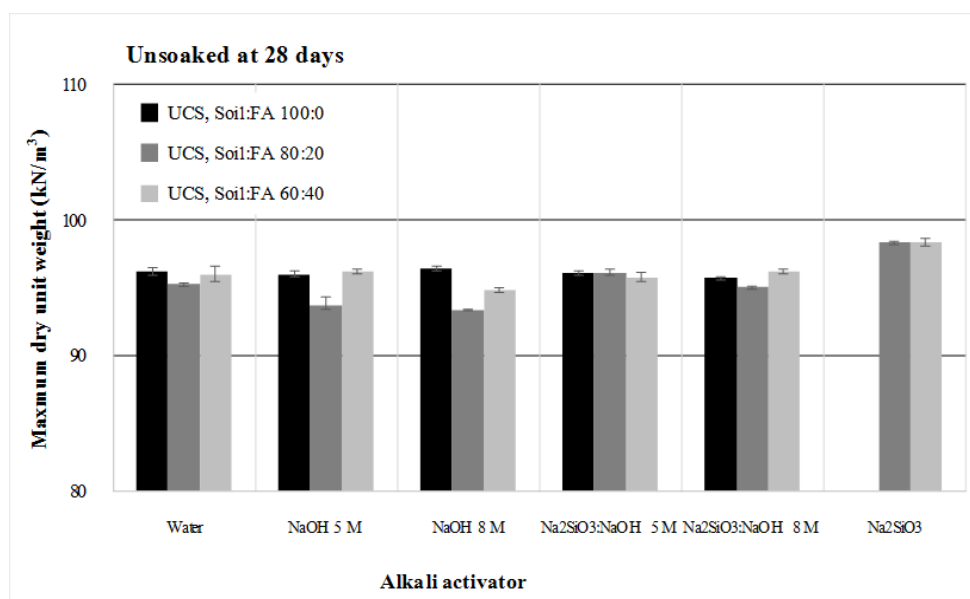


(ข)

ภาพที่ 6-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ OAC (ก) ระยะการบ่ม 7 วัน  
(ข) ที่ระยะการบ่ม 28 วัน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ  $\gamma_{d,max}$  (ก) ระยะการบ่ม 7 วัน  
(ข) ระยะการบ่ม 28 วัน



## ผลการทดสอบ UCS ในสถานะ Unsoaked

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนาค่ากำลังอัดภายใต้สถานะไม่แช่น้ำ ได้มีการศึกษาการเฟลคเตอร์ที่สำคัญต่อการพัฒนาค่ากำลังอัดพบว่าค่ากำลังอัดถูกควบคุมอยู่ด้วยกัน 4 เฟลคเตอร์ ได้แก่

1. อัตราส่วนดินเหนียวต่อเถ้าลอย Soil : FA 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40
2. อัตราส่วน Alkali activator ระหว่าง  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 50 : 50 และ 100 : 0
3. ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 และ 8 โมลาร์
4. ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน โดยใช้อุณหภูมิห้อง

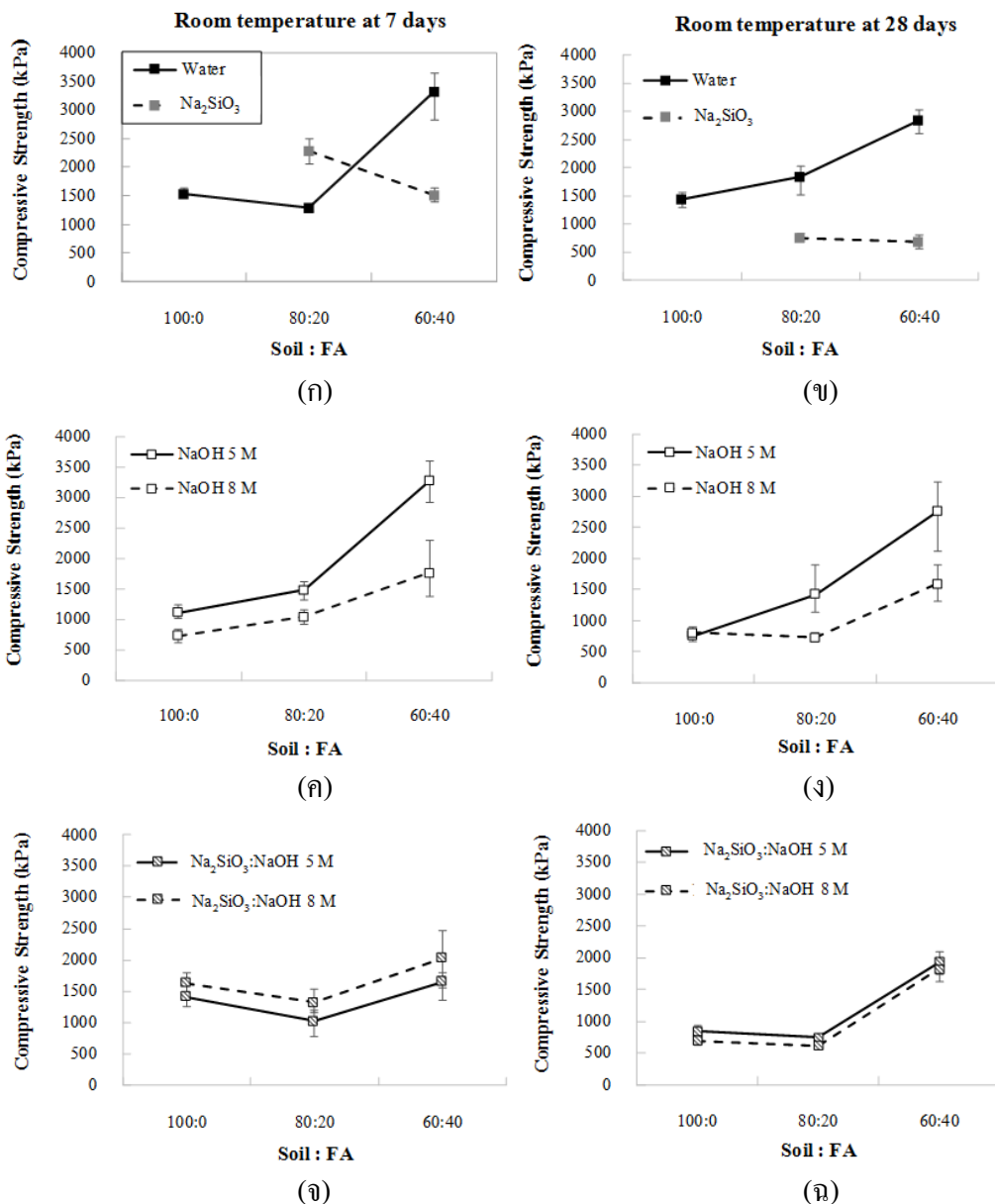
นอกจากนี้ระหว่างการบ่มตัวอย่างตามระยะเวลาที่กำหนด ยังมีโอกาสที่จะทำให้ตัวอย่างเกิดการสูญเสียความชื้นในระหว่างการบ่ม จากการสูญเสียความชื้นดังกล่าวอาจเป็นหรือไม่เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่า UCS ไม่เป็นไปตามจริงนัก ดังนั้นกรณีการสูญเสียความชื้นนี้จะได้รับศึกษาในตัวอย่าง UCS ที่สถานะ Unsoaked ต่อไป

### อัตราส่วน Soil : FA

ความแตกต่างของส่วนผสมที่อัตราส่วน Soil : FA เท่ากับ 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40 การแทนที่ดินตะกอนทะเลด้วยเถ้าลอย ซึ่งเป็นการเพิ่มอสังฐานอะลูมิโนซิลิเกตแก่ตัวอย่าง และเป็นการเพิ่ม Degree สำหรับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันส่งผลต่อการพัฒนาค่ากำลังอัดแก่ตัวอย่าง (Sukmak et al., 2013) ดังภาพที่ 6-3 (ก-จ) แสดงผลของค่ากำลังอัดที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Soil : FA เท่ากับ 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40 ต่ออัตราส่วนของตัวอย่างที่ถูกผสมด้วยน้ำเปล่าเทียบกับตัวอย่างที่ถูกปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ภายใต้ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

จากภาพที่ 6-3 บ่งชี้ว่าระยะเวลาการบ่มตัวอย่างทั้ง 7 และ 28 วัน ค่า UCS เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 อย่างชัดเจนในอัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำ และสารละลาย Alkali activator ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 และ 50 : 50 ส่วนอัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 และ 80 : 20 มีค่า UCS ไม่แตกต่างกันมาก ยกเว้นอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 100 : 0 ที่อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 มีค่า UCS มากกว่า Soil : FA 60 : 40 เนื่องจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของสารละลาย Alkali activator ซึ่งประกอบไปด้วย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ NaOH สามารถเข้าทำการชะละลายซิลิกาและอะลูมินาในเฟสอสังฐานซึ่งมีอยู่ในอนุภาคของเถ้าลอยได้มากขึ้น เมื่อมีเถ้าลอยจำนวนมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจึงพัฒนาไปเป็น N-A-S-H นอกจากนี้จากการเพิ่มสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ทำให้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่อยู่ในอนุภาคของเถ้าลอยถูกชะออกมาในรูปแบบของ C-S-H มากขึ้น แคลเซียมที่ถูกผลิตออกมาเป็นวัสดุ

เชื่อมประสาน และให้กำลังอัด (Phummiphan et al., 2015) การแทนที่ดินตะกอนทะเลด้วยเถ้าลอย จึงเป็นการลดโครงสร้างที่เป็นผลึกให้น้อยลง ให้สาร Alkali activator สามารถเข้าทำการชะละลาย โครงสร้างเฟสอสัณฐานอลูมิโนซิลิเกตได้มากขึ้น ดังนั้นที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 จึงให้ค่า UCS แก่ตัวอย่างมากกว่าอัตราส่วนอื่น



หมายเหตุ แกน x ไม่ได้เป็นหน่วยมาตราส่วน

ภาพที่ 6-3 (ก-ฉ) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Soil : FA ต่ออัตราส่วนที่ผสมน้ำเปล่า และ อัตราส่วนที่ผสม Alkali activator

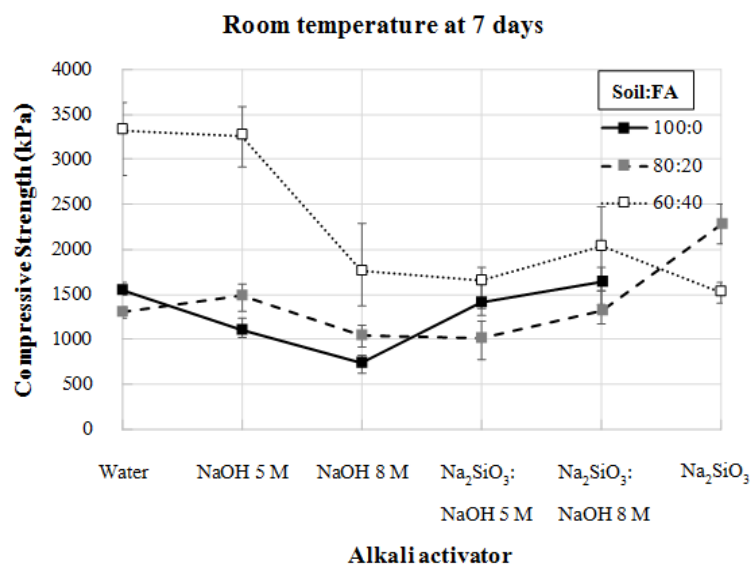
### อัตราส่วน Alkali activator

อัตราส่วน Alkali activator นั้นมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนากำลังอัด ซึ่งสารละลาย Alkali activator ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะมีความสามารถในการชะละลายซิลิกาและอะลูมินา ในแก้วลอยและดินตะกอนทะเลได้ดี นำมาสู่การเกิดจากกระบวนการทางเคมีจีโอโพลิเมอไรเซชัน และทำให้ตัวอย่างแข็งตัวสามารถรับกำลังได้ โดยสารละลาย Alkali activator แต่ละประเภท จะให้ผลผลิตจากกระบวนการดังกล่าวที่แตกต่างกันไป ซึ่งกระบวนการนั้นก็จะส่งผลต่อ ความสามารถในการรับกำลังอัดที่แตกต่างกันไปเช่นกัน ดังนั้นค่า UCS จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ สะท้อนความเหมาะสมของอัตราส่วน Alkali activator และประเภทของ Alkali activator ดังภาพที่ 6-4 (ก-ข) โดย (a) สำหรับระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน และ (b) สำหรับระยะการบ่ม ตัวอย่างที่ 28 วัน

ผลการทดสอบพบว่าค่า UCS ทั้งที่ระยะการบ่ม 7 และ 28 อัตราส่วนที่ถูกผสมด้วยน้ำ และอัตราส่วนของสารละลาย Alkali activator ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 0 : 100$  ที่ความเข้มข้น ของ NaOH 5 โมลาร์ มีค่า UCS ใกล้เคียงกันและสูงกว่าส่วนอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 0 : 100$  ที่ความเข้มข้นของ NaOH 8 โมลาร์ และอัตราส่วนที่เพิ่มสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เข้ามา โดยพบว่า ให้ค่า UCS ต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 0 : 100$  และ  $50 : 50$  ที่ NaOH 8 โมลาร์ โดยรวม แล้วพบว่าผลของค่า UCS สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลาย NaOH (ยกเว้นกรณีน้ำเปล่าที่ จะมีค่ามากที่สุด) โดยที่สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ มีค่า UCS สูงกว่าอัตราส่วน Alkali activator อัตราส่วนอื่นอย่างชัดเจน เนื่องจากการเพิ่มสารละลาย NaOH สามารถเข้า ทำการชะละลายแก้วลอยได้มากกว่าโดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มซิลิกา เพื่อให้กระบวนการผลิต จีโอโพลิเมอร์ การเกิดปฏิกิริยาจีโอ โพลิเมอไรเซชันของสารละลาย NaOH ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ N-A-S-H และ C-S-H จากการชะ CaO ที่อยู่ในอนุภาคของแก้วลอยที่เพียงพอสำหรับตัวอย่าง โดยการมีสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เพียงอย่างเดียว ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 100 : 0$ ) มีความสามารถในการชะ เช่นเดียวกับสารละลาย NaOH แต่ผลิตภัณฑ์ N-A-S-H ที่ได้จะมีเพียงน้อยนิด แต่จะได้ผลิตภัณฑ์ C-S-H มากกว่าจากปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นแต่ไม่ช่วยเพิ่มค่า UCS ดังนั้นผลิตภัณฑ์ N-A-S-H และ C-S-H จึงมีอิทธิพลต่อค่า UCS และเป็นไปได้ว่าผลิตภัณฑ์ N-A-S-H จะมีผลต่อค่า UCS มากกว่า ผลิตภัณฑ์ C-S-H

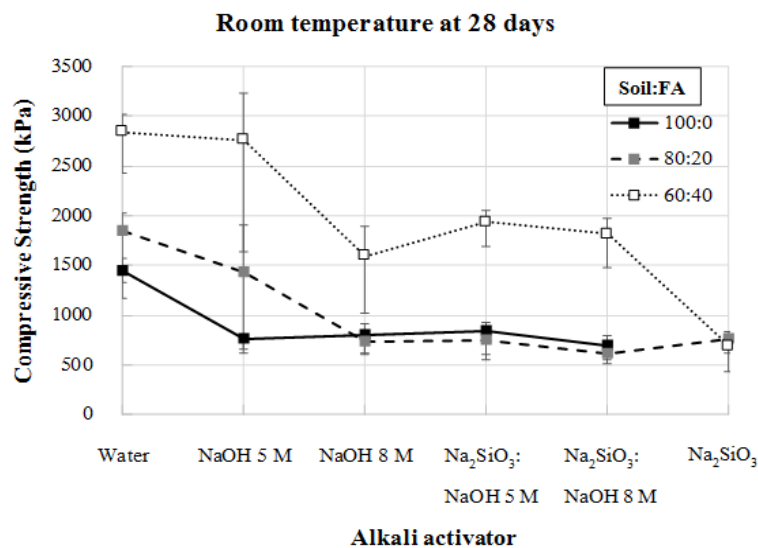
อย่างไรก็ตามค่า UCS สูงสุดที่ได้จากการปรับปรุงด้วยจีโอ โพลิเมอร์นี้ มีค่าใกล้เคียง จากกรณีการใช้น้ำเปล่าเป็นส่วนผสม นั้นแสดงถึงปริมาณแก้วลอยมีผลกระทบต่อค่า UCS ต่อหน้า อย่างมากเช่นเดียวกันกับสารละลาย Alkali activator เนื่องแก้วลอย Class C มีปริมาณ CaO สูง

เมื่อนำมาผสมกับน้ำจึงได้ผลิตภัณฑ์  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$  (Horpiulsuk et al., 2015) และให้กำลังอัดได้ ผลของ UCS ที่ได้จึงสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของสารละลาย Alkali activator ที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นค่า OAC ที่ได้จากการทดสอบการบดอัด นั้นจึงไม่มีความสำคัญในการใช้กำหนดความเหมาะสมของอัตราส่วนสารละลาย Alkali activator (Sukmak et al., 2013) โดยจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การนำอิโอโพลิเมอร์มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินทำให้ดินมีคุณภาพที่ดีขึ้นเป็นไปตามจุดประสงค์ของงานวิจัยนั้น ๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องปรับปรุงอัตราส่วนสารละลาย Alkali activator เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต่อไป



(ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน

ภาพที่ 6-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารละลาย Alkali activator ต่อระยะการบ่มตัวอย่าง (ก) ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วัน (ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน



(ข) ระยะการบ่มตัวอย่าง 28 วัน

ภาพที่ 6-4 (ต่อ)

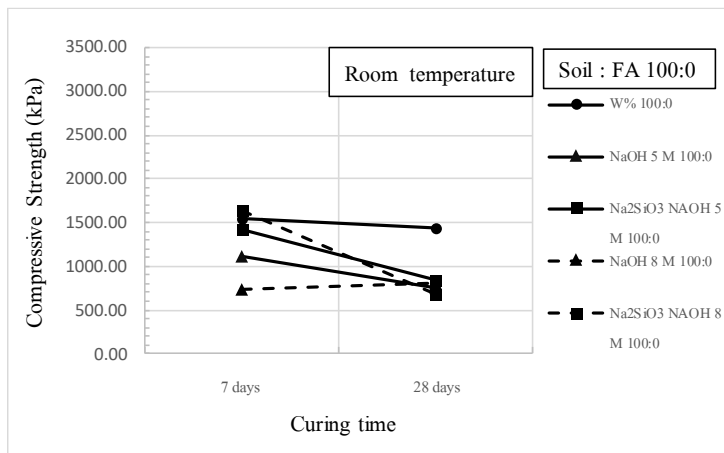
#### ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

นอกจากอัตราส่วนสารละลาย Alkali activator จะมีผลกระทบต่อค่า UCS แล้วงานวิจัยนี้ ได้มีการศึกษาความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ด้วยกันอยู่ 2 ความเข้มข้น ได้แก่ 5 และ 8 โมลาร์ โดยความเข้มข้นของสารละลายดังกล่าวจะถูกผสมเข้าไปในทุกอัตราส่วนที่มีส่วนประกอบของสารละลาย NaOH ซึ่งผลการทดสอบ ดังภาพที่ 6-4 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ให้ค่า UCS สูงกว่าที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทั้งอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  0 : 100 และ 50 : 50 เกือบทุกช่วงระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง เนื่องจากการเพิ่มสารละลาย NaOH สามารถเข้าทำการชะละลายได้มากกว่าโดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มซิลิกา เพื่อให้กระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ แม้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นสูงกว่าอย่างสารละลาย NaOH 8 โมลาร์ จะมีความสามารถในการชะละลายซิลิกาและอะลูมินาออกจากอนุภาคของเถ้าลอยได้มากกว่าสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ (Rattanasak et al., 2009) และดูเหมือนจะสามารถผลิต N-A-S-H ได้ในปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดกระบวนการ Polycondensation มากขึ้น และสุดท้ายทำให้มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า แต่ในขณะเดียวกันก็ชะเอา CaO ที่อยู่ในอนุภาคเถ้าลอยและเกิดการตกผลึกเสียก่อนการเชื่อมประสาน ดังนั้นสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นต่ำนั้นจึงเหมาะสมสำหรับเถ้าลอยประเภท Class C มากกว่าสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นสูง สารละลาย

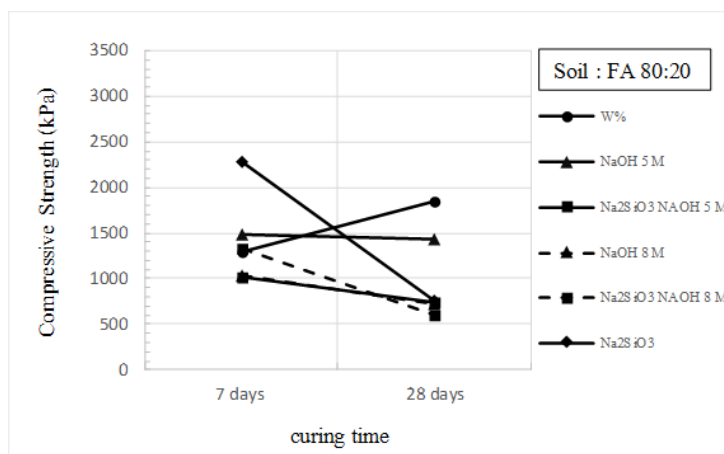
NaOH ที่ความเข้มข้นสูงจึงต้องการสารถละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เพื่อช่วยในการเติมเต็มซิติลเกิดสำหรับเชื่อมประสานเพื่อให้ UCS สูงขึ้น

#### ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

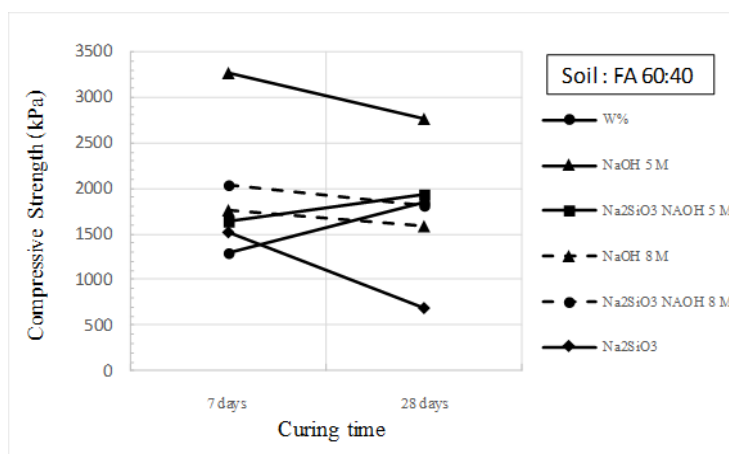
หลังจากตัวอย่างถูกบดอัดเรียบร้อยแล้วจะถูกเก็บห่อหุ้มไว้อย่างดีเพื่อป้องกันมิให้สูญเสียความชื้นเพื่อการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องประมาณ (28 ถึง 35°C) ที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง 7 และ 28 วัน ความสามารถในการพัฒนากำลังอัด แสดงในภาพที่ 6-5 (ก-ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Soil : FA เท่ากับ 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40 ต่อระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน จากผลทดลองพบว่าค่า UCS เกือบทุกอัตราส่วน Soil : FA ที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่นานขึ้นไม่ช่วยส่งเสริมค่า UCS โดยระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน สูงกว่าระยะเวลาบ่มตัวอย่าง 28 วัน โดยเฉพาะอัตราส่วน Soil : FA 100 : 0 แสดงผลของค่า UCS ที่ต่ำลงอย่างชัดเจนหลังจากระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน อาจเนื่องมาจากปริมาณสารถละลาย Alkali activator นั้นไม่ได้ทำปฏิกิริยากับดินตะกอนทะเลมากนัก เนื่องจากดินตะกอนทะเลมีโครงสร้างเป็นอสัณฐานต่ำทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมโรไลเซชันต่ำ ค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่อาจมาจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างสารถละลาย Alkali activator และดินตะกอนทะเล เมื่อสิ้นสุดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างกัน การบ่มตัวอย่างไว้นานขึ้นจึงทำให้ดินตะกอนทะเลและสารถละลาย Alkali activator คลายตัว และแยกตัวออกจากกัน ส่งผลให้ค่า UCS ต่ำลงอย่างชัดเจนกว่าตัวอย่างที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารถละลาย Alkali activator และเถ้าลอยที่แตกต่างกันไปนั้นมีผลต่อระยะเวลาบ่มตัวอย่างหลังจาก 7 วัน อย่างมาก เนื่องจากค่า UCS ควรจะมีการพัฒนากำลังอัดที่สูงขึ้นในการบ่มตัวอย่างที่ระยะเวลา 28 วัน จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมโรไลเซชันจะสามารถพัฒนาได้สูง (Phetchuay et al., 2014; Horpibulsuk et al., 2015; Phummiphan et al., 2015; Sukmak et al. 2013) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างนั้นไม่เกิดการพัฒนาขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่ควรจะเป็น อาจเนื่องจากอัตราส่วนที่ผสมสารถละลาย Alkali activator นั้นไม่เหมาะสมอย่างที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อระยะเวลาผ่านไปอาจทำให้ค่ากำลังอัดลดลงเรื่อย ๆ ดังนั้นการผสมตัวอย่างด้วยสารถละลาย Alkali activator ในปริมาณที่เหมาะสมเป็นไปได้ว่าจะสามารถเกิดการพัฒนากำลังอัดได้ดีตามที่หลายงานวิจัยได้กล่าวไว้



(ก)



(ข)

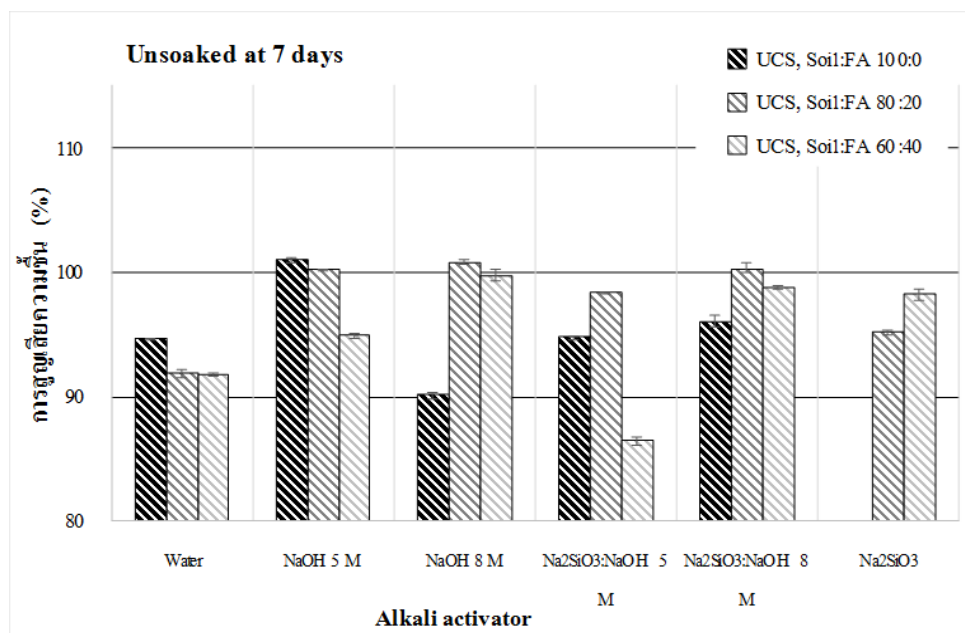


(ค)

ภาพที่ 6-5 (ก-ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารละลาย Soil : FA เท่ากับ 100 : 0 80 : 20 และ 60 : 40 ตามลำดับ ต่อระยะเวลาการบ่มที่ 7 และ 28 วัน

## ผลการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง UCS ในสถานะ Unsoaked

ผลการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง UCS ในสถานะ Unsoaked ดังภาพที่ 6-6 (ก-ข) โดยระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่า การบ่มที่ 28 วัน มีแนวโน้มความชื้นสูงขึ้นกว่าระยะการบ่มที่ 7 วัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  นั้นมีแนวโน้มที่ถูกลำน้ำเข้าแทรกซึมค่อนข้างสูง เนื่องจากมีความชื้นเพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราส่วนอื่น ด้วยคุณสมบัติของซิลิกาในการดูดซับความชื้น และจากระยะการบ่มที่ยาวนานขึ้นจึงเพิ่มโอกาสให้น้ำจะเข้าไปแทรกซึมในตัวอย่างได้มากขึ้น โดยน้ำที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดขึ้นจากความชื้นที่อยู่ในอากาศและการห่อหุ้มที่ไม่ดีพอจากการเตรียมตัวอย่าง ส่วนปัจจัยอื่น เช่น อัตราส่วน Soil : FA หรือความเข้มข้นของสารละลาย NaOH นั้นไม่พบการสูญเสียหรือการเพิ่มขึ้นของความชื้นที่แน่นอนทั้งระยะการบ่มที่ 7 และ 28 วัน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าค่า UCS ที่ระยะการบ่มที่ 28 วันต่ำกว่าระยะการบ่มที่ 7 วัน สาเหตุอาจมาจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นจากการบ่มตัวอย่างในระยะเวลาสั้น ทำให้น้ำเข้าไปแทรกซึมอนุภาคของตัวอย่างและมีส่วนในการขัดขวางหรือทำลายปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันจากปริมาณน้ำที่มีมากเกินไปจนความจำเป็นอาจเจือจางความเข้มข้นของ NaOH ให้น้อยลง ลดความสามารถในการชะซิลิกาและอะลูมินาเพื่อสร้างปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน

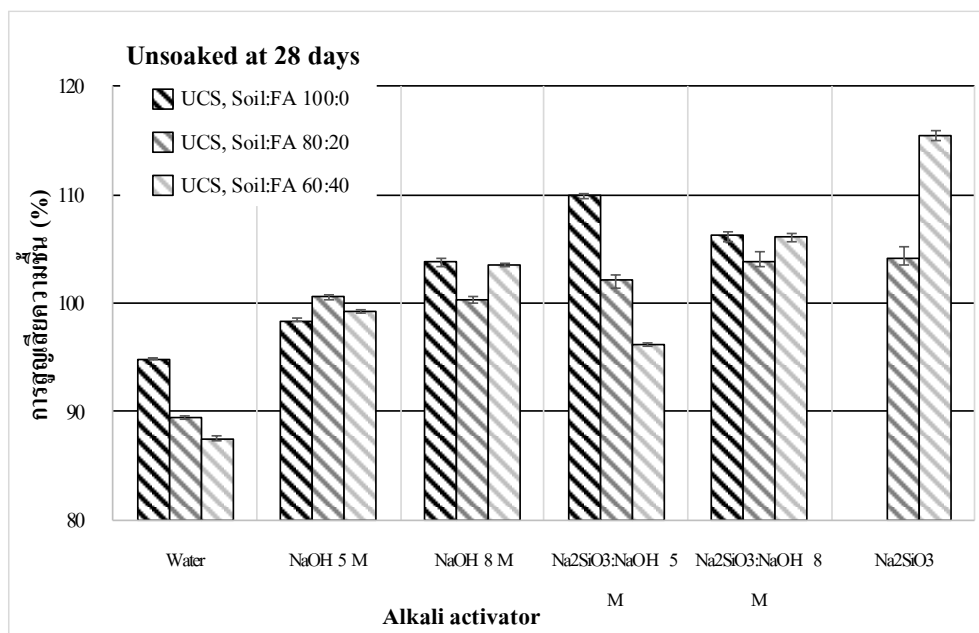


(ก)

ภาพที่ 6-6 (ก-ข) ความสัมพันธ์ของการสูญเสียความชื้นของ UCS ในสถานะ Unsoaked

(ก) ระยะการบ่มที่ 7 และ(ข) ระยะการบ่มที่ 28 วัน





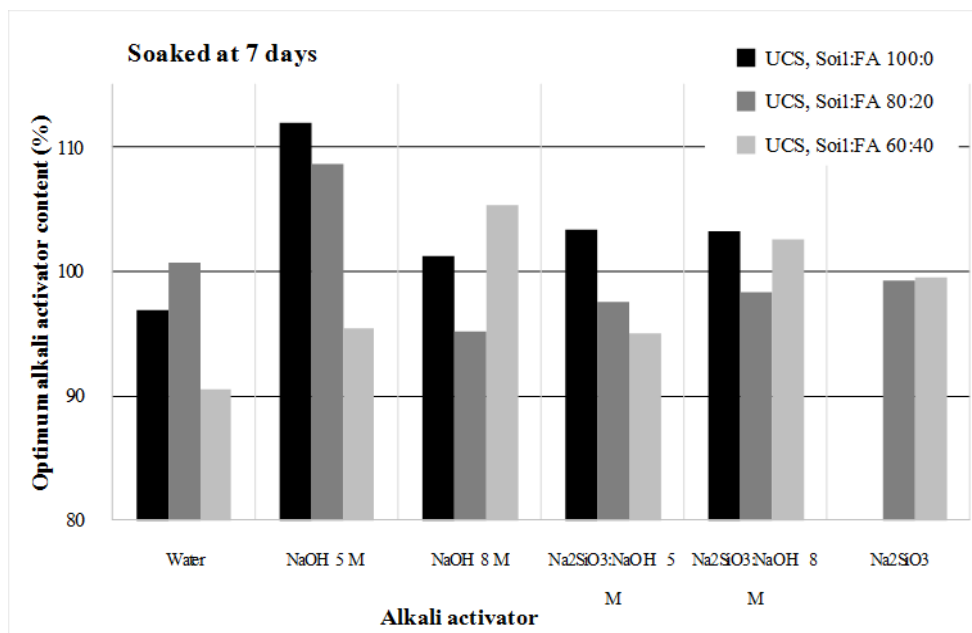
ภาพที่ 6-6 (ต่อ)

### การเตรียมตัวอย่าง UCS ในสถานะ Soaked

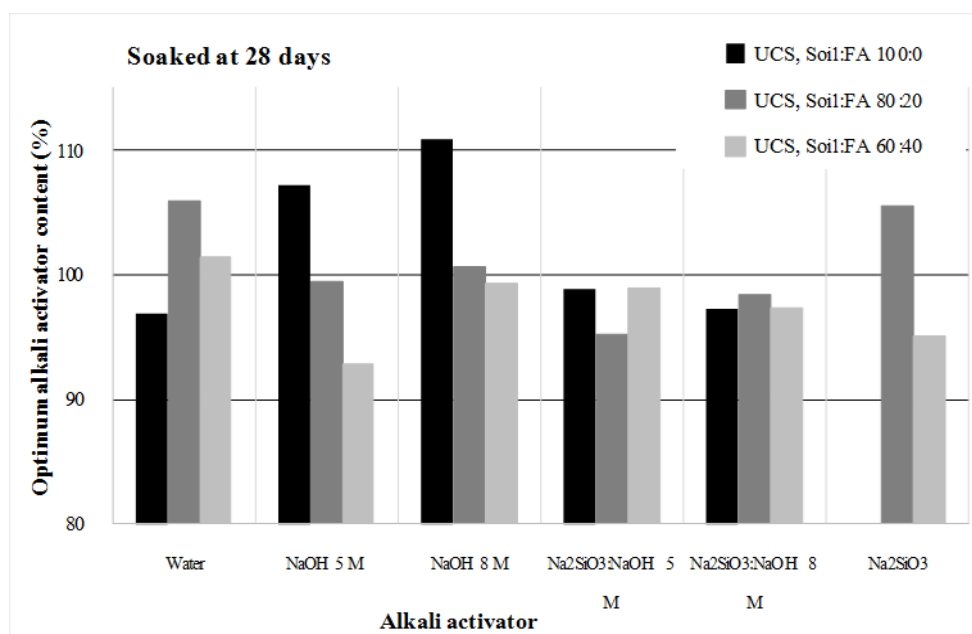
การเตรียมตัวอย่าง UCS แต่ละอัตราส่วนแสดงค่า OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ไว้ดังตารางที่ 6-2 การเปรียบเทียบระหว่างค่า OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ระหว่างจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และจากการเตรียมตัวอย่างทดสอบ UCS ดังภาพที่ 6-7 (ก-ข) โดยแสดงอัตราส่วนสารละลาย OAC ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยค่า OAC จากการเตรียมตัวอย่าง UCS ต่างกับการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานพบว่าที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 90.5 ถึง 111.9% และที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 92.81 ถึง 110.9% ภาพที่ 6-8 (ก-ข) แสดงค่า  $\gamma_{d,max}$  จากการเตรียมตัวอย่าง UCS ต่างกับการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานพบว่าที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 94.9 ถึง 99.5% และที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 95.9 ถึง 100.2% โดยผลการเตรียมตัวอย่าง UCS พบค่า OAC ที่มีความแตกต่างสูงสุดพบที่อัตราส่วน NaOH 5 M ที่ Soil : FA 80 : 20 ระยะการบ่มตัวอย่าง 7 วันซึ่งมี OAC มากกว่าการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 2% หรือ 111.9% และเมื่อพิจารณาถึงค่า  $\gamma_{d,max}$  ต่างจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานน้อยกว่า 0.5% หรือ 97.3% จึงถือว่าค่อนข้างใกล้เคียงกับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และนอกจากนี้พบว่าทุกอัตราส่วนมีค่า  $\gamma_{d,max}$  ใกล้เคียงกับค่าการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จึงไม่น่าจะมีผลกระทบต่อค่า UCS หลังจากสถานะ Soaked มากนัก

ตารางที่ 6-2 ค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  ตัวอย่าง UCS ในสภาวะ Soaked

Soil : FA	Alkali activator	OAC (%)		$\gamma_{dry,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )					
		7 days	28 days	7 days		28 days			
100 : 0	water	15.6	15.6	17.1	17.1	17	17.1	17.1	17
	NaOH 5 M	18.7	17.9	17.3	16.9	16.9	17.1	16.5	17.1
	NaOH 8 M	24.2	26.5	16.2	16.4	16.3	16.6	16.3	16.3
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	18.2	17.4	16.6	17	16.5	17	16.4	16.7
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	22.3	21	16.6	16.4	16.3	16.6	16.7	16.8
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
80 : 20	water	13.7	14.4	18.4	18	17.9	17.6	17.6	17.2
	NaOH 5 M	18.9	17.3	17.3	17.2	17.2	17.5	17.7	17.7
	NaOH 8 M	15.6	16.5	16.9	17	16.8	16.7	16.7	16.9
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	16.3	15.9	16.8	16.5	16.8	16.4	16.8	16.4
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	12.3	12.3	17.6	17.9	17.6	17.5	17.7	17.4
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	27.1	28.8	15.7	15.6	15.8	15.9	15.8	15.5
60 : 40	water	12.4	13.9	17.3	17.4	17.4	17.9	17.4	17.7
	NaOH 5 M	14.6	14.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.1	18.1
	NaOH 8 M	15.7	14.8	17.5	17.5	17.3	18.1	17.9	18.1
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	17.2	17.9	17.2	17.2	16.9	17.2	17.2	17.3
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	15.6	14.8	17.9	17.9	17.8	17.8	17.6	18.1
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	20.1	19.2	15.8	16	15.8	16	16.2	16.2

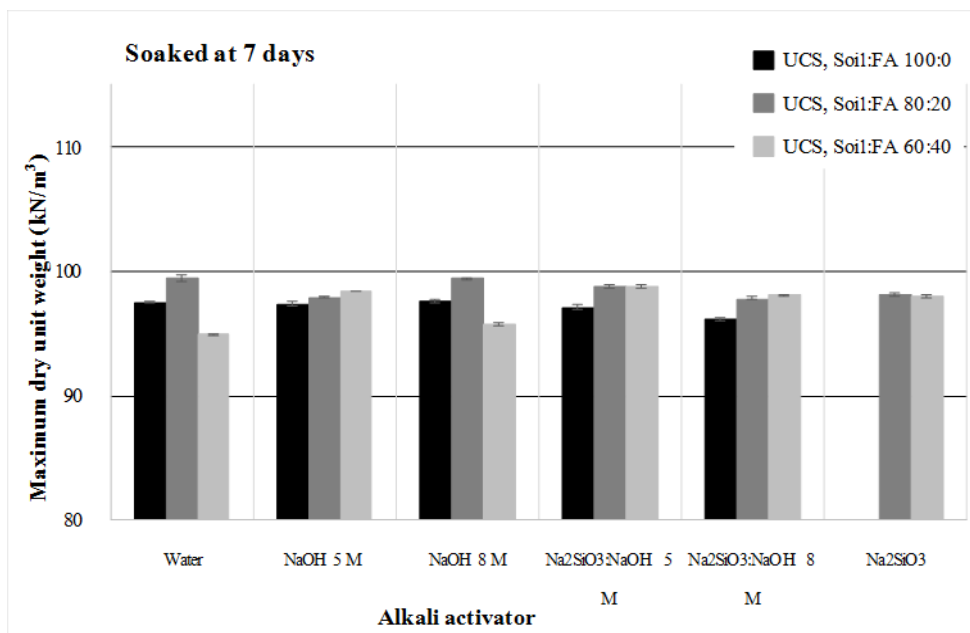


(ก)

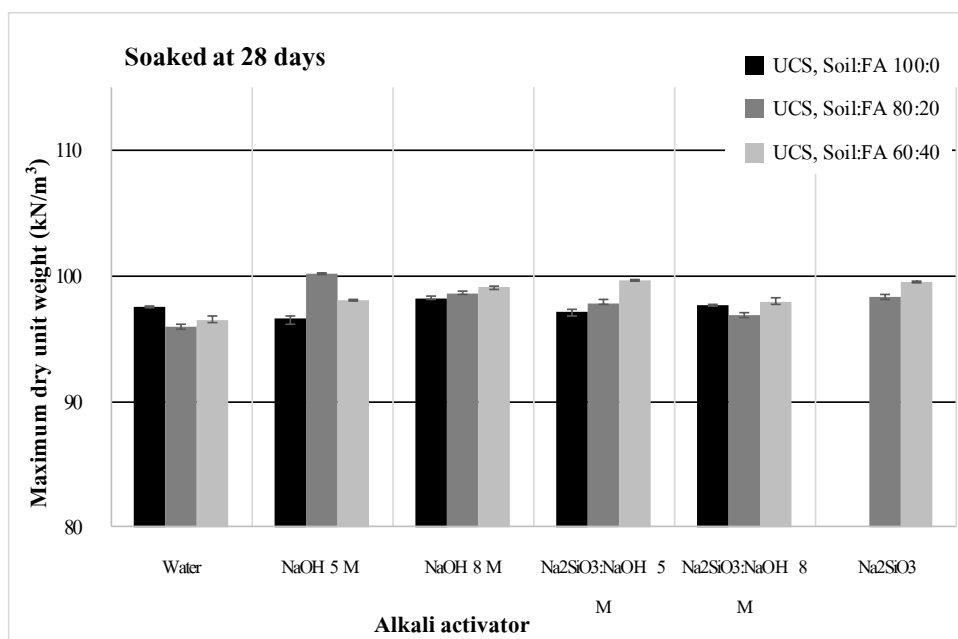


(ข)

ภาพที่ 6-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ OAC (ก) ที่ระยะการบ่ม 7 วัน  
(ข) ที่ระยะการบ่ม 28 วัน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Alkali activator และ  $\gamma_{d,max}$  (ก) ระยะการบ่ม 7 วัน

(ข) ระยะการบ่ม 28 วัน

### ผลการทดสอบ UCS ในสถานะ Soaked

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนาค่ากำลังอัดภายใต้สถานะแช่น้ำยังคงพบว่าค่ากำลังอัด ถูกควบคุมอยู่ด้วยกัน 4 เฟคเตอร์ ได้แก่ อัตราส่วน Soil : FA อัตราส่วน Alkali activator ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 และ 8 โมลาร์ โดยเฉพาะระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งผลการทดสอบ ดังตารางที่ 6-3 ตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้สถานะ Soaked ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ไม่สามารถให้กำลังอัดได้ ส่วนตัวอย่างที่ได้รับการบ่มที่ 28 วัน สามารถให้กำลังอัดได้ในบางอัตราส่วน แสดงให้เห็นว่าค่าเฟคเตอร์ที่สำคัญทั้ง 4 นั้นให้ความสำคัญที่สัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยอัตราส่วนที่ให้กำลังอัดสูงสุดได้แก่ อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  0 : 100 สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  50 : 50 ที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  0 : 100 สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อัตราส่วน Soil : FA 80 : 20 และอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  0 : 100 ที่สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ที่อัตราส่วน Soil : FA เท่ากับ 100 : 0 ตามลำดับ

ตารางที่ 6-3 ค่ากำลังอัดในสถานะ Soaked

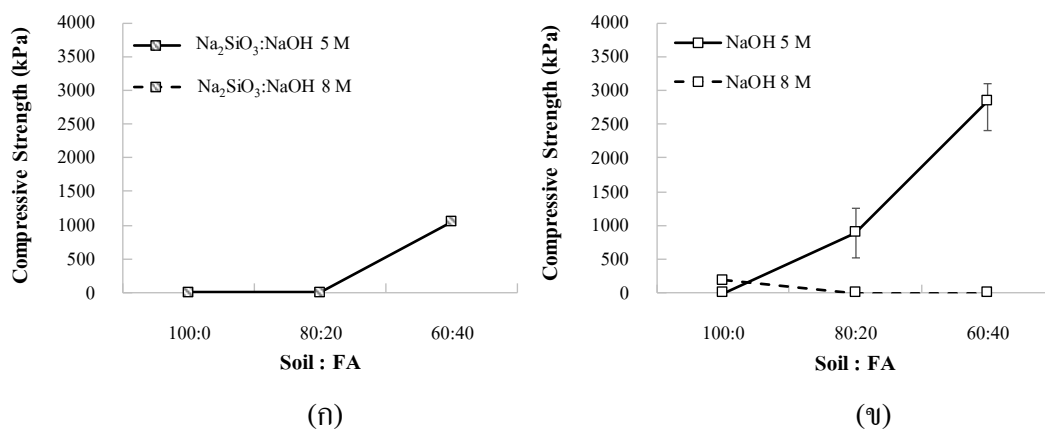
Description	Soil : FA	7 days			28 days		
		Sample1	Sample2	Sample3	Sample1	Sample2	Sample3
Water	100 : 0	0	0	0	0	0	0
	80 : 20	0	0	0	0	0	0
	60 : 40	0	0	0	0	0	0
NaOH 5 M	100 : 0	0	0	0	0	0	0
	80 : 20	0	0	0	886.76	1255.4	532.29
	60 : 40	0	0	0	3093.41	2400.17	3029.65
NaOH 8 M	100 : 0	0	0	0	0	234.64	151.78
	80 : 20	0	0	0	0	0	0
	60 : 40	0	0	0	0	0	0
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 :$	100 : 0	0	0	0	0	0	0
NAOH 5 M	80 : 20	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 6-3 (ต่อ)

Description	Soil : FA	7 days			28 days		
		Sample1	Sample2	Sample3	Sample1	Sample2	Sample3
	60 : 40	0	0	0	994.32	1091.09	1067.28
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> :	100 : 0	0	0	0	0	0	0
NAOH 8 M	80 : 20	0	0	0	0	0	0
	60 : 40	0	0	0	0	0	0
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	100 : 0	0	0	0	0	0	0
	80 : 20	0	0	0	0	0	0
	60 : 40	0	0	0	0	0	0

ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าอัตราส่วน Soil : FA อัตราส่วน Alkali activator และความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 และ 8 โมลาร์ นั้นมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน โดยส่วนใหญ่ พบว่าการเพิ่มเถ้าลอยในอัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ตัวอย่างสามารถรับกำลังอัดได้สูงกว่า ดังภาพที่ 6-9 (ก-ข) ซึ่งบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของเถ้าลอยที่มีต่อสารละลาย NaOH มากกว่าสารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> อัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ร่วมกันกับสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อัตราส่วน Soil : FA เท่ากับ 60 : 40 สามารถให้กำลังอัดได้ แต่ที่สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ นั้นไม่สามารถให้กำลังอัดได้ จึงแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ของสารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ในสารละลาย NaOH นั้นช่วยให้ตัวอย่างยึดประสานกันได้เพียงน้อยนิด และเป็นการลดผลผลิต N-A-S-H ในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักในการพัฒนากำลังอัด ขณะเดียวกันการผสมสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ นั้นไม่มีผลกับตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอย แต่กลับมีผลต่อดินตะกอนทะเลมากกว่าเป็นเพราะการชะเอา CaO ที่อยู่ในอนุภาคเถ้าลอย และเกิดการตกผลึกเสียก่อนการเชื่อมประสาน การแช่ตัวอย่างไว้ในน้ำยิ่งเป็นการทำลายการเชื่อมประสานของโครงสร้าง โดยเฉพาะโครงสร้างที่มีการเชื่อมประสานไม่ดีพอจึงทำให้ตัวอย่างเสียรูปไปจนถึงเกิดการสลายตัวของตัวอย่าง ดังภาพที่ 6-9 สภาพตัวอย่างหลังจากการแช่น้ำเพียง 60 นาทีของตัวอย่างที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> : NaOH 50 : 50 ของภาพ (ข) สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ตัวอย่างเกิดการเสียรูปจนไม่สามารถทดสอบ UCS ได้ เปรียบเทียบกับ (ก) สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ซึ่งตัวอย่างยังคงแข็งแรงไปจนถึงสามารถทดสอบตัวอย่าง UCS ได้ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง จากความสัมพันธ์

ของเฟลคเตอร์ที่กล่าวมาในข้างต้นมีความสำคัญในการพัฒนาปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลา ซึ่งความสัมพันธ์นั้นคือการพัฒนาปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจาก N-A-S-H และจากปฏิกิริยาไฮเดรชันไปสู่ปฏิกิริยาปอซโซลานของ CaO ที่มีอยู่ในถ้ำล่อยพัฒนาไปสู่ C-S-H ในระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน ทำให้ตัวอย่างมีความสามารถยึดเกาะกันได้เพียงพอต่อสภาวะการแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขณะที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 วันนั้น ไม่มีผลต่อกำลังในสภาวะ Soaked แต่อย่างไรก็ดี จึงแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน นั้นเหมาะสมต่อการพัฒนาปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ และส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 6-9 (ก-ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Soil : FA ต่ออัตราส่วนที่ผสมน้ำเปล่า และอัตราส่วนที่ผสม Alkali activator



(ก)

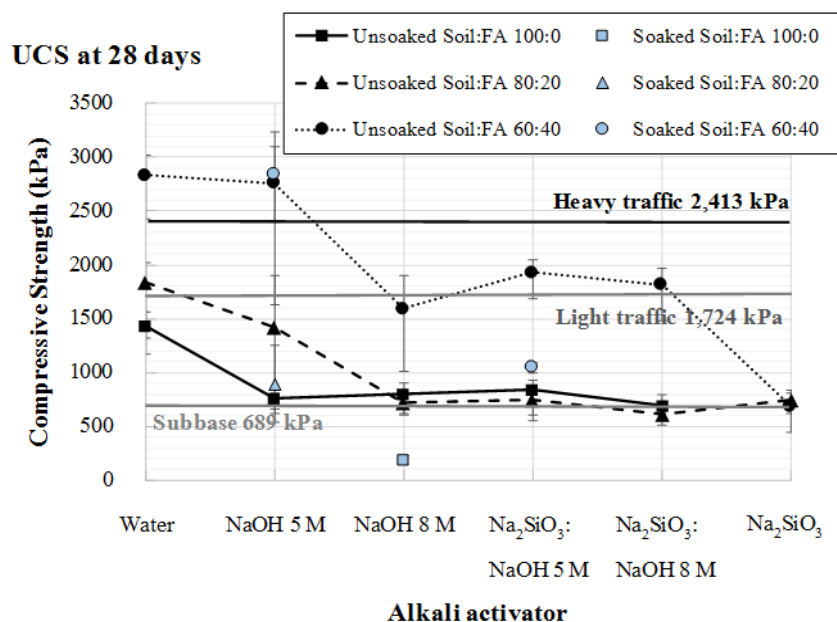


(ข)

ภาพที่ 6-10 (ก-ข) ตัวอย่างการทดสอบ UCS ในสภาวะ Soaked อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 อัตราส่วนที่ผสม Alkali activator อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 50 : 50 (ก) สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ (ข) สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน กับสภาวะ Unsoaked ดังภาพที่ 6-11 นั้นมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับสภาวะ Soaked สังเกตได้ว่าค่ากำลังอัดสูงสุดของทั้งสองสภาวะคือ อัตราส่วนเดียวกันและมีค่ากำลังอัดเกือบจะเท่ากันนั้น คือ อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ส่วนอัตราส่วนอื่นที่สามารถทดสอบค่า UCS ได้ของสภาวะ Soaked นั้นมีค่ากำลังอัดในอัตราที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับค่า UCS ในสภาวะ Unsoaked ในขณะเดียวกันระยะเวลาการบ่มที่ 7 วัน ไม่สามารถทำให้ตัวอย่างพัฒนากำลังอัดจนทนต่อสภาวะ Soaked ได้แม้ตัวอย่างที่สภาวะ Unsoaked ที่ 7 วัน จากภาพที่ 6-5 จะมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า 28 วันก็ตาม เห็นได้ชัดเจนว่าระยะเวลาการบ่มในระยะเวลาที่ต่ำกว่า 28 วันนั้นสามารถให้กำลังอัดแก่ตัวอย่างได้ แต่ไม่สามารถทำให้ตัวอย่างทนต่อสภาวะแช่น้ำได้





ภาพที่ 6-11 ค่า UCS ระหว่างสภาวะ Unsoaked และ Soaked อัตราส่วนผสม Alkali activator ในระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

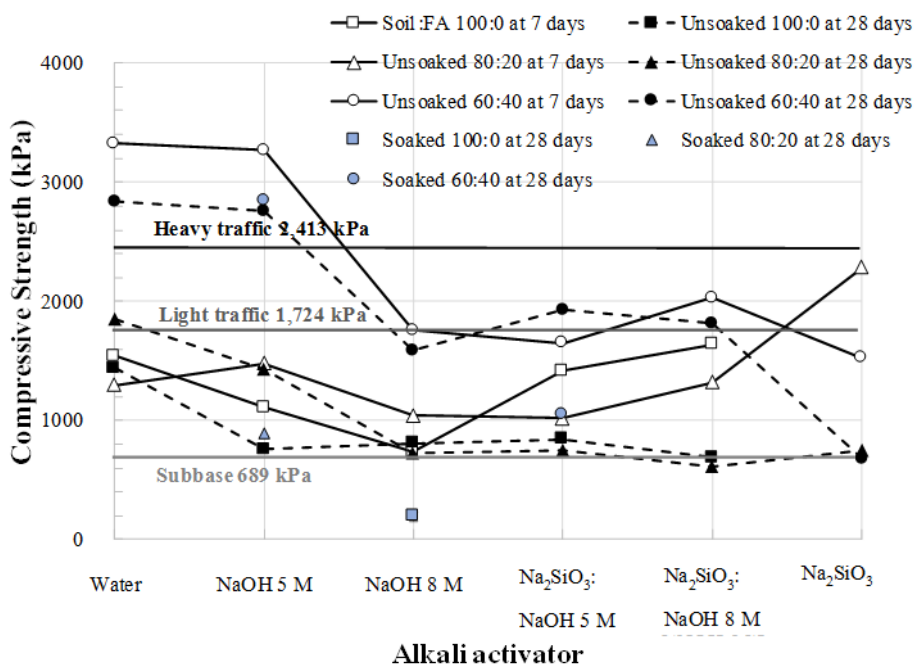
### สรุปผลการทดสอบ UCS

การทดสอบ UCS ในสภาวะ Soaked ให้เป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ถูกรื้อถอนจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ภายหลังจากบ่มในพลาสติกนาน 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง ค่าการทดสอบกำลังอัดที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานชั้นพื้นทางกรมทางหลวงพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ UCS มีค่าเท่ากับ 2,413 kPa พื้นทางดินซีเมนต์ UCS มีค่าเท่ากับ 1,724 kPa มาตรฐานชั้นรองพื้นทางกรมทางหลวง UCS ค่าเท่ากับ 689 kPa ค่า UCS ผลการทดลองดังภาพที่ 6-12 โดยเปรียบเทียบกับค่า UCS ในสภาวะ Unsoaked พบว่า การทดสอบที่สภาวะแช่น้ำในระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ไม่มีอัตราส่วนใดผ่านเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวง ดังนั้นจึงต้องทำการแก้ไขและออกแบบการทดลองใหม่เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์โดยอาศัยปัจจัยหลักในการออกแบบงานวิจัยใหม่ คือ

การปรับเปลี่ยนปริมาณสารละลาย Alkali activator จากค่า OAC เป็นปริมาณสารละลาย Alkali activator ด้านเปียก โดยยังคงมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวง เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ UCS ในก่อนหน้านี้นั้นพบว่าขณะที่ผสมตัวอย่างเข้าด้วยกัน ตัวอย่างนั้นไม่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเกิดจากสาเหตุที่ปริมาณสารละลาย Alkali activator ไม่เพียงพอสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างดินตะกอนทะเล

ทำให้ตัวอย่างไม่สามารถตั้งสารละลาย Alkali activator เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ทั้งหมด และเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน

การแทนที่ของเถ้าลอยทำให้มีปริมาณดินตะกอนทะเลที่จะใช้แลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลาย Alkali activator ลดลงและทำให้สารละลาย Alkali activator สามารถเข้าทำการชะอะลูมิเนียมซิลิเกตจากเถ้าลอย และสร้างปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันได้มากขึ้น ดังนั้นจึงสังเกตได้ว่าอัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 นั้นให้ค่ากำลังอัดค่อนข้างมีแนวโน้มที่สูงกว่าอัตราส่วนที่ผสมดินตะกอนทะเลมากกว่า และยังเห็นได้ชัดจากผลของสภาวะ Soaked ที่ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับสภาวะ Unsoaked ในระยะเวลาการบ่ม 28 วันเช่นเดียวกัน การออกแบบงานวิจัยใหม่จึงมุ่งความสนใจไปที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 แต่ละอัตราส่วนของสารละลาย Alkali activator



ภาพที่ 6-12 ค่า UCS ระหว่างสภาวะ Unsoaked และ Soaked ทุกระยะเวลาการบ่ม

### การเตรียมตัวอย่าง UCS ในสภาวะ Unsoaked และ Soaked จากการออกแบบอัตราส่วนใหม่

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ UCS ในอัตราส่วนใหม่ได้จากค่า OAC จากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งผลการทดสอบบ่งชี้ว่าปริมาณสารละลาย Alkali activator ที่ค่า OAC นั้นไม่เพียงพอต่อการทดสอบ UCS ในสภาวะ Soaked ผู้วิจัยจึงเพิ่มปริมาณสารละลาย

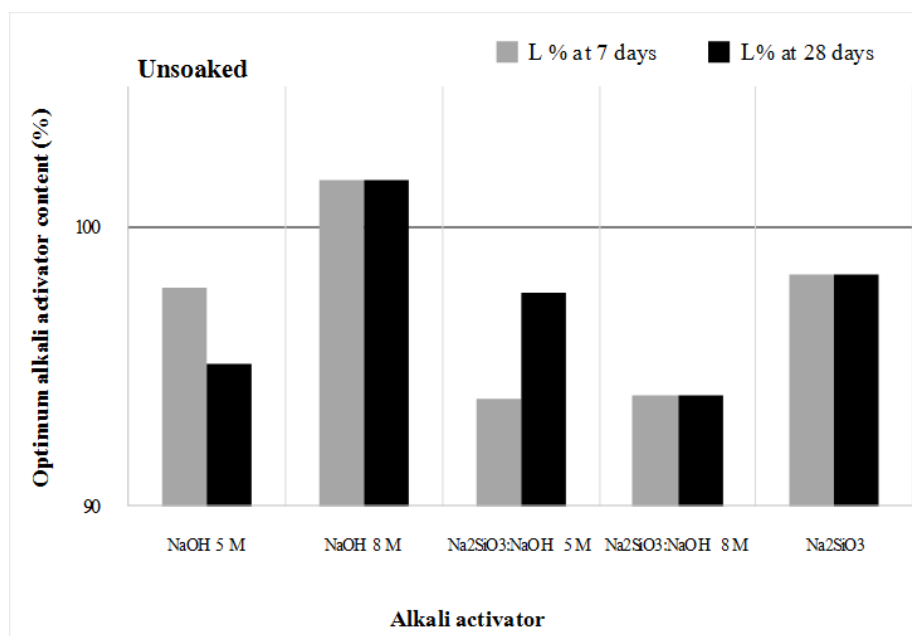
Alkali activator จากค่า OAC มาอีก 3% หรือเรียกว่า OAC (RE) โดย RE ย่อมาจาก Revise จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ณ จุด OAC+3% ของอัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ผลการเตรียมตัวอย่างค่า OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ถูกตั้งตารางที่ 6-4 การเตรียมตัวอย่าง UCS จะถูกนำมาเปรียบเทียบระหว่างค่า OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ค่า OAC+3% ดังแสดงในภาพที่ 6-13 (ก) โดยแสดงอัตราส่วนสารละลาย Alkali activator ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน โดยค่า OAC จากการเตรียมตัวอย่าง UCS ที่สภาวะ Unsoaked ต่างกับการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานพบว่าที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 93.8 ถึง 101.7% และที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 94.0 ถึง 101.7% ภาพที่ 6-13 (ข) แสดงค่า  $\gamma_{d,max}$  จากการเตรียมตัวอย่าง UCS ต่างกับการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานพบว่าที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 97.1 ถึง 100.4% และที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 96.9 ถึง 98.9% โดยผลการเตรียมตัวอย่าง UCS พบค่า OAC ที่มีความแตกต่างสูงสุดพบที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง 7 วัน ซึ่งมี OAC น้อยกว่าการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 6% หรือประมาณ 93% แต่เมื่อพิจารณาถึงค่า  $\gamma_{d,max}$  พบว่าใกล้เคียงกับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 97 ถึง 100% จึงอาจไม่ส่งผลต่อค่า UCS มากนัก

ตารางที่ 6-4 ค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  ตัวอย่าง UCS (RE) ในสภาวะ Unsoaked

Soil : FA	Alkali activator	OAC (%)		$\gamma_{dry,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )					
		7 days	28 days	7 days		28 days			
60 : 40	NaOH 5 M	17.9	17.4	18	17.8	17.7	18.1	18.1	18.1
	NaOH 8 M	18.2	18.2	17.9	18.1	17.7	18	17.5	17.7
	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ 5 M	19.8	20.6	17.2	17.2	17	16.7	16.8	17
	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ 8 M	17.1	17.1	18	18	17.6	18	17.5	17.5
	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	22.8	22.8	16.2	16	15.9	15.6	15.8	15.7

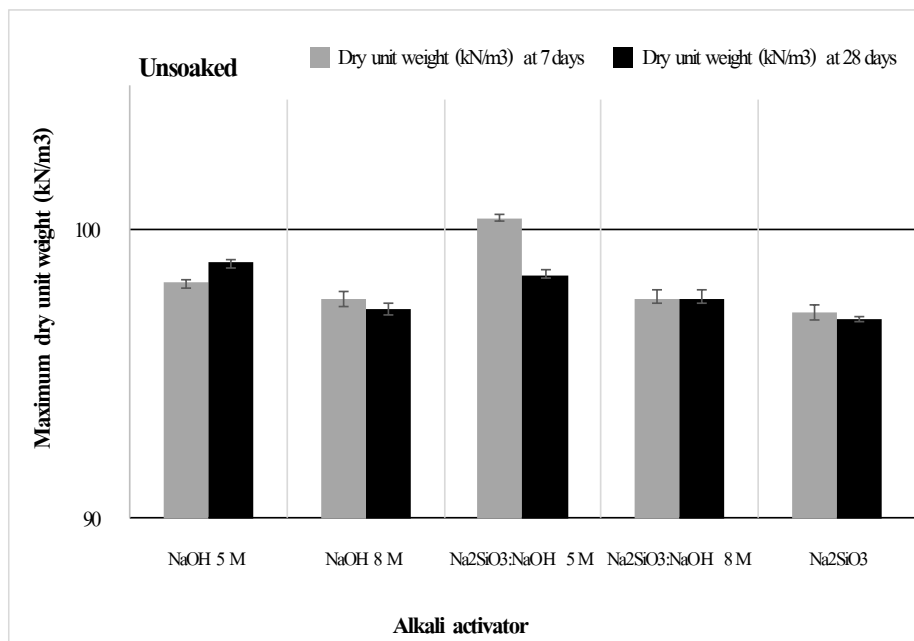
ตารางที่ 6-5 ค่า OAC และ  $\gamma_{dry,max}$  ตัวอย่าง UCS (RE) ในสภาวะ Soaked

Soil : FA	Alkali activator	OAC (%)		$\gamma_{dry,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )					
		7 days	28 days	7 days		28 days			
60 : 40	NaOH 5 M	17.6	17.7	18	17.8	17.7	18.1	18.3	17.7
	NaOH 8 M	17.8	18.1	17.9	18.1	17.7	18	17.5	17.7
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 5 M	20.6	20.6	17.2	17.2	17	17.2	17.2	17
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH 8 M	17.3	17.7	18	18	17.6	17.6	18.2	17.9
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	22.3	22.1	16.2	16	15.9	15.7	15.7	16.5



(ก)

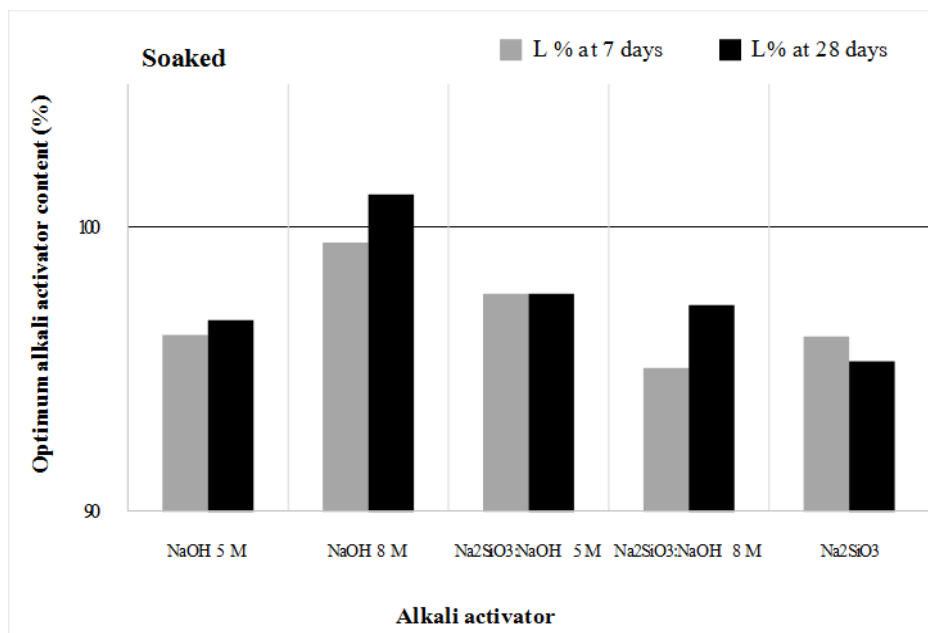
ภาพที่ 6-13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ของการเตรียมตัวอย่าง UCS สภาวะ Unsoaked เทียบกับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ก) สารละลาย Alkali activator ต่อค่า OAC (ข) สารละลาย Alkali activator ต่อค่า  $\gamma_{d,max}$



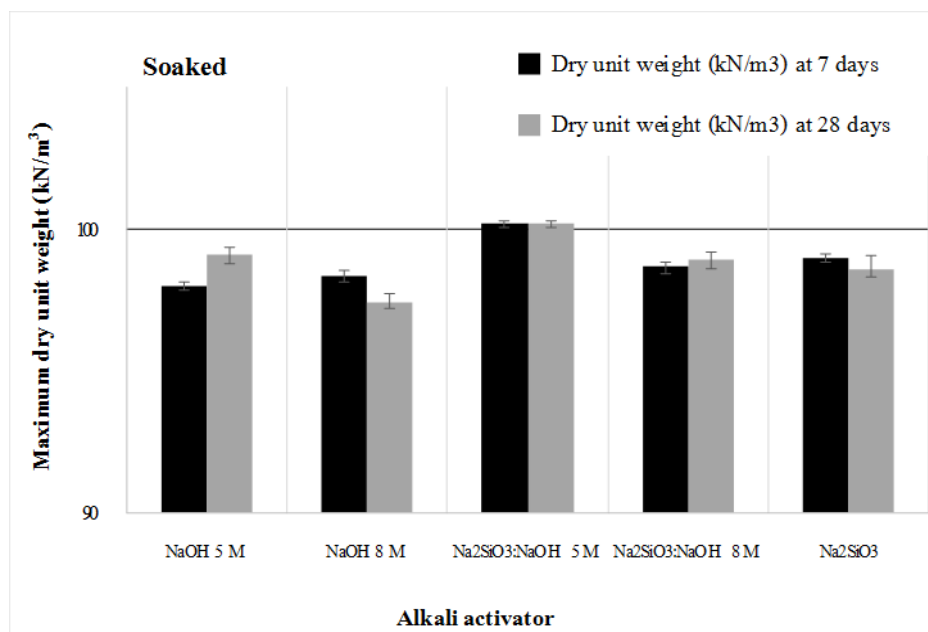
(ข)

ภาพที่ 6-13 (ต่อ)

ภาพที่ 6-14 (ก) แสดงอัตราส่วนสารละลาย Alkali activator ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน โดยค่า OAC จากการเตรียมตัวอย่าง UCS ที่สภาวะ Soaked ต่างกับการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน พบว่า ที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 95.1 ถึง 99.4% และที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 95.3 ถึง 101.1% ภาพที่ 6-14 (ข) แสดงค่า  $\gamma_{d,max}$  จากการเตรียมตัวอย่าง UCS ต่างกับการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานพบว่าที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 98.0 ถึง 100.2% และที่ระยะเวลาบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 97.4 ถึง 100.2%



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6-14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า OAC และ  $\gamma_{d,max}$  ของการเตรียมตัวอย่าง UCS สภาวะ Soaked เทียบกับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ก) Alkali activator ต่อค่า OAC (ข) Alkali activator ต่อค่า  $\gamma_{d,max}$

## ผลการทดสอบ UCS ในสถานะ Unsoaked และ Soaked จากการออกแบบอัตราส่วนใหม่

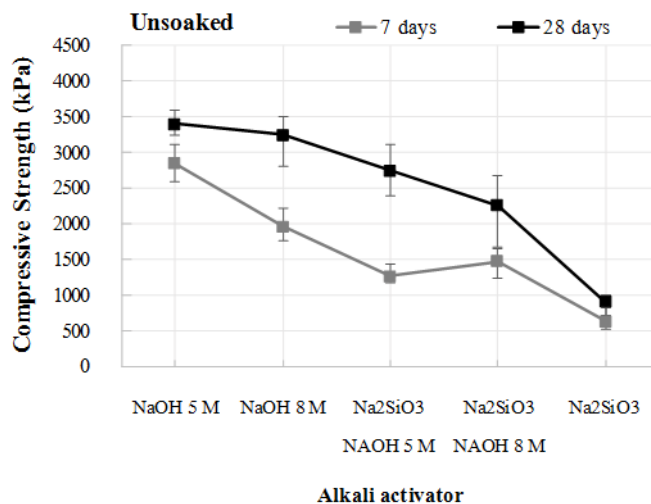
ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนาค่ากำลังอัดภายใต้สถานะ Unsoaked และ Soaked ที่สำคัญคืออัตราส่วน Soil : FA ซึ่งจากการผลการทดสอบการศึกษาอิทธิพลที่ต่อค่ากำลังอัดบ่งชี้ว่าการเพิ่มเถ้าลอยช่วยให้ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น จากการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน ดังนั้นการออกแบบการทดลองใหม่จึงถูกดำเนินการโดยการใช้อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 สำหรับอัตราส่วน Alkali activator ทุกอัตราส่วน เฟกเตอร์ที่ยังคงต้องมีการศึกษาเพื่อความเข้าใจที่ชัดเจนขึ้นยังคงประกอบไปด้วย

1. อัตราส่วน Alkali activator ระหว่าง  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 50 : 50 และ 100 : 0
2. ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 และ 8 โมลาร์
3. ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน

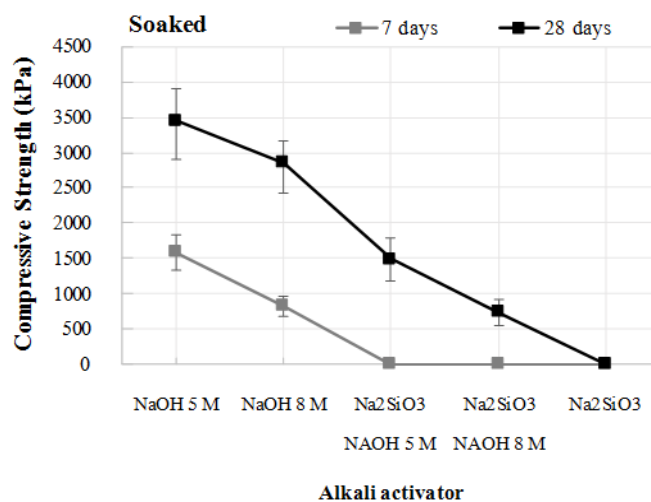
ผลต่อการสูญเสียความชื้นของระยะการบ่มที่ 7 และ 28 วัน และผลการทดสอบตามมาตรฐานชั้นพื้นทางกรรมทางหลวงชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ UCS มีค่าเท่ากับ 2,413 kPa พื้นทางดินซีเมนต์ UCS มีค่าเท่ากับ 1,724 kPa มาตรฐานชั้นรองพื้นทางกรรมทางหลวง UCS มีค่าเท่ากับ 689 kPa

### อัตราส่วน Alkali activator

ภาพที่ 6-15 (ก-ข) แสดงผลการทดสอบที่ชัดเจนถึงค่า UCS ทั้งที่สถานะ Unsoaked และ Soaked ระยะการบ่ม 7 และ 28 ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ มีค่า UCS สูงกว่าส่วนอัตราส่วน Alkali activator อัตราส่วนอื่นอย่างชัดเจน ค่า UCS สูงสุดของสถานะ Unsoaked และ Soaked พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 3,400 kPa อัตราส่วนที่ผสมด้วย สารละลาย NaOH จะให้ค่า UCS สูงกว่าอัตราส่วนที่ถูกผสมด้วยสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ไปจนถึงการผสมด้วยสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เพียงอย่างเดียว ซึ่งพบว่าให้ค่า UCS ต่ำสุด จนกระทั่งไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้ในสถานะ Soaked โดยเฉพาะที่ระยะการบ่มที่ 7 วัน เป็นไปได้ว่า สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  อาจต้องการปริมาณมากกว่าเพื่อเข้าทำปฏิกิริยา และเชื่อมประสานตัวอย่าง ดังนั้นปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันที่ได้จากสารละลาย NaOH จึงเป็นปฏิกิริยาหลักในการพัฒนาค่ากำลังอัดให้สูงขึ้น ช่วยให้ตัวอย่างในสถานะ Unsoaked หรือ Soaked มีค่ากำลังอัดไม่แตกต่างกันนัก การเชื่อมประสานกันจากผลผลิตของสารละลาย NaOH ที่ชะเอาซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยเป็น N-A-S-H ทำให้ตัวอย่างที่อยู่ในสถานะ Soaked ได้โดยที่ไม่ถูกน้ำเข้าแทรกซึมและทำลายโครงสร้างของตัวอย่าง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6-15 ความสัมพันธ์ของค่า UCS ต่ออัตราส่วน Alkali activator (ก) สภาวะ Unsoaked  
(ข) สภาวะ Soaked

#### ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

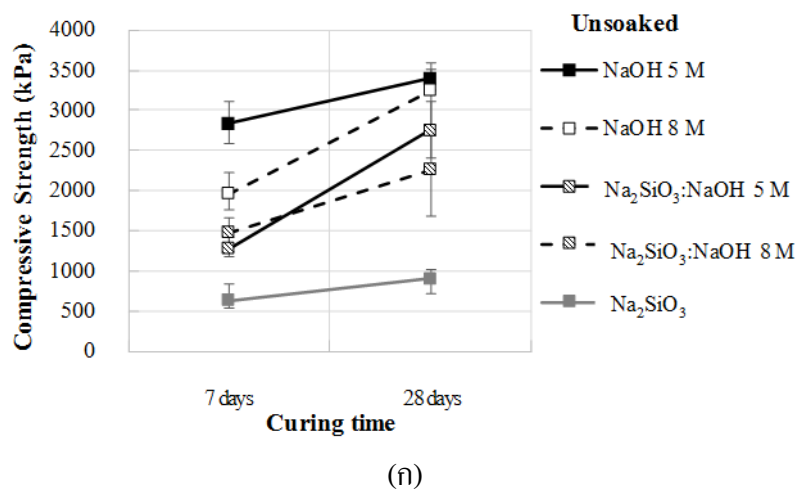
ภาพที่ 6-15 แสดงถึงความสำคัญของสารละลาย NaOH เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ นั้นสามารถเข้าทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันได้ดีกับอัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 กว่าสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ จึงให้ค่า UCS สูงกว่าทุกสภาวะ



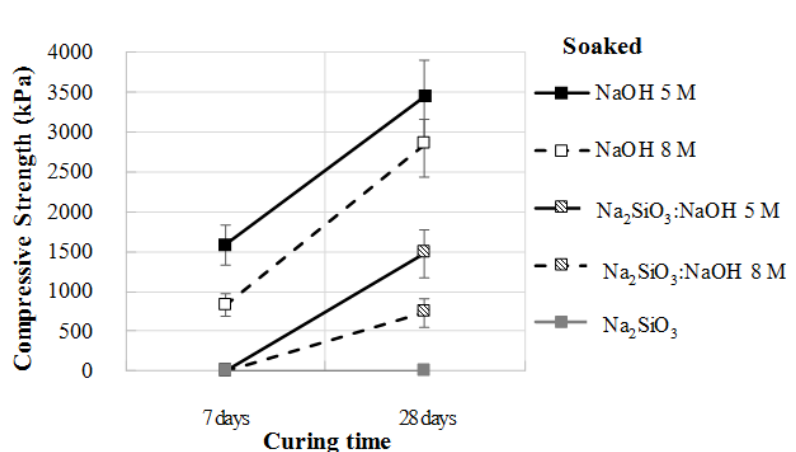
และระยะการบ่ม จึงชัดเจนแล้วว่าสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ เหมาะแก่การใช้ปรับปรุงคุณสมบัติดินตะกอนทะเลร่วมกับเถ้าลอย Class C ได้มากกว่า เนื่องจากความสามารถในการชะซิลิกาและอะลูมินาให้ออกมาในรูปแบบโครงสร้างอสัณฐาน สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ นั้นจะทำให้เกิดการตกผลึกหลังการเข้าชะอย่างรวดเร็ว ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์

#### ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

ผลการทดสอบอัตราส่วนใหม่นั้นของข้างชัดเจนดังภาพที่ 6-16 (ก-ข) โดยทั้งสภาวะ Unsoaked และ Soaked นั้นมีผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกันคือ ระยะการบ่มที่ 28 วันนั้น มีการพัฒนาค่ากำลังอัดมากกว่าระยะการบ่มที่ 7 วัน อย่างชัดเจนในทุกอัตราส่วนของสาร Alkali activator จึงสรุปได้ว่าระยะการบ่มที่ 28 วันนั้นมีความสำคัญต่อการพัฒนาปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน เป็นไปตามงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา (Phetchuay et al., 2014; Horpibulsuk et al., 2015; Phummiphan et al., 2015; Sukmak et al., 2013)



ภาพที่ 6-16 (ก-ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Alkali activator ต่อระยะการบ่มที่ 7 และ 28 วัน (ก) ค่า UCS ที่สภาวะ Unsoaked (ข) ค่า UCS ที่สภาวะ Soaked

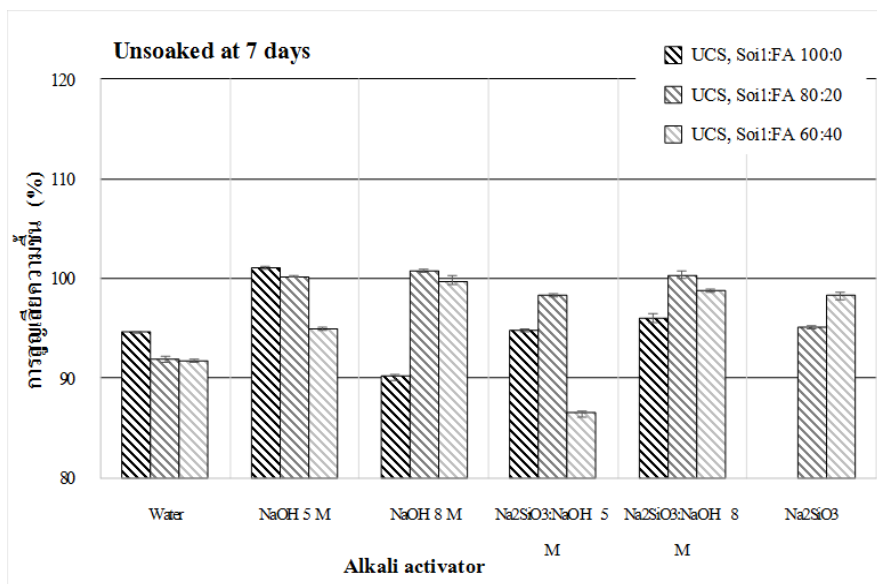


(จ)

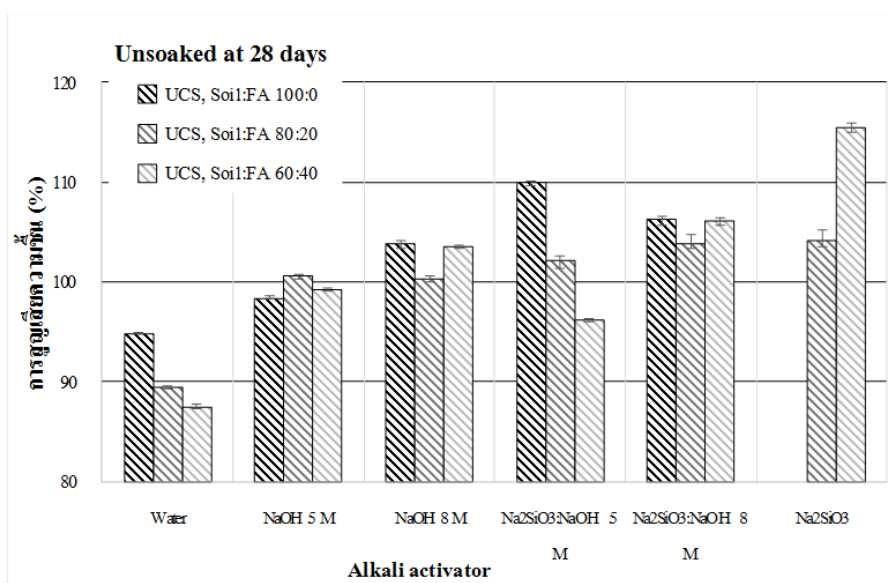
ภาพที่ 6-16 (ต่อ)

### ผลการสูญเสียความชื้นตัวอย่าง UCS ที่ถูกปรับปรุงใหม่ในสถานะ Unsoaked

ผลการสูญเสียความชื้นตัวอย่าง UCS ที่ถูกปรับปรุงใหม่ในสถานะ Unsoaked ดังภาพที่ 6-17 (ก-ข) ที่ระยะการบ่มตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยพบว่าทั้งระยะการบ่มที่ 7 และ 28 วัน มีการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นและลดลงไม่แน่นอน และไม่มีการเพิ่มขึ้นของน้ำค้างค่า UCS ในสถานะ Unsoaked ก่อนหน้านี้ ดังนั้นผลการทดสอบค่า UCS ในครั้งนี้จึงไม่น่าจะได้รับอิทธิพลจากน้ำที่เกิดจากความชื้นของอากาศ ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้ระยะการบ่มที่ 28 วัน มีค่า UCS สูงกว่าระยะการบ่มที่ 7 วัน สอดคล้องกับผลการทดสอบ CBR และเป็นไปตามงานวิจัยที่ได้ศึกษา มาก่อนหน้านี้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6-17 (ก-ข) ความสัมพันธ์ของการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง UCS (RE) ในสภาวะ Unsoaked (ก) ระยะการบ่มที่ 7 และ(ข) ระยะการบ่มที่ 28 วัน

สำหรับ UCS ในสภาวะ Soaked อัตราส่วนที่ผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางกรรมทางหลวงพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ พื้นทางดินซีเมนต์ และชั้นรองพื้นทางกรรมทางหลวง ผลการทดลอง

ดั่งภาพที่ 6-18 การแสดงค่ากำลังอัดแต่ละอัตราส่วนที่ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ตามลำดับ

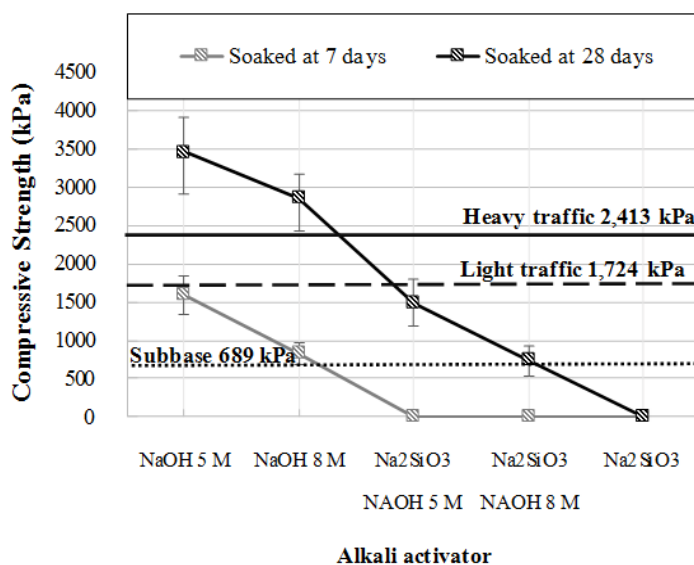
มาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ UCS มีค่าเท่ากับ 2,413 kPa อัตราส่วนที่มีค่ากำลังอัดผ่านเกณฑ์ คือ

1. อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  0 : 100 ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ทั้งระยะการบ่ม 7 และ 28 วัน
2. อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  0 : 100 ความเข้มข้นของ NaOH 8 โมลาร์ ที่ระยะการบ่ม 28 วัน

โดยนอกเหนือจากชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ไม่มีอัตราส่วนใดผ่านเกณฑ์ชั้นพื้นทางดินซีเมนต์

ชั้นรองพื้นทาง UCS ค่าเท่ากับ 689 kPa เกือบทุกอัตราส่วนมีค่ากำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์ ยกเว้น

1. อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  50 : 50 ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ที่ระยะการบ่ม 7 และ 28 วัน
2. อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  50 : 50 ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ที่ระยะการบ่ม 7 วัน
3. อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  100 : 0 ที่ระยะการบ่ม 7 วัน

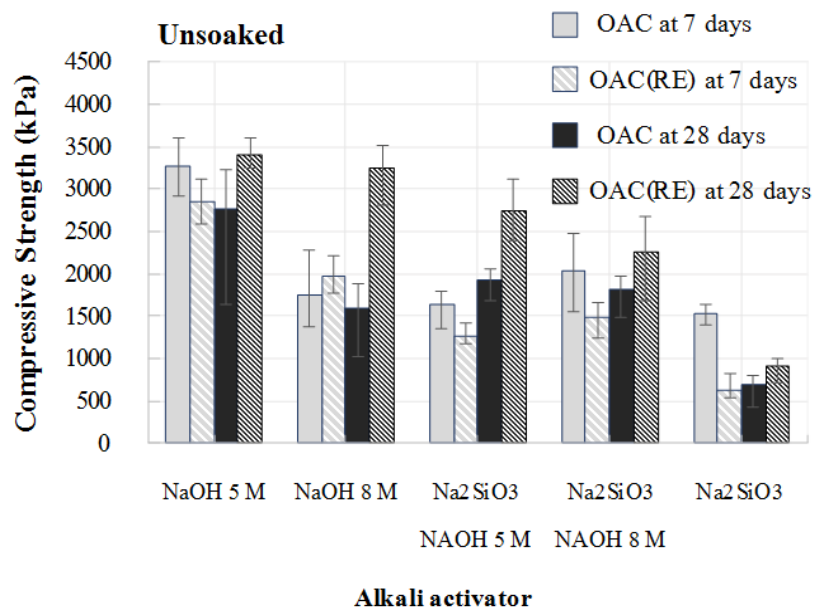


ภาพที่ 6-18 ค่ากำลังอัดแต่ละอัตราส่วนตามมาตรฐานกรมทางหลวง

## การเปรียบเทียบตัวอย่าง UCS ที่ถูกปรับปรุงใหม่ในสถานะ Unsoaked

ผลการเปรียบเทียบตัวอย่าง UCS ในสถานะ Unsoaked ระหว่าง UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC (RE) และ UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC โดยแสดงที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ดังภาพที่ 6-19 ผลการทดสอบแสดงค่า UCS สูงสุดที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน จากค่า UCS ที่ถูกเตรียมด้วย OAC(RE) และค่า UCS มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ส่วนค่า UCS นอกจากนี้พบว่ามีความแปรปรวนไปในทิศทางเดียวกันคือ อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ให้ค่า UCS สูงสุด จากนั้นค่า UCS ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH แต่เมื่อเพิ่ม  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เข้าไปในส่วนผสมจะให้ค่า UCS เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนการผสมสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เพียงอย่างเดียวให้ค่า UCS ต่ำสุด อย่างไรก็ตามและค่า UCS ที่ถูกเตรียมจาก OAC (RE) ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน นั้นให้ค่า UCS เพิ่มขึ้นในเกือบทุกกลุ่มของ Alkali activator ยกเว้นกลุ่มที่ผสมสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เพียงอย่างเดียว ส่วนที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน นั้นแสดงค่า UCS ค่อนข้างต่ำกว่า UCS ที่เตรียมจากค่า OAC อาจเนื่องจากการเพิ่มปริมาณสาร Alkali activator ทำให้ในช่วง 7 วันแรกของการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันค่อนข้างช้า ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันต้องการเวลาสำหรับปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ไม่น้อยกว่า 28 วันในทางตรงกันข้าม การเตรียม UCS จากค่า OAC นั้นให้ค่า UCS ค่อนข้างสูงในช่วง 7 วันแรก หลังจากนั้นตัวอย่างจะให้กำลังอัดที่ต่ำลง นั่นอาจเป็นเพราะปริมาณสารละลาย Alkali activator มีไม่เพียงพอที่จะสร้างปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันและยึดประสานตัวอย่างทั้งหมดให้อยู่ในรูปเดิม การที่ตัวอย่างมีการยึดประสานกันต่ำทำให้ตัวอย่างคลายตัวจากการเตรียมตัวอย่างจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เมื่อทิ้งตัวอย่างไว้เป็นเวลานานขึ้นจึงทำให้ตัวอย่างรับกำลังได้ต่ำลง

ดังนั้นค่า UCS ที่ถูกเตรียมจาก OAC (RE) เมื่อมีระยะเวลาบ่มที่นานขึ้นจึงสามารถรับกำลังอัดได้สูงขึ้น จากปริมาณสารละลาย Alkali activator ที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันและยึดประสานซึ่งกันและกัน ส่วน UCS ที่ถูกเตรียมจาก OAC นั้น มีสารปริมาณสารละลาย Alkali activator ที่ไม่เพียงพอ เมื่อระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้นยิ่งทำให้ตัวอย่างคลายตัวจากแรงอัดส่งผลให้มีค่ากำลังอัดต่ำลง



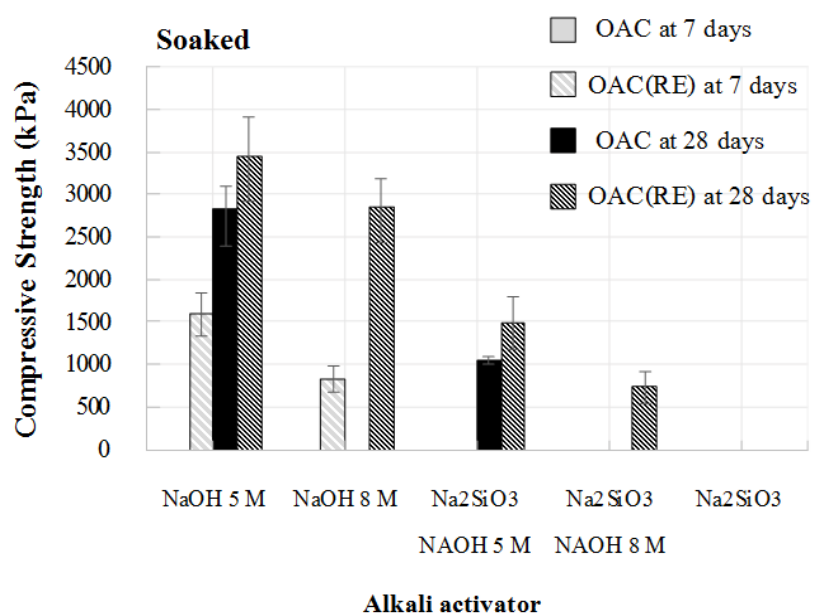
ภาพที่ 6-19 ค่ากำลังอัดของตัวอย่าง UCS ในสภาวะ Unsoaked ระหว่าง UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC (RE) และ UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC

### การเปรียบเทียบตัวอย่าง UCS ที่ถูกปรับปรุงใหม่ในสภาวะ Soaked

ผลการเปรียบเทียบตัวอย่าง UCS ในสภาวะ Soaked ระหว่าง UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC (RE) และ UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC โดยแสดงที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ดังภาพที่ 6-20 ผลจาก UCS ที่ถูกเตรียมจาก OAC (RE) สามารถให้กำลังอัดได้หลังจากผ่านสภาวะ Soaked ในเกือบทุกอัตราส่วน โดยอัตราส่วนที่มีค่า UCS สูงสุด อยู่ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ NaOH และเมื่อผสมสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เช่นเดียวกับสภาวะ Unsoaked โดยที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ตัวอย่างที่ผสมด้วย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  นั้นไม่สามารถให้กำลังอัดได้ ส่วนค่า UCS ที่ถูกเตรียมจาก OAC มีค่า UCS สูงสุด อยู่ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เช่นเดียวกันแต่น้อยกว่า UCS ที่ถูกเตรียมจาก OAC (RE) และมีเพียงอัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH 5 โมลาร์ ที่สามารถกำลังอัดได้ และที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีเพียงอัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH เท่านั้นที่ให้กำลังอัดได้

อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH 0 : 100 ความเข้มข้นของ NaOH 5 โมลาร์นั้นสามารถทำให้ตัวอย่าง UCS รับกำลังอัดได้หลากหลายกว่าอัตราส่วน Alkali activator

อื่น ๆ สำหรับ UCS ในสถานะ Soaked สารละลาย NaOH 5 โมลาร์ จึงมีความสำคัญต่อความสามารถในการรับกำลังอัดอย่างมากซึ่งความสัมพันธ์กับอัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ในการสร้างปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน จาก N-A-S-H นี้จึงทำให้ตัวอย่างสามารถรับกำลังอัดได้แม้จะผ่านสถานะ Soaked มาก่อนก็ตาม ดังนั้นปริมาณสารละลาย Alkali activator ที่เพียงพอจะช่วยในการสร้างปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ไม่เพียงแต่สร้างการยึดประสานแก่ตัวอย่าง ยังทำให้ตัวอย่างทนต่อสถานะ Soaked และรับกำลังอัดได้ดีใกล้เคียงกับสถานะ Unsoaked



ภาพที่ 6-20 ค่ากำลังอัดของตัวอย่าง UCS ในสถานะ Soaked ระหว่าง UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC (RE) และ UCS ที่ถูกเตรียมจากค่า OAC

### สรุปผลการทดสอบ UCS ในสถานะ Unsoaked และ Soaked จากการออกแบบอัตราส่วนใหม่

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนาค่ากำลังอัดภายใต้สถานะ Unsoaked และ Soaked ที่สำคัญ คือ อัตราส่วน Soil : FA ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าการเพิ่มเนื้อที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 เหมาะสมกับสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่ 28 วัน ด้วยปริมาณสารละลาย Alkali activator ที่เพียงพอ สามารถทำให้ตัวอย่างสร้างปฏิกิริยา

จีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้สมบูรณ์จาก N-A-S-H ความสัมพันธ์เหล่านี้ไม่เพียงแต่สร้างการยึดประสานแก่ตัวอย่าง ยังทำให้ตัวอย่างทนต่อสภาวะ Soaked และรับกำลังอัดได้ดีใกล้เคียงกับสภาวะ

Unsoaked

สำหรับงานวิจัยที่มีแนวทางการศึกษาใกล้เคียง ทั้งวัสดุที่ใช้และระยะเวลาบ่มนั้นเป็นงานวิจัยของ (Phummiphan et al., 2015) ดังภาพที่ 2-10 โดยมีอัตราส่วนที่ใกล้เคียงคืออัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 100 : 0$  และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 50 : 50$  ผสมด้วยอัตราส่วน Soil : FA 70 : 30 ซึ่งพบว่า ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีค่า UCS สูงถึง 5,800 kPa และระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน ค่า UCS ที่สูงกว่าระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ส่วนอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 50 : 50$  พบว่าที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน มีค่า UCS ต่ำที่สุดที่ประมาณ 5,100 kPa และระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน มีค่า UCS สูงกว่าอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 100 : 0$  และมีการพัฒนาค่า UCS เพิ่มขึ้นไปสูงกว่าทุกอัตราส่วนที่การบ่ม 90 วัน อย่างไรก็ตามที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วันค่า UCS ของทั้งสองอัตราส่วนนั้นไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อเปรียบเทียบผลงานวิจัยพบว่างานวิจัยของ (Phummiphan et al., 2015) นั้นชัดเจนว่าการทดลองปรับปรุงคุณภาพดินด้วยจีโอโพลิเมอร์จำเป็นต้องอาศัยเผ้าลยเป็นส่วนผสม และระยะเวลาการบ่มตัวอย่างมีผลอย่างยิ่งต่อการพัฒนาปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งมีการพัฒนาค่า UCS สูงกว่าระยะเวลาบ่มที่น้อยกว่าและยาวนานกว่า ส่วนการใช้สารละลาย Alkali activator นั้นเป็นตัวแปรที่มีผลอย่างยิ่งต่อค่า UCS เนื่องจากผลการทดลองของ (Phummiphan et al., 2015) ก่อนข้างประสบความสำเร็จในการใช้  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เป็นส่วนผสมโดยให้ค่า UCS ที่ค่อนข้างสูงในช่วงแรก ซึ่งเมื่อทดลองแล้วกลับ พบว่า การใช้สารละลาย NaOH กลับให้ค่า UCS ที่สูงกว่าทั้งระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองที่ค่อนข้างแปรปรวนและไม่แน่นอน ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ชัดเจนถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหากไม่มีผลการทดลองจากทางด้านวิทยาศาสตร์เพิ่มเติม เช่น XRD และ FT-IR โดยจะสามารถบ่งชี้ได้ถึงการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ได้ไม่มากนัก



## บทที่ 7

### การวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน

ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันสามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายรูปแบบตั้งแต่การวิเคราะห์ในรูปแบบภาพ องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งใช้ศึกษาการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน การศึกษารูปร่างโครงสร้างระดับจุลภาคที่พื้นผิวและองค์ประกอบของสารเคมี ไปจนถึงศึกษาองค์ประกอบของธาตุในเชิงปริมาณ การระบุขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุลพันธะ Si-O-Si และ Al-O ที่ใช้นิยาม Degree of polycondensation ความซับซ้อนของจีโอโพลิเมอร์ ในสถานะการเป็นผลึกหรือไม่เป็นผลึกของโครงสร้าง จากผลจากทดสอบ UCS ของอัตราส่วนที่ถูกปรับปรุงใหม่ของอัตราส่วน NaOH ความเข้มข้น 5 และ 8 โมลาร์ เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ให้ผลการทดสอบผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานกรมทางหลวง สามารถรับกำลังอัดได้ภายใต้สถานะ Soaked ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และให้กำลังอัดสูงในระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน ซึ่งเป็นที่น่าสนใจสำหรับอัตราส่วน N-A-O-H เพียงอัตราส่วนเดียวที่สามารถให้กำลังอัดภายใต้สถานะ Soaked ได้ อัตราส่วนที่ถูกนำมาวิเคราะห์รวมไว้ในภาพที่ 7-1 โดยแบ่งการทดสอบตามระยะเวลาการบ่มที่ 7 และ 28 วัน โดยใช้สัญลักษณ์

00 แทน อัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำ

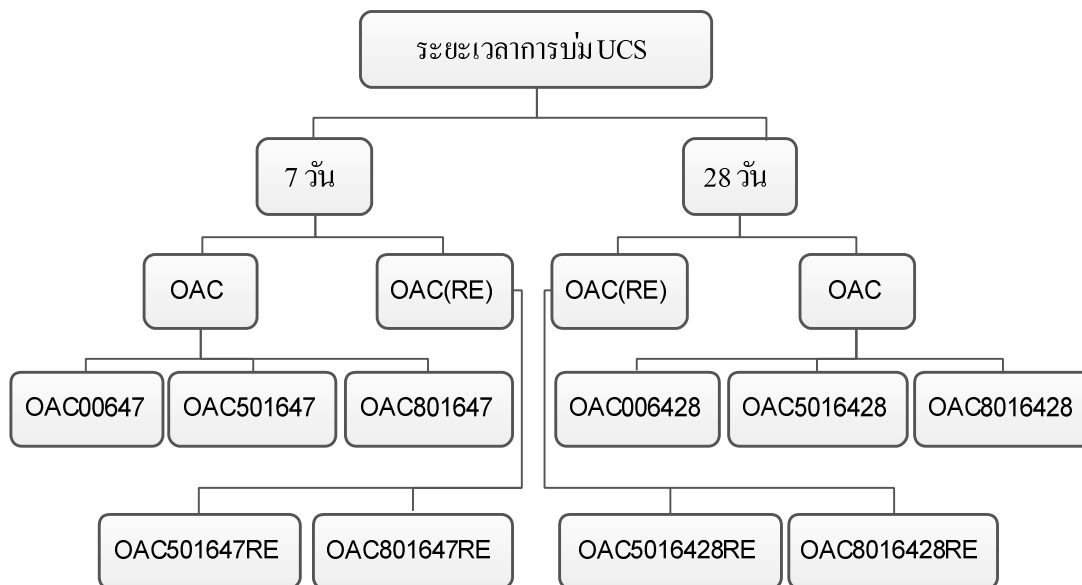
501 แทน อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 0 : 100$  ที่สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์

801 แทน อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 0 : 100$  ที่สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์

64 แทน อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40

7 และ 28 แทน ระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

ตัวอย่างเช่น OAC5016428RE คืออัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} 0 : 100$  ที่สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ Soil : FA 60 : 40 ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน ของอัตราส่วนที่ถูกปรับปรุงใหม่



ภาพที่ 7-1 ผังอัตราส่วนถูกนำมาวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน

การทดสอบเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX หรือ EDS) เป็นการสำรวจการเติบโตของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันที่เชื่อมต่อกันของเม็ดลอมและดินตะกอนทะเลเข้าด้วยกันด้วย N-A-S-H เกิดขึ้นบริเวณโดยรอบและผิวหน้าของอนุภาคดินตะกอนทะเลและเม็ดลอม หลังจากทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันการชะละลายของ NaOH ที่ความเข้มข้น 5 และ 8 โมลาร์ และปฏิกิริยาจาก C-S-H ของอัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ที่ถูกผสมด้วยน้ำเปล่า ดังภาพที่ 7-2 (ก-จ) โดยพบว่า

ภาพที่ 7-2 (ก) อัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำแสดงการเชื่อมประสานกันด้วยองค์ประกอบของ CaOH จากการละลายแคลเซียมในเม็ดลอมและดินตะกอนทะเลของน้ำ เมื่อรวมกับสารประกอบซิลิกาและอะลูมินา ผลที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ระยะการบ่ม 7 วัน และปอซโซลานิกที่ระยะการบ่ม 28 วัน จากผลผลิต C-S-H และ C-A-H (Chindaprasirt et al., 2009)

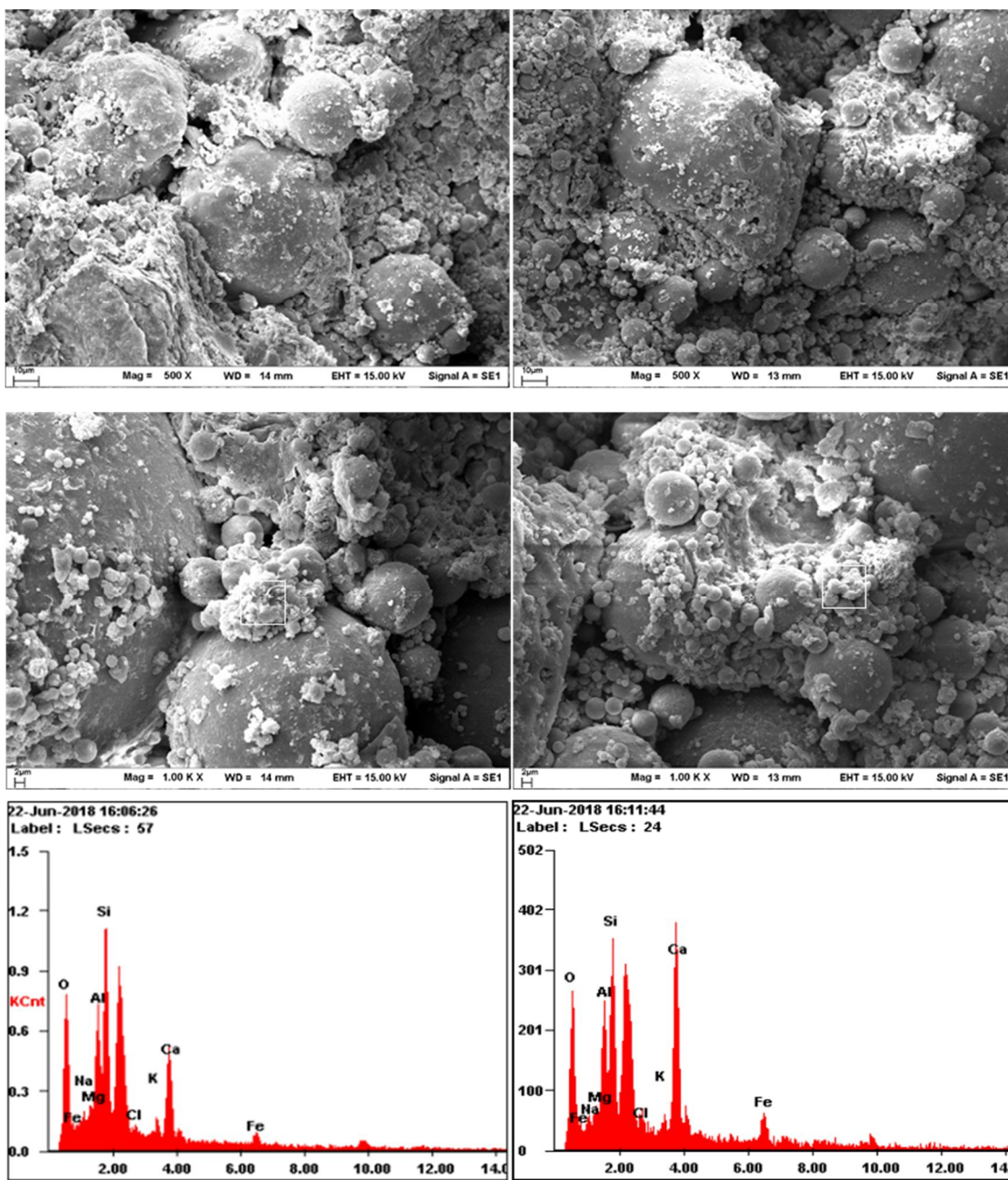
ภาพที่ 7-2 (ข) อัตราส่วน NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่ OAC แสดงการเชื่อมประสานกันระหว่างอนุภาคดินและเม็ดลอมด้วยเจล N-A-S-H จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันสังเกตได้จาก EDX ที่ระยะการบ่ม 28 วัน มีจำนวนซิลิกาจากองค์ประกอบของเจล N-A-S-H จำนวนมากและมีจำนวนแคลเซียมน้อยกว่าจากระยะการบ่มที่ 7 วัน เนื่องจากแคลเซียมถูกใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

จากผลผลิต C-S-H ไปแล้ว จึงสังเกตได้ว่าตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคที่แน่นกว่าระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันพัฒนาดียิ่งขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม

ภาพที่ 7-2 (ค) รูปแบบการเจริญเติบโตของปฏิกิริยาคลายคลิงกับภาพ (ข) แต่การเพิ่มปริมาณ NaOH เป็นการเพิ่มความสามารถในการชะซิลิกาและอะลูมินาที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคได้ลดยมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้เจล N-A-S-H ที่เชื่อมประสานระหว่างอนุภาคมีมากขึ้น สังเกตได้ว่าตัวอย่างใน ภาพ (ค) จะมีความหนาแน่น ความขรุขระและเจลเกาะที่บริเวณผิวมากกว่าภาพ (ข) เล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของเจล N-A-S-H โดยตัวอย่างที่มีระยะเวลาการบ่ม 28 วันนั้นมียอดประกอบของโซเดียมมากกว่า ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันของอัตราส่วนนี้สูงที่สุด

ภาพที่ 7-2 (ง) แสดงการเข้าทำลายที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคเถ้าลอยของสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ชัดเจนกว่า 5 โมลาร์ การเข้าทำลายนั้น ได้ชะแคลเซียมที่อยู่ในอนุภาคเถ้าลอยมาทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaOH จับตัวกันเป็นก้อน และเกิดการตกผลึกจากการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วเกินไปของ NaOH ที่ความเข้มข้นสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 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 มีกำลังอัดที่ต่ำ เมื่ออยู่ในสถานะ Soaked จึงพังทลายลง เนื่องจากน้ำที่เข้าไปแทรกซึมและสลายโครงสร้างอัตราส่วนนี้จึงไม่สามารถให้กำลังอัดได้

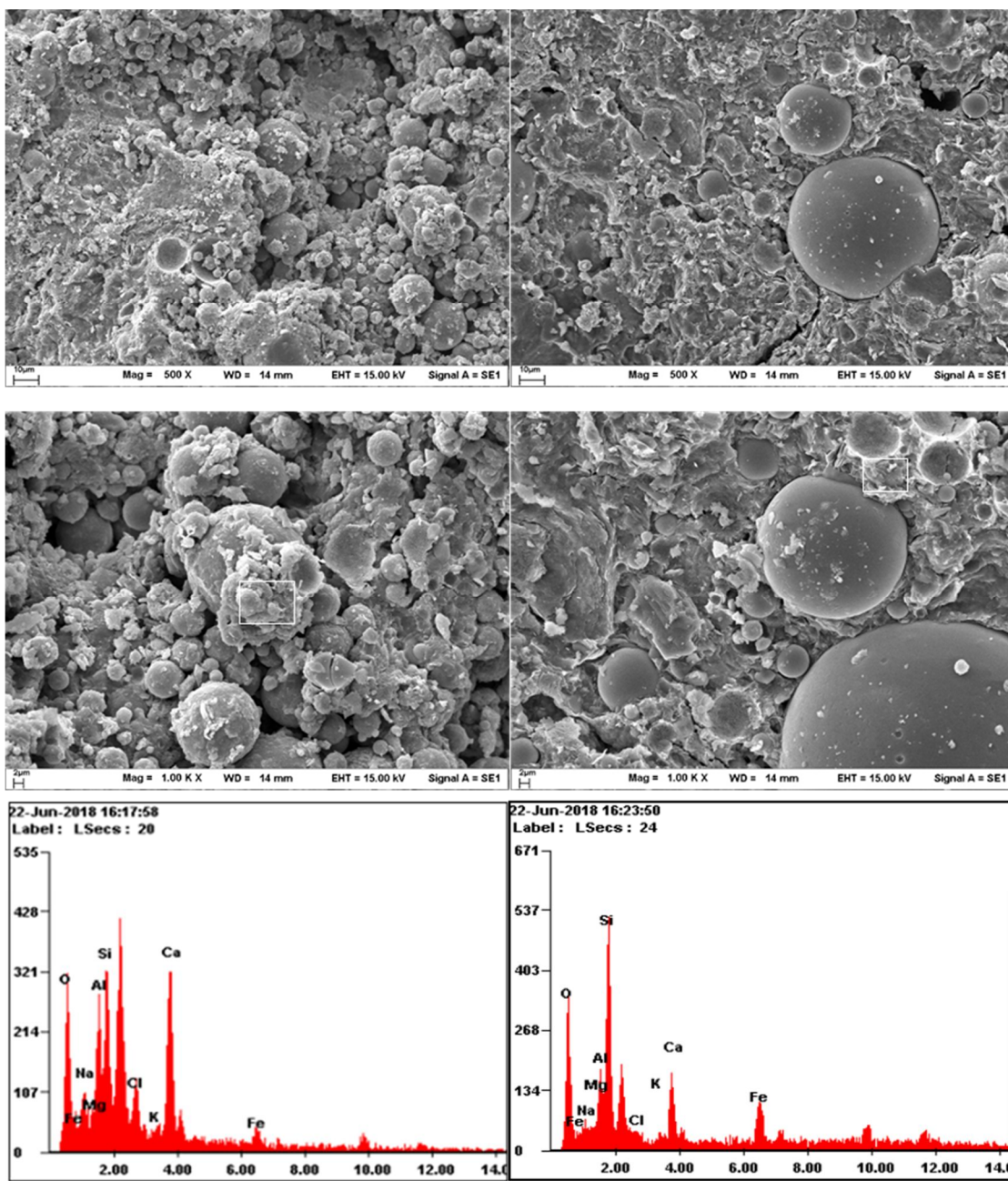
ภาพที่ 7-2 (จ) การเพิ่มจำนวนสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มีรูปแบบของปฏิกิริยาที่คล้ายคลึงกับอัตราส่วนเดิม (OAC) แต่จำนวนสารละลาย NaOH มากขึ้นทำให้ตัวอย่างมีร่องรอยของการชะละลายบริเวณผิวหน้ามากขึ้น การชะแคลเซียมที่มากขึ้นจึงเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับการชะซิลิกาและอะลูมินาในเถ้าลอยทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้เกิดจากเจล N-A-S-H แม้ว่าสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ จะทำให้แคลเซียมตกผลึก และส่งผลต่อกำลังอัด แต่อย่างไรก็ตามจำนวนซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในอนุภาคเถ้าลอยมีมากกว่าแคลเซียม ดังนั้นเมื่อการชะแคลเซียมจบลงสารละลาย NaOH ที่เหลือก็จะทำการชะซิลิกาและอะลูมินาที่ยังไม่ได้ถูกชะ ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันนี้จึงถูกพัฒนาต่อเนื่องที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



(ก) OAC00647

(ข) OAC006428

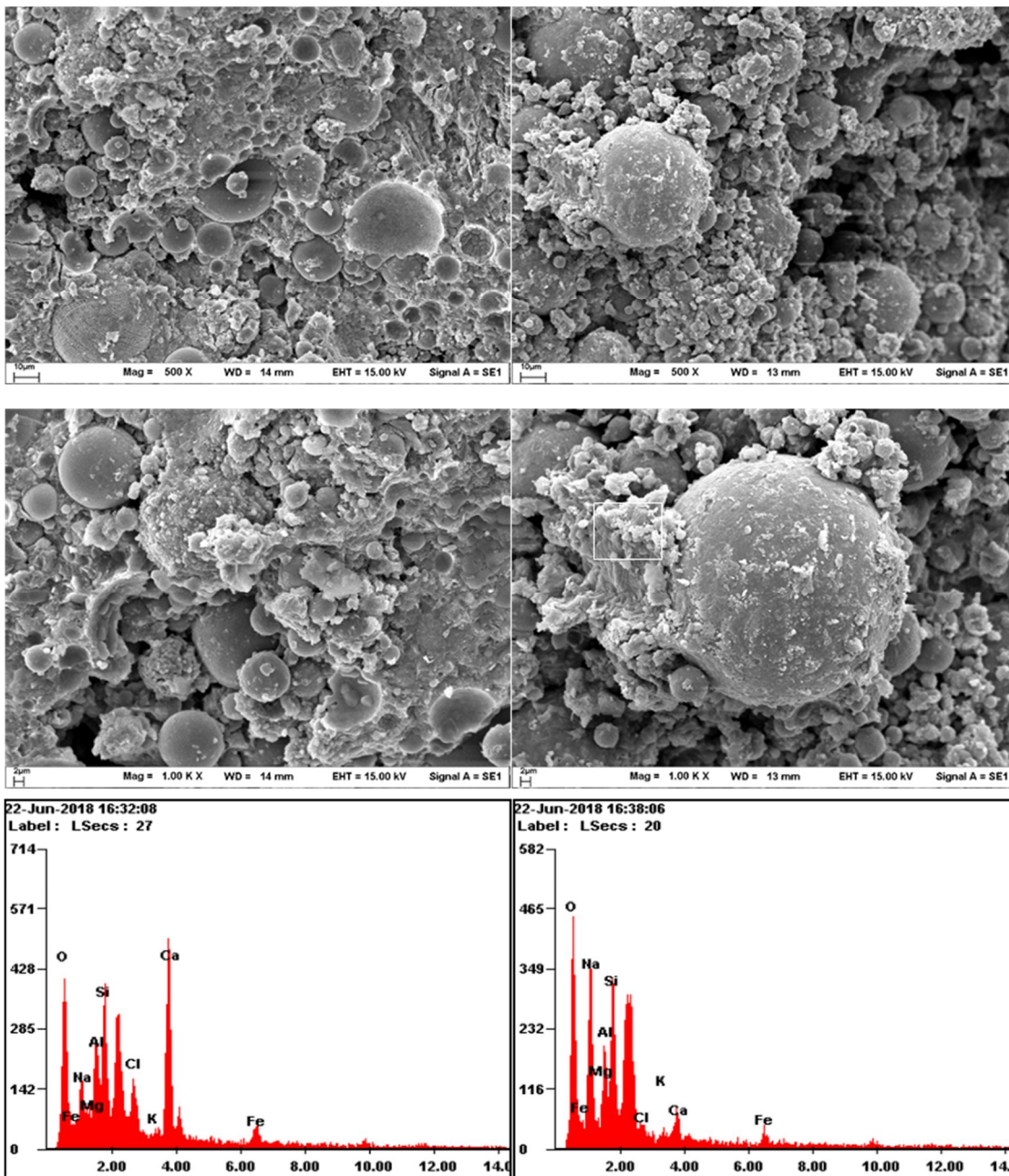
ภาพที่ 7-2 โครงสร้างทางจุลภาพจากการทดสอบ SEM และ EDX



(๗) OAC501647

(๗) OAC5016428

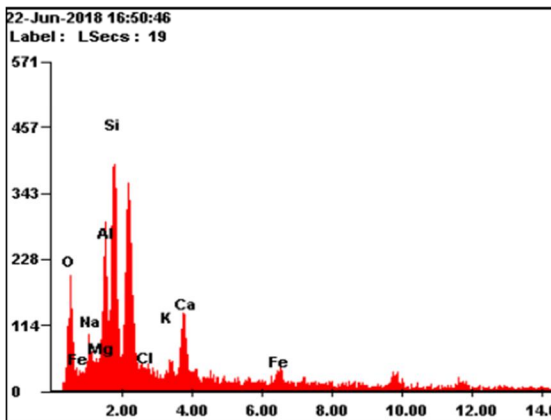
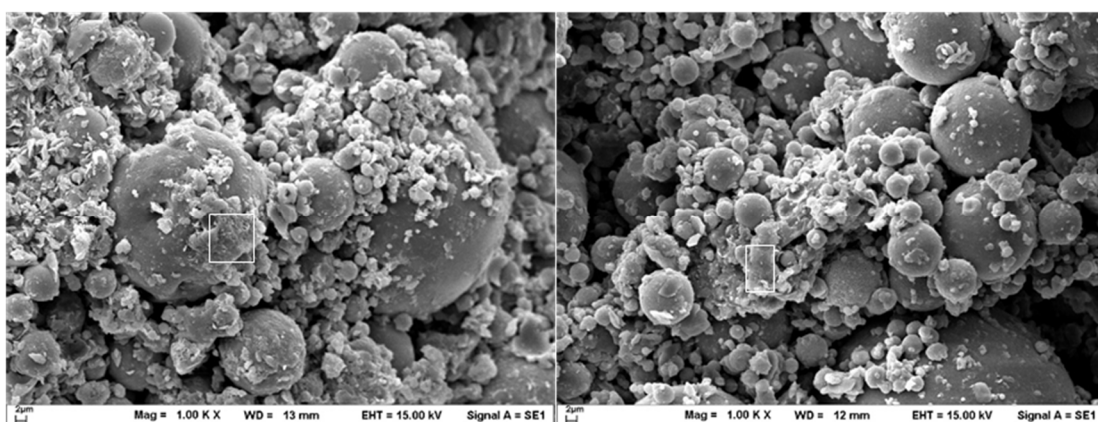
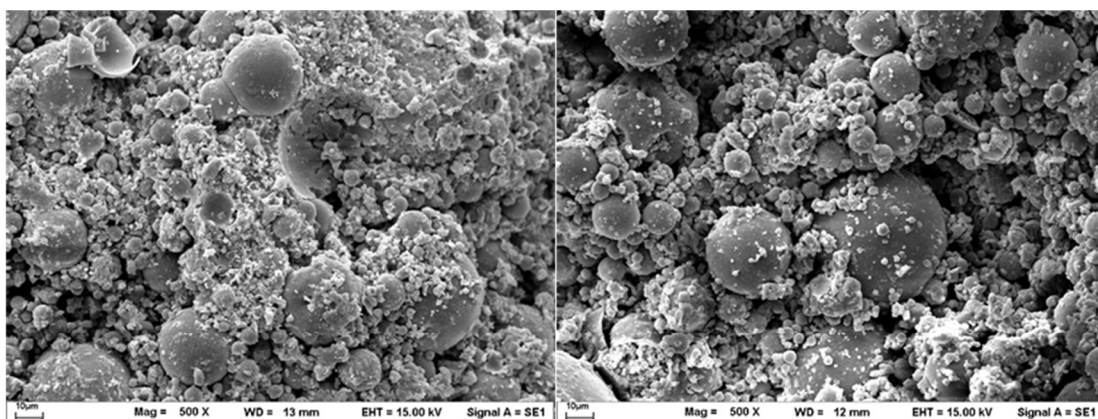
ภาพที่ 7-2 (ต่อ)



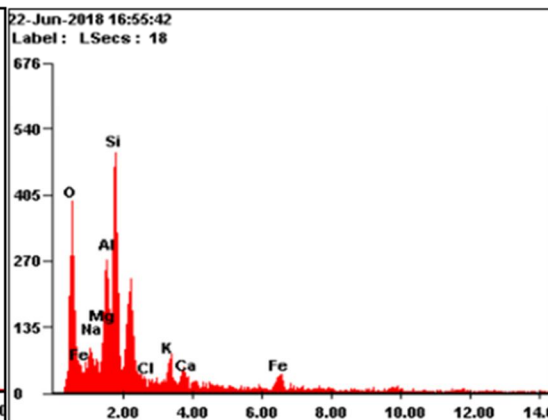
(ก) OAC501647RE

(ข) OAC5016428RE

ภาพที่ 7-2 (ต่อ)

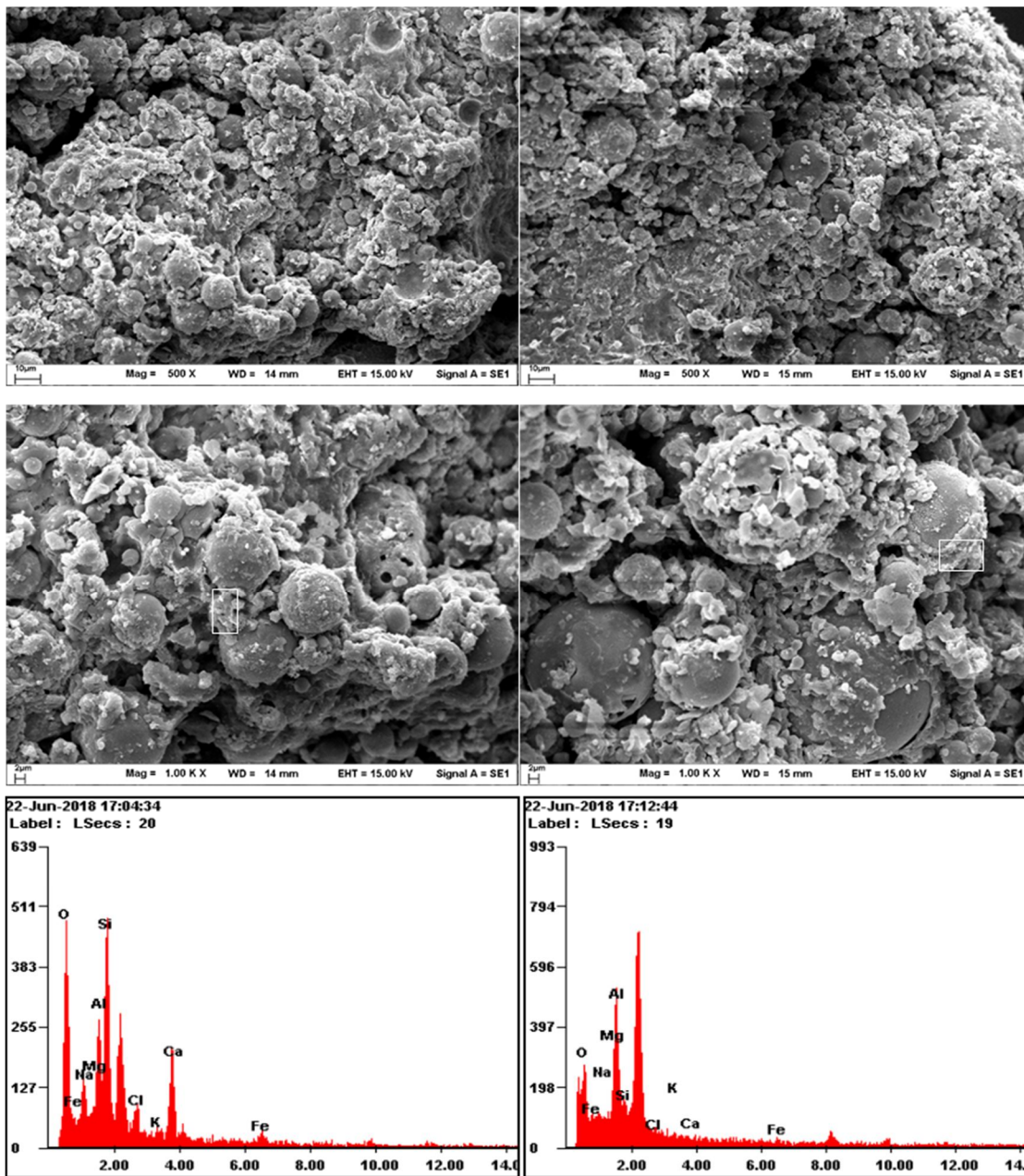


(จ) OAC801647



(จ) OAC8016428

ภาพที่ 7-2 (ต่อ)



ภาพที่ 7-2 (ต่อ)

### สรุปผลการทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

1. กำลั้งอัดที่เกิดขึ้นเกิดจากผลของ C-S-H และ N-A-S-H โดย C-S-H เกิดจาก แคลเซียม ซิลิเกต และน้ำ ส่วน N-A-S-H เกิดจาก โซเดียมซิลิเกต 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

### ผลการทดสอบองค์ประกอบของธาตุ

การทดสอบหาองค์ประกอบธาตุที่แตกต่างกันหลังจากการเกิดปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอไรเซชันด้วยวิธี XRF โดยตารางที่ 7-1 แสดงอัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำ ตารางที่ 7-2 แสดงอัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ และตารางที่ 7-3 แสดงอัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ โดยองค์ประกอบธาตุที่ได้รับ ความสนใจได้แก่  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  และ  $\text{Na}_2\text{O}$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิด C-S-H และ N-A-S-H ผลการทดสอบตารางที่ 7-1 ถึง 7-3 มีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันนัก โดยมีจำนวน  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  และ  $\text{Na}_2\text{O}$  แต่ละอัตราส่วนใกล้เคียงกัน จำนวน  $\text{SiO}_2$  (45.30-47.80) (45.80-47.90) และ (43.90-45.00) จำนวน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (19.10-19.50) (18.6-19.20) และ (17.50-18.00) จำนวน  $\text{CaO}$  (10.90-10.70) (9.80-10.60) และ (10.90-12.20) และจำนวน  $\text{Na}_2\text{O}$  (1.55-1.64) (4.07-5.07) และ (5.05-6.98) ซึ่งอัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำ และอัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทั้งสองอัตราส่วนนี้พบปริมาณ  $\text{CaO}$  ในเปอร์เซ็นต์ (%) ที่สูงกว่าอัตราส่วนที่ผสมด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ เนื่องจาก  $\text{CaO}$  นั้นทำปฏิกิริยากับน้ำ และสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ทำให้  $\text{CaO}$  ที่ชะได้จากเถ้าลอยนั้นตกผลึกลง จึงพบ  $\text{CaO}$  มากกว่าสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ส่วนอัตราส่วนเกิดสารประกอบ N-A-S-H สำหรับปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอไรเซชันได้แก่ อัตราส่วนที่ผสมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 และ 8 โมลาร์ ทั้งสองอัตราส่วนนี้จึงพบปริมาณ  $\text{Na}_2\text{O}$  ในเปอร์เซ็นต์ (%) ที่สูง อัตราส่วนที่ผสมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มีความสามารถในการชะซิลิกาและอะลูมินาที่สูงทำให้เปอร์เซ็นต์ (%)  $\text{SiO}_2$

และ $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่เหลืออยู่มีเปอร์เซ็นต์ (%) ที่ต่ำกว่าอัตราส่วนที่ผสมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์

ตารางที่ 7-1 องค์ประกอบธาตุของอัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำ

องค์ประกอบธาตุ	OAC00647	OAC006428
$\text{SiO}_2$	45.30	47.80
$\text{Al}_2\text{O}_3$	19.10	19.50
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7.81	7.68
CaO	10.90	10.70
$\text{K}_2\text{O}$	3.06	2.97
$\text{Na}_2\text{O}$	1.55	1.64
Cl	0.89	1.00
MgO	1.85	2.10
$\text{SO}_3$	3.42	3.52

ตารางที่ 7-2 อัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์

องค์ประกอบธาตุ (%)	OAC501647	OAC5016428	OAC5016427RE	OAC5016428RE
$\text{SiO}_2$	47.70	47.00	45.80	47.90
$\text{Al}_2\text{O}_3$	18.90	18.60	18.80	19.20
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7.57	7.29	7.42	7.28
CaO	10.60	10.1	10.20	9.80
$\text{K}_2\text{O}$	2.93	2.98	2.91	2.98
$\text{Na}_2\text{O}$	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
$\text{SO}_3$	2.41	2.42	2.56	2.47

ตารางที่ 7-3 อัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์

องค์ประกอบธาตุ (%)	OAC801647	OAC8016428	OAC8016427RE	OAC8016428RE
SiO <sub>2</sub>	43.90	44.10	45.00	45.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.00	17.50	17.70	17.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.17	7.74	7.81	7.58
CaO	12.20	11.60	11.30	10.90
K <sub>2</sub> O	2.70	2.81	2.78	2.77
Na <sub>2</sub> 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 <sub>3</sub>	3.38	3.29	3.03	3.02

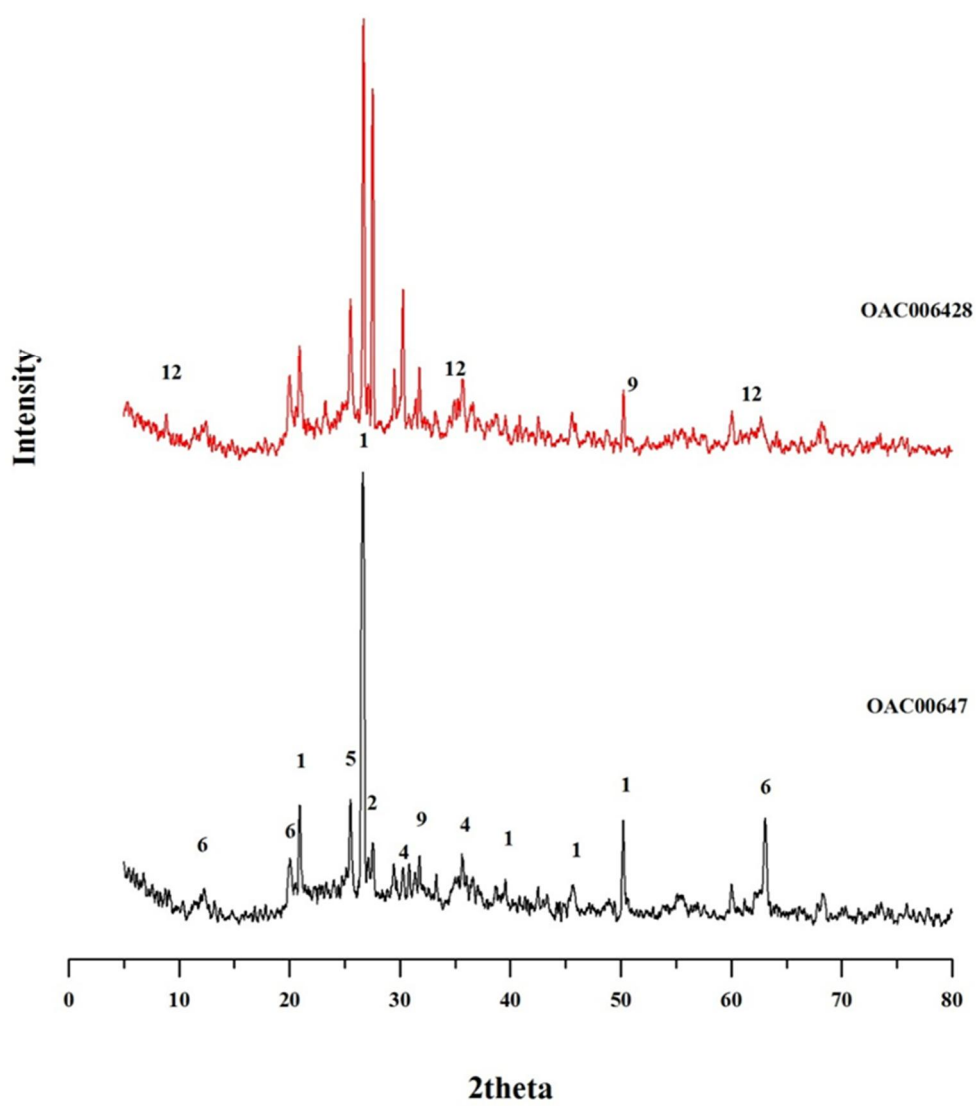
### สรุปผลการทดสอบองค์ประกอบของธาตุ

ปริมาณธาตุที่ C-S-H และ N-A-S-H ต้องการสำหรับการทำปฏิกิริยา ได้แก่ SiO<sub>2</sub> และ CaO สำหรับการสร้าง C-S-H และธาตุ SiO<sub>2</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Na<sub>2</sub>O 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<sub>2</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ได้มากกว่าสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ แต่จะทำให้ชะ CaO และตกผลึกเสียก่อนจะสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ จึงทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์

### ผลการทดสอบความเป็นผลึกของโครงสร้าง

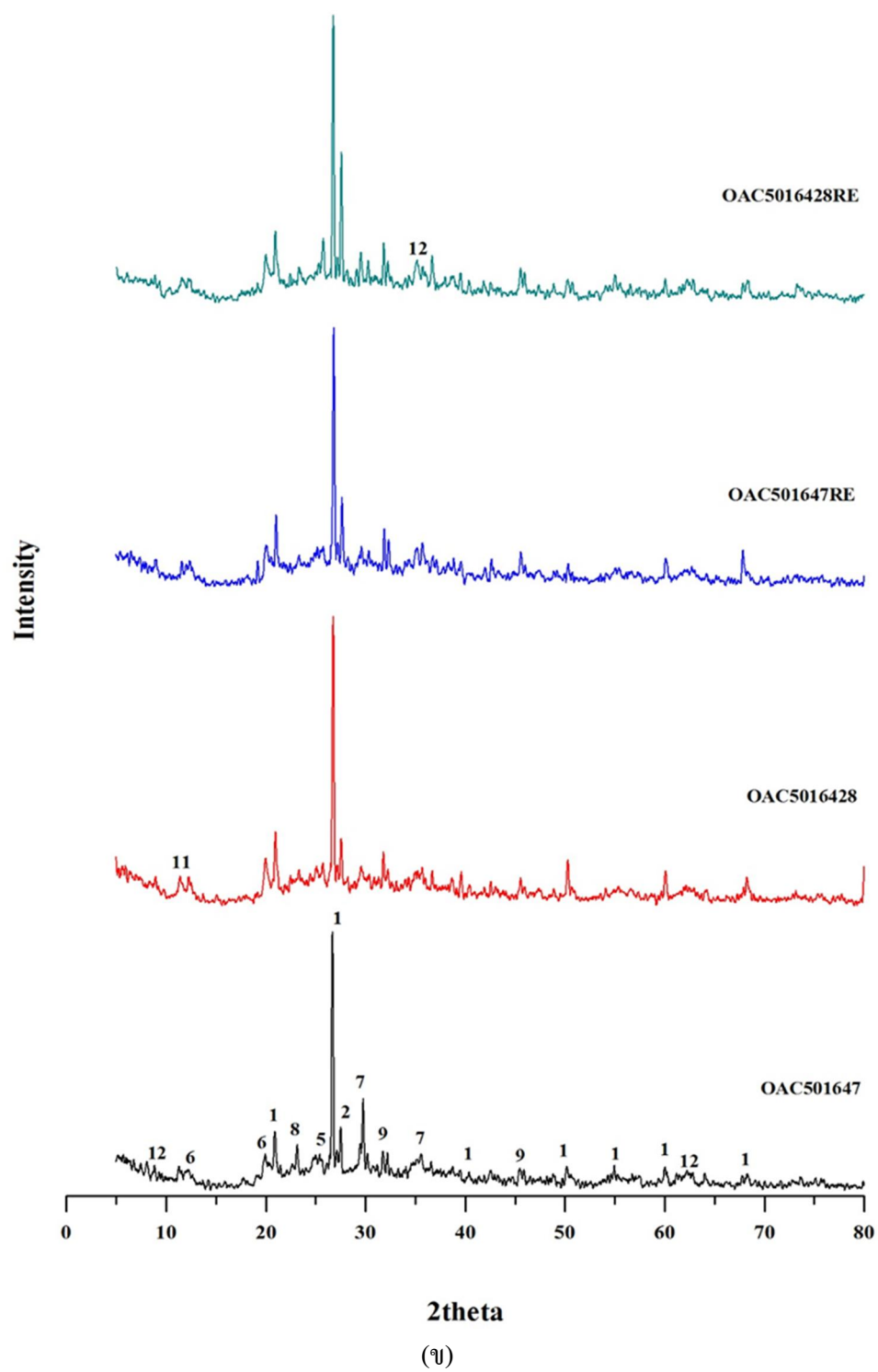
การตรวจสอบผลึกของโครงสร้างด้วยวิธี XRD ผลการวิเคราะห์จะถูกบันทึกเป็นพิก ในช่วงมุมต่าง ๆ พิกกว้างแสดงถึงความเป็นอสัณฐาน ส่วนพิกแหลมแสดงถึงความเป็นผลึกของวัสดุ (อูบลักซ์มันน์ รัตนศักดิ์, 2560) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกก่อนและหลังการเข้าปฏิกิริยาของสารละลาย NaOH ดังภาพที่ 7-3 (ก-ค) อัตราส่วนที่ถูกผสมด้วยน้ำเปล่า ผสมด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 และ 8 โมลาร์ ตามลำดับ แสดงผลของรูปแบบการจัดเรียงตัวที่คล้ายคลึงกันทั้งอัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำเปล่าและอัตราส่วนที่ผสม

ด้วย NaOH โดยพบว่ามึลักษณะเป็นฟิสิกแหลม และเมื่อเทียบฟิสิกการจัดเรียงตัวจาก ภาพที่ 3-4 จะพบว่ามีการจัดเรียงตัวคล้ายกันกับดินตะกอนทะเล ดังนั้นฟิสิกแหลมเหล่านี้จึงมีองค์ประกอบ ส่วนใหญ่เป็น Quartz จากการผสมด้วยดินตะกอนทะเลถึง 60% ลักษณะดังกล่าวจึงทำให้ตัวอย่าง ทั้งหมดมีความเป็น Crystallinity สูง อย่างไรก็ตามแม้ว่าการจัดเรียงตัวของแต่ละอัตราส่วนจะบ่งชี้ว่า มีความเป็น Crystallinity สูง แต่พบว่าม็องค์ประกอบของแร่อื่น ๆ อีกจำนวนมากที่เป็นผลจาก ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน และปฏิกิริยาไฮเดรชัน แร่ต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกแสดงในรูปแบบ ของตัวเลขภายในภาพแสดงผล XRD ของแต่ละอัตราส่วน ได้แก่ 1) Quartz 2) Microcline 3) Calcite magnesium 4) Sodium magnesium silicate 5) Anhydrite 6) Halloysite 7) Diopside 8) Calcium sulfate 9) Calcium silicate 10) Mayenite 11) Sodium Hydrogen Silicate Hydroxide 12) Illite และ 13) Almandine โดยฟิสิกของ Quartz อยู่ที่บริเวณ  $21^{\circ}$   $26.7^{\circ}$   $36.6^{\circ}$   $39.5^{\circ}$   $50.1^{\circ}$  และ  $60^{\circ}$  นอกจาก Quartz ยังมีฟิสิกที่มีความเป็นผลึกที่ค่อนข้างชัดเจนคือฟิสิกของ Microcline อยู่ที่บริเวณ  $27.5^{\circ}$   $41.8^{\circ}$  และ  $50.6^{\circ}$  ฟิสิกสองประเภทนี้ค่อนข้างโดดเด่นซึ่งเกิดขึ้นทุกอัตราส่วน และโดยรวมจะ สังเกตได้ว่าทุกอัตราส่วนมีการจัดเรียงตัวที่เป็นฟิสิกกว้างต่ำมาก จึงเป็นไปได้ว่าอัตราส่วนที่มีฟิสิกที่ เป็น Crystallinity น้อยกว่าจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า ซึ่งจากภาพที่ 7-3 นั้นยังแสดงไม่ชัดเจนนัก แต่ อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่แร่ธาตุทั้งหมดที่พบจากการทดสอบนี้ประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{CaO}$  และ  $\text{Na}_2\text{O}$  เป็นสารประกอบจาก C-S-H และ N-A-S-H ซึ่งให้กำลังอัดแก่ตัวอย่าง

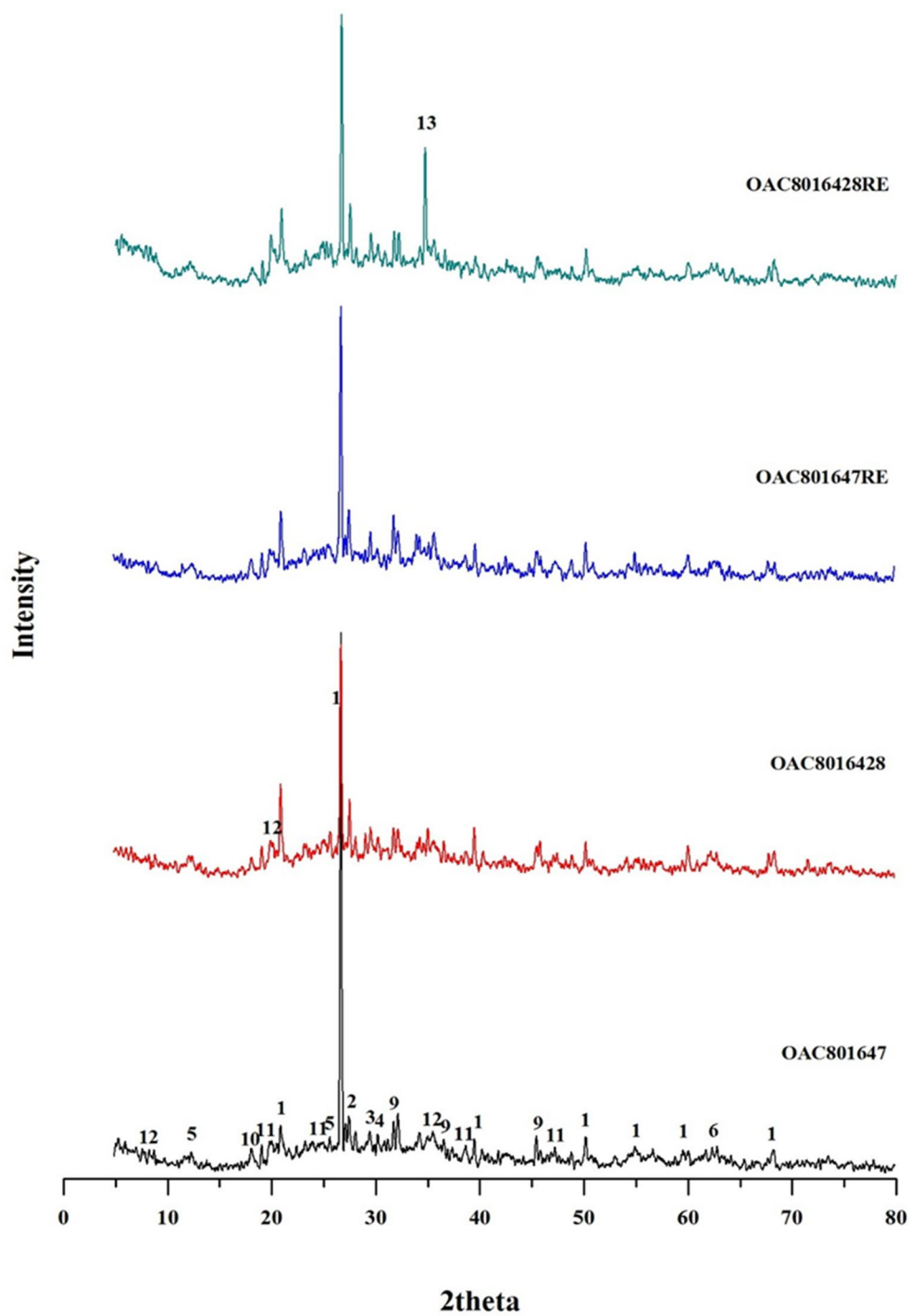


(ก)

ภาพที่ 7-3 โครงสร้างความเป็นผลึกจากการทดสอบ XRD



ภาพที่ 7-3 (ต่อ)



(ก)

ภาพที่ 7-3 (ต่อ)

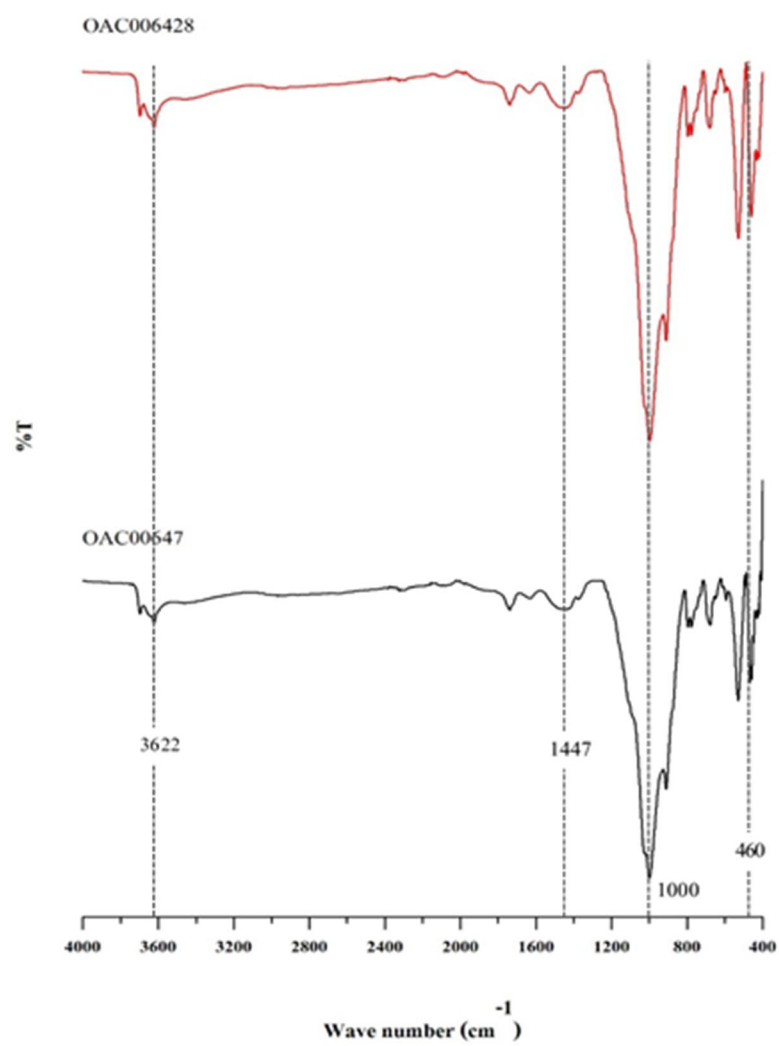
### สรุปผลการทดสอบความเป็นผลึกของโครงสร้าง

อัตราส่วนที่ผสมด้วยน้ำเปล่าและอัตราส่วนที่ผสมด้วย NaOH มีรูปแบบการจัดเรียงตัวที่คล้ายคลึงกัน และแสดงความเป็นผลึกค่อนข้างสูงจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่เป็น Quartz และ Microcline พีคสองประเภทนี้ค่อนข้างโดดเด่นและเกิดขึ้นทุกอัตราส่วน ดังนั้นค่ากำลังอัดของแต่ละอัตราส่วนนั้นจึงเกิดจากความเป็น Crystallinity มากกว่าอัตราส่วน

### ผลการทดสอบขอบเขตของโครงสร้างโมเลกุล

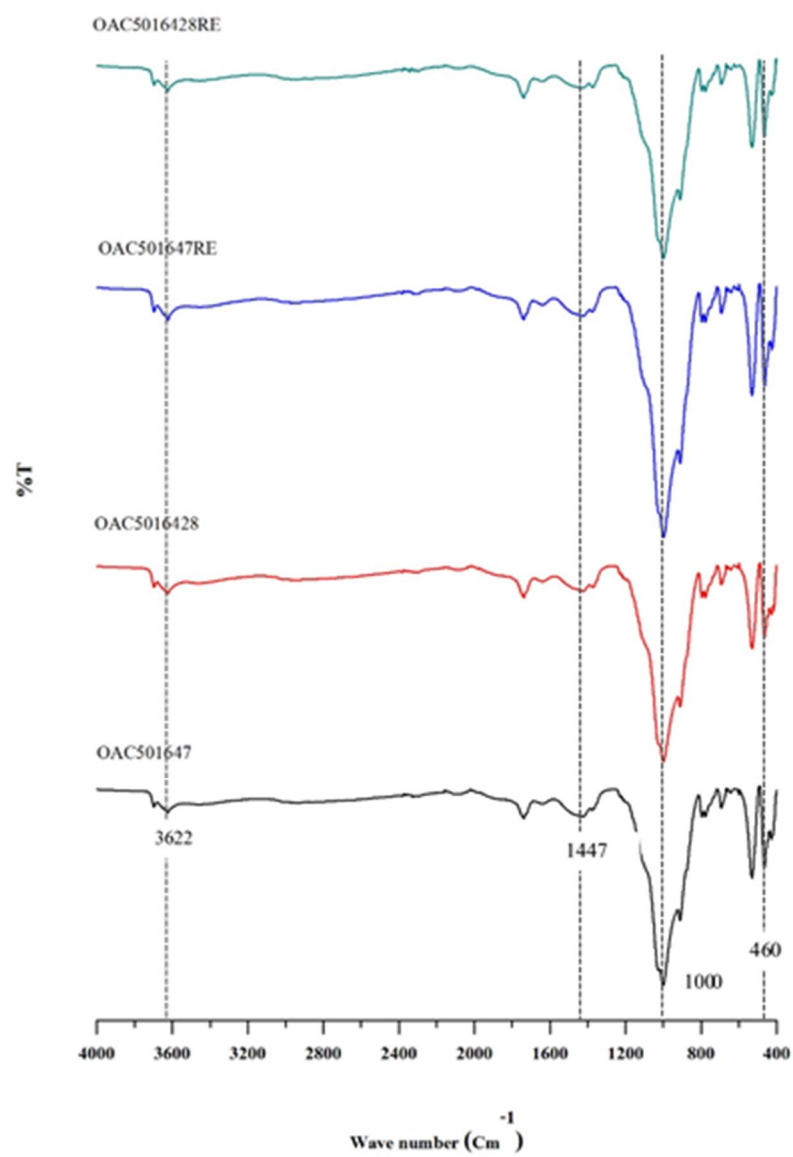
การทดสอบขอบเขต โครงสร้างโมเลกุลของ Degree of geopolymerization ด้วยวิธี FTIR ดังภาพที่ 7-4 (ก-ค) แสดงช่วงความสำคัญมีลักษณะของพันธะ Si-O-Si Stretching อยู่ในช่วงสเปกตรัม  $1,000 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพันธะที่แสดง Degree of geopolymerization และพันธะอื่น ๆ ในแต่ละช่วงสเปกตรัมไม่แตกต่างจากตัวอย่างในภาพที่ 3-5 มากนัก ยกเว้นช่วงสเปกตรัม  $1,447 \text{ cm}^{-1}$  เกิดขึ้นหลังจากตัวอย่างถูกผสมกับน้ำและสาร Alkali activator โดยช่วงสเปกตรัมดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Haq et al., (2014) จาก  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ซึ่งมีองค์ประกอบของตัวอย่างที่ใกล้เคียงกันจึงเป็นไปได้ว่าสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจะเป็นผลจากหมู่พันธะของโซเดียม





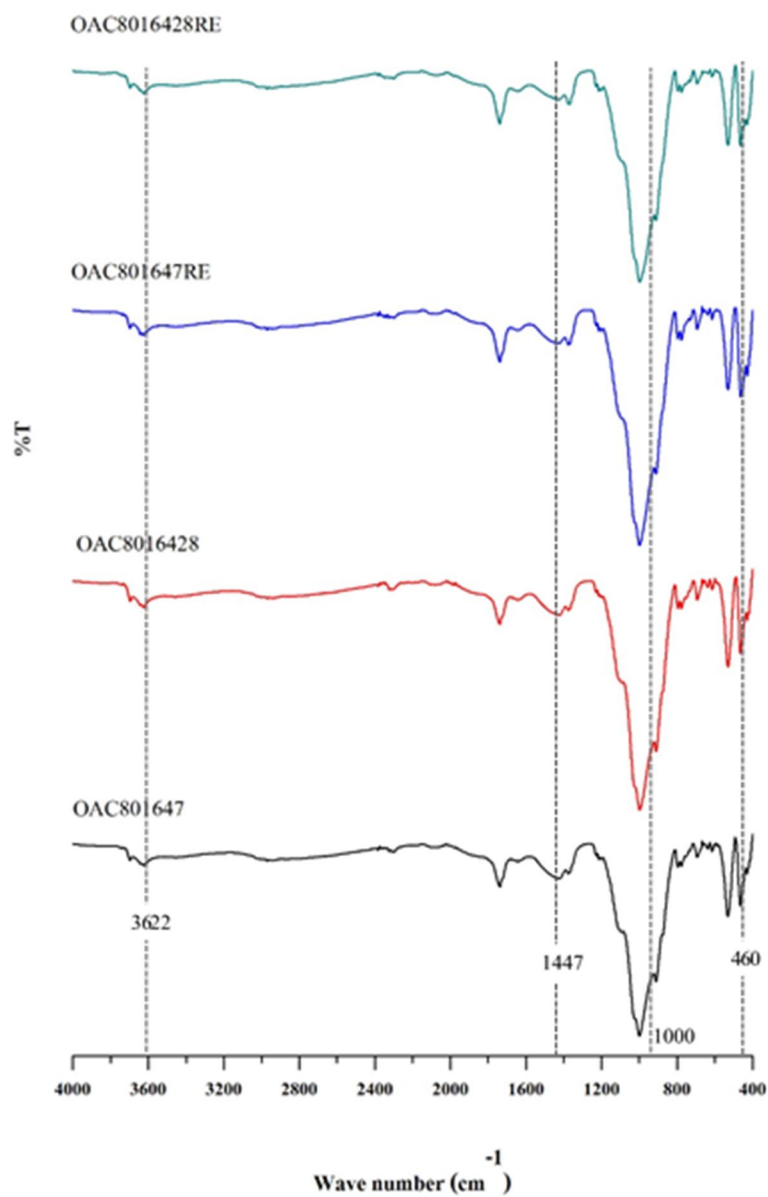
(ก)

ภาพที่ 7-4 โครงสร้างโมเลกุลจากการทดสอบ FT-IR



(ง)

ภาพที่ 7-4 (ต่อ)



(ค)

ภาพที่ 7-4 (ต่อ)

### สรุปผลการทดสอบความเป็นผลึกของโครงสร้าง

อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างโมเลกุลนั้นไม่มีความแตกต่างจากผลการทดสอบของดินตะกอนทะเลมากนัก เช่นเดียวกับผลการทดสอบความเป็นผลึกของโครงสร้าง ซึ่งผลการทดสอบคล้ายคลึงกับผลการทดสอบของดินตะกอนทะเล เนื่องจากการผสม

ดินตะกอนทะเลในอัตราส่วนที่มากกว่าแล้วลอย และการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่มากนักจากโครงสร้างที่เป็นผลึกสูง จึงทำให้โครงสร้างโมเลกุลไม่แสดงผลของโครงสร้างโมเลกุลที่เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์มากเท่าใดนัก ซึ่งโดยปกติมักจะสังเกตได้จากช่วงสเปกตรัม  $1,300$  ถึง  $900\text{ cm}^{-1}$  ที่เป็นบริเวณ Fingerprint region แต่บริเวณดังกล่าวนี้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันหรือแทบจะไม่แตกต่างกันเลย ดังนั้นการทดสอบ FT-IR สำหรับงานวิจัยนี้จึงมีโครงสร้างโมเลกุลของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ชัดเจนนัก

### สรุปการวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน

การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคพบความสำคัญของ C-S-H และ N-A-S-H ซึ่งประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  และ CaO สำหรับการสร้าง C-S-H และ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Na}_2\text{O}$  สำหรับการสร้าง N-A-S-H องค์ประกอบเหล่านี้จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มีผลให้ตัวอย่างเกิดการตกผลึกจากการชะแคลเซียม มีลักษณะของร่องรอยการ Crack ที่เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก และทำให้ตัวอย่างไม่สามารถรับกำลังอัดจากการ Soaked ได้ นอกจากผลึกที่เกิดจากแคลเซียมแล้วยังมีผลึกของซิลิกาในรูปแบบของแร่ Quartz และ Microcline ซึ่งอยู่ในทุกอัตราส่วน โครงสร้างโดยรวมส่วนใหญ่จึงเป็นผลึกมากกว่าอสัณฐาน อย่างไรก็ตามผลจาก C-S-H และ N-A-S-H ก็ยังสามารถทำให้ตัวอย่างรับกำลังอัดได้หลังจากสภาวะ Soaked โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีโครงสร้างของ N-A-S-H ที่มากกว่า และตัวอย่างมีกำลังอัดที่สูงขึ้นตามปริมาณ N-A-S-H ที่มากขึ้นการพัฒนาปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับระยะเวลาบ่ม โดยเฉพาะระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันสำหรับงานวิจัยนี้ยังไม่พบการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ที่ชัดเจนนัก เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบทั้ง SEM XRF XRD และ FT-IR โดยรวมแล้ว พบว่า ทั้ง 10 ตัวอย่างมีทั้งตัวอย่างที่ถูกผสมด้วยน้ำ และสารละลาย Alkali activator ผลการทดสอบที่ได้นั้นก็คล้ายคลึงกับผลการทดสอบของดินตะกอนทะเลในบดที่ 3 ซึ่งมีผลการทดสอบที่ไม่แตกต่างกันชัดเจนนัก อาจเนื่องจากโครงสร้างของดินตะกอนทะเลมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง จึงอาจต้องใช้จำนวนสารละลาย Alkali activator ให้มากขึ้น เพื่อให้โครงสร้างมีความเป็นผลึกต่ำลงจากการเข้าทำลายโครงสร้างผลึกของ NaOH และอะลูมินา เพื่อเสริมโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันให้มีมากขึ้น

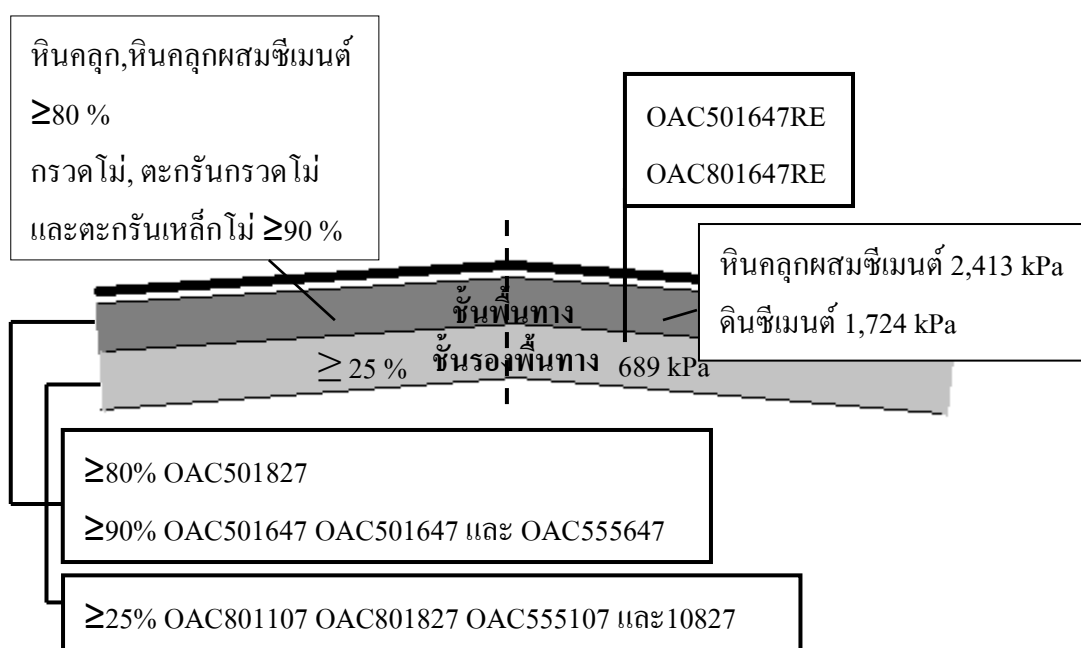
## บทที่ 8

### สรุปผลการทดลอง

การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลด้วยจีโอโพลิเมอร์แก้ล้อยแคลเซียมสูงตามวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ด้วยการนำไปใช้เป็นวัสดุงานทางมาตรฐานวัสดุในการทำถนนที่ครอบคลุมประเภทวัสดุแต่ละชั้นทางมากที่สุด คือ มาตรฐานจากกรมทางหลวง มาตรฐานของวัสดุที่พบคือมาตรฐานของ CBR และ UCS ประกอบไปด้วยชั้นพื้นทาง และรองพื้นทาง โดย CBR ในสถานะ Soaked มีเกณฑ์การทดสอบชั้นพื้นทางหินคลุก หินคลุกผสมซีเมนต์ กรวดโม้ ตะกรันกรวดโม้ และตะกรันเหล็กโม้ ชั้นรองพื้นทางวัสดุมวลรวม ผลการทดสอบของ CBR ในสถานะ Soaked ผ่านเกณฑ์การทดสอบทั้งชั้นรองพื้นและชั้นพื้นทาง ส่วน UCS ในสถานะ Soaked ระยะการบ่มที่ 7 วันมีเกณฑ์การทดสอบชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ พื้นทางดินซีเมนต์ ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ ผลการทดสอบของ UCS ในสถานะ Soaked ผ่านเกณฑ์การทดสอบชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ โดยอัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์การทดสอบจะถูกสรุปในภาพที่ 8-1

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการพัฒนาค่า CBR และการบวมตัวของสถานะ Soaked เกิดจากความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันที่มีต่อตัวอย่างด้วยการสร้างผลิตภัณฑ์ N-A-S-H ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของการพัฒนาค่า CBR และช่วยในการลดการบวมตัวของตัวอย่างจากการเชื่อมประสานกันที่เพียงพอ ทำให้ตัวอย่างยังคงสามารถรับกำลังแบกทานได้ดี แม้ผ่านสถานะ Soaked มาแล้วก็ตาม เช่นเดียวกับการทดสอบ UCS พบว่า ผลกระทบต่อการพัฒนา ค่ากำลังอัดภายใต้สถานะ Soaked ที่สำคัญคืออัตราส่วน Soil : FA ซึ่งจากการผลทดสอบพบว่า การเพิ่มแก้ล้อยที่อัตราส่วน Soil : FA 60 : 40 ด้วยปริมาณสารละลาย Alkali activator ที่เพียงพอสามารถทำให้ตัวอย่างสร้างปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันได้สมบูรณ์จาก N-A-S-H ความสัมพันธ์นี้ช่วยให้ตัวอย่างทนต่อสถานะ Soaked และรับกำลังอัดได้ดีใกล้เคียงกับสถานะ Unsoaked การวิเคราะห์ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันทำให้เข้าใจถึงองค์ประกอบที่สำคัญต่อกำลังอัดไม่เพียงแต่ N-A-S-H ความสำคัญของ C-S-H ยังมีส่วนช่วยส่งเสริมกำลังอัดในช่วงแรกได้ดี ซึ่งประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{CaO}$  และสารประกอบ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Na}_2\text{O}$  สำหรับการสร้าง N-A-S-H องค์ประกอบเหล่านี้จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 8 โมลาร์ มีผลให้ตัวอย่างเกิดการตกผลึก

จากการชะแคลเซียม มีลักษณะของร่องรอยการ Crack ที่เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกและทำให้ตัวอย่างไม่สามารถรับกำลังอัดจากการ Soaked ได้ อย่างไรก็ตามโดยรวมแล้วส่วนใหญ่พบว่าโครงสร้างเป็นผลึกมากกว่าออสติฐานนอกจากผลึกที่เกิดจากแคลเซียมแล้วยังมีผลึกของซิลิกาในรูปแบบของแร่ Quartz และ Microcline ซึ่งอยู่ในทุกอัตราส่วน อย่างไรก็ตามผลจาก C-S-H และ N-A-S-H สามารถพัฒนาปฏิกิริยาจากระยะเวลาการบ่ม โดยเฉพาะระยะการบ่มที่ 28 วัน จะทำให้ N-A-S-H พัฒนามากกว่า C-S-H ซึ่งเกิดการพัฒนาปฏิกิริยาที่ระยะการบ่ม 7 วัน



ภาพที่ 8-1 อัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวง

## บรรณานุกรม

- เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์, ทิวากร ศรีจำปา และสุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2558). อิทธิพลที่ควบคุมกำลังอัดของดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20*. ชลบุรี
- เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์, สุขสันต์ หอพิบูลสุข, เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง, ภัฐพงศ์ มาเจริญ และชยกฤต เพชรช่วย. (2559). แผนภูมิการออกแบบส่วนผสมสำหรับดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลส. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21* (หน้า 1517-1521). สงขลา
- ซัชชัย อภินันท์ติยา, พานิช วุฒิพิทย และชัชรัตน์ ชีระวัฒน์สุข. (2559). การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเศษเซรามิกและจีโอโพลิเมอร์. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21* (หน้า 1488-1494). สงขลา
- ฐิติเทพ เต่าทอง, สมิตร ส่งพิริยะกิจ, ชัชรัตน์ ชีระวัฒน์สุข และเจนจิต เอี่ยมจตุรภัทร. (2559). ผลกระทบของวัฏจักรเปียกสลับแห้งของชั้นดินลูกรังผสมจีโอโพลิเมอร์. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21* (หน้า 1586-1590). สงขลา
- สงกรานต์ คำขอด และพานิช วุฒิพิทย. (2559). คุณสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์เถ้าขานอ้อย. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21* (หน้า 1400-1404). สงขลา
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2560), *วัสดุจีโอโพลิเมอร์*. กรุงเทพฯ:สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., & Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Journal of Waste Management*, 29(2), 539-543.
- Davidovits, J., (1991). 30 Geopolymer : inorganic polymeric new materials. *Journal of thermal analysis*, Vol. 37, 1633-1656.
- Davidovits, J., (2002). 30 Years of successes and failures in geopolymer applications. In *Geopolymer 2002 Conference*. Melbourne: Australia.

- Doubois, V., Abriak, N., Zentar, R. & Ballivy, G. (2009). The use of marine sediments as a pavement base material. *Journal of Waste Management*, 29, 774-782.
- Haq, E., Padmanabhan, S., & Licciulli, A. (2014). Synthesis and characteristics of fly ash and bottom ash based geopolymers-A comparative study. *Journal of Ceramics International*, 40(2), 2965-2971.
- 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.
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., & Disfani M. (2014). Calcium carbide residue: Alkaline activator for clay-fly ash geopolymer. *Journal of Construction and Building Materials*, 69, 285-294.
- Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., Sukmak, P., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., & Shen S. (2015). Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. *Journal of Road Materials and Pavement Design*.
- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P. (2009), Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Journal of Minerals Engineering*, 22, 1073-1078.
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., & Shen, S. (2013). Strength development in clay-fly ash geopolymer. *Journal of Construction and Building Materials*, 40, 566-574.
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, S., Chindaprasirt, P., & Suksiripattanapong, C. (2013). Factor influencing strength development in clay-fly ash geopolymer. *Journal of Construction and Building Materials*, 47, 1125-1136.
- Yip, C.K., Lukey, G.C., & Van Deventer, J.S.J. (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Journal of Cement and Concrete Research*, 35, 1688-1697.



Zang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G. & Tao, M. (2013). Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Journal of Construction and Building Materials*, 47, 1468-1478.