การพัฒนากำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวล

รุ้งลาวัลย์ ราชัน[1] และ ทรงสุดา วิจารณ์[2]
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

บทคัดย่อ

งานศึกษาวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวล ลักษณะโครงสร้างจุลภาคได้ถูกอธิบายโดยอาศัยภาพถ่ายกำลังสูงด้วย SEM (Scanning Electron microscopy) พร้อมวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) และทดสอบสมบัติของวัสดุด้วยเครื่อง XRD (X – ray Diffraction) การศึกษาพบว่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าชีวมวล เท่ากับ 60 ต่อ 40 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด การพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดผสมวัสดุประสานทั้งสองจะแปรผันกับปริมาณผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานกลุ่ม ettringite และ C-A-S-H เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

คำสำคัญ : ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ / กากแคลเซียมคาร์ไบด์ / เถ้าชีวมวล / กำลังอัดแกนเดียว

* *Corresponding author : runglawa@gmail.com*

1 *ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

2 *อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

Unconfined Compressive Strength Development and Microstructure of Calcium Carbide Residue and Biomass Ash Admixed in Compacted Soft Bangkok Clay

Runglawan Rachan[1] and Songsuda Vichan[2]

Mahanakorn University, Nong Chok, Bangkok 10530, Thailand

Abstract

This paper presents the unconfined compressive strength development and microstructure of calcium carbide residue and biomass ash admixed in compacted soft Bangkok clay. The study on microstructure was carried out using Scanning Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and X – ray Diffraction (XRD). The initial soil water content at 1.2 times of the optimum water content and CCR:BA ratio of 60:40 were found to give a maximum strength for the stabilization. The strength development in both blended cementitious materials admixed in compacted soft Bangkok clay was dependent on cementitious products, which were ettringite and C-A-S-H compound, due to the pozzolanic reaction.

Keywords : Biomass Ash / Calcium Carbide Residue / Soft Bangkok Clay / Unconfined Compressive Strength

* *Corresponding author : runglawa@gmail.com*

[1] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

[2] *Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน หรือระบบสาธารณูปโภคบนพื้นที่ซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อน หากขาดการปรับปรุงสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินอย่างเหมาะสม จะก่อให้เกิดปัญหาต่อโครงสร้างดังกล่าวทั้งในขณะก่อสร้าง และใช้งานแล้ว เช่น ปัญหาการอัดตัวคายน้ำ (ยุบตัว) ปัญหาการเสียรูปด้านข้าง การวิบัติของโครงสร้างเมื่อเกิดเหตุแผ่นดินไหวเป็นต้น ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนจึงเป็นสิ่งสำคัญ ในปัจจุบันการปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของดินอ่อนมีอยู่มากมาย การปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรม เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของดินก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่นิยมใช้ซึ่งสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น 1) การใช้วัสดุพิเศษเพื่อแทนที่ดิน 2) ปรับปรุงเสถียรภาพของดินโดยใช้พลังงานหรือเครื่องจักร 3) ปรับปรุงเสถียรภาพของดินโดยการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิ 4) ปรับปรุงเสถียรภาพของดินโดยใช้ประจุไฟฟ้า และ 5) ปรับปรุงเสถียรภาพของดินโดยการเติมสารหรือวัสดุเพื่อเชื่อมประสานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การเติมปูนขาว หรือปูนซีเมนต์ลงในดิน เป็นต้น

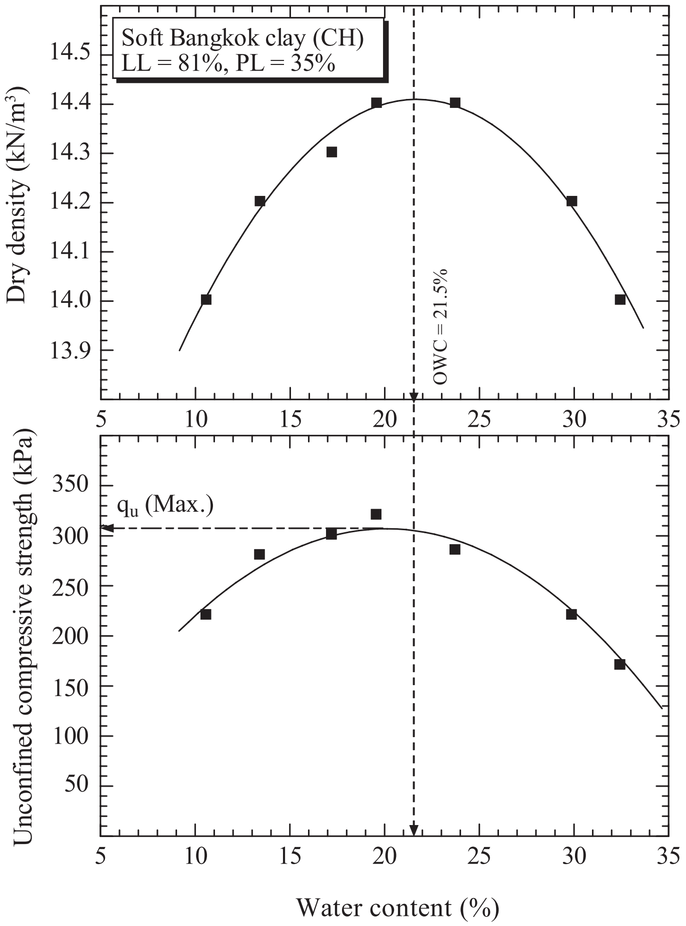
การนำเอาวัสดุที่เกิดจากผลผลิตทางการเกษตรมากมาย ซึ่งมีทั้งที่ใช้เป็นประโยชน์ทางการค้าได้และใช้ไม่ได้ เช่น แกลบ เปลือกไม้ กากของผลปาล์ม เป็นต้น ก็เป็นอีกส่วนหนึ่งของวัสดุเหลือทิ้งซึ่งในแต่ละวันมีวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้จำนวนมากแต่กลับนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น การกองเก็บ และการกำจัดทิ้ง เป็นต้น ต่อมาของเหลือเหล่านี้จากเดิมที่ต้องนำไปทิ้งหรือนำไปกำจัด แต่ปัจจุบันได้มีการนำเศษวัสดุเหลือทิ้ง จากการเกษตรไปใช้ให้เกิดประโยชน์โดยมีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการสร้างพลังงานความร้อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น แกลบ เปลือกไม้ของต้นยูคาลิปตัส กากปาล์มน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งเชื้อเพลิงจากของเหลือ ทางการเกษตรเหล่านี้ เรียกว่าเชื้อเพลิงชีวมวล ผลกระทบที่เป็นปัญหาสำคัญของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในปัจจุบันคือ เถ้าลอยชีวมวลหรือในที่นี้เรียก เถ้าชีวมวล ที่เกิดขึ้นหลังจากการเผา ซึ่งส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง และเนื่องจากมีลักษณะเป็นฝุ่นผง สามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย จึงก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อมกับบริเวณโดยรอบ และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนทิ้งหรือกำจัดดังนั้นหากสามารถนำเถ้าชีวมวลเหล่านั้นซึ่งมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานตามธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ก็จะเป็นการลดสภาวะให้สิ่งแวดล้อม เถ้าชีวมวลนี้มีองค์ประกอบเป็นออกไซด์ของซิลิก้า อลูมิน่า และเฟอร์ริค มากกว่าร้อยละ 70 และมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเถ้าชีวมวลในการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนในการปรับปรุงสมบัติดินเหนียวอ่อน [1-2] ซึ่งเถ้าชีวมวลเหล่านี้มีสมบัติเบื้องต้นที่จะสามารถพัฒนาเพื่อใช้ในงานวิศวกรรมต่อไปได้

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นผลพลอยได้จากขบวนการผลิตก๊าซอะเซทีลีนซึ่งใช้วัตถุดิบหลักคือแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีฤทธิ์เป็นด่างสูง (pH 12) เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ดังนั้นหากมีการจัดการกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ไม่เหมาะสมจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพดินและน้ำใต้ดิน สำหรับประเทศไทยนั้นในระหว่างปี พ.ศ.2538 ถึง 2541 ได้มีการประมาณปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นในปริมาณ 86,000 ตัน หรืออัตราการผลิตเท่ากับ 21,500 ตันต่อปี [3] กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เกิดจากขบวนการผลิตจะอยู่ในรูปของ slurry ซึ่งจะถูกระบายสู่บ่อผึ่งเพื่อลดปริมาตรของเสียกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ผ่านขบวนการระเหยจะมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวปนเทา

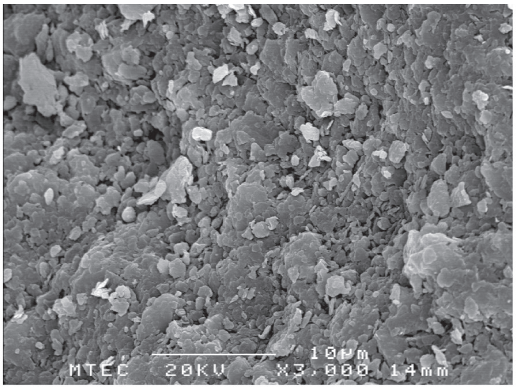
งานวิจัยนี้จะทำศึกษาถึงการปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดโดยใช้วัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งเป็นขบวนการทางเคมี วัสดุเชื่อมประสานสองชนิดที่ทำการศึกษาคือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าชีวมวล (BA) นอกจากนี้จะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค SEM, EDS และ XRD เพื่อทราบถึงปฏิกิริยาเคมีที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุเชื่อมประสานกับอนุภาคดิน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคดิน ซึ่งความรู้ดังกล่าวสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมด้านกำลังของดินเมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพได้

2. วัสดุทดสอบ

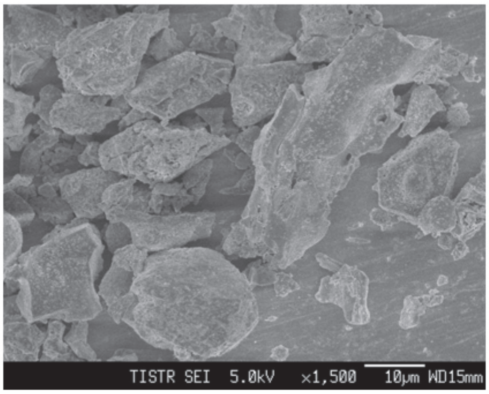
ดินเหนียวที่ใช้ในการศึกษานี้เก็บจากพื้นที่เขตบางกะปิ ที่ระดับความลึกประมาณ 4 เมตร เป็นตัวแทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 81 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72 ดินตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยจัดเป็นดินประเภท CH ตามระบบการจำแนกแบบเอกภาพ (Unified Classification System, USCS) เมื่อทำการทดสอบการบดอัดเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับค่าความหนาแน่นของดิน และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ดังรูปที่ 1 พบว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Water Content, OWC) เท่ากับ 21.5 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนาแน่นแห้งของดินสูงสุด (Maximum Dry Density (MDD), $\gamma_{d\ max}$) เท่ากับ 14.4 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และพบว่าดินธรรมชาติบดอัดมีกำลังอัดแกนเดียวสูงสุดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เถ้าชีวมวล (Biomass ash, BA) ที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยเพาเวอร์โอเปอร์เลต จำกัด (TPO) ที่ หมู่ 3 ตำบลเขาหินซ้อน อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีลักษณะเป็นผงสีดำ เกิดจากขบวนการเผาไหม้ของชีวมวลหลายชนิดรวมกันคือ แกลบ 36 เปอร์เซ็นต์ เปลือกไม้ 24 เปอร์เซ็นต์ ไม้บอร์ด 6 เปอร์เซ็นต์ กากไม้ยูคาลิปตัสสับละเอียด 23 เปอร์เซ็นต์ และแกลบอัดเม็ด 6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 พบว่ามีส่วนที่ค้างบนตะแกรงน้อยกว่าร้อยละ 10 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.95 ปริมาณความชื้นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ค่า pH เท่ากับ 11.33 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue, CCR) มีลักษณะเป็นผงสีขาวอมเทา เมื่อนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (45 μm) พบว่ามีส่วนที่ค้างบนตะแกรงน้อยกว่าร้อยละ 10 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25 เมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 105 $\pm$ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ค่า pH เท่ากับ 12.58 โดยองค์ประกอบทางเคมีและภาพกำลังขยายของวัสดุทดสอบ (กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าชีวมวลและดินตัวอย่าง) แสดงดังในรูปที่ 2 และตารางที่ 1 ตามลำดับ จากรูปถ่าย SEM พบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมีรูปร่างลักษณะไม่แน่นอน เกาะกลุ่มและซ้อนเป็นแผ่น (รูปที่ 2ก) เถ้าชีวมวลมีรูปร่างลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมและมีหลายขนาดปะปนกัน ลักษณะคล้ายวัสดุมวลรวมหยาบ (รูปที่ 2ข) และรูปร่างลักษณะภายนอกของกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นผลึกรูปหกเหลี่ยมเกาะกลุ่มและมีลักษณะซ้อนเป็นชั้น (รูปที่ 2ค) วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ผลึกด้วย XRD ดังรูปที่ 3 พบว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ มีองค์ประกอบหลัก SiO_2 ในรูปของ quartz และมีแร่ดินเหนียวชนิด kaolinite, montmorillonite, illite และมีออกไซด์ของ S ในรูปของสารประกอบ gypsum ($CaSO_4$) (รูปที่ 3ก) เถ้าชีวมวลมีโครงสร้างที่เป็นผลึกคือ quartz และ cristobolite และมีส่วนที่เป็น amorphous ในช่วง 2 theta ตั้งแต่ 3 – 20° และ ช่วง 22 – 26° (รูปที่ 3ข) จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Anderson et al. 2000 [4] และงานวิจัยของ Davraz and Gunduz, 2005 [5] ซึ่งศึกษาสมบัติของเถ้าลอยด้วยเทคนิค XRD พบว่าช่วง 2 theta 22 – 26° ที่มีลักษณะเป็น diffuse reflection ซึ่งแสดงถึงส่วนประกอบที่เป็น amorphous Si ของเถ้าลอย ถึงแม้ว่าผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีจากตารางที่ 1 ในเถ้าชีวมวลมีปริมาณ CaO อยู่ร้อยละ 5.91 แต่จาก XRD pattern ไม่พบว่ามีสารประกอบ portlandite ($Ca(OH)_2$) อยู่ในเถ้าชีวมวล และสำหรับผลวิเคราะห์ XRD pattern ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (รูปที่ 3ค) แสดงถึงส่วนประกอบที่มีโครงสร้างเป็นผลึกคือ portlandite คาร์บอน และ calcite ($CaCO_3$) การพบ $CaCO_3$ เป็นผลมาจากการเกิดขบวนการ carbonation ระหว่างการจัดเก็บของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่บ่อทิ้งกากตะกอนของโรงงาน โดย $Ca(OH)_2$ ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำปฏิกิริยากับ CO_2 ในบรรยากาศ



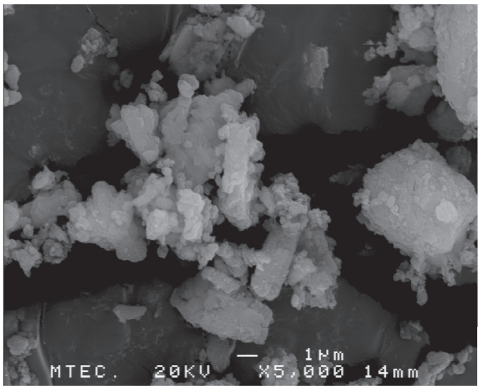
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นในดินเริ่มต้น กับค่าความหนาแน่นแห้งและกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ



ก) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (3,000 เท่า)



ข) เถ้าชีวมวล (1,500 เท่า)

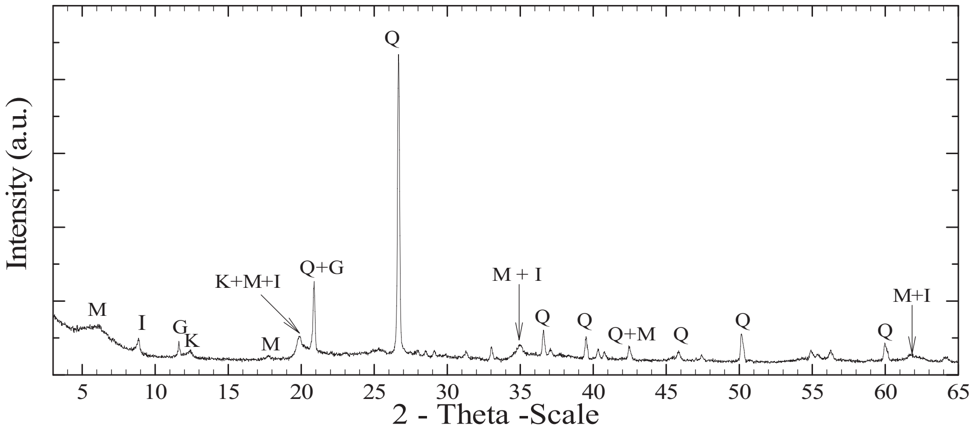


ค) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (5,000 เท่า)

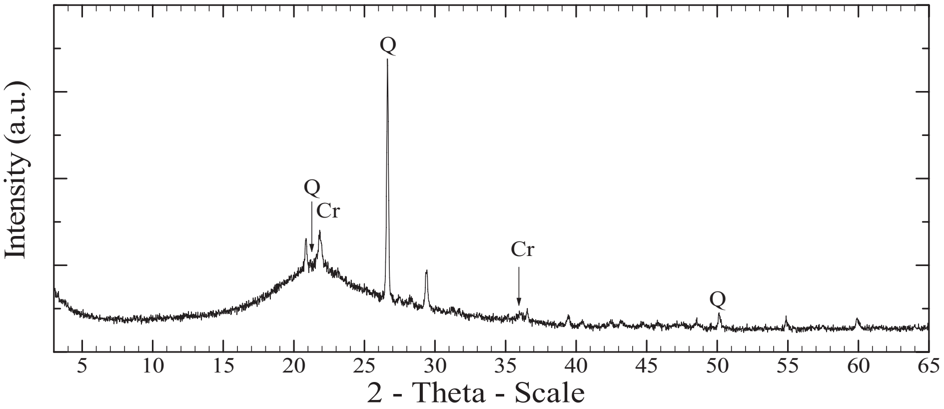
รูปที่ 2 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ เถ้าชีวมวลและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบด้วย XRF

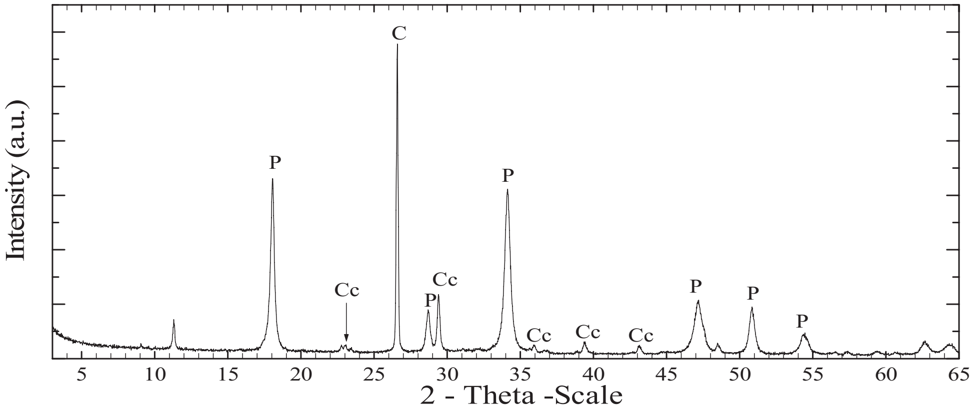
ร้อยละของธาตุองค์ประกอบ (%)	ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ	เถ้าชีวมวล (BA)	กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR)
Silicon dioxide, SiO_2	63.8	74.1	5.5
Aluminum oxide, Al_2O_3	21.3	0.6	2.5
Iron oxide, Fe_2O_3	8.4	0.9	0.7
Calcium oxide, CaO	0.9	5.9	80.1
Magnesium oxide, MgO	1.5	1.5	0.8
Sulfur trioxide, SO_3	1.2	0.5	0.9
Sodium oxide, Na_2O	0.3	3.3	0.05
Potassium oxide, K_2O	2.5	1.7	0.08
LOI	-	9.5	8.6



ก) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ



ข) เถ้าชีวมวล



ค) กากแคลเซียมคาร์ไบด์

รูปที่ 3 ผลการตรวจหาผลึกในวัสดุด้วย XRD (C= Carbon , Cc= Calcite, Cr = Cristobolite, G = Gypsum, I = Illite, K = Kaolinite, M = Montmorillonite, P = Portlandite, Q = Quartz,)

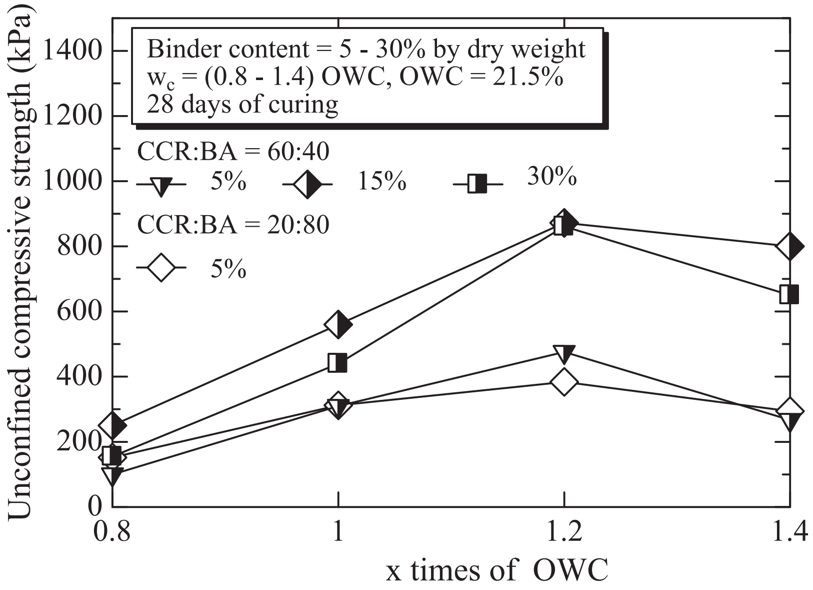
3. วิธีการทดสอบ

ดินตัวอย่างจะถูกนำมาผสมให้มีปริมาณความชื้นเริ่มต้น 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากการบดอัดแบบมาตรฐานของดินธรรมชาติและถูกผสมด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าชีวมวลในปริมาณอัตราส่วนผสมวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับร้อยละ 5 ถึง 30 ของน้ำหนักดินแห้งจนเป็น เนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการบดอัดดินแบบมาตรฐาน เมื่อครบอายุการบ่มนำไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันที ด้วยอัตราเร็วในการกด 1.0 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงดินตัวอย่างต่อนาทีจนกระทั่งดินวิบัติ เมื่อได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจากผลทดสอบดังกล่าวข้างต้นแล้ว ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าชีวมวลเพื่อหาอัตราส่วนผสมของวัสดุประสานที่ให้ค่ากำลังสูงสุด โดยกำหนดอัตราส่วนการผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าชีวมวลเท่ากับ 40:60, 50:50, 60:40, 70:30, 80:20 และ 100:0 โดยน้ำหนักดินแห้งที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นค่าหนึ่ง ในส่วนการศึกษาการพัฒนากำลังและโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลนั้น ดินตัวอย่างถูกผสมกันในอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลที่ปริมาณความชื้นและอัตราส่วนของวัสดุประสานที่เหมาะสมด้านกำลัง จากนั้นทำการบดอัดที่พลังงานการบดอัดมาตรฐาน วัสดุผสมดังกล่าวจะถูกจัดเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 20 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14, 28, 60 และ 90 วัน เมื่อครบอายุการบ่มนำไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันที ด้วยอัตราเร็วในการกด 1.0 เปอร์เซ็นต์ของความสูงดินตัวอย่างต่อนาทีจนกระทั่งดินวิบัติ โดยใช้ตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่างของแต่ละปริมาณส่วนผสมเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของผลทดสอบและตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคทันที ตัวอย่างบางส่วนจะถูกตัด หรือกระเทาะอย่างเบาที่สุด เพื่อให้แตกเป็นก้อนขนาดเล็กไม่เกิน 1 ซม. นำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงเก็บใส่ภาชนะที่แห้งและมีสารดูดความชื้น เพื่อส่งไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พร้อมกับทำ EDS ในทันที ตัวอย่างวัสดุที่เหลือจากการทำ SEM จะถูกบดให้มีลักษณะเป็นผง แล้วจัดเก็บในภาชนะที่แห้งและมีสารดูดความชื้นเพื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วย XRD ในทันทีในวันที่ครบเวลาบ่ม การทำ EDS มีวัตถุประสงค์เพื่อหาชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้าง หรือผลึกที่สนใจเป็นพิเศษในตัวอย่างเท่านั้น ผลจากการทำ SEM ร่วมกับ EDS จะช่วยในการอธิบายหรือสนับสนุนผลการวิเคราะห์ชนิดสารประกอบ

4. ผลทดสอบ

4.1 อิทธิพลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

ในการศึกษาผลของค่าปริมาณความชื้นในดินต่างๆ กันตั้งแต่ 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 เท่าของปริมาณน้ำที่เหมาะสม ((0.8 - 1.4)OWC) ต่อการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวบดอัดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลที่อัตราส่วน 60 ต่อ 40 กำหนดปริมาณวัสดุเชื่อมประสานร้อยละ 5 ถึง 30 โดยน้ำหนักดินแห้งที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นในดินส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวอย่างมาก และให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุด ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นในดินเท่ากับ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (1.2OWC = 25.8%) โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.8 ถึง 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและมีกำลังลดลงเมื่อดินมีปริมาณความชื้นเป็น 1.4 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (1.4OWC)



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดสูงสุดของดินเหนียวที่ค่าความชื้นต่างๆ ในดินผสม CCR กับ BA

4.2 อิทธิพลของอัตราส่วนผสมของวัสดุประสานต่อกำลังอัดแกนเดียวของดิน

การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดโดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวล ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เติมลงในดินร้อยละ 5, 15, 20 และ 30 ที่ระยะบ่ม 28 วัน พบว่ากำลังอัดแกนเดียวที่เกิดขึ้นอยู่กับสัดส่วนการแทนที่ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ด้วยเถ้าชีวมวล (BA) แสดงดังในรูปที่ 5 ดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุเชื่อมประสานกากแคลเซียมคาร์ไบด์อย่างเดียว (CCR:BA = 100:0) เมื่อปริมาณวัสดุเชื่อมประสานในดินเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 15 กำลังอัดแกนเดียวของดินมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่หากปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เติมลงในดินมากกว่าร้อยละ 20 กำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลง และพบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าชีวมวล เท่ากับ 60 ต่อ 40 เป็นอัตราส่วนที่ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุดในทุกปริมาณวัสดุเชื่อมประสานตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึง 30

4.3 การพัฒนากำลังและโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชื่อมประสาน

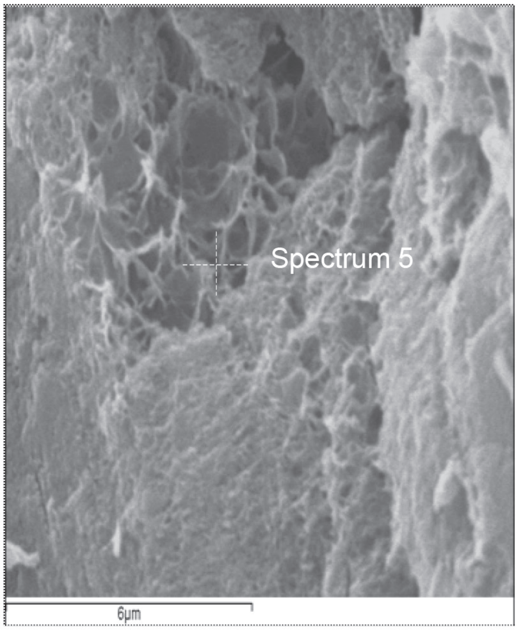
4.3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสม CCR และ BA

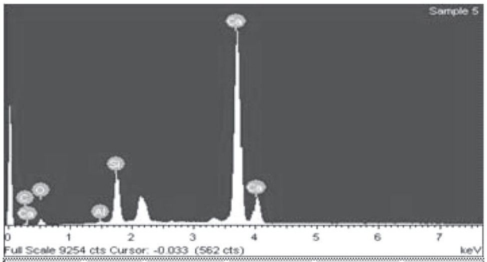
วัสดุเชื่อมประสานกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าชีวมวล (BA) ในอัตราส่วนผสมเท่ากับ 60:40 เมื่อสัมผัสกับน้ำ เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค แตกต่างจากวัสดุเชื่อมประสาน CCR หรือ BA อย่างมาก ลักษณะโครงสร้างภายนอกของผลิตภัณฑ์ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงดังรูปที่ 6 เมื่อทำ EDS พบว่าบริเวณโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นขอบโค้ง (flaky crystal) มีธาตุองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 97 คือ Ca, Si และ O

เมื่อบ่มวัสดุเชื่อมประสานดังกล่าวนานขึ้นเป็น 28 วัน บางตำแหน่งพบโครงสร้างมีลักษณะคล้ายเส้นใยดังรูปที่ 7 เมื่อนำตัวอย่างที่ระยะบ่ม 28 วัน ไปทำ EDS 3 ตำแหน่ง โดยทั้ง 3 ตำแหน่ง (ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3) พบสารประกอบที่มี Ca, Si และ O เป็นองค์ประกอบหลัก

การบ่มวัสดุเชื่อมประสาน CCR ผสมกับ BA ที่อายุบ่มนานขึ้นเป็น 90 วัน ภาพ SEM ของตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 8 พบโครงสร้างมีลักษณะแผ่นขอบพับคล้ายฟอยด์ (foil like crystal) เป็นบริเวณกว้าง และพบทั่วไปในตัวอย่าง แต่เมื่อทำ EDS ที่ตำแหน่งที่ 4 และ 5 พบว่าเป็นผลึกที่มีองค์ประกอบหลักคือ Ca, Si และ O เช่นเดียวกัน

จากผลการศึกษาวัสดุผสมระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน CCR และ BA ด้วยเทคนิค SEM ร่วมกับ EDS พบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน CCR กับ BA มีความแตกต่างของรูปร่างลักษณะภายนอกเมื่ออายุบ่มนานขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบหลักคือ Ca, Si และ O เหมือนกัน แต่มีค่าสัดส่วน Ca:Si แตกต่างกัน ทั้งในตัวอย่างที่ระยะบ่มต่างกันหรือที่ระยะบ่มเดียวกัน จากเอกสารอ้างอิง [6-7] ได้รายงานว่า ลักษณะรูปร่างของผลึกของสารประกอบ C-S-H และค่าสัดส่วน Ca:Si ที่พบในงานคอนกรีตขึ้นอยู่กับสภาพของการบ่ม เช่น อุณหภูมิ ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ สิ่งเจือปน และปริมาณความชื้น เป็นต้น สารประกอบกลุ่ม C-S-H มีความเป็นผลึกต่ำ และมีรูปร่างลักษณะ ภายนอกได้หลายลักษณะ ทั้งที่เป็น foil like C-S-H, fibrous like C-S-H และ flaky like C-S-H [8] เปรียบเทียบภาพ SEM จากงานวิจัยนี้ กับภาพ SEM จากเอกสารอ้างอิงดังกล่าว ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน CCR และ BA จึงเป็นสารประกอบกลุ่ม C-S-H

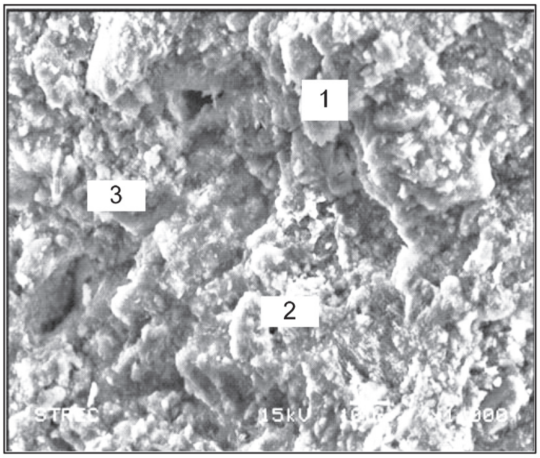




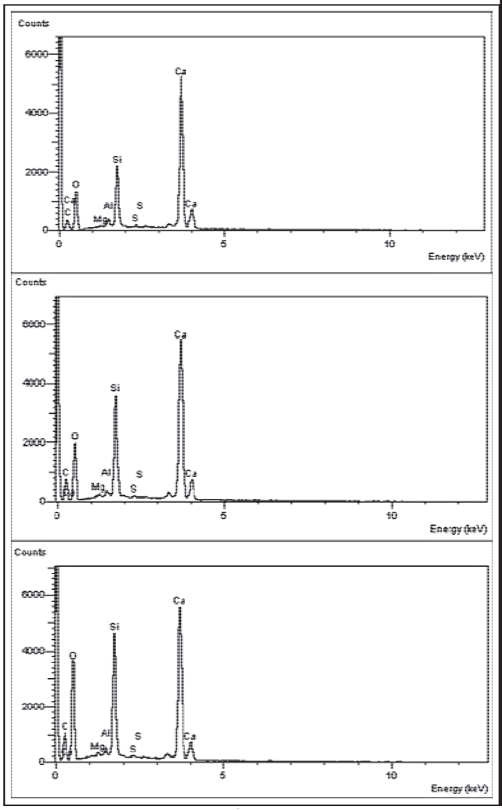
Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	1.00	0.5603	3.66	0.42	8.48
O K	2.23	0.2230	20.50	1.01	35.66
Al K	0.15	0.7725	0.39	0.08	0.40
Si K	4.47	0.8817	10.38	0.24	10.28
Ca K	33.36	1.0496	65.06	0.89	45.17
Totals			100.00		

Ca:Si = 4.4:1

รูปที่ 6 ภาพ SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า และผล EDS ของตัวอย่างวัสดุเชื่อมประสาน CCR และ BA (60:40) ที่ระยะบ่ม 7 วัน (ถ่ายด้วยเครื่อง JOEL 6301 F)



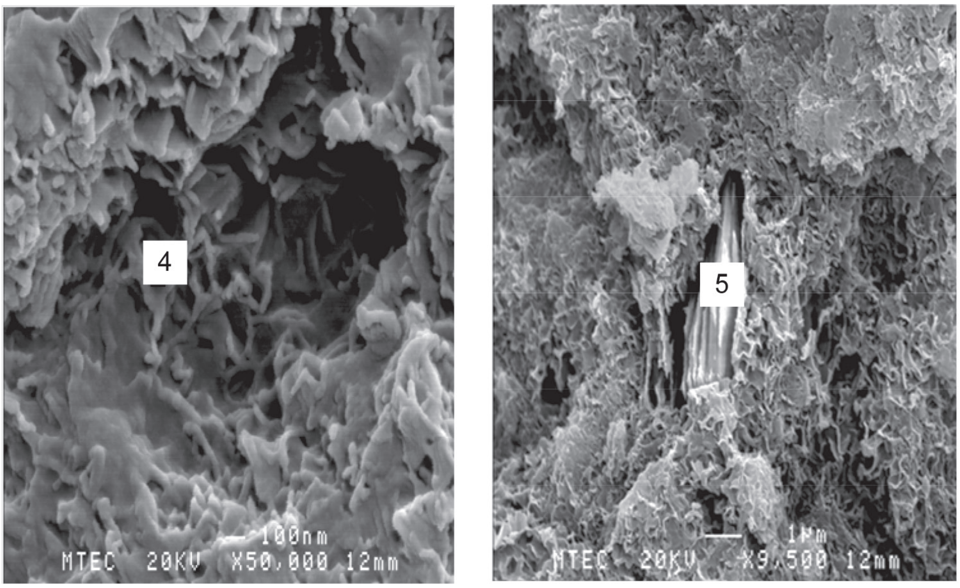
ก) ภาพ SEM กำลังขยาย 1,000 เท่า



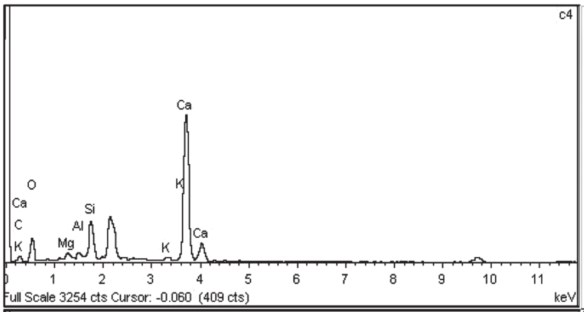
CCR+BA 28 day	
d1_2	
Element	%
C	8.93
S	0.27
O	50.3
Al	0.96
Si	7.97
Ca	31.57
Total	100
d1_3	
Element	%
C	14.82
S	0.27
O	50.44
Al	0.62
Si	9.53
Ca	24.32
Total	100
d1_4	
Element	%
C	14.95
S	0.2
O	56.75
Al	0.59
Si	9.25
Ca	18.26
Total	100

ข) ผล EDS ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 (ถ่ายด้วยเครื่อง JSM 5800 LV)

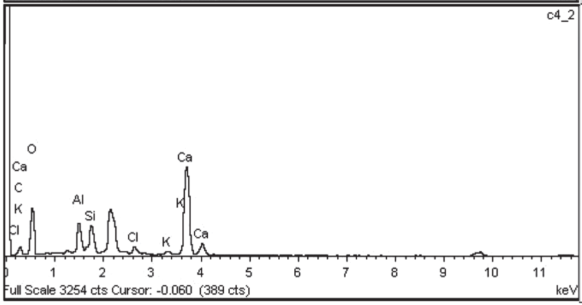
รูปที่ 7 ภาพ SEM กำลังขยาย 1,000 เท่า และผล EDS ของตัวอย่างวัสดุเชื่อมประสาน CCR และ BA (60:40) ที่ระยะบ่ม 28 วัน



ก) ภาพ SEM กำลังขยาย 50,000 เท่า และ 9,500 เท่า



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	1.91	0.6119	3.12	1.38	9.45
O K	8.67	0.3393	25.57	1.51	58.10
Mg K	0.57	0.6731	0.85	0.15	1.27
Al K	0.52	0.7803	0.66	0.13	0.89
Si K	3.83	0.8722	4.39	0.19	5.68
K K	0.56	1.1805	0.47	0.10	0.44
Ca K	27.31	1.0252	26.64	0.39	24.17
Totals			61.70		



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	3.51	0.5429	6.46	2.09	14.76
O K	18.50	0.4854	38.10	1.43	65.35
Al K	2.87	0.7947	3.61	0.18	3.67
Si K	2.70	0.8333	3.24	0.19	3.17
Cl K	0.88	0.8202	1.08	0.12	0.83
K K	0.67	1.1074	0.60	0.10	0.42
Ca K	17.20	0.9982	17.23	0.32	11.80
Totals			70.32		

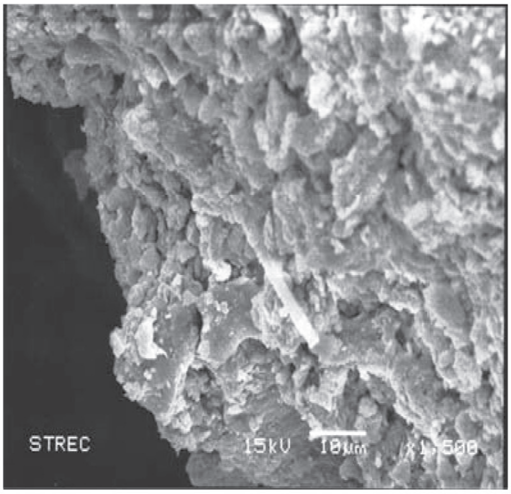
ข) ผล EDS ตำแหน่งที่ 4 และ 5

รูปที่ 8 ภาพ SEM และผล EDS ของตัวอย่างวัสดุเชื่อมประสาน CCR และ BA (60:40) ที่ระยะบ่ม 90 วัน

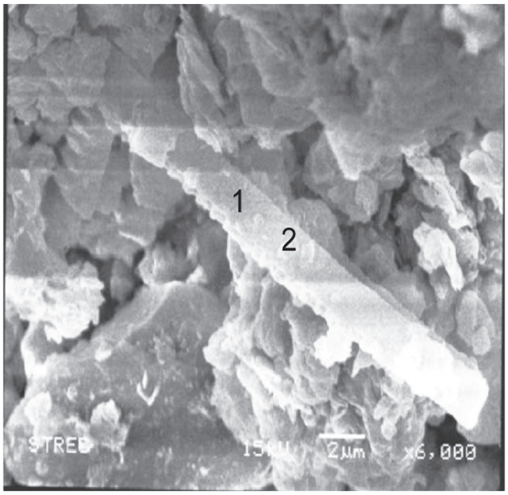
4.3.2 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดผสม CCR และ BA

ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ โดยวัสดุเชื่อมประสานถูกเติมในปริมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง ถูกศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย เทคนิค SEM พร้อมกับ EDS ที่ระยะเวลาบ่ม 28วัน พบผลึกที่มีรูปร่างเป็นแท่งเดี่ยว ขนาดยาวกว่า 10 μm (รูปที่ 9ก และ 9ข) เมื่อทำการยิง EDS (รูปที่ 9ค) พบว่าผลึกนี้มีองค์ประกอบหลักคือ Si, Ca, Al และ O แต่เมื่อนำตัวอย่างดินที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 150 วัน ดังในรูปที่ 10 พบผลึกที่มีลักษณะคล้ายเส้นใยเกาะกลุ่มมีขนาดใหญ่มากขึ้น แทรกอยู่ระหว่างเม็ดดินเรียงซ้อนเป็นแถวและพบผลึกของสารประกอบที่มีองค์ประกอบ ของ Si, Ca, Al และ O เช่นกัน นั้นแสดงให้เห็นว่า เกิดการละลายของสารประกอบออกไซด์ของ Si และ Al ในดินเหนียวและเถ้าชีวมวล โดยปริมาณของ $Ca(OH)_2$ เกิดจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเมื่อนำมาทำการทดสอบ XRD ได้ผลดังในรูปที่ 11 จะเห็นว่าภาพ XRD pattern ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดที่เติมวัสดุเชื่อมประสานร้อยละ 30 ที่ระยะบ่ม 28, 90 และ 150 วัน มีความคล้ายคลึงกัน โดยพบ peak ของผลิตภัณฑ์ 2 ชนิดคือ ettringite ($Ca_2Al_2(SO_4)_3.32H_2O$) และ gismondine ($CaAl_2Si_2O_8.4H_2O$) ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน ettringite เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาซัลโฟ-ปอซโซลาน Aimin and Sarkar, 1991 [9] ได้อธิบายว่าในสภาวะที่เป็นด่างสูง $Ca(OH)_2$ สามารถละลาย alumina ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปกับสารละลาย calcium sulfate หรือ sulfite และเกิดเป็น ettringite ปฏิกิริยาซัลโฟ-ปอซโซลาน นี้จะทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างที่เป็นแก้วในเถ้าลอย ให้มีโครงสร้างที่มีความทึบแน่นและมีความแข็งแรงมากขึ้น และงานวิจัยที่ผ่านมาของ Aimin, and Sarkar, 1991 [9], 1995 [10] และ Ma, and Brown, 1997 [11] ยังพบว่า gypsum ยังสามารถกระตุ้นให้ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าลอยกับ $Ca(OH)_2$ ให้เกิดได้ดีขึ้นด้วย

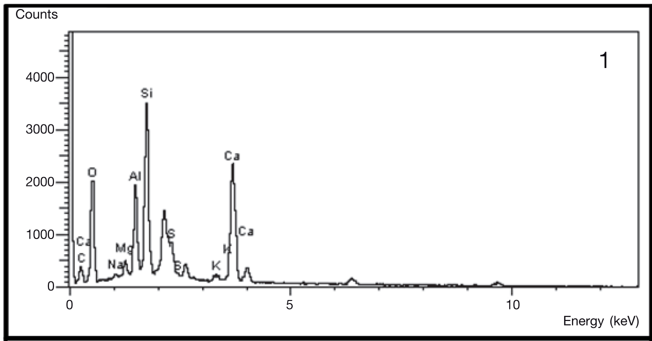
การตรวจพบสารประกอบกลุ่ม C-A-S-H ที่ชื่อ gismondine ในดินบดอัดที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวล โดยเทคนิค XRD เมื่อเปรียบเทียบระดับ intensity ของ peak gismondine ที่ระยะบ่มต่างๆ พบว่า peak ของ gismondine ที่ 2 theta เท่ากับ 28.494° ที่ระยะบ่ม 150 วัน สังเกตได้ชัดเจนและมีระดับ intensity สูงกว่าที่ระยะบ่มอื่นๆ แสดงให้เห็นว่ามีการดำเนินของปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้นตามระยะบ่มที่นานขึ้น



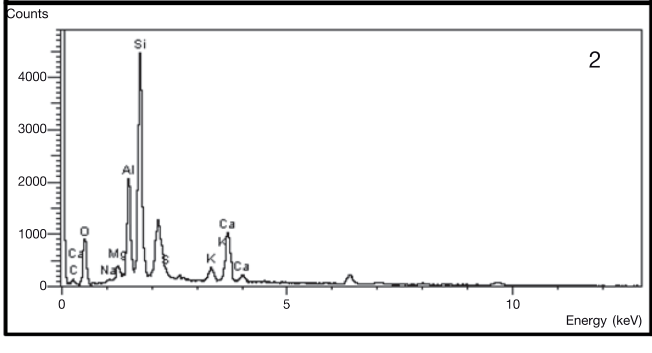
ก) กำลังขยาย 1,500 เท่า



ข) กำลังขยาย 6,000 เท่า



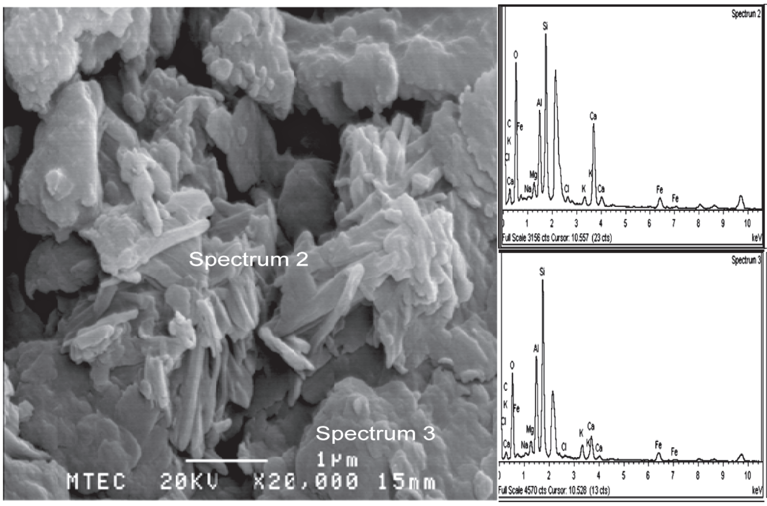
Element	% Weight
C	12.80
O	50.79
Na	0.52
Mg	1.26
Al	6.38
Si	13.63
S	0.28
K	0.63
Ca	13.71
Total	100
Ca:Si:Al = 1:1.5:1	



Element	% Weight
C	9.08
O	38.68
Na	0.41
Mg	1.73
Al	11.29
Si	29.11
S	-2.94
K	2.40
Ca	10.24
Total	100
Ca:Si:Al = 1:4:1.63	

ข) ผล EDS ของผลึก

รูปที่ 9 ภาพ SEM และผล EDS ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสม CCR และ BA (60:40) ปริมาณวัสดุผสมร้อยละ 30 ที่ระยะบ่ม 28 วัน (ถ่ายด้วยเครื่อง SEM JOEL รุ่น 5800 LV)

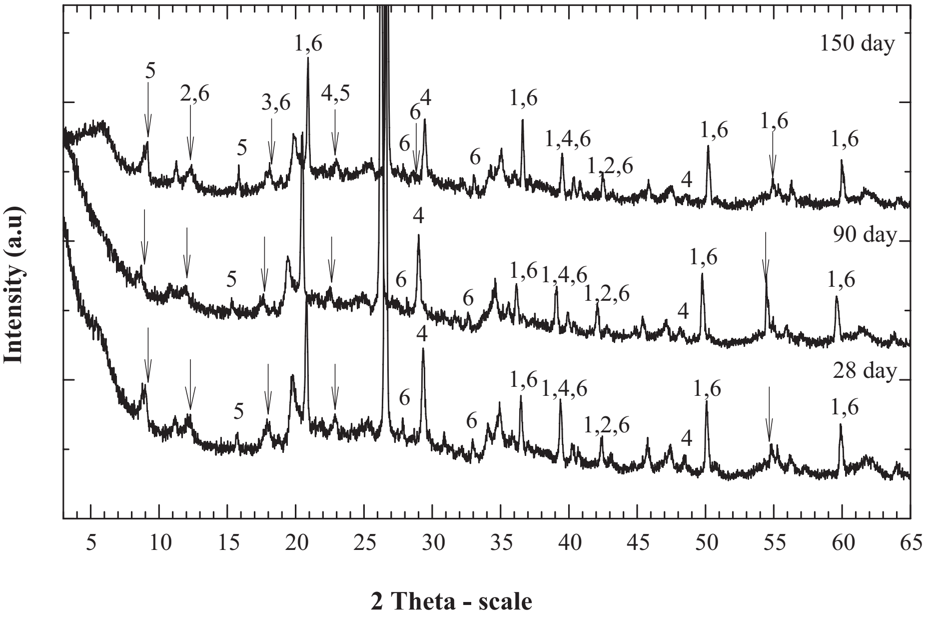


Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	4.70	0.3856	12.48	2.40	19.35
O K	32.95	0.6585	51.18	1.51	59.57
Na K	0.24	0.7402	0.33	0.17	0.27
Mg K	0.95	0.7074	1.37	0.15	1.05
Al K	5.22	0.8046	6.64	0.26	4.58
Si K	10.29	0.8189	12.86	0.43	8.53
Cl K	0.57	0.7606	0.76	0.10	0.40
K K	0.97	1.0374	0.95	0.10	0.45
Ca K	9.62	0.9729	10.11	0.35	4.70
Fe K	2.63	0.8126	3.31	0.23	1.10
Totals			100.00		

Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	2.64	0.2830	10.31	3.04	16.78
O K	27.99	0.7058	43.82	1.59	53.55
Na K	0.38	0.8219	0.52	0.16	0.44
Mg K	1.26	0.7670	1.81	0.16	1.46
Al K	8.24	0.8498	10.71	0.43	7.76
Si K	15.73	0.8059	21.55	0.80	15.00
Cl K	0.30	0.7164	0.46	0.10	0.26
K K	2.23	0.9983	2.47	0.15	1.23
Ca K	3.73	0.9480	4.34	0.21	2.12
Fe K	2.98	0.8210	4.01	0.26	1.40
Totals			100.00		

Spectrum 2; Ca:Si:Al = 1:1.9:1 Spectrum 3; Ca:Si:Al = 1:8:4, Si:Al = 2:1

รูปที่ 10 ภาพ SEM และผล EDS บริเวณ Spectrum 2 และ 3 ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสม CCR และ BA (60:40) ปริมาณวัสดุผสมร้อยละ 30 ที่ระยะบ่ม 150 วัน

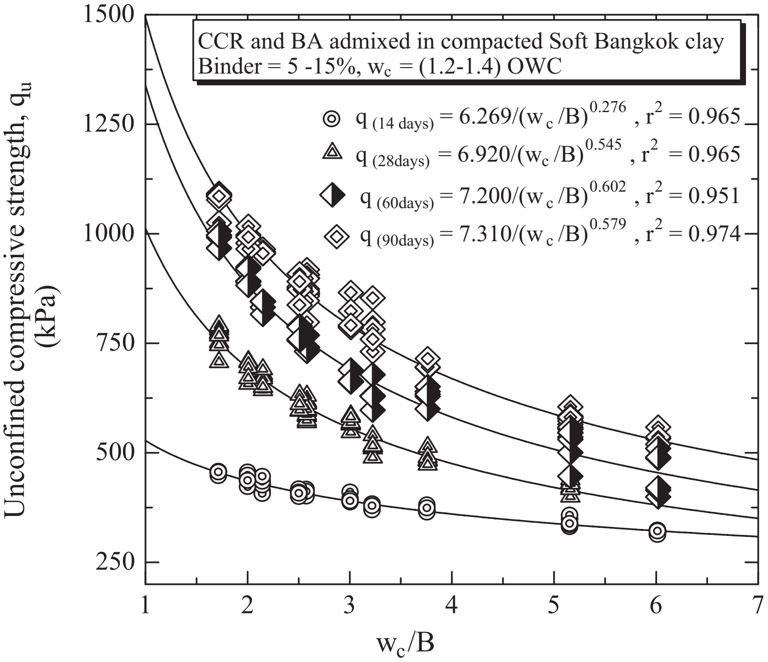


รูปที่ 11 XRD spectra ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลเท่ากับ 60 ต่อ 40 ที่ปริมาณวัสดุผสมร้อยละ 30 ที่ระยะบ่ม 28, 90 และ 150 วัน
(1 = Quartz, 2 = Kaolinite, 3 = Portlandite, 4 = Calcite, 5 = Ettringite, 6 = Gismondine)

จากผลทดสอบการวัดค่าความเป็นด่างพบว่าการเติมวัสดุเชื่อมประสานกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลในสัดส่วน 60:40 ลงในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ให้ค่า pH ของผสมนี้มีค่าเท่ากับ 12.09 ซึ่งจะสามารถสลายพันธะระหว่าง Al, Si กับ O ได้ การวิเคราะห์สารตั้งต้น ด้วยเทคนิค XRD ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ของ Si ที่พบมากในดิน เช่น quartz และ kaolinite ไม่พบว่ามีการเปลี่ยนแปลง หรือมีการลดลงของ intensity ตลอดช่วงอายุบ่มตั้งแต่ 28 ถึง 150 วัน แสดงว่า amorphous Si ในเถ้าชีวมวลมีสมบัติที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาและสามารถละลายใน $Ca(OH)_2$ ได้ดีกว่า quartz และ kaolinite ในดินเหนียวซึ่งยังมีความเป็นผลึกที่แข็งแรงกว่า และจากองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยเทคนิค XRF และ XRD พบว่าในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมี sulfur เป็นองค์ประกอบและอยู่ในรูปของผลึก gypsum ($CaSO_4.2H_2O$) สามารถทำปฏิกิริยาซัลโฟ – ปอซโซลานกับ Al เกิดเป็น ettringite ได้ และพบว่า portlandite จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถทำปฏิกิริยาซัลโฟ - ปอซโซลานกับออกไซด์ของ Al และ Si เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ ettringite ได้ทั้งในกรณีที่วัสดุเชื่อมประสานกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำปฏิกิริยากับเถ้าชีวมวลตามลำพัง หรือเมื่อผสมลงในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพก็ตาม สำหรับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับสารประกอบออกไซด์ของ Si นั้น ทั้งเถ้าชีวมวลและดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ต่างมีสารประกอบออกไซด์ของ Si ในปริมาณที่แตกต่างกันประมาณร้อยละ 10 แต่เนื่องจากเถ้าชีวมวลมีส่วนที่เป็น amorphous Si จึงมีความสามารถที่จะละลายใน $Ca(OH)_2$ ได้ดีกว่า SiO_2 ที่มีโครงสร้างที่เป็นผลึก เช่น quartz ในดินเหนียว หรือ cristobalite ในเถ้าชีวมวลเอง สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เมื่อทำปฏิกิริยากับ amorphous Si ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน C-S-H แต่หากเติมวัสดุเชื่อมประสานกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลที่อัตราส่วน 60:40 ลงในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ จะเกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานกลุ่ม C-A-S-H ได้แก่ gismondine ในดินเหนียวซึ่งมีผลให้ดินมีโครงสร้างที่สามารถรองรับกำลังอัดแกนเดียวได้มากขึ้นในระยะยาว การเติมวัสดุเชื่อมประสานกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน C-A-S-H แทนที่จะเกิด C-S-H เป็นเพราะในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมีส่วนประกอบออกไซด์ของ Al อยู่ร้อยละ 21 ซึ่งมากกว่าปริมาณ Al ในวัสดุเชื่อมประสานกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลรวมกันเพียงแค่ร้อยละ 3 เท่านั้น

4.3.3 ผลการศึกษาด้านกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดผสม CCR และ BA

การพิจารณาผลของปริมาณวัสดุเชื่อมประสานร่วมกับค่าความชื้นในดินเริ่มต้นที่มีต่อการพัฒนาค่ากำลังอัดแกนเดียว ในหัวข้อนี้ได้นำทฤษฎี Clay-Water/Cement Ratio Hypothesis ซึ่งกล่าวว่า “กำลังของดินชนิดหนึ่งที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียว คือ Clay-Water/Cement Ratio” มาประยุกต์ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินเหนียวต่อปริมาณวัสดุเชื่อมประสานในเทอม Clay-Water/Binder Ratio, w_c/B โดยกำหนดปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่ร้อยละ 5, 8, 10, 12 และ 15 และปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.2OWC (ร้อยละ 25.8) และ 1.4OWC (ร้อยละ 30.1) ที่ระยะบ่ม 14, 28, 60 และ 90 วัน แสดงความสัมพันธ์แบบผกผันดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 การพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวล ที่ระยะบ่ม 14 – 90 วัน

จากรูปที่ 12 พบว่าการที่ค่าพารามิเตอร์ w_c/B มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าลดลงในทุกระยะบ่ม ซึ่งมีความสัมพันธ์ ที่ระยะบ่มตั้งแต่ 14 ถึง 90 วัน อธิบายได้ด้วยสมการแบบ power function ดังสมการที่ 1

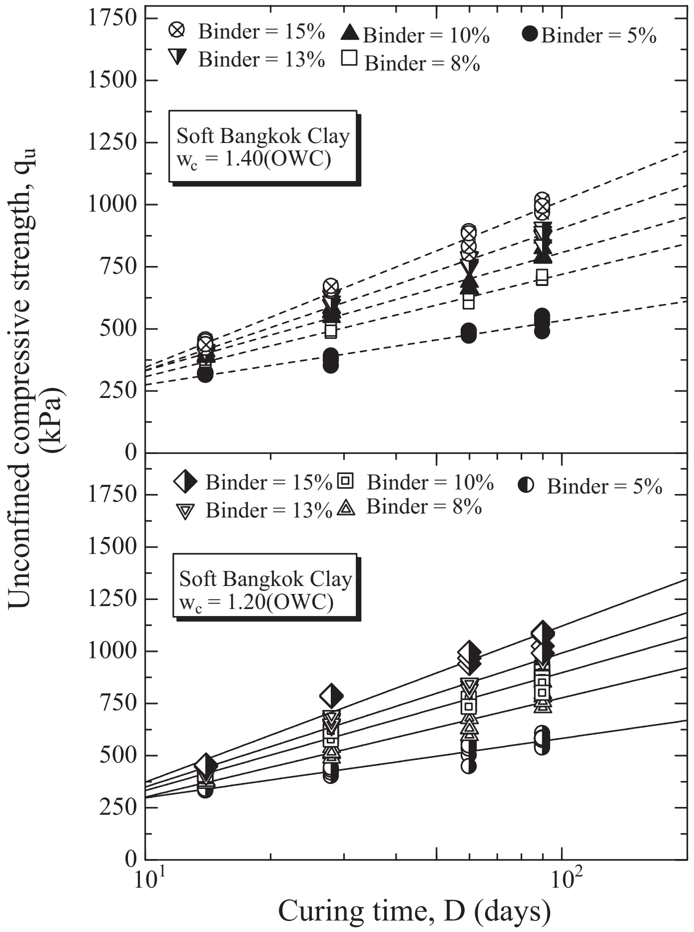
$$q_D = \frac{A}{(w_c/B)^E} \quad \textbf{(1)}$$

เมื่อ q_D คือกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง (kPa)

w_c/B คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณวัสดุเชื่อมประสานโดยน้ำหนักผึ่งแห้ง

A, E คือค่าคงที่

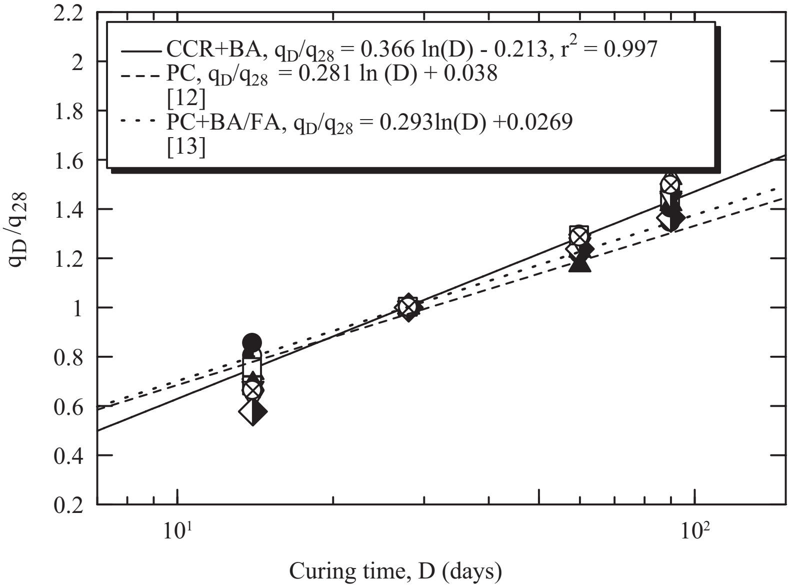
ค่าคงที่ A เป็นค่าเฉพาะของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ และมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุบ่มที่นานขึ้น ค่าคงที่ E เป็นค่าที่ควบคุมระดับมากหรือน้อยของการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ w_c/B ที่มีต่อค่ากำลังอัดแกนเดียว ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดินและวัสดุเชื่อมประสาน ดังนั้นค่าคงที่ E จึงเป็นค่าที่สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังอัดแกนเดียว เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีคือปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างน้ำในดินกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าชีวมวล และจะเห็นว่าค่าคงที่ E ที่ระยะบ่ม 14 วัน มีค่าน้อยกว่าที่ระยะบ่มอื่นๆ เนื่องจากในช่วงแรกนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้น้อย แต่เมื่อระยะบ่มตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป ค่าคงที่ E มีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 0.55 ถึง 0.60 ดังนั้นงานวิจัยจึงประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ E ประมาณคงที่และมีค่าเท่ากับ 0.58 และพบว่าระยะเวลาบ่มมีผลกระทบด้านบวกต่อค่ากำลังอัดแกนเดียว เมื่อพิจารณาที่ค่า w_c/B ค่าใดค่าหนึ่งแล้ว การวิเคราะห์ความความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวกับระยะเวลาบ่มในสเกลล็อคการิทึมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดที่ค่าความชื้นในดินเริ่มต้น 1.2 และ1.4 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เติมลงในดินเท่ากับร้อยละ 5, 8, 10, 13 และ 15 แสดงผลดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลกับระยะเวลาบ่ม

จากรูปที่ 13 พบว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวบดอัดที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุเชื่อมประสานทั้งสองที่พารามิเตอร์ w_c/B ที่แตกต่างกันมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาบ่มในสเกลล็อกการิทึมเป็นเส้นตรงที่มีค่าความชันแตกต่างกัน ความชันของกราฟดังกล่าวขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ w_c/B และระยะบ่ม ผลทดสอบแสดงชี้ชัดว่าที่พารามิเตอร์ w_c/B ที่ต่ำกว่าจะแสดงค่าความชันที่มากกว่าดินที่มีพารามิเตอร์ w_c/B สูงกว่า นอกจากนี้ที่ทุกค่าของ w_c/B กราฟได้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวเนื่องจากระยะบ่มที่นานขึ้น จากผลการทดลองดังกล่าว แสดงว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินบดอัดด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลขึ้นกับตัวแปรหลัก คืออัตราส่วนของปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณวัสดุเชื่อมประสานและระยะเวลาบ่ม

เมื่อพิจารณาว่าดินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นดินชนิดเดียวกัน วัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ก็เป็นชนิดเดียวกันแล้ว อัตราการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดแกนเดียวต่อเวลาที่ค่า w_c/B ใดๆ ควรมีค่าใกล้เคียงกันเพราะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาชนิดเดียวกัน และการใช้หลัก Normalization จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวของดินที่ระยะบ่มใดๆ เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มที่อ้างอิง ในที่นี้อ้างอิงที่ระยะบ่มที่ 28 วัน (q_D/q_{28}) กับระยะเวลาบ่ม (D) ในสเกลล็อกกาทึม แสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 อัตราการพัฒนากำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลกับเวลาเปรียบเทียบกับงานในอดีต

จากรูปที่ 14 พบว่าอัตราการพัฒนากำลังกับระยะเวลาบ่ม ที่ค่าพารามิเตอร์ w_c/B ใดๆ ในช่วง 1.72 ถึง 6.02 นั้นมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเดียวกันและสามารถแทนได้ด้วยสมการเส้นตรงเพียง 1 เส้น ดังสมการที่ 2 เนื่องจากค่าความชันของกราฟมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาชนิดเดียวกันคือปฏิกิริยาปอซโซลาน

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.366 \ln D - 0.213 \qquad \textbf{(2)}$$

เมื่อ $\frac{q_D}{q_{28}}$ คืออัตราการพัฒนากำลังของดินที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ระยะบ่มใดๆ เปรียบเทียบกับกำลังอัดของดินที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน

D คือระยะบ่ม (วัน)

งานวิจัยที่ผ่านมาของ Horpibulsuk et al, 2003 [12] และ 2011a [13] ที่ศึกษาการปรับสมบัติด้านกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยปูนซีเมนต์อย่างเดียวและดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงสมบัติด้านกำลังด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ได้สมการทั่วไปแสดงค่าอัตราการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวใกล้เคียงกันมาก (รูปที่ 14) และงานวิจัยดังกล่าวสรุปว่าการเติมปูนซีเมนต์อย่างเดียวเพื่อเป็นวัสดุเชื่อมประสาน หรือผสมร่วมกับเถ้าลอยให้ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานที่มาจากปฏิกิริยาเดียวกัน คือปฏิกิริยาหลักไฮเดรชั่น (มีปฏิกิริยาปอซโซลานส่วนน้อย) เมื่อทำการเปรียบเทียบความชันของอัตราการพัฒนาค่ากำลังของดินด้วยวัสดุเชื่อมประสานกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลจากงานวิจัยนี้จะพบว่าความลาดชันของการพัฒนากำลังมีค่ามากกว่าดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยตั้งแต่ระยะเวลาบ่มที่มากกว่า 28 วัน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่เป็นปฏิกิริยาที่ให้ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานในระยะยาว

5. สรุปผลงานวิจัย

1) ปริมาณความชื้นในดินเริ่มต้นและอัตราส่วนผสมของวัสดุเชื่อมประสานที่ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงที่สุดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าชีวมวล คือที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (1.2 OWC) และเท่ากับ 60 ต่อ 40 ตามลำดับ

2) วัสดุเชื่อมประสานกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 60 ต่อ 40 ในสภาวะที่มีความชื้น สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ ซึ่งเมื่อทำ SEM พร้อมกับ EDS ของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบด้วยธาตุองค์ประกอบหลักกว่าร้อยละ 97 คือ Ca, Si และ O และรูปร่างลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกัน คือ เป็นแผ่นขอบโค้ง และแบบแผ่นเกล็ด ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของสารประกอบกลุ่ม C-S-H และจากผลการทำ XRD พบผลึกสารประกอบ ettringite

3) ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าชีวมวลเกิดขึ้นเมื่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์สัมผัสน้ำและเป็นสารละลาย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่มีค่า pH สูงถึง 12.13 ซึ่งสามารถละลาย amorphous Si จากเถ้าชีวมวลได้ หลักฐานที่สนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวคือ การลดลงของความสูงและความกว้างของ peak portlandite เมื่อระยะบ่มเพิ่มขึ้นจาก 7 เป็น 90 วัน แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆ ใน peak ของสารประกอบออกไซด์ของ Si จากเถ้าชีวมวลในรูปของ quartz และ cristobalite แสดงว่า amorphous Si ละลายใน $Ca(OH)_2$ ได้ดีกว่าสารประกอบออกไซด์ของ Si ที่มีโครงสร้างเป็นผลึก ในขณะเดียวกันพบผลิตภัณฑ์ คือ ettringite และ amorphous C-S-H ตั้งแต่ที่อายุบ่ม 7 วัน

4) การนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าชีวมวลที่อัตราส่วน 60 ต่อ 40 เติมลงในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดที่ค่าความชื้นในดินเริ่มต้นเท่ากับ 1.2 OWC โดยปริมาณวัสดุเชื่อมประสานร้อยละ 30 ทำการบ่มเป็นระยะเวลา 28, 90 และ 150 วัน มาวิเคราะห์ด้วย SEM พร้อมกับ EDS พบผลึกที่มีองค์ประกอบหลักเป็น Ca, Si, Al และ O ที่มีรูปร่างลักษณะหลายแบบ คือเป็นแท่งเดี่ยวขนาดใหญ่ เป็นแท่งขนาดเล็กหลายแท่งเกาะติดกันและเป็นเส้นใยเกาะกันและจากการทำ XRD พบสารประกอบ ettringite และสารประกอบกลุ่ม C-A-S-H ที่ชื่อ gismondine ซึ่งมีรูปร่างผลึกเป็นปิรามิดคู่ประกบ เป็นผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานที่ทำให้ดินมีโครงสร้างที่สามารถรองรับกำลังอัดแกนเดียวได้มากขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพบดอัดด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าชีวมวลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน ettringite และ C-A-S-H การเกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน C-A-S-H ไม่ใช่ C-S-H เนื่องจากสารละลาย $Ca(OH)_2$ จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถละลายและทำปฏิกิริยากับ amorphous Si และสารประกอบออกไซด์ของ Al ซึ่งมีมากในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพถึงร้อยละ 21

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยและศูนย์เทคโนโลยีโลหะศูนย์วัสดุแห่งชาติและศูนย์เครื่องมือวิจัยและเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์ ในการอนุเคราะห์ช่วยเหลือการทดสอบโครงสร้างจุลภาค

7. เอกสารอ้างอิง

1. Rachan, R., Chim-oye, W., and Horpibulsuk, S., 2009, "Application of biomass fly ash as a pozzolanic material for stabilization of low swelling clay", *Journal of Lowland Technology International*, Vol. 11, No. 1, pp. 11-19.

2. Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Raksachon, Y., 2009. "Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay", *Soil and Foundations*, Vol. 49, No. 1, pp. 85-98.

3. Tanalapsakul, A., 1998, "Document from MThai industrial company limited", May. M Thai Industrial Co.Ltd., Samutsakorn, Thailand.

4. Anderson, D., Roy, A., Seals, R.K., Carledge, F.K., Akhter, H., and Jones, S.C., 2000, "A preliminary assessment of the use of an amorphous silica residual as a supplementary cementing material", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 437-445.

5. Avarz, M. and Gunduz, L., 2005, "Engineering prperties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1251-1261.

6. http://www.cementlab.com

7. http://www.vitrominerals.com

8. http://www.fhwa.dot.gov

9. Aimin, X. and Sarkar, S.L., 1991, "Micrstructural study of gypsum activated fly ash hydration in cement paste", *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, No. 6, pp. 1137-1147.

10. Ma, W., Liu, C., Brown, P.W., and Kormaeneni S., 1995, "Pore structures of fly ashes activated by $Ca(OH)_2$ and $CaSO_4.2H_2O$", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 417-425.

11. Ma,W., and Brown, P.W., 1997, "Hydro-thermal reactions of fly ash with $Ca(OH)_2$ and $CaSO_4.2H_2O$", *Cement and Concrte Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 1237-1248.

12. Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S., 2003, "Assessment of strength development in cement admixed high water content clays with Abraham's law as a basis", *Geotechnique*, Vol. 53, No. 4, pp. 439-444.

13. Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., and Chinkulkijniwat, A., 2011a, "Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash", *Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE*. (in press).