

อิทธิพลของความเค็มต่อสมบัติพื้นฐานและกำลังของดินชายฝั่งทะเล ผสมวัสดุผสมเพิ่ม

รุ่งลาวัลย์ ราชัน¹

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

บทคัดย่อ

งานศึกษาวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวชายฝั่งทะเลและกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวชายฝั่งทะเลผสมวัสดุผสมเพิ่ม ระดับความเค็มของสารละลายต่างๆ (น้ำประปา:น้ำทะเล = 0:1, 1:1 และ 1:0) ถูกเติมและผสมในดินเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราเทอร์เบริก คุณสมบัติการบดอัดดินและกำลังอัดแกนเดียว วัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และถูกแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลหรือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ที่เท่ากัน คือ 15 เปอร์เซ็นต์ การศึกษานี้พบว่าขีดจำกัดเหลว พิกัดพลาสติกและดัชนีความเป็นพลาสติกลดลงเมื่อดินมีระดับความเค็มที่สูงขึ้น ระดับความเค็มที่มากกว่าส่งผลให้ดินชายฝั่งบดอัดมีค่าความหนาแน่นแห้งที่มากกว่าและมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมน้อยกว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินชายฝั่งทะเลผสมวัสดุเชื่อมประสานมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความเค็มที่มากขึ้นเนื่องจากดินที่มีระดับความเค็มที่สูงกว่าจะมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของเม็ดดินเป็นแบบระเกะระกะ

คำสำคัญ : ระดับความเค็ม / ดินเหนียวชายฝั่งทะเล / กากแคลเซียมคาร์ไบด์ / เถ้าลอยชีวมวล / กำลังอัดแกนเดียว

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Influenced by Salinity on Basic Properties and Strength in Supplementary Materials Admixed Coastal Clay

Runglawan Rachan¹

Mahanakorn University of Technology, Nong Chok, Bangkok 10530, THAILAND

Abstract

The object of this paper is to investigate the influenced by salinity on basic properties of coastal clay and unconfined compressive strength of supplementary materials admixed coastal clay. Various amount of salt degrees (Fresh water: Sea water = 0:1, 1:1 and 1:0) were added to the stabilized clay to study the effect of salinity on Atterberg's limits, compaction characteristics and unconfined compressive strength. The supplementary materials used in clay were calcium carbide residue with biomass ash and Portland cement Type I replaced by biomass ash or calcium carbide residue at the same ratio as 15% by weight. It was found that the liquid limit, plastic limit and plasticity index decreased with the increase in saline clay. The more salt degrees increased the maximum dry density and decreased the optimum water content. The unconfined compressive strength increased as the salt degree increased due to the flocculated structure.

Keywords : Salinity / Coastal Clay / Calcium Carbide Residue / Biomass ash / Unconfined Compressive Strength.

¹ Assistance professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ดินเหนียวเป็นดินเม็ดละเอียด พฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินประเภทนี้ขึ้นอยู่กับของเหลวที่อยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore fluid) และพื้นผิวของอนุภาคดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับแร่ดินเหนียว การนำดินเหนียวไปใช้ประโยชน์ต้องเข้าใจอิทธิพลของสมบัติพื้นฐานต่อพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียว เพื่อให้สามารถออกแบบได้อย่างปลอดภัยนอกจากนี้ สมบัติพื้นฐานของดินเหนียว อันได้แก่ ชีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic limit) มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดิน นักวิจัยหลายท่านพบว่าพฤติกรรมทางวิศวกรรมและสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวสมุทร (Marine clays) มีความแตกต่างกันตามการเตรียมดินตัวอย่างก่อนการทดสอบ [1-6] โดยทั่วไปการเตรียมดินตัวอย่างมีสองวิธีคือการเตรียมตัวอย่างเปียก (Wet preparation procedure) และการเตรียมตัวอย่างแห้ง (Dry preparation procedure) (ASTM D 421-85, D 4318)

ปัจจุบันพื้นที่ชายฝั่งทะเล มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสังคมและเศรษฐกิจของประเทศ ที่ดินชายฝั่งทะเลมีทรัพยากรธรรมชาติที่มีค่ามากมาย เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำ แร่ธาตุ ดิน และยังเป็นพื้นที่สำคัญของโครงข่ายคมนาคมที่เป็นประตูเศรษฐกิจของประเทศอีกด้วย ดังนั้นพื้นที่ชายฝั่งทะเลจึงเป็นฐานเศรษฐกิจที่ผลิตสินค้าต่างๆ มากมาย ที่ตั้งโรงงานอุตสาหกรรม แหล่งพาณิชย์กรรม ดังนั้นความเข้าใจถึงอิทธิพลของความเค็มต่อทั้งสมบัติพื้นฐานและสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนชายฝั่งจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เป็นที่ทราบกันว่าสภาพดินเหนียวอ่อนจะก่อปัญหาทางด้านวิศวกรรมอย่างมาก ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนจึงเป็นสิ่งสำคัญ ในปัจจุบันการปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของดินอ่อนมีอยู่มากมาย การปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรม เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของดินก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่นิยมใช้ซึ่งสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น 1) การใช้วัสดุพิเศษเพื่อแทนที่ดิน 2) ปรับปรุงเสถียรภาพของดินโดยใช้พลังงานหรือเครื่องจักร 3) ปรับปรุงเสถียรภาพของดินโดยการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิ 4) ปรับปรุงเสถียรภาพของดินโดยใช้ประจุไฟฟ้า และ 5) ปรับปรุงเสถียรภาพของดินโดยการเติม

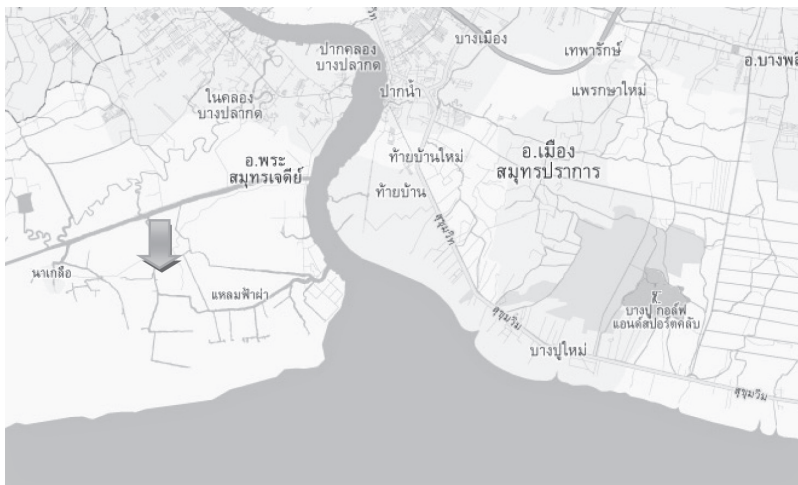
สารหรือวัสดุเพื่อเชื่อมประสาน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การเติมปูนขาว หรือปูนซีเมนต์ลงในดิน เป็นต้น ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ดังนั้นผลผลิตทางการเกษตรที่เหลือใช้จึงมีอยู่มากมาย จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา Horpibulsuk et al, 2009, 2011a. [7-8] และ Rachan et al, 2009 [9] ได้กล่าวถึงการนำเอาวัสดุเชื่อมประสานแก้าลอยหรือแก้าชิวมวลมาแทนที่ปูนซีเมนต์ หรือการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาผสมกับแก้าลอยจะสามารถพัฒนากำลังและนำไปใช้งานด้านวิศวกรรมต่อไปได้ แก้าชิวมวลเหล่านั้นซึ่งมีสมบัติเป็นวัสดุพอซโซลานตามธรรมชาติ แก้าชิวมวลนี้มีองค์ประกอบเป็นออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริก มากกว่าร้อยละ 70 และมีการวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแก้าชิวมวลในการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนในการปรับปรุงสมบัติดินเหนียวอ่อน [9] กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุซึ่งอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) สูงถึงร้อยละ 74 โดยน้ำหนัก และ ความต้องการใช้งานของก๊าซอะเซทิลีนในภาคอุตสาหกรรมจากอดีต จนปัจจุบันพบว่า มีแนวโน้มของกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยสถิติในปี พ.ศ. 2538 - 2541 มีการใช้แคลเซียมคาร์ไบด์รวมทั้งสิ้นประมาณ 74,000 ตัน ส่งผลให้เกิดกากแคลเซียมคาร์ไบด์เหลือทิ้งมากกว่า 21,500 ตันต่อปี [10] และประมาณได้ว่าการใช้แคลเซียมคาร์ไบด์เพื่อผลิตก๊าซอะเซทิลีนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 10 ถึง 15 ต่อปี

จากการศึกษาการนำวัสดุเหลือใช้ทั้งสองประเภทคือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์และแก้าชิวมวลมาแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทดแทนปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานธรณีเทคนิคกับดินเหนียวบริเวณชายฝั่งทะเลซึ่งเป็นดินตะกอนและดินอ่อนอีกทั้งเป็นดินที่มีปริมาณเกลือปนอยู่มาก จึงเป็นสถานที่ตามธรรมชาติที่น่าสนใจที่ยังไม่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จะได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความเค็มต่อสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวชายฝั่งทะเลและความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือใช้ทั้งสองมาทำการปรับเสถียรของดินที่ระดับความเค็มต่างกันเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงด้านกำลังของดินเหนียวชายฝั่งและเพื่อเพิ่มความรู้อย่างเข้าใจในงานด้านวิศวกรรมปฐพีต่อไป

2. วัสดุทดสอบ

ดินตัวอย่างเป็นดินเหนียวอ่อนชายฝั่งเก็บที่ความลึก 3 ถึง 4 เมตร บริเวณชายฝั่งทะเล จังหวัดสมุทรปราการ แผนที่เก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนชายฝั่งทะเล แสดงดังรูปที่ 1 ความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.58 ภูเขาชีวมวล (Biomass Ash, BA) ที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยเพาเวอร์โอเพอร์เลต จำกัด (TPO) ที่ หมู่ 3 ตำบลเขาหินซ้อน อำเภอนวมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา ภูเขาชีวมวลนี้ได้จากการเผาวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ แกลบ เปลือกไม้ ไม้บอร์ค ไม้ยูคาลิปตัสสับละเอียดและแกลบอัดเม็ด ภูเขาชีวมวลชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นภูเขาชีวมวลในชั้นคุณภาพ C และ F ตามมาตรฐานของ ASTM C 618 ได้ ภูเขาชีวมวลมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.95 แกลบเคลือบคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue, CCR) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท สาย 5 ผลิตภัณฑ์ก๊าซ จำกัด อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม แกลบเคลือบคาร์ไบด์มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25 แกลบเคลือบคาร์ไบด์และภูเขาชีวมวลจะถูกนำมาบดด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion ใช้ลูกเหล็กขนาดเส้น

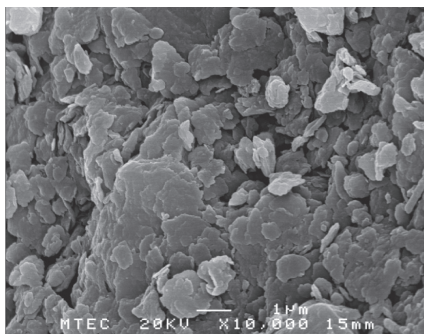
ผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว จำนวน 16 ลูก แล้วนำมาบดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ก่อนทำการทดสอบสมบัติ หรือก่อนนำไปใช้ในการวิจัยทุกครั้ง ทั้งนี้เพื่อกำหนดขนาดของวัสดุเชื่อมประสานให้เป็นประเภทเกล็ดละเอียด ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทดสอบแสดงดังในตารางที่ 1 ภาพถ่ายกำลังขยายของกากเคลือบคาร์ไบด์ ภูเขาชีวมวล ปูนซีเมนต์ และดินตัวอย่างแสดงดังในรูปที่ 2 จะเห็นว่าอนุภาคของดินเหนียวตัวอย่างมีลักษณะเป็นกลุ่มเม็ดเล็กๆ จับกันเป็นแผ่นก้อนหนาที่บดและยึดติดกันระหว่างอนุภาค อนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมและอนุภาคของภูเขาชีวมวลมีลักษณะเป็นแบบเหลี่ยมซึ่งมีลักษณะคล้ายอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เพราะภูเขาชีวมวลนี้ได้มาจากการเผาวัสดุจากธรรมชาติหลายชนิด ได้แก่ แกลบ แกลบอัดเม็ด เปลือกไม้ ไม้บอร์คและไม้ยูคาลิปตัส แต่จะเห็นว่าลักษณะรูปร่างคล้ายกับปูนซีเมนต์กล่าวคือมีลักษณะเหมือนมวลรวมหยาบ รูปร่างลักษณะภายนอกของกากเคลือบคาร์ไบด์เป็นผลิกรูปหลายเหลี่ยมเกาะกลุ่มและมีลักษณะซ้อนเป็นชั้น



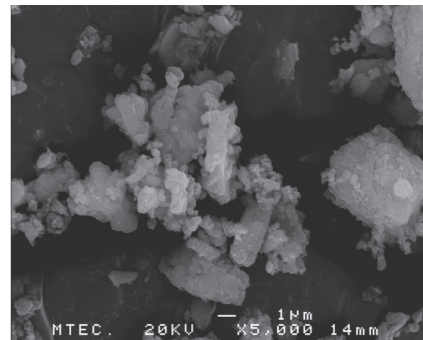
รูปที่ 1 แผนที่เก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนชายฝั่งทะเล

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนชายฝั่ง กากแคลเซียมคาร์ไบด์และ
เถ้าชีวมวล

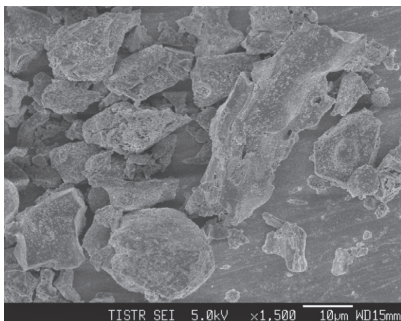
ร้อยละของธาตุ องค์ประกอบ (%)	ดินชายฝั่งทะเล	ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ Type I (PC)	เถ้าชีวมวล (BA)	กาก แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR)
Silicon dioxide, SiO ₂	52.9	20.9	74.1	5.5
Aluminum oxide, Al ₂ O ₃	20.0	4.8	0.6	2.5
Iron oxide, Fe ₂ O ₃	8.6	3.4	0.9	0.7
Calcium oxide, CaO	0.6	65.4	5.9	80.1
Magnesium oxide, MgO	1.8	1.3	1.5	0.8
Sulfur trioxide, SO ₃	0.2	2.7	0.5	0.9
Sodium oxide, Na ₂ O	0.1	0.2	3.3	0.05
Potassium oxide, K ₂ O	3.3	0.4	1.7	0.08
LOI	11.2	0.9	9.5	8.6



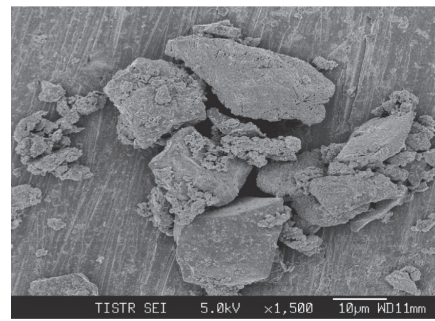
ก) ดินเหนียวชายฝั่ง (10000 เท่า)



ข) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (5000 เท่า)



ค) เถ้าชีวมวล (1500 เท่า)



ง) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (1500 เท่า)

รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของดินเหนียวชายฝั่งทะเล ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าชีวมวล
และกากแคลเซียมคาร์ไบด์

3. วิธีการทดสอบ

สำหรับการหาอิทธิพลความเค็มต่อสมบัติพื้นฐาน น้ำประปาและน้ำทะเลถูกผสมกันตามสัดส่วนต่างๆ และทำการหาระดับความเค็มของของเหลวผสมดังกล่าว และระดับความเค็มของดินชายฝั่งสภาพอบแห้ง ผึ่งแห้ง ในอากาศและสภาพตามธรรมชาติ ด้วยเครื่องมือ Instant Ocean Hydrometer ความเค็มในที่นี้ คือ ปริมาณเกลือที่ละลายอยู่ในน้ำมีหน่วยวัดเป็นกรัมต่อน้ำหนึ่งตันหรือหนึ่งส่วนในพันส่วน หรือ พีพีที (ppt. = part per ton) จากนั้นทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าขีดจำกัดเหลว ค่าพิกัดพลาสติก ค่าดัชนีพลาสติก ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ระดับความเค็มต่างกัน

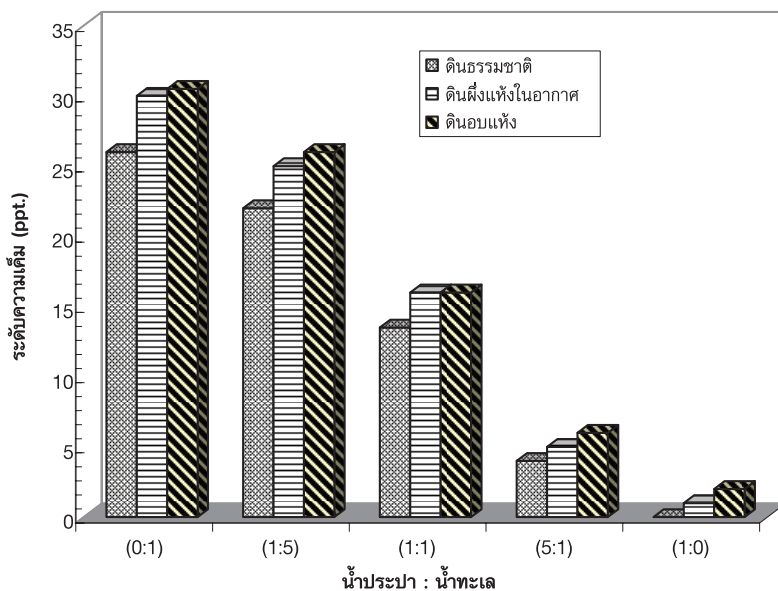
สำหรับการหาอิทธิพลความเค็มต่อกำลังของดินเหนียว ชายฝั่งผสมวัสดุเชื่อมประสานต่างๆ ได้แก่กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวล ปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์และปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวล 15 เปอร์เซ็นต์ กำหนดปริมาณความชื้นในการผสมเท่ากับ 1 เท่าของค่าดัชนีเหลวและอัตราส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าชีวมวล (Calcium Carbide Residue : Biomass ash, CCR:BA) เท่ากับ 60:40 ที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 5 ถึง 30

เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง หลังจากการผสมด้วยเครื่องผสมจนวัสดุเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 5 ถึง 10 นาที แล้วนำส่วนผสมใส่ในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร และความสูงประมาณ 10 เซนติเมตร หลังจากตัวอย่างถูกถอดจากแบบหล่อ ท่อด้วยพลาสติกกันความชื้นและเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ($20 \pm 2^{\circ}\text{C}$) จนครบระยะเวลาป่ม 28 วัน และ 7 วันสำหรับกรณีปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวล เมื่อได้อายุป่มตามต้องการแล้ว นำตัวอย่างมาทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียวด้วยอัตรา 1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้ตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่างของแต่ละปริมาณส่วนผสม เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของผลทดสอบ

4. ผลทดสอบ

4.1 ผลของระดับความเค็มต่อสมบัติพื้นฐาน

ระดับความเค็มของน้ำประปาต่อน้ำทะเลที่อัตราส่วน เท่ากับ 1:0.1:1 และ 0:1 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 0, 15, 30 ppt. ตามลำดับ และระดับความเค็มของดินธรรมชาติ ดินอบแห้งและดินผึ่งแห้งในอากาศ แสดงผลดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภูมิบอกค่าระดับความเค็มของดินชายฝั่งธรรมชาติ ดินชายฝั่งผึ่งแห้งในอากาศและดินชายฝั่งอบแห้ง

จากผลทดสอบพบว่าที่ระดับความเค็มเดียวกันดินที่มีสภาพอบแห้งจะให้ค่าระดับความเค็มที่สูงกว่าดินแห้งผึ่งอากาศ และดินธรรมชาติตามลำดับ ซึ่งให้ผลทดสอบในลักษณะเดียวกันของทุกค่าระดับความเค็มซึ่งมีระดับความเค็มจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้คือ อัตราส่วนของน้ำประปาต่อทะเล เท่ากับ 0:1 ,1:5 ,1:1 ,5:1 และ 1:0 ตามลำดับแสดงผลดังรูปที่ 3 นั้นแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการเตรียมตัวอย่างแบบเปียกและแบบแห้ง ดินอบแห้งมีค่าระดับความเค็มสูงกว่าดินแห้งผึ่งอากาศและดินธรรมชาติ

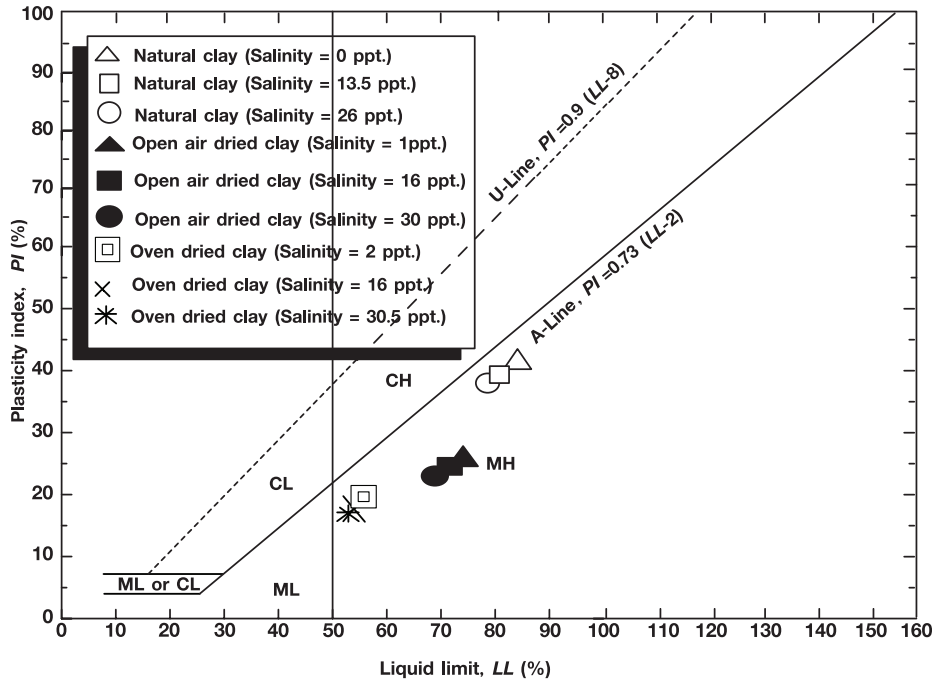
ทั้งนี้เนื่องจากดินที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นหรือสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นที่น้อยกว่าจะมีความสามารถในการดูดซึมของเหลวในช่องว่าง ของมวลดินได้ดีกว่าและเมื่อได้รับความเข้มข้นและชนิดของประจุบวกเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาของชั้นประจุกระจายตัวลดลงและทำให้อนุภาคดินเหนียว (Clay platelet) เข้าใกล้กัน อนุภาคดินจะจัดเรียงตัวแบบกระจาย และเกิดการกระจายตัวของอนุภาคดินที่มีขนาดเล็กทำให้ดินที่บดน้ำมากขึ้นน้ำจึงไหลผ่านดินได้ ไม่สะดวก[4]

ตารางที่ 2 ระดับความเค็ม, LL, PL และ PI ของดินชายฝั่งที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่าง ๆ

Description of sample	ค่าระดับความเค็ม (ppt.)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
1. ดินธรรมชาติ				
น้ำประปา : น้ำทะเล = 1 : 0	0	82.30	41.39	40.91
น้ำประปา : น้ำทะเล = 1 : 1	13.5	81.40	41.04	40.36
น้ำประปา : น้ำทะเล = 0 : 1	26	80.30	40.94	39.36
2. ดินแห้งผึ่งอากาศ				
น้ำประปา : น้ำทะเล = 1 : 0	1	71.80	46.34	25.46
น้ำประปา : น้ำทะเล = 1 : 1	16	71.40	46.09	25.31
น้ำประปา : น้ำทะเล = 0 : 1	30	69.00	45.31	23.69
3. ดินอบแห้ง				
น้ำประปา : น้ำทะเล = 1 : 0	2	53.20	34.92	18.28
น้ำประปา : น้ำทะเล = 1 : 1	16	52.70	34.67	18.03
น้ำประปา : น้ำทะเล = 0 : 1	30.5	52.30	34.38	17.92

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการเตรียมดินตัวอย่างก่อนการทดสอบ (Pre-testing condition) ต่อพิกัดอัตราเบียร์ก จากการศึกษาพบว่าผลการเตรียมตัวอย่างแบบแห้งทำให้ขีดจำกัดเหลวและดัชนีสภาพพลาสติกของดินเหนียวชนิดเดียวกันแต่มีสถานะเริ่มต้นของปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันและมีระดับความเค็มของสารละลายในช่องว่างต่างๆ มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเตรียมตัวอย่างแบบเปียก และพบว่าเมื่อระดับความเค็มสูงขึ้นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของขีดจำกัดเหลว และดัชนีสภาพพลาสติกระหว่างการเตรียมแบบเปียกและแบบแห้งของดินเหนียวชนิดเดียวกันนั้นยังมีค่าเพิ่มมากขึ้น เช่นเมื่อเปลี่ยนจากดินชายฝั่งธรรมชาติ ที่อัตราส่วนน้ำประปา

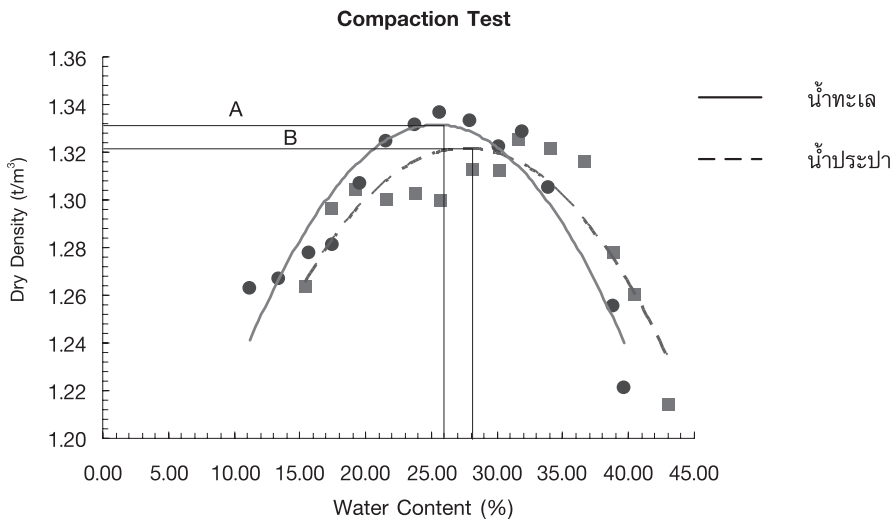
ต่อน้ำทะเลเท่ากับ 1 ต่อ 0 นั้น ซึ่งมีระดับความเค็มที่ 0 ppt. เป็นดินชายฝั่งแห้งผึ่งอากาศและดินชายฝั่งอบแห้งที่มีระดับความเค็มที่ 1 ppt. และ 2 ppt. ตามลำดับค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าขีดจำกัดเหลวมีค่าเพิ่มจาก 12.75 เปอร์เซ็นต์ เป็น 35.35 เปอร์เซ็นต์ และค่าดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าความแตกต่างเพิ่มจาก 37.77 เปอร์เซ็นต์ เป็น 55.32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าพิกัดพลาสติกของดินทั้งหมดมีความแตกต่างกันน้อยระหว่างการเตรียมแบบเปียกและแบบแห้ง เนื่องจากพิกัดพลาสติกถูกควบคุมโดยสมบัติทางกายภาพของดินมากกว่าสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของเหลวที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดเหลวกับดัชนีความเป็นพลาสติกของดินชายฝั่งธรรมชาติ ดินชายฝั่งฝั่งอากาศและดินชายฝั่งอบแห้งที่ระดับความเค็มต่างๆ

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดเหลว และดัชนีสภาพพลาสติก จะเห็นว่าความเป็นพลาสติก และขีดจำกัดเหลวของดินทุกประเภทลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเตรียมดินแบบแห้ง การลดลงของขีดจำกัดเหลว อาจเนื่องจากการเตรียมตัวอย่างแบบแห้งทำให้แผ่นดินเหนียวรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ส่งผลให้พื้นที่ผิว

จำเพาะลดลง แรงผลักระหว่างแผ่นดินเหนียว (Repulsive force) จะมีค่าลดลง ถึงแม้ว่าจะมีการเติมน้ำให้กับดินตัวอย่างก่อนการทดสอบอนุภาคดินก็ไม่สามารถแตกตัวได้ด้วยเหตุนี้เองความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลของน้ำในดินจึงลดลงและส่งผลให้ขีดจำกัดเหลวลดลง [11-12]



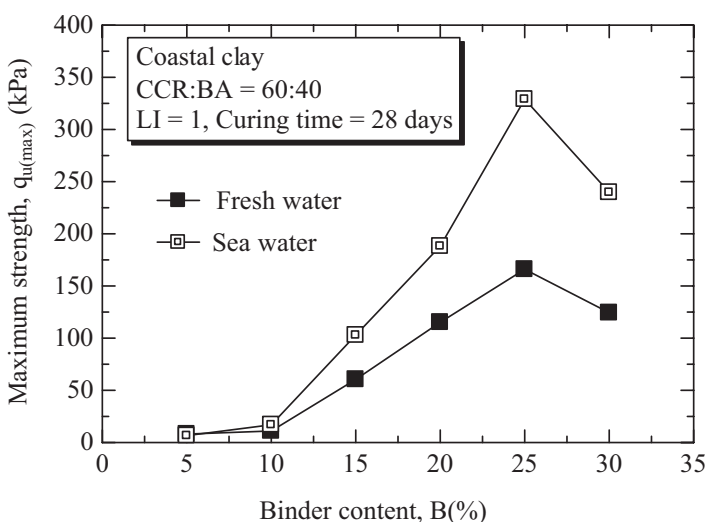
รูปที่ 5 ผลการบดอัดดินชายฝั่งที่ระดับความเค็มต่างกัน

รูปที่ 5 แสดงผลทดสอบการบดอัดดินที่มาตรฐาน (Standard Proctor) กับดินแห้งฟุ้งอากาศในน้ำประปา และน้ำทะเลพบว่าดินบดอัดที่ผสมน้ำทะเลซึ่งมีระดับความเค็มที่สูงกว่า (เส้น A) จะให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d_{max}}$) มากกว่าและมีปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content) ต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [13-14] โครงสร้างของดินที่ได้รับความเค็มเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนโครงสร้างแบบ edge-to-face เป็นโครงสร้างแบบ face-to-face หรือเรียกว่า โครงสร้างแบบประเกะระกะ (Flocculated Structure)

และหลังจากที่ดินได้รับการบดอัด อนุภาคของเม็ดดินจะมีการจัดเรียงตัวใหม่และมีความหนาแน่นแห้งที่สูงขึ้นตามปริมาณความเค็มที่เพิ่มขึ้น [15] ดังนั้นปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลงเมื่อดินมีระดับความเค็มที่สูงขึ้นนั้นสามารถอธิบายได้จากดินที่มีโครงสร้างแบบประเกะระกะจะมีความต้องการใช้น้ำ ที่ลดลง

4.2 ผลของระดับความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดียว

4.2.1 ดินชายฝั่งทะเลผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวล



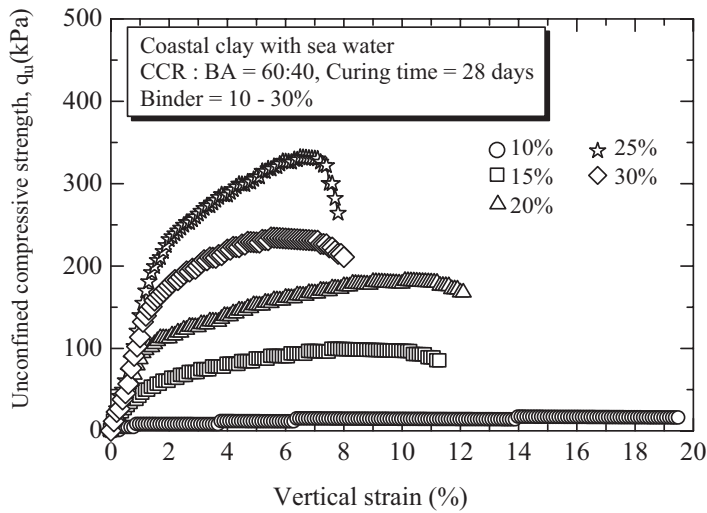
รูปที่ 6 กำลังอัดแกนเดียวของดินชายฝั่งผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 28 วัน ในน้ำประปา และในน้ำทะเล

รูปที่ 6 แสดงผลทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดของดินอ่อนชายฝั่งผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนผสม 60:40 ที่ปริมาณความชื้น 71.8 และ 69 เปอร์เซ็นต์ (LI = 1.0) สำหรับดินอ่อนชายฝั่งทะเลแห้งในอากาศผสมน้ำประปาและน้ำทะเลตามลำดับ ปริมาณส่วนผสมของวัสดุประสานเท่ากับ 5 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง จะเห็นว่าการอัดแกนเดียวสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (ปริมาณส่วนผสมน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์) หลังจากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และสามารถกล่าวได้ว่า ปริมาณส่วนผสมของวัสดุประสานทั้งสองที่ 25 เปอร์เซ็นต์

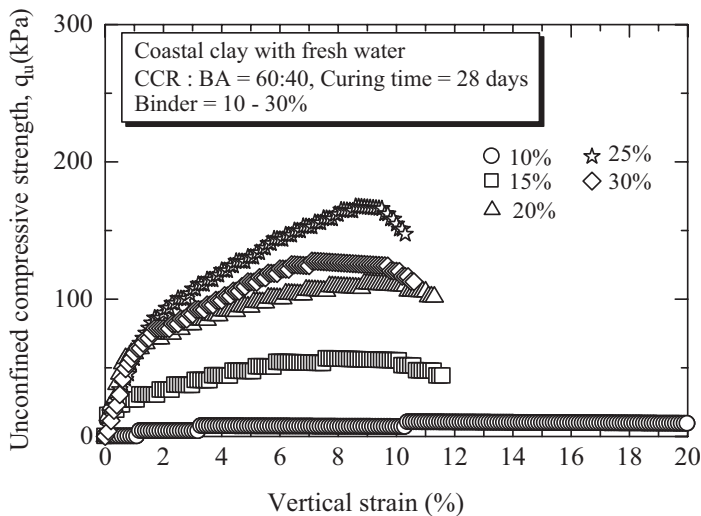
เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเรียกช่วงดังกล่าวอยู่ในโซน Active (5-25%) และเมื่อพิจารณาถึงระดับความเค็มที่มีผลต่อกำลังจะเห็นว่าดินที่มีระดับความเค็มสูงกว่าจะให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่สูงกว่าและเป็นไปในทำนองเดียวกันในอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นในกรณีวัสดุประสานผสมที่ 5 เปอร์เซ็นต์ซึ่งให้ค่ากำลังแตกต่างกันเล็กน้อย ดินที่มีระดับความเค็มที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่สูงกว่านั้นทั้งนี้เนื่องจากดินที่มีสารละลายเกลือหรือมีระดับความเค็มของของเหลวในช่องว่างของมวลดินที่มากกว่าจะมีการจัดเรียงตัวโครงสร้างแบบประเกะระกะ (Flocculation) ซึ่งจะมีความสามารถ

ในการรับกำลังได้ดีกว่าโครงสร้างแบบเป็นระเบียบ (Dispersed structure) Tiwari et al, 2005 [16], Mitchell, 1993 [17] และ Sridharan and Rao, 1973 [18] กล่าวว่าระดับการกระจายหรือความเป็นโครงสร้างระกระจะจะมีมากขึ้นตามความเข้มข้นและความแรงของประจุบวก ความเข้มข้นของอือนั้นจะลดความหนาของชั้นประจุกระจายตัว (Diffusion double layer) และเมื่อความหนาของชั้นประจุกระจายตัวจะลดลงจะทำให้อนุภาคดินเหนียว (Clay platelet) เข้าใกล้กันและรวมตัวกันเป็น

เหตุให้ค่าความเชื่อมแน่นมีค่าสูงขึ้น [19] และจากงานวิจัยนี้พบว่าดินอ่อนชายฝั่งทะเลผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลมีพฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile) ที่ปริมาณส่วนผสมต่ำ (10%) กล่าวคือกำลังสูงสุดจะคงที่ต่อเนื่องแม้ว่าการยืดหด (ความเครียด) จะเปลี่ยนแปลงก็ตามและเริ่มมีพฤติกรรมแบบเปราะ (Brittle) มากขึ้นตามปริมาณส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น (15 – 30%) ทั้งในกรณีดินผสมน้ำทะเลและน้ำเปล่า ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ

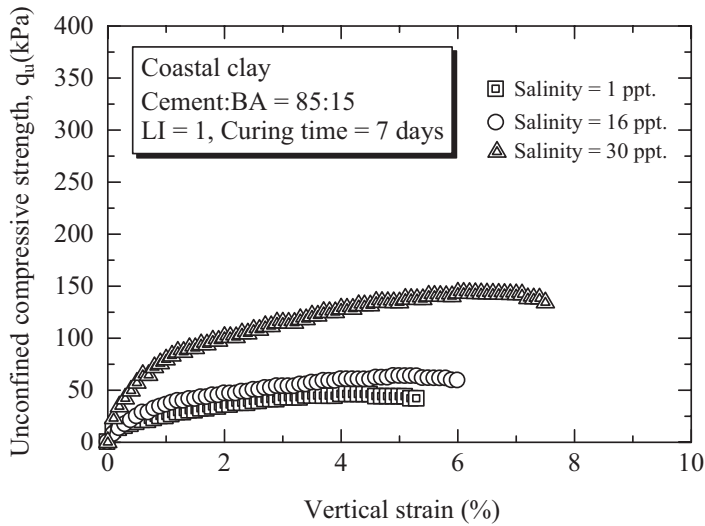


รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินอ่อนชายฝั่งผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลในน้ำทะเล

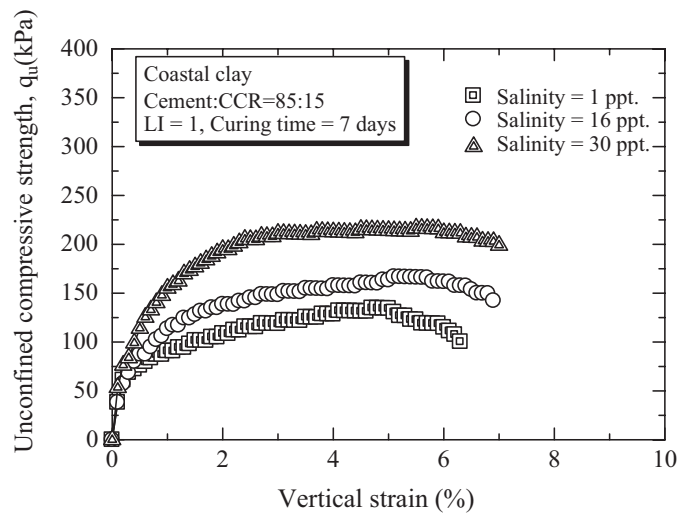


รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินอ่อนชายฝั่งผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลในน้ำเปล่า

4.2.2 ดินชายฝั่งทะเลผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าชีวมวลหรือปูนซีเมนต์กับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 15% โดยน้ำหนักดินแห้ง



รูปที่ 9 ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวชายฝั่งผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวลที่ระดับความเค็มต่างๆ



รูปที่ 10 ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวชายฝั่งผสมปูนซีเมนต์และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ระดับความเค็มต่างๆ

จากรูปที่ 9 และรูปที่ 10 พบว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนชายฝั่งทะเลผสมปูนซีเมนต์และถูกแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลหรือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อัตราส่วนการแทนที่ที่เท่ากันคือ 15 เปอร์เซ็นต์ นั้นมีค่ากำลังสูงขึ้นตามระดับความเค็มที่มากขึ้น ซึ่งมีพฤติกรรม

เหมือนดินชายฝั่งผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวล และพบว่าดินชายฝั่งผสมวัสดุประสานที่อายุบ่มเดียวกัน ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากันนั้นดินชายฝั่งผสมปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวลมีค่ากำลังอัดแกนเดียวต่ำกว่าดินที่ผสมปูนซีเมนต์และกากแคลเซียมคาร์ไบด์

กำลังอัดที่แตกต่างกันอาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุเชื่อมประสานทั้งสองแตกต่างกัน จากสมบัติพื้นฐานของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งมีสมบัติทางเคมีและโครงสร้างคล้ายคลึงกับปูนขาว (Hydrate lime) ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับดินเหนียวสามารถอ้างอิงได้เช่นเดียวกับปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับดินเหนียว [20] และจากการอ้างอิงงานวิจัยของศุภกิจ นนทนานันท์และกมล อมรฟ้า, 2006 [21] กล่าวว่าเนื่องจากในเบื้องต้นปูนขาวจะช่วยปรับปรุงสมบัติดินโดยมีส่วนทำให้ ซิลิกาและอลูมินาในดินเหนียวจะละลายออกมามากขึ้น ในขณะที่เดียวกันปูนขาวจะช่วยเพิ่ม Ca^{2+} และมีการดูดซับ Cation ของ Calcium และเม็ดดินจะดูดเอา $Ca(OH)_2$ เอาไว้ ที่จะทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทั้งหมด กลไกดังกล่าวนี้มีส่วนเร่งการทำปฏิกิริยาของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ เช่น CSH ในลำดับต่อมา ช่วยทำให้ดินมีความเชื่อมประสานได้ดียิ่งขึ้นแม้ในระยะบ่มระยะสั้นก็ตาม อีกทั้งเกิดสภาพความเป็นด่างซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องในระยะยาวเพราะสภาพด่างจะทำให้เกิดการแยกตัวของดินเหนียวและผลิตสารประกอบช่วยยึดประสานขึ้นอีกในระยะยาว ที่เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงส่งผลด้านกำลังที่มากกว่า ซึ่งต่างจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในงานวิจัยของรุ่งลวัลย์, 2010 [22] และ Horpibulsuk et al., 2009 [7] ที่กล่าวว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะแปรผันกับปริมาณผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน ซึ่งเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลของการกระจายกลุ่มดินซีเมนต์ อันเนื่องมาจากเถ้าลอยทำให้ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานจะเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดลดลงและกำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น ดังนั้นในช่วงระยะเวลาบ่มสั้นยังคงมีการพัฒนา กำลังค่อนข้างต่ำเพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยใส่เข้าไปเพิ่มทำหน้าที่กระจายกลุ่มดินซีเมนต์เท่านั้น

5. สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มระดับความเค็มหรือปริมาณเกลือของของเหลวในช่องว่างระหว่างมวลดินนั้นมีผลทั้งต่อสมบัติพื้นฐานและสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวชายฝั่งทะเล ระดับความเค็มที่สูง

ขึ้นจะส่งผลให้ค่าขีดจำกัดเหลว พิกัดพลาสติก ดัชนีความเป็นพลาสติก ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินเหนียวชายฝั่งมีค่าลดลงและในทางตรงกันข้ามจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและกำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเค็มจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวแบบระเกะระกะหรือการจัดกระจาย (Flocculation) มากขึ้นส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินสูงขึ้น และยังพบว่าการเตรียมตัวอย่างแบบแห้งทำให้ค่าขีดจำกัดเหลวและดัชนีความเป็นพลาสติกมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การเตรียมตัวอย่างแบบเปียก อย่างไรก็ตามพิกัดพลาสติกมีความแตกต่างน้อยระหว่างการเตรียมแบบเปียกและแบบแห้งและจากผลการทดสอบทั้งหมด แสดงให้เห็นปัจจัยในการพัฒนา ค่ากำลังอัดที่สำคัญอันดับแรกคือปฏิกิริยา Cation exchange ระหว่างดินเหนียวกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์หรือปูนซีเมนต์ อันดับต่อมาคือปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นได้ดีนั้นต้องมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระมากพอที่จะทำปฏิกิริยา

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติและศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการอนุเคราะห์ช่วยเหลือการทดสอบโครงสร้างจุลภาค

7. เอกสารอ้างอิง

1. Bjerrum, 1954, "Geotechnical properties of Norwegian Marine Clays", *Geotechnique*, Vol. 4, pp. 49-69.
2. Jose, B. T., Sridharan, A. and Abraham, B. M., 1988, "A study of geotechnical properties of Cochin marine clays", *Marine Geotechnology*, Vol. 7, pp. 189 - 209.
3. Ohtsubo, M., Egashira, K., Koumoto, T. and Bergado, D.T., 2000, "Mineralogy and chemical and their correlation with geotechnical index properties of Bangkok clay Comparison with Ariake clay",

Soils and Foundations, Vol. 40, No. 1, pp. 11-21.

4. Rao, G., Sridharan, A. and Chandrakaran, S., 1989, "Influence of drying on the liquid limit behavior of a marine clay", *Geotechnique*, Vol. 39, No. 4, pp. 715-719.

5. Sridharan, A. and Miura, N., 2000, "Physico chemical and engineering behaviour of Ariake clay and its comparison with other marine clays", *Proc. Int. Symposium, IS Yokohama 2000*, 2, pp. 203-213.

6. Sridharan, A., El-Shafei, A. and Miura, N., 2000, "A study on the dominating mechanisms and parameters influencing the physical properties of Ariake Clay", *Jl. of Int. Association of Lowland Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 55-70.

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

8. Horpibulsuk, S., Rachan, R., Suddepong, A., 2011a, "Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 4, pp. 1521- 1531.

9. 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.

10. Tanalapsakul, A., 1998, "*Document from M Thai industrial company limited*" May. M Thai Industrial Co.Ltd., Samutsakorn, Thailand. (in Thai)

11. Horpibulsuk, S., Phojan, W., Suddepong, A., Chinkulkijniwat, A. and Liu, M.D., "Strength development in blended cement admixed saline clay", *Applied Clay Science*. (In Press).

12. Di Maio and Fenelli, 1994, "Residual

strength of kaoline and bentonite: the influence of their constituent pore fluid", *Geotechnique*, Vol.44, No. 4, pp. 217 – 226.

13. Frydam I.R. and Ehrenreich, T., 1977, "Stabilization of heavy clay with potassium chloride", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 8, pp. 95-107.

14. Wood, K.B., 1971, "*Highway Engineering Hand Book*". Chapter 21. New York: McGraw Hill Book Company, Inc.

15. Lambe, T.W., 1958, "The structure of compacted clay", *Journal of Soil Mechanics and Foundation*, Vol. 84, pp. 55-70.

16. Tiwari, B., Tuladhar, G., and Marui, H., 2005, "Variation in residual shear strength of the soil with the salinity of pore fluid", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering@ASCE*, Vol.131, No. 12, pp. 1445-1456.

17. Mitchell, J. K., 1993, *Fundamentals of soil behavior*, 2nd Ed., Wiley, New York.

18. Sridharan, A. and Rao, G.V., 1973, "Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept", *Geotechnique*, Vol. 23, No. 3, pp. 359 - 382.

19. T. Abood, A. B. Kasa and Z. B. Chik, 2007, "Stabilisation of silty clay soil using Chloride Compounds", *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 102-110.

20. Cardoso, F. A., Fernandes, H. C., Pileggi, R. G., Cincotto, M. A. and John, V. M., 2009, "Carbide lime and industrial hydrated lime characterization", *Science Direct, Powder Technology*, Vol. 195, pp. 143-149.

21. Nontananandh, S. and Amornphar, K., 2006, "Strength development of soil stabilized with cement and lime", *The 44th Proceedings of the Kasetsart University conference*, Thailand. (in Thai)

22. Rachan, R., 2010, "The influence of biomass ash on strength development and microstructure of blended cement admixed soft Bangkok clay", *KMUTT Research & Development Journal*, Vol.33, No.2, pp. 105-120. (in Thai)