

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันสิ่งก่อสร้างต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเส้นทางคมนาคมตลอดจนการขุดเจาะอุโมงค์รวมไปถึงการสร้างเขื่อนกักเก็บน้ำ และสิ่งปลูกสร้างอื่นๆ หรือแม้กระทั่งงานฐานรากอาคารที่ก่อสร้างในเขตกรุงเทพฯ รวมถึงในเขตลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง จะเกิดปัญหาของการก่อสร้างในเรื่องการทรุดตัวของดิน ส่งผลทำให้สิ่งก่อสร้างต่างๆ เหล่านั้นได้รับผลกระทบและเกิดความเสียหาย สาเหตุหลักของปัญหาดังกล่าว เกิดจากคุณสมบัติความสามารถในการรับกำลังของดินในบริเวณที่ก่อสร้างมีค่าต่ำ และมีการยุบตัวค่อนข้างสูง ทำให้สิ่งก่อสร้างในบริเวณนั้นขาดความเสถียรภาพจนก่อให้เกิดการแตก (Crack) และทรุดตัวปรากฏให้เห็นเป็นจำนวนมากดังนั้นแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงคุณภาพของดิน เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรับน้ำหนักและมีคุณสมบัติในเชิงวิศวกรรมที่ดี เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยแก้ไขและลดปัญหาการทรุดตัวดังกล่าวได้ เพื่อให้สิ่งปลูกสร้างมีอายุการใช้งานที่ยาวขึ้นและเป็นการช่วยประหยัดทั้งเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้อีกด้วย

เทคนิคในการแก้ปัญหาดังกล่าวมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ PVD, Cement Column, Shallow Subgrade Stabilization, Lightweight Material แต่ วิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน คือ การผสมดินเข้ากับซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วทำการบด [29], [30] และ [31] แต่มีหลายพื้นที่ที่มีการเจือปนของสารละลายซัลเฟต ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นอันตรายต่อซีเมนต์ เพราะสารละลายซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมอลูมินไฮดรอกไซด์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับซีเมนต์ (ปฏิกิริยาไฮเดรชัน) ทำให้ความสามารถในการเป็นวัสดุประสานของซีเมนต์ลดลง [28] ซึ่งจะทำให้คุณภาพของดินซีเมนต์ที่ได้นั้นลดลง การป้องกันอิทธิพลจากซัลเฟต อาจทำได้โดยการ ลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และไตรแคลเซียมอลูมินไฮดรอกไซด์ วัสดุปอซโซลาน ที่ผ่านมา อภิชาติ และคณะ, 2550 [31] ได้ทำการศึกษาการนำเถ้าแกลบมาแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงดินเหนียวปนดินตะกอนในสภาพธรรมชาติ ในจังหวัดนครราชสีมา จากการศึกษาพบว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมชีวมวลที่ผ่านการบดและไม่ผ่านการบด ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยชีวมวลในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 จะมีค่าสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์เพียงอย่างเดียว การศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การทดแทนซีเมนต์ด้วยชีวมวลในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้ดินมีกำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการผสมซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยชีวมวล และอัตราผสมของสารละลายซัลเฟตในการปรับปรุงกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยชีวมวล และอัตราส่วนผสมของสารละลายซัลเฟตในดินเหนียวที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอายุการบ่มของดินที่นำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในดินเหนียวที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตผสมชีวมวลในดินเหนียว ตามปริมาณ ที่กำหนดที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวที่ได้ เพื่อแสดงความสามารถของดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตผสมชีวมวล ในการนำมาประยุกต์ใช้งานกับโครงสร้างชั้นทาง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ใช้ดินเหนียวอ่อนจากบริเวณการก่อสร้างอาคารสูง 4 ชั้น ถนนท้ายบ้าน อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ

1.3.2 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (ตราอินทรี)

1.3.3 ใช้ชีวมวล (ถั่วแกลบ) ที่เผาไหม้สมบูรณ์แล้ว จากอำเภอบางขุนทด จังหวัดพิจิตร

1.3.4 ใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในระดับความเข้มข้น 40.36 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

1.3.5 ห้อตราส่วนผสมระหว่างดินเหนียวกับปริมาณน้ำที่เหมาะสม

1.3.6 ทดสอบคุณสมบัติการรับกำลังอัดแกนเดียวที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักดินแห้ง โดยแปรผันตามปริมาณของซีเมนต์และถั่วแกลบในอัตราส่วน 100:0, 90:10, 80:20 และทดสอบที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

1.3.7 ศึกษาค่ายุบตัวของดินตัวอย่างในการทดสอบการรับกำลังอัดจนถึงค่าอัตราการเปลี่ยนรูป ร้าง, Strain เท่ากับร้อยละ 2 ในทุกอัตราส่วนผสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยชีวมวลและอัตราส่วนผสมของสารละลายซัลเฟตในดินเหนียวที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว

1.4.2 ลดต้นทุนการก่อสร้างด้วยการปรับลดปริมาณซีเมนต์ลง โดยนำวัสดุเหลือใช้ที่มีอยู่ในท้องถิ่น มาประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์

1.4.3 สามารถช่วยลดมลภาวะด้านสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่ใช้สารเคมีที่อาจมีฤทธิ์ตกค้าง

1.4.4 ส่งเสริมให้เกิดการนำเอาวัสดุในท้องถิ่น ที่เป็นวัสดุขจัด (Waste material) มาใช้ให้เกิดประโยชน์

บทที่ 2

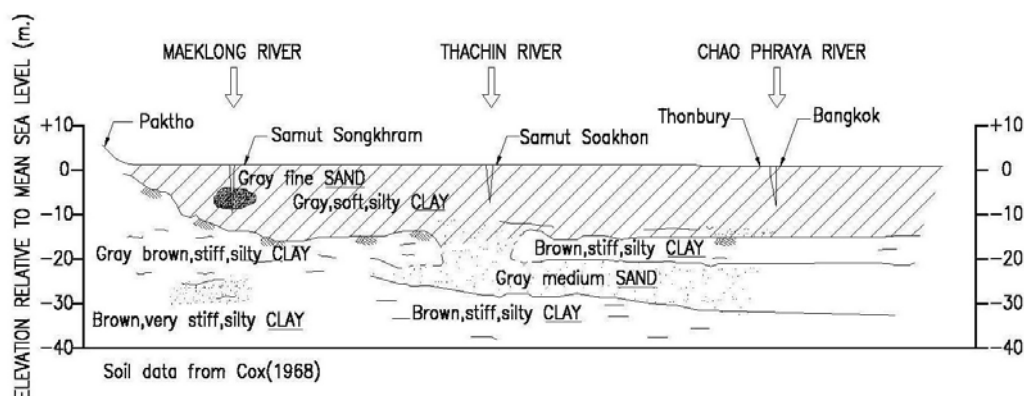
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย คือ ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียว, ปูนซีเมนต์, ชีวมวล, และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

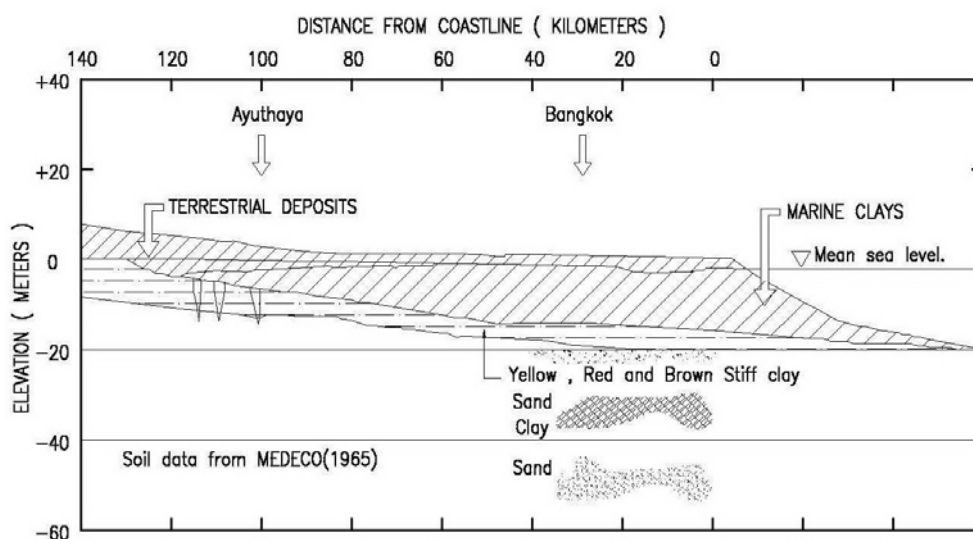
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok Clay)

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เป็นดินเหนียวที่มีปริมาณความชื้นสูง มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำมีค่าความเหนียวหนืดสูงและมีค่าการทรุดตัวสูง ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จะเกิดในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑลความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนจะแปรเปลี่ยนตั้งแต่ 4 ถึง 5 เมตร ไปจนถึงกว่า 20 เมตร ซึ่งชั้นดินอ่อนที่หนามากๆ เช่นนี้ มักจะพบตามแนวถนนเลียบริมชายฝั่งทะเลและบริเวณร่อนน้ำเก่า รูปตัดขวางของชั้นดินตามแนวถนนสายธนบุรี-ปากท่อได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 และรูปตัดขวางของชั้นดินในแนว เหนือ-ใต้ของที่ราบลุ่มภาคกลางได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ผลการทดสอบดินในอดีตที่ผ่านมาพบว่าดินเหนียวอ่อนในกรุงเทพฯ แสดงคุณสมบัติของ Normally Consolidated Clay หรือ Slightly Over – Consolidated Clay ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของชั้นดินเหนียวในแต่ละบริเวณ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จัดได้ว่าเป็นดินที่สร้างปัญหาในงานทางหลวงมานานหลายสิบปี การก่อสร้างถนนในพื้นที่ของดินเหนียวอ่อนของกรุงเทพฯ พบว่ามีปัญหาหลายอย่าง ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อการออกแบบ แผนการก่อสร้าง ราคาก่อสร้าง ราคาจ้างงานซ่อมบำรุง และพฤติกรรมของถนนภายหลังเปิดการจราจร โดยรวม ตลอดจนอายุการใช้งานของถนน



รูปที่ 2.1 รูปตัดตามแนวถนนสาย ธนบุรี – ปากท่อ [32]



รูปที่ 2.2 รูปตัดของที่ราบลุ่มเจ้าพระยาในแนวเหนือ – ใต้ [32]

2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

คุณสมบัติเบื้องต้นของดินเหนียว ก่อนที่จะทำการปรับปรุงนั้นมีความสำคัญมากในการใช้เปรียบ เทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว กับดินเหนียวธรรมชาติ จากตารางที่ 2.1 แสดงถึงค่า Atterberg's Limit เมื่อนำค่า ไปทำการเปรียบเทียบกับเส้น A-Line จะพบว่ามีความอยู่เหนือเส้น A-Line เล็กน้อย ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญในการทำนายความสามารถในการรับแรงอัดของดินเหนียวโดยใช้ความสัมพันธ์ของ Skempton [17] คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ ความแตกต่างกันระหว่างค่าความชื้นตามธรรมชาติกับค่าขีดจำกัดเหลว (LL) โดยที่ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) มีค่าเท่ากับ 103% แต่ค่าความชื้นตามธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 76-84% ซึ่งมีความแตกต่างนี้ สามารถบ่งชี้ได้ถึงความสามารถในการสร้างขึ้นมาใหม่ของดินเหนียว ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 2.68 และค่าอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น มีค่า เท่ากับ 2.2 ค่าอัตราส่วนช่องว่างจะมีความสอดคล้องกับปริมาณน้ำ คือเมื่อปริมาณน้ำมีค่าเท่ากับขีดจำกัดเหลว(LL) จะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนช่องว่างได้เท่ากับ 2.8

2.1.3 กำลังรับแรงเฉือนและตัวแปรอื่นๆของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวจะได้อาจมาจากการทดสอบกำลังแรงอัดทิศทางเดียวซึ่งมีค่า S_u อยู่ระหว่าง 16-17 kpa ขณะที่ Undrained Modulus, E_u อยู่ระหว่าง 1500-1700 kPa Undrained Modulus สามารถหาได้จากค่า Field Vane Shear Strength (S_{uv}) ที่ยังไม่ได้ปรับแก้โดย $E_u = \alpha S_{uv}$ ดินเหนียวกรุงเทพฯ จะมีค่า α อยู่ระหว่าง 70-250 ผลจากการวัดการ

ทรุดตัวของถนนสายบางนา-บางปะกง ได้ α เท่ากับ 150 พบว่า α เท่ากับ 125 โดยมาจากการวิเคราะห์ผลการทรุดตัวของดินกันทางถนนสายจะเชิงเตรา

ตารางที่ 2.1 Characteristics values of the physical properties of soft Bangkok clay [19]

Properties	Characteristics Value
Consistency Index	
Liquid Limit, LL (%)	103
Plastic Limit, PL (%)	43
Plasticity Index, PI	60
Liquidity Index, LI	0.62
Water Content, w (%)	76-84
Grain Size Distribution	
Clay (%)	69
Silt (%)	28
Sand (%)	3
Total Unit Weight, (kN/m ³)	14.3
Dry Unit Weight, (kN/m ³)	7.73
Initial Void Ratio, e	2.2
Color	Dark Gray
Activity	0.87
Sensitivity	7.4

สำหรับการวิเคราะห์การทรุดตัวในระยะยาวจะใช้ค่า Drained Modulus, E' แทน Undrained Modulus, E_u โดย E' จะมีความสัมพันธ์กับ E_u ดังนี้

$$E' = 0.36 E_u \text{ for weathered clay}$$

$$E' = 0.26 E_u \text{ for very soft clay}$$

$$E' = 0.15 E_u \text{ for soft clay}$$

$$E' = 0.57 E_u \text{ for medium stiff clay}$$

2.1.4 การปรับปรุงคุณสมบัติของดิน

วิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทดังนี้คือ

1) Granular Stabilization เป็นการรวมกันของวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเคมีและฟิสิกส์เข้าไว้ด้วยกัน

2) Chemical Stabilization เป็นวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินที่ครอบคลุมวิธีการต่างๆ ซึ่งสารประกอบทางเคมีถูกเพิ่มลงไปดินเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดิน ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นระหว่างส่วนประกอบของดินและส่วนผสมเพิ่ม

3) Thermal Stabilization เป็นวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินทางฟิสิกส์ ซึ่งสามารถใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของดินได้ทั้งระยะสั้นและระยะยาว ได้แก่ Heating และ Freezing

4) Electrokinetic Stabilization เป็นวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยใช้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าเพื่อให้ดินเม็ดละเอียดหลุดตัวได้ง่ายขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพของดิน โดยวิธีการนำซีเมนต์และสารผสมเพิ่มมาผสมลงในดินเพื่อต้องการ ให้ดินมีคุณสมบัติในเชิงวิศวกรรมดีขึ้น มีวิธีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีก็มีประโยชน์ในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน การใส่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ เพราะเป็นวิธีที่สามารถใช้ในการปรับปรุงดินได้เกือบทุกประเภท ปูนซีเมนต์จะเข้าไปทำการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและโครงสร้างของดิน แต่ผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินจะแตกต่างกัน แต่ถ้าคุณสมบัติของดินต่างกันแม้ว่าจะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เท่ากันและดินจะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่เหมือนกันก็ตามผลก็อาจจะแตกต่างกันก็ได้

2.2 วิวัฒนาการของดินซีเมนต์

Davidson [4] ได้บันทึกเรื่องวิวัฒนาการของการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมในดินเริ่มขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1915 เมื่อมีการก่อสร้างถนน Oak ในเมือง Saratosa รัฐ Florida โดยการขุดเอาเปลือก Shell ในอ่างขึ้นมาผสมกับทรายและปูนซีเมนต์แล้วทำการบดด้วยรถอัดไอน้ำขนาด 10 ตัน แทนการทำถนนด้วยคอนกรีต เนื่องจากเครื่องผสมคอนกรีตเสีย ในช่วงทศวรรษที่ 1920 มีหลายๆ ที่ทำการถมทางหลวง ประกอบด้วยมลรัฐ Iowa, South Dakota, Ohio, California และ Texas ได้ดำเนินการทดสอบผสมดินกับปูนซีเมนต์เพื่อใช้สร้างถนน แต่เนื่องจากในตอนนั้น ยังขาดความรู้ความเข้าใจทางด้านคุณสมบัติและพฤติกรรมของดินทำให้ไม่สามารถอธิบายทำนายผลได้ นอกจากนี้ Davidson [4] ยังได้อ้างถึงรายงานของ Mills (1935,1936) ว่าในปี 1932 Dr.C.H. Moorefield แห่งที่ทำการกรมทางหลวง มลรัฐ South Carolina ได้ทดลองนำดินซีเมนต์มาสร้างถนนหลายสาย พบว่าดินซีเมนต์เป็นวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้เป็นวัสดุสำหรับชั้น

พื้นทางของถนนและราคาถูก จากการค้นพบดังกล่าวได้กระตุ้นให้เกิดการค้นคว้าเกี่ยวกับดินซีเมนต์กันอย่างกว้างขวางมากขึ้น

Portland Cement Association [12] ได้บันทึกไว้ว่าในปี 1995 การพัฒนาของ Portland Cement Association ได้ศึกษาค้นคว้าเทคโนโลยีการอัดดิน (ซึ่งใช้มาตั้งแต่ ปีค.ศ. 1929) จนสามารถพัฒนาผลของส่วนผสมที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์กับดินหลายๆ ชนิด อีกทั้งยังสามารถหาวิธีการทดสอบที่ได้มีการพัฒนาขึ้นคือ Moisture-Density Test, Wet-Dry Test และ Freeze-Thaw Test สำหรับดินซีเมนต์ และวิธีเหล่านี้ต่อมานำมาเป็นมาตรฐานการทดสอบของ American Society for Testing Material ในปี 1944 และ American Association of State Highway Official ในปี 1945

Terrel และคณะ [18] , Davidson [4] ได้บันทึกตรงกันว่าในปี ค.ศ. 1935 South California State Highway, Bureau of Public Roads และ Portland Cement Association ได้ร่วมกันทดลองสร้างถนน โดยการใช้ดินซีเมนต์เป็นระยะทาง 1.5 ไมล์ บริเวณใกล้เมือง Johnsonville ซึ่งเป็นโครงการแรกในทางวงการวิศวกรรมที่นำดินซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุอย่างกว้างขวาง

2.2.1 ประเภทของดินซีเมนต์

Highway Research Boare' s Committee on Soil-Portland Cement Stabilization [8] ได้ให้คำจำกัดความของ Cement – Treated Soil ว่าเป็นการนำดินและปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการผสมน้ำให้เข้ากันแล้วบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด และป้องกันความชื้นไม่ให้สูญเสียไประหว่างการบ่ม ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท ตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมและตามลักษณะการใช้งาน

Soil Cement คือการนำดินมาผสมกับปูนซีเมนต์ โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 5-7 ของน้ำหนักดินแห้ง สำหรับดินประเภท Poor Grade ในกรณีที่ดินมีค่า Plasticity Index สูงอาจจะเติม ปูนขาวลงไปเพื่อลดค่า Plasticity Index ของดินลงบ้างโดยมีค่า Water Cement Ratio ต่างๆ แล้วทำการบดอัดและบ่มให้แข็งตัว โดยที่ความแข็งแรงจะพิจารณาจากความคงทนและค่ากำลังการรับแรงอัดของดินตามมาตรฐานของ Portland Cement Association (PCA) หรือ ASTM ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมกับดินจะต้องสูงพอจนทำให้ได้กำลังแรงอัดหรือกำลังแบกทานตามที่กำหนด

Cement – Modified Granular Soil Mixture เป็นการผสมกันระหว่างปูนซีเมนต์และดินจำพวกทรายและกรวด ซึ่งมีค่า Plasticity สูงเกินไป ทั้งนี้เพื่อต้องการลดค่า Plasticity และการดูดซึมน้ำของดินให้ต่ำลง ดินซีเมนต์ประเภทนี้จึงใช้ทำเป็นวัสดุรองพื้นทางและชั้นทางของถนน โดยที่ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ประมาณร้อยละ 1-6 ของน้ำหนักดินแห้ง

Cement – Modified Silty – Clay Soil เป็นการผสมกันระหว่างปูนซีเมนต์กับดินประเภท Silty – Clay เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการบวมและการหดตัวของดิน โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 1-3 ของน้ำหนักดินแห้ง

Plastic Soil – Cement เป็นดินผสมปูนซีเมนต์ที่จะต้องมียาน้ำมากพอที่จะทำให้ส่วนผสมมี Workability สูงพอที่จะนำมาใช้งานคาบปูลงไปในพื้นที่ที่มีความลาดเอียง

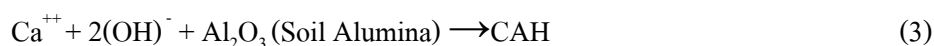
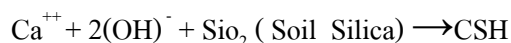
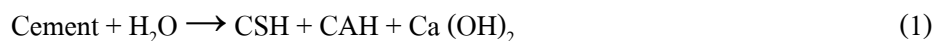
Cement – Treated Soil Slurry เป็นปูนซีเมนต์ที่ผสมทรายและน้ำเหมาะสำหรับใช้ในงานซ่อมถนนคอนกรีต

2.2.2 กลไกการปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยซีเมนต์

Davidson [4] ได้บันทึกไว้ว่าคุณสมบัติที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นภายหลังจากการผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียวขึ้นจะทำให้เกิดการลดลงของค่า Plasticity โดยเหตุผลน่าจะมาจากการแยกตัวของ Calcium Ions ในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กลไกที่เกิดขึ้นไม่มาจาก Cat ion Exchange หรือก็มาจากการจับกลุ่มเพิ่มขึ้นของ Cat ion ในดินเหนียว จากขบวนการทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าที่มีอย่างหนาแน่นบริเวณรอบๆ ของอนุภาคดินเหนียว ประจุไฟฟ้าจะมีการดึงดูดเข้าหากัน เป็นเหตุทำให้อนุภาคดินเหนียวมีการรวมตัวกันตกตะกอนหรือเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และอนุภาคของดินที่ใหญ่ขึ้นนี้จะแสดงคุณสมบัติคล้ายกับดินตะกอนมีค่า Plasticity หรือมีค่าความยึดเหนี่ยวต่ำการยึดประสาน ในการบดอัด Cement Treated Soil ปฏิกิริยา Hydration ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นแตกต่างกัน โดยผลของการปฏิกิริยาทำให้เม็ดดินเกิดการเกาะยึดกันเป็นก้อน การยึดเกาะนี้เกิดขึ้นจากการพัฒนาของแรงยึดเกาะทางเคมีที่มีอยู่ในธรรมชาติของดิน ในมวลดินที่มีขนาดหยาบ เมื่อเกิด Cement Hydration การยึดเกาะกันของเม็ดดินจะคล้ายกับคอนกรีตต่างกันว่า Cement Paste จะไม่ไปช่วยอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดินแรงเชื่อมแน่นยึดติดกันจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางด้าน Mechanical Interlock และ Chemical Cementation มวลดินที่มีขนาดเดียวกันตลอดจะมีพื้นที่สัมผัสน้อยการใช้ปูนซีเมนต์จะต้องมีปริมาณมากขึ้นกว่าดินที่มีขนาดแตกต่างกัน

Herzog และ Mitchell [7] ได้ศึกษาปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับดินเหนียวพบว่าเกิด Cement Hydration เป็นการเกิด CSH และ CAH ในช่วงแรกและปฏิกิริยาระหว่าง Silica และ Alumina ที่มีอยู่ในเม็ดดินกับ Calcium Ion ที่เกิดจาก Released Hydrated Lime จะเป็นกระบวนการที่จะทำให้เกิด CSH และ CAH ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลายาวนานกว่า จึงทำให้กำลังแรงอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น

Moh [11] ได้ศึกษาปฏิกิริยาประกอบของแร่ประกอบของดิน กับปูนซีเมนต์และสารผสมเพิ่มจำพวกโซเดียม พบว่าการเกิดปฏิกิริยาของดินซีเมนต์สามารถเขียนสมการทางเคมีได้ดังนี้



Saitoh (1985) [16] ได้ศึกษาผลการผสมปอร์ตแลนด์ปูนซีเมนต์ (Ordinary Portland Cement, OPC) กับ Marine Clay พบว่าการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์เป็นไปตาม Diagram ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็นสามขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC จะทำให้เกิด $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ประมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ขั้นที่ 2 ดินเหนียวจะถูกยึดเคลือบผิวด้วย $\text{Ca}(\text{OH})_2$

ขั้นที่ 3 เมื่อแร่ดินเหนียวผสม $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ระหว่างแร่ดินเหนียวกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$

ผลสุดท้ายของการปรับปรุงดินตามวิธีนี้จะทำให้ดินแข็งแรงขึ้น รวมกันเป็นเม็ดโตขึ้นเนื่องจากขบวนการ ไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก การปรับปรุงดินโดยผสมผลึกจะประสบความสำเร็จ มากน้อยแค่ไหน ขึ้นอยู่กับว่าดินที่เราทำการปรับปรุงคุณภาพสามารถเคลือบผิวด้วย $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ได้มากน้อยแค่ไหน และปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือไม่ จากการศึกษาพบว่าในการปรับปรุงดินโดยวิธีการผสมผลึกด้วย OPC โดยผสม Blast Furnace Slag จะให้ผลดีกว่าผสม Quicklime และ Slaked Lime

2.2.3 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell และ Jack [10] ได้เสนอแนวความคิดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินภายหลังจากผสมกับปูนซีเมนต์ลงไปแล้วดังแสดงในรูปที่ 2.4 แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ

2.2.3.1 ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำเกินไปเป็นช่วงที่ปูนซีเมนต์ไม่เกิดปฏิกิริยา Hydration แต่จะเริ่มเกิดปฏิกิริยา Cement Hydration เมื่อปูนซีเมนต์เข้าไปผสมกับอนุภาคของดิน

2.2.3.2 ภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา Hydration จะเริ่มเกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ซึ่งจะทำให้เกิด Cement Gel เข้าไปแทรกซึมตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินและ Released Lime เริ่มทำปฏิกิริยากับดินที่เป็น Active Soil Silica และ Active Soil Alumina ในสารละลายจะเป็นผลให้เกิดการแยกตัวของ Soil Silica และ Soil Alumina ในดินและผลของปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะแผ่กระจายไปตามอนุภาคของดิน

2.2.3.3 ภายใต้การบ่มระยะยาว อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเกิดกระบวนการ Cement Hydration อย่างสมบูรณ์มีผลทำให้ปริมาณ Cement Gel และขอบเขตการแทรกซึมของ Cement Gel แผ่กระจายทั่วไป ซึ่งมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น

จากที่กล่าวมาทั้ง 3 ขั้นตอนจะพบว่าขั้นตอนที่ 1 จะไม่เป็นจริงตามธรรมชาติแต่จะเกิดไปพร้อมกับขั้นตอนที่ 2 เลย เพราะว่าปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำความชื้นในมวลดินในอากาศก็จะทำปฏิกิริยา Cement Hydration เลยอย่างรวดเร็ว

2.2.4 คุณสมบัติของดิน

Davidson [4] พบว่าส่วนประกอบทางเคมีของดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ Cat ion ที่มีอยู่ในเม็ดดิน โดยดินที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่จะทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนไป เช่น ดินที่มี Sulphate ผสมอยู่จะก่อให้เกิดการแข็งตัวช้าและเกิดการบวมตัว

Terrel และ คณะ [18] ได้อธิบายเรื่องดินที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติกล่าวว่าดินที่มีสภาวะความเป็นกรด ด่าง และ กลาง ยังคงมีการตอบสนองที่ดีต่อการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยปูนซีเมนต์ แต่ถ้าเป็นประเภท Organic Compounds เช่น Nucleic และ Dextrose Acid จะทำให้น่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันและกำลังที่ได้จะลดลง กล่าวคือ Organic จะดูดซับ Calcium Ions ไว้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันน่าเป็นผลทำให้ค่า pH ของดินลดลง และยังไปยับยั้งขบวนการแข็งตัวของดินผสมปูนซีเมนต์

Felt [5] ได้กล่าวว่า คุณสมบัติที่ได้จากการบดอัดดินซีเมนต์ และปฏิกิริยา ที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่นำมาใช้ ความแตกต่างในด้านคุณสมบัติ และปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์จะแปรผันเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบทางเคมีของดิน ตัวอย่างความแตกต่างที่เห็นได้ชัดคือการใช้ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณสมบัติดิน จะมีประสิทธิภาพน้อยเมื่อใช้กับดินชั้นบน (Topsoil) แต่เมื่อใช้ดินชั้นก้น (Patent Material) จะมีประสิทธิภาพมากในแหล่งดินเดียวกัน

2.2.4.1 ปริมาณดินเหนียวและแร่ประกอบดินเหนียวที่มีอยู่ในดินซีเมนต์

Reinhold [20] ได้ทดลองนำเอาทรายมาผสมดินเหนียวโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณดินเหนียวตั้งแต่ร้อยละ 0 – 100 แล้วผสมกับปูนซีเมนต์ที่ปริมาณคงที่ จากนั้นนำไปทดลองหาลำดับรับแรงอัด พบว่าปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น ค่า Modulus of Elasticity จะลดลงนั้น แสดงว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังแรงอัดมีค่าลดลง

Davidson, Pitre, Mateos และ Kalankamary [33] ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณดินเหนียวที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ ในการทดสอบใช้ทรายผสมกับดินเหนียวที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่ร้อยละ 25 กล่าวคือใช้ทรายผสมกับดินเหนียวดังนี้ร้อยละ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 และดินเหนียวที่ใช้เป็นดินเหนียวชนิด Kaolinite, Illite และ Montmorillonite

ได้ผลดังรูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวกับค่ากำลังแรงอัดผสมปูนซีเมนต์ 12% อธิบายผลว่าที่ปริมาณสัดส่วนนี้เป็นสัดส่วนผสมที่กลมกลืนกันจะก่อให้เกิดส่วนผสมแบบ Well Grade ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นสูงสุด ส่งผลทำให้ได้ค่ากำลังสูงสุดด้วย และนอกจากนี้ยังอธิบายอีกว่าดินเหนียวชนิด Montmorillonite ยังให้ค่ากำลังที่มีแนวโน้มสูงกว่า ดินเหนียวชนิด Illite และ Daolinite ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าในดินเหนียวชนิด Montmorillonite จะมีค่า Surface Activity สูงมาก ซึ่งจะมีส่วนช่วยเหลือในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้ดี

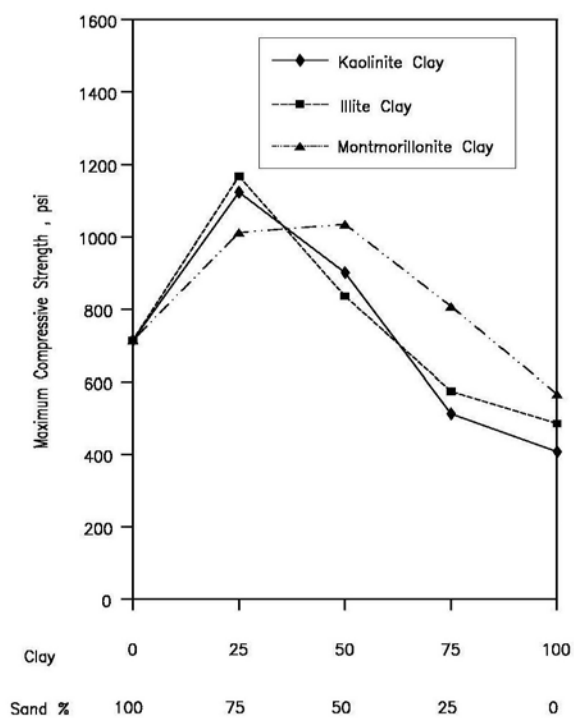
Grimer และ Krawczyk [6] ได้กล่าวว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดกับอายุ (Log Seale) ของดินซีเมนต์ที่ผสมร้อยละ 10 พบว่า Uniform – Sand ที่ไม่มีดินเหนียวผสมจะให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ถ้าเป็น Silty – Clay จะให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงถึงเพียง อายุ 28 วัน และจากนั้นมีการเพิ่มขึ้นของกำลัง เชื่อว่าน่าจะมาจากอิทธิพลของปฏิกิริยาของดินเหนียวที่ผสมอยู่กับ Hydrated Lime ที่แยกตัวจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และนอกจากนั้นการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเร็วอีกด้วย

2.2.4.2 ค่า Plasticity Index ของดิน

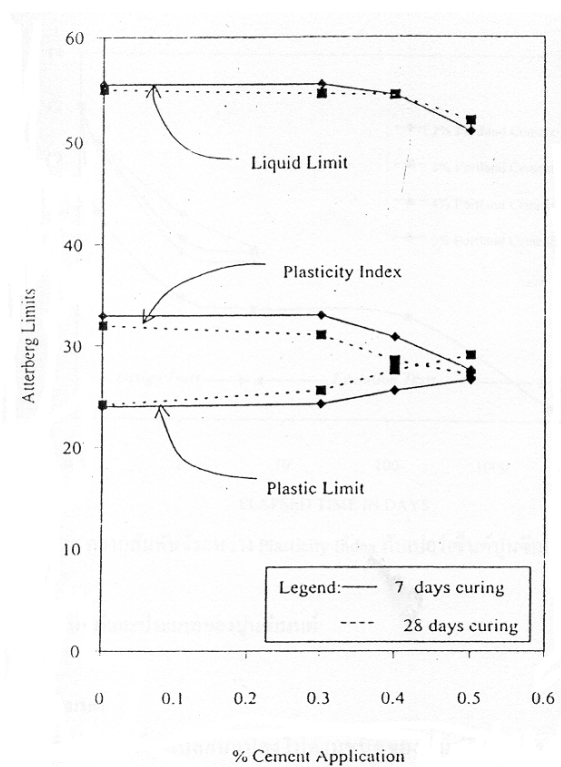
Terrel และคณะ [18] ได้อธิบายว่าดินที่มีค่า Plasticity Index ตั้งแต่ระดับต่ำถึงปานกลางจะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในการปรับปรุงคุณภาพได้ดี แต่ถ้าดินนั้นมีค่า Plasticity Index มากกว่าร้อยละ 30 เป็นผลทำให้การผสมนั้นกับปูนซีเมนต์มีความยากลำบากมากขึ้น ความยากในการผสมลดต่ำลงได้โดยการผสมปูนขาวก่อนลำดับแรก จะช่วยให้ค่า Plasticity Index ของดินลดลง และนอกจากนั้นการเพิ่มอุณหภูมิยังทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเร็วอีกด้วย

Awal [1] ได้อธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่า Plasticity Index ของดินผสมปูนซีเมนต์ที่เป็นผลจากการผสมปูนซีเมนต์ได้ผลแสดงรูปในที่ 2.4 พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์จะมีผลทำให้ดินมีการเพิ่มค่า Plastic Limit เล็กน้อย แต่จะทำให้มีการลดลงของค่า Liquid Limit และเป็นผลทำให้ Plasticity Index มีค่าลดลง

Redus [15] ได้ทำการศึกษาดินซีเมนต์ที่ใช้เป็นพื้นทางของสนามบินและได้ทำการทดสอบ Atterber's Limit พบว่าปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดการลดลงของค่า Plasticity Index ของวัสดุและการลดลงจะเป็นไปอย่างถาวร จำนวนการลดลงจะแปรผันตรงกับร้อยละของปูนซีเมนต์ที่ใช้ และส่วนระยะเวลาที่ใช้สำหรับการลดลงจะแปรผกผันกับร้อยละของปูนซีเมนต์ที่ใช้ และเมื่อปูนซีเมนต์ที่ใช้้น้อยกว่าหรือเทียบเท่ากับร้อยละ 5 หมายความว่าในช่วงอายุต้นๆ ค่า Plasticity Index จะลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆ ลดลงช้าๆ เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวกับค่ากำลังแรงอัดผสมปูนซีเมนต์ 12% [33]



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Atterberg's Limit กับเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ [1]

2.3 ปูนซีเมนต์

ปริมาณปูนซีเมนต์และประเภทของปูนซีเมนต์

ก. ปริมาณปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปปริมาณปูนซีเมนต์จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของดิน ปริมาณสารเคมีในดิน และชนิดของปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพ

Felt [5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณปูนซีเมนต์ ชนิดของดิน โดยทำการทดสอบ แรงอัดพบว่ากำลังแรงอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่ จะมี กำลังแรงอัดสูงกว่าดินที่มีขนาดเล็ก ดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่สูงจะรับกำลังได้น้อยกว่า ดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำและความคงทนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้

Portland Cement Association [13] ได้เสนอแนะว่าปริมาณปูนซีเมนต์ในดินหลายชนิด โดยจัดกลุ่มตามระบบ AASHTO และ Unified System Classification ได้ใช้สภาพธรรมชาติของดิน เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณปูนซีเมนต์ที่จะใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน

Metcalf [21] ได้บันทึกไว้ว่าค่า Unconfined Compressive Strength (q) ของดินเหนียว ผสมปูนซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นเป็นกราฟเส้นตรงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต่างกับปูนขาวจะได้ กราฟเส้นโค้งกลับ โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์กับค่า Unconfined Compressive Strength สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$(q_u)(t) = (q_u)(t_0) + K \log(t/t_0)$$

เมื่อ

$$(q_u)(t) = \text{Unconfined Compressive Strength at } t, \text{ days, kPa}$$

$$(q_u)(t_0) = \text{Unconfined Compressive Strength at } t, \text{ days, kPa}$$

$$K = 480 \text{ C สำหรับดินทราย}$$

$$= 70 \text{ C สำหรับดินเหนียว}$$

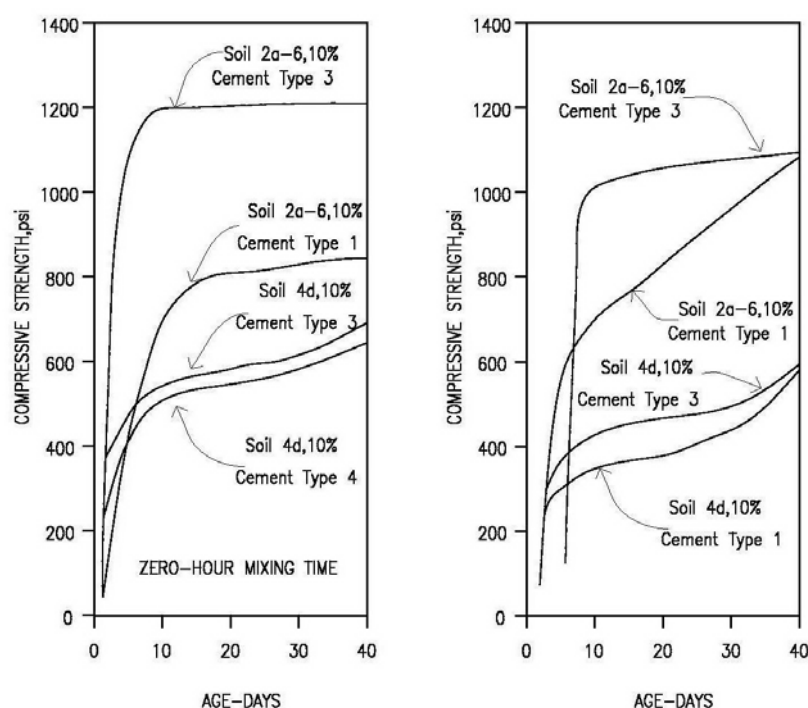
$$C = \text{ปริมาณปูนซีเมนต์เป็นร้อยละต่อน้ำหนักมวลดิน}$$

ข. ประเภทของปูนซีเมนต์

Terrel และคณะ [18] กล่าวว่ามีการนำปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆ มาใช้ปรับปรุง คุณสมบัติของดินได้เป็นผลสำเร็จ และในปัจจุบันได้มีการนำปูนซีเมนต์ประเภทสอง มาใช้แทน ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งมากขึ้น เพราะปูนซีเมนต์ประเภทสองจะมีแรงต้าน Sulfate ได้ดีกว่า ประเภทหนึ่งในขณะที่ราคาวัสดุเท่ากัน

Massachusetts Institute of Technology [22] ได้รายงานผลการทดสอบดิน Clayey Sandy Sily ผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทสาม พบว่าจะให้ค่ากำลังสูงกว่าผสมปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง ประมาณ 1.5 และ 1.3 เท่าที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ

Felt [5] ได้ศึกษาผลกระทบของประเภทปูนซีเมนต์ ที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังแรงอัด โดยได้ทดลองกับ Sandy Loam (2a – b) และ Silty Clay (2d) ดังรูปที่ 2.5 พบว่าดินที่ผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทสาม จะให้กำลังแรงอัดสูงกว่าดินที่ผสมปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มเดียวกัน และปูนซีเมนต์ประเภทสามยังให้ผลทางด้านกำลังไม่เหมือนกัน สำหรับดินแต่ละชนิดด้วย เช่น ในดิน Sandy Loam เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่สาม ตัวอย่างอายุ 7 และ 28 วัน จะให้ค่ากำลังแรงอัดที่สูงกว่าผสมปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งประมาณ 2 และ 1.4 เท่าตามลำดับ ส่วนในดิน Silty Clay ปูนซีเมนต์ประเภทสามจะให้กำลังที่สูงกว่าประเภทหนึ่งเล็กน้อย



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง, ประเภทสาม และประเภทสี่กับอายุการบ่ม [5]

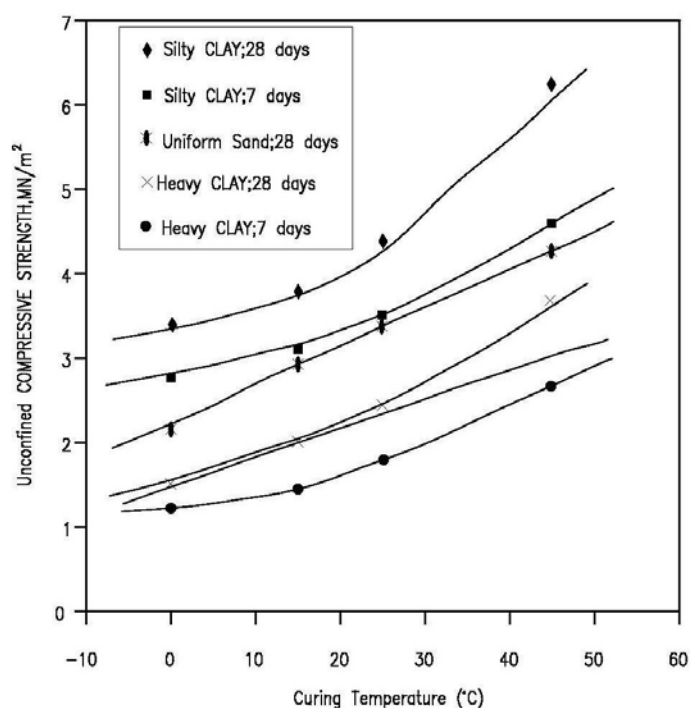
2.3.1 อุณหภูมิที่ใช้บ่มดินซีเมนต์

Herzog และ Mitchell [7] ได้ศึกษาและพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของดินเหนียว Kaolinite และ Montmorillonite ที่ผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักดินแห้ง บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาจะมีค่ากำลังรับแรงอัดประมาณเท่ากับดินเหนียวทั้งสองชนิดผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ที่อุณหภูมิบ่ม 60 องศาแสดงให้เห็นว่าอัตราเร่งของกำลังที่เพิ่มขึ้นมีผลกระทบโดยตรงจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขณะช่วงเวลาบ่ม

Clare และ Pollard [24] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ได้ผลดังแสดงรูปที่ 2.6 ทำการทดสอบกับดิน Heavy Clay, Uniform Sand และ Silty Clay ผสมกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่าดินทุกๆ ชนิดจะมีการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงอัดตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

2.3.2 สารเคมีที่ใช้ผสมเพิ่ม

Ruenkairergsa [25] ได้อธิบายว่าถ้ามีการใช้จำนวนวัสดุเพิ่มหลายชนิดผสมรวมกันกับการทำดินซีเมนต์โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาที่ได้จากปูนซีเมนต์อย่างเดียวให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น และเพื่อลดจำนวนความต้องการของปูนซีเมนต์ที่ใช้ให้มีปริมาณที่น้อยลง พบว่าการใช้ปูนขาวเป็นวัสดุผสมเพิ่มนอกจากจะช่วยทำให้การผสมระหว่างดินและปูนซีเมนต์มีความง่ายขึ้นแล้ว ยังมีแนวโน้มที่จะแก้ไขผลที่เกิดจาก Organic Materials ที่มีผลต่อปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ และการใช้ Fly Ash เป็นสารผสมเพิ่มพบว่ามีความสามารถในการช่วยลดการหดตัวที่เกิดขึ้นในดินเหนียวได้



Soil	L.L.(%)	P.L.(%)	Moisture Content(%)	Density (Mg/m ³)
Heavy CLAY	76	26	25	1.52
Uniform Sand	38	19	18	1.72
Silty CLAY	Non plastic		8	1.60

รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่ากำลังความต้านทานแรงอัด [24]

2.4 วัสดุมวลเบา (Lightweight Material)

ในปัจจุบันมีการนำเอาวัสดุมวลเบา (Lightweight Material) มาใช้ในงานก่อสร้างกันอย่างกว้างขวางซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุถมกลับสำหรับก่อสร้างกำแพงกันดินหรือดินถมบริเวณคอสะพาน และนำมาก่อสร้างคันทางที่วางอยู่บนดินเหนียวอ่อน เพื่อลดแรงดันทางด้านข้างที่กระทำกับโครงสร้างกำแพงกันดิน ลดน้ำหนักของคันทางที่กระทำต่อชั้นดินเดิม และป้องกันการทรุดตัวของดินเดิม วัสดุมวลเบาสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ประเภทวัสดุมวลเบา [32]

Lightweight banking Material	Unit Volume weight (t/m)	Description
ESP blocks	0.01-0.03	Ultra Lightweight, expandable synthetic resins
Expanded-beads mixed Lightweight soil	0.7 approx.or more	Variable density; similar compaction and deformation Characteristics to soil; can use excess construction soil
Air Foamed mortar and Air Foamed Lightweight stabilized Soil	0.5 approx.or more	Density adjustable;flowable;self-hardening;and can use Excess construction soil
Coal ash, granulated Slag,etc	1.0-1.5 approx.	Granular materials; self-hardening
Volcanic ash soil	1.2-1.5	Natural material
Hollow structures	1.0 approx.	Corrugated pipes,box culverts,etc.
Wood chips	0.7-1.0	Usually to be used below ground-water level; anti-Leaching measures needed.
Shells	1.1 approx.	Sized 12 to 76 mm; interlocking effects
Tire chips	0.7-0.9	Usually used above ground-water level ; cover soil layer of at least 0.9 m is required

2.4.1 ชนิดและลักษณะของวัสดุมวลเบา

2.4.1.2 Geofoam (EPS Blocks)

เป็นวัสดุมวลเบาที่ใช้เทคนิคการทำให้ Poly Styrol เกิดการขยายตัว ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มโฟมเข้าไปใน Poly Styrene มาตรฐานของ EPS Block ทั่วไปมีความกว้าง 1 เมตร ยาว 2 เมตร และหนา 0.50 เมตร มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.03 ตันต่อลูกบาศก์เมตรมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 7 ถึง 18 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่น

2.4.1.2 Expanded-Beads Mixed Lightweight Soil

เป็นการปรับปรุงดินเดิมให้เป็นวัสดุมวลเบา โดยการผสมกันระหว่าง Expanded Poly Styrol หรือ Expanded Poly Propylene และปูนซีเมนต์เพื่อให้มีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น หรือบางครั้งอาจมีการใส่ Fiber เพื่อเพิ่มความแข็งแรงหรือต้านทานการกัดเซาะ โดยมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.07 ถึง 1.3 ตันต่อลูกบาศก์เมตร กำลังรับมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 5 ถึง 20 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์

2.4.1.3 Air Foam Mortar or Air Foamed Stabilized Soil

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยเกิดจากการผสมกันระหว่าง ดิน ปูนซีเมนต์ น้ำ และสารเคมีที่มีน้ำมาทำเป็น Air – Foam โดย Air Foamed Stabilized Soil นั้นจะมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.60 ถึง 1.20 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังแรงอัดของ Air Foam Mortar และ Air Foamed Stabilized Soil จะแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาผสม

2.4.1.4 Coal Ash, Granulated Slag

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของ Coal Ash บดอัดดังแสดงในตารางที่ 2.3 เนื่องจากขนาดของช่องว่างและความถ่วงจำเพาะของ Coal Ash มีค่าต่ำกว่าดินปกติ ความหนาแน่นของ Coal Ash บดอัด จะอยู่ระหว่าง 1.10 ถึง 1.50 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของ Coal Ash บดอัด [32]

Type	Soil Classification	OMC (%)	Unit Weight		Strength Constant		CBR (%)	Permeability (cm/sec)
			Dry (tf/m ²)	Wet (tf/m ²)	Cohesion (kgf/cm ²)	Phi		
Fly Ash	Same as Silt	11-36	1.06-1.49	1.1-1.5	1.0-2.0	30°-37°	1.8-22.5	10-10
Clinker Ash	Same as Sand	32-52	0.88-1.45	Less than 1.5	0.4-1.1	29°-33°	50-70	10-10

Granulated Slag คือ ผลผลิตที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของตะกอนจากเตาหลอม Granulated Slag แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ Hard และ Soft เมื่อบดอัดแล้วความหนาแน่นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.20 ถึง 1.35 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และความหนาแน่นได้น้ำ (Under-Water Weight) อยู่ระหว่าง 0.50 ถึง 0.70 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่สำหรับการออกแบบของ Granulated Slag (Soft) [32]

Gs	Unit Weight (t/m ³)	Under-Water Weight (t/m ³)	Phi	Permeability (cm/sec)	CBR (%)
2.53-2.76	1.2 - 1.35	0.5 - 0.7	35°	10 ⁻¹ -10 ⁻²	20

2.4.2 การนำวัสดุมวลเบามาประยุกต์ใช้กับปัญหาดินอ่อน

จากการแนะนำของวิธี Norwegian ESP ในปี 1985 การนำเทคโนโลยีคันทางมวลเบามาใช้แก้ปัญหาเมื่อเผชิญกับดินอ่อน ได้ถูกยอมรับมากขึ้นในโครงการก่อสร้างต่างๆ กล่าวคือ

2.4.2.1 ลดการทรุดตัวคงค้างของคันทางที่สร้างบนดินอ่อน

ถนนที่มีคันทางค้ำบนดินอ่อนมีโอกาสที่จะเกิดการทรุดตัวคงค้าง เนื่องจากได้รับน้ำหนักกระทำซ้ำจากการจราจร เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาอาจแก้ไขได้โดยการให้น้ำหนักบรรทุกก่อนเท่ากับน้ำหนักบรรทุกที่จะเกิดขึ้น แต่ถ้าดินอ่อนมีชั้นหนามาก วิธีนี้อาจไม่ได้ผลดีนักในกรณีนี้ การทรุดตัวคงค้างอาจสามารถลดลงได้อย่างเห็นได้ชัดเจน ถ้านำวัสดุมวลเบามาเป็นวัสดุสร้างคันทางร่วมกับการให้น้ำหนักบรรทุกก่อนเล็กน้อยแล้วเอาดินเดิมออก

2.4.2.2 ป้องกันการทรุดตัวต่างระดับของคันทางที่ติดกับโครงสร้างบนฐานรากเสาเข็ม และป้องกันการเคลื่อนไถลตัวของเสาเข็ม ปัญหาของการทรุดตัวไม่เท่ากัน มักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีท่อลอดในกรณีของถนนที่มีคันทางหรือในกรณีถนนที่เชื่อมกับสะพาน อีกทั้งยังอาจมีการเคลื่อนไถลของเสาเข็มตอม่อ เนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้าง การใช้คันทางมวลเบาสามารถระงับการทรุดตัวหรือปัญหาการรับแรงกระทำด้านข้างนี้ได้ อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

2.4.2.3 ป้องกันการเคลื่อนตัวเมื่อก่อสร้างใกล้กับอาคารข้างเคียง

เมื่อถนนที่มีผิวจราจรที่กว้างก่อสร้างบนดินอ่อน ปัญหาที่ต้องระมัดระวังอีกอย่างหนึ่งก็คือผลกระทบต่ออาคารบ้านเรือนใกล้เคียง ในสถานการณ์แบบนี้มักแก้ปัญหาโดยวิธีการเจาะลึกหรือการตอกเข็มพิคแต่สำหรับพื้นที่ที่ดินอ่อนมาก ๆ ค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการก่อสร้างจะลดลงมากถ้าใช้วิธีคันทางมวลเบา อาจจะใช้วิธีนี้เพียงอย่างเดียว

2.4.2.4 ช่วยลดการทรุดตัวของพื้นที่ที่ถมขึ้นมาใหม่

เนื่องจากน้ำหนักของวัสดุมีน้ำหนักเบาอีกทั้งยังมีการปรับปรุงในด้านกำลังทางวิศวกรรมของดินให้ดีขึ้นจึงทำให้การทรุดตัวของดินลดลงและจะใช้เวลาในการก่อสร้างน้อยลง

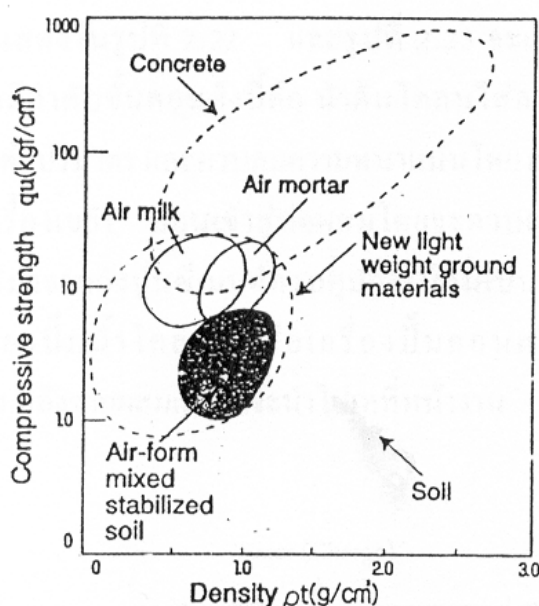
2.4.2.5 ลดระยะเวลาการก่อสร้าง

คันทางมวลเบาจะมีประโยชน์อย่างเห็นได้ชัด ในการประยุกต์กับงานที่จำกัดระยะเวลาในการก่อสร้าง เนื่องจากสามารถตัดงานในส่วนของการปรับปรุงดินออกไปอย่างใดก็ตามถ้าดินอ่อนมากวิธีทางมวลเบานี้ยังสามารถใช้ร่วมกับการใช้ฐานรากตื้นหรือวิธีอื่นๆได้

2.4.2.6 ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

จุดเด่นของวิธีคันทางมวลเบานี้ก็คือ ถึงแม้ว่าต้นทุนเริ่มแรกจะสูง แต่ในอนาคค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยมาก

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้น้ำยาเคมี (Air Foamed Stabilized Soil) หลักการเบื้องต้นของการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้น้ำยาเคมี (Air Foamed Stabilized Soil) จะสามารถทำได้โดยผสมน้ำเข้ากับดินในปริมาณที่เหมาะสม ก่อนนำไปผสมกับสารเพิ่มความแข็ง (Hardening Agent) หรือปูนซีเมนต์ แล้วค่อยนำไปผสมกับน้ำยาเคมี (Foaming Agent) เป็นลำดับถัดไป ซึ่งประโยชน์หลักๆ ของการปรับปรุงดินด้วยวิธีนี้ได้แก่ มีน้ำหนักเบา ความสามารถในการไหล และมีคุณสมบัติในการแข็งตัว ดินหลายประเภทสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีนี้ รวมไปถึงดินที่มีความชื้นแน่นซึ่งมีปริมาณน้ำสูง นอกจากนี้ดินส่วนเกินจากสถานที่ก่อสร้างก็อาจนำมาปรับปรุงด้วยวิธีนี้ได้ คุณสมบัติทางวิศวกรรมของการปรับปรุงดินด้วย Air-Form จะแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 คุณสมบัติความหนาแน่นและกำลังแรงอัดของวัสดุชนิดต่างๆที่นำมาปรับปรุงดิน [19]

เมื่อต้องนำดินที่ปรับปรุง Air-Foam มาใช้ในงานก่อสร้าง ควรจำเป็นต้องพิจารณา ศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ และทางเคมี ดังนี้

- ความหนาแน่น และกำลังแรงอัด (Density and Compressive Strength)
- ความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability)
- การดูดซับ (Absorption)
- แรงลอยตัว (Buoyancy)
- ความคงทน (Durability)

2.5 เถ้าแกลบ (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545 [26])

2.5.1 อิทธิพลต่อคุณสมบัติของเถ้าแกลบ

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเถ้าแกลบ ได้แก่ ลักษณะของคุณสมบัติของแกลบวิธีการเผาแกลบ สารประกอบทางเคมี และความละเอียด มีรายละเอียดดังนี้

1) ลักษณะและคุณสมบัติของแกลบ คุณสมบัติของแกลบจะแปรตามชนิดของข้าว สภาพดินและสภาพภูมิอากาศที่ปลูกข้าว โดยจะมีอิทธิพลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเป็นเปลือกของข้าวที่ได้จากการสีข้าว มีสีตั้งแต่สีเหลืองถึงสีทอง มีขนาดยาว 5 - 10 มม. กว้าง 2.5 - 5.0 มม. ความหนาแน่นเฉลี่ย 125 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนประกอบของแกลบเป็น เซลลูโลสร้อยละ 40 มีลิกนินร้อยละ 30 และเถ้าร้อยละ 20 (Chindaprasirt, Praparntanatorn 1983 [2]) ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์

2) วิธีการเผาแกลบ แต่ละวิธีจะให้เถ้าแกลบ แตกต่างกันดังนี้

- Chindaprasirt, Praparntanatorn 1983 [2] การเผาแกลบโดยการกองแกลบบน แผ่นเหล็กที่มีรูพรุน ซึ่งวางสูงจากพื้นเล็กน้อยในที่กลางแจ้งขนาดของกองแกลบจะมีผลต่อทั้ง อุณหภูมิ และระยะเวลาของการเผาแกลบ พบว่ากองแกลบขนาดเส้นขนาดผ่าศูนย์กลาง 1.2 ม. สูง 40-45 ซม. ปริมาณแกลบ 18-20 กก. จะมีอุณหภูมิสูงสุด 6000°ซ และได้เถ้าแกลบสีเทาขาว

- การเผาแกลบในเตาเผา Chindaprasirt, Praparntanatorn (1983) [2] ได้ศึกษา การเผาแกลบในเตาเผา 3 ชนิดคือ

ก. เตาเผาขนาด 105 x 105 ซม. สูง 90 ซม. ทำจากแผ่นเหล็กที่มีรูพรุน พบว่า เมื่อใช้แกลบ 50 กก. และ 100 กก. จะมีอุณหภูมิของการเผาแกลบสูงสุด 600°ซ และ 800°ซ ตามลำดับ และได้เถ้าแกลบสีเทาขาว

ข. เตาเผาถังน้ำมันขนาด 200 ลิตร แบบ PCSIR พบว่าอุณหภูมิของการเผา แกลบสูงสุด 750°ซ และได้เถ้าแกลบสีเทาขาวปนดำ

ค. เตาเผาอิฐแบบ PCSIR พบว่า อุณหภูมิของการเผาเคลือบสูงสุด 650°C และได้เถ้าเคลือบสีเทาขาวปนดำ

3) อิทธิพลของอุณหภูมิการเผาเถ้าเคลือบ จากศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติ ของเถ้าเคลือบพบว่า เมื่อเผาเคลือบมีอุณหภูมิถึง 105°C ความชื้นภายในจะระเหยออกไป เมื่ออุณหภูมิถึง 200°C สีเคลือบจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาล เมื่ออุณหภูมิถึง 300°C จะมีสารบางส่วนที่ระเหยออกไป สังเกตได้จากน้ำหนักที่ลดลงจำนวนมาก และเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 400°C สารที่ระเหยได้จะระเหยออกไปจนหมดเหลือแต่เถ้าที่มีน้ำหนักน้อย การเผาในที่มียากษาดำยเท อุณหภูมิเผาเคลือบคงที่ประมาณ $450 - 500$ พบว่า เมื่อเผาเคลือบมีอุณหภูมิถึง 105°C ความชื้นภายในจะระเหยออกไป เมื่ออุณหภูมิถึง 200°C สีเคลือบจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาล เมื่ออุณหภูมิถึง 300°C จะมีสารบางส่วนที่ระเหยออกไป สังเกตได้จากน้ำหนักที่ลดลงจำนวนมาก และเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 400°C สารที่ระเหยได้จะระเหยออกไปจนหมดเหลือแต่เถ้าที่มีน้ำหนักน้อย การเผาในที่มียากษาดำยเท อุณหภูมิเผาเคลือบคงที่ประมาณ $450^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$ และระยะเวลาการเผาที่เพียงพอเคลือบจะเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้เถ้าเคลือบสีขาวหรือสีน้ำตาลอ่อนมีรายงานการศึกษาหลายชิ้นพบว่า อุณหภูมิ, ระยะเวลาการเผา และมีอากาศถ่ายเท จะมีผลต่ออัญรูปของซิลิกาในเถ้าเคลือบคือการเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่ำและมีอากาศถ่ายเท จะได้เถ้าเคลือบที่มีซิลิกาในรูปที่อสัณฐานว่องไวต่อการทำ ปฏิกิริยา ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงและไม่มีอากาศถ่ายเทจะได้เถ้าเคลือบที่มีซิลิกาเป็นผลึกที่เฉื่อยต่อการทำ ปฏิกิริยา Mehta, 1979 อ้างถึงใน Chindaprasirt, Praparntanatom 1983 [2] พบว่าการเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C และใช้เวลาเผานาน มีอากาศที่เพียงพอ หรือเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 680°C และใช้เวลาไม่น้อยกว่า 1 นาที จะได้เคลือบอสัณฐาน และการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 800°C และ 1000°C เป็นเวลา 4 ชม.จะซิลิกาในรูปอสัณฐานและผุพังตามลำดับ และการสูญเสียเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิ $200^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$ เท่ากับร้อยละ 39-54 การเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่ำจะมีปริมาณคาร์บอนในเถ้าเคลือบสูง ซึ่งมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนผสมที่มีคาร์บอนต่ำกว่าร้อยละ 15-20 ไม่มีผลต่อกำ ลังของปูนซีเมนต์ผสม แต่ถ้ามากกว่าร้อยละ 20 จะทำให้กำ ลังของปูนซีเมนต์ลดลง (Cook, D.J., and Suwanvitaya, 1981 [3])

4) ความละเอียดของเถ้าเคลือบ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545 [26] อ้างถึงใน “Lakho (1980), Farooq-e-Azam (1982), Chindaprasirt Praparntanatom 1983 ,พิชัย นิมิตรยงสกุล (2526)] พบว่าเถ้าเคลือบที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นจะทำให้มอร์ต้ารมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นนอกจากนี้ความละเอียดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้องการน้ำของส่วนผสมเพิ่มขึ้นด้วย Chindaprasirt Praparntanatom 1983 [2] พบว่าการบดเถ้าเคลือบขึ้นอยู่กับขบวนการเผา การควบคุมอุณหภูมิเผาเคลือบที่ 600°C จะทำให้เถ้าเคลือบที่ง่ายต่อการบดและบดเป็นระยะเวลานาน 1-2 ชม.จะได้เถ้าเคลือบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา

เคมี Lakho (1980) พบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อทำการบดเป็นเวลา 90 นาที ถ้านานกว่านี้จะไม่เพิ่มกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ Farooq-e-Azam (1982) พบว่าการบดรวมระหว่างเถ้าแกลบและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้ปูนซีเมนต์ผสมมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าแกลบเข้ากันได้ดีและมีความละเอียดมากขึ้น”

2.5.2 คุณสมบัติของมอร์ต้าร์และคอนกรีตที่ทำ จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ

2.5.2.1 ความต้องการน้ำและความสามารถทำงานได้เถ้าลอยในคอนกรีตจะทำให้เพสต์มีปริมาตรเพิ่มขึ้น และแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของมวลรวม รูปร่างทรงกลมของเถ้าลอยช่วยลดความเสียดทานระหว่างมวลรวมกับเพสต์

Ravina (1980) [14] พบว่า เถ้าลอยที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้น ส่วนผสมจะมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น

Mehta (1977) [9], Chindaprasirt, Praparntanatorn 1983 [2], บัณฑิต หิรัญ สถิตย์พร (2534) [27] พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบในคอนกรีตจะทำให้ความต้องการน้ำของส่วนผสมเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถทำงานได้เท่าเดิม ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย นอกจากนี้

Farooq-e-Azam (1982) พบว่าในการผสมคอนกรีต ถ้าเถ้าแกลบมีความละเอียดเพิ่มขึ้นจะทำให้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์คงที่มีค่าความสามารถทำงานได้ลดลง

2.5.3 การเข็ม

Damer (1976) พบว่าการผสมเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์จะทำให้อัตราการเข็มลดลง บัณฑิต หิรัญสถิตย์พร (2534) [27] พบว่าเพสต์ที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ จะมีอัตราการเข็มและความสามารถในการเข็มลดลงมาก

2.5.4 ระยะเวลาการก่อตัว (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545 [26] อ้างถึงใน)

Pinnarat (1984), Lane, Best (1982) ได้อธิบายว่าโดยทั่วไปเวลาการก่อตัวจะขึ้นอยู่กับปริมาณความละเอียดและสารประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

Monk (1983) พบว่าการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บดรวมเถ้าลอยจะไม่แตกต่างกันมาก แต่จะมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

Paul (1976), Praparntanatorn (1983) พบว่าการผสมเถ้าแกลบตั้งแต่ร้อยละ 0-60 ในปูนซีเมนต์จะทำให้เวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายเพิ่มขึ้น

Mehta (1977 อ้างถึงใน ชุมพล จันทรสม, 2528) พบว่าการผสมเถ้าแกลบร้อยละ 30 ทำให้ระยะเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้น เมื่อผสมร้อยละ 50 ระยะเวลาก่อตัวจะเท่ากับปูนซีเมนต์ล้วน และเมื่อผสมร้อยละ 70 ระยะเวลาก่อตัวจะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วน

Cook, Suwanvitaya (1981 อ้างถึงใน ชุมพล จันทรสม, 2528) พบว่าปริมาณคาร์บอนในเถ้าแกลบจะทำให้เวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายสั้นลง

Praparntanatorn (1983) พบว่าระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บดรวมเถ้าแกลบมีลักษณะเหมือนกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบคือเพิ่มมากขึ้น

2.5.5 กำลังรับแรงอัด

Brink, Halstead (1956) พบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยได้มากถึงร้อยละ 50 โดยมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 365 วันมีค่าเท่าเดิม

Pinnarat (1984) พบว่าสามารถผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 โดยที่ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 180 วัน ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเล็กน้อย

2.6 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธุ์ วงษ์พา และ สุรพันธุ์ สุคันธปรีย์(2545) [26] ประเทศไทยจัดเป็นประเทศอุตสาหกรรมเกษตร จึงมีวัสดุที่เกิดจากผลผลิตทางการเกษตรมากมาย ทั้งที่ใช้เป็นประโยชน์ทางการค้าได้และบางส่วนเป็นของเหลือใช้หรือใช้ไม่ได้ แกลบ เปลือกไม้ และกากของผลปาล์มก็เป็นอีกส่วนหนึ่งของวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร องค์การอาหารและเกษตรแห่งชาติ พบว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่ปลูกข้าวเป็นอันดับ 6 และปลูกปาล์มเป็นอันดับ 4 ของโลก ปัจจุบันประเทศไทยมีแกลบถึง 5 ล้านตันต่อปี ขณะที่ปาล์มซึ่งปลูกกันมากในภาคใต้มีกากของผลปาล์มกว่า 6 แสนตัน และเป็นเถ้าปาล์ม 400-500 ตัน โดยที่แกลบเป็นของเหลือที่ได้มาจากการสีข้าว ส่วนกากปาล์มน้ำมันได้จากเปลือกของผลปาล์มหลังสิ้นสุดกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม แต่ละวันจึงมีวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้จำนวนมากแต่กลับนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น การกองเก็บ และการกำจัดทิ้งเป็นต้น

ของเหลือเหล่านี้จากเดิมเกือบทั้งหมดต้องนำไปทิ้ง แต่ปัจจุบันได้มีการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรไปใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการสร้างพลังงานความร้อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น แกลบ เปลือกไม้ของต้นยูคาลิปตัส กากปาล์มน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งเชื้อเพลิงจากของเหลือทางการเกษตรเหล่านี้ เรียกว่า เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูกและมีอยู่ในประเทศเป็นจำนวนมาก มีกำมะถันต่ำ จึงไม่ก่อให้เกิดฝนกรด และที่สำคัญเป็นพลังงานหมุนเวียนสามารถปลูกทดแทนได้ ซึ่งแตกต่างจากการใช้น้ำมันและถ่านหินที่มีปริมาณจำกัดเมื่อหมดแล้วไม่สามารถผลิตขึ้นได้อีก อย่างไรก็ตามผลกระทบที่เป็นปัญหาสำคัญของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในปัจจุบันคือ เถ้าชีวมวล ที่เกิดขึ้นหลังจากการเผา ซึ่งส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง และเนื่องจากมีลักษณะเป็นฝุ่นผง สามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย จึงก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อมกับบริเวณโดยรอบ และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนทิ้งหรือกำจัด

ปัญหาที่สำคัญมากของเถ้าแกลบหรือเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน คือ มีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของปูนซีเมนต์ ดังนั้นก่อนนำเถ้าชีวมวลมาใช้งานคอนกรีต จึงต้องปรับปรุงเถ้าชีวมวลเหล่านี้ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้สามารถทำปฏิกิริยาร่วมกับปูนซีเมนต์ได้เร็วขึ้น โดยทั่วไปทำได้โดยการบดเถ้าชีวมวลให้มีความละเอียดมากขึ้น

ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ได้เล็งเห็นความสำคัญของปัญหานี้ จึงคิดจะใช้ประโยชน์จากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีคุณสมบัติเบื้องต้นที่สามารถพัฒนาเพื่อใช้งานคอนกรีตแทนกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งต้องใช้พลังงานและความร้อนในการเผาวัตถุดิบ และก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่อากาศ หากนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน จะทำให้ปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์โดยรวมลดลง ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (ทุนสนับสนุนจากฝ่ายวิชาการ สกว.) ได้ศึกษาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต โดยนำวัสดุพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้ามาปรับปรุงคุณภาพโดยบดให้ได้ความละเอียด 2 ขนาด คือ ขนาดปานกลาง (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15-20) และบดละเอียดมาก (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5) รวมกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรง แล้วนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนโดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำการหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีต ศึกษาค่าดัชนีความเป็นปอซโซลาน (ตัวชี้วัดประสาน) ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน จากนั้นศึกษาการขยายตัวของมอร์ตาร์และคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต ศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ผสมของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันโดยน้ำหนักวัสดุประสาน ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ และศึกษาการทำอิฐคอนกรีตเมื่อใช้ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม

ผลการวิจัยพบว่า เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีพบว่าสามารถจัดเป็นวัสดุปอชโซลานได้ ระยะเวลาการก่อดำของเพสต์เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีระยะเวลานานกว่าซีเมนต์เพสต์ แต่เมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน ระยะเวลาการก่อดำมีค่าลดลงจนใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์

มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงขึ้นหลังการบดเถ้าปาล์มน้ำมันและมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 180 วัน เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 10 และ 20 สำหรับเถ้าบดละเอียดปานกลางและบดละเอียดมากตามลำดับ นอกจากนี้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอชโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีค่ามากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน

คอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมบดละเอียดมากของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ หรือ เถ้าปาล์มน้ำมันมีการขยายตัวและอัตราการซึมผ่านน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ รวมทั้งช่วยลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตกำลังสูงได้ ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไม่แตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์มากนัก แสดงให้เห็นว่าวัสดุเหล่านี้มีศักยภาพสูง สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตกำลังสูงได้ดี

แม้ว่าเถ้าชีวมวลดูเหมือนจะมีแต่ข้อดีก็ตาม แต่ความเป็นจริงแล้วเถ้าชีวมวลทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเหมือนวัสดุปอชโซลานโดยทั่วไป กล่าวคือ หากเถ้าชีวมวลมีความละเอียดต่ำหรือมีขนาดใหญ่ มักคุดน้ำจากส่วนผสมคอนกรีตหรือมอร์ตาร์จำนวนมาก หากมีความเป็นผลึกสูงมักจะทำปฏิกิริยาปอชโซลานไม่ดี และส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังต่ำและความทนทานลดลง การใช้เถ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนมักทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้น (1-28 วัน) มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าชีวมวล หากการเผาเถ้าชีวมวลมีวัสดุอื่นที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตผสมอยู่เป็นจำนวนมาก เช่น เถ้าที่เผาไหม้ไม่หมด เป็นต้น วัสดุเหล่านี้จะส่งผลเสียต่อคอนกรีตได้โดยอาจทำให้กำลังอัดต่ำลง หรือมีการก่อดำที่นานขึ้น

อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดีและมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อใช้ในการคอนกรีต ทั้งนี้หากนำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างจะทำให้สามารถลดต้นทุนในภาพรวมได้ อีกทั้งยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และที่สำคัญคือประหยัดพลังงานและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เป็นปัญหาสำคัญของโลกในปัจจุบันได้เป็นอย่างดี

2.7 สารแมกนีเซียมซัลเฟต

2.7.1 ปฏิกิริยาเคมีของสารแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate: $MgSO_4$)

สารละลายที่ความเข้มข้น 0.5 % โดยที่ผลกระทบของแมกนีเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 % จะมีลักษณะคล้ายกัน แต่สารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 0.5 จะมีความรุนแรงน้อยกว่าสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นเดียวกัน เป็นข้อมูล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 320 กก./ลบ.ม. แช่ในน้ำและในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และ 5 ตามลำดับ เป็นเวลา 1 ปี พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 ชนิดที่มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน จะมีความต้านทานซัลเฟตแตกต่างกัน โดยปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A ต่ำจะสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดี และในปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูงจะพบว่าสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะกัดกร่อนได้น้อยกว่าสารละลายแมกนีเซียม

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนในที่นี้เป็นการเก็บตัวอย่างดินแบบรบกวน จากบริเวณการก่อสร้างอาคารสูง 4 ชั้น ถนนท้ายบ้าน อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ โดยได้มีการเจาะสำรวจจำนวน 1 หลุม ความลึก 30 เมตร และได้หาค่าถึงรับแรงเฉือนของดินเหนียวในสนามโดยใช้ Pocket Penetrometer ได้ค่า $S_u = 0.6$ ตันต่อตารางเมตร

3.1.2 ปูนซีเมนต์ ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (ตราอินทรี)

3.1.3 เถ้าชีวมวล ใช้เถ้าแกลบ จากอำเภอบางพูนทาท จังหวัดพิจิตรในอัตราส่วน 1:19 (น้ำ : ชัลเฟต มาผสมกับสารละลายแมกนีเซียมชัลเฟตในระดับความเข้มข้น 40.36 กรัม ต่อปริมาณน้ำ 1 ลิตร

3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

ในการศึกษาจะใช้จำนวนของ 1 ชุดการทดสอบเท่ากับ 3 ตัวอย่าง โดยนำค่าที่ได้ทั้ง 3 ตัวอย่างมาหาค่าเฉลี่ย

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมดิน

นำดินจากแหล่งตัวอย่างที่ได้มาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเสียก่อน แล้วนำมาหาปริมาณความชื้นในดินเพื่อนำไปหาปริมาณน้ำที่ต้องใส่เพิ่ม โดยต้องใส่น้ำเพิ่มให้น้ำดินมีค่าปริมาณความชื้นให้ได้ปริมาณ 2.5 เท่า ของขีดจำกัดเหลว ซึ่งมาจากการทดสอบค่าการไหล ให้น้ำดินมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 45 เซนติเมตร เป็นการทดสอบเพื่อป้องกันการเยิ้ม ในดิน เพื่อให้ น้ำดินผสมเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ที่มีชัลเฟต และเถ้าแกลบ ให้มีค่าการไหลที่ต้องการ หลังจากได้ตัวอย่างน้ำดิน ที่เข้ากันแล้วให้ทำการเก็บใส่ถังป้องกันการสูญเสียความชื้น

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำยาเคมี

ผสมน้ำยาเคมีกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม ในการทดสอบใช้อัตราส่วนน้ำต่อน้ำยาเคมี 1:19 โดยปริมาตร กวนให้เข้ากันแล้วเทใส่ลงในภาชนะเพื่อรอการผสมในขั้นตอนต่อไป

3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ทำการชั่งน้ำหนักของน้ำดิน ปูนซีเมนต์ที่มีชัลเฟต ชีวมวล ตาม Mix Design ที่ต้องการ หลังจากนั้นนำน้ำดินมาผสมกับปูนซีเมนต์ที่มีชัลเฟต และชีวมวลตามอัตราส่วนผสมผสมด้วยเครื่องปั่นให้เข้ากันใช้เวลาประมาณ 6 นาที หลังจากผสมเข้ากันแล้วค่อยนำเถ้าแกลบผสม

ตามสัดส่วนที่ต้องการการนำ Muddy มาผสมกับปูนซีเมนต์ก่อน แล้วค่อยผสมน้ำตามอัตราส่วน จะช่วยลดการเกิดการแยกตัวของน้ำและจะได้สารผสมที่ดี แล้วตรวจสอบค่าความหนาแน่นที่ได้ ต้องมีค่าผิดพลาดจากที่ต้องการไม่ควรเกิน 0.03 ตันต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อตรวจสอบความหนาแน่นเรียบร้อยแล้วจึงนำตัวอย่างไปทดสอบความสามารถในการไหล และนำตัวอย่างใส่แบบหล่อก่อน ตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร รอการทดสอบตามอยู่การบ่มที่ต้องการ



รูปที่ 3.1 การเตรียมดิน



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างน้ำโคลนที่เตรียมผสม



รูปที่ 3.3 เครื่องบดอัดดิน แบบ Modified Compaction Test



รูปที่ 3.4 การเตรียมสารละลายฟอสเฟตและเถ้าแกลบ



รูปที่ 3.5 การอบตัวอย่างดินเพื่อตรวจสอบค่าความความชื้นของดินตัวอย่าง



รูปที่ 3.6 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 ซม. สูง 10 ซม.

3.3 การทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบดินที่จะทำการในห้องปฏิบัติการ มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวตามธรรมชาติ และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวถูกปรับปรุงสภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่มีซัลเฟต และมีเถ้าชีวะมวลแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์แก้ปัญหา ศึกษาพฤติกรรมของดินและใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบงานทางวิศวกรรมปฐพี และวิศวกรรมฐานราก โดยหลักการที่สำคัญที่สุดในการทดสอบดิน จะต้องพยายามควบคุมให้

มีสภาพหรือเงื่อนไขในการทดสอบ ใกล้เคียงกับสภาพหรือเงื่อนไขของงานจริงมากที่สุด เพื่อให้ข้อมูลที่ถูกต้องใกล้เคียงที่สุด

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวในห้องปฏิบัติการ

3.3.1.1 การทดสอบหาปริมาณความชื้นของดิน เป็นการอบดินด้วยเตาอบจนแห้งเพื่อหาปริมาณความชื้นที่อยู่ในมวลดิน ถือว่าเป็นวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุดโดยทั่วไปจะใช้เตาอบไฟฟ้าที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอด ภายใต้อุณหภูมิ 110/5 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาการอบประมาณ 18- 24 ชั่วโมง แล้วนำค่าน้ำหนักน้ำที่อยู่ในดิน มาหารกับน้ำหนักดินแห้ง มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

3.3.1.2 การทดสอบหาขีดจำกัดและดัชนีแอตเตอร์เบอร์ก ซึ่งจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318 ใช้หาค่าปริมาณความชื้นที่ขีดจำกัดความเหลว ขีดจำกัดพลาสติก ขีดจำกัดการหดตัว และนำค่าที่ทดสอบได้ไปคำนวณค่าดัชนีพลาสติก และค่าดัชนีเหลว ซึ่งจะนำไปเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ออกแบบและจำแนกชนิดและประเภทของดินเบื้องต้น

3.3.1.3 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 854 การทดสอบจะอาศัยหลักการอาคิมีดิส คือ การนำตัวอย่างดินมาแทนที่น้ำเพื่อหาน้ำหนักที่มีปริมาตรเท่ากับดิน โดยการกำหนดที่ค่าอุณหภูมิมาตรฐานของน้ำที่ 4 องศาเซลเซียส แต่การทดลองจริงๆจะทดสอบในอุณหภูมิห้องประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส แล้วต้องนำค่าที่ได้จากการทดลองมาปรับแก้ด้วยค่าองค์ประกอบแก้ความแตกต่างของอุณหภูมิ

3.3.1.4 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดิน ตามมาตรฐาน ASTM D 422-63 ได้ใช้วิธีตะแกรงร่อนน้ำและวิธีวิเคราะห์ด้วยไฮโดรมิเตอร์ โดยวิธีการร่อนเปียกจะใช้วิเคราะห์ขนาดของดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่กว่า 75 ไมครอน หรือ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 200 ดินที่ค้างจะนำไปทดสอบการตกตะกอนด้วยไฮโดรมิเตอร์ ซึ่งอาศัยหลักการตกตะกอนของสโตรค

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินมวลเบาในห้องปฏิบัติการ

3.3.2.1 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของดินเหนียวถูกปรับปรุงสภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่มีสารชีวะมวลแทนที่ จะมีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบเร็ว โดยจะเป็นการทดสอบแบบควบคุมความเครียด ในแนวดิ่งให้คงที่และใช้อัตราความเร็วกระทำแรงเฉือนเท่ากับ 0.1 เซนติเมตรต่อวินาที สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้แบบหล่อตัวอย่างเป็นท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร มาหล่อเป็นแท่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทำการบ่มตัวอย่างด้วยพลาสติกหุ้ม แล้วนำไปทดสอบที่อายุการบ่มต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 3.7 เครื่องมือทดสอบการรับแรงกดทิศทางเดียว



รูปที่ 3.8 การบ่มตัวอย่างดินด้วยพลาสติกเพื่อรอการทดสอบกำลังอัด

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

ดินตัวอย่างเป็นดินเหนียวปนดินตะกอนจากบริเวณพื้นที่ถนนท้ายบ้าน อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ดินตัวอย่างจะถูกผสมเข้ากับสารละลายซัลเฟตในปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง โดยคุณสมบัติพื้นฐานองค์ประกอบทางเคมีของดินตัวอย่างแสดงใน ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

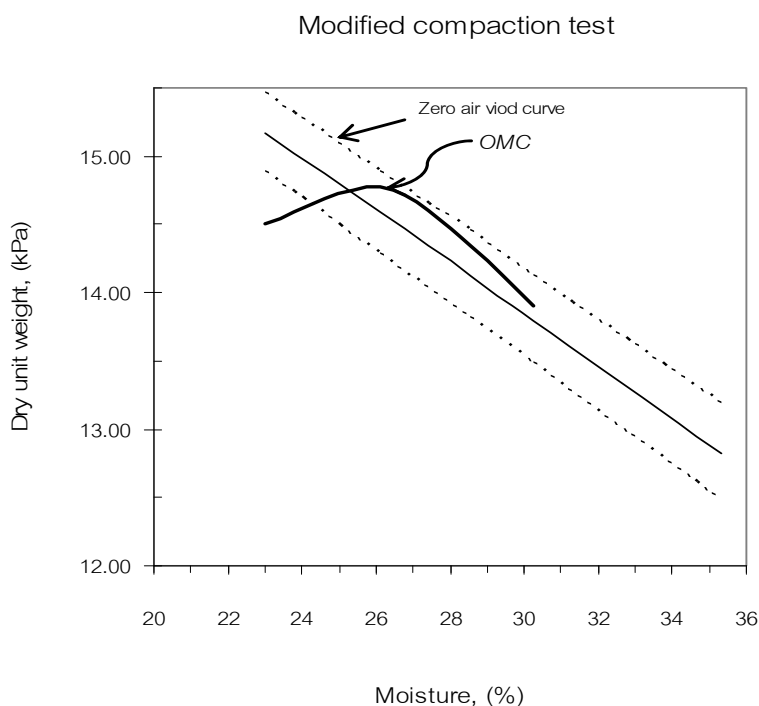
คุณสมบัติ	Nature clay	Sulfate clay
ขีดจำกัดเหลว, <i>LL</i>	97.5 %	93.07 %
ขีดจำกัดพลาสติก, <i>PL</i>	60.60 %	39.28 %
ความถ่วงจำเพาะ, <i>Gs</i>	2.48	2.76
การจำแนกดินตามระบบเอกภาพ	CH	CH

จากผลการทดสอบในภาคผนวก จ. พบว่า สารละลายซัลเฟตที่ผสมเข้าไปในดินตัวอย่างธรรมชาติจะทำให้ค่าความถ่วงเพาะของดินตัวอย่างมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าขีดจำกัดเหลว และขีดพลาสติกจะมีค่าลดลง ปริมาณของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟต มีเท่ากับ 0.69 และ 1.45 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าอยู่ในสภาวะการกักครองที่รุนแรง ถั่วแกลบ (rice husk ash) ที่ใช้ในการศึกษา เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาแกลบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ของโรงสีข้าวในอำเภอบางนา จังหวัดพิจิตรผ่านการบดละเอียด (fined particles) ให้มีขนาดผ่านเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618 (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และค้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่า 34 เปอร์เซ็นต์) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ของถั่วแกลบ พบว่า ถั่วแกลบมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) ในปริมาณ 95.12 เปอร์เซ็นต์และมีอลูมินา

ไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในปริมาณ 0.06 เปอร์เซ็นต์สารประกอบทั้งสองนี้เป็นสารประกอบสำคัญที่จะทำให้ปฏิกิริยาขั้นที่สอง (secondary reaction) ในดินซีเมนต์เกิดได้สมบูรณ์

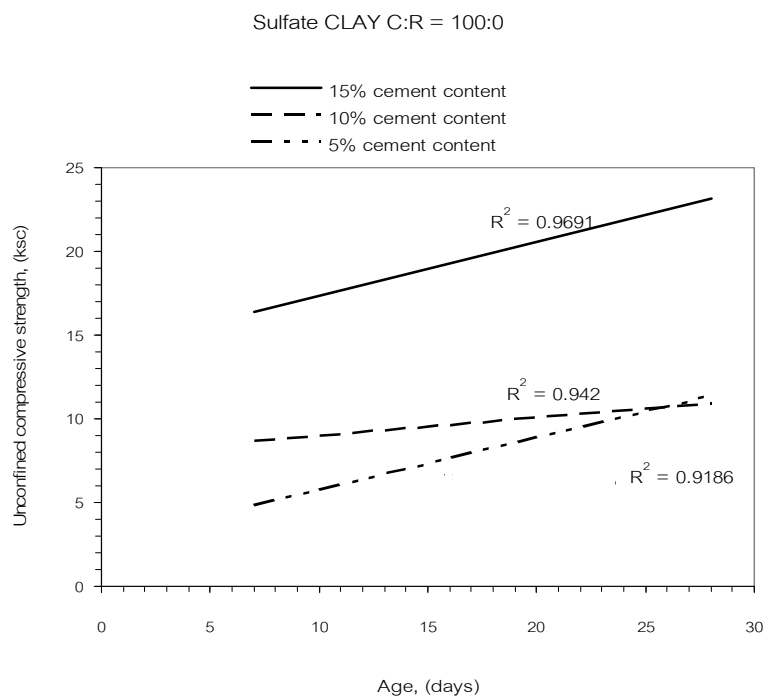
4.2 คุณสมบัติด้านการบดอัด

ผลทดสอบการบดอัดของดินตัวอย่างที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่าแบบมาตรฐานตาม ASTM D -1557 ใช้ดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ใช้ Mold ที่มีปริมาตรเท่ากับ 2,142 ลูกบาศก์เซนติเมตร แบ่งชั้นดินเป็น 5 ชั้น แต่ละชั้นทำการบดอัดด้วยค้อนมาตรฐานหนัก 4.54 กิโลกรัม ยกสูง 45.72 เซนติเมตร จำนวน 56 ครั้งต่อชั้น ได้พลังงานในการบดอัดเท่ากับ 2,713.32 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ของดินเหนียวปนดินตะกอนธรรมชาติและดินเหนียวปนดินตะกอนที่มีสารละลายลลายซัลเฟต แสดงในรูปที่ 4.1

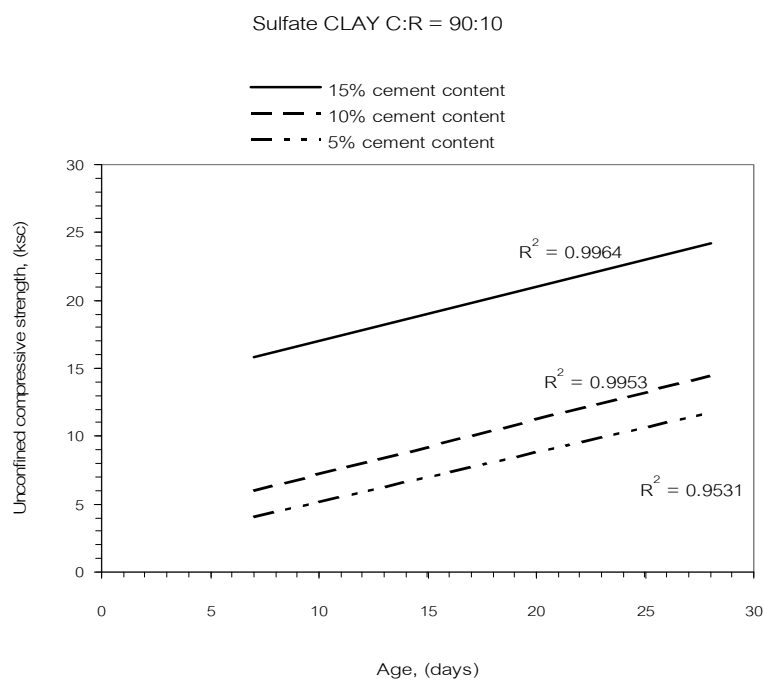


รูปที่ 4.1 กราฟการบดอัดดินตัวอย่างที่ พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่าแบบมาตรฐาน

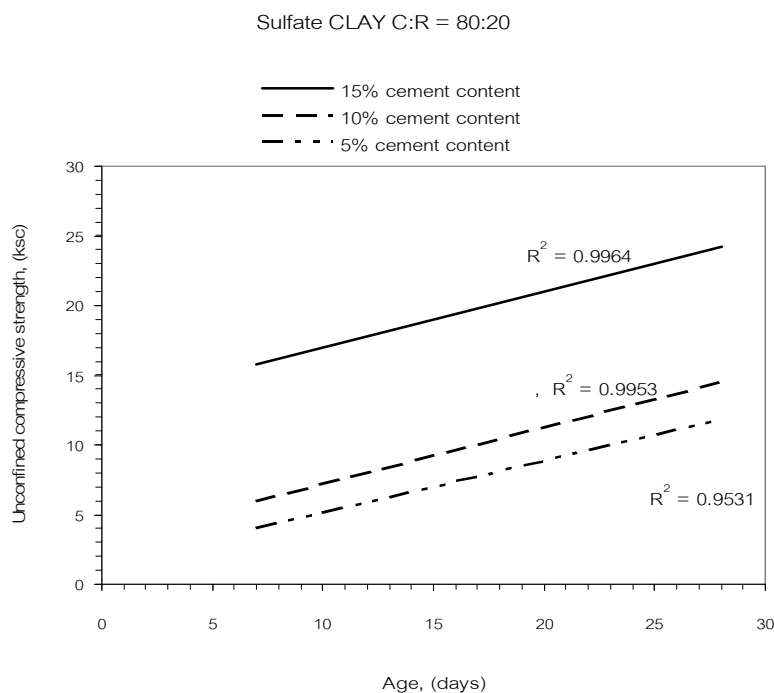
จากรูปพบว่า ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่าแบบมาตรฐานของตัวอย่างดินอยู่ระหว่างร้อยละ 26.09 ถึง 28.52 และหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 14.75 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ซัลเฟตที่ไม่มีการทดแทนปริมาณซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบหรืออัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้ากลบเท่ากับ 100:0



รูปที่ 4.3 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ซัลเฟตที่ทดแทนปริมาณซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบหรืออัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้ากลบเท่ากับ 90:10



รูปที่ 4.4 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ซัลเฟตที่ทดแทนปริมาณซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบหรืออัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าแกลบเท่ากับ 80:20

4.3 กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างผสมซีเมนต์

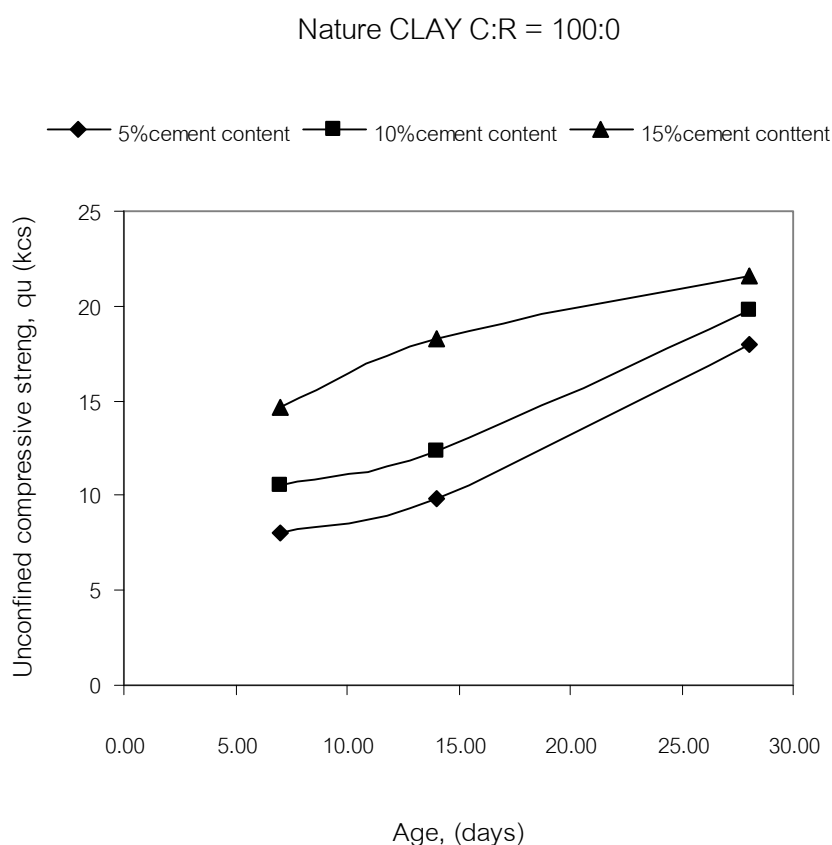
4.3.1 อิทธิพลของปริมาณน้ำต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์

กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ในสภาพธรรมชาติและดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟต ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง ที่ความชื้นในการบดอัดเท่ากับ 16, 19, 22, 25 และ 28 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำที่เหมาะสม ($OMC = 26.08$ เปอร์เซ็นต์) บ่มที่อายุบ่มเท่ากับ 28 วัน พบว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างทั้งสองชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณน้ำประมาณ 1.06 เท่าของปริมาณน้ำที่เหมาะสม (18.02 เปอร์เซ็นต์) หลังจากนั้นกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างธรรมชาติและดินตัวอย่างที่มีสารละลายซัลเฟตจะมีความแตกต่างกันไม่มากนักในด้านหนึ่งของการบดอัด ส่วนในด้านเปียก (ปริมาณน้ำสูงกว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม) กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างธรรมชาติจะมีค่าสูงกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่มีสารละลายซัลเฟต พฤติกรรมลักษณะนี้อาจเกิดจากในด้านหนึ่งมีปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าปริมาณความน้ำ

ที่เหมาะสม ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ ดังนั้น ผลของสารละลายซัลเฟตจึงไม่มีอิทธิพลมากนัก

4.3.2 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียว

จากรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 แสดงค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีซัลเฟตผสมเข้าเกลบในอัตราส่วน 100:0, 90:10, และ 80:20 โดยแปรผันกับปริมาณปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุบ่ม 7, 14, และ 28 พบว่าที่ปริมาณซีเมนต์ค่าหนึ่ง กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างธรรมชาติและดินตัวอย่างที่มีสารละลายซัลเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม และอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าสูงในช่วงอายุบ่ม 7 ถึง 28 วัน

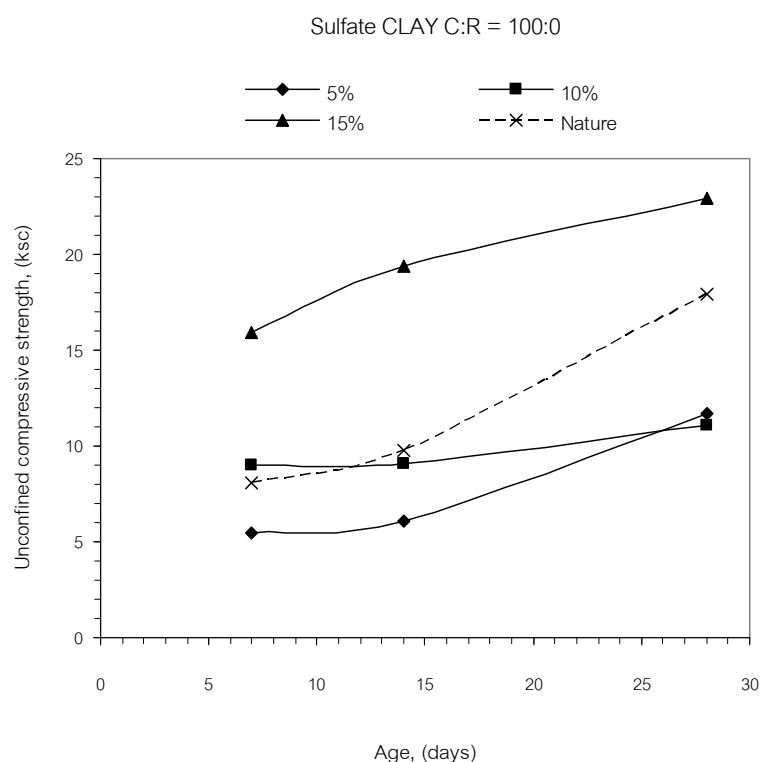


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแกนเดียวกับอายุบ่มของดินเหนียวธรรมชาติ

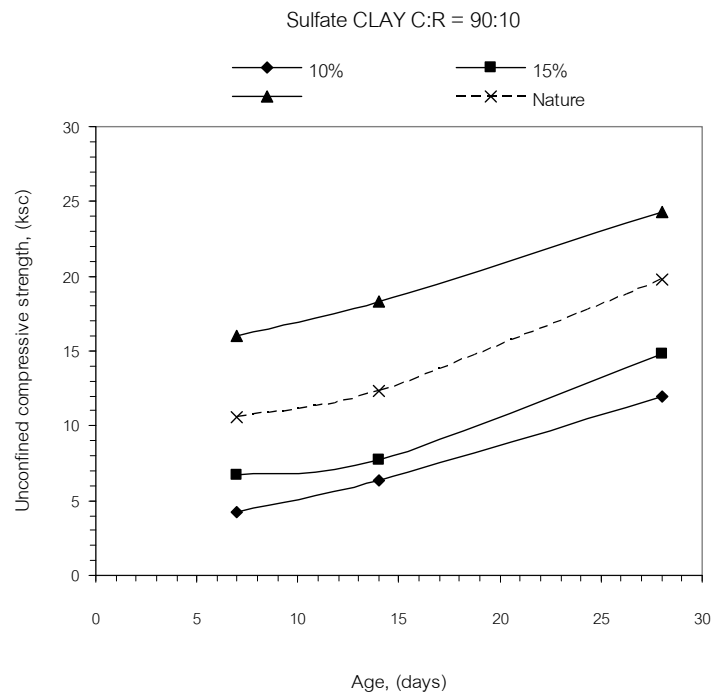
4.4 กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่ทดแทนปริมาณซีเมนต์ด้วยเถ้าเกลบ

เนื่องจากวัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินเหนียวปนดินตะกอนในสภาพธรรมชาติได้ [8] และ [9] ดังนั้น

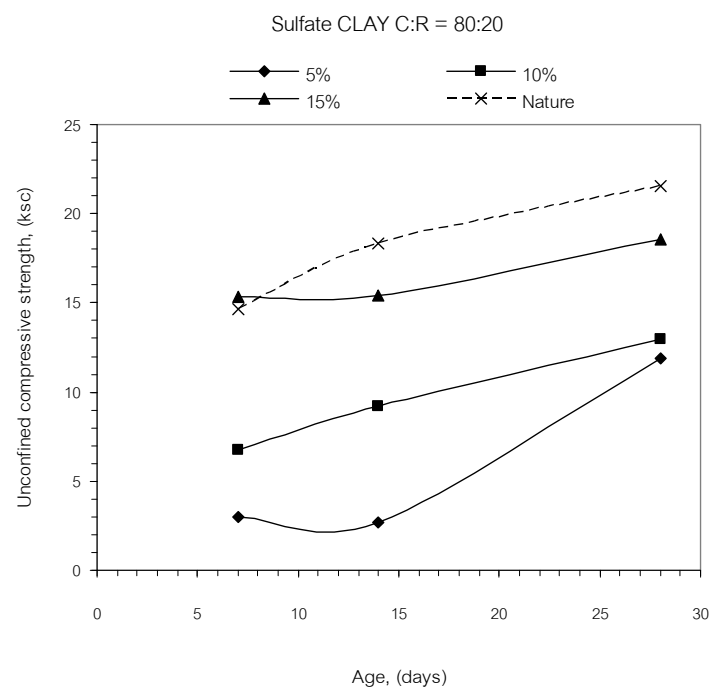
การแทนที่เถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งในดินซีเมนต์ น่าจะเป็นวิธีการลดปริมาณของ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สารถละลายซัลเฟตต้องการทำปฏิกิริยาดัวยรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 แสดงกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ ของตัวอย่างดินใน สภาพธรรมชาติ และดินที่มีสารถละลายซัลเฟตเจือปน ในปริมาณซีเมนต์ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักดินแห้ง ตามลำดับจากรูป พบว่า ทุกปริมาณซีเมนต์ และทุกอายุบ่ม กำลังอัดแกนเดียว ของตัวอย่างดินในสภาพธรรมชาติผสมซีเมนต์มีค่าสูงที่สุด กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินที่มี สารถละลายซัลเฟตเจือปนจะมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น พฤติกรรมลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่าในช่วงอายุบ่ม 7 ถึง 14 วัน กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของซีเมนต์ เพียงอย่างเดียว หากพิจารณาเฉพาะตัวอย่างที่มีสารถละลายซัลเฟตเจือปนพบว่า ที่อายุบ่ม 28 วัน ใน ทุกปริมาณซีเมนต์ กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างในอัตราส่วนปริมาณซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบ 100 : 0 จะมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่อัตราปริมาณซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ 90 : 10 และ 80 : 20 กำลังอัดแกนเดียว ของดินตัวอย่างอัตราส่วนเถ้าแกลบต่อปริมาณซีเมนต์ เท่ากับ 90 : 10 จะมีค่าสูงสุด และจะมีค่าเกือบ เท่ากับดินที่ไม่มีสารถละลายซัลเฟต



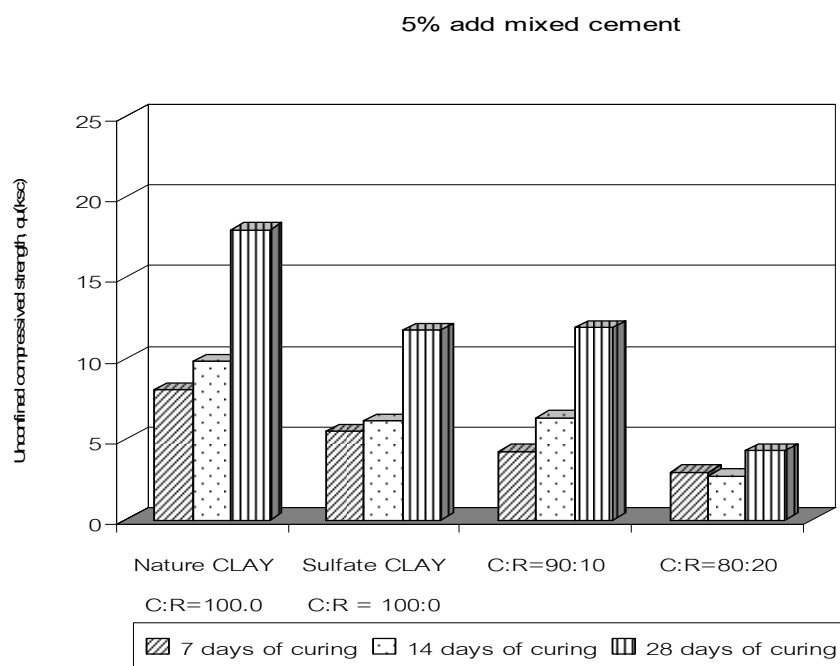
รูปที่ 4.6 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทดแทนปริมาณซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่ปริมาณซีเมนต์ 5%



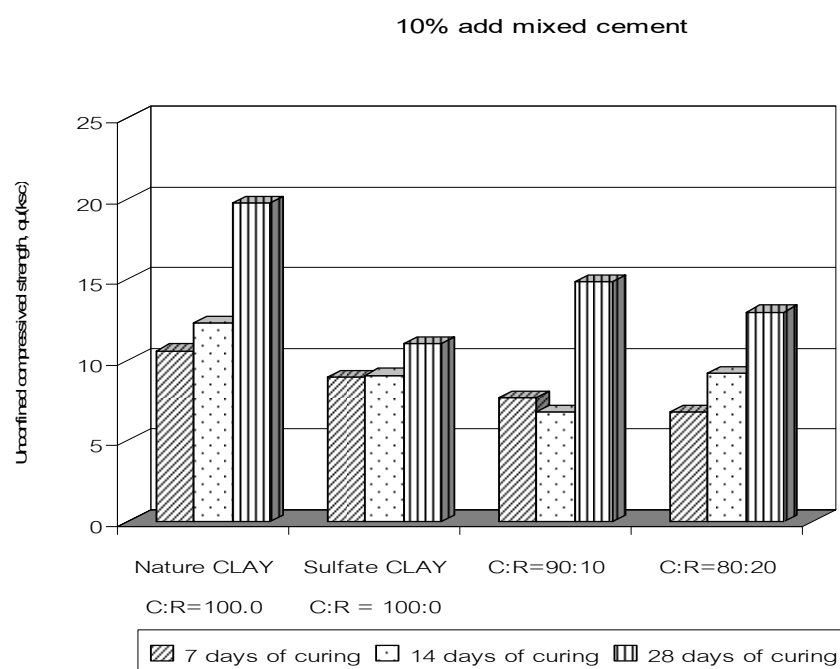
รูปที่ 4.7 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทดแทนปริมาณซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ ที่ปริมาณซีเมนต์ 10%



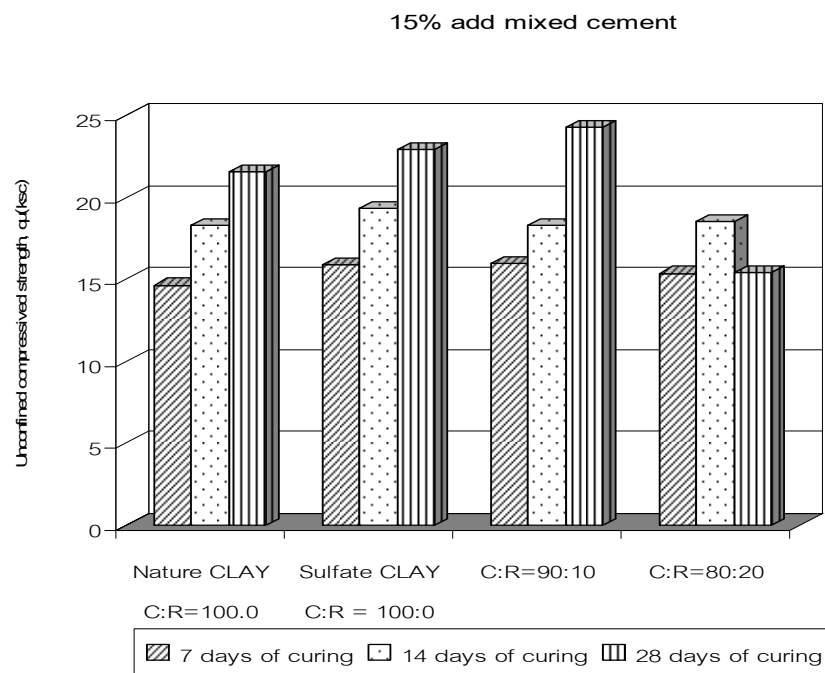
รูปที่ 4.8 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทดแทนปริมาณซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15%



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ ในอัตราส่วน 100:0, 90:10 และ 80:20 ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักดินแห้ง



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ ในอัตราส่วน 100:0, 90:10 และ 80:20 ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินแห้ง



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบ ในอัตราส่วน 100:0, 90:10 และ 80:20 ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักดินแห้ง

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมของการรับกำลังอัดของดินเหนียว ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ผสมแกลบและสารละลายซัลเฟต ที่อัตราส่วนผสมต่างๆสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 จากผลการทดสอบจะสรุปได้ว่ากำลังรับแรงอัดของดินเหนียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้น โดยมีค่าการรับกำลังอัดสูงสุดที่ปริมาณการแทนที่ของซีเมนต์ด้วยแกลบ 0% เท่ากับ 6.8, 7.86 และ 13.23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ในปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ 5%, 10% และ 15% ของน้ำหนักดินแห้งตามลำดับ สำหรับกรณีที่ดินผสมปูนซีเมนต์ กับแกลบที่ปริมาณการแทนที่ของซีเมนต์ด้วยแกลบ 100:0, 90:10 และ 80:20 เท่ากับ 11.04, 14.82 และ 12.99 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 14 วัน โดยค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มเช่นเดียวกับที่เกิดในปูนซีเมนต์อย่างเดียว เนื่องจากการที่ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และเกิดต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะช่วยทำให้กำลังอัดของดินที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์ผสมแกลบ และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พัฒนาขึ้นช้าในช่วงต้น เพิ่มสูงขึ้นไปได้เรื่อยๆโดยจะมีค่าสูงกว่าดินที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวที่มีกำลังอัดที่อายุเท่าๆ กัน

5.1.2 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติ และดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟต มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีเมนต์ และอายุบ่ม จนถึงปริมาณซีเมนต์ค่าหนึ่งกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลง ปริมาณซีเมนต์ที่ทำให้กำลังอัดแกนเดียวมีค่าสูงสุด ในปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าสูงในช่วงอายุบ่มระหว่าง 7 ถึง 28 วัน หลังจากนั้น อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลง โดยที่กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติ จากการแทนที่แกลบในดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟต พบว่าที่ปริมาณสารเชื่อมประสาน (ซีเมนต์ + แกลบ) เท่ากับ 19 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง และอัตราส่วนแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ ที่อายุบ่มน้อยกว่า 28 วัน กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติ การทดแทนซีเมนต์ด้วยแกลบในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้ดินมีกำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น แต่ต้องใช้เวลาในการบ่มตัวอย่างนานขึ้น และปริมาณของซัลเฟตที่ผสมในดินด้วย

5.1.3 ต้นทุนการก่อสร้าง เมื่อใช้ปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ราคาต้นทุนจะลดลงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว คือที่ปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ 5% , 10% และ 15% มีราคาต้นทุนต่ำกว่าปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ 0% เนื่องจากเถ้าแกลบเป็นวัสดุเหลือใช้ มีราคาถูกกว่าราคาปูนซีเมนต์อยู่มาก เมื่อเปรียบเทียบราคาต้นทุนต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินเหนียวมวลเบาที่อายุ 28 วัน พบว่าดินที่มีความหนาแน่นน้อยราคาต้นทุนต่อค่ากำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าดินที่มีความหนาแน่นมาก ยิ่งถ้ามีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยก็จะทำให้ราคาต้นทุนต่อค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าราคาต้นทุนต่อค่ากำลังรับแรงอัดของดินที่มีปริมาณซีเมนต์มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการศึกษาพฤติกรรมของการรับกำลังอัดของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ สารละลายซัลเฟต ผสมเถ้าแกลบ ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ขอแนะนำให้หาวิธีนำตัวอย่างดินออกจาก Mold หลังจากการบดอัดด้วยความระมัดระวัง เพื่อป้องกันการรบกวนตัวอย่างดินไม่ให้เกิดการกระทบกระเทือนมากนัก มิฉะนั้นจะทำให้ตัวอย่างดินเสียหายจนไม่อาจนำไปใช้ทดสอบหาค่าการรับกำลังรับแรงอัดของดินได้

5.2.2 ควรทำการตรวจสอบความพร้อมของเครื่องมือทดสอบก่อนทุกครั้ง โดยเฉพาะเครื่อง Unconfined compressive test เพราะหากอุปกรณ์เกิดการชำรุดเพียงเล็กน้อยจะส่งผลทำให้ค่าที่อ่านได้จากเข็มวัดแรง (Dial gage) ผิดพลาดได้

5.2.3 ในการทดสอบนี้ใช้ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างดินค่อนข้างน้อย หากมีผู้สนใจทดลองต่ออาจเพิ่มเวลาให้มากขึ้นได้ โดยเหตุที่ซัลเฟตต้องใช้ระยะเวลาในการกักกร่อน เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลกระทบในด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] Awal. 1979. **Effect of Portland Cement Mixing on Soil Properties**. Master of Engineering Thesis, Geotechnical Engineering Program: Asian Institute of Technology.
- [2] Chindaprasirt P, Praparntanatorn S. 1983. **A Study of Portland Cements Containing Rice Husk Ash**. In: Proceeding of the Ninth Conference on Science and Technology for the Development of Noreast Thailand: Khon Kaen.
- [3] Cook, D.J., and Suwanvitaya, P. 1981. **Rice husk ash based cement-a state of art review** **Proc. UNIDO/ESCAP/RCTT Third workshop on rice husk ash cements** New Delhi India.
- [4] Dividson D.T., 1961. **Soil Stabilization with Portland Cement**. Highway Research Board: Bull 292.
- [5] Felt. E.J., 1955. **Factors Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures**. Highway Research Board: Bull 108.
- [6] Grimer, F.J. and Krawzyk, J., 1963. **Relation between Strength and Age for Soil-Cement with Particular Reference to the Prediction of Later Strength Form Earlier Strengths**. Magazine Concrete Research, Vol.15, No.43.
- [7] Herzog, A. and Mitchell, J.K., 1963. **Reactions Accompanying Stabilization of clay with Cement**. Highway Research Board. No.36.
- [8] Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization. 1959. **Defintion of Terms Relation to Soil-Portland Cement Stabilization**. Washington D.C., National Academy of Sciences : 28-29
- [9] Mehta P.K., 1977. **Properties of Blended Cement Made from RHA**. ACI Journal, Vol. 74, No.9, September
- [10] Mitchell, J.K. and el Jack, S.A., 1966. **The Fabric of Soil-Cement and its Formation**. Proceedings of 14 National Clay and Clay Minerals, Vol. 26: 297-305.
- [11] Moh, Z.C., 1965. **Reaction of soil Minerals with Cement and Chemicals**. Highway Research Record, No. 86: 39-61.
- [12] Portland Cement Asssocation. 1959. **Soil Cement Laboratory Handbook**. Illinois. Scolder: 60.

- [13] Portland Cement Association. 1963. **Soil Cement Inspector's Manual**. Illinois, Skokie: 52p.
- [14] Ravina. 1980. **Cement and Concrete Res.**10: 573-80.
- [15] Redus, J.F., 1958. **Study of Soil-Cement Base Courses on Military Airfields**. Highway Research Board, Bull 198: 13-18.
- [16] Saitoh, S., Suzuki, Y. and Shirai, K., 1985. **Hardening of soil Improved by deep Mixing Method**. Proceedings of the 11th International Conferences on Soil Mechanics and Foundation Engineering: San Francisco, Vol.3: 1745-1748.
- [17] Skempton, A.W., 1944. **Notes on the compressibility of clays**. Q.J. Geol Soc., Vol. 100: 119-135.
- [18] Terrel R.L. Barengerg E.J., Mitchell, J.M and Thomson. M.R., 1979. **Soil Stabilization in Pavement Structures A User's Manual Mixture Design Consideration**. Vol. 2. Washington, D.C. US. Government Printion Offices: 120 p.
- [19] Uddin, Md., Kamal, 1995. **Strength and deformation Characteristics of Cement Treated Bangkok Clay**. D.Eng Dissertation No. GT-94-I, Asian Institute of Technology: Bangkok Thailand.
- [20] Rinhold, F., 1955. **Elastic Behavior of soil Cement Mixture**. Highway Research Board, Bull 108: 128-137
- [21] Metcalf, J.B. 1977. **Principles and application of Cement and Lime Stabilization**. Australian Road Research Board: No.49.
- [22] Massachusetts Institute of Technology, 1954. **Soil Stabilization for Highway**. Massachusetts Department of Public Work and Joint Highway Research Project: 81p.
- [23] Clare, K.E. and Farrar, 1956. **The Use of Cement of Different Fineness in soil-Cement Mixtures**. Magazine Concrete Research, Vol.8 No.24: 137-144.
- [24] Clare, K.E. and Pollard, A.E., 1954. **The Effect of Curing Temperature on the Compressive Strength of Soil-Cement Mixture**. Geotechnique, Vol.4, No.3: 97-107.
- [25] Ruenkairergsa, T., 1982. **Principle of Soil Stabilization Group Training in Road Construction**. Highway Department of Thailand: 150p.

- [26] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธุ์ วงษ์พา และ สุรพันธุ์ สุคันธปรีย์. 2545. การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อใช้ในงานคอนกรีต. การประชุมทางวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, 23-25 ตุลาคม, ขอนแก่น.
- [27] บัณฑิต หิรัญสถิตย์พร. การศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าแกลบขี้เถ้าลอยและสารลดน้ำพิเศษ. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2534
- [28] ปริญา จินดาประเสริฐ ปละ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547., ปูนซีเมนต์ วัสดุปอชโซลาน และคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ต.) กรุงเทพฯ
- [29] สุขสันต์ หอพิบูลย์สุข, 2547., รายงานการวิจัยการเพิ่มกำลังของดินเหนียวและดินตะกอนโดยการผสมซีเมนต์สำหรับงานฐานราก., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา
- [30] ยุทธนา รักษาชนม์, สุขสันต์ หอพิบูลย์สุข และธีรวัฒน์ ลินศิริ, 2550. อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์บดอัด, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [31] อภิชาติ คำภาห้ำ, วรชัย เกษกัน และ สุขสันต์ หอพิบูลย์สุข., 2550. กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์และเถ้าแกลบ, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [32] กนก ต่ายคำ. 2548. “พฤติกรรมกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวมวลเบาที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและน้ำยาเคมีอัดอากาศ”. วิทยานพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [33] Davison, D.T., Pitre, G.L., Mateos, M. and Kalankamary, P.G., 1962, “Moisture-Density, Moisture-Strength and Compaction Characteristics of Cement-Treated Soil Mixtures”, Highway Research Board, Bull.353.

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียว

ตารางที่ ก. 1 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินเหนียวซีเมนต์กับเส้นใยแก้วเท่ากับ 100:0

Unconfined Compression Test												
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1		
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	22.481 cm ²	
1	5.340	5.340	5.325	5.335	22.385	22.259	22.343	22.364	9.950	Hight of Sample, HT =	10.007 cm	
2	5.355	5.350	5.330	5.345	22.511	22.301	22.427	22.469	9.950	Reading rate =	1 mm/min	
3	5.380	5.355	5.335	5.357	22.721	22.343	22.525	22.623	10.120	Proving ring constant =	0.3525 kg/div	
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm2)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)	
	1	2	3	0	0	0	0	0	22.481	0	0	
0	0	0	0	38	63	26	42	0.010	22.708	14.923	0.657	
10	0.10	0.10	0.10	68	107	57	77	0.025	23.057	27.260	1.182	
25	0.25	0.25	0.25	118	178	111	136	0.050	23.663	47.823	2.021	
50	0.50	0.50	0.50	172	255	164	197	0.075	24.302	69.443	2.857	
75	0.75	0.75	0.75	222	316	224	254	0.100	24.977	89.535	3.585	
100	1.00	1.00	1.00	315	415	340	357	0.150	26.445	125.725	4.754	
150	1.50	1.50	1.50	389	486	439	438	0.200	28.096	154.395	5.495	
200	2.00	2.00	2.00									

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง
ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยแก้วกับ 90:10

Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	22.693 cm ²
1	5.365	5.415	5.395	5.392	22.595	22.848	22.820	22.707	10.110	Hight of Sample, HT =	10.080 cm
2	5.375	5.365	5.35	5.363	22.679	22.469	22.581	22.630	9.985	Reading rate =	1 mm/min
3	5.400	5.385	5.355	5.380	22.891	22.511	22.721	22.806	10.145	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.693	0	0
10	0.10	57	58	39	57	58	51	0.010	22.920	18.095	0.789
25	0.25	96	98	83	96	98	92	0.025	23.270	32.548	1.399
50	0.50	149	153	113	149	153	138	0.050	23.877	48.763	2.042
75	0.75	198	201	183	198	201	194	0.074	24.517	68.385	2.789
100	1.00	242	239	237	242	239	239	0.099	25.192	84.365	3.349
150	1.50	299	293	311	299	293	301	0.149	26.660	106.103	3.980
200	2.00	334	323	365	334	323	341	0.198	28.310	120.085	4.242

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าเกลบเท่ากับ 80:20

Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	cm ²
1	5.395	5.355	5.375	5.375	22.848	22.679	22.679	22.764	10.175	Hight of Sample, HT =	10.062 cm
2	5.38	5.350	5.370	5.367	22.721	22.637	22.609	22.665	10.025	Reading rate =	1 mm/min
3	5.395	5.395	5.355	5.382	22.848	22.511	22.735	22.792	9.985	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.721	0	0
10	0.10	43	38	51	43	38	44	0.010	22.949	15.510	0.676
25	0.25	74	64	81	74	64	73	0.025	23.300	25.733	1.104
50	0.50	116	99	110	116	99	108	0.050	23.909	38.188	1.597
75	0.75	155	132	140	155	132	142	0.075	24.551	50.173	2.044
100	1.00	190	160	161	190	160	170	0.099	25.228	60.043	2.380
150	1.50	242	195	196	242	195	211	0.149	26.702	74.378	2.786
200	2.00	276	219	220	276	219	238	0.199	28.358	84.013	2.963

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง

ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยลพพเท่ากับ 100:0

Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	22.517 cm ²
1	5.350	5.375	5.325	5.350	22.469	22.679	22.259	22.364	10.055	Hight of Sample, HT =	10.043 cm
2	5.390	5.390	5.330	5.370	22.806	22.806	22.301	22.553	9.955	Reading rate =	1 mm/min
3	5.395	5.395	5.335	5.375	22.848	22.848	22.343	22.596	10.120	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.517	0	0
10	0.10	65	26	68	65	26	53	0.010	22.743	18.683	0.821
25	0.25	150	57	138	150	57	115	0.025	23.092	40.538	1.755
50	0.50	292	111	286	292	111	230	0.050	23.697	80.958	3.416
75	0.75	423	164	457	423	164	348	0.075	24.334	122.670	5.041
100	1.00	545	224	628	545	224	466	0.100	25.007	164.148	6.564
150	1.50	680	340	856	680	340	625	0.149	26.471	220.430	8.327
200	2.00	738	439	970	738	439	716	0.199	28.116	252.273	8.973

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง
ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นแกลบเท่ากับ 80:20

Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	22.828 cm ²
1	5.425	5.34	5.375	5.380	23.103	22.385	22.679	22.891	9.875	Hight of Sample, HT =	9.968 cm
2	5.42	5.395	5.37	5.395	23.060	22.848	22.637	22.849	10.045	Reading rate =	1 mm/min
3	5.405	5.39	5.355	5.383	22.933	22.806	22.511	22.722	9.985	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm2)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.828	0	0
10	0.10			87	34	38	53	0.010	23.059	18.683	0.810
25	0.25			170	79	64	104	0.025	23.415	36.778	1.571
50	0.50			294	186	99	193	0.050	24.034	68.033	2.831
75	0.75			406	320	132	286	0.075	24.685	100.815	4.084
100	1.00			497	435	160	364	0.100	25.373	128.310	5.057
150	1.50			637	605	195	479	0.150	26.872	168.848	6.283
200	2.00			724	700	219	548	0.201	28.558	193.053	6.760

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าเกลบเท่ากับ 100:0												
Unconfined Compression Test												
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1		
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ = 22.516 cm ²		
1	5.370	5.385	5.325	5.360	22.637	22.764	22.259	22.448	9.960	Hight of Sample, HT = 10.058 cm		
2	5.380	5.390	5.330	5.367	22.721	22.806	22.301	22.511	10.095	Reading rate = 1 mm/min		
3	5.395	5.450	5.335	5.393	22.848	23.316	22.343	22.596	10.120	Proving ring constant = 0.3525 kg/div		
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)	
				1	2	3						
0	0			0	0	0	0	0	22.516	0	0	
10	0.10			25	70	26	40	0.010	22.742	14.218	0.625	
25	0.25			55	300	57	137	0.025	23.090	48.410	2.097	
50	0.50			140	610	111	287	0.050	23.694	101.168	4.270	
75	0.75			320	840	164	441	0.075	24.330	155.570	6.394	
100	1.00			560	1060	224	615	0.099	25.002	216.670	8.666	
150	1.50			1250	1410	340	1000	0.149	26.462	352.500	13.321	
200	2.00			1720	1650	439	1270	0.199	28.104	447.558	15.925	

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อุณหภูม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยแก้วเท่ากับ 90:10

Unconfined Compression Test											
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	cm ²
1	5.395	5.440	5.395	5.410	22.848	23.231	22.848	22.848	9.965	Hight of Sample, HT =	10.020 cm
2	5.420	5.450	5.350	5.407	23.060	23.316	22.469	22.765	9.950	Reading rate =	1 mm/min
3	5.450	5.430	5.355	5.412	23.316	23.146	22.511	22.914	10.145	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.823	0	0
10	0.10	150	158	30	150	158	112.667	0.010	23.053	39.715	1.723
25	0.25	290	198	150	290	198	212.667	0.025	23.407	74.965	3.203
50	0.50	510	253	370	510	253	377.667	0.050	24.022	133.128	5.542
75	0.75	700	501	600	700	501	600.333	0.075	24.670	211.618	8.578
100	1.00	860	739	830	860	739	809.667	0.100	25.353	285.408	11.257
150	1.50	1110	1293	1230	1110	1293	1211.000	0.150	26.841	426.878	15.904
200	2.00	1023	1323	1530	1023	1323	1292.000	0.199	28.488	455.430	15.987

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อุณหภูม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ที่ลู่ได้กับเล้าแกลบเท่ากับ 100:0

Unconfined Compression Test											
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	22.827 cm ²
1	5.375	5.395	5.355	5.375	22.679	22.848	22.511	22.595	10.095	Hight of Sample, HT =	10.133 cm
2	5.395	5.395	5.395	5.395	22.848	22.848	22.848	22.848	10.15	Reading rate =	1 mm/min
3	5.425	5.395	5.405	5.408	23.103	22.848	22.933	23.018	10.155	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm2)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.827	0	0
10	0.10	20	50	76	20	50	49	0.010	23.055	17.155	0.744
25	0.25	180	210	180	180	210	190	0.025	23.404	66.975	2.862
50	0.50	430	440	450	430	440	440	0.049	24.012	155.100	6.459
75	0.75	680	620	720	680	620	673	0.074	24.652	237.350	9.628
100	1.00	900	750	940	900	750	863	0.099	25.326	304.325	12.016
150	1.50	1110	810	1200	1110	810	1040	0.148	26.793	366.600	13.683
200	2.00	810	766	1260	810	766	945	0.197	28.440	333.230	11.717

ตารางที่ ก. 12 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินเหนียวซีลเฟตกับเถ้าแกลบเท่ากับ 80:200												
Unconfined Compression Test												
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1		
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ = 22.706 cm ²		
1	5.385	5.415	5.370	5.390	22.764	23.018	22.637	22.700	10.070	Hight of Sample, HT = 10.117 cm		
2	5.380	5.400	5.370	5.383	22.721	22.891	22.637	22.679	10.195	Reading rate = 1 mm/min		
3	5.390	5.395	5.380	5.388	22.806	22.848	22.721	22.764	10.085	Proving ring constant = 0.3525 kg/div		
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)	
	1	2	3									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.706	0	0	
10	0.10	123	119	79	123	119	107	0.010	22.933	37.718	1.645	
25	0.25	299	229	227	299	229	252	0.025	23.281	88.713	3.810	
50	0.50	498	403	450	498	403	450	0.049	23.887	158.743	6.646	
75	0.75	692	554	652	692	554	633	0.074	24.524	223.015	9.094	
100	1.00	883	691	839	883	691	804	0.099	25.197	283.528	11.253	
150	1.50	1189	879	1169	1189	879	1079	0.148	26.659	380.348	14.267	
200	2.00	1391	942	1387	1391	942	1240	0.198	28.301	437.100	15.445	

ตารางที่ ก. 13 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อุณหภูม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นแกลบเท่ากับ 100:0

Unconfined Compression Test											
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	22.753 cm ²
1	5.380	5.355	5.385	5.373	22.721	22.511	22.764	22.742	10.035	Hight of Sample, HT =	10.048 cm
2	5.385	5.360	5.385	5.377	22.764	22.553	22.764	22.764	10.120	Reading rate =	1 mm/min
3	5.395	5.390	5.370	5.385	22.848	22.806	22.637	22.743	9.990	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.753	0	0
10	0.10			104.00	153.00	118.00	125	0.010	22.982	44.063	1.917
25	0.25			205.00	266.00	252.00	241	0.025	23.334	84.953	3.641
50	0.50			360.00	426.00	392.00	393	0.050	23.945	138.415	5.781
75	0.75			501.00	560.00	540.00	534	0.075	24.588	188.118	7.651
100	1.00			622.00	672.00	661.00	652	0.100	25.268	229.713	9.091
150	1.50			784.00	813.00	853.00	817	0.149	26.746	287.875	10.763
200	2.00			864.00	872.00	933.00	890	0.199	28.407	313.608	11.040

ตารางที่ ก.14 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินเหนียวซีลเฟตกับเส้นใยแก้วเท่ากับ 90:10												
Unconfined Compression Test												
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1		
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =		
1	5.390	5.410	5.375	5.392	22.806	22.975	22.679	22.743	9.995	10.030 cm		
2	5.375	5.365	5.395	5.378	22.679	22.595	22.848	22.764	10.110	1 mm/min		
3	5.390	5.355	5.420	5.388	22.806	22.511	23.060	22.933	9.985	Proving ring constant = 0.3525 kg/div		
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)		
				1	2	3				Axial Stress (ksc)		
0	0			0	0	0	0	0	22.801	0		
10	0.10			176.00	173.00	174.50	175	0.010	23.031	61.511		
25	0.25			313.00	284.00	298.50	299	0.025	23.384	105.221		
50	0.50			512.00	466.00	489.00	489	0.050	23.997	172.373		
75	0.75			698.00	635.00	666.50	667	0.075	24.644	234.941		
100	1.00			848.00	795.00	821.50	822	0.100	25.326	289.579		
150	1.50			1080.00	1027.00	1053.50	1054	0.150	26.811	371.359		
200	2.00			1231.00	1165.00	1198.00	1198	0.199	28.480	422.295		

ตารางที่ ก.15 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยเท่ากับ 80:20												
Unconfined Compression Test												
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1		
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ = 22.711 cm ²		
1	5.385	5.360	5.375	5.373	22.764	22.553	22.679	22.721	10.120	Hight of Sample, HT = 10.035 cm		
2	5.380	5.345	5.380	5.368	22.721	22.427	22.721	22.721	9.990	Reading rate = 1 mm/min		
3	5.380	5.370	5.370	5.373	22.721	22.637	22.637	22.679	9.995	Proving ring constant = 0.3525 kg/div		
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)		
	1	2	3							Axial Stress (ksc)		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.711	0		
10	0.10	123.00	134.00	146.00	123.00	134.00	134	0.010	22.940	47.353		
25	0.25	231.00	240.00	247.00	231.00	240.00	239	0.025	23.291	84.365		
50	0.50	400.00	405.00	400.00	400.00	405.00	402	0.050	23.902	141.588		
75	0.75	546.00	544.00	542.00	546.00	544.00	544	0.075	24.545	191.760		
100	1.00	681.00	675.00	670.00	681.00	675.00	675	0.100	25.225	238.055		
150	1.50	910.00	886.00	882.00	910.00	886.00	893	0.149	26.702	314.665		
200	2.00	1064.00	1044.00	1027.00	1064.00	1044.00	1045	0.199	28.364	368.363		

ตารางที่ ก.16 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยเท่ากับ 100:0

Unconfined Compression Test											
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	cm ²
1	5.380	5.365	5.375	5.373	22.721	22.595	22.679	22.700	9.955	Hight of Sample, HT =	10.030 cm
2	5.355	5.370	5.350	5.358	22.511	22.637	22.469	22.490	10.000	Reading rate =	1 mm/min
3	5.350	5.355	5.390	5.365	22.469	22.511	22.806	22.637	10.135	Proving ring constant =	3.2027 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.579	0	0
10	0.10	12.00	8.00	23	12.00	8.00	14	0.010	22.806	45.905	2.013
25	0.25	30.00	18.52	50	30.00	18.52	33	0.025	23.156	105.180	4.542
50	0.50	75.00	21.71	90	75.00	21.71	62	0.050	23.764	199.325	8.388
75	0.75	101.00	110.00	120	101.00	110.00	110	0.075	24.404	353.365	14.480
100	1.00	140.00	142.00	145	140.00	142.00	142	0.100	25.079	455.851	18.176
150	1.50	180.00	168.00	180	180.00	168.00	176	0.150	26.550	563.675	21.231
200	2.00	210.00	196.00	200	210.00	196.00	202	0.199	28.203	646.945	22.939

ตารางที่ ก.17 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง

ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยแก้วเท่ากับ 90:10

Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	22.511 cm ²
1	5.390	5.335	5.340	5.355	22.806	22.343	22.385	22.595	10.145	Hight of Sample, HT =	10.045 cm
2	5.350	5.330	5.360	5.347	22.469	22.301	22.553	22.511	9.965	Reading rate =	1 mm/min
3	5.340	5.340	5.350	5.343	22.385	22.385	22.469	22.427	10.025	Proving ring constant =	3.2027 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm2)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.511	0	0
10	0.10	0.10	0.10	50	10	35	32	0.010	22.738	101.419	4.460
25	0.25	0.25	0.25	100	65	80	82	0.025	23.086	261.554	11.329
50	0.50	0.50	0.50	150	90	130	123	0.050	23.692	395.000	16.672
75	0.75	0.75	0.75	180	110	160	150	0.075	24.330	480.405	19.745
100	1.00	1.00	1.00	200	130	170	167	0.100	25.004	533.783	21.348
150	1.50	1.50	1.50	240	150	195	195	0.150	26.470	624.527	23.594
200	2.00	2.00	2.00	260	160	220	213	0.199	28.118	683.243	24.299

ตารางที่ ก.18 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยเท่ากับ 80:20												
Unconfined Compression Test												
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1		
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ = 22.427 cm ²		
1	5.340	5.345	5.390	5.358	22.385	22.427	22.806	22.595	9.895	Hight of Sample, HT = 9.975 cm		
2	5.330	5.345	5.355	5.343	22.301	22.427	22.511	22.406	9.940	Reading rate = 1 mm/min		
3	5.320	5.365	5.340	5.342	22.217	22.595	22.385	22.301	10.090	Proving ring constant = 3.2027 kg/div		
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)	
	1	2	3									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.427	0	0	
10	0.10	86	105	70	86	105	87	0.010	22.654	30.668	1.354	
25	0.25	139	157	108	139	157	135	0.025	23.004	47.470	2.064	
50	0.50	194	223	150	194	223	189	0.050	23.611	66.623	2.822	
75	0.75	242	270	183	242	270	232	0.075	24.250	81.663	3.367	
100	1.00	275	309	209	275	309	264	0.100	24.926	93.178	3.738	
150	1.50	330	363	245	330	363	313	0.150	26.397	110.215	4.175	
200	2.00	361	400	263	361	400	341	0.201	28.052	120.320	4.289	

ตารางที่ ก.20 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยเท่ากับ 90:10												
Unconfined Compression Test												
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1		
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ = 22.548 cm ²		
1	5.345	5.325	5.425	5.365	22.427	22.259	23.103	22.765	10.210	Hight of Sample, HT = 10.133 cm		
2	5.340	5.320	5.360	5.340	22.385	22.217	22.553	22.469	10.045	Reading rate = 1 mm/min		
3	5.345	5.370	5.360	5.358	22.427	22.637	22.553	22.490	10.145	Proving ring constant = 0.3525 kg/div		
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)	
	1	2	3									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.548	0	0	
10	0.10	120	149	134	120	149	134	0.010	22.773	47.353	2.079	
25	0.25	187	234	210	187	234	210	0.025	23.118	74.143	3.207	
50	0.50	254	322	284	254	322	287	0.049	23.718	101.050	4.260	
75	0.75	305	395	349	305	395	350	0.074	24.350	123.258	5.062	
100	1.00	342	459	323	342	459	375	0.099	25.017	132.070	5.279	
150	1.50	363	558	461	363	558	461	0.148	26.466	162.385	6.136	
200	2.00	379	629	504	379	629	504	0.197	28.093	177.660	6.324	

ตารางที่ ก.21 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยเท่ากับ 80:20												
Unconfined Compression Test												
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1		
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ = 22.359 cm ²		
1	5.330	5.330	5.330	5.330	22.301	22.301	22.301	22.301	10.180	Hight of Sample, HT = 10.105 cm		
2	5.355	5.335	5.310	5.333	22.511	22.343	22.134	22.322	10.155	Reading rate = 1 mm/min		
3	5.390	5.340	5.315	5.348	22.806	22.385	22.176	22.491	9.980	Proving ring constant = 3.2027 kg/div		
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)		
				1	2	3						
0	0			0	0	0	0	0	22.359	0		
10	0.10			11	7	6	8	0.010	22.582	25.622		
25	0.25			20	19	18	19	0.025	22.926	60.851		
50	0.50			22	23	21	22	0.049	23.523	70.459		
75	0.75			25	29	24	26	0.074	24.152	83.270		
100	1.00			27	25	23	25	0.099	24.815	80.068		
150	1.50			28	27	21	25	0.148	26.257	81.135		
200	2.00			27	24	20	24	0.198	27.876	75.797		

ตารางที่ ก.22 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยเท่ากับ 100:0												
Unconfine Compression Test												
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1		
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ = 22.648 cm ²		
1	5.390	5.335	5.395	5.373	22.806	22.343	22.848	22.827	10.320	Hight of Sample, HT = 10.287 cm		
2	5.370	5.395	5.360	5.375	22.637	22.848	22.553	22.595	10.285	Reading rate = 1 mm/min		
3	5.365	5.465	5.360	5.397	22.595	23.445	22.553	22.574	10.255	Proving ring constant = 3.2027 kg/div		
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)	
				1	2	3						
0	0			0	0	0	0	0	22.648	0	0	
10	0.10			16	22	16	18	0.010	22.870	57.649	2.521	
25	0.25			23	43	33	33	0.024	23.212	105.689	4.553	
50	0.50			42	57	60	53	0.049	23.805	169.743	7.131	
75	0.75			57	68	77	67	0.073	24.429	215.648	8.828	
100	1.00			69	74	83	75	0.097	25.087	241.270	9.617	
150	1.50			83	83	86	84	0.146	26.514	269.027	10.147	
200	2.00			80	84	75	80	0.194	28.114	255.148	9.076	

ตารางที่ ก.23 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินเหนียวซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 90:10												
Unconfine Compression Test												
Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1		
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =		
1	5.415	5.390	5.400	5.402	23.018	22.806	22.891	22.954	10.180	10.225 cm		
2	5.410	5.390	5.385	5.395	22.975	22.806	22.764	22.870	10.295	1 mm/min		
3	5.410	5.385	5.380	5.392	22.975	22.764	22.721	22.848	10.200	Proving ring constant = 3.2027 kg/div		
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)		
				1	2	3				Axial Stress (ksc)		
0	0			0	0	0	0	0	22.885	0		
10	0.10			17	7	10	11	0.010	23.111	36.297		
25	0.25			38	22	16	25	0.024	23.459	81.135		
50	0.50			63	37	26	42	0.049	24.062	134.513		
75	0.75			81	48	33	54	0.073	24.696	172.946		
100	1.00			92	55	37	61	0.098	25.366	196.432		
150	1.50			96	53	42	64	0.147	26.819	203.905		
200	2.00			89	35	54	59	0.196	28.450	190.027		

ตารางที่ ก. 24 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง

ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเถ้าแกลบเท่ากับ 80:20

Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	23.009 cm ²
1	5.480	5.480	5.415	5.458	23.574	23.574	23.018	23.296	10.135	Hight of Sample, HT =	10.180 cm
2	5.355	5.475	5.455	5.428	22.511	23.531	23.359	22.935	10.160	Reading rate =	1 mm/min
3	5.355	5.455	5.440	5.417	22.511	23.359	23.231	22.871	10.245	Proving ring constant =	3.2027 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
				1	2	3					
0	0			0	0	0	0	0	23.009	0	0
10	0.10			6	7	8	7	0.010	23.237	22.419	0.965
25	0.25			23	14	20	19	0.025	23.588	60.851	2.580
50	0.50			28	21	25	25	0.049	24.197	79.000	3.265
75	0.75			52	22	37	37	0.074	24.839	118.500	4.771
100	1.00			68	47	57	57	0.098	25.515	183.621	7.196
150	1.50			78	63	70	70	0.147	26.955	225.257	8.347
200	2.00			76	76	95	82	0.196	28.635	263.689	9.209

ตารางที่ ก.25 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุ 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง
ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยแก้วกับ 100:0

Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	23.483 cm ²
1	5.475	5.480	5.415	5.457	23.531	23.574	23.018	23.274	10.285	Hight of Sample, HT =	10.207 cm
2	5.455	5.480	5.495	5.477	23.359	23.574	23.703	23.531	10.210	Reading rate =	1 mm/min
3	5.455	5.470	5.510	5.478	23.359	23.488	23.833	23.596	10.125	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm2)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	23.483	0.000	0
10		0.10		155	178	143	159	0.010	23.715	55.930	2.358
25		0.25		356	385	462	401	0.024	24.073	141.353	5.872
50		0.50		708	702	845	752	0.049	24.693	264.963	10.730
75		0.75		1008	963	1190	1054	0.073	25.345	371.418	14.654
100		1.00		1234	1187	1368	1263	0.098	26.034	445.208	17.101
150		1.50		1443	1374	1598	1472	0.147	27.529	518.763	18.845
200		2.00		1620	1568	1621	1603	0.196	29.206	565.058	19.348

ตารางที่ ก. 26 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง

ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเส้นใยแก้วกับ 90:10

Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	cm ²
1	5.485	5.415	5.455	5.452	23.617	23.018	23.359	23.488	10.235	Hight of Sample, HT =	10.227 cm
2	5.325	5.490	5.425	5.413	22.259	23.660	23.103	22.681	10.150	Reading rate =	1 mm/min
3	5.455	5.465	5.495	5.472	23.359	23.445	23.703	23.531	10.295	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	23.095	0.000	0
10	0.10	281	128	25	281	128	145	0.010	23.323	51.022	2.188
25	0.25	476	298	26	476	298	267	0.024	23.674	93.990	3.970
50	0.50	795	591	27	795	591	471	0.049	24.282	166.075	6.839
75	0.75	980	865	29	980	865	625	0.073	24.923	220.203	8.835
100	1.00	1223	1088	1155	1223	1088	1155	0.098	25.598	407.255	15.910
150	1.50	1523	1340	1430	1523	1340	1431	0.147	27.065	504.428	18.638
200	2.00	1616	1366	1490	1616	1366	1491	0.196	28.709	525.460	18.303

ตารางที่ ก.27 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมต่าง

ดินซีเมนต์ซีลเฟดกับเส้นแกลบเท่ากับ 80:20

Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	23.489 cm ²
1	5.490	5.465	5.410	5.455	23.660	23.445	22.975	23.318	10.175	Hight of Sample, HT =	10.148 cm
2	5.490	5.480	5.490	5.487	23.660	23.574	23.660	23.660	10.220	Reading rate =	1 mm/min
3	5.475	5.425	5.425	5.442	23.531	23.103	23.103	23.317	10.050	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	23.489	0.000	0
10	0.10	178	163	138	178	163	160	0.010	23.723	56.283	2.373
25	0.25	340	366	310	340	366	339	0.025	24.082	119.380	4.957
50	0.50	608	652	537	608	652	599	0.049	24.706	211.148	8.546
75	0.75	843	913	755	843	913	837	0.074	25.364	295.043	11.633
100	1.00	1050	1125	949	1050	1125	1041	0.099	26.057	367.070	14.087
150	1.50	1367	1455	1244	1367	1455	1355	0.148	27.563	477.755	17.333
200	2.00	1549	1644	1419	1549	1644	1537	0.197	29.255	541.910	18.524

ตารางที่ ก. 28 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติที่อายุ 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง

Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	25.318 cm ²
1	5.660	5.635	5.525	5.607	25.148	24.926	23.963	24.555	10.320	Hight of Sample, HT =	10.297 cm
2	5.880	5.675	5.590	5.715	27.141	25.281	24.530	25.835	10.350	Reading rate =	1 mm/min
3	5.760	5.650	5.535	5.648	26.044	25.059	24.049	25.047	10.220	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	25.318	0.000	0
10	0.10	104	133	97	104	133	111	0.010	25.566	39.245	1.535
25	0.25	188	238	173	188	238	200	0.024	25.948	70.383	2.712
50	0.50	277	358	273	277	358	303	0.049	26.610	106.690	4.009
75	0.75	353	462	363	353	462	393	0.073	27.307	138.415	5.069
100	1.00	413	553	424	413	553	463	0.097	28.041	163.325	5.824
150	1.50	472	687	531	472	687	563	0.146	29.635	198.575	6.701
200	2.00	567	758	520	567	758	615	0.194	31.421	216.788	6.899

ตารางที่ ก. 29 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง

Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Hight of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	25.027 cm ²
1	5.610	5.610	5.675	5.632	24.706	24.706	25.281	24.994	10.350	Hight of Sample, HT =	10.322 cm
2	5.695	5.610	5.635	5.647	25.460	24.706	24.926	25.193	10.370	Reading rate =	1 mm/min
3	5.610	5.610	5.615	5.612	24.706	24.706	24.750	24.728	10.245	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	25.027	0.000	0
10	0.10	118	157	117	118	157	131	0.010	25.272	46.060	1.823
25	0.25	261	315	223	261	315	266	0.024	25.648	93.883	3.660
50	0.50	420	527	357	420	527	435	0.048	26.301	153.220	5.826
75	0.75	545	714	478	545	714	579	0.073	26.988	204.098	7.563
100	1.00	610	852	573	610	852	678	0.097	27.712	239.113	8.629
150	1.50	756	1018	671	756	1018	815	0.145	29.282	287.288	9.811
200	2.00	667	890	520	667	890	692	0.194	31.042	244.048	7.862

ตารางที่ ก. 30 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง

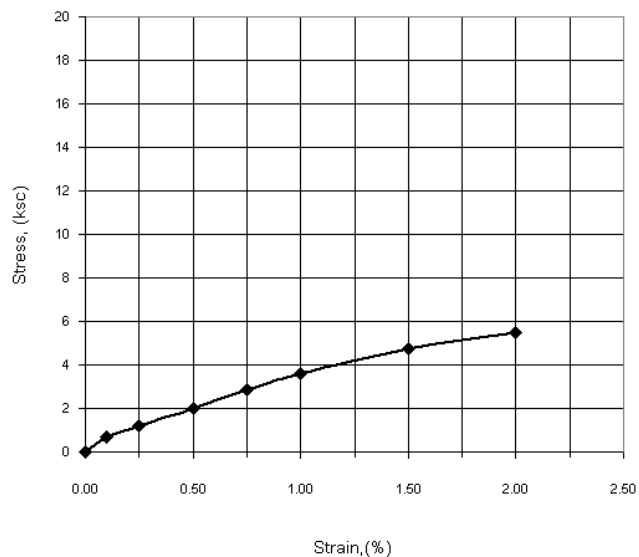
Unconfined Compression Test

Sample No.	Diameter (cm)			Average Diameter (cm)	Area (cm ²)			Average Area (cm ²)	Height of Sample (cm)	Sheet No. 1	
	D _t	D _m	D _b		A _t	A _m	A _b			Area of Sample, A ₀ =	24.244 cm ²
1	5.550	5.565	5.745	5.620	24.180	24.311	25.909	25.044	10.480	Height of Sample, HT =	10.378 cm
2	5.510	5.625	5.550	5.562	23.833	24.838	24.180	24.006	10.345	Reading rate =	1 mm/min
3	5.525	5.575	5.515	5.538	23.963	24.398	23.876	23.919	10.310	Proving ring constant =	0.3525 kg/div
Deformation Dial Reading	Vertical Deformation			Sample Proving Reading			Average Proving Reading	Axial Strain ϵ	Corrected Area (cm ²)	Axial Load (kg.)	Axial Stress (ksc)
	1	2	3								
0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	25.244	0.000	0
10	0.10	176	206	147	176	206	176	0.010	25.490	62.158	2.439
25	0.25	370	413	328	370	413	370	0.024	25.867	130.543	5.047
50	0.50	691	748	635	691	748	691	0.048	26.522	243.695	9.188
75	0.75	858	816	900	858	816	858	0.072	27.210	302.445	11.115
100	1.00	1012	912	1112	1012	912	1012	0.096	27.936	356.730	12.770
150	1.50	1229	1047	1411	1229	1047	1229	0.145	29.509	433.223	14.681
200	2.00	1174	1124	1224	1174	1124	1174	0.193	31.270	413.835	13.234

ภาคผนวก ข.

ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียว

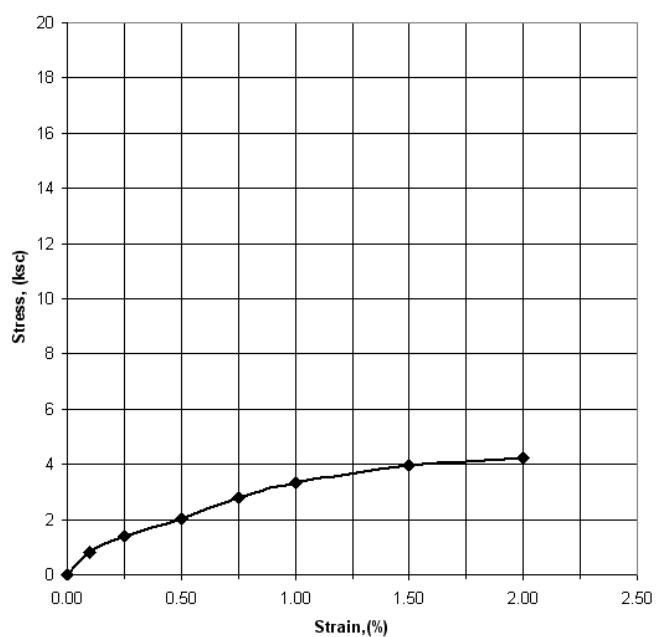
Unconfined Compressive Test



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

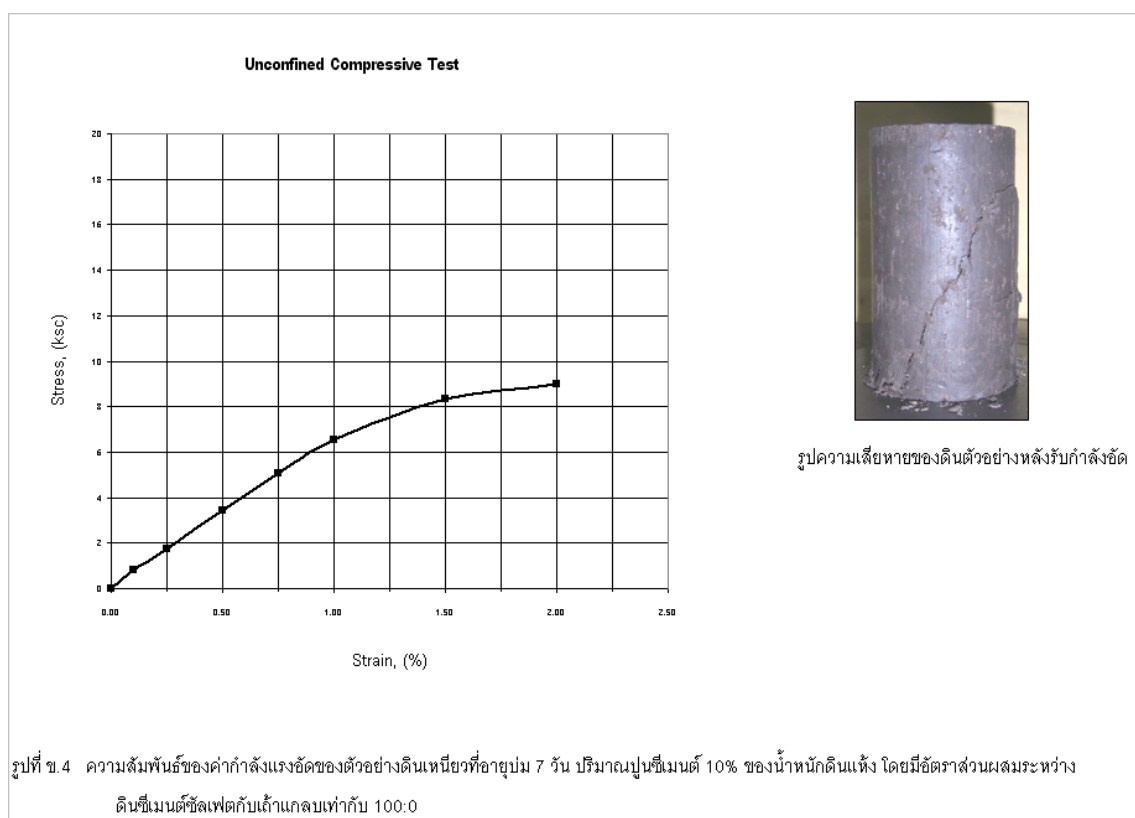
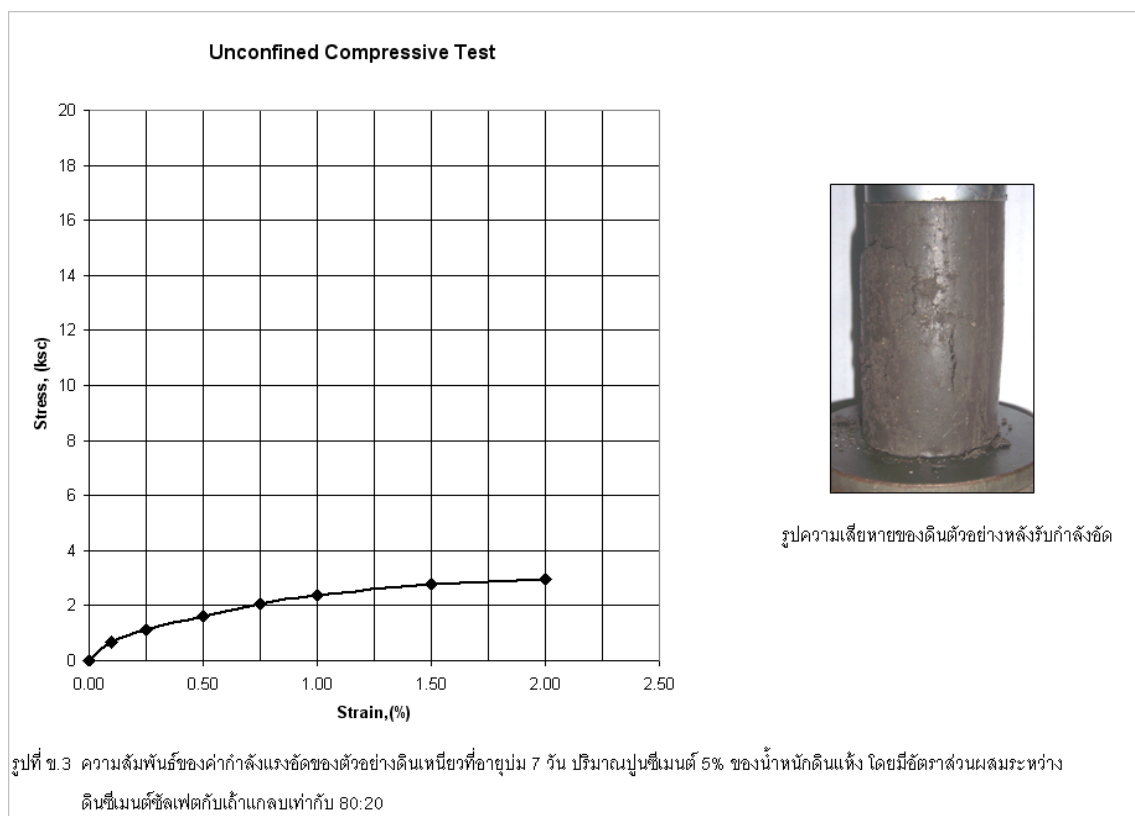
รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุปม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 100:0

Unconfined Compressive Test

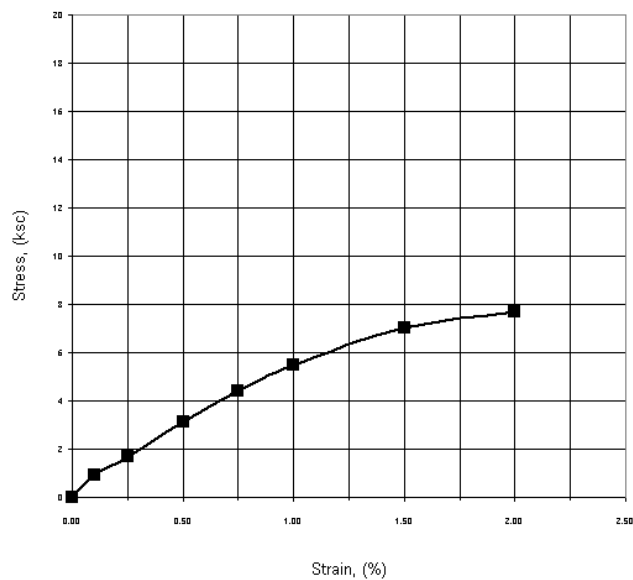


รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุปม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 90:10



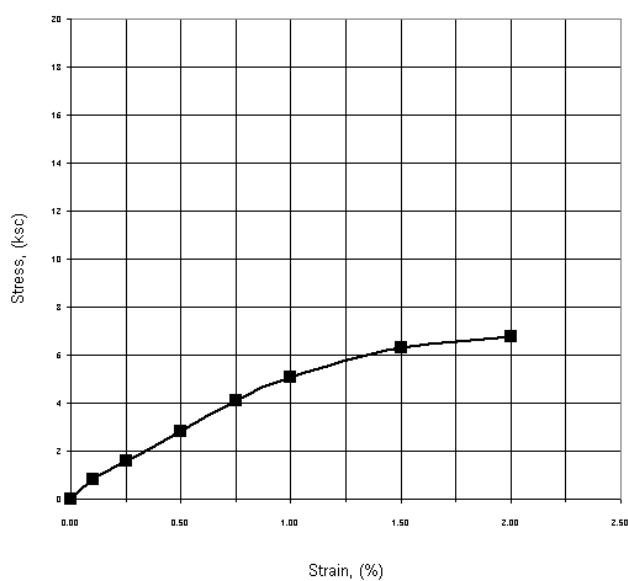
Unconfined Compressive Test



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

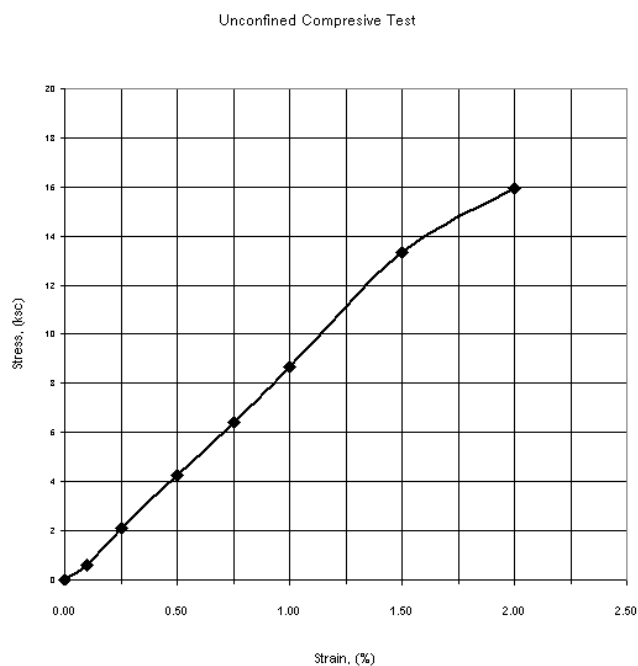
รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับแก้วกลบเท่ากับ 90:10

Unconfined Compressive Test



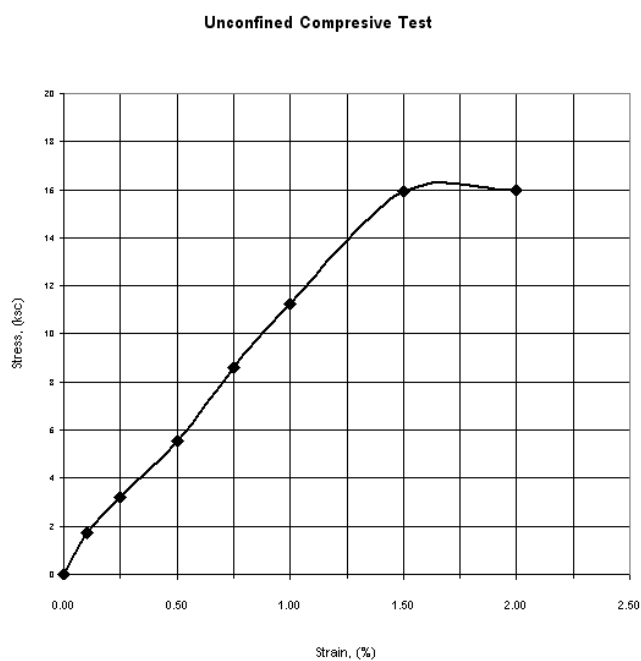
รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับแก้วกลบเท่ากับ 80:20



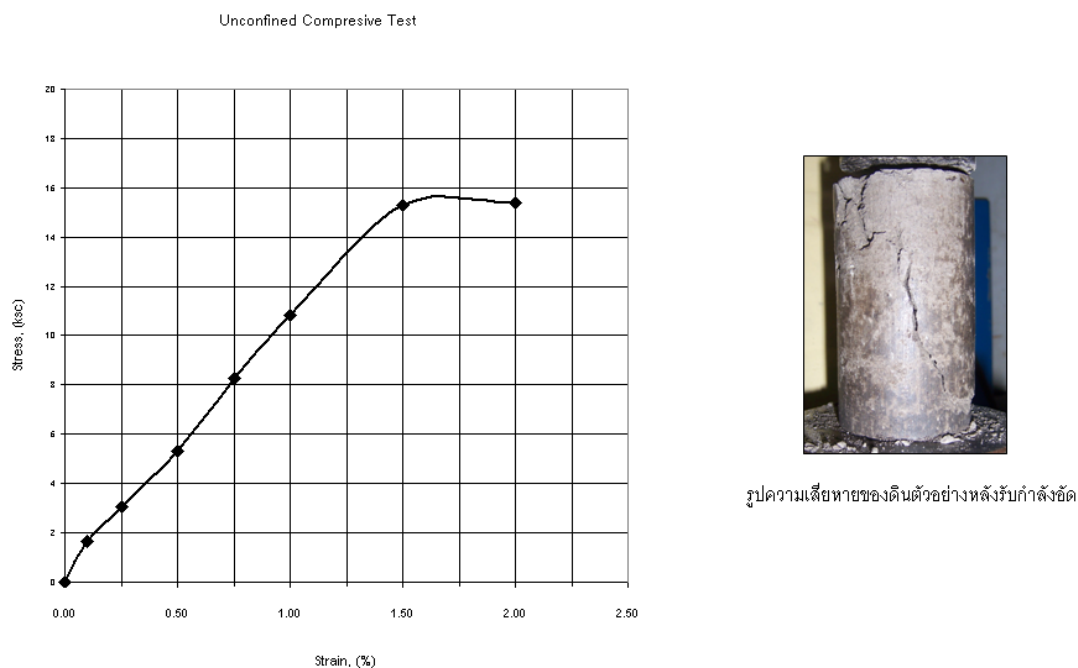
รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 100:0

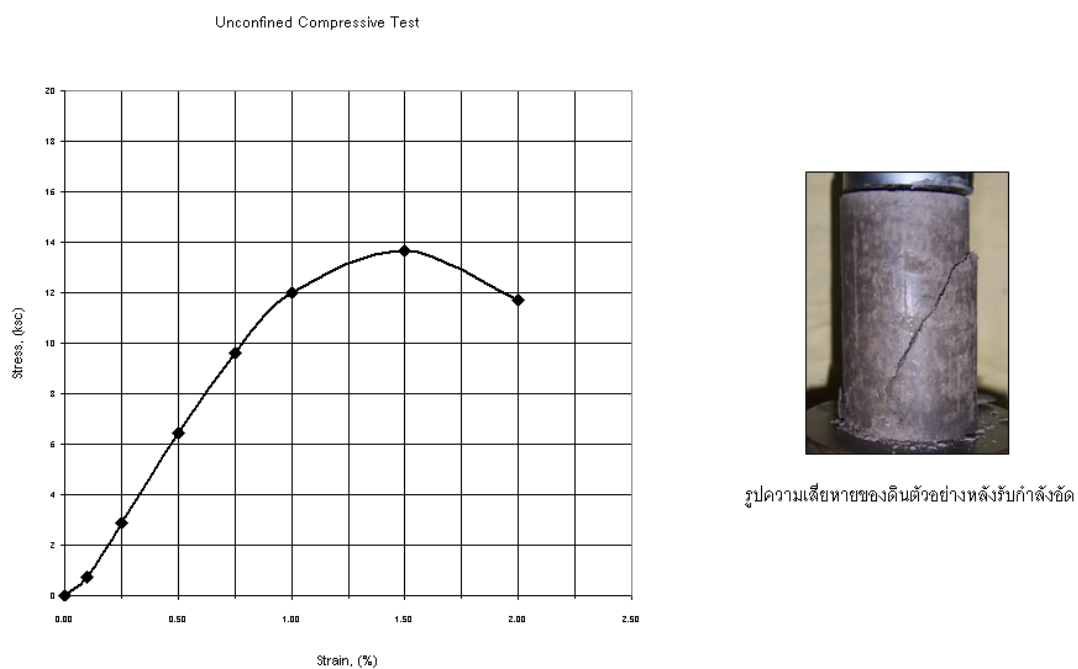


รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

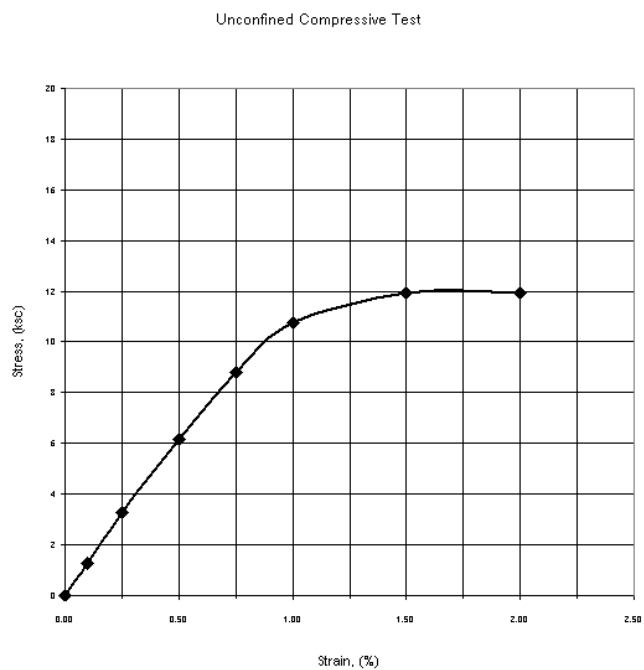
รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 90:10



รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 80:20

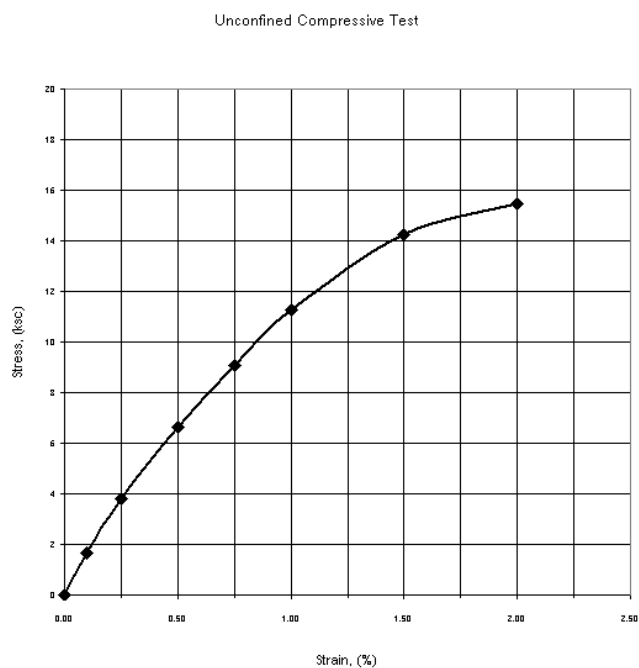


รูปที่ ข.10 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 100:0



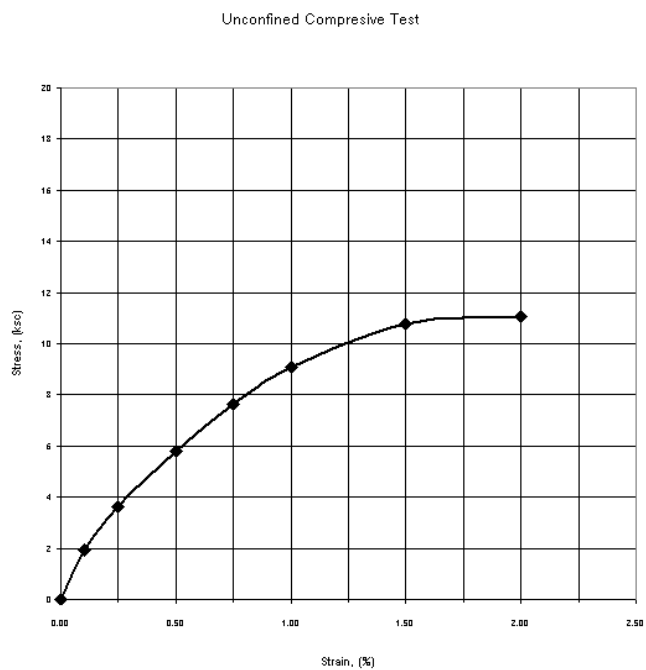
รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.11 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุปม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 90:10



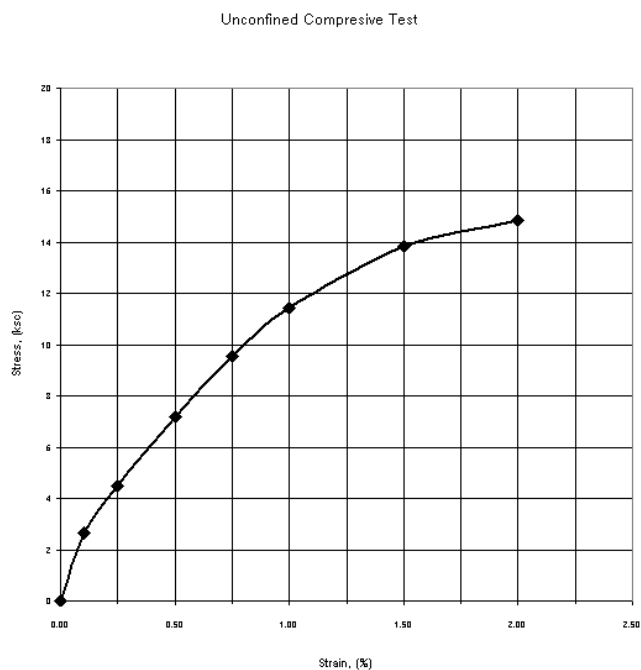
รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุปม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 80:20



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

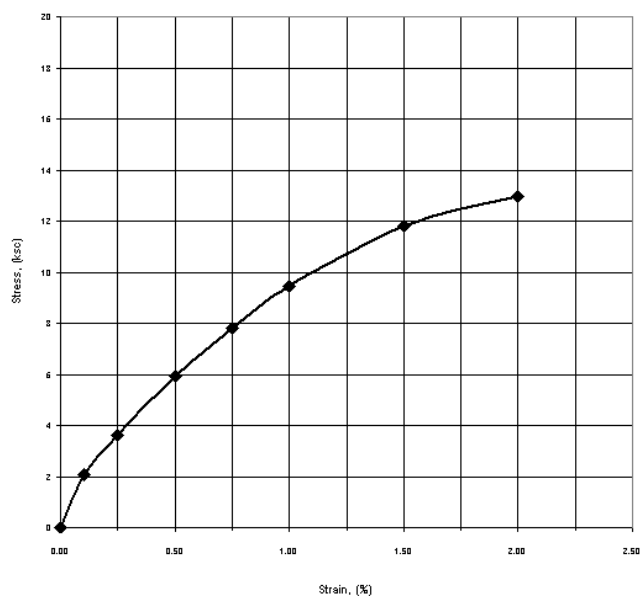
รูปที่ ข. 13 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเถ้ากลบเท่ากับ 100:0



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข. 14 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเถ้ากลบเท่ากับ 90:10

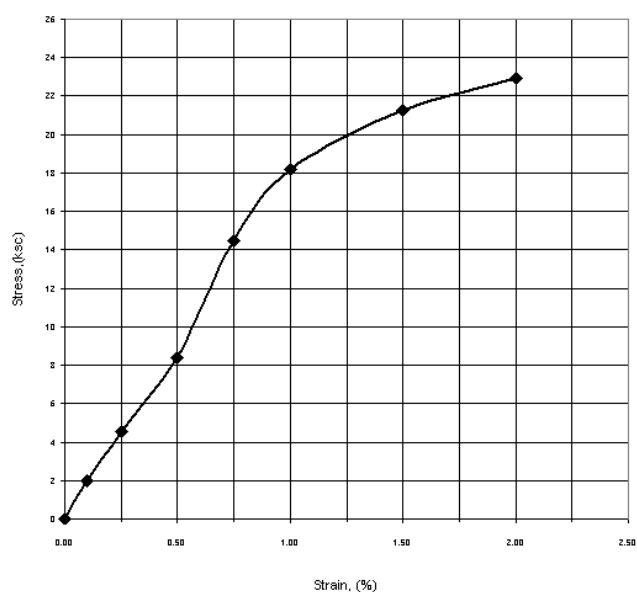
Unconfined Compressive Test



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

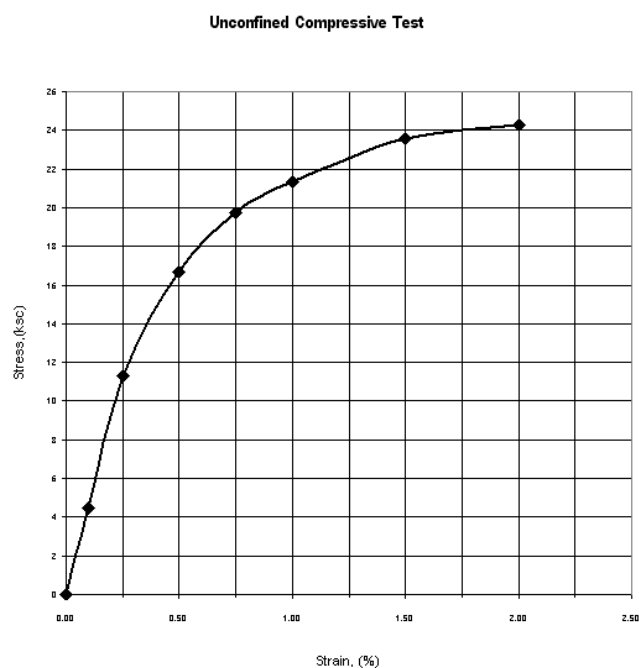
รูปที่ ข.15 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซัลเฟตกับเถ้าแกลบเท่ากับ 90:10

Unconfined Compressive Test



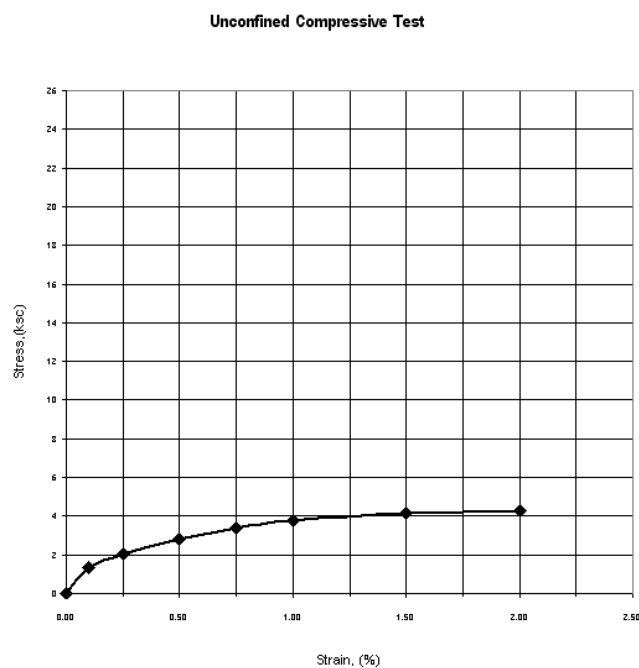
รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.16 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซัลเฟตกับเถ้าแกลบเท่ากับ 100:0



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.17 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเถ้าแกลบเท่ากับ 90:10

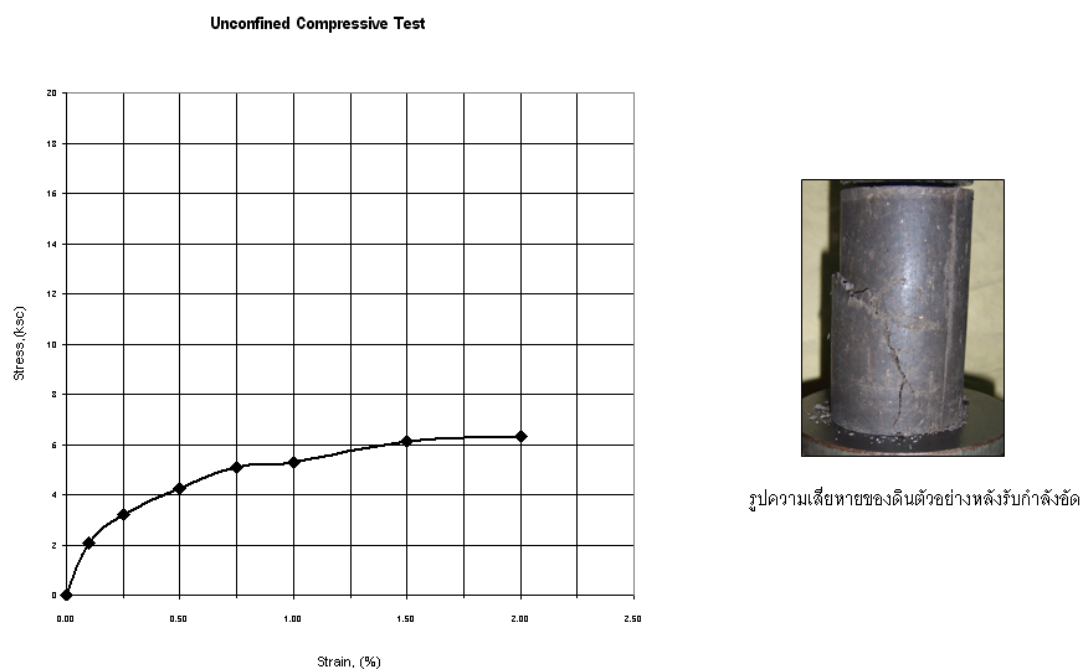


รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.18 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 14 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเถ้าแกลบเท่ากับ 80:20

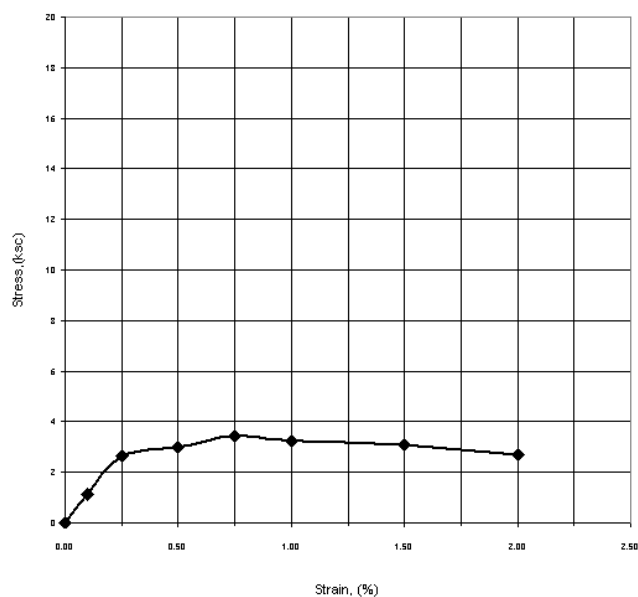


รูปที่ ข.19 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับแก้วกลบเท่ากับ 100:0



รูปที่ ข.20 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับแก้วกลบเท่ากับ 90:10

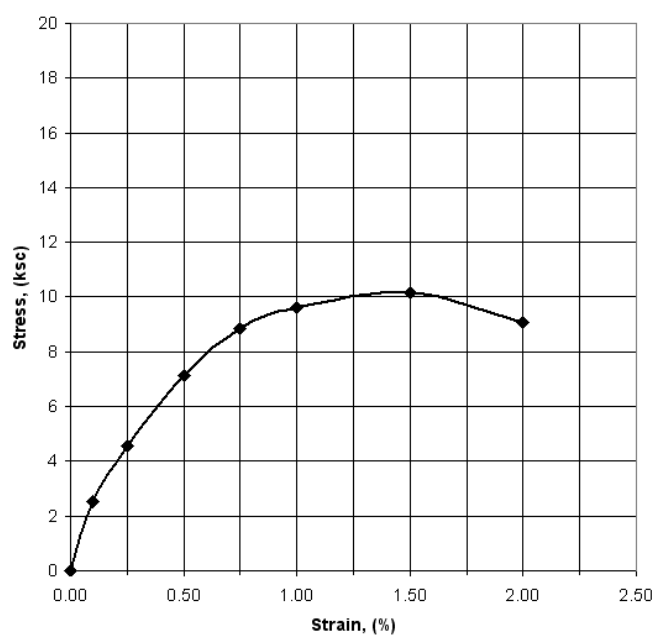
Unconfined Compressive Test



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

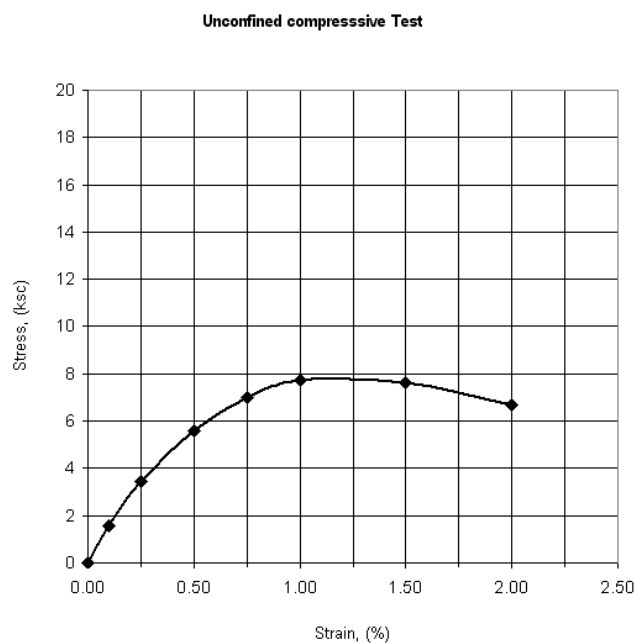
รูปที่ ข.21 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุปม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเถ้าแกลบเท่ากับ 80:20

Unconfined compressive Test



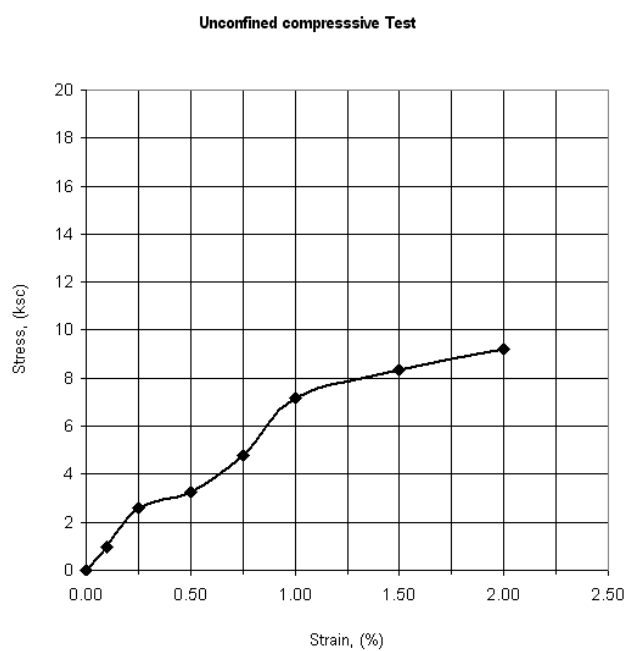
รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.22 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุปม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเถ้าแกลบเท่ากับ 100:0



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

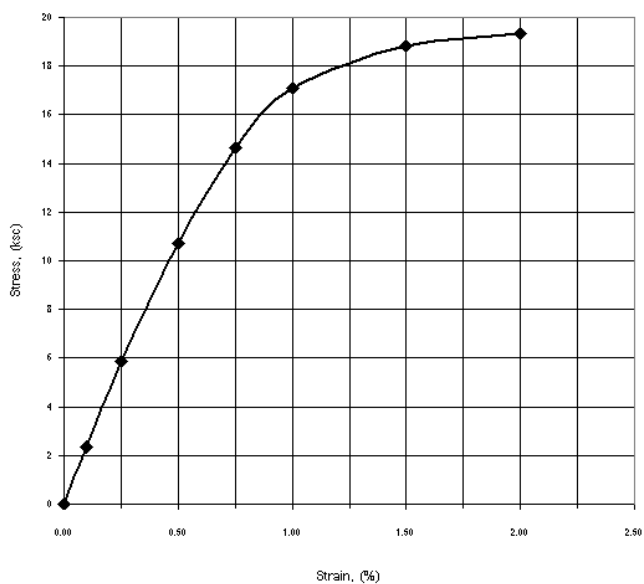
รูปที่ ข.23 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุปม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 90:10



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.24 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุปม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 80:20

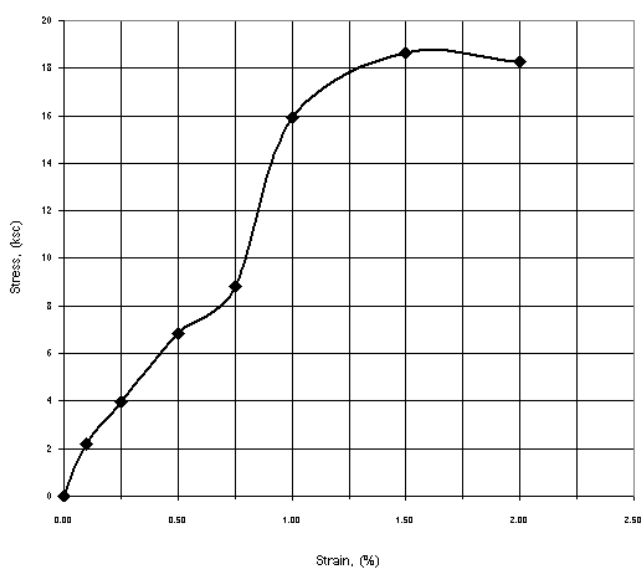
Unconfined Compressive Test



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.25 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้ากลบเท่ากับ 100:0

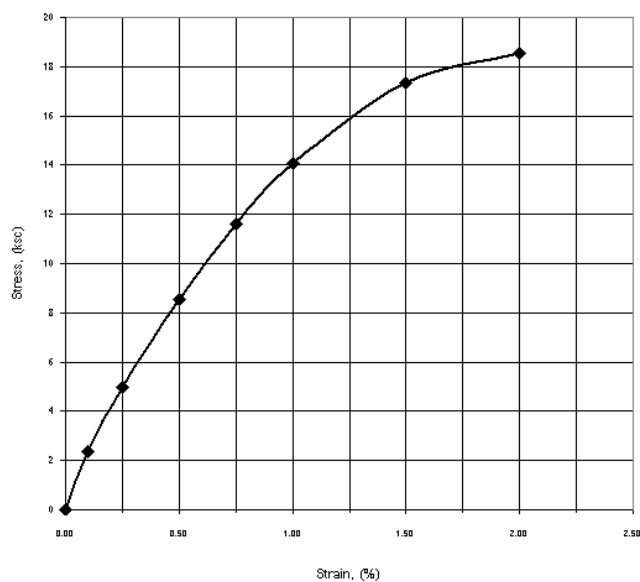
Unconfined Compressive Test



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.26 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้ากลบเท่ากับ 90:10

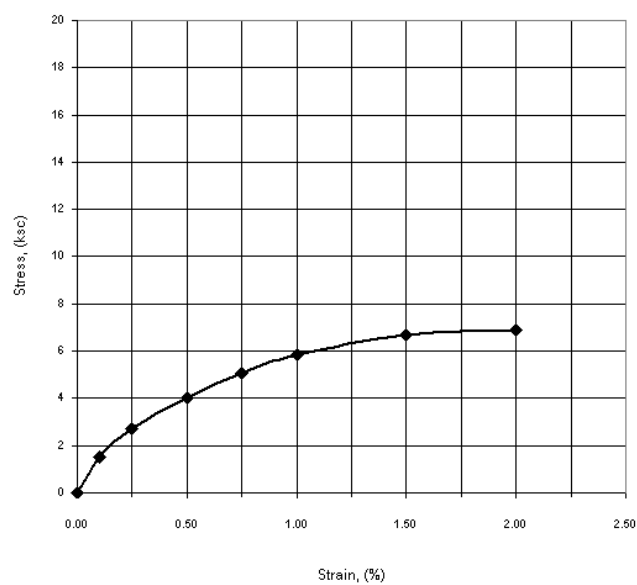
Unconfined Compressive Test



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.27 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างดินซีเมนต์ซีลเฟตกับเล้าแกลบเท่ากับ 80:20

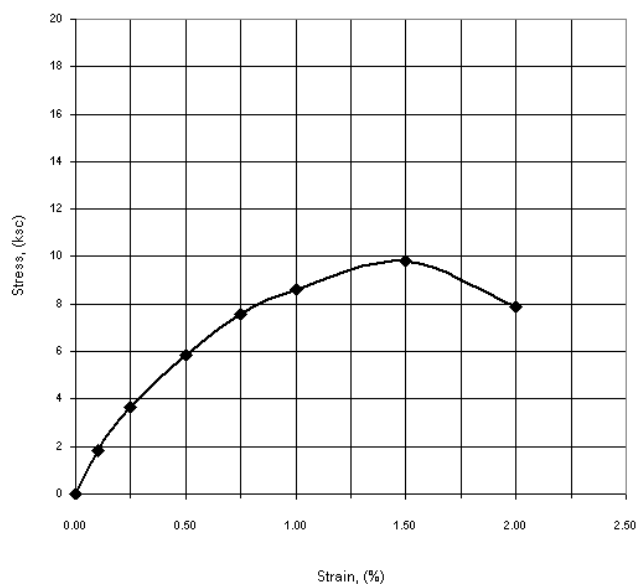
Unconfined Compressive Test



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.28 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง

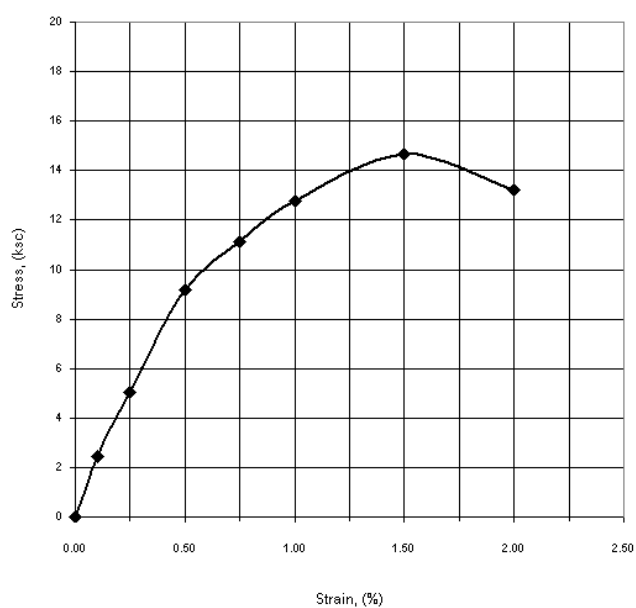
Unconfined Compressive Test



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.29 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง

Unconfined Compressive Test



รูปความเสียหายของดินตัวอย่างหลังรับกำลังอัด

รูปที่ ข.30 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังแรงอัดของตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติที่อายุบ่ม 28 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง

ภาคผนวก ค.

การทดสอบหาความชื้นของดินเหนียว

การทดสอบหาความหนาแน่นในการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินเหนียว

ตารางที่ ค-1 การทดสอบหาความชื้นของดินเหนียว

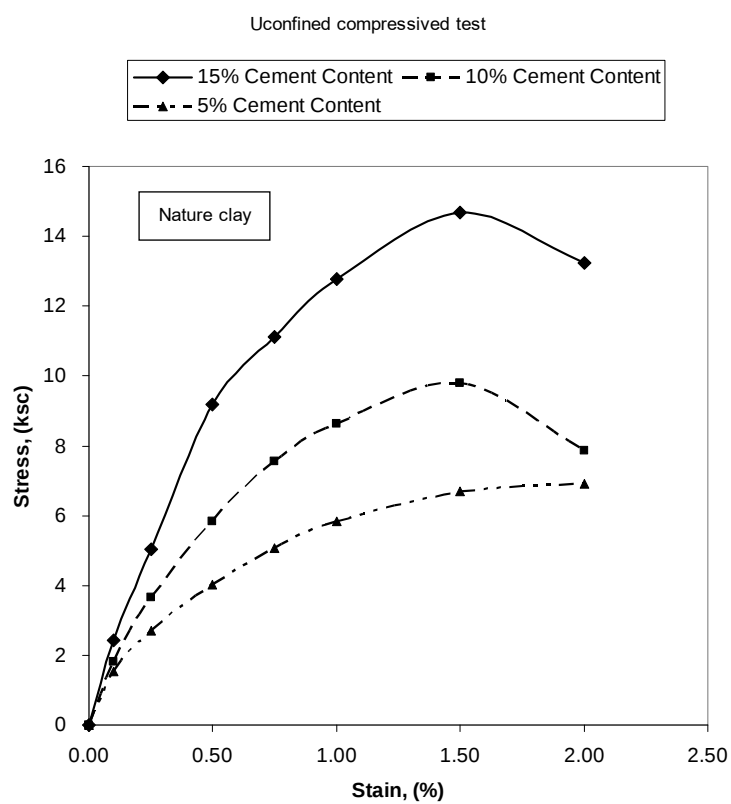
SAMPLE NO.	1	2	3	4	5
CAN NO.	A	B	C	D	E
WT. OF WET SOIL + CAN gm.	51.36	50.50	53.86	65.06	56.20
WT. OF DRY SOIL + CAN gm.	46.73	45.70	47.30	56.20	48.30
WT. OF CAN gm.	26.60	27.30	24.30	26.93	25.93
WT. OF DRY SOIL gm.	20.13	18.40	23.00	29.27	22.37
WT. OF WATER gm.	4.63	4.80	6.56	8.86	7.90
WATER CONTENT %	23.00	26.09	28.52	30.27	35.32

ตารางที่ ค-2 การทดสอบหาความหนาแน่นในการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินเหนียว

SAMPLE NO.	1	2	3	4	5
CAN NO.	A	B	C	D	E
WT. OF WET SOIL + MOLD gm.	8904	9042	8986	8978	8845
WT. OF MOLD gm.	5048	5048	5048	5048	5048
WT. OF SOIL gm.	3856	3994	3938	3930	3797
WET DENSITY gm./cc	1.80	1.86	1.83	1.83	1.77
DRY DENSITY gm./cc	1.463	1.475	1.424	1.405	1.308

ภาคผนวก ง.

ตัวอย่างกราฟแสดงผลกำลังอัดแกนเดียวของดินธรรมชาติ ที่ปรับปรุงด้วยการผสมซีเมนต์ 15%



รูป ง. กราฟแสดงผลกำลังอัดแกนเดียวของดินธรรมชาติ ที่ปรับปรุงด้วยการผสมซีเมนต์ 15%

ภาคผนวก จ.

การทดสอบหาขีดจำกัดและดัชนีแอตเตอร์เบอร์ก

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ

การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดิน

องค์ประกอบทางเคมีของดินตัวอย่าง

ตารางที่ จ-1 การทดสอบหาขีดจำกัดและดัชนีแอตเตอร์เบอร์ก, หาค่าความถ่วงจำเพาะ และ การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดิน

รายการผลการทดสอบ	ผลการทดสอบ
1. ขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit, LL)	93.07%
2. ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL)	39.28%
3. ค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index, PI)	53.79
4. ค่าดัชนีเหลว (Liquidity Index, PI)	0.24
5. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, Gs)	2.76
6. ปริมาณความชื้น (Water Content, W)	26.09%
7. ความหนาแน่นเปียก (Wet Density)	1.86 t/m ³
8. ขนาดกละของเม็ดดิน (Sieve Analysis)	
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 4	100
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 10	99
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 40	96.14
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 100	94.56
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	64.12
9. ประเภทของดินเหนียวตามระบบเอกภาพ	CH

ตารางที่ จ-2 องค์ประกอบทางเคมีของดินตัวอย่าง

องค์ประกอบทางเคมี	Nature Clay		Sulfate Clay	
ซัลเฟต(SO ₄)	-	-	23.32%	233199ppm
แคลเซียม(Ca)	0.69%	6931ppm	0.69%	6931ppm
แมกนีเซียม(Mg)	-	-	1.45%	14507ppm
ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	7.1		5.9	

