

# การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้ปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ

## COMBINATIONS OF LIME AND COAL FLY ASH AS STABILIZERS FOR SOFT SOIL

ศุภกิจ นนทนานันท์ (Supakij Nontananandh)<sup>1</sup>

ศรัณรัตน์ พวงพัฒน์ (Saranrat Puangpattana)<sup>2</sup>

กมล อมรฟ้า (Kamol Amornfa)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>2</sup>วิศวกร สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง

<sup>3</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม

**บทคัดย่อ :** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการพัฒนากำลังของดินเหนียวอ่อนโดยใช้ปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ โดยเน้นสัดส่วนผสมของเถ้าลอยปริมาณมาก สารเชื่อมประสานที่ใช้ในการปรับปรุงกำลังของดินเหนียวอ่อนได้แก่ ปูนขาว และปูนขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน 1:1, 1:3, 1:6 และ 1:9 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณ 100, 150, 200 และ 250 กก./ม.<sup>3</sup> โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสานเท่ากับ 0.8 บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 4, 7, 14, 28, 90 และ 180 วัน จากนั้นจึงทำการทดสอบหาค่ากำลังของดินโดยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ผลการศึกษาพบว่าดินผสมปูนขาวมีการพัฒนากำลังอย่างสม่ำเสมอทั้งในระยะแรกและระยะยาว โดยกำลังจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมที่ค่า 200 กก./ม.<sup>3</sup> สำหรับดินที่ใช้ปูนขาวและเถ้าลอยร่วมกัน การพัฒนากำลังจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเถ้าลอยที่ผสมและปริมาณสารเชื่อมประสาน ที่อัตราส่วน 1:1 และที่ปริมาณสารเชื่อมประสาน 200 และ 250 กก./ม.<sup>3</sup> ดินมีการพัฒนา กำลังอย่างชัดเจน ในขณะที่ดินมีการพัฒนากำลังปานกลางที่ 100 และ 150 กก./ม.<sup>3</sup> สำหรับที่อัตราส่วน 1:3 ดินมีการพัฒนา กำลังเพียงเล็กน้อย จากการทดลองพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนที่มากกว่า 1:3 ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินลดลงอย่างมาก

**ABSTRACT :** This research attempted to study strength development of clayey soil stabilized with lime and coal fly ash. Emphasis was placed on using fly ash with high content. Therefore, lime blended with coal fly ash by weight at ratios of 1:1, 1:3, 1:6 and 1:9 were used at stabilizer contents of 100, 150, 200 and 250 kg/m<sup>3</sup> and a water to stabilizer ratio of 0.8. Unconfined compressive strengths were measured at 4, 7, 14, 28, 90 and 180 days. Results showed that soil lime uniformly gain in strength over curing time. The maximum strengths were achieved when lime contents were increased up to the "Optimum Lime Content" of 200 kg/m<sup>3</sup>. It could also be observed that for soils mixed with lime blended with fly ash at a ratio of 1:1, strengths markedly developed for stabilizer contents of 200 and 250 kg/m<sup>3</sup>, while strengths moderately developed for stabilizer contents of 100 and 150 kg/m<sup>3</sup>. For lime to fly ash ratio of 1:3, slight strength development was obtained when stabilizer content was greater than 200 kg/m<sup>3</sup>. Increasing lime to fly ash ratio beyond 1:3 markedly decreased effectiveness on strength development.

**KEYWORDS :** Soil Stabilization, Lime, Coal Fly Ash, Unconfined Compressive Strength

## 1. บทนำ

ดินเหนียวอ่อนเป็นวัสดุที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำและมีค่าการทรุดตัวที่สูง เมื่อมีการก่อสร้างโดยใช้ดินเหนียวอ่อนหรือก่อสร้างอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนจึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงดินให้มีความสมบัติเหมาะสมในการใช้งาน การแก้ปัญหาดังกล่าวนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้งานสารเชื่อมประสานเช่น ซีเมนต์ และปูนขาวจะทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ กำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงแบกทานของดินเพิ่มขึ้น ความคงทนของดินเพิ่มขึ้น การบวมตัวและการหดตัวจะน้อยลง ในดินซีเมนต์คุณสมบัติของดินจะเปลี่ยนไปเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานิก [1] ในขณะที่ในดินผสมปูนขาวจะเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งได้แก่ปฏิกิริยาไฮเดรชัน การแลกเปลี่ยนไอออนปฏิกิริยาปอซโซลานิก และคาร์บอนเนชัน [2] การปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมีสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินระดับต้นในส่วนของโครงสร้างถนน รวมไปถึงการปรับปรุงคุณภาพดินในระดับลึก โดยการทำเสาเข็มดินซีเมนต์หรือ เสาเข็มดินปูนขาว [3]

จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการเติมปูนขาวปริมาณเล็กน้อยในเถ้าลอยลิกไนต์ ในอัตราส่วน 1:20 เหมาะที่จะใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน ซึ่งเมื่อบดอัดโดยมีการควบคุมคุณภาพที่ดีแล้วจะมีคุณสมบัติ ทั้งในด้านกำลังและความชื้นน้ำเป็นไปตามเกณฑ์ของวัสดุสำหรับทำชั้นกันซึมในพื้นที่ฝังกลบขยะ [4] สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาแนวโน้มการพัฒนากำลังของดินเหนียวอ่อนที่ผสมด้วยปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์ที่อัตราส่วนส่วนต่างๆ โดยเน้นสัดส่วนผสมของเถ้าลอยปริมาณมาก และเปรียบเทียบกับดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวอย่างเดียว โดยเลือกช่วงปริมาณของสารเชื่อมประสานและที่อายุการบ่มต่างๆ เพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังของดิน

## 2. วัสดุและวิธีการ

ตัวอย่างดินเหนียวถูกเก็บแบบเปลี่ยนสภาพที่ความลึก 2 - 4 เมตร จากบริเวณรังสิตคลองสอง จ.ปทุมธานี จากการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพของดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพสามารถสรุปผลการทดสอบต่างๆ ดังนี้ ความชื้นของดินในสภาพธรรมชาติมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 93.5% หน่วงน้ำหนักเปียกเท่ากับ 1.38 ตัน/ม.<sup>3</sup> ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.56 ซีดจำกัด

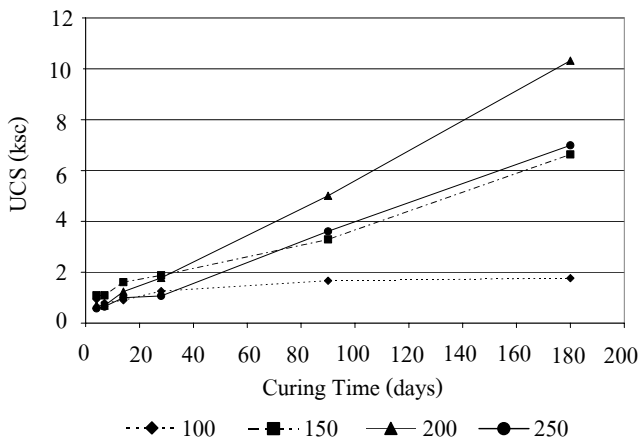
ความชื้นเหลว (LL.) เท่ากับ 101.6% ซีดจำกัดความเป็นพลาสติก (PL.) เท่ากับ 41.4% และค่าครรชนีความเหนียว (PI.) เท่ากับ 60.2% ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวก่อนการปรับปรุงคุณภาพในสภาพถูกรบกวนพบว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) อยู่ในช่วง 0.08-0.21 ksc ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ( $E_{50}$ ) อยู่ในช่วง 6.55-16.85 ksc และค่าความเครียดที่จุดวิบัติ ( $\epsilon_v$ ) อยู่ในช่วง 3.54-9.96% สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์ได้เก็บตัวอย่างมาจากเหมืองแม่เมาะ จ.ลำปาง โดยมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ  $SiO_2$  (40.89%),  $Al_2O_3$  (13.33%),  $Fe_2O_3$  (19.79%),  $CaO$  (14.54%),  $SO_3$  (2.71%),  $Na_2O$  (2.62%),  $K_2O$  (2.25%) และ  $MgO$  (2.08%) ซึ่งจัดเป็นเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ตามมาตรฐาน ASTM C-618

ดินเหนียวถูกนำมาผสมด้วยปูนขาวซึ่งร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และมีปริมาณ  $CaO$  มากกว่า 65 % (ใช้สัญลักษณ์ SL) ที่ปริมาณ 100, 150, 200 และ 250  $kg/m^3$  และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสานเท่ากับ 0.8 ดินผสมจะถูกนำไปบรรจุในแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 10 ซม. ตัวอย่างส่วนผสมดังกล่าวผลิตขึ้นเพื่อเปรียบเทียบกับดินอีกชุดหนึ่งที่ใช้สารเชื่อมประสานเป็นปูนขาวผสมเถ้าลอยลิกไนต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักแห้งเป็น 1:1, 1:3, 1:6 และ 1:9 (SLF1, SLF2, SLF3 และ SLF4 ตามลำดับ) และดินเหนียวที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์อย่างเดียว (SF) ในการผลิตตัวอย่างจะมีการควบคุมคุณภาพอย่างละเอียดตั้งแต่การผสมดินกับสารเชื่อมประสานให้มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน การควบคุมความหนาแน่นเริ่มต้นของดินให้มีความสม่ำเสมอ และการป้องกันการระเหยของน้ำจากตัวอย่างดินหลังบรรจุในแบบ สำหรับการศึกษการพัฒนา กำลังจะใช้การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D 2166-91 ทำการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง ที่อายุการบ่ม 4, 7, 14, 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ

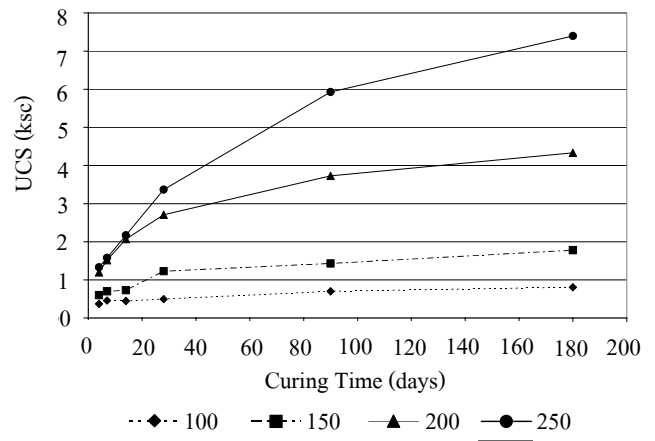
## 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

### 3.1 การพัฒนากำลังของดินผสมสารเชื่อมประสาน

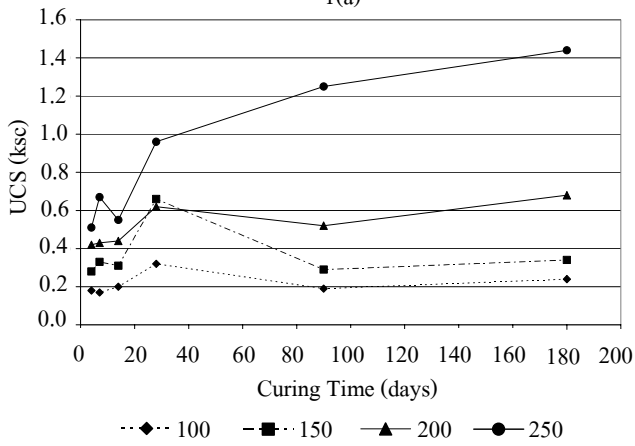
เมื่อพิจารณาแนวโน้มการเพิ่มกำลังของดินผสมปูนขาว (SL) พบว่ากำลังรับแรงอัด (UCS) ของดิน SL จะพัฒนาไปอย่างสม่ำเสมอตามอายุการบ่มทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ยกเว้นที่สัดส่วนผสม 100  $kg/m^3$  ดินมีการพัฒนากำลังเพียงเล็กน้อยที่อายุการบ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1 (a)



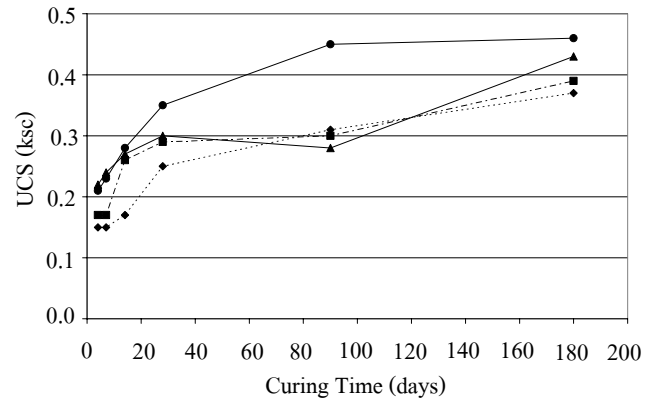
1(a)



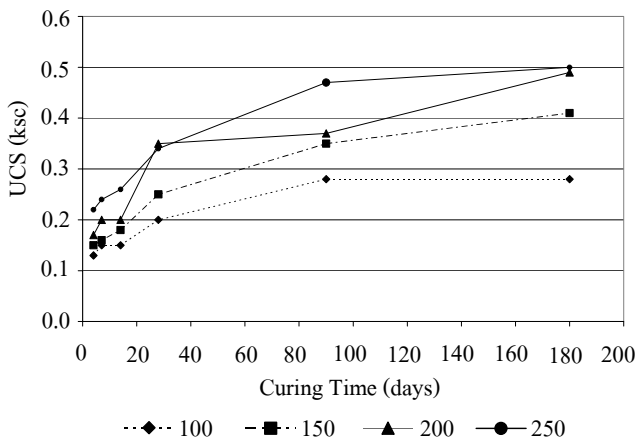
1(b)



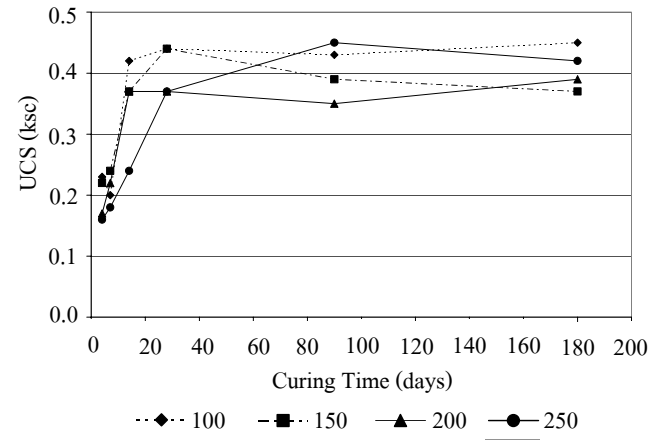
1(c)



1(d)



1(e)



1(f)

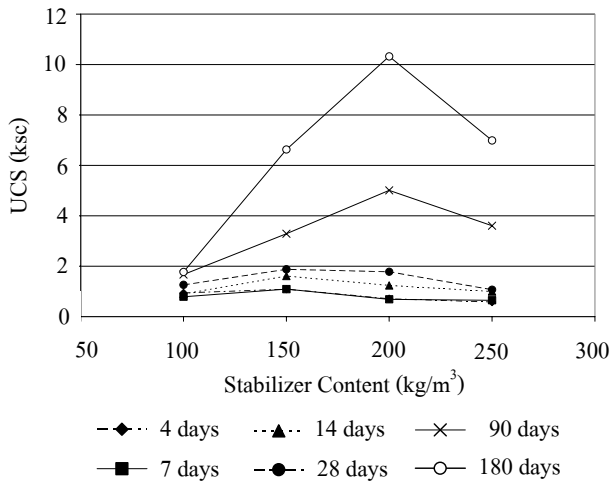
รูปที่ 1 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม (a) SL (b) SLF1 (c) SLF2 (d) SLF3 (e) SLF4 และ (f) SF

กรณีดินผสมปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ 1:1 (SLF1) กำลังของดินพัฒนาขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงอายุการบ่มน้อยกว่า 28 วัน โดยดินที่มีปริมาณสารเชื่อมประสาน 200 และ 250 kg/m<sup>3</sup> จะพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องทั้งในระยะต้นและในระยะยาว สำหรับที่สัดส่วนผสม 100 และ 150 kg/m<sup>3</sup> กำลังจะพัฒนาเพิ่มอีกเล็กน้อยในระยะยาว ดังแสดงในรูปที่ 1 (b)

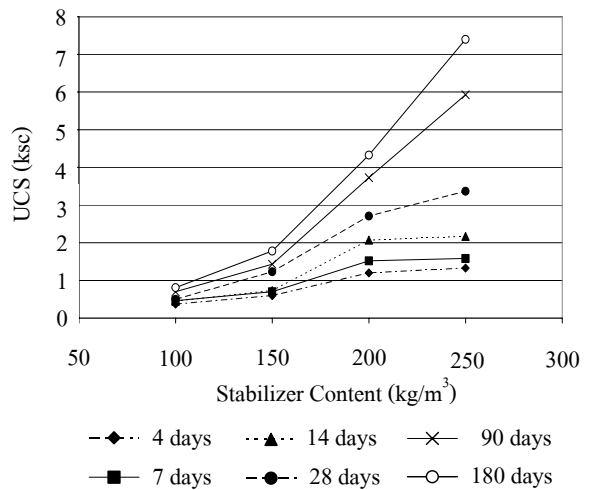
สำหรับดินผสมปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ 1:3 (SLF2), 1:6 (SLF3), และ 1:9 (SLF4) ที่สัดส่วนผสมน้อยกว่า 200 kg/m<sup>3</sup> การพัฒนากำลังจะอยู่ในช่วงอายุไม่เกิน 28 วัน หลังจากนั้นกำลังของดินจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (รูปที่ 1 (c) ถึง 1 (e)) จะเห็นได้ชัดเจน

ว่ากำลังของดินจะน้อยกว่า SL และ SLF1 มาก อย่างไรก็ตามหากใช้สัดส่วนผสมที่มากขึ้น เช่น SLF2 ที่ 250 kg/m<sup>3</sup> ดินสามารถพัฒนากำลังได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1 (c)

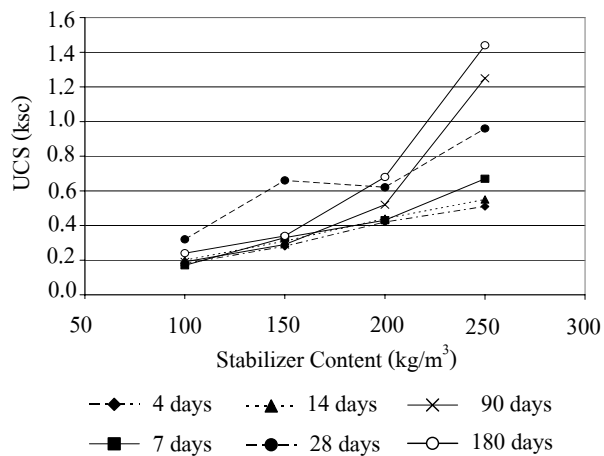
รูปที่ 1 (f) แสดงกำลังดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (SF) กำลังของดินพัฒนาขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงอายุการบ่มไม่เกิน 28 วัน และไม่มีการพัฒนากำลังหลังจากนั้น ในระยะยาว กำลังของดิน SF มีค่าใกล้เคียงกับดิน SLF4 แต่มีอัตราการพัฒนากำลังในช่วงต้นดีกว่าทั้งนี้จะเป็นผลเนื่องมาจากการดูดซึมน้ำที่มากกว่า โดยอนุภาคเถ้าลอย นอกจากนี้สามารถสังเกตเห็นได้ชัดว่ากำลังที่พัฒนามีความแปรปรวนมากขึ้นเมื่อสัดส่วนผสมเถ้าลอยมากขึ้น



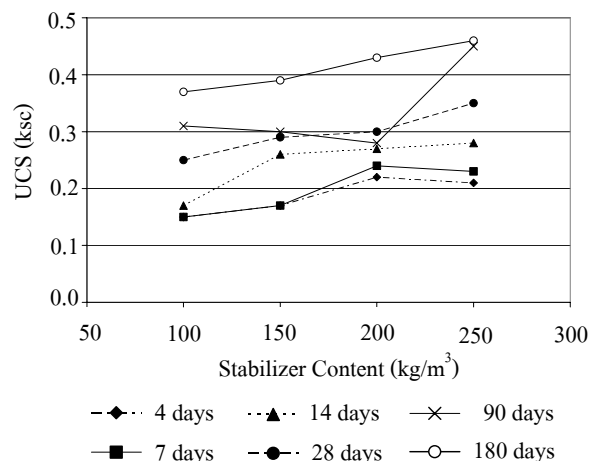
2(a)



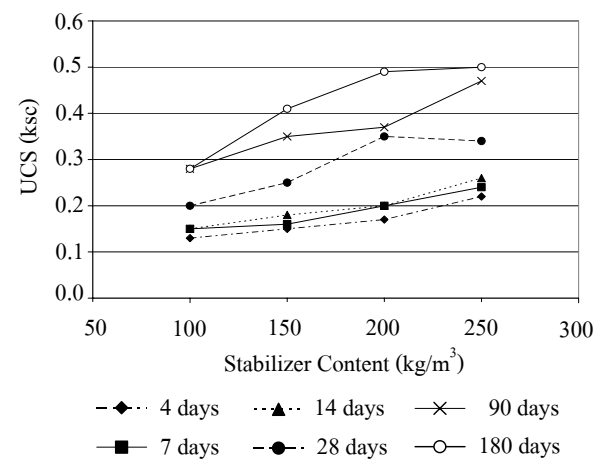
2(b)



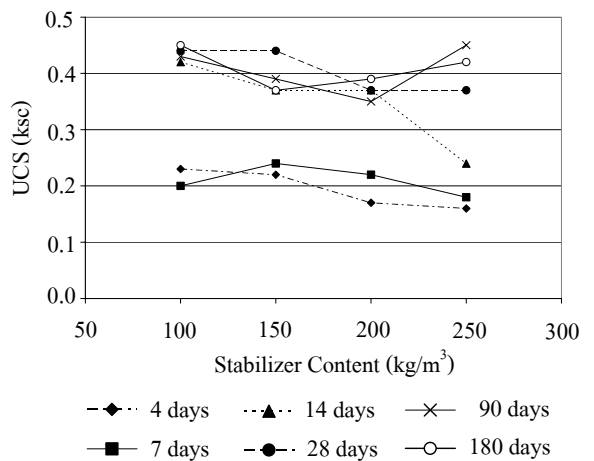
2(c)



2(d)



2(e)



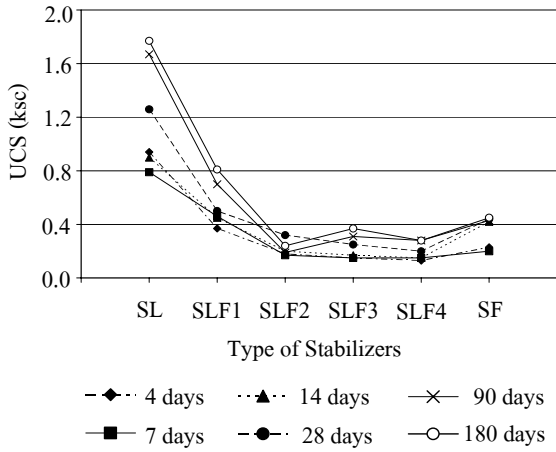
2(f)

รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับปริมาณสารเชื่อมประสาน (a)SL (b)SLF1 (c)SLF2 (d)SLF3 (e) SLF4 และ (f)SF

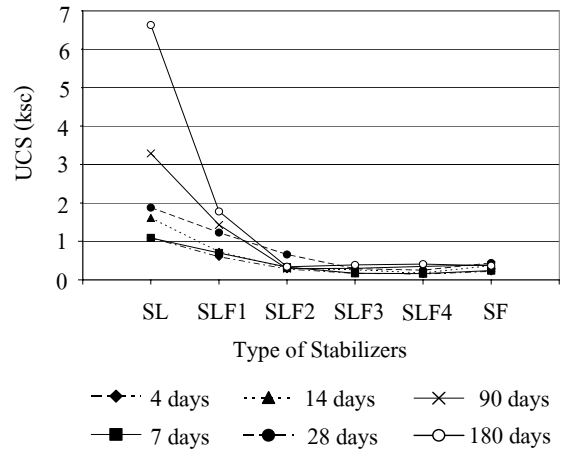
### 3.2 ปริมาณสารเชื่อมประสานที่มีผลต่อกำลัง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับปริมาณสารเชื่อมประสานดังแสดงในรูปที่ 2(a) พบว่าดินมีกำลังเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนขาวที่เพิ่มและมีค่าสูงขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนผสมโดยเฉพาะที่ระยะยาว เช่นที่ปริมาณ  $200 \text{ kg/m}^3$  ให้ค่ากำลังเท่ากับ 5.01 และ 10.32 ksc ที่อายุการบ่ม 90 และ 180

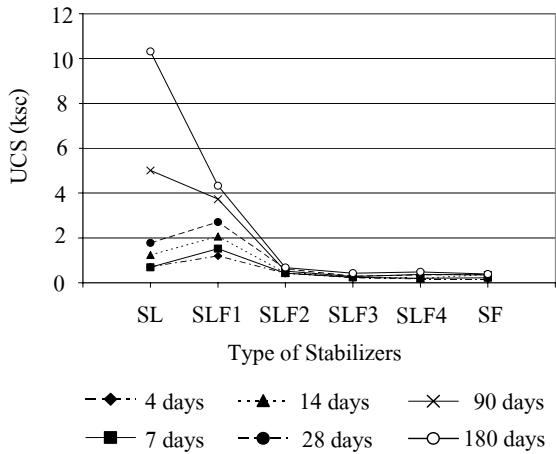
วัน ดินมีกำลังเพิ่มขึ้น 25-130 เท่า กำลังของดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวในช่วงหนึ่ง จนถึงปริมาณปูนขาวที่เหมาะสม (Optimum Lime Content, OLC) ซึ่งให้ค่ากำลังสูงสุดซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวมากกว่าปริมาณนี้ กำลังมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 2(a) สำหรับการศึกษาดินนี้ดินมีค่า OLC เท่ากับ  $200 \text{ kg/m}^3$



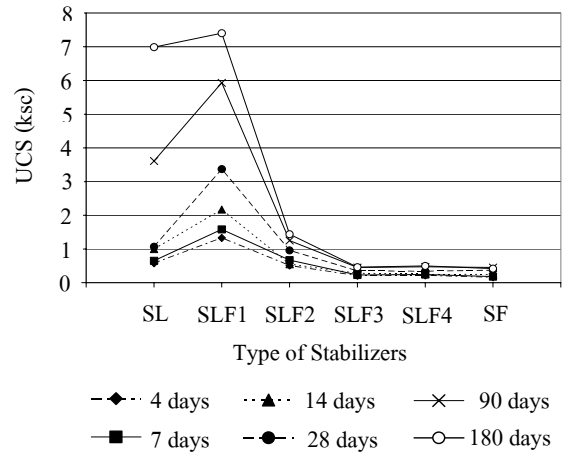
3(a)



3(b)



3(c)



3(d)

รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดกับชนิดของสารเชื่อมประสานที่สัดส่วนผสมต่างๆ (a) 100 kg/m<sup>3</sup> (b) 150 kg/m<sup>3</sup> (c) 200 kg/m<sup>3</sup> และ (d) 250 kg/m<sup>3</sup>

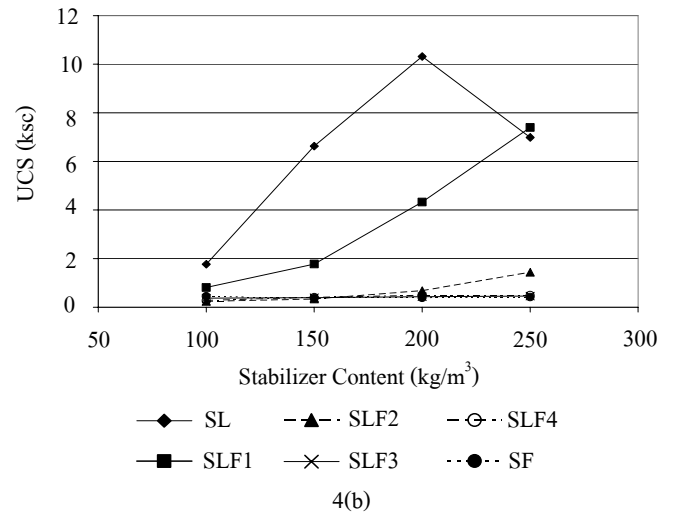
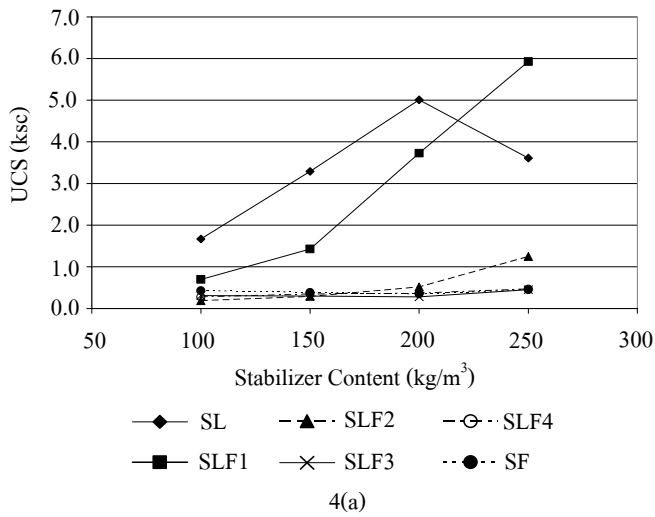
รูปที่ 2 (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับปริมาณสารเชื่อมประสานของดิน SLF1 ซึ่งแตกต่างจากดิน SL ดิน SLF1 พัฒนากำลังตามปริมาณสารเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงว่าเถ้าลอยที่สัดส่วนผสม 1:1 ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับปูนขาวเร็วขึ้นส่งผลทำให้กำลังในระยะยาวพัฒนาได้มากกว่าการใช้ปูนขาวอย่างเดียว เช่น ที่ 250 kg/m<sup>3</sup> กำลังของดิน SLF1 ที่อายุการบ่ม 90 และ 180 วัน มีค่า 5.93 และ 7.40 ksc เมื่อเปรียบเทียบกับดิน SL ซึ่งมีค่ากำลังเท่ากับ 3.61 และ 6.99 ksc ตามลำดับ สำหรับดินมีแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับปริมาณสารเชื่อมประสานคล้ายกรณีดิน SLF1 แต่กำลังมีค่าต่ำกว่าอย่างชัดเจนในทุกสัดส่วนผสม SLF2 ดังแสดงในรูปที่ 2 (c) เมื่อสัดส่วนเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้นเช่นในกรณีดิน SLF3 และดิน SLF4 ดังแสดงในรูปที่ 2(d) และ 2(e) เมื่อปริมาณสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น กำลังของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 0.2-0.5 ksc สำหรับดิน SF จากการทดลองพบว่าดินพัฒนากำลังตามอายุการบ่มแต่กำลังไม่เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2(f)

### 3.3 กำลังและชนิดของสารเชื่อมประสาน

รูปที่ 3 แสดงกำลังของดินกับชนิดของสารเชื่อมประสานที่ปริมาณและอายุการบ่มต่างๆ จากรูปที่ 3(a)-3(c) พบว่าที่ปริมาณสารเชื่อมประสาน 100, 150 และ 200 kg/m<sup>3</sup> ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ SL > SLF1 > SLF2 ≈ SLF3 ≈ SLF4 ≈ SF

เมื่อปริมาณสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นเป็น 250 kg/m<sup>3</sup> ดิน SLF1 จะมีค่ากำลังมากที่สุด และมีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้น ตลอดจนพัฒนาต่อเนื่องอย่างชัดเจนที่ระยะยาว เช่น จากรูปที่ 3(d) ที่อายุ 4, 7, 14 และ 28 วัน ดิน SLF1 มีค่ากำลังเท่ากับ 1.33, 1.58, 2.17 และ 3.37 ksc ส่วนที่อายุ 90 และ 180 วัน ดิน SLF1 มีค่ากำลังเท่ากับ 5.93 และ 7.40 ksc ตามลำดับ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนขาวในอัตราส่วน 1:1 มีผลทำให้ดินเหนียวอ่อนมีการพัฒนากำลังอย่างชัดเจน สำหรับที่อัตราส่วน 1:3 ดินมีการพัฒนากำลังเพียงเล็กน้อย และการเพิ่มอัตราส่วนที่มากกว่า 1:3 ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินลดลงอย่างมาก



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดกับชนิดและปริมาณของสารเชื่อมประสานที่อายุการบ่มในระยะยาว (a) 90 days และ (b) 180 days

ประสิทธิภาพในการปรับปรุงดินสามารถพิจารณาจาก รูปที่ 4 (a) – (b) ซึ่งพบว่า การแทนที่ปูนขาวด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วน 1:1 มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อมประสานในช่วง 200 – 250 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่อายุการบ่มระยะยาว เช่น ที่ 180 วัน ดิน SLF1 ที่สัดส่วนผสมดังกล่าวมีค่ากำลังอยู่ในช่วง ประมาณ 4-8 ksc เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนขาวอย่างเดียว ในช่วง 100–125 kg/m<sup>3</sup> ดินมีค่ากำลังอยู่ในช่วงประมาณ 2-4 ksc

ประสิทธิภาพของปูนขาวที่เพิ่มขึ้น จากการผสมเถ้าลอยใน สัดส่วนที่เหมาะสม สามารถอธิบายจากงานวิจัยที่ศึกษาปฏิกิริยา ในดินซีเมนต์และดินผสมซีเมนต์และเถ้าลอย [1], [5] ในเบื้องต้น ปูนขาวจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติดิน โดยมีส่วนทำให้ซิลิกาและ อลูมินาในดินเหนียวระลอกมากเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันปูนขาวจะ ช่วยเพิ่ม Ca<sup>2+</sup> ที่จะทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทั้งหมด การเติม เถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานจะมีส่วนเร่งการทำปฏิกิริยา เกิด เป็นสารผลึกภัณฑ์ เช่น CSH ในลำดับต่อมา ช่วยทำให้ดินมีความ เชื่อมประสานได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากในดินหนึ่งๆ จะ มีซิลิกาและอลูมินาอยู่ในปริมาณหนึ่ง อัตราส่วนของปูนขาวที่ไม่ สมดุล และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสัดส่วนเถ้าลอยเพิ่มขึ้น จึงไม่มี ส่วนช่วยให้กำลังของดินเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามเถ้าลอยจะไปลด อัตราส่วนของปูนขาวซึ่งโดยทั่วไปให้กำลังสูงกว่า จึงเป็นสาเหตุ ทำให้กำลังของดินมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนเถ้าลอยที่มี ปริมาณมาก

#### 4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการพัฒนา กำลังของดิน ผสมปูนขาวและเถ้า ลอยลิกไนต์พบว่า ดินผสมปูนขาวจะพัฒนา กำลังสม่ำเสมอทั้งใน

ระยะสั้นและระยะยาว ดินผสมปูนขาวจะมีกำลังเพิ่มขึ้นจนถึง ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสม และเมื่อปริมาณปูนขาวมากกว่านี้ กำลังมีแนวโน้มลดลง การใช้เถ้าลอยผสมกับปูนขาวในปริมาณที่ เหมาะสมเช่นที่อัตราส่วน 1:1 สามารถทำให้กำลังของดินเพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อใช้ปูนขาวอย่างเดียว

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณ ณพล อยู่บรรพต วิศวกรโยธาสังกัด การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) ที่ได้ให้ความ อนุเคราะห์ช่วยจัดทำรูปภาพของบทความนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Nontananandh, S., S. Boonyong and T. Yoobanpot. 2004. *Strength Development of Soft Marine Clay Stabilized with Cement and Fly ash*. Kasetsart J. (Nat.Sci.) 38: 539-552.
- [2] Hausmann, M.R. 1990 *Engineering principles of ground modification*. Sydney: McGraw-Hill.
- [3] Broms, B.B. and P. Boman. 1978 *Stabilization of soil with lime columns*. Department of Soil and Rock Mechanics.
- [4] Jirathanathaworn, T and S. Nontananandh and K. Chantawaranggul. 2003. *Stabilization of Clayey Sand Using Fly Ash Mixed with Small Amount of Lime*, Proc. of the 9<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering.
- [5] Nontananandh, S., S. Boonyong and T. Yoobanpot. 2005. *Investigation of Reaction Products in Soil Cement*, GTE 13-16. In Proc.of the 10<sup>th</sup> National Conference on Civil Engineering.