

## การพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ชยานนท์ ศรีเจริญ<sup>1</sup> รุ่งลาวัลย์ ราชัน<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ ด้วยวิธีเทคนิคการผสมลิกในสนาม เสาเข็มดินทดสอบมีทั้งสิ้น 3 ต้น คือ ต้นที่ 1 เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 ต้นที่ 2 และต้นที่ 3 เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมเท่ากับ 1 และ 1.2 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดแกนเดียวในสนามของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุ 14, 28 และ 60 วัน มีค่าเท่ากับกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมเท่ากับ 1 กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมเท่ากับ 1 มีค่าเท่ากับ 1.3, 1.24 และ 1.24 เท่าของกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมเท่ากับ 1.2 สำหรับอายุบ่ม 14, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 สามารถลดค่าใช้จ่ายของปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 12.75

**คำสำคัญ :** ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ / เสาเข็มดินซีเมนต์ / กำลังอัดแกนเดียว / เถ้าลอย

\* Corresponding author : [runglawa@gmail.com](mailto:runglawa@gmail.com)

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

<sup>3</sup> ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## Strength Development in Soil Cement Column and Soil Fly ash - Cement Column in Soft Bangkok Clay Deposit

Chayanon Srijaroen<sup>1</sup> Runglawan Rachan<sup>2</sup>

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

and Suksun Horpibulsuk<sup>3</sup>

Suranaree University of Technology, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

### Abstract

This study investigated the effect of using fly ash (FA) to replace cement on the strength development in deep mixing columns in soft Bangkok clay deposit. In total, 3 columns were installed and their strengths were investigated. The first column was soil-cement column, made up at the water to cement ratio of 1, while the second and third columns were soil-cement-FA column with 15 percent FA replacement, made up at the water to binder ratios of 1 and 1.2, respectively. It was found that the unconfined compressive strengths of soil-cement column were similar to those of the soil-cement-FA column at water to binder ratio of 1 for all the tested curing times of 14, 28 and 60 days. The strength ratios of the soil-cement-FA columns between water to binder ratios of 1 and 1.2 were 1.3, 1.24 and 1.24 for 14, 28 and 60 days of curing, respectively. The 15 percent FA replacement can save cement cost up to 12.75 percent.

**Keywords :** Soft Bangkok Clay / Soil Cement Column / Unconfined Compressive Strength / Fly Ash

---

\* Corresponding author : [runglawa@gmail.com](mailto:runglawa@gmail.com)

<sup>1</sup> M.Eng, Scholar, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology.

<sup>3</sup> Professor, School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

## 1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่ากรุงเทพฯ เป็นเมืองหลวงของประเทศไทย ซึ่งการพัฒนาเมืองหลวงแห่งนี้เกิดขึ้นต่อเนื่องในหลายๆ ด้าน โดยเฉพาะการพัฒนาด้านสาธารณูปโภค เช่น งานถนน งานฐานรากอาคาร งานฐานรากสะพาน คลองระบายน้ำ เชื่อมกันดิน และเชื่อมกันน้ำ เป็นต้น แต่เนื่องจากว่าสภาพชั้นดินในเขตกรุงเทพฯ ประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งมีความหนาอยู่ระหว่าง 15-20 เมตร ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่เหมาะสมในการรับน้ำหนัก เนื่องจากมีปริมาณความชื้นในมวลดินสูง ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกตำแหน่ง และการทรุดตัวสูง ดังนั้นหากจำเป็นต้องก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนนี้ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนก่อนการใช้งาน วิธีการหนึ่งที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ คือ เทคนิคการผสมลึก (Deep Mixing Technique) ซึ่งเป็นวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยใช้สารเคมี (เช่น ปูนซีเมนต์ และปูนขาว เป็นต้น) การทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในประเทศไทยมีอยู่มากมาย เช่น โครงการปรับปรุงคลองลาดโพธิ์ หรือโครงการก่อสร้างคลองระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นโครงการขนาดใหญ่ในความร่วมมือของกรมชลประทาน

ในการก่อสร้างในโครงการใหญ่ๆ ที่ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูง การลดต้นทุนการก่อสร้างเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับเจ้าของงาน และจากปัญหาปรากฏการณ์เรือนกระจกที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ การผลิตปูนซีเมนต์เป็นสาเหตุหนึ่งให้เกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) มากในชั้นบรรยากาศ จากเหตุผลข้างต้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยใช้วัสดุ Pozzolan ซึ่งมีราคาต่ำกว่าปูนซีเมนต์จึงเป็นสิ่งจำเป็น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุ Pozzolan ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด และความคงทน (Durability) ให้กับดินซีเมนต์

Horpibulsuk et al. [1] ได้ศึกษาและเสนอตัวแปรหลักที่เป็นตัวควบคุมกำลังของดินซีเมนต์ คืออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณของซีเมนต์ (เทียบต่อน้ำหนักดินแห้ง) (Soil-water/cement ratio,  $w_c/C$ ) รุ่งลาวัลย์

ราชัน [2] ได้ศึกษาการพัฒนากำลังและลักษณะโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ผสมด้วยซีเมนต์และเถ้าชีวมวล Horpibulsuk et al. [3] ได้ศึกษาอิทธิพลของการผสมเถ้าลอยในดินซีเมนต์ และพบว่าเถ้าลอยช่วยให้ดินซีเมนต์กระจายตัวและสัมผัสน้ำได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนเพิ่มขึ้น รุ่งลาวัลย์ ราชัน และทรงสุดา วิจารณ์ [4] ได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ บดอัดผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลในห้องปฏิบัติการผลการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแห้งและเปียกได้นำเสนอโดย Horpibulsuk et al. [5] แม้จะมีการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์แทนที่ด้วยวัสดุ Pozzolan [3] แต่การศึกษาส่วนใหญ่ยังเป็นการดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในทางปฏิบัติยังไม่มี การนำวัสดุ Pozzolan มาประยุกต์ใช้งานจริงในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์

ปัจจุบันการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ส่วนใหญ่เป็นเพียงการลองผิดลองถูกหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมโดยการลุ่มทดสอบปริมาณปูนซีเมนต์จาก 170 ถึง 220 กิโลกรัมต่อปริมาตรดินหนึ่งลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ( $W/C$ ) เท่ากับ 1.0 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำงานในสนาม สำหรับบ่มฉิदन้ำปูนแบบแรงดันต่ำ และขนาดของท่อส่งน้ำปูนที่ใช้ในประเทศไทย นอกจากนี้ อัตราส่วนน้ำ  $W/C$  ดังกล่าวยังช่วยให้การบำรุงรักษาและอายุการใช้งานนานกว่าอัตราส่วน  $W/C$  ที่ต่ำกว่านี้ เนื่องจากน้ำปูนที่ชื้นเกินไป (High Density) จะทำให้เกิดการแข็งตัวเร็ว และทำให้เกิดปัญหาการอุดตันต่อระบบบ่มฉิदन้ำปูนและท่อส่งน้ำปูน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยถ่านหิน ซึ่งเป็นวัสดุ Pozzolan ชนิดหนึ่งในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 15 ซึ่งอยู่ในช่วง Active Zone ที่ศึกษาโดย Vichan et al. [6] และนำเสนอการพัฒนา กำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์เถ้าลอยเปรียบเทียบกับกำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ (ปราศจากเถ้าลอย) ที่อัตราส่วน  $W/C$  และอายุบ่มต่างๆ

## 2. วัสดุทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อน เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร ภายหลังจากการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อน โดยเทคนิคการผสมลึก (Deep Mixing Method) เส้าซีเมนต์ซีเมนต์และเส้าซีเมนต์ซีเมนต์เถ้าลอยทดสอบมีทั้งหมด 3 ต้นตัวแปรควบคุม ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณส่วนผสม อัตราส่วนปริมาณซีเมนต์ต่อปริมาตรดินเปียก และปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย เถ้าลอยที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไฟว์ เค.ที จำกัด ซึ่งเป็นเถ้าลอยที่ได้มาจากโรงไฟฟ้า BSCP ตั้งอยู่เลขที่ 9 ถนนโอ 8 นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง โดยนำเถ้าลอยมาจากไซโล มาเก็บในถังพลาสติก 100 ลิตร ปิดมิดชิดเพื่อรักษาความชื้น ก่อนที่จะทำการศึกษา 7 วัน และปูนซีเมนต์ที่ใช้ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

## 3. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยการศึกษาในสนามและในห้องปฏิบัติการ โดยประกอบไปด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังสรุปในตารางที่ 1 และ 2 คือ

ส่วนที่ 1 การติดตั้งเส้าซีเมนต์ซีเมนต์ และเส้าซีเมนต์ซีเมนต์เถ้าลอยในสนาม 3 ต้น เส้าซีเมนต์แต่ละต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร และยาว 10 เมตร เมื่อได้อายุบ่มที่กำหนด ผู้วิจัยทำการ Coring เก็บตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียวในห้องปฏิบัติการที่ระยะเวลาบ่ม ที่ 14, 28 และ 60 วัน

ส่วนที่ 2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอยปูนซีเมนต์ และตัวอย่างดินทดสอบ และการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของเส้าซีเมนต์ซีเมนต์และเส้าซีเมนต์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่อายุบ่มดังกล่าวข้างต้น

ตารางที่ 1 รายละเอียดการเจาะทำเส้าซีเมนต์ซีเมนต์และเส้าซีเมนต์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในสนาม

| อัตราส่วนซีเมนต์ : เถ้าลอย (C:FA)   | อัตราส่วนน้ำ ส่วนผสม (W/B) |
|---|----------------------------|
| เส้าซีเมนต์ซีเมนต์ ต้นที่ 1 (C:FA = 100:0)<br>(ปูนซีเมนต์ 200 kg)                           | 1 : 1                      |
| เส้าซีเมนต์ซีเมนต์-เถ้าลอย ต้นที่ 2<br>(C:FA = 85:15) (ปูนซีเมนต์ 170 kg+เถ้า<br>ลอย 30 kg) | 1 : 1                      |
| เส้าซีเมนต์ซีเมนต์-เถ้าลอย ต้นที่ 3<br>(C:FA = 85:15) (ปูนซีเมนต์ 170 kg+เถ้า<br>ลอย 30 kg) | 1.2 : 1                    |

ตารางที่ 2 รายละเอียดการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

| ประเภทของวัสดุ                               | วิธีการทดสอบ   |
|--|--|
| 1. ดินเหนียวอ่อน เขตหนองจอก                  | รวบรวมข้อมูลดินที่ได้จากการไถลี้เคียงและการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ |
| 2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1             | การทดสอบหาสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี                        |
| 3. เถ้าลอย                                   | การทดสอบหาสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี                        |
| 4. ตัวอย่างดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย | การทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 14, 28 และ 60 วัน         |

รายละเอียดของการศึกษาทั้ง 2 ส่วนสามารถอธิบายได้ดังนี้

### การทดสอบในสนาม

#### การติดตั้งทำเสาเข็มดินซีเมนต์

เครื่องจักรผสมดังรูปที่ 1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องผสมซีเมนต์ น้ำ และถัลดอยให้เข้ากัน ป้อนน้ำปูนซึ่งทนแรงดันได้ 20 บาร์ ทำหน้าที่ส่งถัลดอยน้ำปูนผ่านสายน้ำปูนไปยังตัวรถเจาะ ผ่านไปยังหัวเจาะซึ่ง มีใบกววนดินทำหน้าที่กววนดิน และใบตาดินป้องกันดินหมุนตามใบกววนดินเพื่อทำให้ประสิทธิภาพของการตีคววนผสมกับดินได้ดีขึ้น และมีรู 1 นิ้ว ที่ปลายหัวเจาะเพื่อให้ น้ำปูนไหล ออกไปผสมกับดิน



รูปที่ 1 ชูตเครื่องจักรผสม และป้อนส่งน้ำปูน

รถเจาะมีใบกววนทำหน้าที่ในการกววนดินไปพร้อมๆ กับการเจาะฉีดน้ำปูนไปผสมกับดิน โดยอัตราการเจาะขึ้น - ลง ของหัวเจาะอยู่ที่ 1.0 และ 1.2 เมตรต่อนาที มีอัตราการหมุนกววนที่ 30 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราการเจาะจริงในสนามที่เหมาะสม ในหลายๆ โครงการ เช่น โครงการปรับปรุงคลองลัดโพธิ์ โครงการคลองระบายน้ำ บริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ อัตราการติดตั้งเสาเข็มดังกล่าวให้เสาเข็มดินซีเมนต์มีคุณภาพดีและเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้กำลังอัดสูง อัตราการฉีดน้ำปูน (ประมาณ 75-90 ลิตรต่อนาที) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของแต่ละต้น (รายการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3) การฉีดน้ำปูนจะเริ่มฉีดที่ระดับหัวเสาเข็ม ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ที่

ระดับ 0.00 - 0.30 เมตร การฉีดน้ำปูนและการ เจาะกววนดินโดยการหมุนหัวเจาะกววนดินจะทำในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เมื่อเจาะถึงระดับความลึก 10 เมตร ที่ต้องการ ก็จะหยุดฉีดน้ำปูน และถอนหัวเจาะขึ้นพร้อมๆ กับปรับทิศทางการหมุนของหัวเจาะในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เพื่อให้การผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้นจนหัวเจาะขึ้นมาที่ระดับ 0.00 ถือว่าเสร็จสิ้นการเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเจาะทำเสาเข็มดินซีเมนต์

การเจาะเก็บตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 8 ภายหลังจากการเจาะทำเสาเข็มดินซีเมนต์ครบอายุบ่ม 14 และ 28 วัน เพื่อทดสอบกำลังอัดแกนเดียวในห้องปฏิบัติการที่อายุบ่ม 14, 28 และ 60 วัน

กำลังอัดที่อายุบ่ม 60 วัน ได้จากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่เจาะเก็บจากสนามที่อายุบ่ม 28 วัน และนำมาบ่มในห้องปฏิบัติการจนอายุการบ่มครบ 60 วัน

ตารางที่ 3 อัตราการเจาะ และฉีดน้ำปูน

| อัตราส่วนซีเมนต์ : ถัลดอย (C:FA) | อัตราการเจาะชั้นลง (เมตร/นาท) | อัตราการฉีดน้ำปูน (ลิตร/นาท) | ปริมาณน้ำปูนต่อเมตร (ลิตร) | ปริมาณน้ำปูนรวม (ลิตร) |
|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------|
| 100 : 0                          | 1.1                           | 82.0                         | 74.5                       | 745                    |
| 85 : 15                          | 1.1                           | 83.4                         | 75.8                       | 758                    |
| 85 : 15                          | 1.1                           | 95.9                         | 87.2                       | 872                    |



รูปที่ 3 ตำแหน่งหัวเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 6 การวัดขนาดตัวอย่างดินซีเมนต์



รูปที่ 4 การเจาะเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 7 การตัดตัวอย่างดินซีเมนต์



รูปที่ 5 ตัวอย่างดินซีเมนต์



รูปที่ 8 การห่อเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์เตรียมไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ

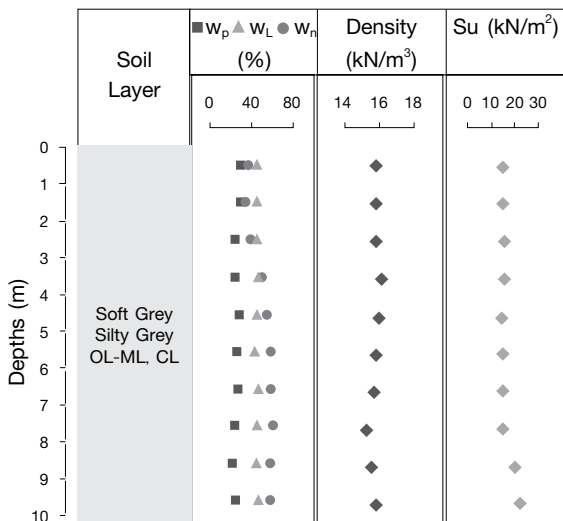
**การทดสอบในห้องปฏิบัติการ**

รูปที่ 9 แสดงลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ บริเวณที่ทำทดสอบ ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.1 และ 3.15 ตามลำดับองค์ประกอบทางเคมีของดินตัวอย่างปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยแสดงดังตารางที่ 4 เถ้าลอยที่ใช้ในการทดสอบมีปริมาณร้อยละซิลิกอนไดออกไซด์ 30.34 และผลรวมของ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 15 จัดเป็นเถ้าลอยชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C618 แต่เนื่องจากการทดสอบในส่วน gradation ยังไม่มีข้อมูลซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการตีความเปรียบเทียบ และสามารถใช้ประโยชน์จากการศึกษาในอนาคต

ตัวอย่างดินซีเมนต์สำหรับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.30 เซนติเมตร และความสูง 12.60 เซนติเมตร ดังรูปที่ 10 การทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียวด้วยเครื่องทดสอบ Unconfined Compression Test ดังรูปที่ 11 ถึง 12 อัตราเร็วของการทดสอบเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อนาที ผลทดสอบที่ได้นำมาคำนวณและวิเคราะห์ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

**ตารางที่ 4** ผลวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบด้วย XRF

| ร้อยละของธาตุองค์ประกอบ (%)    | ดินเหนียว อ่อน กรุงเทพฯ | ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 | เถ้าลอย ถ่านหิน |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------|
| Na <sub>2</sub> O              | -                       | -                              | -               |
| MgO                            | -                       | -                              | -               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20.78                   | 5.03                           | 18.06           |
| SiO <sub>2</sub>               | 68.03                   | 23.74                          | 30.34           |
| SO <sub>3</sub>                | 1.22                    | 3.34                           | 7.77            |
| K <sub>2</sub> O               | 1.53                    | 0.34                           | 0.76            |
| CaO                            | 0.91                    | 63.29                          | 38.44           |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.95                    | 0.32                           | 0.69            |
| Tr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.02                    | -                              | -               |
| MnO <sub>2</sub>               | 0.13                    | 0.05                           | 0.02            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.44                    | 3.82                           | 3.93            |



**รูปที่ 9** ข้อมูลดินเขตหนองจอก



**รูปที่ 10** การทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว



รูปที่ 11 ตัวอย่างดินซีเมนต์พร้อมทดสอบในห้องปฏิบัติการ

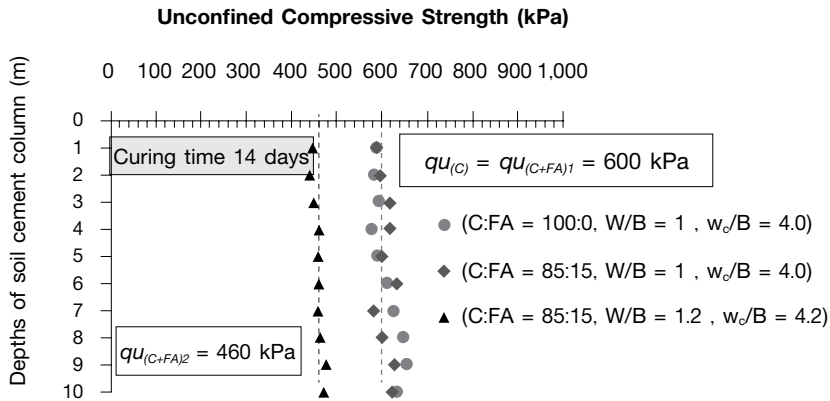


รูปที่ 12 การวัดของตัวอย่างดินซีเมนต์

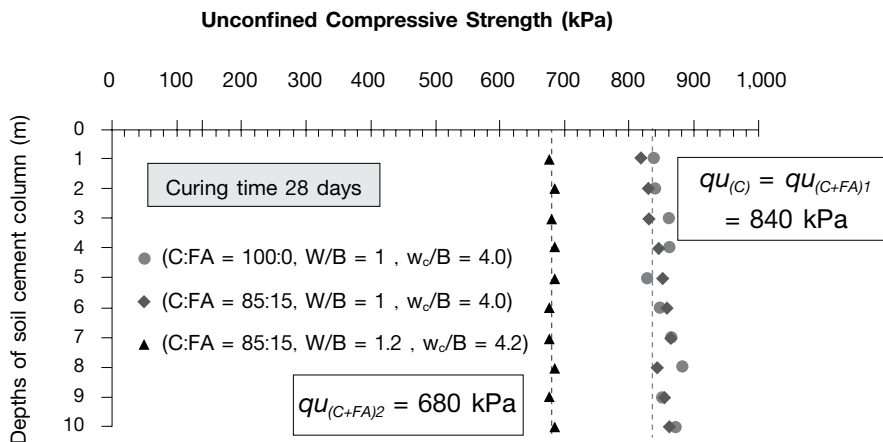
#### 4. ผลการทดสอบ และวิจารณ์ผล

รูปที่ 13 แสดงผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้ง 3 ต้นที่อายุบ่ม 14 วัน จะเห็นว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ - เถ้าลอย ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสม เท่ากับ 1 ( $W/B = 1$ ) ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณของวัสดุผสม (ปูนซีเมนต์ + เถ้าลอย) เท่ากับ 4.0 ( $w_c/B = 4.0$ ) (ต้นที่ 2) ( $qu_{(C+FA)1}$ ) มีค่ากำลังอัดแกนเดียวใกล้เคียงกับเสาเข็มดินซีเมนต์ ( $qu_{(C)}$ ) (ต้นที่ 1) ที่อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมเท่ากับ 1 ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 4.0 ซึ่งมีความเฉื่อยกำลังอัดแกนเดียวตลอดความลึกเท่ากับ 600 กิโลปาสคาล ( $(qu_{(C+FA)1}) / qu_C = 1$ ) และเท่ากับ 1.3 เท่าของกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์เถ้าลอยต้นที่ 3 ซึ่งมีค่าเฉื่อย ตลอดความลึกประมาณ 460 กิโลปาสคาล (ที่  $W/B = 1.2$ ,  $w_c/B = 4.2$ ) ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเท่ากัน (ร้อยละ 15%) ( $qu_{(C+FA)1} / (qu_{(C+FA)2}) = 1.3$ )





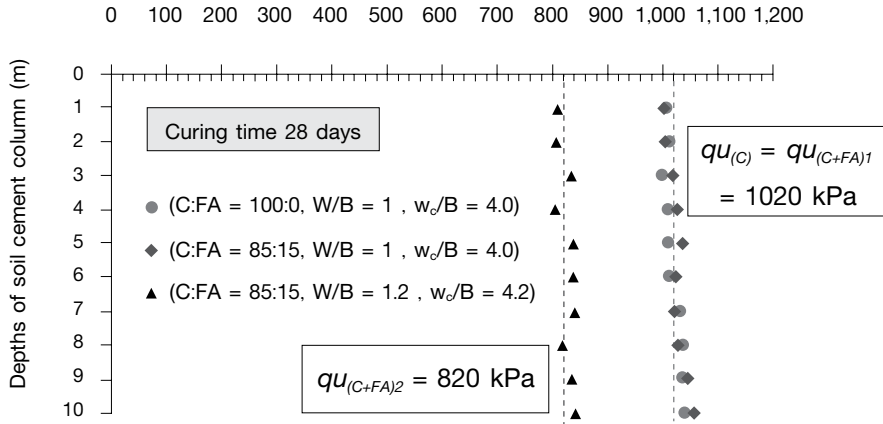
**รูปที่ 13** กำลังอัดแกนเดียวสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ที่ความลึกต่างๆ ที่อายุบ่ม 14 วัน



**รูปที่ 14** กำลังอัดแกนเดียวสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ที่ความลึกต่างๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน

รูปที่ 14 แสดงผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวสูงสุดของเสาเข็มทั้ง 3 ต้น ที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งสามารถสรุปได้เช่นกันกับผลทดสอบที่อายุบ่ม 14 วัน (รูปที่ 13) ว่ากำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์-เถ้าลอยต้นที่ 2 มีค่าเทียบเท่ากับกำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ (ต้นที่ 1)

โดยให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยเท่ากับที่ 840 กิโลปาสคาล ( $qu_{(C+FA)1}/qu_C = 1$ ) และมีค่าสูงกว่ากำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์-เถ้าลอยต้นที่ 3 ถึง 1.24 เท่า ( $qu_{(C+FA)1}/qu_{(C+FA)2} = 1.24$ ) โดยที่ กำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยของเสาเข็มต้นที่ 3 เท่ากับ 680 กิโลปาสคาล



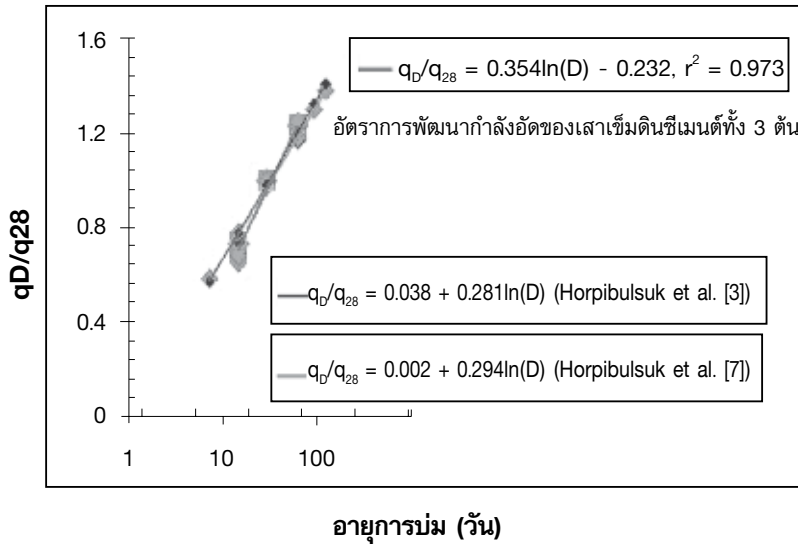
**รูปที่ 15** กำลังอัดแกนเดี่ยวสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ที่ความลึกต่างๆ ที่อายุบ่ม 60 วัน

เมื่อพิจารณาที่อายุการบ่ม 60 วัน ดังรูปที่ 15 กำลังอัดแกนเดี่ยวของเสาเข็มดินซีเมนต์-เถ้าลอยต้นที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ (ต้นที่ 1) เช่นเดียวกับอายุบ่ม 14 และ 28 วัน (โดยให้ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยวเฉลี่ยเท่ากับ 1,020 กิโลปาสคาล) และมีค่าเท่ากับ 1.24 เท่า ของเสาเข็มดินซีเมนต์-เถ้าลอย ต้นที่ 3 ซึ่งให้ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยวเฉลี่ยเท่ากับ 820 กิโลปาสคาล ( $qu_{(C+FA)1} / qu_{(C+FA)2} = 1.24$ ) รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพัฒนากำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์-เถ้าลอยทั้งสามต้น เปรียบเทียบ

กับสมการที่นำเสนอในท้องปฏิบัติการโดย Horpibulsuk et al. [3] และ Horpibulsuk et al. [7] ผลการทดสอบของเสาเข็มทั้งสามต้นสามารถประมาณได้ด้วยสมการลือกกาลิทิม ดังแสดงในสมการที่ 1

$$q_D / q_{28} = 0.354 \ln D - 0.232 \tag{1}$$

เมื่อ  $q_D$  คือกำลังอัดแกนเดี่ยวที่อายุบ่ม  $D$  วัน  $q_{28}$  คือกำลังอัดแกนเดี่ยวที่อายุบ่ม 28 วัน และ  $D$  คืออายุการบ่ม



**รูปที่ 16** อัตราการพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสม  
 etailoy เทียบกับสมการของ [3] และ [7]

สมการอัตราการพัฒนากำลัง ดังแสดงในสมการที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกันกับความสัมพันธ์ที่นำเสนอโดย Horpibulsuk et al. [3] และ Horpibulsuk et al. [7] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการพัฒนากำลังอัดภายใต้ปฏิกิริยาเดียวกัน คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามมีค่าใกล้เคียงกันทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นตัวแปรหลักในการควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด ด้วยเหตุนี้เอง สมการดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นสมการเอกภาพสำหรับดินซีเมนต์ที่มีการบวมตัวต่ำและสูงค่าผิดพลาดร้อยละเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percent Error) ระหว่างผลทดสอบและผลการทำนายด้วยสมการที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. [3 และ 7] แสดงในตารางที่ 5 ค่า

ผิดพลาดร้อยละเฉลี่ยสัมบูรณ์มีค่าเท่ากับร้อยละ 4.31 และ 5.05 เมื่อเทียบกับสมการที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. [3] และ [7] ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในงานออกแบบทางวิศวกรรมที่ใช้อัตราส่วนความปลอดภัยไม่ต่ำกว่า 2 หรือร้อยละ 50 ตารางที่ 6 แสดงความคุ้มค่าของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยetailoy จะเห็นได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยetailoy ร้อยละ 15 ให้ค่ากำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์etailoy เท่ากับกำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ และช่วยลดค่าใช้จ่ายได้ถึงร้อยละ 12.75 โดยพิจารณาเฉพาะค่าวัสดุเท่านั้น เนื่องจากค่าใช้จ่ายจากเครื่องจักรและแรงงานในการติดตั้งเสาเข็มทั้งสองประเภทมีค่าเท่ากัน

ตารางที่ 5 การทำนายกำลังอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์

| ความลึก (เมตร)  | อายุ บ่ม D (วัน) | ความชื้นเริ่มต้น $w_c$ (%) | ปริมาณซีเมนต์ C (%) | ความชื้นต่อซีเมนต์ $w_c/C$ | ความชื้นของตัวอย่าง $w_c$ (%) | หน่วยน้ำหนัก (kN/m <sup>3</sup> ) | กำลังอัดในสนาม $q_u$ (kPa) | กำลังอัดที่ทำนายโดย [3] $q_{u_p}$ (kPa) | กำลังอัดที่ทำนายโดย [7] $q_{u_p}$ (kPa) | $\frac{ q_{up} - q_{uf} }{q_{up}} \times 100$ |                |
|---|------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---|---|---|----------------|
|   |                  |                            |                     |                            |                               |                                   |                            |   |   | % เทียบกับ [3]                                | % เทียบกับ [7] |
| 1   | 14               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 88.22                         | 13.989                            | 589.50                     | 645.28                                  | 646.69                                  | 9.46  | 9.70           |
|   | 28               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 84.53                         | 13.881                            | 829.54                     | อ้างอิง                                 | อ้างอิง                                 | 1.83  | 2.57           |
|   | 60               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 81.25                         | 14.695                            | 998.88                     | 1000.21                                 | 985.92                                  | 0.13  | 1.30           |
| 2   | 14               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 96.54                         | 13.999                            | 584.64                     | 645.28                                  | 646.69                                  | 10.37   | 10.61          |
|   | 28               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 94.61                         | 13.479                            | 838.30                     | 814.33                                  | 808.26                                  | 2.86  | 3.58           |
|   | 60               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 90.67                         | 13.940                            | 1011.0                     | 1000.21                                 | 985.92                                  | 1.07  | 2.48           |
| 3   | 14               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 88.54                         | 13.312                            | 595.92                     | 645.28                                  | 646.69                                  | 8.28  | 8.52           |
|   | 28               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 87.40                         | 13.646                            | 860.06                     | 814.33                                  | 808.26                                  | 5.32  | 6.02           |
|   | 60               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 86.79                         | 13.930                            | 999.76                     | 1000.21                                 | 985.92                                  | 0.04  | 1.38           |
| 4   | 14               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 81.90                         | 13.263                            | 578.81                     | 645.28                                  | 646.69                                  | 11.48   | 11.73          |
|   | 28               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 78.93                         | 13.489                            | 861.24                     | 814.33                                  | 808.26                                  | 5.45  | 6.15           |
|   | 60               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 77.78                         | 13.881                            | 1010.70                    | 1000.21                                 | 985.92                                  | 1.04  | 2.45           |
| 5   | 14               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 89.67                         | 13.244                            | 593.02                     | 645.28                                  | 646.69                                  | 8.81  | 9.05           |
|   | 28               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 89.48                         | 13.538                            | 828.00                     | 814.33                                  | 808.26                                  | 1.65  | 2.38           |
|   | 60               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 84.67                         | 14.264                            | 1012.50                    | 1000.21                                 | 985.92                                  | 1.21  | 2.63           |
| 6   | 14               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 87.79                         | 13.391                            | 611.99                     | 645.28                                  | 646.69                                  | 5.44  | 5.67           |
|   | 28               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 85.67                         | 13.812                            | 846.81                     | 814.33                                  | 808.26                                  | 3.84  | 4.55           |
|   | 60               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 83.43                         | 14.460                            | 1043.69                    | 1000.21                                 | 985.92                                  | 4.17  | 5.54           |
| 7   | 14               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 92.19                         | 13.616                            | 626.18                     | 645.28                                  | 646.69                                  | 3.05  | 3.27           |
|   | 28               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 91.92                         | 13.920                            | 864.67                     | 814.33                                  | 808.26                                  | 5.82  | 6.52           |
|   | 60               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 85.45                         | 14.509                            | 1031.61                    | 1000.21                                 | 985.92                                  | 3.04  | 4.43           |
| 8   | 14               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 91.09                         | 13.832                            | 648.53                     | 645.28                                  | 646.69                                  | 0.50  | 0.28           |
|   | 28               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 89.41                         | 14.185                            | 881.65                     | 814.33                                  | 808.26                                  | 7.64  | 8.32           |
|   | 60               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 86.32                         | 14.421                            | 1045.90                    | 1000.21                                 | 985.92                                  | 4.37  | 5.73           |
| 9   | 14               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 82.45                         | 13.930                            | 656.52                     | 645.28                                  | 646.69                                  | 1.71  | 1.50           |
|   | 28               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 77.66                         | 14.097                            | 848.48                     | 814.33                                  | 808.26                                  | 4.02  | 4.74           |
|   | 60               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 76.56                         | 14.529                            | 1037.70                    | 1000.21                                 | 985.92                                  | 3.61  | 4.99           |
| 10  | 14               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 89.80                         | 14.107                            | 632.01                     | 645.28                                  | 646.69                                  | 2.10  | 2.32           |
|   | 28               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 86.77                         | 14.313                            | 869.42                     | 814.33                                  | 808.26                                  | 6.34  | 7.03           |
|   | 60               | 80                         | 20                  | 4.0                        | 81.78                         | 14.538                            | 1049.45                    | 1000.21                                 | 985.92                                  | 4.69  | 6.05           |
| Mean Absolute Percent Error, MAPE ( $MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ q_{up} - q_{uf} }{q_{up}} \times 100$ ) |                  |                            |                     |                            |                               |                                   |                            |   |   | 4.31%   | 5.05%          |

## ตารางที่ 6 ค่าใช้จ่ายที่ลดลง เมื่อใช้เถ้าลอย แทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 15

| ปริมาณวัสดุที่ใช้ต่อ 1 m <sup>3</sup> ของเสาเข็มดินซีเมนต์  | ราคาต่อหน่วย (บาท) | เป็นเงิน (บาท) | รวม (บาท) |
|---|--------------------|----------------|-----------|
| 1. กรณีใช้ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ 200 kg  | 2.0                | 400            | 400       |
| 2. กรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสม เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ 170 kg เถ้าลอย 30 kg   | 2.0<br>0.3         | 340<br>9       | 349       |
| ดังนั้นค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้ = 400 - 349 = 51 บาท ต่อ 1 m <sup>3</sup> ของเสาเข็มดินซีเมนต์ คิดเป็น = $(51/400) \times 100 = 12.75\%$ |                    |                |           |

## 5. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้ได้ทำการศึกษาคือความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในสนาม ซึ่งจากผลการศึกษาสมาารถสรุปประเด็นหลักๆ ได้ดังนี้

1. กำลังอัดแกนเดียวในสนามของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุ 14, 28 และ 60 วัน มีค่าเท่ากับกำลังอัดแกนเดียวในสนามของเสาเข็มดินซีเมนต์-เถ้าลอย ที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าลอย 85:15 (ที่  $W/B = 1$ ,  $w_c/B = 4.0$  เท่ากัน)

2. เสาเข็มดินซีเมนต์-เถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมเท่ากับ 1 ( $W/B = 1$ ) มีค่ากำลังอัดสูงกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์-เถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมเท่ากับ 1.2 ( $W/B = 1.2$ ) เท่ากับ 1.3, 1.24 และ 1.24 เท่า ที่อายุบ่ม 14, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ที่อัตราส่วนผสมวัสดุที่เท่ากัน

3. เถ้าลอยมีประสิทธิภาพในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 15 สามารถลดค่าใช้จ่ายปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 12.75

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัทปั้นจั่นไทย จำกัด และบริษัท โทเท่นอกซ์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือเรื่องเครื่องจักรอุปกรณ์ และขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ภายใต้สัญญา RTA568002

## 7. เอกสารอ้างอิง

- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Bergado D.T., 2004b, "Undrained Shear Behavior of Cement Admixed Clay at High Water Content", *J Geoenviron Eng, ASCE*, Vol. 130, No. 10, pp. 1096-1105.
- Rachan, R., 2009, *Strength Development and Microstructural Characteristics of Soft Bangkok Clay Admixed with Cement and Biomass Ash*, Doctoral Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Bangkok. (In Thai)
- Horpibulsuk, S., Rachan, R. and Raksachon, Y., 2009, "Role of Fly Ash on Strength and Microstructure Development in Blended Cement Stabilized Silty Clay", *Soil and Foundations*, Vol. 49, No. 1, pp. 85-98.
- Rachan, R. and Vichan, S., 2013, "Unconfined Compressive Strength Development and Microstructure of Calcium Carbide Residue and Biomass Ash Admixed in Compacted Soft Bangkok Clay", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 36, No. 1, pp. 51-71. (In Thai)
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Suddepong, A. and Chinkulkijniwat, A., 2011, "Strength Development in Cement Admixed Bangkok Clay: Laboratory and Field Investigations", *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 2, pp. 239-251.
- Vichan, S., Rachan, R. and Horpibulsuk, S., 2013, "Strength and Microstructure Development

in Bangkok Clay Stabilized with Calcium Carbide Residue and Biomass Ash”, *Science Asia*, Vol. 39, pp. 186-193.

7. Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S.,

2003, “Assessment of Strength Development in Cement-Admixed High Water Content Clays with Abraham’s Law as a Basis” *Geotechnique*, Vol. 53, No. 4, pp. 439-444.