



ผลกระทบของปริมาณความชื้นต่อกำลังรับแรงอัดจากการเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์

บดอัดแบบสถิตและแบบพลวัต

THE EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF  
STATIC AND DYNAMIC COMPACTED SOIL-CEMENT SPECIMENS

ภูมิจิยามณ์ ทองแสน<sup>1</sup> และ ดลฤดี หอมดี<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*Corresponding author, E-Mail: dolhor@kku.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำดินลมหอบขอนแก่นมาปรับปรุงโดยการบดอัดและผสมปูนซีเมนต์ ร้อยละ 3-6 โดยน้ำหนัก จากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตและแบบพลวัต เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณความชื้นต่อกำลังรับแรงอัด โดยการทดสอบแรงอัดแกนเดียว พบว่าในตัวอย่างดินซีเมนต์บดอัดแบบสถิต ผลของปริมาณความชื้นที่ใช้ผสม จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เมื่อมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นที่เหมาะสม 2 % สำหรับระยะเวลาบ่ม 3-7 วัน ส่วนที่ 14 และ 28 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เมื่อใช้ปริมาณความชื้นที่ใกล้ๆ ค่าความชื้นที่เหมาะสมทางด้านแห้ง เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีการแช่น้ำก่อนการทดสอบ 2 ชั่วโมงพบว่าค่ากำลังลดลง 12-47% จากผลการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ โดยตัวอย่างดินที่ผสมน้ำน้อยกว่าหรือทางด้านแห้งมีแนวโน้มทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงจากการแช่น้ำมากกว่าในทุกปริมาณซีเมนต์ และเมื่อมีปริมาณซีเมนต์ที่สูงกว่าจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงจากการแช่น้ำที่น้อยกว่า และยังทำให้ผลของปริมาณน้ำที่ผสมในตัวอย่างส่งผลต่อผลต่างของกำลังระหว่างการทดสอบแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำน้อยลงอีกด้วย ส่วนผลจากการเตรียมตัวอย่างแบบพลวัตในแบบขนาดใหญ่พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ลดลง 11-34 % ของผลที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตเนื่องจากประสิทธิภาพของการผสม

คำสำคัญ: ดินซีเมนต์; ค่ากำลังรับแรงอัด; ปริมาณความชื้น; การเตรียมตัวอย่าง

ABSTRACT

In this research, Khon Kaen loess soil is used to improve by compaction loess with 3-6% cement by weight in static and dynamic methods of preparation. The objective is to determine the effect of moisture content on unconfined compressive strength (UCS). In case of the static sample preparation, the results from the effect of the moisture content showed the highest UCS when the moisture content is less than the optimum moisture content (OMC) minus 2 percent for 3-7 days curing time. But for 14 and 28 days curing time, mixing close to OMC in the dry side should be used to get the highest UCS. When considering the UCS of the samples that were soaked in water for 2 hours before the test, the strength was 12-47% lower. The lower moisture content as the dry side of OMC, the more reduction of UCS from soaking for all cement content. The mixture at the higher cement content, the less reduction

of UCS from soaking and also more decreasing the influence of water content on reduction of UCS from soaking. The results from the dynamic sample preparation showed that the compressive strength of soil cement decreased by 11-34% of the results from the static sample preparation due to the efficiency of the mixing.

**KEYWORD:** Soil-cement; unconfined compressive strength; moisture content; soil preparation

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการก่อสร้างถนนนั้นจะต้องมีการออกแบบชั้นทางเพื่อให้ถนนนั้นสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามทีผู้ออกแบบกำหนดไว้ได้ ซึ่งการใช้วัสดุในการออกแบบชั้นทางนั้นมีข้อกำหนดตามมาตรฐานของวัสดุว่ามีกำลังรับแรงอัดที่เหมาะสมกับที่ออกแบบไว้หรือไม่ ทำให้การเลือกวัสดุจึงเป็นเรื่องที่สำคัญทั้งในด้านของคุณภาพและประสิทธิภาพรวมถึงทางด้านราคาดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพดินในงานพื้นทางสามารถตอบสนองทางด้านคุณภาพ, ประสิทธิภาพและยังสามารถช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้างได้ โดยการปรับปรุงคุณภาพของดินสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การบดอัดดิน การปรับปรุงทางด้านเคมีโดยการผสมด้วยสารผสมเพิ่มซึ่งมีในงานวิจัยต่างๆ เช่น วัสดุปอสโซลาน ปูนขาว ซีเมนต์ ในงานวิจัยของวิวรรณ วงศ์วานศรีสุข [1] ได้กล่าวว่าเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน แล้วได้ แคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรต, แคลเซียมอลูมิเนต ไฮเดรต และ Released Hydration Lime จะทำให้ค่าความต่างของน้ำในโพรงเพิ่มขึ้นอันเป็นผลทำให้ฝุ่นแขวนลอย หรือ ฝุ่นซีเมนต์ ก่อตัวเข้าด้วยกันแล้วยึดเกาะกันทำให้มวลมีกำลังสูงขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น จากงานวิจัยของ สนธยา แพทย์พัฒน์ [2] ศึกษากำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์โดยจะแปรผัน 4 ปัจจัย ดังนี้คือ ปริมาณซีเมนต์, ปริมาณความชื้น, พลังงานการบดอัดและระยะเวลาบ่มพบว่าปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ค่ากำลังรับแรงอัดและความยืดหยุ่น มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นจนกระทั่งถึงค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ในงานวิจัยของ Ribeiro และคณะ[3] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของน้ำที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินที่ผสมด้วยซีเมนต์โดยใช้ปริมาณซีเมนต์คือ 10% และ 13% และใช้อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์คือ 0.65 และ 2.0 และระยะเวลาบ่มเท่ากับ 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่าค่ากำลังอัดแปรผันตามผลของปริมาณน้ำ เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งคือจุดที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มากที่สุดและเมื่อปริมาณน้ำมากกว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าน้อยลง โดยในประเทศไทยใช้วิธี Cement Treated Base (CTB) ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ.1935 เพื่อปรับปรุงโครงสร้างชั้นพื้นทางสำหรับทางหลวงหมายเลข 41 ใกล้จอห์นสันวิลล์ รัฐเซาท์แคโรไลนา ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นการใช้ดินผสมด้วยซีเมนต์ Halsted และคณะ[4] ได้นำเสนอ ข้อเสนอแนะของการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์สำหรับงานทาง โดยชั้นทางที่เสริมด้วยดินซีเมนต์เปรียบเสมือนพื้นที่มีความแข็งแรงและความแกร่งเพียงพอที่กระจายน้ำหนักไปยังพื้นที่ขนาดใหญ่ ส่วนชั้นพื้นทางที่ไม่ได้เสริมด้วยดิน-ซีเมนต์ ปริมาณของการกระจายน้ำหนักจะมีพื้นที่น้อยทำให้ระดับของหน่วยแรงมากกว่าและส่งผลไปยังโครงสร้างชั้นถัดไป ต่อมาในประเทศไทยในช่วง พ.ศ.2508-2509 บริษัทปูนซีเมนต์ไทยได้เสนอทดลองทำการผสมดินลูกรังเก่าด้วยซีเมนต์ในการก่อสร้างถนนสายเดชอุดม-บุญศรี จังหวัดอุบลราชธานี ความยาว 5 กิโลเมตร โดยการใช้เครื่องผสม งานวิจัยของ Horpibulsuk และคณะ[5] ได้ศึกษาและเสนอตัวแปรหลัก ที่เป็นตัวควบคุมกำลังของดินซีเมนต์คืออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณของซีเมนต์ (เทียบต่อน้ำหนักดินแห้ง) โดยศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินปริมาณความชื้นสูงผสมซีเมนต์สัมพันธ์กับอายุบ่ม โดยทำการทดลองกับดินหลายชนิดที่ปริมาณซีเมนต์และปริมาณความชื้นต่างๆ พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินซีเมนต์ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะปกคลุมไปด้วยดินลมหอบ เกือบทั้งพื้นที่ มีคุณสมบัติเป็นดินพังยุบตัว มีกำลังแบกรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขณะที่อยู่ในสภาพแห้ง แต่ความสามารถในการรับน้ำหนักจะลดโดยเฉียบพลันและมีการยุบตัวของดินเมื่อมีน้ำแช่แข็ง ดังนั้นใน

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของปริมาณน้ำซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาด้านกำลังรับแรงอัดและยังเป็นตัวทำปฏิกิริยาภายในปูนซีเมนต์ให้มีการก่อตัวที่แข็งแรงขึ้นตามระยะเวลาบ่ม โดยทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดจากผลของการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตและแบบพลวัต ซึ่งในงานวิจัยจะประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของดินผสมซีเมนต์จากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตและแบบพลวัต จากผลของการแช่น้ำโดยมีส่วนผสมที่ใกล้เคียงกันและหาปริมาณซีเมนต์และน้ำที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดผ่าน [6] มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง

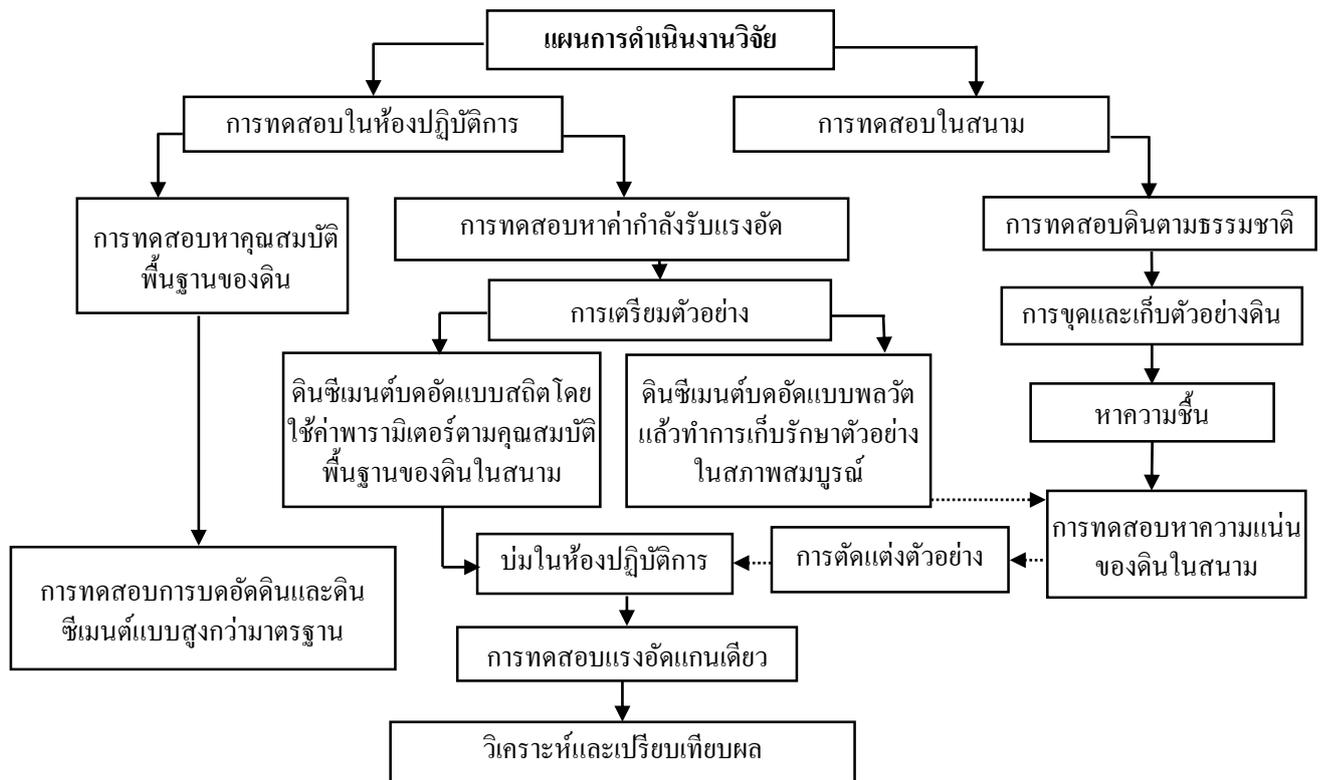
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของดินลมหอบขอนแก่นบดอัดผสมซีเมนต์จากผลของการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตและแบบพลวัต ผลของปริมาณน้ำ ผลของปริมาณซีเมนต์และผลของระยะเวลาบ่ม

2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลของค่ากำลังรับแรงอัดจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียว จากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตและแบบพลวัต จากการแช่น้ำ

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ได้ทำการแบ่งแผนดำเนินงานวิจัยเป็น 4 หัวข้อและสามารถสรุปได้ดังแผนภาพในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนดำเนินงานวิจัย

3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินลมหอบ ได้แก่ การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน, การทดสอบหาการกระจายขนาดของเม็ดดิน, การหาค่าพิกัดอัตราเบร็กร์และการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน

3.2 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของดินและดิน-ซีเมนต์โดยการทดสอบแรงอัดแกนเดียว จากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิต ผสมดินกับปูนซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ 3 ถึง 6% ของน้ำหนักดินแห้ง และทำการผสมน้ำตามค่าความชื้นที่เหมาะสม,ค่าที่มากกว่าและน้อยกว่าความชื้นที่เหมาะสม 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ได้ 95% ของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จากการนำส่วนผสมอัดลงในโมลทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร อย่างช้าๆ ด้วยเครื่องอัดตัวอย่าง โดยแบ่งการบดอัดเป็น 3 ชั้นเท่าๆ กันบ่มใส่ในถุงพลาสติกไม่ให้ความชื้นออกต่อ 1 ตัวอย่างเป็นระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วันดังรูปที่ 2

3.3 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของดินและดิน-ซีเมนต์โดยการทดสอบแรงอัดแกนเดียว จากการเตรียมตัวอย่างแบบพลวัต โดยการเตรียมแบบเหล็กกล่องขนาด 50x100x30cm ต่อ 1 บล็อก ผสมดินกับปูนซีเมนต์ตามปริมาณปูนซีเมนต์ คือ 3, 4 และ 5% โดยน้ำหนักดินแห้ง และทำการผสมน้ำตามค่าความชื้นที่เหมาะสม รวมทั้งค่าที่มากกว่าและน้อยกว่าความชื้นที่เหมาะสม 2 เปอร์เซ็นต์ ลงไปในแบบ ดังรูปที่ 3 โดยแบ่งการบดอัดเป็น 3 ชั้นๆ ละ 5 เซนติเมตร ตามน้ำหนักที่คำนวณได้จากค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ที่ 95% ของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยใช้แผ่นเหล็กขนาด 30x30x2.5cm น้ำหนัก 17.8 ปอนด์ ยกสูงเฉลี่ย 50 เซนติเมตร ในการกระทุ้งให้ได้ความหนา 5 เซนติเมตรในชั้นที่ 1 ตามส่วนผสมที่คำนวณไว้ให้ได้ความหนาแน่น 95% ของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังรูปที่ 4 และทำการชูดน้ำดินก่อนบดอัดในชั้นที่ 2 ทำจนครบ 3 ชั้น จากนั้นทำการทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนาม และตรวจสอบหาปริมาณความชื้น ดังรูปที่ 5 แล้วทำการรักษาความชื้นเพื่อไม่ให้ผิวหน้าดินซีเมนต์แตกร้าวโดยการ ใช้ผ้าเปียกคลุมพื้นที่ทดสอบไว้ ดังรูปที่ 6 จากนั้นแบ่งตัวอย่างที่สมบูรณ์เพื่อนำมาเก็บรักษาความชื้นในห้องปฏิบัติการและทำการตัดแต่งตัวอย่างให้ได้ขนาดรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 7 แล้วจึงบ่มต่อในถุงพลาสติกไม่ให้ความชื้นออกต่อ 1 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 8 จนครบเวลาบ่มแล้วนำมาแช่ให้น้ำท่วมตัวอย่างในถังขนาดใหญ่เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วจึงทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียว

3.4 การหาปริมาณน้ำที่ดูดซึมจากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตและแบบพลวัต เป็นวิธีการหาปริมาณน้ำจากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตและแบบพลวัต จากนั้นเมื่อครบระยะเวลาบ่มก็ทำการชั่งน้ำหนักเพื่อหาความชื้นหลังบ่ม และนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อนำค่าไปหาความชื้นขณะตัวอย่างอยู่ในสภาพเปียกและเข้าสู่อบเพื่อหาค่าความชื้นสุดท้าย



รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างแบบ  
สถิต

รูปที่ 3 การเตรียมตัวอย่าง  
แบบพลวัต

รูปที่ 4 การบดอัดดิน โดยแผ่น  
เหล็กกระทุ้ง

รูปที่ 5 การทดสอบการ  
แทนที่ด้วยทราย



รูปที่ 6 การคลุมผ้าเปียกในพื้นที่ทดสอบ    รูปที่ 7 การตัดแต่งตัวอย่างดินซีเมนต์    รูปที่ 8 การบ่มตัวอย่างไว้ในถุงพลาสติก

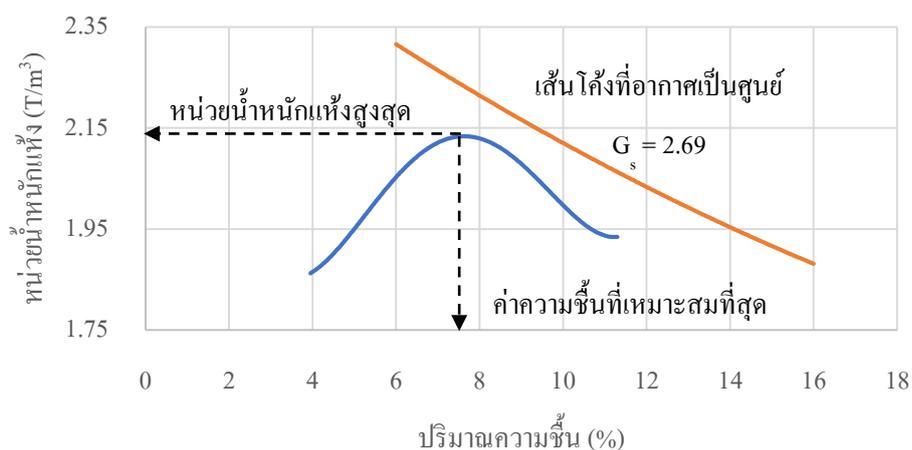
#### 4. ผลการทดสอบ

##### 4.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากงานวิจัยนี้เก็บตัวอย่างดินลมหอบแบบถูกรบกวนที่ระดับความลึก 1.5 เมตรจากระดับผิวดินบริเวณมหาวิทยาลัยขอนแก่น นำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดิน ค่าคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินลมหอบแสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 9 ซึ่งจะเห็นว่าดินลมหอบนี้ถูกจัดอยู่ในประเภทแข็งพอใช้ สำหรับชั้นคันทางเท่านั้น จากผลการจำแนกด้วย AASHTO

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินในห้องปฏิบัติการ

%Passing #4 (%)	%Passing #200 (%)	LL (%)	PL (%)	$G_s$	OMC (%)	$\rho_d$ ( $t/m^3$ )	USCS	AASHTO
100	43.1	16.2	NP	2.69	7.80	2.13	SM	A-4



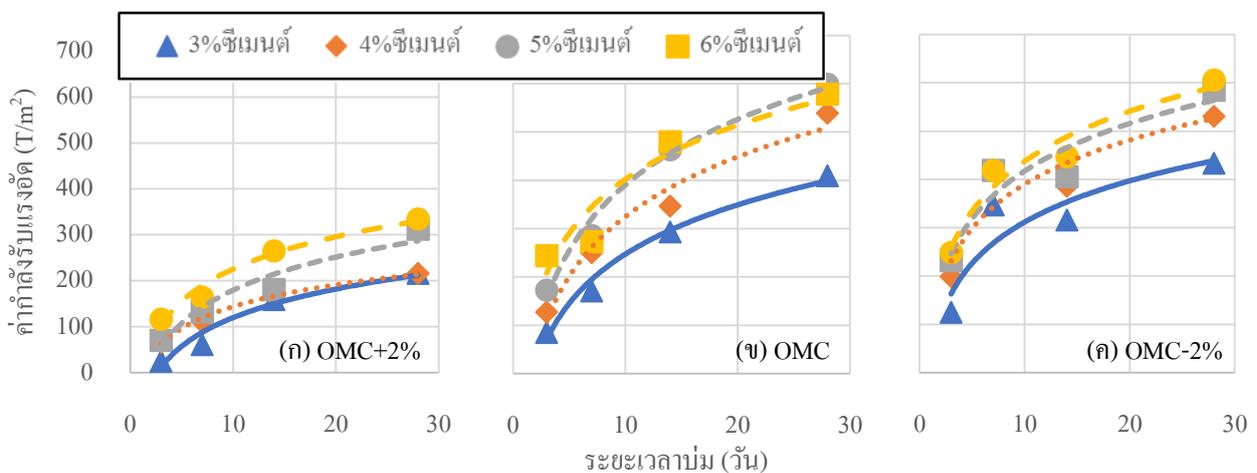
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณความชื้นในการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานและเส้นโค้งอากาศเป็นศูนย์

##### 4.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์จากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิต

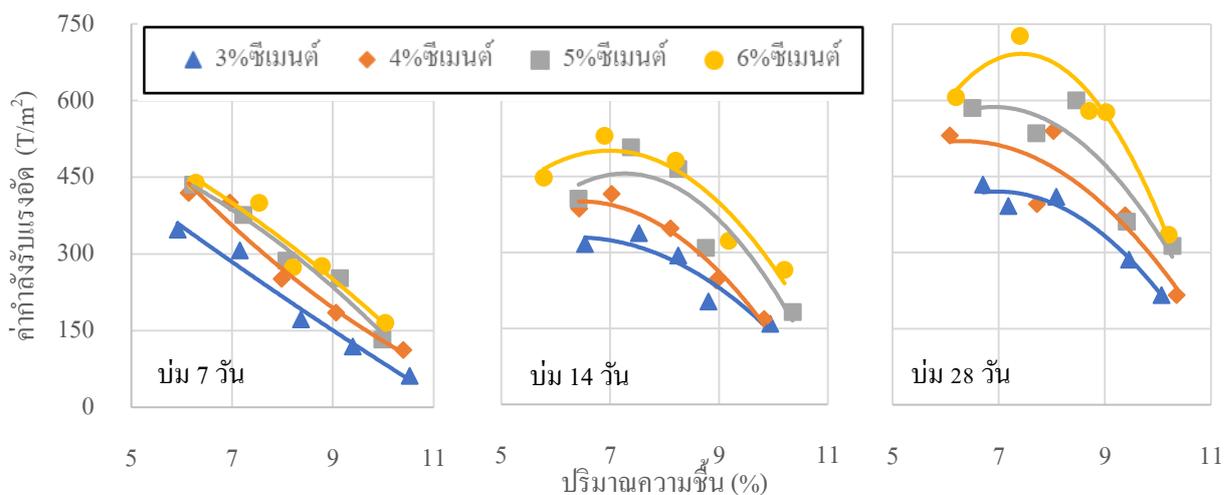
สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่มจากผลของปริมาณซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้นต่างๆ และที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ แสดงดังรูปที่ 10 และ 11

จากรูปที่ 10 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแปรผันตรงกับระยะเวลาบ่มและปริมาณซีเมนต์ คือเมื่อระยะเวลาบ่มและปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้นก็จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จากเส้นแนวโน้มของกราฟในช่วงระยะเวลาบ่มช่วง 3 ถึง 7 วันแรกอัตราการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากจากผลของการผสมซีเมนต์และอัตราการเพิ่มจะลดลงตามระยะเวลาบ่มหลังจากนั้น ในทุกปริมาณซีเมนต์

จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นและ ในช่วงระยะเวลาบ่ม 7 วันนั้นค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่ามากที่สุดในช่วงปริมาณความชื้นที่เท่ากับ -2%ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม คือความชื้นระหว่าง 5.9 ถึง 6.4 % ในช่วงระยะเวลาบ่ม 14 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่ามากที่สุดในช่วงปริมาณความชื้นที่เท่ากับ -1%ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม คือความชื้นระหว่าง 6.9 ถึง 7.4 % และในช่วงระยะเวลาบ่ม 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่ามากที่สุดในช่วงปริมาณความชื้นที่เหมาะสมคือความชื้นประมาณ 7.80%

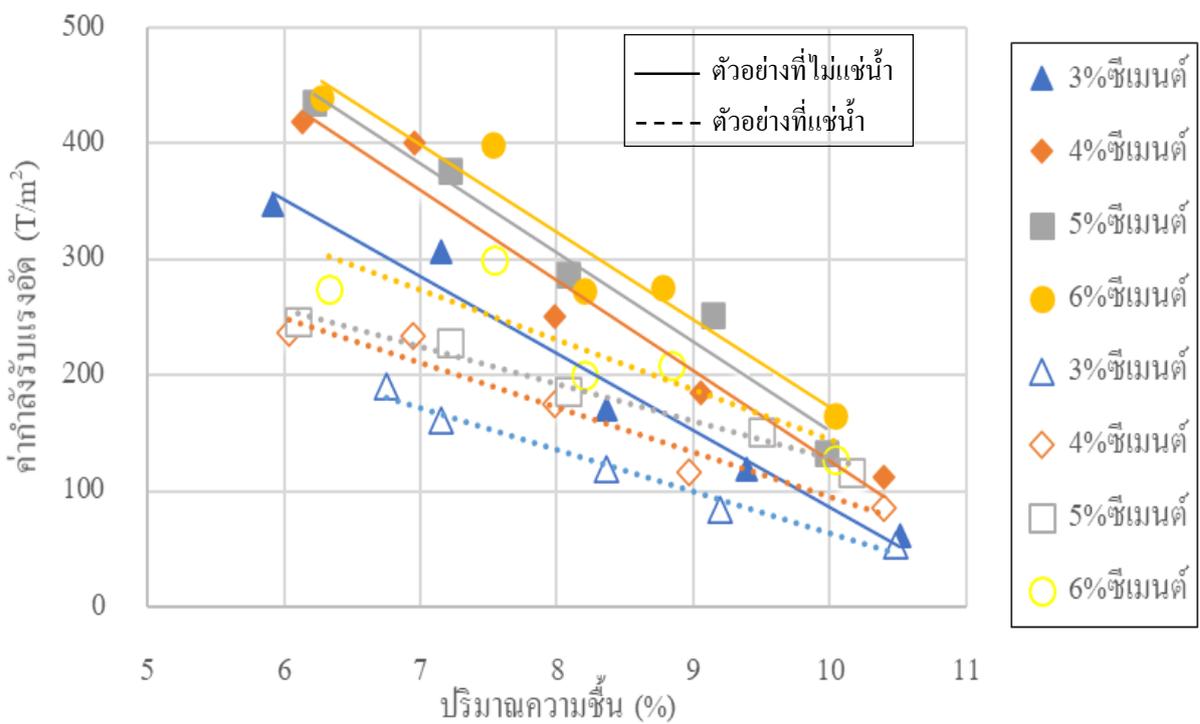


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่มจากผลของปริมาณซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้นต่างๆ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณความชื้นจากผลของปริมาณซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

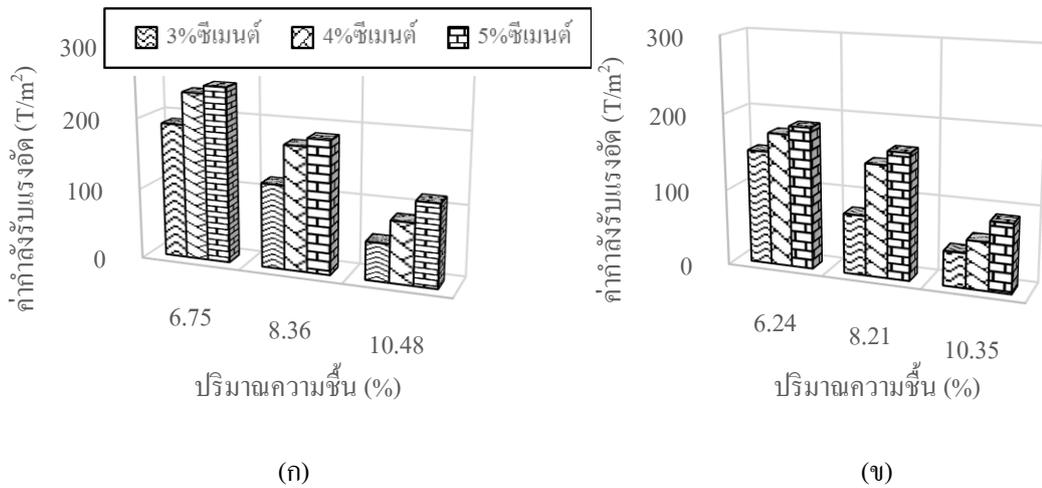
เนื่องจากตามมาตรฐานของกรมทางหลวงสำหรับการใช้ดินซีเมนต์ในงานพื้นทาง กำหนดให้นำตัวอย่างหลังจากบ่มเป็นระยะเวลา 7 วันแล้ว ทำการแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนการทดสอบแรงอัดแกนเดียว ซึ่งเมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณความชื้นระหว่างตัวอย่างที่ไม่แช่น้ำและแช่น้ำ จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดจากการที่แช่น้ำจะมีค่าน้อยลงทุกปริมาณซีเมนต์ โดยตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่น้อย (-1 ถึง -2%ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม) จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเป็นอย่างมากเนื่องจากตัวอย่างยังมีความทึบน้ำน้อยจากการเกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์ไม่เต็มที่ น้ำจึงแทรกเข้าตัวอย่างได้ง่ายกว่า แต่ในกรณีที่ตัวอย่างมีความชื้นเพิ่มขึ้นแนวโน้มจะมีความทึบน้ำมากขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกำลังเกิดขึ้นมากทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่แช่น้ำเท่ากับ 12.1 ถึง 47.4% ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณความชื้นจากผลของปริมาณซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (ไม่แช่น้ำและแช่ตัวอย่างก่อนทดสอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง)

#### 4.3 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์จากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตและพลวัต

สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณความชื้นจากผลของปริมาณซีเมนต์จากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตและแบบพลวัตที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ได้ดังรูปที่ 13 จากการเตรียมตัวอย่างแบบพลวัตพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นเข้าใกล้ -2%ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งความสัมพันธ์มีแนวโน้มคล้ายผลจากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิต และเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดจากการเตรียมตัวอย่างแบบพลวัตเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 21.87% จากค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมแบบสถิต



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณความชื้นจากผลของปริมาณซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน จากการเตรียมตัวอย่าง (ก) แบบสถิต (ข) แบบพลวัต

4.4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตและพลวัต

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดจากการเตรียมตัวอย่างแบบพลวัตนั้นมีค่าที่น้อยกว่าจึงได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นหลังจากการบ่ม 7 วัน และทำการแช่ตัวอย่างในน้ำต่ออีก 2 ชั่วโมง แสดงข้อมูลดังตารางที่ 2 จากการเตรียมตัวอย่าง พบว่าความชื้นสุดท้ายลดลงตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นและความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างที่เตรียมแบบพลวัตนั้นมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่เตรียมแบบสถิตประมาณ 0.86% ที่ความชื้นเท่ากับ -2%ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างที่เตรียมแบบพลวัตนั้นมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่เตรียมแบบสถิตประมาณ 0.77% ที่ความชื้นเท่ากับ +2%ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างต่างๆ กันทำให้ความชื้นในดินลมหอบผสมซีเมนต์จากการเตรียมตัวอย่างแบบพลวัตเพิ่มขึ้นดังแสดงดังรูปที่ 14

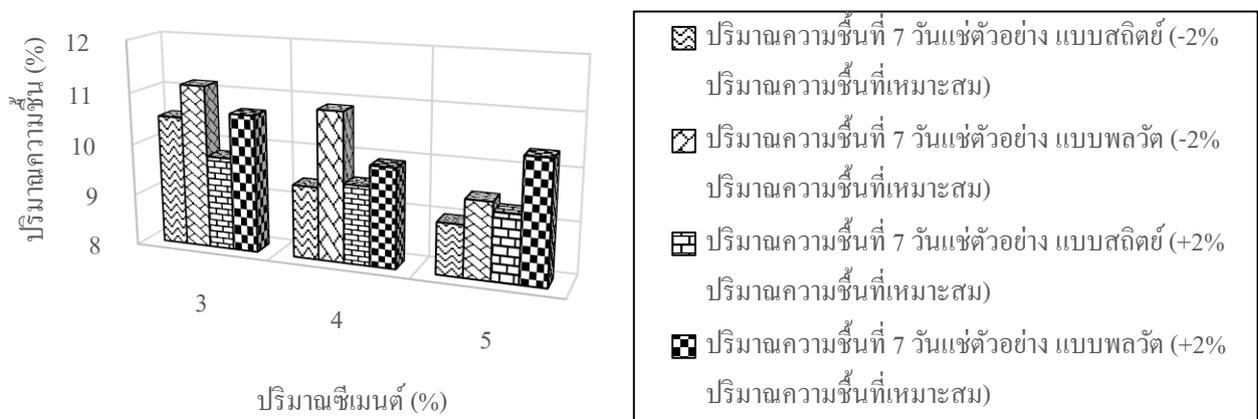
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลความชื้นก่อนแช่น้ำและหลังแช่น้ำจากการเตรียมตัวอย่างแบบสถิตและพลวัต

ประเภท	ปริมาณความชื้น	$m_0$ (%) (สถิต)	$m_0$ (%) (พลวัต)	$m_7$ (%) (สถิต)	$m_7$ (%) (พลวัต)	$m_{7\text{ Soaked}}$ (%) (สถิต)	$m_{7\text{ Soaked}}$ (%) (พลวัต)	เปอร์เซ็นต์การบดอัด (พลวัต)
3%ซีเมนต์	-2%ปริมาณ	6.54	6.24	6.19	6.16	10.51	11.15	97.49
4%ซีเมนต์	ความชื้นที่เหมาะสม	6.28	6.08	6.11	6.00	9.41	10.87	95.87
5%ซีเมนต์		6.16	5.79	5.90	5.70	8.99	9.47	96.64
3%ซีเมนต์	+2%ปริมาณ	10.18	10.35	9.75	10.20	9.8	10.66	97.10
4%ซีเมนต์	ความชื้นที่เหมาะสม	10.47	9.75	9.38	9.50	9.52	9.92	98.99
5%ซีเมนต์		10.27	9.82	9.25	9.70	9.29	10.35	96.44

โดยที่:  $m_0$  คือ ปริมาณความชื้นตอนเตรียมตัวอย่าง

$m_7$  คือ ปริมาณความชื้นหลังระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน

$m_{7\text{ soaked}}$  คือ ปริมาณความชื้นหลังแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ของตัวอย่างที่บ่ม 7 วัน



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสุดท้ายต่อปริมาณซีเมนต์จากการเตรียมตัวอย่างแบบสติกและแบบพลาสติก ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ -2% ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และ +2% ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

## 5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงระยะเวลา 7 วันแรก และหลังจากนั้นอัตราการเพิ่มจะลดลง และช่วงระยะเวลาบ่ม 7 วัน แนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ระยะบ่ม 14 ถึง 28 วันค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจนเมื่อปริมาณความชื้นเข้าใกล้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม หลังจากนั้นค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น คือปริมาณความชื้นมากกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมปริมาณน้ำที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด ในช่วงระยะเวลาบ่ม 7 วัน คือปริมาณน้ำที่น้อยกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพราะเพียงพอต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปริมาณน้ำที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดใน ช่วงระยะเวลาบ่มที่ 28 วันคือปริมาณน้ำที่อยู่ในช่วงปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เนื่องจากปริมาณความชื้นน้อยจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยเนื่องจากน้ำที่เข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมีไม่เพียงพอและผลของน้ำทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่แช่มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่แช่น้ำจากการเตรียมตัวอย่างแบบสติก และค่ากำลังรับแรงอัดจากการเตรียมตัวอย่างแบบพลาสติกมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่เตรียมแบบสติกเนื่องจากปริมาณน้ำหลังการแช่ตัวอย่างเข้าซึมเข้าไปในตัวอย่างมากทำให้มีผลต่อโครงสร้างดินลมหอบผสมซีเมนต์ทำให้สูญเสียค่ากำลังรับน้ำหนักและประสิทธิภาพในการผสม และสรุปส่วนผสมของตัวอย่างที่ผ่าน [6] มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์กรมทางหลวงจากการเตรียมตัวแบบสติกและพลาสติกคือปริมาณซีเมนต์ที่มากกว่า 5% ซีเมนต์ของน้ำหนักดินแห้ง โดยใช้ปริมาณน้ำที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและ -1 ถึง -2 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมโดยจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มากกว่า 1724 กิโลพาสคัล หรือ 175.74 ตันต่อตารางเมตร

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณท่านหัวหน้าสาขาวิศวกรรมโยธา ที่ให้การอนุเคราะห์สถานที่ใช้ในงานวิจัยและเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการสาขาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ รวมถึงการอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ และขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับทุนอุดหนุนในงานวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] วิวรรณ วงศ์วานศิริสุข. การปรับปรุงคุณภาพมวลรวมดินด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานเปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี/กรุงเทพฯ, 2546.
- [2] สนธยา แพทย์ โนนทัย, *กำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548.
- [3] Daniel Ribeiro, Raquel Néri and Rafaela Cardoso, *Influence of Water Content in the UCS of Soil-Cement Mixtures for Different Cement Dosages*. Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal 2 former, Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.
- [4] Gregory E. Halsted, David R. Luhr, Wayne S. Adaska, *Guide to Cement-Treated Base (CTB)*, 2006.
- [5] Horpibulsuk, S., Miura, N. and Bergado D. T., Undrained Shear Behavior of Cement Admixed Clay at High Water Content, *J Geoenviron Eng. ASCE*, 2004, Vol. 130, No. 10, pp. 1096-1105.
- [6] กรมทางหลวง, มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2556, มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (soil Cement Base), สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง มาตรฐาน ข้อกำหนดและวิธีการทดลอง กรุงเทพฯ: มปท., 2556.