

# พฤติกรรมของดินทรายที่มีขนาดละเอียด เมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์สำหรับงานทาง

## Behavior of Poorly Graded Sand Stabilized with Cement For Road Construction

วีรยา นิมอ้อย และ ศิริวิทย์ นะวะยศ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12121

### บทคัดย่อ

การปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ถูกนำมาใช้ในงานทางอย่างกว้างขวาง โดยงานวิจัยที่ผ่านมาศึกษาการผสมซีเมนต์กับดินลูกรัง (SW) และ หินคลุก (GC) เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เพราะมักจะพบดินชนิดนี้ตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาดินชนิดอื่นๆเพื่อเป็นทางเลือกในการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมของดินทรายที่มีขนาดละเอียดเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์โดยปริมาณซีเมนต์ 0%, 2%, 5% และ 8% ของน้ำหนักดินทรายแห้งพบว่าความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์แต่ปริมาณความชื้นเหมาะสมสูงสุดมีแนวโน้มลดลง สำหรับค่า UCS ของดินทรายผสมซีเมนต์เมื่อบดอัดด้านแห้งและด้านเปียก พบว่าค่า UCS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อตามอายุบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยค่า UCS ของดินทรายผสมซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นด้านแห้ง (-2% OMC) มีค่ามากกว่า ค่า UCS ของดินทรายผสมซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นด้านเปียก (+2% OMC) เช่นเดียวกับค่า CBR พบว่าที่ดินทรายผสมซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นด้านแห้งค่า CBR จะมากกว่าเมื่อบดอัดด้านเปียกเสมอ และเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นด้วย

**คำสำคัญ:** ดินทรายผสมซีเมนต์ดินทรายที่มีขนาดละเอียด การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด กำลังรับแรงเบกทาน

### Abstract

Soil cement stabilization has been widely used as subbase in highway construction. In the past researches, almost cement mixed with lateritic soil (SW) and mixed with crushed rock (GC) were studied, since these soils usually were found in natural conditions. Anyway the other soil types should be studied in order to have an alternative for using in highway construction. Therefore this research aims to study the behavior of

poorly graded sand stabilized by cement with 2%, 5% and 8% by dry weight of sand. The mixed sand cements were compacted at  $\pm 2\%$  OMC and were tested for unconfined compression test and California bearing ratio test. The test results show that the dry density of sand-cement increased with increasing of cement content but in the opposite way the optimum moisture content (OMC) decreased. It shows evidently that the UCS values increased with the increasing of cement content and curing time. The UCS values of mixed sand cement when compact at dry side ( $-2\%$  OMC) are more than that of wet side ( $+2\%$  OMC). The CBR values were also in the similar trend with UCS values. The CBR of mixed sand cement increased with the increasing of cement content.

**Keywords:** sand-cement, poorly graded sand, unconfined compression test, CBR

## 1. บทนำ

การคมนาคมขนส่งทางบกประเภทรถยนต์เป็นที่นิยมมากที่สุดเพราะเป็นการเดินทางที่สะดวกสามารถเข้าถึงได้ทุกที่และราคาประหยัด ดังนั้นถนนซึ่งใช้ในการเดินทางจึงถือได้ว่าเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกขั้นพื้นฐานภายในประเทศ รัฐบาลของแต่ละประเทศต้องจัดให้มีการสร้างถนนเพื่อเป็นเส้นทางคมนาคมเชื่อมโยงกันเป็นเครือข่ายอย่างทั่วถึงเพื่อการติดต่อ

การเพิ่มเสถียรภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการป้องกันการซังของน้ำในชั้นวัสดุชั้นทางภายใต้สภาวะการแช่น้ำ สามารถรองรับการจราจรที่หนาแน่นของถนนลาดยางได้เป็นอย่างดี โดยได้มีการศึกษาวิจัยการผสมซีเมนต์กับดินลูกรัง (SW) และหินคลุก (GC) อย่างแพร่หลาย แต่สำหรับดินทรายที่มีขนาดคละไม่ดี (Poorly Graded Sand, SP) ยังไม่มีงานวิจัยออกมาแพร่หลายมากนัก เพื่อการศึกษาพฤติกรรมของดินตามธรรมชาติซึ่งมีความ

หลากหลาย สำหรับเป็นทางเลือกในการนำวัสดุเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาพฤติกรรมของดินทรายประเภทขนาดคละกันไม่ดีเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางวิศวกรรมและเป็นทางเลือกการเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางหรือรองพื้นทางต่อไป

## 2. วัตถุประสงค์

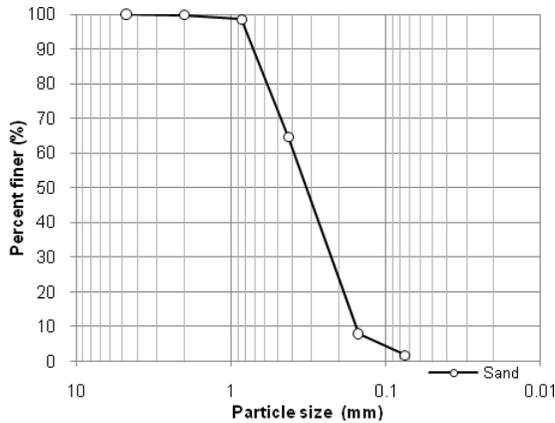
เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ อายุการบ่มที่มีผลต่อกำลังของดินทรายที่มีขนาดคละไม่ดีเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพื่อเป็นข้อมูลในการนำมาใช้งานทาง

## 3. วิธีการทำวิจัย

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นดินทรายซึ่งถูกเตรียมให้มีขนาดคละไม่ดีโดยมีขนาดเม็ดที่เท่าๆกันเพื่อให้เป็นดินขนาดคละไม่ดีประเภทขนาดเดียว (Uniform Poorly Graded, SP) ตามระบบ USCS และ

จัดเป็น A-3 (0) ตามระบบ AASHTO ซึ่งการกระจายตัวของดินทรายแสดงในรูปที่ 1 สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของดินทรายแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดคละของดินทราย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินทราย

คุณสมบัติ	ค่า
Gravel (76.2-4.75 mm), %	0
Sand (4.75-0.075 mm), %	>95
Silt & Clay (<0.002 mm), %	<5
Specific Gravity	2.65
Coefficient of Uniformity, $C_u$	<6
Coefficient of Curvature, $C_c$	1-3
Classification: USCS	SP
Classification: AASHTO	A-3(0)

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) โดยนำมาจากบริษัทผลิตปูนซีเมนต์ภายในประเทศซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับในประเทศ

### 3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรม

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติการบดอัด กำลังรับน้ำหนักของดินทรายที่มีขนาดคละไม่ผสมด้วย

ซีเมนต์ที่ 0%, 2%, 5% และ 8% โดยน้ำหนักทรายแห้ง โดยทำการทดสอบดังนี้

1) ทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของดินทรายผสมซีเมนต์ (Standard Proctor Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 698-70, D 1557-70 เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) และ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ Unconfined Compression Test และ California Bearing Ratio Test ต่อไป

2) ทดสอบ Unconfined Compression Test ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 โดยเตรียมตัวอย่างด้วยท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. สูง 9 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) บดอัดให้ได้ความหนาแน่นแห้งไม่น้อยกว่า 95% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยใช้ปริมาณความชื้นบดอัดด้านแห้ง (-2% OMC) และด้านเปียก (+2% OMC) จากผลทดสอบการบดอัดตามข้อ 1) จากนั้นห่อหุ้มด้วยถุงพลาสติกให้มิดชิดบ่มที่อายุ 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน นำตัวอย่างที่ได้มาตัดแต่งให้มีความสูง 7 ซม. เพื่อทำการทดสอบต่อไปหาค่า UCS ต่อไป

3) เตรียมตัวอย่างดินทรายผสมซีเมนต์เพื่อทดสอบ CBR แบบ Unsoaked ตามมาตรฐาน ASTM D 1883 โดยบดอัดแบบมาตรฐานที่ด้านแห้ง (-2% OMC) และด้านเปียก (+2% OMC) โดยการบดอัดจะต้องให้ได้ความหนาแน่นแห้งไม่น้อยกว่า 95% ของค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มที่อายุ 7 วันแล้วนำไปทดสอบเพื่อหาค่า CBR ต่อไป



(ก) Mold ประดิษฐ์จากท่อพีวีซี



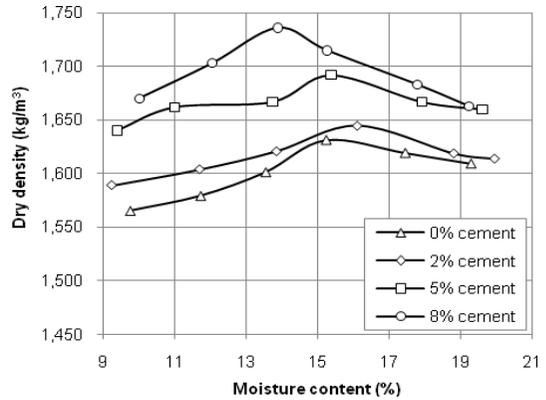
(ข) ตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัดซึ่งผ่านการบ่มแล้ว

**รูปที่ 2** การเตรียมตัวอย่างทดสอบ Unconfined Compression Test

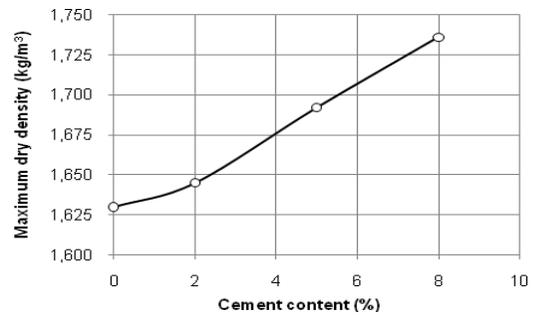
**4. ผลของการศึกษาวิจัย**

**4.1 ผลการทดสอบการบดอัดดินทรายผสมซีเมนต์**

ผลการทดสอบการบดอัดดินทรายตามมาตรฐาน ASTM D 698 โดยผสมซีเมนต์ที่ 0%, 2%, 5% และ 8% ของน้ำหนักดินแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3 จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินทรายผสมซีเมนต์นั้นบดอัดได้ดีขึ้น โดยความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่เล็กกว่าของซีเมนต์เข้าไปแทรกในอนุภาคระหว่างดินทรายที่ใหญ่กว่าจนกระทั่งอัตราส่วนช่องว่างทั้งหมดลดลงส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น [1] ดังรูปที่ 4



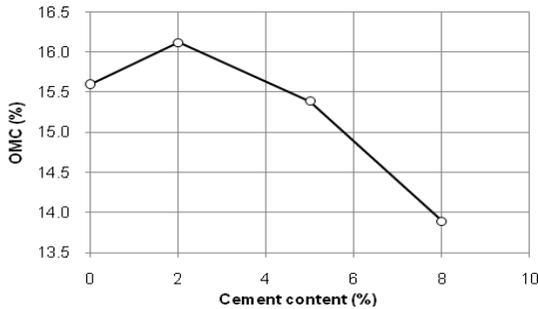
**รูปที่ 3** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งจากการบดอัด



**รูปที่ 4** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับความหนาแน่นแห้งสูงสุด

สำหรับปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณซีเมนต์เป็น 2% แต่เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 5% และ 8% พบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากว่าปริมาณซีเมนต์ 2% ยังไม่มากพอที่จะเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างเม็ดทรายทำให้ซีเมนต์เหล่านี้เกาะตามผิวของเม็ดทรายเท่านั้น ซึ่งทำให้ต้องการปริมาณความชื้นในการบดอัดมากขึ้นเพื่อประสานให้ซีเมนต์กับทรายยึดเกาะกัน เมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ให้มากขึ้น(5% และ 8%) ค่า OMC มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเป็นปริมาณซีเมนต์ที่มากพอที่จะเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างเม็ดทรายในขณะบดอัด ช่วยให้เกิดการยึดเกาะได้ดียิ่งขึ้น [2,3] ตารางที่

2 สรุปค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินทรายผสมซีเมนต์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับปริมาณความชื้น

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินทรายผสมซีเมนต์

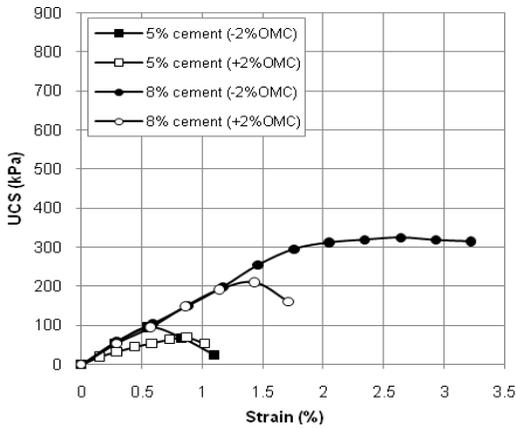
Cement (%)	OMC (%)	$\rho_{d(max)}$ ( $kg/m^3$ )
0	15.6	1,630
2	16.1	1,645
5	15.4	1,692
8	13.9	1,736

#### 4.2 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test

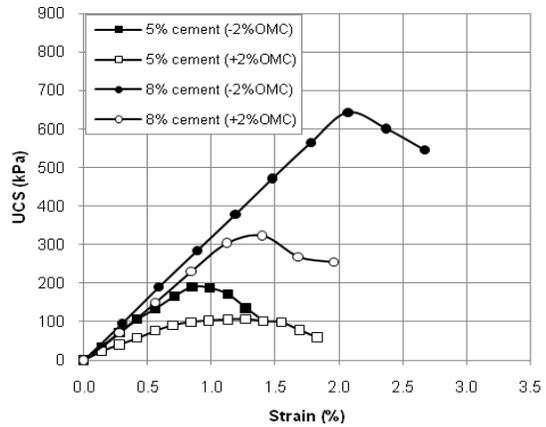
##### 1) พฤติกรรมการเสียรูปของดินซีเมนต์

พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength (UCS) และ %Strain ของทรายผสมซีเมนต์ 2%, 5% และ 8% ที่อายุบ่ม 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน ดังรูปที่ 6(ก)-6(ง) พบว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นและอายุบ่มมากขึ้น กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่าง

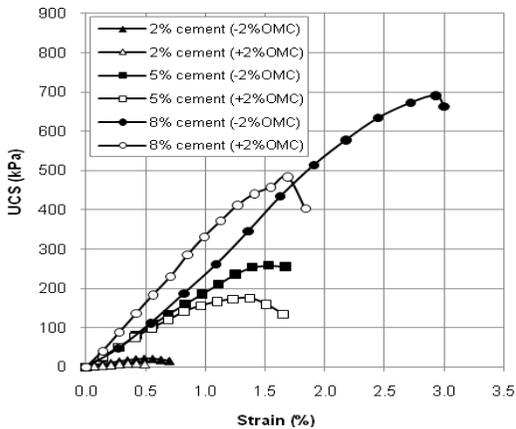
ยิ่งในกรณีที่อายุบ่ม 3 และ 7 วันของดินทรายผสมซีเมนต์ 2% พบว่าไม่สามารถรับน้ำหนักได้ เนื่องจากระยะเวลาการบ่มมีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์ช่วยให้ดินซีเมนต์เปลี่ยนสภาพจากวัสดุกึ่งอ่อน-กึ่งแข็ง (Semi-Flexible or Semi-Rigid) กลายเป็นวัสดุเปราะ (Brittle Failure) ลักษณะคือความแข็งแรง (Strength) จะลดลงอย่างทันทีทันใดเมื่อถึงจุดค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) จากนั้นค่าการเสียรูป (Strain) จึงมากตามไปด้วย ในแง่เชิงพฤติกรรมของดินซีเมนต์มี 3 ช่วง คือ Flexible, Rigid และ Failure ช่วงต้นหลังจากผสมดินและซีเมนต์แล้วเป็นพฤติกรรมแบบ Flexible เนื่องจากซีเมนต์อยู่ในช่วงการทำปฏิกิริยา Hydration กับปริมาณความชื้นยังไม่สมบูรณ์ไม่สามารถรับกำลังได้เต็มที่ เมื่อมีระยะเวลาการบ่มมากขึ้นจะเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction ดินซีเมนต์จะค่อยๆ พัฒนากำลังขึ้นเรื่อยๆ มีความแข็งแรง แต่เปราะเนื่องจากได้มีการดึงปริมาณความชื้นไปใช้ในกระบวนการทำปฏิกิริยา Hydration ประกอบกับความร้อนที่ออกมาจากกระบวนการทำปฏิกิริยา ดังกล่าวอาจส่งผลให้ปริมาณความชื้นในตัวอย่างที่เคี้ยวทำให้ดินซีเมนต์อยู่ในสภาพ Flexible กลายเป็น Rigid โดยมีความแข็งแรงมากขึ้นสามารถรับกำลังได้ดียิ่งขึ้น เมื่อปฏิกิริยาสมบูรณ์แล้วมีแรงกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เกินกำลังของดินซีเมนต์ที่จะรับได้ก็จะเกิดสถานการณ์ Failure หรือการพังทลายในที่สุด [4]



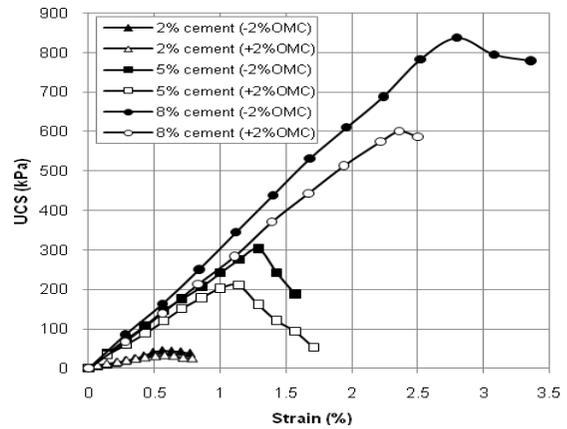
(ก) อายุบ่ม 3 วัน



(ข) อายุบ่ม 7 วัน



(ค) อายุบ่ม 14 วัน



(ง) อายุบ่ม 28 วัน

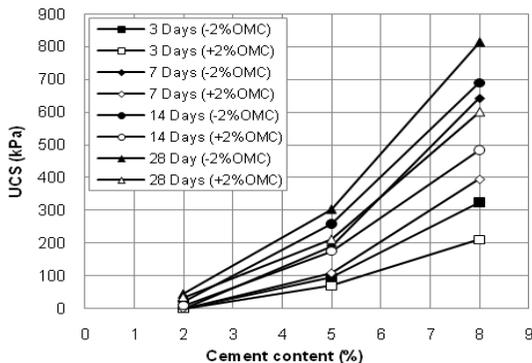
**รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง UCS กับ Strain**

2) อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มที่มีผลต่อค่า UCS

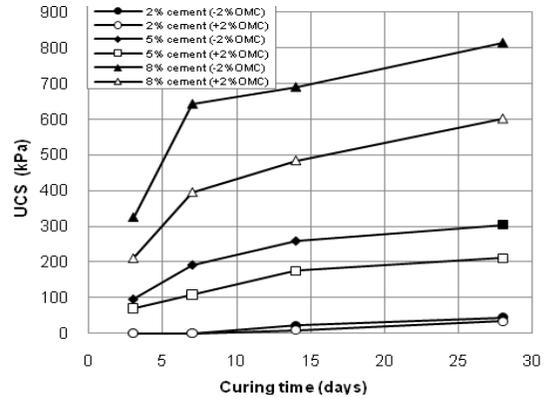
จากรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับปริมาณซีเมนต์ที่อายุบ่ม 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน และ 28 วันพบว่า ปริมาณซีเมนต์ 2% ค่า UCS มีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ปริมาณซีเมนต์ 5% ค่า UCS เริ่มมีความแตกต่างกันตามอายุบ่ม และปริมาณซีเมนต์ 8% ค่า UCS จะแตกต่างกันอย่างชัดเจนมากตามอายุการบ่ม ดังนั้นปริมาณซีเมนต์น้อยๆ (ในงานวิจัยนี้คือ 2%) ยังไม่เพียงพอต่อการ

พัฒนากำลังของดินซีเมนต์เพราะเป็นปริมาณซีเมนต์น้อยเกินไปไม่เพียงพอที่จะเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพื่อเป็นตัวเชื่อมประสานที่จะทำปฏิกิริยา Hydration อีกทั้งอายุบ่มยังไม่มากพอที่จะพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ดังกล่าว แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ให้มากขึ้นเป็น 5% และ 8% ส่งผลชัดเจนต่อการเพิ่มค่า UCS ดังแสดงในตารางที่ 3 เนื่องจากปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า UCS เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยา CSH และ CAH ดีขึ้น [5,6] อีก

ทั้งการบ่มยังช่วยพัฒนากำลังของดินซีเมนต์อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 8 จะพบว่าที่อายุบ่ม 7 วัน อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS สูงขึ้นจากอายุบ่ม 3 วันอย่างชัดเจนหลังจากนั้นที่อายุบ่ม 14 และ 28 วัน อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS ลดลง [7] โดยความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่า UCS มีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear) [3] เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นที่บดอัดพบว่าปริมาณความชื้นด้านแห้ง (-2% OMC) ของทุกปริมาณซีเมนต์จะให้ค่า UCS มากกว่าด้านเปียก (+2% OMC) เนื่องจากความหนาแน่นแห้งของปริมาณความชื้นด้านแห้งมากกว่าความหนาแน่นแห้งด้านเปียก ทั้งนี้เพราะปริมาณความชื้นและความหนาแน่นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สำหรับดินทรายควรรบอัดทางด้านแห้ง โดยให้มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าค่า OMC เล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด [8,9] ดังนั้นเมื่อปริมาณความชื้นบดอัดมากขึ้นทำให้กำลังของดินและความสามารถในการด้านการเสีรูปลดลง [10]



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับค่า UCS



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่า UCS

ตารางที่ 3 แสดงค่า UCS ตามปริมาณซีเมนต์และอายุบ่ม

Cement (%)	Condition	UCS (kPa)			
		Curing time (day)			
		3	7	14	28
2	(-2%OMC)	-	-	21.77	44.87
	(+2%OMC)	-	-	9.54	33.99
5	(-2%OMC)	95.19	191.31	258.5	303.68
	(+2%OMC)	69.81	107.93	175.32	210.88
8	(-2%OMC)	324.83	642.71	690.19	814.31
	(+2%OMC)	210.26	395.17	483.92	600.78

\*หมายเหตุ ปริมาณซีเมนต์ 2% อายุบ่ม 3 และ 7 วันไม่สามารถเตรียมตัวอย่างได้

### 3) ผลของ Water/cement ratio, w/c

จากตารางที่ 2 นำมาคำนวณหาค่า w/c ของปริมาณซีเมนต์และปริมาณความชื้นด้านเปียก และด้านแห้งดังแสดงตามตารางที่ 4 โดยพิจารณาปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ (w/c) พบว่าปริมาณซีเมนต์ 2%, 5% และ 8% ให้ค่า w/c จากมากไปหาน้อยตามลำดับ เช่นเดียวกับปริมาณความชื้นด้านแห้งและด้านเปียก ปริมาณซีเมนต์ 8% ด้านแห้งให้ค่า w/c น้อยสุดเท่ากับ 1.5 และหากพิจารณาด้านเปียกของปริมาณซีเมนต์ 8% แล้วพบว่ามีความ w/c เท่ากับ 2.0 ซึ่งน้อยกว่า w/c ของปริมาณซีเมนต์ 5% ด้านแห้งที่

เท่ากับ 2.7 ดังนั้นจากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ตามตารางที่ 3 พบว่าค่าที่ได้สอดคล้องกัน เช่นเปรียบเทียบค่า UCS ของปริมาณซีเมนต์ 8% ด้านเปียก (+2% OMC) มากกว่าค่า UCS ของปริมาณซีเมนต์ 5% ด้านแห้ง (-2% OMC) แม้ว่าปริมาณความชื้นด้านเปียกของปริมาณซีเมนต์ 8% จะมากกว่าปริมาณความชื้นด้านแห้งของปริมาณซีเมนต์ 5% แต่ค่า w/c มากกว่าดังนั้นค่า UCS จึงมากกว่า ซึ่งแสดงว่าค่า w/c ต่ำจะให้ค่ากำลังอัดที่สูง [6,10,11]

ตารางที่ 4 Water cement/ratio, w/c

Cement (%)	OMC (%)	(-2% OMC)		(+2% OMC)	
		(W%)	W/C	(W%)	W/C
0	15.6	13.6	-	17.6	-
2	16.1	14.1	7.1	18.1	9.1
5	15.4	13.4	2.7	17.4	3.5
8	13.9	11.9	1.5	15.9	2.0

#### 4.3 ผลการทดสอบ CBR แบบ Unsoaked

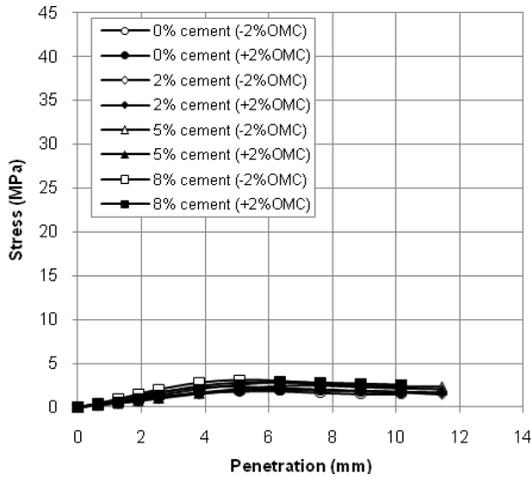
1) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะจม

จากรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะจม (Penetration) กับหน่วยแรง (Stress) ของปริมาณซีเมนต์ทั้งตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นด้านแห้ง (-2% OMC) และด้านเปียก (+2% OMC) กรณีไม่มีการบ่มจะเห็นว่าลักษณะของความสัมพันธ์ไม่แตกต่างกันในทุกปริมาณซีเมนต์ รวมถึงค่า CBR มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 16.5%–29.7% ดังแสดงในตารางที่ 5 ในขณะที่เมื่ออบบ่ม 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) พบว่าเมื่อทำการบ่มดินทรายผสมซีเมนต์แล้วจะทำให้กำลังรับแรงแบกทานเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่บ่มพิจารณาที่ปริมาณซีเมนต์ 2% ทั้งปริมาณความชื้น +2% OMC กำลังรับแรงแบก

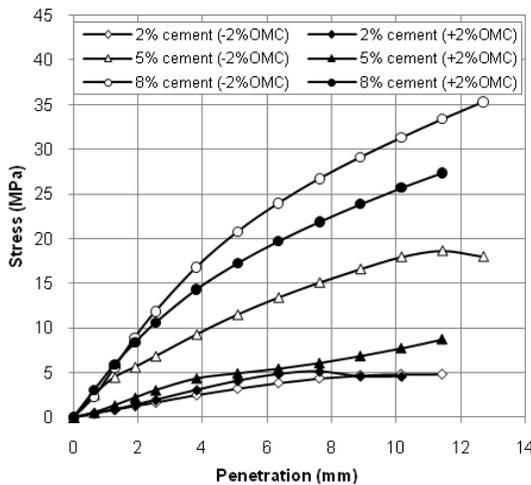
ทานจะใกล้เคียงกัน เพราะปริมาณซีเมนต์ดังกล่าวยังไม่มากพอที่จะทำให้ค่ากำลังรับแรงแบกทานเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนทันทีทันใด และปริมาณความชื้นยังไม่มีผลต่อตัวอย่างที่มีปริมาณซีเมนต์น้อยๆ แต่เมื่อเทียบกับปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นทั้ง 5% และ 8% พบว่าค่ากำลังรับแรงแบกทานดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นของดินทรายผสมซีเมนต์ 5% กับ 8% จะพบว่าค่า CBR ของดินทรายผสมซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านแห้งจะมากกว่าค่า CBR ของดินทรายผสมซีเมนต์ที่บดอัดทางด้านเปียก แสดงให้เห็นว่าการบ่มทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการเสียรูปเป็นแบบ Gradual or progressive failure [12]

ตารางที่ 5 สรุปค่าจากการทดสอบ CBR

Cement %	Condition	Dry Density kg/m <sup>3</sup>	CBR (%)	
			Curing time (day)	
			0	7
0	(-2%OMC)	1,630	17.9	-
	(+2%OMC)	1,609	16.5	-
2	(-2%OMC)	1,640	24.6	26.9
	(+2%OMC)	1,624	18.2	23.5
5	(-2%OMC)	1,659	27.0	98.6
	(+2%OMC)	1,632	20.2	43.5
8	(-2%OMC)	1,666	29.7	171.0
	(+2%OMC)	1,651	24.8	150.7



(ก) อายุบ่ม 0 วัน



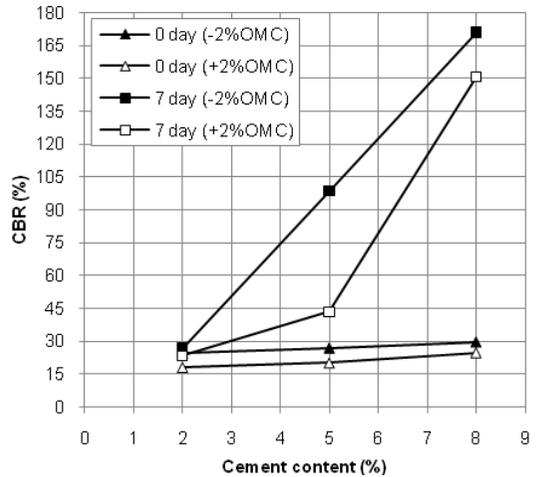
(ข) อายุบ่ม 7 วัน

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมกับหน่วยแรงจากการทดสอบ CBR

2) อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และความหนาแน่นที่มีผลต่อค่า Unsoaked CBR

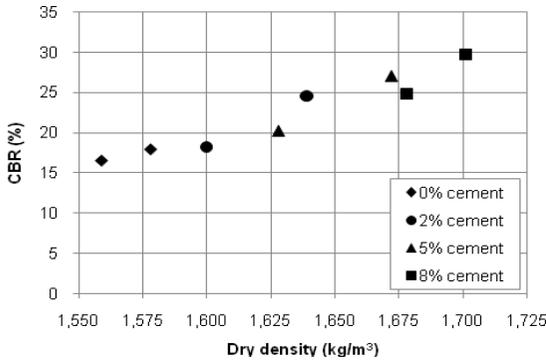
ลักษณะการพัฒนากำลังรับแรงแบกทาน (CBR) จะแปรผันตามปริมาณซีเมนต์และความหนาแน่นดังแสดงในรูปที่ 10 ค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นและค่า CBR ด้านแห้งจะมากกว่าด้านเปียกเสมอกรณีไม่บ่มค่า CBR ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการบ่มแล้วค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้น

อย่างมาก เนื่องจากอายุบ่มช่วยพัฒนากำลังรับแรงแบกทานของดินซีเมนต์ได้ดียิ่งขึ้น โดยมีลักษณะเป็นเส้นตรง [5,13]

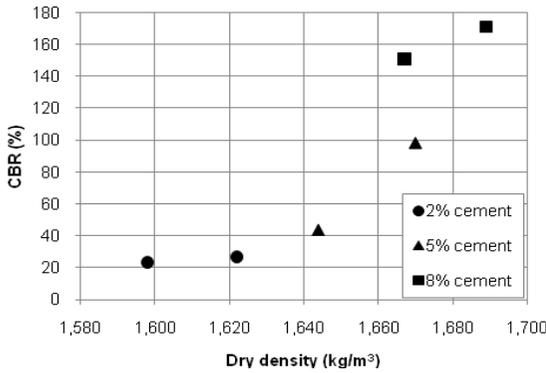


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับ CBR ที่อายุบ่ม 0 วันและ 7 วัน

รูปที่ 11 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับค่า CBR ที่อายุบ่ม 0 วัน พบว่าค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อความหนาแน่นแห้งมากขึ้น และแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้น เช่นเดียวกับที่อายุบ่ม 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 11(ข) พบว่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณซีเมนต์มีผลทำให้ค่า CBR เพิ่มขึ้น เพราะในช่วงอายุบ่มนี้ปริมาณซีเมนต์มีผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงแบกทานของดินซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นทำให้ปฏิกิริยา Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) สมบูรณ์ยิ่งขึ้น [6,14]



(ก) อายุบ่ม 0 วัน



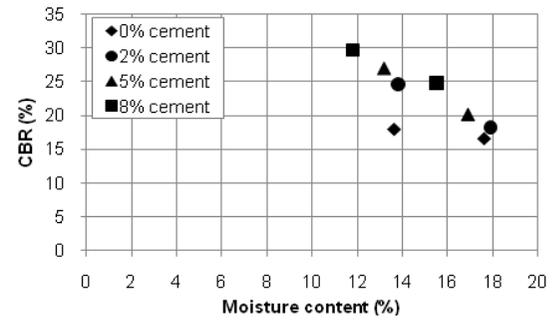
(ข) อายุบ่ม 7 วัน

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับค่า CBR

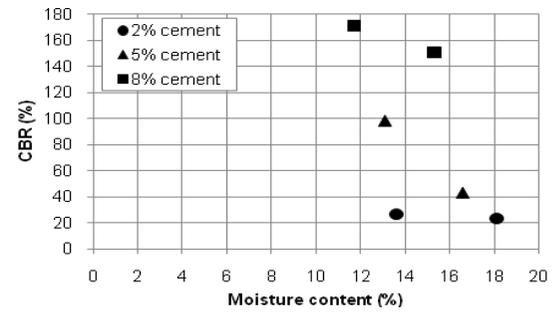
3) ผลของปริมาณความชื้นในการบดอัดต่อค่า Unsoaked CBR ของดินซีเมนต์

จากรูปที่ 12 (ก) ที่อายุบ่ม 0 วัน พบว่าปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดมากขึ้นค่า CBR มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากในช่วงนี้ยังไม่เกิดปฏิกิริยา Hydration ปริมาณความชื้นที่มากเกินไปกลายเป็นสารหล่อลื่นขณะบดอัดระหว่างอนุภาคดินซีเมนต์ไม่ทำให้แน่นขึ้น และเป็นตัวสลายสารเชื่อมระหว่างอนุภาคเม็ดดินส่งผลให้ดินซีเมนต์อยู่ในสภาวะที่อ่อนแอและรับกำลังได้น้อย ด้วยเหตุดังกล่าวนี้จึงทำให้ดินมีค่า CBR ลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น [4] ในทำนองเดียวกันที่อายุบ่ม 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 12 (ข) พบว่าปริมาณความชื้นมีผลต่อค่า CBR แต่

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังรับแรงเบกทานคือปริมาณซีเมนต์



(ก) อายุบ่ม 0 วัน



(ข) อายุบ่ม 7 วัน

รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับค่า CBR

### 5.สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพฤติกรรมของดินทรายที่มีขนาดละเอียดเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ( $\rho_{dry}$ ) ของดินทรายผสมซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น และ OMC มีค่าลดลงเนื่องจากอนุภาคที่เล็กกว่าของปูนซีเมนต์จะเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างของเม็ดดินจนกระทั่งช่องว่างทั้งหมดของดินทรายถูกเติมเต็มไปด้วยอนุภาคของซีเมนต์

2) ค่า Unconfined Compression Strength (UCS) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น และอายุ

บ่มที่มากขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่า UCS มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง แต่ในทางตรงข้าม ปริมาณความชื้นบดอัดที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า UCS ลดลง สำหรับปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในทางตามมาตรฐานรองพื้นทางดิน ซีเมนต์ของกรมทางหลวงควรใช้ปริมาณซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 8% อายุบ่ม 7 วัน บดอัดด้วยปริมาณความชื้นด้านแห้งซึ่งให้ค่า UCS ไม่น้อยกว่า 7.02 ksc (100 lb/in<sup>2</sup>) และ ค่า Unsoaked CBR ที่อายุบ่ม 7 วันพบว่า ปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ 5% ขึ้นไปบดอัดด้วยปริมาณความชื้นด้านแห้งหรือด้านเปียก ( $\pm 2\%$  OMC) มีค่า CBR มากกว่า 25% ผ่านตามมาตรฐานกรมทางหลวง ดังนั้นหากจะนำไปใช้ในทางก่อนสร้างถนนเพื่อเป็นชั้นรองพื้นแนะนำปริมาณซีเมนต์ 8% บดอัดด้านแห้งจึงจะผ่านมาตรฐานทั้งค่า UCS และ ค่า CBR ของกรมทางหลวง

3) ดินทรายที่มีขนาดคละไม่ดีเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (Poorly graded Sand, SP) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำไปใช้ในทางซึ่งหากมีการพบดินชนิดนี้ในแหล่งดิน ก็สามารถนำมาใช้ได้ ซึ่งเป็นการประหยัดค่าขนส่งดินลูกรังหรือหินคลุกจากแหล่งวัสดุที่ห่างไกลได้

#### ข้อเสนอแนะ

ควรทดสอบ CBR แบบ Soaked เพิ่มเติม และควรมีการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี SEM (Scanning Electron Microscope) หรือทดสอบวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD (X-ray Diffractometer) เพื่อหาศึกษาโครงสร้างและส่วนประกอบทางเคมีของดินซีเมนต์

## 6.กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## 7.เอกสารอ้างอิง

- [1] Lade, P.V., Liggo, C.D. and Yamamuro, J.A., Effects of Non-plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of sand, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 21, No. 4, pp. 336-347, 1998
- [2] Yoon, S. and Abu-Farakh, M., Laboratory Investigation on the Strength Characteristics of Cement-sand as Base Material, KSCE Journal of Civil Engineering, 13(1), pp. 15-22, 2009.
- [3] Al-Aghbari, M.Y. and Dutta, R.K., Suitability of Desert Sand Cement Mixes for Base Courses in Highway Pavement, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol.10, Bundle D., 2005.
- [4] ศิริศักดิ์ จินดาพล, การปรับปรุงคุณภาพของดินในสภาพแช่น้ำด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว สำหรับการก่อสร้างดินคันทางรถไฟ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2550.
- [5] สุคนธ์รัตน์ เพชรรัตน์, การต้านทานแรงเฉือนของหินฝุ่นผสมซีเมนต์โดยการทดสอบด้วยวิธี CBR, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พิษณุโลก, 6 น., 2550.

- [6] รุ่งลาวัณย์ ลาชัน, การพัฒนากำลังและลักษณะโครงสร้างจุดภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล, วิทยานิพนธ์ปริญญาคุยฎีบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 2552.
- [7] ทรงพล บุญมาดี, ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, 2529.
- [8] Felt, E.J., Factor Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures, Highway Research Board, Bulletin, 108, pp. 138-163, 1955.
- [9] Davidson, D.T., Pitre, G.L., Mateos, M. and Kalankamary, P.G., Moisture-Density, Moisture-Strength and Compaction Characteristics of Cement-Treated Soil Mixture, Highway Research Board, Bulletin, 353, pp. 42-63, 1962.
- [10] สุขสันต์ หอพิบูลสุข, ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์บดอัดสำหรับงานถนน, รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 75 น., 2548.
- [11] Horpibulsuk, S., Rachan R. and Katkan, W., Phenomenological modeling of compaction curve, Proceeding of 5th Symposium on Soil/Ground Improvement and Geosynthetics, Bangkok, Thailand, pp. 137, 2005b.
- [12] Bowles, J.E., Physical and Geotechnical Properties of Soils, 2 ed., McGraw-Hill Book Company, Singapore, 516 p., 1984.
- [13] ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และชัชวัฒน์ มนัสกุล, กำลังรับแรงอัดและกำลังแบกทานของดินทรายผสมซีเมนต์, รายงานวิจัยฉบับที่ วพ. 178, ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ, 131 น., 2543.
- [14] Moh, Z.C., Reaction Soil Mineral with Cement and Chemical, Highway Research Board, Record, No.86, pp.39-61, 1965.