

# การวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินลูกรังบดอัดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อรุณเดช บุญสูง\*

## บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นกรนำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินลูกรังที่ใช้ปริมาณน้ำในการบดอัดที่แตกต่างกันภายใต้น้ำหนักบรรทุกโดยระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ผลจากการศึกษาพบว่าดินลูกรังที่ใช้มีปริมาณธาตุประกอบในรูปของออกไซด์ได้แก่ อลูมิเนียม ( $Al_2O_3$ ) ซิลิกา ( $SiO_2$ ) โพแทสเซียม ( $K_2O$ ) ไทเทเนียม ( $TiO_2$ ) แมงกานีส ( $Mn_2O_3$ ) และ เหล็ก ( $Fe_2O_3$ ) โดยโครงสร้างทางจุลภาคของเม็ดดินมีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยมและเรียงตัวเป็นชั้นๆ จากภายใน โดยสามารถจำแนกได้เป็นดินประเภท SP และ A-2-7 ด้วยระบบ USCS และ ASSHTO ตามลำดับ จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดส่งผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักโดยตรง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการลดหรือเพิ่มปริมาณน้ำจะทำให้แรงตึงผิวระหว่างเม็ดดิน (Surface Tension) เกิดการเปลี่ยนแปลงและส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเคลื่อนตัวเข้าหากันของเม็ดดิน ผลจากการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินลูกรังบดอัดด้วย Finite Element Method พบว่า กลไกการรับน้ำหนักจนถึงจุดวิบัติของมวลดินประกอบไปด้วย 3 ระดับได้แก่ สถานะเริ่มต้น (Initial State) สถานะส่งถ่าย (Transfer State) และสถานะวิกฤติ (Critical State) โดยกำลังต้านทานการรับน้ำหนักจะเกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน (Friction) ที่จุดสัมผัส (Contact Surface) ร่วมกับแรงตึงผิว (Surface Tension) เนื่องจากปฏิกิริยาแคพิลลารี (Capillary Attraction)

**คำสำคัญ :** ดินลูกรังบดอัด, กำลังรับแรงอัดแกนเดียว, ไฟไนต์เอลิเมนต์

## **Analysis of Strength Behavior of Compacted Laterite Soil with Finite Element Method**

**Aroondet Boonsung\***

### **Abstract**

This paper presents the result of strength behavior of laterite soil compacted with differential water content and the compacted soil were analyzed by Finite Element Method. The results show that the soil are composed of Oxides of Alumina( $Al_2O_3$ ), Silica( $SiO_2$ ), Potassium( $K_2O$ ), Titanium( $TiO_2$ ), Magnesium( $Mn_2O_3$ ) and Iron ( $Fe_2O_3$ ). The micro structure of the soil is angular shape and dispersed layer within the soil can be classified as SP and A - 2 - 7 with the USCS and ASSHTO system respectively. The results of unconfined compression test show that the variation of water content used for compaction have directly affect to the soil strength as a result of the increase or decrease of water content changes the surface tension within soil mass and the ability of soil grains movement. The results of analysis of strength behavior of compacted laterite soil with finite element method show that the mechanism of soil strength related to 3 states until the soil mass failure. Such a mechanism, which caused internal friction at contact surface within soil grains work together with surface tension from capillary attraction.

**Keywords :** Compacted lateritic soil, Unconfined Compressive Strength, Finite Element

---

Department of Civil and Design, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University.

\* Corresponding author, E-mail: A.boonsung9@Gmail.com Received 4 September 2015, Accepted 14 March 2016

**1. บทนำ**

ดินลูกรัง (Lateritic Soil) เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่มากและราคาถูกจัดอยู่ในดินประเภท skeletal soil คือมีเศษหินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรหรือใหญ่กว่าอยู่ในดินมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 35 ปริมาตรซึ่งเป็นได้ทั้งดินทราย (Sandy – Skeletal) ดินร่วน (Loamy – Skeletal) และดินเหนียว (Clay – Skeletal) เกิดได้ทุกสภาพพื้นที่ โดยรูปที่ 1 แสดงลักษณะการเรียงตัวของชั้นดินลูกรังในสภาพธรรมชาติ ซึ่งจะมีการปะปนออกไซด์ของเหล็กในมวลดินที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระดับการทำปฏิกิริยา (Degree of Reaction) ระหว่างน้ำและแร่เหล็กในมวลดิน ในประเทศไทยมีแหล่งดินลูกรังมากถึง 68,765 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 13.4 ของพื้นที่ประเทศ [1]



รูปที่ 1 ลักษณะชั้นดินลูกรังในสภาพธรรมชาติ

ดินลูกรังถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมหลากหลายรูปแบบเช่น โครงสร้างก่อสร้าง ถนน เขื่อน หรือ งานดินถมเพื่อเป็นฐานรากรองรับน้ำหนักสิ่งปลูกสร้างเป็นต้น แต่ก่อนที่ดินลูกรังจะมีคุณสมบัติเช่นนั้นจำเป็นจะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วย

วิธีการทางกล (Mechanical Method) โดยมีน้ำทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) เคลือบที่ผิวของเม็ดดินทำให้เม็ดดินเคลื่อนที่เข้าหากันได้ง่ายปริมาณช่องว่างในมวลดินลดลง ความแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มวลดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ลดการอัดตัวได้ และลดความชื้นได้ของน้ำผ่านมวลดินได้เป็นต้น [2-3] แต่ในทางกลับกันหากปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดมีมากกว่าความต้องการน้ำจะเข้าไปแทนที่เม็ดดินและทำให้มวลดินมีหน่วยน้ำหนักที่ลดลงโดยจะส่งผลเสียต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยคุณภาพในการบดอัดนั้นจะอยู่ในรูปของหน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry Unit Weight,  $\gamma_d$ ) ดังนั้น จะพบว่าในทางปฏิบัติการควบคุมงานก่อสร้างประเภทนี้จึงมักกำหนดให้ใช้ค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) และปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Moisture Content) ที่ได้ผลจากการทดสอบการบดอัด (Compaction Test) ในห้องปฏิบัติการเป็นค่าควบคุมการทำงาน

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมมารับน้ำหนักของมวลดินลูกรังที่บดอัดด้วยปริมาณน้ำ (Water Content) ที่แตกต่างกันอันนำไปสู่ความรู้ ความเข้าใจที่ดีในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านธรณีเทคนิควิศวกรรมของดินลูกรังบดอัดต่อไป

**2. วัสดุและวิธีการศึกษา**

**2.1 การเตรียมวัสดุ**

ดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษาจะถูกนำมาผสมเพื่อให้ความเป็นเนื้อเดียวกัน โดยกองให้เป็นรูปกรวยก่อนทำการแบ่งออกเป็น 4 ส่วน (Quartering) แล้วนำสองส่วนที่อยู่ตรงข้ามมารวมกัน ส่วนที่เหลือให้แยกออกไว้แล้วคลุกดินลูกรังให้เข้ากันอีกครั้งเพื่อให้องค์ประกอบต่างๆ

ของดินลูกรังกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นจึงนำไปเก็บไว้ในถังพลาสติกเพื่อป้องกันการปนเปื้อนก่อนนำไปใช้งาน



รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างดินลูกรัง

**2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมี**

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพเพื่อให้ทราบพื้นฐานของดินลูกรัง และปริมาณธาตุองค์ประกอบจะใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X - Ray Fluorescence, XRF) ตามลำดับ

**2.3 การทดสอบคุณสมบัติทางธรณีเทคนิค**

คุณสมบัติทางธรณีเทคนิควิศวกรรมจะแยกการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือคุณสมบัติพื้นฐาน (Basic Properties) ได้แก่ ชิดจำกัดความชื้นเหลว (Consistency Limit) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) การกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Distribution) การจำแนกประเภทดิน (Soil Classification) ซึ่งจะแสดงในลักษณะค่าบ่งชี้ และคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering Properties) บางส่วนที่จำเป็นต่อการจำลองปัญหาเพื่อ

วิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกได้แก่ การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน (Standard and Modified Compaction Test) และการหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของมวลดิน แบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, Su) ใช้วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test, ASTM D2166) โดยใช้ก้อนตัวอย่างที่ได้จากการบดอัดในแบบหล่อมาตรฐานขนาด  $\varnothing 4'' \times 4.6''$  (โดยอนุโลมตามมาตรฐาน ทล - 105/2517) ซึ่งมิได้ปรับแก้อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Height -to-Diameter ratio = H/D) [4] ดังแสดงในรูปที่ 3 ด้วยร้อยละปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ -4.5, -3.0, -1.5, +1.5, +3.0 และ +4.5 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) จากผลการทดสอบการบดอัดทั้งแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน โดยก้อนตัวอย่างจะถูกหุ้มด้วยฟิล์มถนอมอาหารนาน 2 วันก่อนนำมาทดสอบ



รูปที่ 3 ก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับน้ำหนัก

**2.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมรับน้ำหนัก**

ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักของมวลดินบดอัดที่ปริมาณ

ความชื้นที่แตกต่างกันดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Static Load) ดังแบบจำลองที่แสดงในรูปที่ 4 (a) ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D จนกระทั่งมวลดินเกิดการวิบัติ ในขั้นตอนการวิเคราะห์ จะกำหนดให้มวลดินถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบ 15 Node ดังแสดงในรูปที่ 4 (b) ซึ่งประกอบด้วย 12 Stress Point และเงื่อนไขในการวิเคราะห์เป็นแบบ

Axisymmetric [5] ตัวแปรด้านกำลังมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength Parameter) ซึ่งได้จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดและมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นแบบมอร์-คูลอมป์ (Mohr – Coulomb Failure Criteria) โดยตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

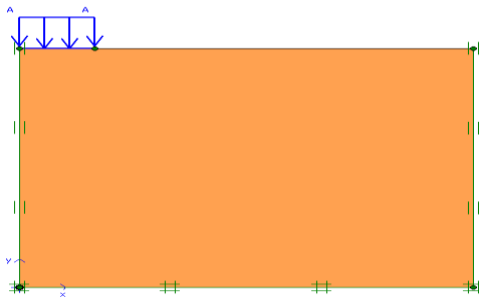
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของมวลดินบดอัดในแบบจำลอง

Parameter	Unit	Compacted Lateritic Soil						
Model	-	Mohr-Coulomb						
Type	-	Undrained						
$K_x=K_y$ **	m/day	0.001						
$V^*$	-	19.7						
<b>Moisture Content</b>		-4.5	-3.0	-1.5	OMC	+1.5	+3.0	+4.5
<b>Standard Compaction</b>								
$C_u$ ***	$kN/m^2$	158	166	172	154	176	150	145
$E$ ***	$kN/m^2$	152	143	144	129	144	79	75
$\gamma_{dry}$ ***	$kN/m^3$	15.0						
$\gamma_{wet}$	$kN/m^3$	18.0						
<b>Modified Compaction</b>								
$C_u$ ***	$kN/m^2$	348	337	320	341	287	265	238
$E$ ***	$kN/m^2$	218	261	207	217	132	130	115
$\gamma_{dry}$ ***	$kN/m^3$	16.0						
$\gamma_{wet}$	$kN/m^3$	19.0						

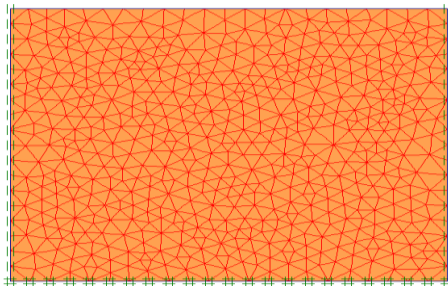
หมายเหตุ ที่มา \* Plaxis V7 Tutorial Manual [5]

\*\* Braja M.Das [6]

\*\*\* ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด



(a)



(b)

รูปที่ 4 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

### 3. ผลการศึกษา

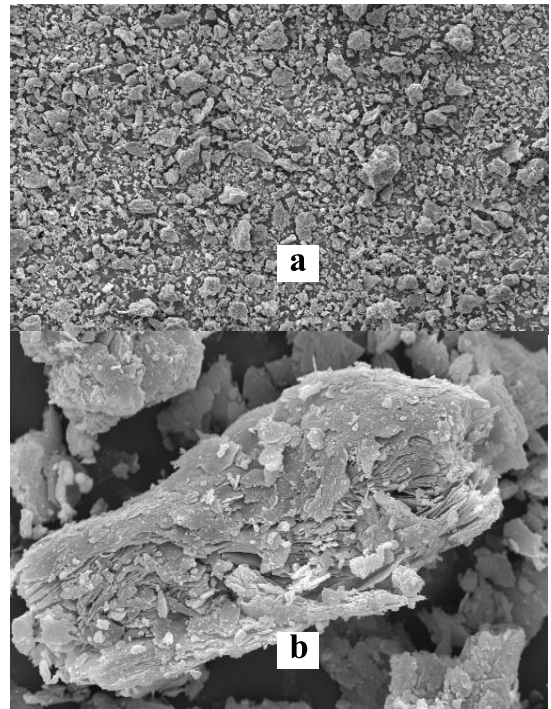
#### 3.1 คุณลักษณะทางกายและเคมี

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

Lateritic Soil Oxide Mass %					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
23.03	52.69	3.04	3.50	0.09	17.66

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษา พบว่า มีปริมาณธาตุประกอบในรูปของออกไซด์ได้แก่ อลูมิเนียม (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) โพแทสเซียม (K<sub>2</sub>O) ไทเทเนียม (TiO<sub>2</sub>) แมงกานีส (Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ เหล็ก (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ร้อยละ 23.03, 52.69, 3.04, 3.50, 0.09 และ 17.66 ตามลำดับ โดยออกไซด์ของเหล็กส่งผลให้ดินมีสีน้ำตาลแดงและมีสี

ขาวปะปนซึ่งเป็นผลมาจากออกไซด์ของแมงกานีส แมงกานีส และ โพแทสเซียม [7]

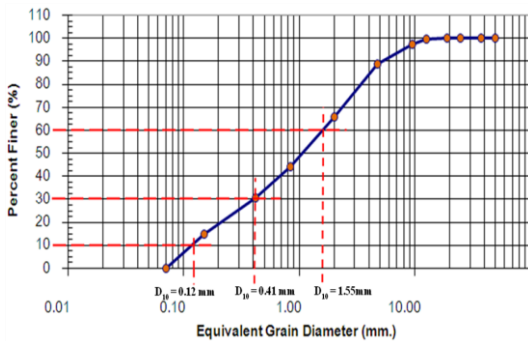


รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 5 (a) และ (b) ยังแสดงให้เห็นว่าเม็ดดินมีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยมซึ่งเป็นส่วนที่เกิดจากการแตกสลายของส่วนหยาบโดยมีขนาดของเม็ดดินอยู่ในช่วง 2 – 32 ไมโครเมตร และเมื่อพิจารณาโครงสร้างของเม็ดดินที่กำลังขยายเท่ากับ 500 เท่าพบว่าอนุภาคของเม็ดดินมีการเรียงตัวเป็นแผ่นบางเป็นชั้นๆ จากภายในซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ามวลดินลูกรังนี้มีระดับการย่อยสลายที่ค่อนข้างสูงโดยสามารถมีขนาดที่เล็กลงได้อันเนื่องจากการแตกหักของเม็ดดินจากกระบวนการทางกล (Mechanical Process)

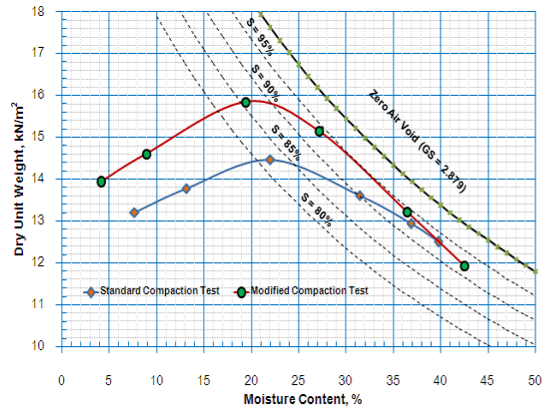
### 3.2 คุณสมบัติพื้นฐานและการบดอัด

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแสดงให้เห็นว่าดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษามีส่วนเม็ดละเอียดปนอยู่ในระดับต่ำมีความเหนียว (Plasticity) อยู่ในระดับปานกลางโดยมีค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plastic Index) อยู่ในช่วง 10 – 20% มีค่าต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินที่ขีดจำกัดพลาสติก (TI) เท่ากับ 1.003 นอกจากนี้ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะและค่าดัชนีความชื้นหลายยังบ่งชี้ให้เห็นว่ามวลดินมีองค์ประกอบของแร่ดินเหนียว (Clay Mineral) กลุ่ม Kaolinite เป็นหลัก [8]



รูปที่ 6 การกระจายตัวของดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบการกระจายตัวของเม็ดดินพบว่ามีความ  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ , และ  $D_{60}$  เท่ากับ 0.12, 0.41 และ 1.55 mm โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Coefficient of Uniformity,  $C_u$ ) และความโค้ง (Coefficient of Curvature,  $C_c$ ) เท่ากับ 12.917 และ 0.946 ตามลำดับ เมื่อจำแนกประเภทดินด้วยระบบ USCS และ AASHTO แสดงให้เห็นว่าอยู่ในกลุ่ม SP ก่อนมาทาง SW และ A – 2 – 7 ตามลำดับ ซึ่งเป็นดินที่ส่วนประกอบของ ดินเหนียว ตะกอนทราย ทราย และกรวดในระดับที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 7 ผลการทดสอบการบดอัดดินลูกรัง

ผลการทดสอบการบดอัดแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่จุดยอดกราฟเพียง 1 จุดซึ่งเป็นคุณลักษณะของดินทรายปนดินเม็ดละเอียด (Sand with Plastic Fine) ที่มีขีดจำกัดเหลวอยู่ในช่วงร้อยละ 30 – 70 [9-10] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในการบดอัดจะทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากน้ำจะไปลดแรงดึงดูดที่ต้านทานพลังงานในการบดอัดและทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น [11-13] และเมื่อใช้พลังงานในการบดอัดที่สูงขึ้นจะทำให้มวลดินเกิดการเกาะรวมตัวเป็นก้อนในระดับที่น้อยลงทำให้เม็ดดินสามารถเคลื่อนตัวเข้าหากันได้มากขึ้น [14] โดยผลการทดสอบพบว่ามีความหนาแน่นแห้ง (Dry Unit Weight,  $\gamma_d$ ) เท่ากับ 14.47 kN/m<sup>3</sup> และ 15.90 kN/m<sup>3</sup> ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) ในการบดอัดเท่ากับร้อยละ 22.04 และ 20.50 ที่ระดับความอึดตัวเท่ากับร้อยละ 82 และ 86 จากการทดสอบการบดอัด ด้วยวิธีแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐานตามลำดับโดยผลการทดสอบทั้งหมดแสดงไว้ดังตารางที่ 3

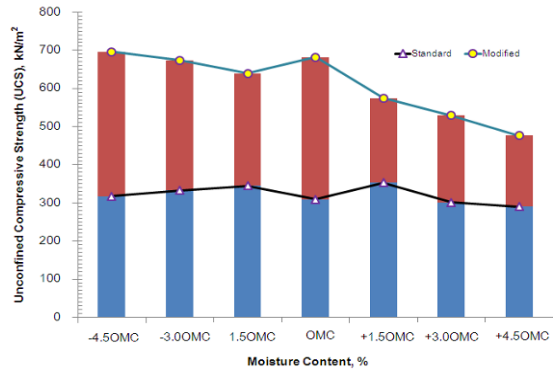
**ตารางที่ 3** ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

Properties	Values
Specific Gravity, GS	2.879
Liquid Limit, LL	51.0 %
Plastic Limit, PL	32.0 %
Plastic Index, PI	19.0 %
Flow Index, FI	17.9
Toughness Index, TI	1.003
Soil Classification	
- USCS	SP
- ASSHTO	A – 2 – 7
Standard Compaction	
$\gamma_a$	14.47 kN/m <sup>3</sup>
OMC	22.04 %
Modified Compaction	
$\gamma_a$	15.90 kN/m <sup>3</sup>
OMC	20.50 %

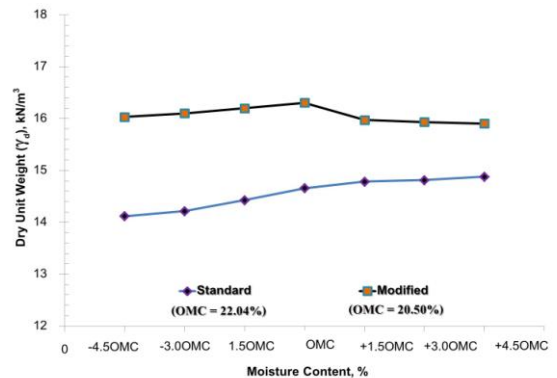
**3.3 ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว**

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดกับปริมาณความชื้นในการบดอัดที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณความชื้นในการบดอัดเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการบดอัดทางด้านข้างนั้นเม็ดดินจะมีแรงเสียดทานที่สูงทำให้สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าด้านเป็ยก [15] โดยการบดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐานจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวอยู่ในช่วง 280 – 350 kN/m<sup>2</sup> มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_{50}$ ) อยู่ในช่วง 10 – 15 kN/m<sup>2</sup> ในขณะที่แบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าอยู่ในช่วง 470 – 690 kN/m<sup>2</sup> และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_{50}$ ) อยู่ในช่วง 11 – 26 kN/m<sup>2</sup> และมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 14.12 –

14.88 kN/m<sup>3</sup> และ 15.97 – 16.31 kN/m<sup>3</sup> จากการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐานตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9



**รูปที่ 8** ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้น



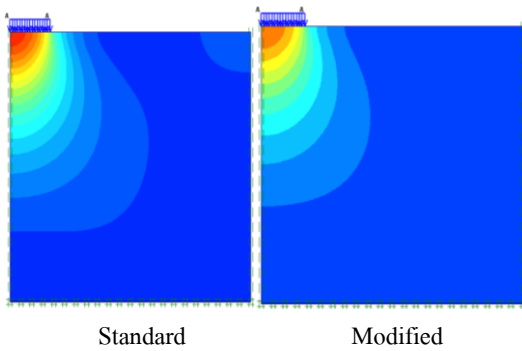
**รูปที่ 9** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้น

**3.4 พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก**

รูปที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของมวลดินบดอัดภายใต้น้ำหนักบรรทุกพบว่าในมวลดินที่มีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard) จะเกิดการเคลื่อนตัวที่



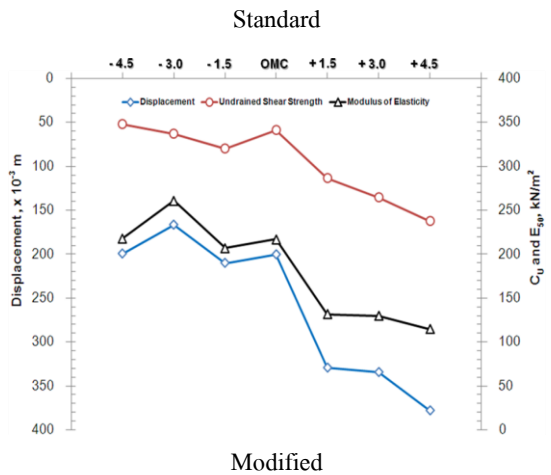
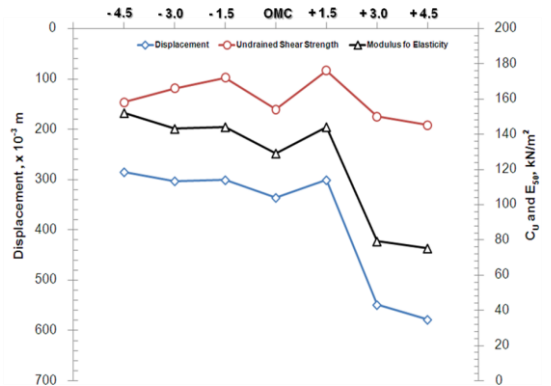
จุดวิกฤติที่แตกต่างกันตามปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด โดยที่ปริมาณน้ำเท่ากับ -4.5OMC จะเกิดในระดับที่น้อยที่สุด ส่วน OMC และ +4.5 OMC มีการขยายแนวการเคลื่อนตัวที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง  $115 \times 10^{-3} - 218 \times 10^{-3} \text{ m}$  ในกรณีบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified) นั้นการเคลื่อนตัวที่จุดวิกฤติเกิดขึ้นในระดับที่ใกล้เคียงกันที่ทุกปริมาณความชื้นในการบดอัด และโดยมีค่าอยู่ในช่วง  $75 \times 10^{-3} - 152 \times 10^{-3} \text{ m}$  จะเห็นได้ว่ามวลดินที่ถูกบดอัดด้วยวิธีแบบสูงกว่ามาตรฐานซึ่งมีพลังงานที่สูงกว่าจะทำให้ที่เงื่อนไขเริ่มต้นของเม็ดดินเกิดการอัดตัวในระดับที่สูงกว่าส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกในปริมาณที่น้อยกว่ามวลดินที่ถูกบดอัดด้วยวิธีแบบมาตรฐาน



รูปที่ 10 การเคลื่อนตัวของมวลดินที่จุดวิกฤติ

นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่าทั้งการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐานลักษณะการวิบัติของมวลดินจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องใต้น้ำหนักบรรทุกในลักษณะของกระเปาะหน่วยแรง (Stress Bulb) ตามหลักเกณฑ์ของมอร์-คูลอมป์ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของ Mohr – Coulomb Point ในขณะที่การวิบัติของมวลดินที่ขยายตัวออกไปในแนวรัศมีเกิดจากการวิบัติเนื่องจาก

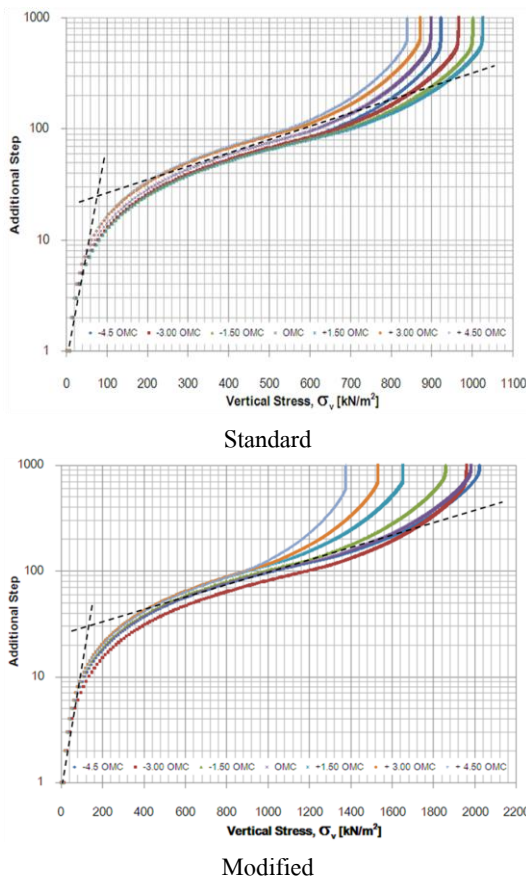
แรงดึงซึ่งเรียกว่า Tension Cut-Off Point ทำให้มวลดินนั้นเกิดการแยกตัวออกจากกัน



รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวของมวลดินภายใต้ น้ำหนักบรรทุก (Displacement) เทียบกับค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $C_u$ ) และ โมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_{50}$ )

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนและ โมดูลัสยืดหยุ่น ( $C_u$  and  $E_{50}$ ) จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดที่ปริมาณความชื้นในการบดอัดต่างๆกัน เปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) จากการวิเคราะห์ด้วย FEM

พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนและโมดูลัสยืดหยุ่นของดินบดอัดส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่ทุกปริมาณความชื้นในการบดอัด โดยการบดอัดแบบมาตรฐานจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่จุดวิกฤติในช่วงเกิดขึ้นในช่วง 0.29 m – 0.58 m ในขณะที่การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะเกิดการเคลื่อนตัวที่จุดวิกฤติในระดับที่ต่ำกว่าโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.20 m – 0.38 m



รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงในมวลดินที่จุดวิกฤติภายใต้น้ำหนักบรรทุก

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดกับหน่วยแรงในแนวตั้งที่จุดวิกฤติ

(Failure Stress) พบว่าพฤติกรรมการรับน้ำหนักของมวลดินบดอัดทั้งแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐานมีการพัฒนาความต้านทานได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (Additional Step) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 336 – 396 kN/m<sup>2</sup> และ 514 – 821 kN/m<sup>2</sup> หลังจากนั้นการพัฒนากำลังต้านทานจะมีแนวโน้มลดลง แต่ก็ยังเกิดการพัฒนากำลังต้านทานน้ำหนักบรรทุกอย่างต่อเนื่องโดยมีค่าอยู่ในช่วง 585 – 719 kN/m<sup>2</sup> และ 978 – 1,436 kN/m<sup>2</sup> และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งมวลดินเกิดการวิบัติมวลดินจะสูญเสียกำลังโดยฉับพลันที่จุดนี้หน่วยแรงจะมีค่าคงที่แม้จะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในแบบจำลอง โดยผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าหน่วยแรงที่จุดวิกฤติ (Stress at Failure,  $\sigma_p$ ) จะมีค่าอยู่ในช่วง 840 – 1,026 kN/m<sup>2</sup> และ 2,023 – 1,376 kN/m<sup>2</sup> ที่พลังงานบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐานตามลำดับเมื่อแปรผันปริมาณความชื้นในการบดอัดที่ -4.5 ถึง +4.5 ที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัด (OMC)

#### 4. อภิปรายผล

จากการวิเคราะห์ผลการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินลูกรังบดอัดจะมีลักษณะคล้ายกันแม้จะเปลี่ยนแปลงพลังงานและปริมาณความชื้นในการบดอัดโดยผู้วิจัยได้นำเสนอกลไกการรับน้ำหนักของดินลูกรังบดอัดดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งจะเกิดขึ้นใน 3 สถานะได้แก่สถานะเริ่มต้น (Initial State) สถานะส่งถ่าย (Transfer State) และสถานะวิกฤติ (Critical State) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- จุด A เมื่อดินจะจัดเรียงตัวด้วยความหนาแน่นภายใต้ปริมาณความชื้นและพลังงานที่ใช้ในการบดอัด

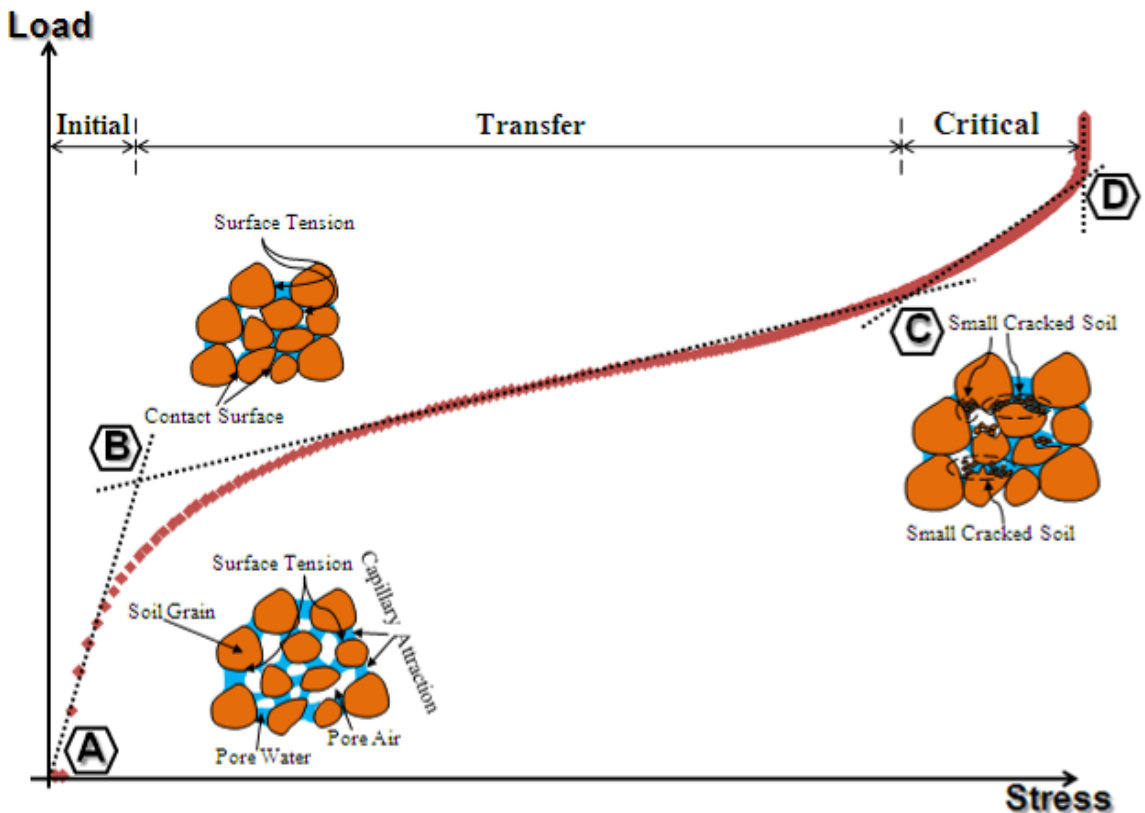
โดยพฤติกรรมการรับน้ำหนักถูกควบคุมภายใต้แรงตึงผิว (Surface Tension) เนื่องจากปฏิกิริยาแคพิลลารีจากปริมาณน้ำที่ใช้ผสม (Capillary Attraction)

- จุด B เม็ดดินเกิดการเคลื่อนตัวเข้าหากันและเกิดการพัฒนากำลังต้านทานการรับน้ำหนักเนื่องจากการเสียดทานระหว่างเม็ดดิน (Friction) ที่จุดสัมผัสระหว่างเม็ดดิน (Contact Surface) ร่วมกับแรงตึงผิว

- จุด C เม็ดดินได้รับความเค้นเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เม็ดดินบางส่วนเกิดการแตกหัก ในขณะที่เดียวกันก็เกิดการเคลื่อนตัวของมวลดินเพื่อจัดเรียงโครงสร้างให้อยู่ในสถานะสมดุลและสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้นอีกครั้งจนกระทั่ง

- จุด D ความเค้นในมวลดินถูกส่งถ่ายมายังเม็ดดินในสถานะสูงสุดจนทำให้เม็ดดินแตกออกจากกันในระดับที่เล็กมากส่งผลให้สูญเสียกำลังต้านทานทั้งจากแรงเสียดทานและแรงตึงผิวในที่สุด

ทั้งนี้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของมวลดินถูกรังบอดัดจะมีมากหรือน้อยเพียงใดนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคและระดับการแตกสลายของดินถูกรังที่นำมาใช้งานเป็นสำคัญ ดังนั้นหากมีความเข้าใจถึงอิทธิพลที่มีต่อคุณสมบัติดังกล่าวได้อย่างถูกต้องก็จะสามารถใช้งานวัสดุนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย



รูปที่ 13 กลไกการรับน้ำหนักของมวลดินถูกรังบอดัด

## 5. สรุปผล

การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของมวลดินลูกรังบดอัดด้วยปริมาณน้ำที่แตกต่างกันประกอบกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยไฟไนต์อิเลเมนต์ (Finite Element Method, FEM) สามารถสรุปประเด็นต่างๆได้ดังต่อไปนี้

1. ดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณธาตุประกอบในรูปของออกไซด์ได้แก่ อลูมิเนียม ( $Al_2O_3$ ) ซิลิกา ( $SiO_2$ ) โพแทสเซียม ( $K_2O$ ) ไทเทเนียม ( $TiO_2$ ) แมกนีเซียม ( $Mn_2O_3$ ) และ เหล็ก ( $Fe_2O_3$ ) ร้อยละ 23.03, 52.69, 3.04, 3.50, 0.09 และ 17.66 ตามลำดับ โดยโครงสร้างทางจุลภาคของเม็ดดินมีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยมที่มีการเรียงตัวเป็นแผ่นบางเป็นชั้นจากภายในซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคของเม็ดดินนี้มีระดับการย่อยสลายที่ค่อนข้างสูง

2. ดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษามีค่าดัชนีความเป็นพลาสติกอยู่ในช่วง 10 – 20% ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.879 และสามารถจำแนกดินด้วยระบบ USCS และ ASSHTO แสดงให้เห็นว่าอยู่ในกลุ่ม SP ก่อนมาทาง SW และ A – 2 – 7 ตามลำดับ ซึ่งเป็นดินที่มีส่วนประกอบของ ดินเหนียว ตะกอนทราย ทราย และกรวดในระดับที่แตกต่างกันไป

3. ผลการทดสอบการบดอัดแสดงให้เห็นว่าการบดอัดทั้งด้านแห้ง (Dry Side) และด้านเปียก (Wet Side) จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 280 – 350  $kN/m^2$  และ 470 – 690  $kN/m^2$  ด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐานตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการลด หรือ เพิ่มปริมาณความชื้นในมวลดินซึ่งจะทำให้แรงตึงผิว

ระหว่างเม็ดดิน (Surface Tension) ลดลงส่งผลให้เม็ดดินสามารถเคลื่อนตัวเข้าหากัน

4. พฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินลูกรังบดอัดจะประกอบไปด้วยกลไก 3 ระดับได้แก่ สถานะเริ่มต้น (Initial State) สถานะส่งถ่าย (Transfer State) และสถานะวิกฤติ (Critical State) โดยกำลังต้านทานการรับน้ำหนักจะเกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน (Friction) ที่จุดสัมผัส (Contact Surface) ร่วมกับแรงตึงผิวแรงตึงผิว (Surface Tension) เนื่องจากปฏิกิริยาแคพิลลารี (Capillary Attraction)

## 6. กิติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ประจำปี 2558 โดยมุ่งเน้นส่งเสริมให้คณาจารย์พัฒนาองค์ความรู้ผ่านกระบวนการวิจัย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณคณะกรรมการพิจารณาทุนทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] I. Kheoruenromne, A. Suddhiprakarn and S. Watana, “Properties and Agricultural Potential of Skeletal Soils in Southern Thailand”, Kasetart Journal (Nat. Sci.) 34, 2000, pp 52–63.
- [2] M.D. Braja, “Fundamentals of Geotechnical Engineering (2<sup>nd</sup> Eds)”, Pacific Grove, Books/ Cole-Thomson Learning, 2005.
- [3] R.H. Manfred, “Engineering Principles of Ground Modification”, Singapore, Mc-Graw-Hill Inc, 1990.

- [4] A. Boonsung, “Stabilization Industrial Waste of Kaolin for Road Material”, *KKU Engineering Journal*. 34, 2012, pp. 47-57. (in Thai)
- [5] R.B.J Brinkgreve, “PLAXIS : Finite Element Code for Soil and Rock Analyses Version 7.0 (user’s guide)”, PA Vermeer, A.A. Balkema Rotterdam, Netherland, 1999.
- [6] M.D. Braja, “Principles of Geotechnical Engineering (5<sup>th</sup> Eds)”, Pacific Grove, Books/Cole-Thomson Leaning, 2002.
- [7] N. Ngenprom and S. Rukzon, “Development Laterite Soil Cement Containing Waste Ash from Industrial and Agricultural as Brick Interface”, Research report, Rajamangala University of Technology Phra Nakhorn, Thailand. 2012.
- [8] M.D. Braja, “Foundation Engineering (5<sup>th</sup> Eds)”, Pacific Grove, Books/Cole-Thomson Leaning, 2004.
- [9] P.Y. Lee and R.J. Suedkamp, “Characteristics of Irregularly Shaped Compaction Curve of Soil”, *Highway Research Record No.381*, National Academy of Sciences. Washington D.C., 1972, pp. 1–9.
- [10] W.L. Schroeder, S.E. Dickenson, and D.C. Warrington, “Soil in Construction (5<sup>th</sup> Eds), New Jersey, Pearson Education, 2004.
- [11] R. Whitlow, “Basic Soil Mechanics (3<sup>rd</sup> Eds)”, Malaysia, Pearson Education Limited, 1995.
- [12] J.W. Hilf, “An Investigation of Pore Water Pressure in Compacted Cohesive Soil”, *Doctoral Thesis, Technical Memorandum 654*, US Bureau of Reclamation, Colorado, 1956.
- [13] C.A. Hogentogler, “Essentials of soil compaction”, In *Proceedings of the Highway Research Board*, Washington, United States of America, 1936, pp. 309-316.
- [14] T.W. Lambe and R.V. Whitman, “Soil Mechanics”, New York, John Wiley & Sons, Inc, 1969.
- [15] R.R. Proctor, “Fundamental Principle of Soil Compaction : Description of field and laboratory methods”, *Engineering New Record* 3, 1933, pp. 236–289.