

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเพื่อให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทียบเท่าหินคลุก โดยใช้ตะกรันจากกระบวนการถลุงเหล็ก

The Improvement of the Engineering Property Lateritic Soil by using Steelmaking Slag



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเพื่อให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทียบเท่าหินคลุก โดยใช้ตะกรันจากกระบวนการถลุงเหล็ก

The Improvement of the Engineering Property Lateritic Soil by using  
Steelmaking Slag



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

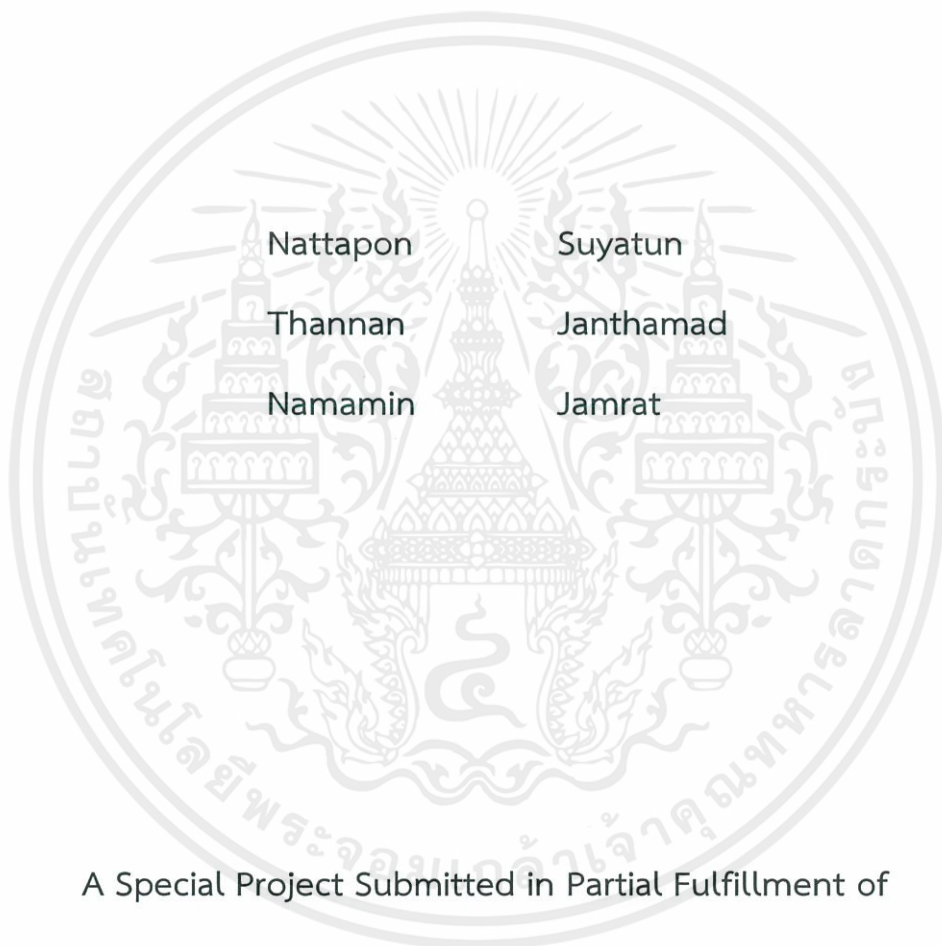
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Improvement of the Engineering Property Lateritic Soil by using Steelmaking Slag



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of

The Requirement for the Degree of

Bachelor of Civil Engineering

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเพื่อให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทียบเท่าหินคลุก โดยใช้ตะกรันจากกระบวนการถลุงเหล็ก  
The Improvement of the Engineering Property Lateritic Soil by using  
Steelmaking Slag

นักศึกษา นายณัฐพล สุยะตุ่น รหัสประจำตัว 58010415  
นายชนนัท จันทมาศ รหัสประจำตัว 58010498  
นายนวมินทร์ จำรัส รหัสประจำตัว 58010658  
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ศลิษา ไชยพุทธ

| คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ |  | ลายมือชื่อ   |
|---------------------------|--|--|
| ผศ.ดร.ธนาดล คงสมบูรณ์     |  |  |
| อ.อุษะ ศิริแก้ว           |  |  |
| ดร.ศลิษา ไชยพุทธ          |  |  |
| ดร.วิรุฬห์ คำชุม          |  |  |
| ดร.ประทีป หลือประเสริฐ    |  |  |

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(.....)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเพื่อให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทียบเท่าหิน คลุก โดยใช้ตะกรันจากกระบวนการถลุงเหล็ก

นายณัฐพล สุยะตุ่น 58010415

นายธนันท์ จันทมาศ 58010498

นายนวนินทร์ จำรัส 58010658

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ศลิษา ไชยพุทธ

ปีการศึกษา 2561

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันในประเทศไทย รัฐบาลมีโครงการก่อสร้างถนนมากขึ้น จึงทำให้มีความต้องการใช้วัสดุที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างถนนมากขึ้นเช่นกัน โดยวัสดุที่ใช้ก่อสร้างถนนนั้นก็จะมี ดินลูกรัง หินคลุก เป็นต้น วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างนี้ หินคลุก มีข้อจำกัดที่สุดทั้งในเรื่องราคาที่สูง และแหล่งที่มีจำกัดเฉพาะพื้นที่ จึงมีการนำดินลูกรังมาปรับปรุงให้สามารถใช้แทนหินคลุกได้ ทั้งนี้หลังปรับปรุงคุณสมบัติแล้ว ดินที่ปรับปรุงต้องผ่านคุณสมบัติตามมาตรฐานของกรมทางหลวงด้วย ซึ่งปัจจุบันมีวิธีการปรับปรุงแคในงานวิจัยเท่านั้น ยังไม่มีการนำมาใช้สร้างถนนจริง งานวิจัยที่กล่าวมาคือการนำซีเมนต์มาผสมกับดินแล้วทำการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติตามที่กรมทางหลวงกำหนด แต่สำหรับในการศึกษานี้จะทำการศึกษาโดยการนำตะกรันถลุงเหล็ก ประเภท EAF Slag และ LF Slag มาใช้ปรับปรุงดินลูกรังเพื่อใช้งานทดแทนหินคลุกได้ในงานก่อสร้างชั้นพื้นทาง และผ่านตามาตรฐานของกรมทางหลวง โดยจะทำการผสมตะกรันถลุงเหล็กทั้งสองชนิดด้วยอัตราส่วนต่างๆกัน จนได้อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน และจากการทดสอบได้ผลว่า สารประเภท EAF Slag ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า C.B.R. ส่วนสารประเภท LF Slag ทำให้ค่า CBR เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำดินลูกรังที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว ไปใช้เป็นวัสดุในชั้นพื้นทางแทนที่หินคลุก จะพบว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 74% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับราคาหินคลุก

# The Improvement of the Engineering Property Lateritic Soil by using Steelmaking Slag

Mr.Nattapon Suyatun Student ID. 58010415

Mr.Thananan Janthamad Student ID. 58010498

Mr.Nawamin Jumrat Student ID. 58010658

Advisor Dr.Salisa Chaiyaput

Academic Year 2018

## Abstract

In the present, there were many road construction project about road in Thailand, while a material for road construction were decreased especially crushed rock. therefore, the composite material is proposed to replace the crushed rock in the construction. Lateritic soil mix with Steelmaking Slag 2 type consist of Electric Arc Furnace (EAF Slag) and Ladle Furnace Slag (LF slag) are used to replace the crushed rock in road construction material. The properties of lateritic soil type D and type E, atterberg limit, compaction and C.B.R., comparing with the standard properties of crushed rock by department of highway. As a result, it was found that the EAF slag has no effect to the lateritic soil, but the C.B.R. value has better than the unimproved lateritic soil. The result of lateritic soil mix with LF slag can increase C.B.R. value when compare with unimproved soil. When use lateritic soil mix with LF slag can decrease cost of material 74% of crushed rock price.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร.ศลิษา ไชยพุทธ ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องอีกทั้งยังสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษากับคณะผู้จัดทำ ตลอดจนให้ความรู้ เอาใจใส่ ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา ให้ประสบการณ์ที่ดี อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับงานวิจัยนี้ พวกเราผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วง ตลอดจนอาจารย์ประจำภาควิชาท่านต่างๆที่ให้คำแนะนำและกำลังใจอย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณพี่ชยวานนท์ เขมะลิลิตและทีมงานจากบริษัท เหล็กสยามยามาโตะ จำกัด ที่สนับสนุนงานวิจัยโดยการจัดหาตะกรันถลุงเหล็กประเภท EAF Slag และ LF Slag และให้ความรู้เกี่ยวกับตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณพี่ธีรเดช คำวิล ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้ความรู้ในการทำ การทดลองต่างๆตลอดมา ทั้งยังเตรียมอุปกรณ์การทดลองให้พร้อมทำการทดลองอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างยิ่ง

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพยกย่อง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและให้กำลังใจ ในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

นายณัฐพล สุยะตุน

นายธนันท์ จันทมาศ

นายนวมินทร์ จำรัส

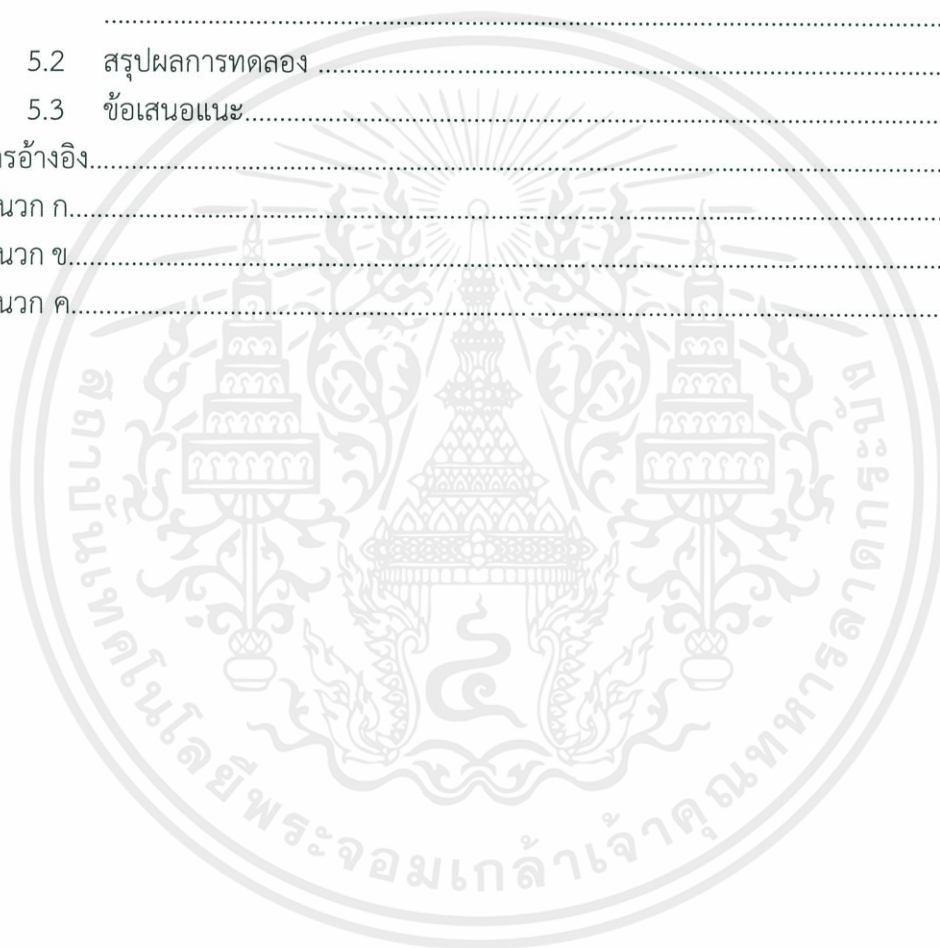
# สารบัญ

หน้า

|  |      |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | III  |
| สารบัญ.....  | IV   |
| สารบัญตาราง.....   | VI   |
| สารบัญรูป.....   | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ.....   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา.....  | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....   | 3    |
| บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....  | 4    |
| 2.1 โครงสร้างลาดยาง.....   | 4    |
| 2.2 หินคลุก.....   | 9    |
| 2.3 ดินลูกรัง.....   | 14   |
| 2.4 ตะกรันจากกระบวนการถลุงเหล็ก.....   | 20   |
| 2.5 การทดสอบ Atterberg's limit.....  | 26   |
| 2.6 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction).....  | 30   |
| 2.7 การทดสอบ California bearing ratio (C.B.R.).....  | 45   |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....   | 51   |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....   | 52   |
| 3.1 บทนำ.....  | 52   |
| 3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่าง.....   | 52   |
| 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังผสมกับตะกรันถลุงเหล็ก.....  | 72   |
| บทที่ 4 ผลการศึกษา.....  | 77   |
| 4.1 บทนำ.....  | 77   |
| 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังผสมกับตะกรันถลุงเหล็กชนิด EAF Slag<br>และ LF Slag เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ ..... | 77   |
| 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังชนิด D และ ชนิด E ที่ใช้ในการศึกษา.....   | 78   |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังชนิด D และ E ผสมกับตะกรันถลุงเหล็ก<br>ชนิด LF Slag เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม..... | 82   |
| บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....   | 91   |
| 5.1 บทนำ.....   | 91   |
| 5.2 สรุปผลการทดลอง.....   | 91   |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ.....   | 92   |
| เอกสารอ้างอิง.....  | 93   |
| ภาคผนวก ก.....  | 94   |
| ภาคผนวก ข.....  | 95   |
| ภาคผนวก ค.....  | 172  |



## สารบัญตาราง

หน้า

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| ตารางที่ 2.1  | ขนาดคละเกรดต่างๆของวัสดุชั้นรองพื้นทาง.....  | 6  |
| ตารางที่ 2.2  | แสดงเกรดของหินคลุก A และ B .....   | 8  |
| ตารางที่ 2.3  | แสดงปริมาณการผลิตหินในงานก่อสร้าง .....  | 10 |
| ตารางที่ 2.4  | แสดงปริมาณการใช้หินในงานก่อสร้าง.....  | 10 |
| ตารางที่ 2.5  | แสดงปริมาณการใช้หินในงานก่อสร้าง.....  | 10 |
| ตารางที่ 2.6  | แสดงจำนวนโรงม่หินและกำลังการผลิตแยกตามภาค.....   | 11 |
| ตารางที่ 2.7  | แสดงจำนวนและปริมาณสำรองของหินเพื่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง.....                                | 11 |
| ตารางที่ 2.8  | แสดงขนาดคละต่างๆของดินลูกรังตามมาตรฐานกรมทางหลวง.....                                    | 19 |
| ตารางที่ 2.9  | การผลิตเหล็กแต่ละชนิดในแต่ละปี.....  | 20 |
| ตารางที่ 2.10 | องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็กชนิดต่างๆ.....  | 22 |
| ตารางที่ 2.11 | ตารางเปรียบเทียบวิธี Standard Proctor Test และ Modified Proctor Test...                  | 37 |
| ตารางที่ 2.12 | แสดงความสัมพันธ์ของ % C.B.R.และการใช้งาน.....  | 46 |
| ตารางที่ 2.13 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า % C.B.R. กับการใช้งาน.....                                    | 47 |
| ตารางที่ 2.14 | แสดงค่ามาตรฐานการบดอัดตัวอย่างดินใน C.B.R. Mold.....                                     | 49 |
| ตารางที่ 4.1  | แสดงผลการทดสอบ Check Effect ของตะกรันทั้ง 2 ชนิด.....                                    | 77 |
| ตารางที่ 4.2  | แสดงการกระจายขนาดคละของเม็ดดินลูกรังชนิด D.....  | 78 |
| ตารางที่ 4.3  | แสดงการผลการทดสอบการบดอัดดินลูกรังชนิด D .....   | 80 |
| ตารางที่ 4.4  | แสดงการผลการทดสอบ C.B.R. ชนิด D.....   | 80 |
| ตารางที่ 4.5  | แสดงการกระจายขนาดคละของเม็ดดินลูกรังชนิด E.....  | 80 |
| ตารางที่ 4.6  | แสดงการผลการทดสอบการบดอัดดินลูกรังชนิด E.....  | 82 |
| ตารางที่ 4.7  | แสดงการผลการทดสอบ C.B.R. ชนิด E.....   | 82 |
| ตารางที่ 4.8  | แสดงค่าความชื้นที่เหมาะสมเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ<br>กับดินลูกรังชนิด D..... | 82 |
| ตารางที่ 4.9  | ตารางแสดงความหนาแน่นแห้งเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ<br>ของดินลูกรังชนิด D.....  | 83 |
| ตารางที่ 4.10 | ตารางแสดงค่าการบวมตัวเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ<br>ของดินลูกรังชนิด D.....     | 84 |
| ตารางที่ 4.11 | ตารางแสดงค่า C.B.R.เมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของดินลูกรังชนิด D.....           | 84 |
| ตารางที่ 4.12 | แสดงค่าความชื้นที่เหมาะสมเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆกับดินลูกรังชนิด<br>E.....  | 86 |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| ตารางที่ 4.13 | ตารางแสดงความหนาแน่นแห้งเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ<br>ของดินลูกรังชนิด E ..... | 87 |
| ตารางที่ 4.14 | ตารางแสดงค่าการบวมตัวเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของดินลูกรังชนิด<br>E.....      | 88 |
| ตารางที่ 4.15 | ตารางแสดงค่าC.B.R.เมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของดินลูกรังชนิด E....             | 88 |



## สารบัญรูป

|                | หน้า   |
|----------------|--|
| รูปภาพที่ 2.1  | การถ่ายแรงในโครงสร้างถนนลาดยาง..... 4  |
| รูปภาพที่ 2.2  | หินคลุก..... 9   |
| รูปภาพที่ 2.3  | ลักษณะของชั้นดินลูกรังที่สามารถแบ่งแยกได้อย่างชัดเจน..... 15                           |
| รูปภาพที่ 2.4  | แหล่งดินลูกรังในประเทศไทย..... 16  |
| รูปภาพที่ 2.5  | ลักษณะของดินลูกรังที่ใช้ในงานก่อสร้างถนน..... 16                                       |
| รูปภาพที่ 2.6  | กราฟแสดงการผลิตเหล็กแต่ละชนิดในแต่ละปี..... 20   |
| รูปภาพที่ 2.7  | ขั้นตอนกระบวนการถลุงเหล็ก..... 22  |
| รูปภาพที่ 2.8  | การนำตะกรันไปใช้งาน..... 23  |
| รูปภาพที่ 2.9  | การนำตะกรันเตาอุณหภูมิลดลงเหลือสำหรับดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์..... 24                |
| รูปภาพที่ 2.10 | นำกากของเสียที่ได้กลับมาใช้ในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตา Blast furnace..... 25           |
| รูปภาพที่ 2.11 | ใช้ของเสียจากกระบวนการหลอมเศษเหล็กกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในเตาอาร์คไฟฟ้า..... 26         |
| รูปภาพที่ 2.12 | ความสัมพันธ์ของปริมาตรดินกับปริมาณความชื้นและค่าความชื้นที่พิกัด Atterberg..... 27     |
| รูปภาพที่ 2.13 | การทดสอบพิกัดเหลวเมื่อดินขีดกันยาว 1.3 เซนติเมตร..... 28                               |
| รูปภาพที่ 2.14 | แสดงการหาค่าพิกัดเหลวจากกราฟ semi-log..... 28  |
| รูปภาพที่ 2.15 | แสดงปริมาตรดินและปริมาณความชื้นที่จุดพิกัดหัตถ์..... 29                                |
| รูปภาพที่ 2.16 | การบดอัดดิน..... 30  |
| รูปภาพที่ 2.17 | ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน..... 31   |
| รูปภาพที่ 2.18 | ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ..... 32 |
| รูปภาพที่ 2.19 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นนำเสนอดโดย Hogentogler..... 32  |
| รูปภาพที่ 2.20 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นนำเสนอดโดย Buchanan..... 34     |
| รูปภาพที่ 2.21 | กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอดโดย Hilf..... 35  |
| รูปภาพที่ 2.22 | ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน..... 36                                      |
| รูปภาพที่ 2.23 | เส้นโค้งการบดอัดดิน..... 38  |
| รูปภาพที่ 2.24 | เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ..... 39   |
| รูปภาพที่ 2.25 | กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน..... 40          |
| รูปภาพที่ 2.26 | อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน..... 41   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้ VIII

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| รูปภาพที่ 2.27 | อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง.....   | 42 |
| รูปภาพที่ 2.28 | การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน <i>Siburua</i> .....  | 43 |
| รูปภาพที่ 2.29 | ลักษณะการอัดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวบดอัดที่ด้านข้างและด้านเปียกของปริมาณ ความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น..... | 43 |
| รูปภาพที่ 2.30 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัด..  | 44 |
| รูปภาพที่ 2.31 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินลูกรังบดอัด.....   | 44 |
| รูปภาพที่ 2.32 | แสดงลักษณะชั้นทางของงานถนน .....   | 47 |
| รูปภาพที่ 2.33 | แสดงการ Fail ของดินใต้ Piston.....   | 48 |
| รูปภาพที่ 2.34 | แสดงการปรับแก้โค้งการทดสอบ C.B.R. ....   | 49 |
| รูปภาพที่ 2.35 | แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการบดอัดและ C.B.R.....  | 50 |
| รูปภาพที่ 2.36 | แสดงตัวอย่างค่า C.B.R. บนกราฟการบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ กัน.....  | 50 |
| รูปภาพที่ 3.1  | แสดงวัสดุและอุปกรณ์การทดสอบหาขนาดผลของดินตัวอย่าง.....   | 53 |
| รูปภาพที่ 3.2  | แสดงการชั่งตะแกรง .....  | 54 |
| รูปภาพที่ 3.3  | แสดงการใช้ค้อนยางทุบดินก้อนใหญ่ .....  | 54 |
| รูปภาพที่ 3.4  | แสดงเครื่องเขย่าดิน.....   | 55 |
| รูปภาพที่ 3.5  | แสดงการชั่งน้ำหนักของตะแกรงและดินที่ค้างบนตะแกรง .....   | 55 |
| รูปภาพที่ 3.6  | แสดงวัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ.....   | 56 |
| รูปภาพที่ 3.7  | แสดงการร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ 40.....  | 57 |
| รูปภาพที่ 3.8  | แสดงการบากโดยเครื่องมือบากให้เป็นร่องตรงกลาง .....   | 58 |
| รูปภาพที่ 3.9  | แสดงการเคาะถ้วยทองเหลือง.....  | 58 |
| รูปภาพที่ 3.10 | แสดงการบากโดยเครื่องมือบากให้เป็นร่องตรงกลาง.....  | 59 |
| รูปภาพที่ 3.11 | แสดงการผสมน้ำในดิน.....  | 59 |
| รูปภาพที่ 3.12 | แสดงการนำดินมาผึ่งให้หมาดๆแล้วนำมาปั้นคลึงเป็นแท่งยาว .....  | 60 |
| รูปภาพที่ 3.13 | แสดงวัสดุและอุปกรณ์การทดสอบการบดอัดดิน.....  | 61 |
| รูปภาพที่ 3.14 | แสดงการเตรียมตัวอย่างดิน .....   | 62 |
| รูปภาพที่ 3.15 | แสดงการร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4.....   | 62 |
| รูปภาพที่ 3.16 | แสดงการผสมดินกับน้ำ.....   | 63 |
| รูปภาพที่ 3.17 | แสดงการบดอัดดินแบบ Modified Test ทำการบดอัดชั้นละ 56 ครั้ง .....   | 63 |
| รูปภาพที่ 3.18 | แสดงการปาดดินส่วนบนของ Mold ให้อยู่ในระดับเดียวกับปากขอบ Mold.....   | 64 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปภาพที่ 3.19 แสดงการเก็บตัวอย่างดิน.....  | 64   |
| รูปภาพที่ 3.20 แสดงวัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ C.B.R.....   | 65   |
| รูปภาพที่ 3.21 แสดงการเตรียมตัวอย่างดิน.....  | 67   |
| รูปภาพที่ 3.22 แสดงการชั่งน้ำหนัก Mold.....   | 67   |
| รูปภาพที่ 3.23 แสดงการประกอบ Mold.....  | 68   |
| รูปภาพที่ 3.24 แสดงการบดอัดดิน.....   | 68   |
| รูปภาพที่ 3.25 แสดงการปาดดินส่วนที่สูงเกินขอบ Mold.....   | 69   |
| รูปภาพที่ 3.26 แสดงการชั่งน้ำหนักดินในMold.....   | 69   |
| รูปภาพที่ 3.27 แสดงการกดทดสอบตัวอย่างดิน .....  | 70   |
| รูปภาพที่ 3.28 แสดงการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำไปหา Water Content.....   | 70   |
| รูปภาพที่ 3.29 แสดงกราฟระหว่าง Test Unit Load ในแกนตั้งกับ Penetration ในแกนนอน..   | 72   |
| รูปภาพที่ 3.30 แสดงการร่อนตะกรันถลุงเหล็กผ่านตะแกรงเบอร์ 40.....  | 73   |
| รูปภาพที่ 3.31 แสดงอัตราส่วนของดินลูกรังกับตะกรันถลุงเหล็ก .....  | 73   |
| รูปภาพที่ 3.32 แสดงการเตรียมดิน.....  | 74   |
| รูปภาพที่ 3.33 แสดงการร่อนดินลูกรังที่ผสมกับ EAF Steel Slag.....  | 74   |
| รูปภาพที่ 3.34 แสดงการร่อน LF Slag.....   | 75   |
| รูปภาพที่ 3.35 แสดงการเตรียมดินลูกรังผสมกับ LF Slag ตามอัตราส่วน.....   | 75   |
| รูปภาพที่ 3.36 แสดงการบดอัดดินลูกรังผสมกับ LF Slag.....   | 76   |
| รูปภาพที่ 3.37 แสดงการทดสอบ C.B.R.ดินลูกรังผสมกับ LF Slag.....  | 76   |
| รูปภาพที่ 4.1 กราฟแสดงการกระจายขนาดคละของเม็ดดินลูกรังชนิด D.....   | 79   |
| รูปภาพที่ 4.2 แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด D.....   | 79   |
| รูปภาพที่ 4.3 กราฟแสดงการกระจายขนาดคละของเม็ดดินลูกรังชนิด E.....   | 81   |
| รูปภาพที่ 4.4 แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด E.....   | 81   |
| รูปภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์<br>ต่างๆ ของดินลูกรังชนิด D..... | 83   |
| รูปภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์<br>ต่างๆ ของดินลูกรังชนิด D.....    | 83   |
| รูปภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวกับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ<br>ของดินลูกรังชนิด D.....                  | 84   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|                |  |     |
|----------------|--|-----|
| รูปภาพที่ 4.8  | กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C.B.R.กับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ<br>ของดินลูกรังชนิด D.....                   | 85  |
| รูปภาพที่ 4.9  | แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด D ที่ผสมสาร LF Slag 7% ที่ 1..                                  | 85  |
| รูปภาพที่ 4.10 | แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด D ที่ผสมสาร LF Slag 7% ที่ 2..                                  | 86  |
| รูปภาพที่ 4.11 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับ LF Slag<br>ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของดินลูกรังชนิด E..... | 87  |
| รูปภาพที่ 4.12 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับ LF Slag<br>เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของดินลูกรังชนิด E.....       | 87  |
| รูปภาพที่ 4.13 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวกับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ<br>ของดินลูกรังชนิด E.....                 | 88  |
| รูปภาพที่ 4.14 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C.B.R.กับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ<br>ของดินลูกรังชนิด E.....                   | 89  |
| รูปภาพที่ 4.15 | แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด E ที่ผสมสาร LF Slag 9.5% ที่ 1<br>.....                         | 89  |
| รูปภาพที่ 4.16 | แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด E ที่ผสมสาร LF Slag 9.5% ที่ 2<br>.....                         | 90  |
| รูปภาพที่ ค.1  | แสดงการพิบัติของดินลูกรังประเภท D.....   | 172 |
| รูปภาพที่ ค.2  | แสดงการพิบัติของดินลูกรังประเภท D +LF Slag 5%.....   | 172 |
| รูปภาพที่ ค.3  | แสดงการพิบัติของดินลูกรังประเภท D +LF Slag 7%.....   | 173 |
| รูปภาพที่ ค.4  | แสดงการพิบัติของดินลูกรังประเภท D +LF Slag 10%.....  | 173 |
| รูปภาพที่ ค.5  | แสดงการพิบัติของดินลูกรังประเภท E.....   | 174 |
| รูปภาพที่ ค.6  | แสดงการพิบัติของดินลูกรังประเภท E +LF Slag 5%.....   | 174 |
| รูปภาพที่ ค.7  | แสดงการพิบัติของดินลูกรังประเภท E +LF Slag 10%.....  | 175 |
| รูปภาพที่ ค.8  | แสดงการพิบัติของดินลูกรังประเภท E +LF Slag 12%.....  | 175 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันรัฐบาลให้ความสำคัญต่อการพัฒนาระบบคมนาคมขนส่งในประเทศ เห็นได้จากโครงการก่อสร้างต่าง ๆ ที่ดำเนินอยู่ในปัจจุบัน อาทิ โครงการก่อสร้างรถไฟความเร็วสูง,โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าและโครงการก่อสร้างรถไฟไฟฟ้าใต้ดิน เป็นต้น ถนนจึงนับเป็นเส้นทางคมนาคมขนส่งที่มีความสำคัญ เห็นได้จากการก่อสร้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้รัฐบาลต้องใช้งบประมาณจำนวนมากในแต่ละปี เพื่อการก่อสร้างและซ่อมแซมถนน ต้นทุนในการก่อสร้างจึงเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่จะนำมาประกอบเพื่อการลงทุนในการก่อสร้าง ราคาวัสดุจึงนับได้ว่าเป็นหนึ่งปัจจัยหลัก

การเลือกวัสดุเพื่อนำมาเป็นโครงสร้างถนนโดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างชั้นพื้นทาง จัดเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักจากยานพาหนะของจราจรชั้นผิวทาง ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้นั้นจะต้องผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การทดสอบขนาดคละของดิน เช่น การทดสอบ Sieves Analysis เป็นต้น และคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น การทดสอบการบดอัดดิน การทดสอบ C.B.R และการทดสอบ Atterberg's Limit เป็นต้น การทดสอบดังกล่าวเป็นการควบคุมคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐานที่หน่วยงานรัฐหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้กำหนดไว้ โดยทั่วไปวัสดุที่มีคุณภาพดี และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นพื้นทางได้แก่ "หินคลุก" แต่พบว่าหินคลุกนั้นเป็นวัสดุหายากและมีราคาแพง นอกจากนี้ยังพบว่าในอุตสาหกรรมการผลิตหินคลุกยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำให้รัฐบาลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องออกข้อบังคับเพื่อควบคุมการระเบิดภูเขา ส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดแคลนหินคลุกที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุคัดเลือกเพื่อใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นพื้นทาง

ปัจจุบันโรงงานถลุงเหล็กได้เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในประเทศไทย และจากกระบวนการผลิตเหล็กยังก่อให้เกิดตะกรันถลุงเหล็กที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของปูนขาว ปฏิกิริยาดังกล่าวจะช่วยกำจัดสิ่งมลทินในน้ำเหล็กช่วยให้เหล็กที่ผลิตออกมามีองค์ประกอบและคุณภาพตามที่ต้องการ หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตเหล็ก ตะกรันถลุงเหล็กจะถูกกำจัดทิ้ง ทำให้หลายหน่วยงานได้พยายามนำตะกรันถลุงเหล็กมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยเฉพาะในงานทางด้านวิศวกรรม อาทิ นำมาเป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มคุณภาพของปูนซีเมนต์ หรือนำตะกรันถลุงเหล็กที่มีขนาดคละเหมาะสมมาใช้ในการปรับปรุงเพื่อความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างถนนในชั้นพื้นทาง เป็นต้น แต่ยังไม่ได้มีการศึกษาที่นำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินให้มีคุณสมบัติใช้ในโครงสร้างชั้นพื้นทางได้

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำดินลูกรัง ซึ่งเป็นดินที่พบได้ทั่วไปตามแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย เป็นดินที่มีคุณสมบัติในการบดอัดที่ดี และยังเป็นดินที่ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในโครงสร้างชั้นรองพื้นทางของงานถนน และที่สำคัญไปกว่านั้น ดินลูกรังมีราคาต่ำมากเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับราคาของหินคลุก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมด้วยตะกรันถลุงเหล็กและผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นพื้นทาง โดยมีการทดสอบการบดอัดดินและการทดสอบ C.B.R การทดสอบ Atterberg's Limit ของดินลูกรังที่ขนาดคละต่างๆ ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง และทำการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้การผสมด้วยตะกรันจากการถลุงเหล็ก เนื่องจากให้ตะกรันถลุงเหล็กทำปฏิกิริยาเชื่อมประสานเม็ดดินเม็ดละเอียดให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและมีคุณสมบัติที่เพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของถนน

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อนำดินลูกรังมาปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ตะกรันถลุงเหล็กให้มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมให้สามารถใช้งานในโครงสร้างชั้นพื้นทางเพื่อทดแทนหินคลุกได้
- 2) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่เกิดขึ้นหลังจากผสมตะกรันถลุงเหล็ก
- 3) เพื่อนำวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการถลุงเหล็กมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานดิน
- 4) เพื่อเปรียบเทียบราคาต้นทุนในการก่อสร้างชั้นพื้นทางระหว่างหินคลุกกับดินลูกรังที่ถูกปรับปรุงโดยใช้ตะกรันถลุงเหล็ก

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของดินลูกรัง
  - 1.1 การบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) ตามมาตรฐาน AASHTO T 180 เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และค่าความชื้นที่เหมาะสม
  - 1.2 การทดสอบ C.B.R (California Bearing Ratio Test) ตามมาตรฐาน AASHTO T 193 เพื่อหาค่ากำลังการรับแรงของดินตัวอย่าง
  - 1.3 บดอัดแน่นที่ความชื้นที่เหมาะสมจากการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน
  - 1.4 การทดสอบ Atterberg's Limit เพื่อหาค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plastic Index ตามมาตรฐาน AASHTO T 89 และ AASHTO T 90
- 2) ดินตัวอย่างเป็นดินลูกรังอบแห้งที่มีขนาดคละตามที่กรมทางหลวงระบุไว้ในมาตรฐาน ทล.-ม. 205 มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม
- 3) ตะกรันถลุงเหล็กที่นำมาปรับปรุงคุณภาพดิน คือตะกรันจากเตาปฏิกรณ์อาร์คไฟฟ้า (EAF Slag) และตะกรันถลุงเหล็กจากเตาอุณหเหล็ก (Ladle Furnace Slag)

- 4) โดยดินลูกรังที่นำมาทดสอบในครั้งนี้ มาจากอำเภอนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยจะนำดินนี้มาแยกขนาดเพื่อทำการคละขนาดให้ได้เกรด D และ E ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ดินลูกรังที่ผสมตะกรันถลุงเหล็กมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมเพียงพอต่อการใช้เป็นวัสดุพื้นทางได้
- 2) คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้นหลังจากผสมตะกรันถลุงเหล็ก
- 3) ราคาต้นทุนในการก่อสร้างชั้นพื้นทางด้วยดินลูกรังผสมตะกรันถลุงเหล็กมีราคาต่ำกว่าใช้หินคลุก
- 4) สามารถนำวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการถลุงเหล็กมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานดิน

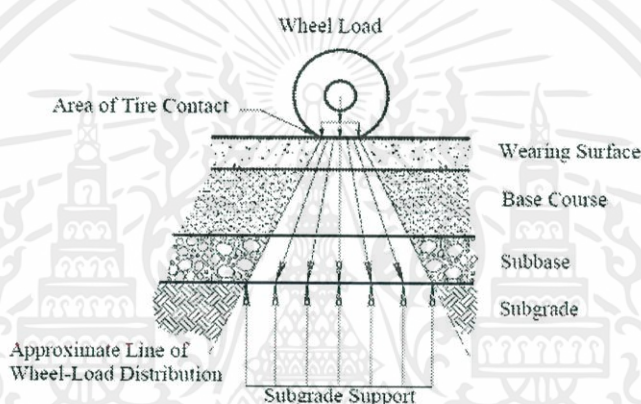


## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 โครงสร้างถนนลาดยาง (Flexible Pavement)

ถนนลาดยางเป็นถนนที่มีผิวถนนเป็นวัสดุที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ เช่น ยางมะตอย ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเมื่อได้รับแรงจากการจราจรบนท้องถนนจะเกิดการโก่งตัว โครงสร้างของถนนลาดยางนั้นมีหลากหลายวัสดุแบ่งเป็นชั้นๆ ตามความสามารถในการรับแรงที่ถ่ายจากผิวด้านบนมาในแต่ละชั้นได้ดังรูปที่ 2.1.1



รูปที่ 2.1 การถ่ายแรงในโครงสร้างถนนลาดยาง (ที่มา : The Constructor ,2017)

##### 2.1.1 ชั้นคันทาง (Subgrade Course)

เป็นวัสดุดินเดิมตามธรรมชาติที่ต้องทำการปรับปรุงดินให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้โดยการบดอัด ถ้าดินตามธรรมชาตินั้นเป็นดินที่อ่อนเกินไปไม่สามารถบดอัดได้ ก็ต้องทำการขุดดินออกและนำดินที่สามารถบดอัดได้มาแทนที่ โดยกรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานของวัสดุดินถมคันทาง (ทล.-ม. 102/2532) ไว้ดังนี้

- ค่า ซี.บี.อาร์. จากห้องทดลองไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Density) ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. (C.B.R.)
- มีค่าการบวมตัวไม่เกินกว่าร้อยละ 4 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงสุดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Density)

## 2.1.2 ชั้นวัสดุคัดเลือก (Selected Materials)

ชั้นนี้เป็นชั้นที่นำมาแทนที่ดินเดิม เนื่องจากดินเดิมมีสภาพไม่ดี ไม่สามารถบดอัดได้ (C.B.R.  $\leq$  2%) หรือใช้เสริมระหว่างวัสดุคันทางและวัสดุรองพื้นทาง หรือตามตำแหน่งอื่นๆตามที่แบบได้กำหนดไว้ โดยชั้นนี้จะแบ่งวัสดุได้เป็น 2 แบบคือชั้นวัสดุคัดเลือก ก และวัสดุคัดเลือก ข ซึ่งวัสดุคัดเลือก ก จะเป็นพวกวัสดุมวลรวมที่มีขนาดโตกว่า 50 มิลลิเมตร และวัสดุคัดเลือก ข จะเป็นวัสดุมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 50 มิลลิเมตร โดยกรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานของวัสดุคัดเลือก ก (ทล.-ม. 208/2532) และวัสดุ ข (ทล.-ม. 209/2532) ไว้ดังนี้

### 2.1.2.1 คุณสมบัติของวัสดุมวลรวมที่ใช้ทำชั้นวัสดุคัดเลือก ก.

- มีขนาดเม็ดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร และผานตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาด 0.075 มิลลิเมตร) ไม่เกิน 30 % เมื่อทำการทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผานตะแกรงแบบกลางและห้ามใช้ทรายที่มีคุณสมบัติข้อหนึ่ง ข้อใดดังต่อไปนี้
  - มีส่วนผานตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตรเกิน 80 %
  - มีส่วนผานตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร น้อยกว่า 8 % หรือเกิน 30 %
- มีค่า Liquid Limit (LL) ไม่เกิน 40 % เมื่อทดสอบตาม ทล.-ท. 102
- มีค่า Plasticity Index (PI) ไม่เกิน 20 % เมื่อทดสอบตาม ทล.-ท. 103
- มีค่า C.B.R. ไม่น้อยกว่า 10 % ที่ความหนาแน่นแห้ง 95 % ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน
- ค่าการขยายตัวเมื่อทดสอบ C.B.R. แบบแช่น้ำต้องไม่เกิน 3 % ที่ความหนาแน่นแห้ง 95 % ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน
- กรณีใช้วัสดุจำพวก Shale ต้องมีค่าเฉลี่ย Durability Index ของวัสดุทั้งชนิดเม็ดละเอียดและชนิดเม็ดหยาบจากการทดสอบหาค่า Durability ของวัสดุ จะต้องไม่น้อยกว่า 30 %
- กรณีวัสดุจำพวก Non Plastic ที่เมื่อทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุตามวิธีหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผานตะแกรงแบบกลางมีส่วนผานตะแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร เกินกว่า 90% และได้คุณภาพดังที่ข้างต้นทั้ง 6 ข้อหากนำมาใช้จะต้องทำการบดทับให้ได้ความหนาแน่นแห้งสม่ำเสมอตลอดไม่ต่ำกว่า 100% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน

### 2.1.2.2 คุณสมบัติของวัสดุมวลรวมที่ใช้ทำชั้นวัสดุคัดเลือก ข.

- มีขนาดเม็ดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร และผานตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาด 0.075 มิลลิเมตร) ไม่เกิน 35 % เมื่อทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผานตะแกรงแบบกลาง

- มีค่า C.B.R. ไม่น้อยกว่า 6 % ที่ความหนาแน่นแห้ง 95 % ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดสูงความมาตรฐาน
- ค่าการขยายตัวเมื่อทำทดลอง C.B.R. แบบแช่น้ำต้องไม่เกิน 3 % ที่ความหนาแน่นแห้ง 95 % ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดสูงความมาตรฐาน

### 2.1.3 ชั้นรองพื้นทาง (Subbase Course)

ชั้น Subbase นั้นจะถูกออกแบบให้ใช้วัสดุที่คัดสรรมาอย่างระมัดระวังเนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นดินเดิมและ Base ของพื้นถนน ความหนาของ Subbase โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 4-16 นิ้ว, และมันถูกออกแบบมาเพื่อทนต่อความจุของโครงสร้างที่ต้องการของพื้นถนน โดยกรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง (ทล.-ม. 205/2532) ไว้ดังนี้

- มีค่าความสึกหรอ เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ไม่เกินร้อยละ 60
- มีขนาดคละที่ดี และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่างต้องมีขนาดหนึ่งตามตารางที่ 2.1

| ขนาดตะแกรง<br>มิลลิเมตร | ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล |       |       |        |        |
|-------------------------|---------------------------|-------|-------|--------|--------|
|                         | A                         | B     | C     | D      | E      |
| 50                      | 100                       | 100   | -     | -      | -      |
| 25                      | -                         | -     | 100   | 100    | 100    |
| 9.5                     | 30-65                     | 40-75 | 50-85 | 60-100 | -      |
| 2                       | 15-40                     | 20-45 | 25-50 | 40-70  | 40-100 |
| 0.425                   | 8-20                      | 15-30 | 15-30 | 25-45  | 20-50  |
| 0.075                   | 2-8                       | 5-20  | 5-15  | 5-20   | 6-20   |

ตารางที่ 2.1 ขนาดคละเกรดต่างๆของวัสดุชั้นรองพื้นทาง (กรมทางหลวง, 2532)

- ปราศจากก้อนดินเหนียว (Clay Lump) Shale รากไม้หรือวัชพืชอื่นๆ
- ขนาดวัสดุใหญ่สุดไม่โตกว่า 5 เซนติเมตร
- ค่าขีดเหลว (Liquid Limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 35 ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว (Liquid Limit : L.L.)

- ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) ไม่มากกว่าร้อยละ 11 ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก (Plastic Limit : P.L.)
- ค่า C.B.R จากห้องทดลอง (Lab C.B.R.) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Density) ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่า C.B.R. หรือไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง

#### 2.1.4 ชั้นพื้นทาง (Base Course)

ชั้น Base เป็นส่วนของโครงสร้างถนนลาดยางและอยู่ใต้พื้นผิวถนนพоди หากมีชั้น Subbase ชั้น Base จะถูกสร้างเหนือชั้นนี้โดยตรง และหากไม่มีชั้น Subbase ชั้น Base จะถูกสร้างบนชั้นดินเดิม ปกติความหนาของ Base อยู่ในช่วง 4-6 นิ้วและถูกควบคุมโดยคุณสมบัติชั้นที่อยู่ข้างใต้

แรงจากการจราจรเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องบนพื้นผิว และชั้น base จะดูดซับความเค้นทุกอย่างมาจากชั้นพื้นผิวและความเครียดที่เกิดจากการโก่งตัวของชั้นพื้นผิว โดยทั่วไปชั้น base จะถูกสร้างด้วยหินคลุกบดที่ยังไม่ปรับสภาพเช่นหินบด, ตะกรัน, หรือกรวด วัสดุที่ทำ base จะมีความมั่นคงภายใต้การจราจรสูงและมีการระบายน้ำที่ดี

วัสดุชั้น Base มักจะถูกปรับสภาพด้วยปูนซีเมนต์, น้ำมันดิน, แคลเซียมคลอไรด์, โซเดียมคลอไรด์, เถ้าลอยหรือหินปูน การปรับสภาพเหล่านี้จะช่วยให้การรองรับน้ำหนักดีขึ้นสำหรับไหลค้ำน้ำหนักสูง เพิ่มความแข็งแรงเมื่อเกิดน้ำค้ำแข็ง, และทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันความชื้นระหว่างชั้น Base และชั้นพื้นผิว

กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานวัสดุรองพื้นทางที่เป็นหินคลุก (ทล.-ม. 201/2544) ไว้ดังนี้

- มีค่าความสึกหรอ เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ไม่เกินร้อยละ 40
- มีค่าส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองการหาความคงทนของมวลรวม โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ แล้วไม่เกินร้อยละ 9 ใช้มีการทดลองทุกครั้งที่น่ามาใช้
- ส่วนเม็ดละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกับกับส่วนหยาบ (Coarse Aggregate) การใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปน เพื่อปรับปรุงคุณภาพจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน
- มีขนาดคละที่ดี เมื่อทำการทดลองการหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง โดยต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามนี้

| ขนาดตะแกรง<br>มิลลิเมตร | ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล |       |
|-------------------------|---------------------------|-------|
|                         | A                         | B     |
| 50                      | 100                       | 100   |
| 25                      | -                         | 75-95 |
| 9.5                     | 30-65                     | 40-75 |
| 4.75                    | 25-55                     | 30-60 |
| 2.00                    | 15-40                     | 20-45 |
| 0.425                   | 8-20                      | 15-30 |
| 0.075                   | 2-8                       | 5-20  |

ตารางที่ 2.2 แสดงเกรดของหินคลุก A และ B (กรมทางหลวง, 2544)

- ค่าขีดเหลว (Liquid Limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 25 ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว (Liquid Limit : L.L.)
- ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) ไม่มากกว่าร้อยละ 6 ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก (Plastic Limit : P.L.)
- ค่า C.B.R. จากห้องทดลอง (Lab C.B.R.) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีต และไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางซอร์เฟสทรีตเมนต์ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Density) ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่า C.B.R.

### 2.1.5 ชั้นผิวทาง (Surface Course)

ชั้นผิวทางในถนนลาดยางนั้นวัสดุที่ใช้จะเป็นยางมะตอยผสมร้อน (Hot Mix Asphalt) ซึ่งเป็นชั้นที่สัมผัสกับล้อยานพาหนะโดยตรงจะถูกออกแบบให้ผิวขรุขระและมีความปลอดภัยในขณะเดียวกันก็มีการถ่ายโอนแรงการจราจรที่หนาแน่นผ่านชั้น base ต่างๆไปพร้อมกัน และเข้าไปในดินชั้น subgrade ที่อยู่ด้านล่าง

### 2.1.6 ค่า C.B.R. ของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

ชั้นพื้นทางหินคลุก, C.B.R.  $\geq$  80%

ชั้นรองพื้นทาง, C.B.R.  $\geq$  25%

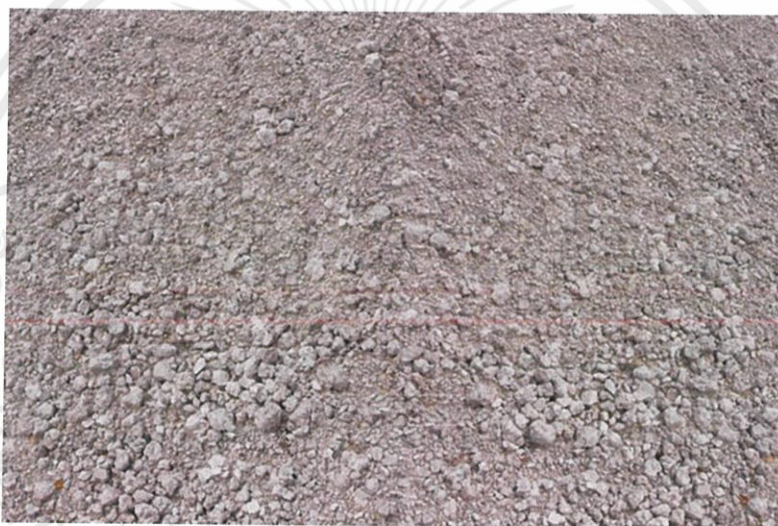
ชั้นวัสดุคัดเลือก ก, C.B.R.  $\geq$  10%

ชั้นวัสดุคัดเลือก ข, C.B.R.  $\geq$  6%

## 2.2 หินคลุก

### 2.2.1 หินคลุกในประเทศไทย

หินคลุก คือ หินที่เกิดจากการผสมระหว่างหินประเภทต่างๆส่วนมากมักใช้เป็นวัสดุสร้างชั้นรองพื้นทาง หรือใช้เป็นส่วนประกอบของถนนในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง เช่นอาจนำมาใช้เป็นผิวทางที่อยู่ส่วนบนสุดหรือใช้เป็นพื้นทางที่อยู่ใต้ผิวทาง หรือในบางกรณีอาจใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง หินที่ใช้ในงานประเภทนี้มักจะเป็นหินปูน เนื่องจากมีราคาถูก หาง่าย และยังง่ายต่อการควบคุมคุณภาพอีกด้วย ส่วนหินบะซอลต์ และ หินแกรนิต ก็มีการนำมาใช้ในงานก่อสร้างบ้าง แต่ส่วนน้อย สำหรับกระบวนการผลิตหินคลุกในประเทศไทย มีกระบวนการผลิตมาจากการระเบิดและย่อยหิน ซึ่งแหล่งที่ทำการผลิตหินนั้นก็คือโรงโม่หิน โดยโรงโม่หินมีกระจายอยู่ทั่วไปในประเทศไทย



รูปที่ 2.2 หินคลุก (ที่มา : <http://anchor-rockbm.com/our-product/>)

หินสามารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภทในงานก่อสร้าง คือ หิน 3 , หิน 2 , หิน 1 , หินเกล็ด , หอนฝุ่น , หินคลุก ซึ่งหิน1,2,หินคลุก เป็นที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป มีปริมาณการผลิตสูงที่สุด หินที่มีการผลิตรองลงมาคือหินเกล็ดและหินฝุ่น หินเกล็ดนั้นจะใช้ผสมกับแอสฟัลต์สำหรับทำผิวทางและผสมกับหินฝุ่นในการทำคอนกรีตบล็อก ส่วนหิน 3 นั้นใช้ในงานก่อสร้างจำพวก เขื่อน ทางรถไฟ เป็นต้น

### 2.2.2 ปริมาณการผลิตสำหรับงานก่อสร้าง

ในปัจจุบันการผลิตหินมีอัตราไม่คงที่ บางปีก็มีการผลิตที่เพิ่มขึ้นจากปีก่อนๆ บางปีก็มีการผลิตลดลง ซึ่งขึ้นกับปัจจัยด้านความต้องการในการก่อสร้าง แต่จากข้อมูลกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่กล่าวว่าการผลิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับปีก่อนๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณเป็นสำคัญ จากข้อมูลย้อนหลัง 4 ปีมีแนวโน้มของการผลิตทั้งลดลงและเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 2.3 แสดงจำนวนการผลิตหินปูน แกรนิต และ บะซอลต์ ที่ผลิตเพื่อการก่อสร้างในแต่ละปี

| ชนิดแร่    | 2557<br>(ล้านบาท) | 2558<br>(ล้านบาท) | 2559<br>(ล้านบาท) | 2560<br>(ล้านบาท) |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| หินปูน     | 81.03             | 95.07             | 92.22             | 99.35             |
| หินบะซอลต์ | 14.13             | 12.87             | 12.46             | 12.57             |
| หินแกรนิต  | 7.30              | 7.75              | 7.87              | 8.30              |

ตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณการผลิตหินในงานก่อสร้าง (ที่มา : สำนักงานสถิติแห่งชาติ)

### 2.2.3 ปริมาณการใช้ในงานก่อสร้าง

ปัจจุบันความต้องการในการใช้หินในงานก่อสร้างมีมากขึ้น อันเนื่องมาจากการขยายตัวของเมืองและนโยบายในการสร้างโครงสร้างพื้นฐานของรัฐบาล และจากข้อมูลของสำนักงานสถิติแห่งชาติ ปี พ.ศ. 2559 มีปริมาณการใช้หินในงานก่อสร้าง 98.77 ล้านบาท และปี พ.ศ. 2560 มีปริมาณการใช้หินในงานก่อสร้าง 99.00 ล้านบาท ดังแสดงในตารางที่ 2.4

| ชนิดแร่    | 2557<br>(ล้านบาท) | 2558<br>(ล้านบาท) | 2559<br>(ล้านบาท) | 2560<br>(ล้านบาท) |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| หินปูน     | 89.27             | 95.63             | 98.77             | 99.00             |
| หินบะซอลต์ | 13.98             | 12.06             | 12.93             | 12.82             |
| หินแกรนิต  | 6.81              | 7.89              | 8.39              | 8.93              |

ตารางที่ 2.4 แสดงปริมาณการใช้หินในงานก่อสร้าง (ที่มา : สำนักงานสถิติแห่งชาติ)

จะเห็นได้ว่ามีการใช้งานหินในงานก่อสร้างเพิ่มขึ้นทุกปี และในบางปีปริมาณการใช้หินเยอะกว่าการผลิต ประเทศไทยจึงต้องมีการนำเข้าหินเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการในการใช้งาน และการใช้งานหินที่เพิ่มขึ้นนั้นยังทำให้หินที่มีอยู่สำรองในประเทศลดน้อยลง อีกทั้งการควบคุมด้านกฎหมายสำหรับการทำเหมืองยังเป็นตัวจำกัดจำนวนการผลิตให้น้อยลงอีกด้วย

### 2.2.4 ปริมาณการนำเข้า

เนื่องด้วยปริมาณการใช้งานของหินสำหรับงานก่อสร้างในแต่ละปีมีปริมาณมากกว่าปริมาณการผลิต ทำให้ต้องมีการนำเข้าหินจากต่างประเทศเพื่อให้เพียงพอต่อการนำไปใช้ในงานก่อสร้าง จำเป็นได้จากข้อมูลการนำเข้าหินปูนที่มีมากขึ้นทุกปีดังตาราง

| ชนิดแร่ | 2557<br>(ล้านบาท) | 2558<br>(ล้านบาท) | 2559<br>(ล้านบาท) | 2560<br>(ล้านบาท) |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| หินปูน  | 0.003             | 0.003             | 0.076             | 0.37              |

ตารางที่ 2.5 แสดงปริมาณการใช้หินในงานก่อสร้าง (ที่มา: กลุ่มสถิติและพัฒนาข้อมูล)

## 2.2.5 แหล่งผลิต

แหล่งผลิตหินหรือโรงโม่หินในประเทศไทยที่เปิดการในปัจจุบัน (ตุลาคม 2561) มีจำนวน 291 โรง กำลังการผลิตรวม 115 ล้านตันต่อปี กระจายอยู่ทั่วประเทศไทย โดยภาคที่มีโรงโม่หินมากที่สุดที่เปิดการอยู่คือ ภาคกลางมีจำนวนโรงโม่หิน 101 โรง กำลังการผลิต 43 ล้านตันต่อปี รายละเอียดตามตารางที่ 2.5

| ภาค                | จำนวนโรงโม่หินเปิดการ |
|--------------------|-----------------------|
| เหนือ              | 41                    |
| กลาง               | 101                   |
| ใต้                | 54                    |
| ตะวันออกเฉียงเหนือ | 53                    |
| ตะวันออก           | 42                    |
| รวม                | 291                   |

ตารางที่ 2.6 แสดงจำนวนโรงโม่หินและกำลังการผลิตแยกตามภาค  
(ที่มา : กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่)

## 2.2.6 ปริมาณสำรองของหินในประเทศไทย

สำหรับปริมาณสำรองหินอุตสาหกรรมเพื่อการก่อสร้างทั่วประเทศ สามารถหาได้จากการรวบรวมแหล่งหินที่ได้รับการประกาศเป็นแหล่งหินอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 318 แห่ง มีปริมาณสำรองรวม 8,010.04 ล้านตัน โดยภาคกลางมีปริมาณสำรองหินมากที่สุด 3,296.81 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 41.16 ของปริมาณสำรองแหล่งหินรวมทั้งประเทศ รองลงมาได้แก่ ภาคเหนือ และภาคใต้ ตามลำดับ รายละเอียดตามตารางที่ 2.6

| ลำดับ | ภาค                   | จำนวนแหล่งหิน | พื้นที่(ไร่) | ปริมาณสำรอง |             |
|-------|-----------------------|---------------|--------------|-------------|-------------|
|       |                       |               |              | ล้านตัน     | เปอร์เซ็นต์ |
| 1     | ภาคกลาง               | 62            | 26,990.00    | 3,296.81    | 41.16       |
| 2     | ภาคเหนือ              | 118           | 45,394.00    | 2,574.32    | 32.14       |
| 3     | ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ | 49            | 43,110.00    | 791.60      | 9.88        |
| 4     | ภาคใต้                | 77            | 20,399.00    | 1,108.56    | 13.84       |
| 5     | ภาคตะวันออก           | 12            | 5,501.00     | 238.75      | 2.98        |
|       | รวม                   | 318           | 141,394.00   | 8,010.04    | 100.00      |

ตารางที่ 2.7 แสดงจำนวนและปริมาณสำรองของหินเพื่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง  
(ที่มา : สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่)

## 2.2.6 กฎหมายที่เกี่ยวข้อง

### พระราชบัญญัติแร่ พ.ศ. ๒๕๖๐

“แร่” หมายความว่า ทรัพยากรธรณีที่เป็นอนินทรีย์วัตถุ มีส่วนประกอบทางเคมีกับลักษณะทางฟิสิกส์แน่นอนหรือเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยไม่ว่าจะต้องถลุงหรือหลอมก่อนใช้หรือไม่ และหมายความรวมถึงถ่านหิน หินน้ำมัน หินอ่อน โลหะและตะกั่วที่ได้จากโลหกรรม น้ำเกลือใต้ดิน หินตามที่ถูกกระทรวงกำหนดเป็นหินประดับหรือหินอุตสาหกรรม และดินหรือทรายตามที่กฎกระทรวงกำหนดเป็นดินอุตสาหกรรมหรือทรายอุตสาหกรรม แต่ไม่รวมถึงน้ำ หรือเกลือสินเธาว์

มาตรา ๑๘ ห้ามมิให้ทำเหมืองในพื้นที่หรือชนิดแร่ที่แผนแม่บทบริหารจัดการแร่กำหนดให้มีการสงวนหวงห้ามหรืออนุรักษ์ไว้

มาตรา ๖๘ ผู้ถือประทานบัตรมีหน้าที่ต้องปฏิบัติ ดังต่อไปนี้

- (๑) ทำเหมืองตามวิธีการทำเหมือง แผนผัง โครงการ และเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในการออกประทานบัตร
- (๒) การเพิ่มเติมชนิดแร่ที่จะทำเหมือง การเปลี่ยนแปลงวิธีการทำเหมือง แผนผังโครงการ และเงื่อนไขสำหรับการทำเหมืองประเภทที่ ๑ จะต้องได้รับอนุญาตเป็นหนังสือจากเจ้าพนักงานอุตสาหกรรมแร่  
ประจำท้องที่ ส่วนการทำเหมืองประเภทที่ ๒ และการทำเหมืองประเภทที่ ๓ จะต้องได้รับอนุญาตเป็นหนังสือจากอธิบดี
- (๓) ห้ามทำเหมืองใกล้ทางหลวงที่ได้ลงทะเบียนไว้ตามกฎหมายว่าด้วยทางหลวง หรือทางน้ำสาธารณะภายในระยะหนึ่งร้อยเมตรสำหรับการทำเหมืองประเภทที่ ๑ และภายในระยะสามร้อยเมตรสำหรับการทำเหมืองประเภทที่ ๒ และประเภทที่ ๓ เว้นแต่ประทานบัตรกำหนดให้ทำได้หรือได้รับอนุญาตให้เปลี่ยนแปลงแผนผังโครงการ
- (๔) ห้ามปิดกั้น ทำลาย หรือทำด้วยประการใดให้เป็นการเสื่อมประโยชน์แก่ทางหลวงที่ได้ลงทะเบียนไว้ตามกฎหมายว่าด้วยทางหลวงหรือทางน้ำสาธารณะ เว้นแต่จะได้รับความเห็นชอบจากเจ้าพนักงานอุตสาหกรรมแร่ประจำท้องที่ และได้รับอนุญาตจากเจ้าพนักงานผู้รับผิดชอบทางหลวงหรือทางน้ำสาธารณะดังกล่าวตามกฎหมาย โดยผู้ถือประทานบัตรต้องรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงเปลี่ยนแปลง หรือฟื้นฟูทางหลวงหรือทางน้ำสาธารณะให้สามารถใช้ประโยชน์ได้ไม่น้อยกว่าเดิม
- (๕) ห้ามทدنน้ำหรือซึมน้ำจากทางน้ำสาธารณะ ไม่ว่าจะอยู่ภายในหรือนอกเขตเหมืองแร่เว้นแต่จะได้รับความเห็นชอบจากเจ้าพนักงานอุตสาหกรรมแร่ประจำท้องที่ และได้รับอนุญาตจากเจ้าพนักงานผู้รับผิดชอบทางน้ำสาธารณะดังกล่าวตามกฎหมาย
- (๖) ห้ามทิ้งหรือยอมให้ผู้อื่นนำมูลดินทรายออกนอกเขตเหมืองแร่ เว้นแต่จะได้รับความเห็นชอบจากเจ้าพนักงานอุตสาหกรรมแร่ประจำท้องที่ ตามหลักเกณฑ์ที่อธิบดีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา
- (๗) การทำเหมือง การแต่งแร่ หรือการประกอบโลหกรรม ภายในเขตเหมืองแร่ ห้ามกระทำหรือละเว้นกระทำการใดอันน่าจะเป็นเหตุให้แร่ที่มีพิษหรือสิ่งอื่นใดที่มีพิษก่อให้เกิดอันตรายแก่บุคคล สัตว์พืช ทรัพย์สิน หรือสิ่งแวดล้อม

(๘) พื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมืองตามแผนการฟื้นฟู การพัฒนา การใช้ประโยชน์ และการเฝ้าระวังผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนในระหว่างที่มีการทำเหมืองและหลังจากปิดเหมืองที่ได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการแร่

(๙) วางหลักประกันการฟื้นฟูสภาพพื้นที่การทำเหมืองและเยียวยาผู้ได้รับผลกระทบจากการทำเหมืองตามที่คณะกรรมการแร่กำหนด และในกรณีการทำเหมืองประเภทที่ ๒ และประเภทที่ ๓ ต้องจัดทำประกันภัยความรับผิดชอบต่อชีวิต ร่างกาย ทรัพย์สินของบุคคลภายนอกตามวงเงินที่คณะกรรมการแร่กำหนดด้วย

(๑๐) ชำระหนี้อันพึงต้องชำระตามพระราชบัญญัติ

## 2.2.7 ปัจจัยที่ทำให้หินคลุกหายากและมีราคาแพงขึ้นในปัจจุบัน

ตาม(ร่าง) ยุทธศาสตร์การบริหารจัดการแร่ 20 ปีและแผนแม่บทการบริหารจัดการแร่ พ.ศ. 2560-2564 หน้าที่ 27 -28 แก๊ไขปรับปรุงล่าสุด วันที่ ๓ พฤศจิกายน ๒๕๖๐ หัวข้อ ๒.๒.๔ ปัจจัยคุกคามและข้อจำกัดในการบริหารจัดการแร่ของประเทศ จะเห็นได้ว่าแร่ที่กล่าวนั้นรวมถึงหินคลุกตามความหมายของคำว่าแร่ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อหินคลุกอย่างมาก มีใจความสำคัญดังนี้

๑) พื้นที่ที่มีศักยภาพในการทำเหมือง พื้นที่แหล่งแร่ และเขตแหล่งแร่เพื่อการทำเหมืองซ้อนทับอยู่กับพื้นที่ป่าและพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีความสำคัญเชิงนิเวศ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความสำคัญ ควรค่าแก่การอนุรักษ์รักษาไว้เป็นแหล่งฐานทรัพยากรและการให้บริการเชิงนิเวศที่ไม่อาจประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ในขณะที่สถานการณ์ป่าไม้ในปัจจุบันตกอยู่ในภาวะถูกคุกคาม และในเชิงนโยบาย มีเป้าหมายในการเพิ่มพื้นที่ป่ามากขึ้น นอกจากนี้ ยังมีการซ้อนทับกับพื้นที่เกษตรกรรมและเขตชุมชน ซึ่งทำให้การทำเหมืองแร่มีต้นทุนสูงขึ้นทางเศรษฐกิจรวมทั้งมีความเสี่ยงต่อการสูญเสียต้นทุนทางสังคมและสุขภาพของประชาชนส่งผลให้ออกาสการพัฒนาแหล่งแร่ในพื้นที่ดังกล่าวเป็นไปได้ยาก

๒) ประชาชนขาดความเชื่อมั่นในการบริหารจัดการของภาครัฐ และวิตกกังวลกับปัญหาด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัย วิธีการดำรงชีวิตที่อาจเปลี่ยนแปลงไป โดยเห็นว่าการมีส่วนร่วมของประชาชน และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นร่วมกับหน่วยงานภาครัฐในส่วนกลางยังไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากภาครัฐไม่เป็นตัวกลางสำคัญในการประสาน ชี้แจง และเผยแพร่ข้อมูลให้ประชาชนได้รับความรู้และข้อเท็จจริงเกี่ยวกับการทำเหมืองอย่างเพียงพอ รวมทั้งกระบวนการทำประชาพิจารณ์ และกลไกการมีส่วนร่วมของภาคประชาสังคมในการติดตามและตรวจสอบการดำเนินการทำเหมืองและมาตรการในการป้องกันผลกระทบด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมของผู้ประกอบการเหมืองแร่ยังคงไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

๓) ขาดการบูรณาการของหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องในการบริหารจัดการแร่ที่จะทำให้สามารถปฏิบัติหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และขาดความชัดเจนของนโยบายบริหารจัดการแร่ที่จะต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านต่าง ๆ อย่างครบถ้วนและมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์ทรัพยากรอย่างสูงสุด จึงก่อให้เกิดผลกระทบหลายประการ ดังนี้

- ขาดความชัดเจนในการกำหนดพื้นที่พัฒนาแหล่งแร่พื้นที่อนุรักษ์ พื้นที่สงวนหวงห้ามโดยพิจารณาจากปริมาณสำรองแร่ อุปสงค์ อุปทาน ราคา เทคโนโลยีและปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

- ผู้ประกอบการอาจเสียประโยชน์ในการลงทุนและไม่สามารถวางแผนการลงทุนในอนาคตได้ ส่งผลให้การเตรียมความพร้อมด้านวัตถุดิบสำหรับภาคอุตสาหกรรมการผลิตไม่ทันต่อสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลง ทำให้ต้องนำเข้าทรัพยากรแร่บางชนิดจากต่างประเทศในราคาแพงทั้ง ๆ ที่ประเทศไทยมีศักยภาพแร่ชนิดนั้น จนสูญเสียความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมการผลิต

- การพัฒนาทรัพยากรแร่บางชนิดในปัจจุบันมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น เนื่องจากทรัพยากรแร่เป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป การพัฒนาทรัพยากรแร่มาใช้ประโยชน์ในปัจจุบันจำเป็นต้องคำนึงถึงการใช้ประโยชน์ในอนาคตด้วย หากอัตราการใช้ประโยชน์ในปัจจุบันสูงเกินไปอาจทำให้ทรัพยากรแร่ที่ผลิตได้มีมูลค่าต่ำเมื่อเทียบกับการอนุรักษ์เพื่อใช้ประโยชน์ในอนาคตจะให้มูลค่าที่สูงกว่าได้ ในทางกลับกัน หากอนุรักษ์เพื่อใช้ประโยชน์ในอนาคตมากเกินไปอาจทำให้สูญเสียประโยชน์ที่ควรจะได้ในปัจจุบัน ขณะเดียวกันหากไม่สามารถพัฒนามาใช้ประโยชน์ได้ก็จะเกิดความสูญเสียต่อระบบเศรษฐกิจและสังคมด้วยเช่นกัน

๔) การทำเหมืองมีความเสี่ยงที่จะส่งผลกระทบต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อม ซึ่งกระบวนการทำเหมืองแร่ต้องมีการเปิดหน้าดิน ทำให้เกิดการชะล้างพังทลาย การทำเหมืองแร่จึงเป็นอุปสรรคสำคัญในการอนุรักษ์ทรัพยากรอื่น ๆ ทำให้มีการร้องเรียน เช่น เสียงดังจากการระเบิดและการทำงานของเครื่องจักรแรงสะเทือนจากรถบรรทุกทำให้ถนนชำรุดเสียหาย ฝุ่นละออง ฟุ้งกระจายเกิดมลพิษในอากาศ การแพร่กระจายสารพิษในแหล่งน้ำและอากาศ เกิดมลพิษและอันตรายจากสินแร่และสารเคมีที่ใช้ในการทำเหมืองและการสูญเสียทัศนียภาพสภาพพื้นที่ดินเป็นภูเขาหัวโล้น เป็นต้น ทำให้ถูกต่อต้านจากชุมชนและองค์กรพัฒนาเอกชน (NGOs) มากขึ้น

## 2.3 ดินลูกรัง

ดินลูกรังเกิดจากการผุพังของหินในสภาพภูมิอากาศชื้นและมีอุณหภูมิสูง มีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือสามารถแข็งตัวได้เมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศ และมักมีสีแดงเพราะมีออกไซด์ของเหล็กปะปนอยู่ คุณสมบัติของดินลูกรังจะขึ้นอยู่กับชนิดของต้นกำเนิด ชนิดของหินเดิม ส่วนประกอบทางเคมี และสภาพภูมิอากาศ ดินลูกรังเมื่อนำมาบดอัดจะสามารถรับแรงเฉือนได้สูงขึ้น และมักนิยมใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในงานวิศวกรรม เช่น เป็นชั้นทางวัสดุงานทาง เป็นดินถมในคันทางดินถม ในเขื่อน ดินและในงานฐานราก เพราะมีราคาถูก และหาง่ายในธรรมชาติ งานวิจัยนี้จึงเลือกดินลูกรังเป็นวัสดุหลักในการจัดทำกรวิจัย

### 2.3.1 ความหมายของดินลูกรัง

ดินลูกรังหรือดินปนกรวด (skeletal Soils) ตามระบบอนุกรมวิธานดินกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา หมายถึง ดินซึ่งมีชั้นส่วนหยาบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร มากกว่าร้อยละ 35 โดยปริมาตร และมีอนุภาคดินที่พอจะแทรกอยู่ในช่องว่างที่มีขนาดโตกว่า 1 มิลลิเมตร จากคำนิยามของกองสำรวจดิน กรมพัฒนาที่ดิน หมายถึง เศษส่วนหิน หรือก้อนกรวด

### 2.3.2 ลักษณะของดินลูกรัง

ดินลูกรัง (lateritic Soil) ลักษณะของดินลูกรัง จัดอยู่ในประเภท skeletal Soil ดินที่มี เศษหินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร หรือใหญ่กว่าอยู่ในดินเป็นปริมาณ 35 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่าโดยปริมาตรที่มีความลึกไม่เกิน 50 เซนติเมตรจากผิวดิน เป็นได้ทั้งดินทราย (Sandy - Skeletal) ดินร่วน (Loamy - Skeletal) และดินเหนียว (Clay - Skeletal) เกิดได้ทุกสภาพพื้นที่



รูปที่ 2.3 ลักษณะของชั้นดินลูกรังที่สามารถแบ่งแยกได้อย่างชัดเจน  
(ที่มา : <http://www.phenixenterprise.com/product/laterite/> )

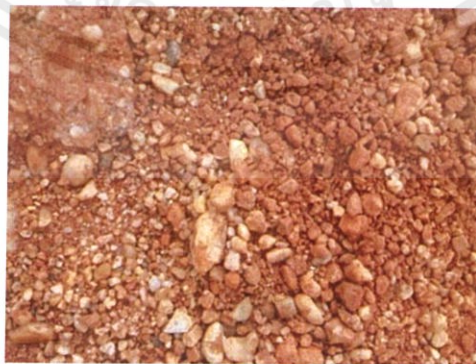
ดินลูกรังโดยทั่วไป สามารถแยกได้เป็น 2 ชนิด ที่พบในชั้นของดิน ที่สามารถแยกได้ ชัดเจน คือประเภทดินลูกรังร่วน (ดินลูกรังสเปรค) หรือเป็นก้อนเกาะเป็นแผ่นแน่นที่บลูกรังร่วน (ดิน ลูกรัง ก้อน) โดยปกติแล้วจะมีขนาดแตกต่างกันมาก ตั้งแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 ถึง 4-5 เซนติเมตร รายละเอียดของ 2 แบบ สามารถแยกได้ดังนี้คือ แบบแรก เมื่อใช้มือ บิออกจะเห็นลักษณะ Concentric Lamination Characteristic แต่แบบที่ 2 จะไม่เห็น โดยทางปฏิบัติ แบบแรก เรียกว่า True Laterite หรือ Ground Water Latenite ส่วนแบบหลัง เรียกว่า Pseudo Laterite โดยทั่วไป จะพบ Latenite ทั้ง 2 แบบปะปนในชั้นดินเสมอ แต่จะมีชนิดหนึ่งชนิดใดมากกว่ากันขึ้นอยู่กับ ลักษณะและหรือบริเวณที่ อยู่ในดิน เช่น Pseudo มักจะพบที่ส่วนบนสุดของที่ลาดเอียง มีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ ปกติแล้วมี เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2 เซนติเมตร แบบที่สองของหินลูกรังเป็น ชนิดแผ่นแน่นที่บ แต่ถ้าแบ่งย่อย ต่อไปจะแยกได้ชัดว่ามี 3 ชนิด คือ แบบ Honey Comb ซึ่งเป็น แบบที่ลูกรังร่วนเกาะกันแน่นหรือเป็น หินก้อนกรวดมายึดกันมากกว่าจะเป็น Laterite การเกิดของ หินเหล่านี้แต่ละรูปแบบยังไม่แน่นอนนัก เชื่อว่า Honey Comb เกิดขึ้นมาจากแร่ธาตุที่มีเหล็กผสมอยู่ มาก หรือ Plinthite ถูกยกขึ้นบนผิวดิน และนักวิทยาศาสตร์อื่นๆ ได้อธิบายเพิ่มเติมว่า Plinthite สามารถที่จะแข็งตัวได้ หากเกิดสภาพแห้งและ เปียกสลับกับในช่วงเวลาพอสมควรทั้ง ๆ ที่ไม่ต้องถูก อากาศ สำหรับอีก 2 ชนิด ต้องเกิดจากการเชื่อมติดกันของลูกรังร่วนและกรวดหินมากกว่าการเชื่อม ของหินลูกรังโดยธาตุเหล็ก อย่างไรก็ตามสภาวะ สิ่งแวดล้อมทางกายภาพที่จะอำนวยให้เกิดเหตุการณ์ เหล่านี้ยังเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ โดยธรรมชาติดิน ลูกรังชนิดที่เป็นแผ่นเกาะกันแน่น จะพบในชั้นดินใน

รูปแบบหักหรือแตก หรือแบบที่เป็นชั้นหรือหิน เป็นแผ่นต่อเนื่องกัน ดังนั้นแผ่นแข็งมีขนาดแตกต่างกันไป ตั้งแต่เส้นผ่าศูนย์กลาง 2-3 เมตร ถึง 1-2 กิโลเมตร



รูปที่ 2.4 แหล่งดินลูกรังในประเทศไทย (ที่มา : กรมพัฒนาที่ดิน ,2004)

ประเทศไทยมีพื้นที่ดินลูกรังประมาณ 68,765 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 13.4 ของพื้นที่ทั้งประเทศ พบแพร่กระจายอยู่ทั่วประเทศ ในบริเวณตะพักลำน้ำ ที่ลาดเชิงเขา เนินตะกอนรูปพัด ต่อเนื่อง พื้นที่เหลือค้ำจากการชะล้างหน้าดิน (Erosion Surface) เนินเขาและภูเขา พื้นที่ส่วนใหญ่ของดินนี้อยู่ทางตอนเหนือของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตอนกลางของภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียง และพบเล็กน้อยในภาคกลางและภาคใต้ ดังรูปที่ 2.3.2



รูปที่ 2.5 ลักษณะของดินลูกรังที่ใช้ในงานก่อสร้างถนน

(ที่มา : [http://pariwattomawan.blogspot.com/2015/08/blog-post\\_12.html](http://pariwattomawan.blogspot.com/2015/08/blog-post_12.html))

### 2.3.3 ประเภทของดินลูกรัง

ประเภทของดินลูกรังตามคุณสมบัติทางฟิสิกส์สามารถแบ่งออกเป็นดังนี้

- 1) Laterite หรือลูกรัง หมายถึง ดินที่เกิดจากกระบวนการผุพังในอัตรา ค่อนข้างสูง และมีคุณสมบัติแข็งตัวเมื่อสัมผัสกับอากาศ
- 2) Lateritic Soil หรือดินลูกรัง หมายถึง ดินสีแดงซึ่งมีออกไซด์ของเหล็ก และอลูมิเนียมในปริมาณสูง ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการ laterization มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เองและมี Laterite Rock และ Laterite Gravel ผสมอยู่
- 3) Tropical Red Soil (Latosols) หมายถึง ดินสีแดงที่ไม่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้ เอง และไม่มี laterite Rock และ Laterite Gravel ผสมอยู่
- 4) Laterite Rock หรือหินลูกรัง หมายถึง ดินลูกรังที่เกิดจากการแข็งตัวเอง อย่างสมบูรณ์ มีความเหนียวและแข็ง มีคุณสมบัติเป็นหินมากกว่าดิน เช่น หินศิลาแลง เป็นต้น
- 5) Phinthise หมายถึง หินลูกรังอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งสามารถตัดด้วยเครื่องตัด โลหะได้ในขณะอยู่ใต้ดิน เมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศจะเกิดการแข็งตัวและไม่กลับสู่สภาพเดิม
- 6) Laterite Gravel หรือกรวดลูกรัง หมายถึง ลูกรังที่ประกอบด้วยวัสดุเม็ด หยาบเป็นเม็ดเล็ก มีความแข็งแตกต่างกัน บางที่อาจยึดเกาะกันเป็นมวลใหญ่ หรืออาจร่วนเป็น silty และ (หรือ) clayey Lateritic Soil

### 2.3.4 สีของดินลูกรัง

ดินลูกรังส่วนใหญ่มักจะมีสีแดง และจะมีสีแดงเข้มหรือสีแดงอ่อน ขึ้นอยู่กับปริมาณ น้ำที่เป็น ส่วนประกอบของเหล็กออกไซด์ อลูมิเนียม ดินาเนียม และแมงกานีส โดยทั่วไปสีของดินลูกรังจะเกิดจาก

- 1) สารอินทรีย์ ดินจะมีสีดำ สีน้ำตาลและสีเทา
- 2) แร่ธาตุๆ ที่เป็นส่วนประกอบของดินลูกรัง
  - แร่เหล็ก ดินมีสีแดง สีส้ม สีเหลือง สีน้ำเงิน และสีเขียว
  - แคลเซียม แมกนีเซียม และโปแทสเซียม ดินจะมีสีขาว
  - อลูมิเนียม ดินจะมีสีขาว
  - แมงกานีส ดินจะมีสีดำ และสีน้ำตาล

ซึ่งจะสังเกตได้ว่าถ้าเป็นบริเวณเชิงลาดสูงสุดของเนินเขาที่มีการระบายน้ำดีดิน ลูกกรังจะมีสีแดงไปจนถึงน้ำตาลแกมแดง หรือสีแดงสด หรือสีแดงแกมม่วง ซึ่งสีแดงเหล่านี้แสดงถึงการมีเหล็กออกไซด์ประเภทเฮมาไทท์ในดิน แต่ถ้าในบริเวณตอนกลางของเนินเขา และที่ต่ำลงมา การระบายน้ำจะดีน้อยกว่าบริเวณสูงสุดของเนินเขาทำให้ดินมีความชื้นนาน และปริมาณน้ำที่เป็นส่วนประกอบของเหล็กในดินมากขึ้น ดินลูกกรังจะมีสีน้ำตาล หรือสีเหลืองมากกว่าสีแดง เหล็กออกไซด์ในรูปของดินลูกกรังบริเวณนี้ส่วนใหญ่จะเป็น จีโอไทต์ และลิโมนด์ แสดงให้เห็นว่ายิ่งต่ำลงมาดินจะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลแกมแดงมาเป็นสีน้ำตาล หรือสีน้ำตาลแกมส้ม จนถึงน้ำตาลแกมเหลือง หรืออาจเป็นสีเหลืองแกมน้ำตาล ส่วนบริเวณที่มีการระบายน้ำไม่ดีดินจะมีสีเทาปนน้ำเงิน

### 2.3.5 การสำรวจแหล่งลูกกรัง เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

ในการสำรวจหาแหล่งดินลูกกรังที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างนั้น จะต้องเริ่มจาก ศึกษาข้อมูลของดินลูกกรังที่พบอยู่ในประเทศ โดยอาศัยข้อมูลจากแผนที่ภูมิประเทศเพื่อเป็นแนวทาง ในการหาแหล่งดินลูกกรังที่จะนำมาเป็นวัสดุในงานวิศวกรรม เมื่อพบแหล่งดินลูกกรังที่ต้องการแล้วก็จะ ทำการสำรวจเพื่อหาขอบเขตของพื้นที่ที่มีดินลูกกรัง

ในการสำรวจแหล่งวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทางสามารถแบ่งขั้นตอนการ ปฏิบัติงานออกได้ 2 ขั้นตอน คือ

1) การหาแหล่งหรือบริเวณที่คาดว่าจะมีวัสดุ โดยปกติการหาแหล่งวัสดุที่จะใช้ในงานก่อสร้างจะพยายามหาให้ได้ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับงานก่อสร้างทางมากที่สุด เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง การหาแหล่งวัสดุโดยทั่วๆ ไปจะต้องเริ่มต้นจากการศึกษาแผนที่ภูมิประเทศ (Topographic Map) เสียก่อน บริเวณที่จะมีแหล่งลูกกรังมักจะมีเส้นชั้นความสูงปานกลาง ฉะนั้นควรให้ความสนใจแก่แนวทางการไหลของน้ำในปัจจุบัน เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดแนวทางของลำน้ำเก่า

หลังจากที่ได้กำหนดจุดสำรวจอันได้แก่บริเวณที่เป็นเนินและบริเวณที่คาดว่าจะเป็นลำน้ำเก่าแล้ว คณะสำรวจก็จะออกสำรวจโดยการเจาะสุ่มบริเวณต่างๆ ตามที่ได้กำหนดในแผนที่การสังเกตลักษณะพืชพันธุ์สามารถใช้เป็นแนวทางในการสำรวจแหล่งลูกกรังได้ นอกจากนี้คณะผู้สำรวจอาจสอบถามจากชาวบ้านที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่เข้าไปทำการสำรวจอันจะทำให้เข้าถึงจุดที่ต้องการจะสำรวจได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น

2) การหาอาณาบริเวณและปริมาณวัสดุของแหล่งวัสดุ เมื่อทราบว่แหล่งวัสดุอยู่ ณ ที่แห่งใดแล้ว ก็ทำการเจาะสำรวจเพื่อหาปริมาณและขอบเขตที่มีวัสดุ การขุดเจาะจะขุดโดยใช้รถแบคโฮ ในการเจาะตรวจสอบความหนาของชั้นหน้าดินและความหนาของชั้นดินลูกกรังในทุกหลุมที่ขุดเจาะ

อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะทำการเจาะสำรวจเพื่อครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด ให้เก็บตัวอย่างมาตรวจสอบคุณภาพของวัสดุดินลูกรังเพื่อใช้ในงานวิศวกรรม

### 2.3.5 มาตรฐานการทดสอบวัสดุก่อสร้างทางประเภทดินลูกรังซึ่งกำหนดคุณสมบัติดังนี้

1. มีค่าความสึกหรอ เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ไม่เกินร้อยละ 60
2. มีขนาดคละที่ดี และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่างต้องมีขนาดหนึ่งตามตารางที่ 2.3.1

| ขนาดตะแกรง<br>มิลลิเมตร | ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล |       |       |        |        |
|-------------------------|---------------------------|-------|-------|--------|--------|
|                         | A                         | B     | C     | D      | E      |
| 50                      | 100                       | 100   | -     | -      | -      |
| 25                      | -                         | -     | 100   | 100    | 100    |
| 9.5                     | 30-65                     | 40-75 | 50-85 | 60-100 | -      |
| 2                       | 15-40                     | 20-45 | 25-50 | 40-70  | 40-100 |
| 0.425                   | 8-20                      | 15-30 | 15-30 | 25-45  | 20-50  |
| 0.075                   | 2-8                       | 5-20  | 5-15  | 5-20   | 6-20   |

ตารางที่ 2.8 แสดงขนาดคละต่างๆของดินลูกรังตามมาตรฐานกรมทางหลวง (กรมทางหลวง, 2532)

3. ปราศจากก้อนดินเหนียว (Clay Lump) Shale รากไม้หรือวัชพืชอื่นๆ
4. ขนาดวัสดุใหญ่สุดไม่โตกว่า 5 เซนติเมตร
5. ค่าขีดเหลว (Liquid Limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 35 ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว (Liquid Limit : L.L.)
6. ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) ไม่มากกว่าร้อยละ 11 ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก (Plastic Limit : P.L.)
7. ค่า ซี.บี.อาร์. จากห้องทดลอง (Lab C.B.R.) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Density) ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. หรือไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง

## 2.4 ตะกรันจากกระบวนการถลุงเหล็ก (Steelmaking Slag)

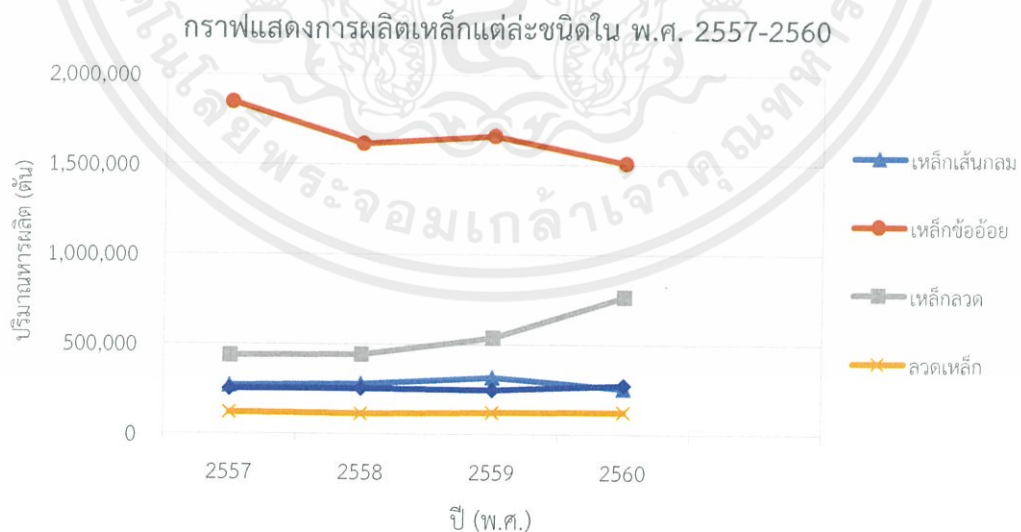
ตะกรันเหล็กเป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงสมบัติของน้ำเหล็กในการหลอมเศษเหล็ก โดยปกติเศษเหล็กที่เป็นวัตถุดิบมักจะมีปริมาณองค์ประกอบที่เกินกว่ามาตรฐานที่ต้องการเสมอ อาทิ คาร์บอน ซิลิคอน แมงกานีส ไททาเนียม ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ ดังนั้น การทำให้น้ำเหล็กมีองค์ประกอบตามต้องการ ต้องมีการกำจัดหรือลดปริมาณสารมลทินเหล่านี้ผ่านปฏิกิริยาทางเคมีด้วยการใส่สารสร้างตะกรัน เช่น หินฟืนม้าหรือปูนขาว ลงไป ตะกรันจึงเป็นสารประกอบโลหะที่ประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา หินปูน แมกนีเซียม เหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์

### 2.4.1 อุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย

จากข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจในอุตสาหกรรม การผลิตเหล็กเส้นกลม,เหล็กข้ออ้อย,เหล็กหลอด,หลอดเหล็ก และหลอดเหล็กแรงดึงสูง ในปี 2557-2560 ประเทศไทยแสดงในตารางที่ 2.4.1

| รายการ                   | 2557      | 2558      | 2559      | 2560      |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| เหล็กเส้นกลม (ตัน)       | 270,154   | 278,551   | 316,137   | 255,691   |
| เหล็กข้ออ้อย (ตัน)       | 1,849,423 | 1,617,778 | 1,660,295 | 1,510,776 |
| เหล็กหลอด (ตัน)          | 436,754   | 441,841   | 537,174   | 764,350   |
| หลอดเหล็ก (ตัน)          | 121,004   | 114,524   | 122,269   | 125,886   |
| หลอดเหล็กแรงดึงสูง (ตัน) | 252,592   | 254,416   | 246,673   | 272,968   |

ตารางที่ 2.9 การผลิตเหล็กแต่ละชนิดในแต่ละปี (ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจในอุตสาหกรรม)



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงการผลิตเหล็กแต่ละชนิดในแต่ละปี

จากข้อมูลจะเห็นได้ว่า อุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทยมีการผลิตเหล็กเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ซึ่งทำให้แต่ละปีเกิดตะกรันเหล็กที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเหล็กขึ้นเป็นจำนวนมาก

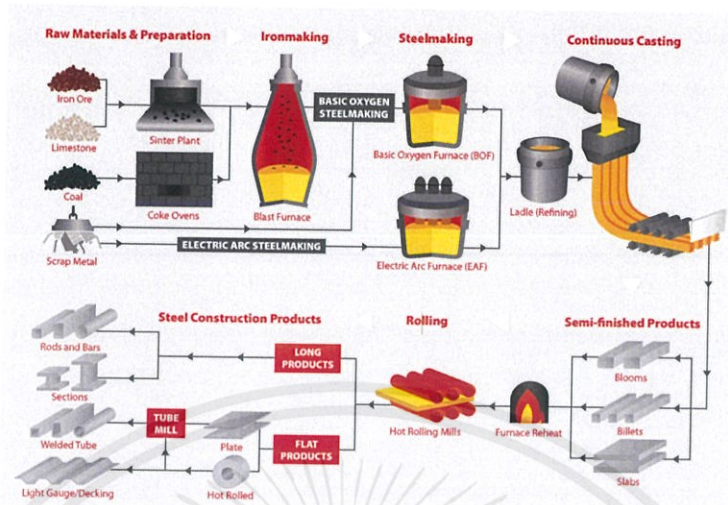
และจากข้อมูลแนวโน้มของอุตสาหกรรมเหล็กคาดว่าในช่วงปี 2561-2562 ความต้องการใช้เหล็กทรงยาวและเหล็กทรงแบนจะเติบโตแรงขึ้นในอัตราเฉลี่ย 8-12% และ 2-4.5% ต่อปี ตามลำดับอันสืบเนื่องจากงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ของภาครัฐที่น่าจะอยู่ในขั้นตอนที่ใช้เหล็กก่อสร้างมาก ส่วนการใช้เหล็กในภาคอสังหาริมทรัพย์และภาคอุตสาหกรรมจะทยอยปรับตัวดีขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปตามทิศทาง การฟื้นตัวของที่อยู่อาศัยและอุตสาหกรรม

การผลิตเหล็กของไทยในช่วงปี 2560-2562 คาดมีแนวโน้มขยายตัวในกรอบจำกัด จะมีปริมาณ 7-8 ล้านตันต่อปี เนื่องจากแม้มีแรงจูงใจจากอุปสงค์ที่เติบโตแต่ผลจากอุปทานส่วนเกินที่ยังมีอยู่ ผนวกกับการนำเข้าเหล็กจากต่างประเทศและการตั้งโรงงานผลิตเหล็กในไทยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจกดดันให้ผู้ผลิตไทยสูญเสียส่วนแบ่งตลาดอยู่บ้าง

แต่อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมการถลุงเหล็กนั้นมีการคาดการณ์ว่าจะขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งยังมีโรงงานที่ถลุงเหล็กเกิดขึ้นมากมายในประเทศไทย ซึ่งทำให้ตะกรันที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเหล็ก จึงมีจำนวนมากเพียงพอที่จะนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในงานวิศวกรรมปฐพี

#### 2.4.2 ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าและตะกรันจากเตาอุ้มน้ำเหล็ก (EAF Slag and Ladle Furnace Slag)

ตะกรันเหล็กเป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงสมบัติของน้ำเหล็กในการหลอมเศษเหล็ก เศษเหล็กที่เป็นวัตถุดิบมักจะมีปริมาณองค์ประกอบที่เกินกว่ามาตรฐานที่ต้องการเสมอ อาทิ คาร์บอน ซิลิคอน แมงกานีส ไททาเนียม ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ การทำให้น้ำเหล็กมีองค์ประกอบตามต้องการ ต้องมีการกำจัดหรือลดปริมาณสารมลทินเหล่านี้ผ่านปฏิกิริยาทางเคมีด้วยการใส่สารสร้างตะกรัน เช่น หินปูนขาวหรือปูนขาว ลงไป ตะกรันจึงเป็นสารประกอบไอโคนที่ประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา หินปูน แมกนีเซียม เหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันน้ำเหล็กค่อนข้างไม่คงที่เท่าใดนัก ตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF Slag) มีปริมาณเหล็กออกไซด์เจือปนค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 25-40 โดยน้ำหนัก มีแคลเซียมออกไซด์ และซิลิกอนออกไซด์ที่ประมาณร้อยละ 30 และ 15 มีสีดำค่อนข้างเข้ม จัดเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่ไม่มีพิษ ในขณะที่ตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอุ้มน้ำเหล็ก (Ladle furnace) มีฤทธิ์เป็นด่างกว่ามาก เนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (มาจากปูนขาว) ต่อซิลิกาค่อนข้างสูง มีแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 35-60 โดยน้ำหนัก มีสีเทาเข้ม แข็ง และมักมีเหล็กเจือปนมาด้วย ตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอุ้มน้ำเหล็กจัดเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่ไม่มีพิษเช่นเดียวกับตะกรันที่เกิดในเตาอาร์คไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการผลิตเหล็กนั้น น้ำเหล็กจะมีอุณหภูมิของน้ำเหล็กอยู่ที่ 1550-1650 °C โดยจะเกิด Slag ทั้งสองตัวประมาณ 1-2% ของเหล็ก



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนกระบวนการถลุงเหล็ก

(ที่มา: <http://www.newsteelconstruction.com/wp/an-introduction-to-steelmaking/>)

ส่วนผสมทางเคมีของตะกรันแสดงตารางที่ 2.10 ตะกรันทั้งสองชนิดนี้แตกต่างกันตรงอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ต่อซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) โดยแคลเซียมออกไซด์มีฤทธิ์เป็นด่างในขณะที่ซิลิกามีฤทธิ์เป็นกรด อัตราส่วนนี้บ่งบอกถึงสมบัติความเป็นกรดเบสของตะกรัน กล่าวคือยิ่งอัตราส่วนมีค่าสูง ตะกรันก็มีความเป็นเบสมาก นอกจากนี้ในบางกรณีหากมีแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) อยู่มากจะพิจารณาผลรวมของแคลเซียมออกไซด์กับแมกนีเซียมต่อซิลิกา ทั้งแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ล้วนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อได้รับความชื้นของตะกรันทั้งสิ้น

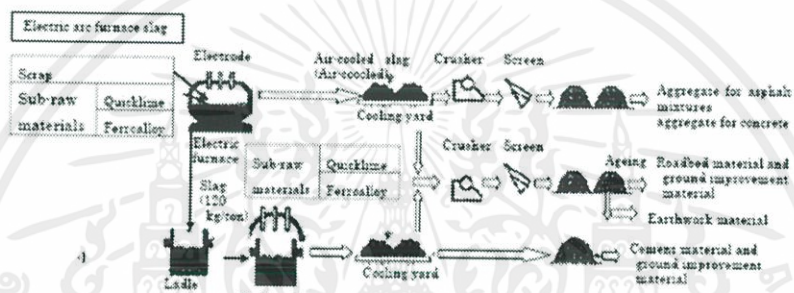
| Constituents (%)               | BF slag | EAF slag | LF slag |
|--------------------------------|---------|----------|---------|
| CaO                            | 42.0    | 25-35    | 48-54   |
| SiO <sub>2</sub>               | 33.8    | 8-18     | 12-18   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.4    | 3-10     | 1-4     |
| MgO                            | 6.7     | 2-9      | 1-4     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.3     | 20-30    | 14-19   |
| others                         | ≈ 2     | 1.7-4.0  | 2.8-4   |

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็กชนิดต่างๆ

(ที่มา : The Japan Iron and Steel Federation, Nippon Slag Association, 2006)

### 2.4.3 การนำไปใช้ประโยชน์

1. ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทางและวัสดุกรูพื้นถนน สามารถใช้ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นมวลรวมผสมกับยางมะตอยราดปูพื้นทางได้ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีสมบัติหลายประการที่จะใช้เป็นมวลรวมได้ สมบัติบางประการเหนือกว่ามวลรวมจากวัสดุธรรมชาติอีกด้วยเช่น มีความแข็งและความต้านทานการขีดสีค่อนข้างสูงกว่า ความหนาแน่นสูงกว่าวัสดุธรรมชาติจึงแข็งแรง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงทำให้ไม่ลื่นไหล อีกทั้งสามารถเก็บความร้อนได้ดีทำให้ส่วนผสมยางมะตอยอยู่นาน ทำให้การเทราดและปรับระดับพื้นถนนง่ายขึ้น การนำไปใช้งานลักษณะนี้จัดว่าเป็น Best Available Practice ขั้นตอนการเตรียมตะกรันสำหรับงานก่อสร้างแสดงดังรูปที่ 2.8

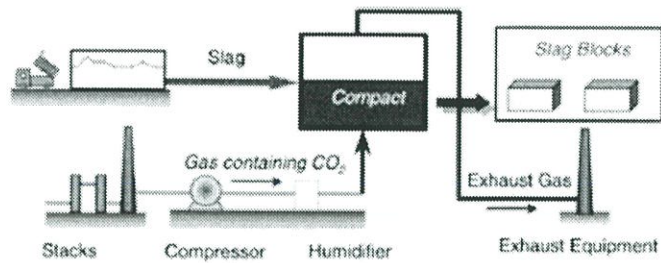


รูปที่ 2.8 การนำตะกรันไปใช้งาน

(ที่มา: The Japan Iron and Steel Federation, Nippon Slag Association, 2006)

2. ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเม็ดปูน โดยการผสมในเตาเผาปูนร่วมกับส่วนผสมอื่นๆ ในบางกรณีสามารถใช้งานแทน Portland Cement ได้เนื่องจากตะกรันจากเตาอุณหภูมิลึกมีส่วนผสมทางเคมีค่อนข้างใกล้เคียงกับซีเมนต์

3. ใช้เป็นวัสดุดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้เป็น Carbonated Block ตะกรันจากเตาอุณหภูมิลึกมีแนวโน้มที่จะดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เนื่องจากมีหินปูนอิสระอยู่มาก ตะกรันจากเตาอุณหภูมิลึกถูกอัดกันอย่างหลวมๆ มีความพรุนตัวประมาณร้อยละ 20-40 แล้วให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไหลผ่าน ที่ผิวจะเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ที่ผิวได้ประมาณร้อยละ 1-7 โดยน้ำหนัก กลายเป็นสารประกอบคาร์บอเนต กระบวนการนี้เรียกว่า Carbonation หรือ Sequestration ซึ่งสามารถดักก๊าซเรือนกระจกได้ทางอ้อม ส่วนของตะกรันที่ดูดซับก๊าซไว้เรียบร้อยแล้วสามารถใช้ทำเป็น Carbonated Block ใช้เป็นเรือนเพาะเลี้ยงสาหร่ายทะเลและเป็นสถานที่อนุบาลสัตว์น้ำ ขั้นตอนการเตรียมตะกรันสำหรับดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.4.3 อย่างไรก็ตามการใช้งานในลักษณะนี้ยังอยู่ในระหว่างการศึกษาวิจัยโดยบริษัท JFE Steel ประเทศญี่ปุ่น



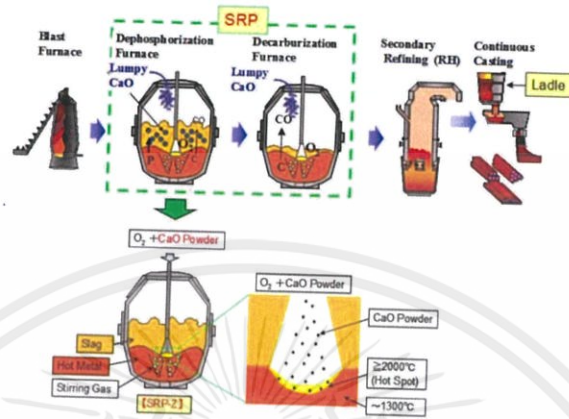
รูปที่ 2.9 การนำตะกรันเตาอุณหภูมิเหล็กสำหรับดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ที่มา : Miyata et al., 2004)

4. ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินในทางเกษตรกรรมโดยตะกรันเตาอุณหภูมิเหล็กซึ่งมีฤทธิ์เป็นเบสจะช่วยลดสภาพความเป็นกรดของดินได้

5. การใช้ตะกรันแทนปูนขาวในกระบวนการหลอมรีไซเคิลเศษเหล็กพัฒนาโดยปี 2006 บริษัท Sumitomo Metals Industries การนำ LF Slag กลับมาใช้ใหม่เรียกว่า SRP (Simple Refining Process) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ การปรับกระบวนการเพื่อให้ขั้นตอนการกำจัดคาร์บอนและฟอสฟอรัสส่วนเกินมีประสิทธิภาพ และการนำกากของเสียที่ได้กลับมาใช้ในกระบวนการหลอมดังแสดงในรูปที่ 2.4.4 ในการหลอมเหล็กด้วยเตา Blast Furnace จำเป็นต้องมีการกำจัดคาร์บอนและฟอสฟอรัส ส่วนเกินใน Converter กระบวนการ SRP จะใช้ Converter 2 ตัว Converter ตัวหนึ่งกำจัดฟอสฟอรัส (Dephosphorization) และ Converter อีกตัวกำจัดคาร์บอน (Decarbulization) ฟลักซ์ที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสคือปูนขาว (Lime) ซึ่งมีจุดหลอมตัวสูงประมาณ 2000 องศาเซลเซียส จึงหลอมละลายในเตาได้ยากและไม่สามารถทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสในน้ำเหล็กได้เท่าที่ควร กระบวนการ SRP ได้เพิ่มส่วนของท่อเป่าออกซิเจน ติดตั้งทางด้านบนของเตาเหนือผิวหน้าของเหล็กปิกหลอมเหลว ฟันออกซิเจนไปพร้อมๆกับผงปูนขาว ปูนขาวในรูปของผงมีพื้นที่ผิวมากทำอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น นอกจากนี้การเป่าผงปูนขาว ผ่านท่อออกซิเจนลงใน Converter ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสสามารถลดปริมาณการใช้ปูนขาวเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปกติ (การเติมปูนขาวเป็นก้อนใหญ่ลงในน้ำเหล็ก) ประมาณร้อยละ 15 น้ำเหล็กที่ได้หลังจากการกำจัดคาร์บอนและฟอสฟอรัสส่วนเกินจะถูกส่งต่อมายังเตา Basic Oxygen Furnace (BOF) เพื่อปรับปรุงส่วนผสมของน้ำเหล็กให้ได้ตามต้องการ ตะกรันที่ได้จาก BOF สามารถนำกลับไปใช้อีกครั้งในกระบวนการ SRP ได้โดยตรง โดยตะกรันเหล่านี้จะมีอะลูมินาเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นตัวที่ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยา Dephosphorization และการสร้างตะกรันเหนือผิวน้ำเหล็ก นอกเหนือจากกระบวนการ SRP มีจุดเด่นก็คือสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการ Dephosphorization กระบวนการที่คิดค้นขึ้นมาแล้วยังมีข้อดีอื่นอีก ได้แก่ ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่ากระบวนการทั่วไป

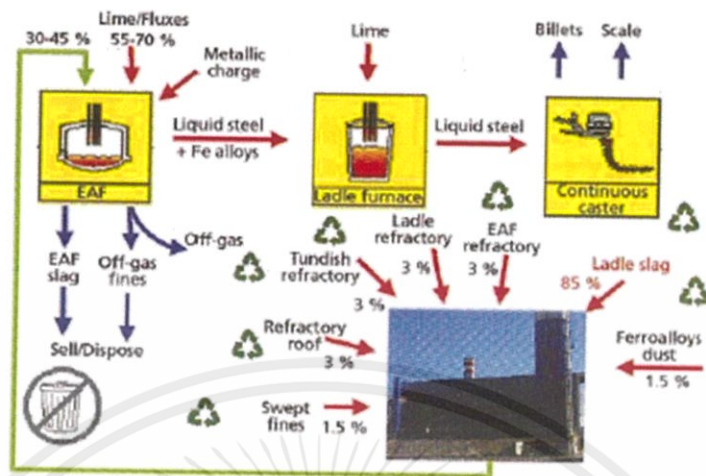
เนื่องจากปริมาณการใช้ปูนขาวในกระบวนการลดและลดปริมาณการเกิดฝุ่นเหล็ก ตะกรันที่เกิดขึ้นในกระบวนการ SRP มีปริมาณของ Lime น้อยกว่าตะกรันที่ได้จากกระบวนการหลอมดั้งเดิม ทำให้ระยะเวลาการบ่มสั้นลงเนื่องจากการบวมของตะกรันจากการดูดน้ำหรือความชื้นของตะกรันเหล่านี้น้อย จึงสามารถนำตะกรันไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับงานก่อสร้างได้เร็วกว่าเดิม ตะกรันที่เกิดจาก

กระบวนการ SRP สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการได้ทันทีโดยไม่ต้องนำมาบำบัดด้วยวิธีการอื่นใด



รูปที่ 2.10 นำกากของเสียที่ได้กลับมาใช้ในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตา Blast furnace

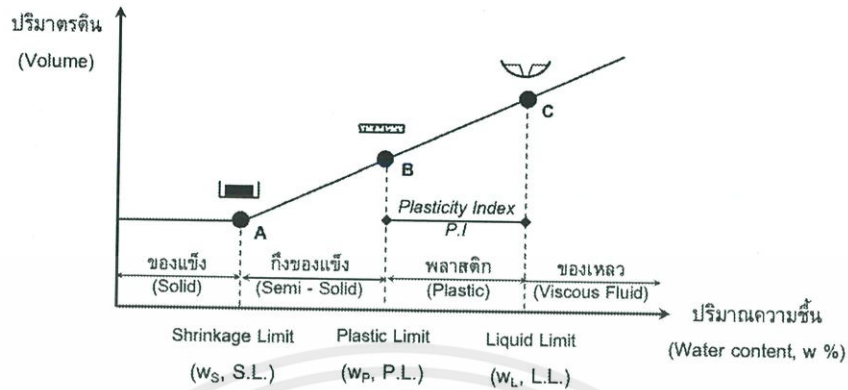
นอกจากนี้ยังมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกรันในเตาอุณหภูมิลดลงน้ำเหล็กกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในการหลอมเหล็กอีกวิธีหนึ่ง โดยวิธีการนี้คิดค้นโดยบริษัท Techint Technology ประเทศอิตาลีในปี 2001 และได้ขยายขอบเขตการใช้งานในลักษณะดังกล่าวในระดับอุตสาหกรรมในปี 2003 โดยเน้นการนำเอาตะกรันในเตาอุณหภูมิลดลงน้ำเหล็กผสมกับของเสียอื่นๆ ที่เกิดจากการหลอม ไม่ว่าจะเป็นอิฐทนไฟที่บุเตาอุณหภูมิลดลงน้ำเหล็ก และ Tundish ฝุ่นผงต่างๆ มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของตะกรันในเตาอุณหภูมิลดลงน้ำเหล็กกว่าร้อยละ 85 โดยน้ำหนักใช้เป็นฟลักซ์แทนปูนขาวฉีดพ่นเข้าไปในเตาอาร์คไฟฟ้า จุดเด่นของการใช้ฟลักซ์ที่เตรียมจากกากของเสีย ต่างๆนี้คือสามารถลดปริมาณเหล็กที่ติดมากับตะกรันได้ อิฐที่ใช้บุเตาอุณหภูมิลดลงน้ำเหล็กเป็นอิฐชนิดแมกนีเซียม-คาร์บอนซึ่งเป็นชนิดเดียวกับอิฐทนไฟที่ใช้ในเตาอาร์คไฟฟ้า ฟลักซ์ตัวนี้จึงมีปริมาณของแมกนีเซียม ค่อนข้างสูงจึงเป็นการลดโอกาสการกัดกร่อนของอิฐในเตาอาร์คไฟฟ้า ทำให้อายุการใช้งานของอิฐยาวนานขึ้นและทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกรันที่ส่งเสริมการเกิดฟองอากาศในชั้นตะกรันหรือ Slag Foaming เพิ่มความหนาของชั้นตะกรัน ช่วยลดการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กได้ อย่างไรก็ตาม การใช้ตะกรัน และของเสียดังกล่าวในกระบวนการหลอมรีไซเคิลเหล็กต้องควบคุมวิธีการเตรียมของเสียแต่ละชนิดอย่างเคร่งครัด เช่น ตะกรันในเตาอุณหภูมิลดลงน้ำเหล็กต้องทำให้เกิดการเย็นตัวที่เหมาะสม โดยควบคุมการเปลี่ยนแปลงและกลายเป็นผงของตะกรันในเตาอุณหภูมิลดลงน้ำเหล็กอย่างทั่วถึง และต้องจัดเก็บผงตะกรันที่ได้ก่อนที่ตะกรันจะเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องผสมส่วนผสมของเสียต่างๆและใช้แบบวันต่อวันเท่านั้น ไม่สามารถเตรียมไว้ล่วงหน้าได้ เนื่องจากส่วนผสมมีโอกาสรวมตัวกับความชื้นได้ รวมไปถึงต้องใช้ส่วนผสมที่เตรียมไว้ขณะที่ยังร้อนอยู่เท่านั้น จึงส่งผลทำให้การจัดเก็บและเคลื่อนย้ายส่วนผสมตะกรันและของเสียไม่สะดวก นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่ส่งผลต่อการใช้งานลักษณะนี้ ได้แก่ สมบัติและลักษณะของเศษเหล็กที่นำมารีไซเคิล ซึ่งส่งผลต่อส่วนผสมและปริมาณการใช้ฟลักซ์จากกากของเสียดังกล่าวการใช้ของเสียจากกระบวนการหลอมเศษเหล็กในเตาอาร์คไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.4.6



รูปที่ 2.11 การใช้ของเสียจากกระบวนการหลอมเศษเหล็กกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในเตาอาร์คไฟฟ้า (ที่มา : F. Memoli and M. Guzzon, “Recycling of furnace by-products by injecting into the EAF experience and prospect”. MPT international, May 2006.)

## 2.5 การทดสอบ Atterberg’s Limit

ในปี ค.ศ. 1911 A. Atterberg นักวิทยาศาสตร์การเกษตร ชาวสวีเดน ได้เสนอวิธีแบ่งพิกัดเปลี่ยนแปลงสภาพของดินออกเป็น 5 พิกัด ดังนี้ Cohesion Limit, Sticky Limit, Shrinkage Limit (w<sub>S</sub>, w<sub>SL</sub> หรือ S.L.), Plastic Limit (w<sub>P</sub>, w<sub>PL</sub> หรือ P.L.), Liquid Limit (w<sub>L</sub>, w<sub>LL</sub> หรือ L.L.) ต่อมาในปี ค.ศ. 1932 Casagrande ได้นำค่าพิกัดมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมกลศาสตร์ของดินโดยได้กำหนดรูปแบบเครื่องมือและวิธีการทดสอบ Liquid Limit และ Plastic Limit ซึ่งเป็นดัชนีที่สำคัญของดินซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามปัจจุบันการศึกษาทางด้านรัฐพีกลศาสตร์ได้นำพิกัด 3 พิกัดสุดท้ายเท่านั้นมาใช้ประโยชน์ คือ พิกัดหดตัว (Shrinkage Limit) พิกัดพลาสติก (Plastic Limit) และ พิกัดเหลว (Liquid Limit) โดยการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาเฉพาะพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) และ พิกัดเหลว (Liquid Limit)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของปริมาตรดินกับปริมาณความชื้น และ ค่าความชื้นที่พิกัด Atterberg (ที่มา : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ,2015)

จากรูปที่ 2.5.1 สามารถแบ่งค่าพิกัด Atterberg ได้ดังนี้

- ปริมาณความชื้นที่จุดแบ่งระหว่าง สภาพดินที่อยู่ในสถานะของเหลวกับสถานะพลาสติก เรียกว่า พิกัดเหลว (Liquid Limit) โดยคำนิยามคือจุดซึ่งดินเริ่มที่จะมีกำลังรับแรงเฉือน ประมาณ 21.7 kN/m
- ปริมาณความชื้นที่จุดแบ่งระหว่างสถานะพลาสติกกับกึ่งของแข็ง เรียกว่า พิกัดพลาสติก (Plastic Limit)
- ปริมาณความชื้น ณ.จุดที่ดินไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอีกต่อไปเรียกว่า พิกัดการหดตัว (Shrinkage Limit)

### 2.5.1 การหาค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit)

แบบใช้ถ้วยทองเหลืองโดยค่า Liquid Limit ของดิน คือค่าปริมาณความชื้นที่จุดรอยปาดร่องดินซึ่งถูกปาดด้วยตัวปาดร่องดินมาตรฐาน (Standard Grooving Tool) เคลื่อนที่มาบรรจบกันในถ้วยทองเหลืองยาวประมาณ 1.3 เซนติเมตร (1/2 นิ้ว) เมื่อเคาะได้ 25 ครั้งพอดีโดยมีระยะตกกระทบของถ้วยทองเหลืองถึงพื้นรองเท่ากับ 1 เซนติเมตร ที่อัตราการหมุนถ้วยทองเหลืองเท่ากับ 120 ครั้งต่อนาที (2 ครั้งต่อวินาที)

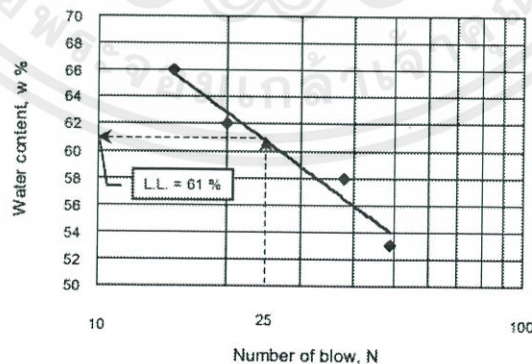


รูปที่ 2.13 การทดสอบพิกัดเหลวเมื่อดินชดกันยาว 1.3 เซนติเมตร

( ที่มา : <https://theconstructor.org/geotechnical/the-liquid-limit-of-soil-test/2877/> )

แต่อย่างไรก็ตาม การที่จะเคาะถ้วยทองเหลือง 25 ครั้งแล้วทำให้ดินไหลมาบรรจบกันที่ระยะเท่ากับ 1.3 เซนติเมตรพอดีนั้นยากมากหรือแทบจะเป็นไปไม่ได้ในการทดลองเพียงครั้งเดียว ดังนั้นจึงใช้วิธีการหาค่า Liquid Limit จากกราฟ Semi - Log โดยในแกน x (Log Scale) เป็นค่าจำนวนครั้งในการเคาะ (Blow Count, N) และในแกน y (Scale ธรรมดา) เป็นค่าปริมาณความชื้นของดินซึ่งจะต้องทำการทดลองโดยผสมน้ำในดินให้ดินมีค่าปริมาณความชื้น 4 ค่า (หรือประมาณ 3 ถึง 6 ค่า) และนับจำนวนครั้งในการเคาะดินที่มาบรรจบกันระยะ 1.3 เซนติเมตรพอดี โดยมีหลักคร่าวๆดังนี้

- น้อย
- ครั้งที่ 1 (ค่าปริมาณความชื้นที่ 1) จำนวนครั้งการเคาะ 30 - 35 ครั้ง ปริมาณความชื้น
  - ครั้งที่ 2 (ค่าปริมาณความชื้นที่ 2) จำนวนครั้งการเคาะ 25 - 30 ครั้ง
  - ครั้งที่ 3 (ค่าปริมาณความชื้นที่ 3) จำนวนครั้งการเคาะ 20 - 25 ครั้ง
  - ครั้งที่ 4 (ค่าปริมาณความชื้นที่ 4) จำนวนครั้งการเคาะ 15 - 20 ครั้ง ปริมาณความชื้น
- มาก



รูปที่ 2.14 แสดงการหาค่าพิกัดเหลวจากกราฟ Semi-Log  
(ที่มา : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ,2015)

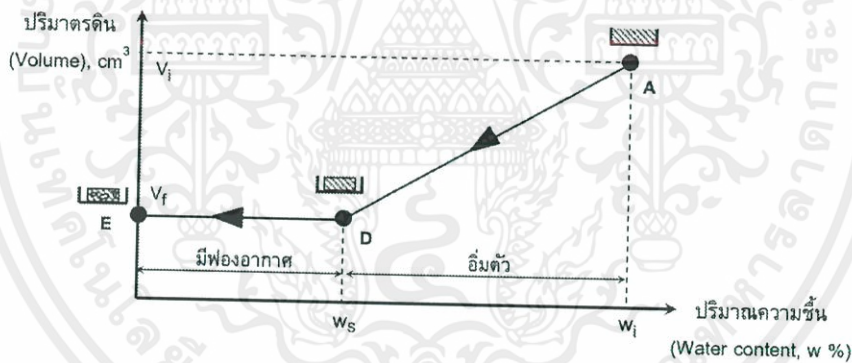
## 2.5.2 การหาค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit)

ค่า Plastic Limit เป็นค่าความชื้นในมวลดินซึ่งเมื่อถูกปั้นคลึงเป็นเส้นกลมยาวได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) แล้วจะเริ่มปรากฏรอยแตกปริโดยรอบผิวดินขึ้นพอดี ซึ่งในการปฏิบัติจริงทำได้ยากพอสมควร ต้องอาศัยความชำนาญกว่าจะได้ผลการทดลองที่น่าเชื่อถือได้

ค่าความชื้นในสถานภาพพลาสติกของดิน เรียกว่า Plasticity Index (P.I. หรือ  $I_p$ ) คือ ผลต่างของ L.L และ P.L มักเป็นตัวแสดงถึงความเหนียวของดิน และยังแสดงถึงความไวต่อการเปลี่ยนสภาพต่อความชื้นของมวลดินนั้น จึงเป็นค่าที่สำคัญมากในการจำแนกมวลดิน

## 2.5.3 การหาค่าพิกัดหดตัว (Shrinkage Limit)

การหาค่าพิกัดหดตัวเป็นค่าความชื้น ณ จุดที่มวลดินจะไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตรอีก แม้ว่าความชื้นในดินจะต่ำไปกว่านี้



รูปที่ 2.15 แสดงปริมาตรดินและปริมาณความชื้นที่จุดพิกัดหดตัว  
( ที่มา : [http://www.gerd.eng.ku.ac.th/Cai/Ch04/ch043\\_A\\_theory.htm](http://www.gerd.eng.ku.ac.th/Cai/Ch04/ch043_A_theory.htm) )

สมการการหาค่า Shrinkage Limit

$$w_s = w_i - \left( \frac{V_i - V_f}{M_s} \right) \times \rho_w \times 100\% \quad \dots$$

(2.5.1)

โดย  $w_s$  คือ ค่า Shrinkage Limit

$w_i$  คือ ค่าปริมาณความชื้นเมื่อเริ่มทำการทดลอง (ที่จุด A)

$V_i$  คือ ค่าปริมาตรดินเมื่อเริ่มทำการทดลอง (ที่จุด A)

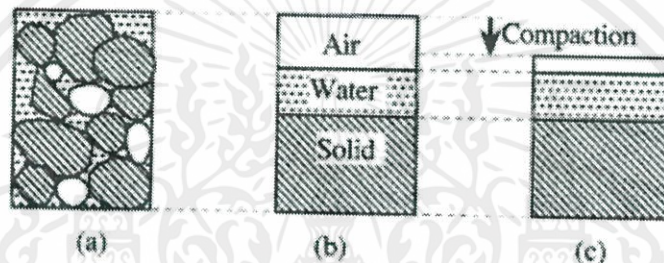
$V_f$  คือ ค่าปริมาตรดินเมื่อดินแห้ง (ที่จุด D หรือ จุด E)

$M_s$  คือ ค่ามวลดินแห้ง

$\rho_w$  คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ  $1,000 \text{ kg/m}^3$  หรือ  $1 \text{ g/cm}^3$

## 2.6 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction)

โครงสร้างของดิน ประกอบด้วย เม็ดดิน ช่องว่าง และน้ำ หลักการของการบดอัดดิน คือ การลดช่องว่างในมวลดิน ด้วยการเพิ่มปริมาณน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของมวลดิน และให้แรงจากภายนอกมากระทำกับมวลดิน เพื่อให้อนุภาคของเม็ดดินชิดติดกันมากขึ้น ขณะที่เม็ดดินยังคงมีปริมาตรเท่าเดิม มีเพียงแค่อากาศ ที่ถูกไล่ออกไปจากมวลดิน ดังรูปที่ 2.6.1



รูปที่ 2.16 การบดอัดดิน

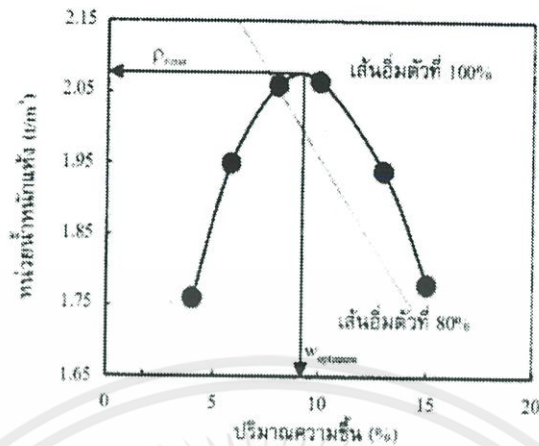
(ที่มา : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ,2015)

งานส่วนใหญ่ในทางวิศวกรรมโยธา เช่น งานเขื่อน ถนน สนามบินจะใช้ดินเป็นวัสดุถม (Fill Material) ซึ่งก่อนทำการก่อสร้างงานต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น จำเป็นต้องมีการบดอัดดินเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ คือ

1. ช่วยลดการทรุดตัวของดินในระยะยาว (Long Term Settlement)
2. ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน (Increase Shear Strength)
3. เพื่อลดความซึมของน้ำใต้ดิน (Decrease Soil Permeability)

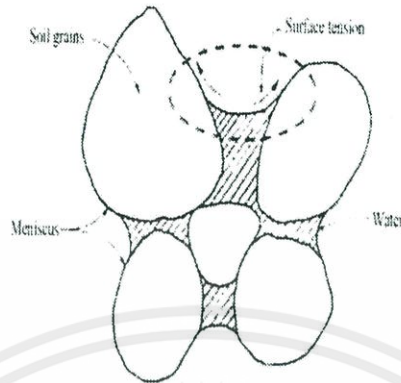
### 2.6.1 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)

ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความชื้นแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R.Proctor (1930) โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering New-Record (proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test



รูปที่ 2.17 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (ที่มา : โภคินทร์ ฐ้าเกตุ, 2554)

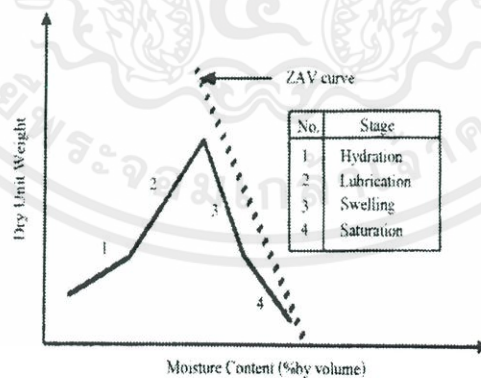
Proctor ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดเส้นการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 2.6.1 ไว้ว่าประสิทธิภาพของการบดอัดดินถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน โดยแบ่งการบดอัดดินเป็น 2 ด้านคือ ด้านแห้งและด้านเปียก สำหรับการบดอัดดินที่แห้งมากๆ ดินจะมีแรงเสียดทานที่สูงมาก เนื่องจากแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี (Capillary Moisture) ดังแสดงในรูปที่ 2.6.2 เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมากๆ น้ำจะไปลดแรงคาพิลลารีและเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย ถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกเรื่อยๆ จนน้ำไปสลายแรงเสียดทานได้แล้ว น้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จนถึงปริมาณน้ำที่เติมช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเรียกจุดที่ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดว่า Maximum Dry Density และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้ว่า Optimum Moisture Content หลังจากจุดนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินสูงมากๆ พบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป



รูปที่ 2.18 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ (ที่มา : โภคินทร์ ฐ้ำเกตุ, 2554)

### 2.6.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936)

Hogentogler นำเสนอเส้นกราฟการบดอัดที่แตกต่างกับ Proctor กล่าวคือ เขาได้นำเสนอเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) กับปริมาณความชื้นในรูปของปริมาณน้ำต่อปริมาตรรวม (Molding Moisture Content:  $V_w/V$ ) โดยลักษณะของเส้นกราฟแสดงด้วยเส้นตรง 4 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6.3 ซึ่งสาเหตุที่เขาได้นำเสนอการพล็อตเส้นกราฟแบบนี้เนื่องจากเขาพบว่าน้ำมีบทบาทอยู่ 4 ส่วน แบ่งได้เป็น 4 ช่วงที่มีผลทำให้ดินเกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด และทำให้โครงสร้างของดินบดอัดมีความแตกต่างกันโดยมีรายละเอียดแต่ละช่วง



รูปที่ 2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นนำเสนอโดย Hogentogler (ที่มา : โภคินทร์ ฐ้ำเกตุ, 2554)

1. Hydration Stage เขากล่าวว่าในช่วงนี้น้ำจะถูกดูดซึมโดยอนุภาคของดินในลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ห่อหุ้มอนุภาคดินในลักษณะเดียวกับเมื่อพรมน้ำลงไปบนดินแห้งในช่วงแรกอนุภาคดินจะถูกดูดซึมน้ำทันทีเพื่อไปห่อหุ้มอนุภาคดินก่อน โดยน้ำส่วนกลางที่จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นนั้นยังไม่มี
2. Lubrication Stage ในช่วงนี้น้ำจะมีบทบาทเป็นสารหล่อลื่น เป็นผลให้ดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะที่มวลดินมีความแน่นขึ้น โดยยังคงมีอากาศอยู่ในมวลดินบางส่วน นั่นหมายถึงความหนาแน่นแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อถึงจุดปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content; O.M.C.) จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าสูงสุด (Maximum Dry Density)
3. Swelling Stage ในช่วงนี้เกิดจากการเติมน้ำที่เกินปริมาณน้ำที่เหมาะสม อากาศในส่วนที่มีอยู่จะไม่มีเปลี่ยนแปลง เนื่องจากปริมาตรของมวลดินมีค่าน้อยอยู่แล้วและอยู่ในสภาพที่แน่น ซึ่งจะไม่ให้อากาศที่มีอยู่ออกไป ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกมวลดินจึงเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรอากาศคงที่อากาศที่มีอยู่ออกไป ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก มวลดินจึงเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรอากาศคงที่
4. Saturation Stage ในช่วงนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก น้ำจะเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างที่เหลืออยู่ในมวลดิน เป็นผลให้ระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นอากาศเป็นศูนย์ (Zero Air Void; ZAV)

ดังที่ Hogentogler ได้อธิบายไว้ข้างต้น มักจะประยุกต์ใช้โดยตรงกับดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับ Proctor

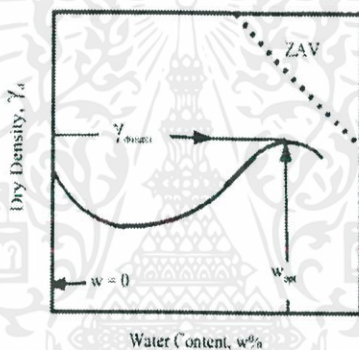
#### 2.6.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (ที่มา : 1942)

Buchanan ได้อธิบายเส้นกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบ โดยเขาพบว่า นอกจากจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ปรากฏบนเส้นกราฟการบดอัดแล้ว ก่อนถึงตำแหน่งของการบดอัดจะมีจุดที่แสดงถึงค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 2.6.5 ซึ่งเขาได้อธิบายถึงช่วงที่ดินมีความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดที่มีความหนาแน่นแห้งต่ำสุดว่า ถ้าหากเริ่มบดอัดดินเม็ดหยาบที่แห้งมากๆ หรือดินที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์ เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงแรกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดความหนาแน่นแห้งต่ำสุด เมื่อเลยจุดนี้ไปก็จะเข้าสู่เส้นกราฟการบดอัดปกติ ซึ่งถ้าสังเกตจากเส้นกราฟพบว่า เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งที่จุดปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์กับจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด จะมีช่วงความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย และเขาได้กล่าวในเชิงวิชาการไว้ว่า สำหรับกรณีของทรายที่มีความแห้งมากๆ เมื่อเติมน้ำในช่วงแรก อนุภาคดินจะจับตัวกันด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ของน้ำในลักษณะคล้ายกระดูกงูของก้อนดินหรือทรายรอบตัวเอง ที่เรียกว่า Arching Effect ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินมากขึ้น โดย Arching Effect จะพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่มีความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ดังนั้นปฏิกิริยาของน้ำที่เติมในช่วงแรกๆ จะแตกต่างจากกรณีของ Hogentogler และ Proctor เนื่องจากดินทรายไม่มีประจุลบ ดังนั้นเมื่อเติมน้ำจะเกิดแรงดึงผิวทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี 33 หน้าไปใช้

เกิดแรงยึดแน่นปรากฏ (Apparent Cohesion) และเมื่อเติมน้ำมากขึ้นแผ่นฟิล์มจะมีความหนาขึ้น มีผลทำให้ Arching Effect ลดน้อยลงไป เป็นผลให้แรงดึงดูดของแรงดึงผิวลดลงตามลำดับ แล้วอนุภาคดินก็เริ่มจัดเรียงตัวกันใหม่ และหลังจากนั้นก็จะเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้วแต่เขาได้ให้ความหมายของ O.M.C. แตกต่างจากคนอื่น กล่าวคือ O.M.C. คือ น้ำที่มีอยู่พอดีในมวลดินบดอัดที่ทำให้ดินอยู่ในสภาพที่เปสลายแรงดึงผิวพอดี ที่เรียกว่า Neutralizes Surface Tension และเมื่อมีพลังงานบดอัดมากกระทำ จึงทำให้ทรายจัดเรียงตัวกันใหม่ทำให้ทรายแน่นขึ้น จนสุดท้ายถึงจุดที่ความหนาแน่นแห่งสูงสุด เมื่อน้ำสูงขึ้นเกิน O.M.C. ดินก็จะอ่อนตัวลง เป็นผลให้ความหนาแน่นแห่งลดลงโดยสรุปแล้ว ในการบดอัดดินทราย การที่จะให้ได้ความหนาแน่นแห่งค่อนข้างดี คือช่วงที่ทรายแห้งมากๆ และช่วงความชื้นที่ค่อนข้างน้อยทางด้านเปียกไปแล้ว

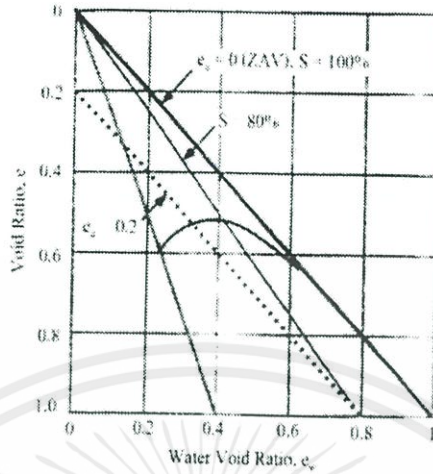


รูปที่ 2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห่งและปริมาณความชื้นน้ำเสนอโดย Buchanan (ที่มา : โภคินทร์ ฐิฎาเกตุ, 2554)

### 2.6.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956)

เขาได้นำเสนอแนวความคิดใหม่ โดยวางอยู่บนพื้นฐานของแรงดันน้ำในช่องว่าง (Pore Water Pressure) และแรงดันอากาศในช่องว่าง (Pore Air Pressure) ที่มีอยู่ในมวลดินที่บดอัด เขากล่าวไว้ว่า ดินแห้งเป็นดินที่บดอัดได้ยาก เนื่องจากภายในมวลดินมีแรงเสียดทานมากซึ่งเกิดจากแรงคาพิลลารี อย่างไรก็ตาม ในช่วงที่ดินมีความแห้งมากๆ มวลดินจะมีช่องว่างอยู่มาก การบดอัดจึงไปไล่อากาศให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเติมน้ำเพิ่มขึ้นแรงดึงผิวก็จะลดลง ทำให้แรงเสียดทานลดลงด้วยความแน่นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปจนกระทั่งถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสม (O.M.C.) ก็จะได้ค่าความหนาแน่นแห่งสูงสุด (Maximum Dry Density) เขากล่าวว่า ประสิทธิภาพที่น้อยลงไปจากการบดอัดเมื่อเติมน้ำเลยจุด O.M.C. เนื่องจากอากาศถูกกักเอาไว้และเกิดการสะสมกันเป็นแรงดันอากาศในมวลดิน เขาได้เสนอเส้นกราฟการบดอัดโดยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio; e) และอัตราส่วนน้ำในช่องว่าง (Water Void Ratio; ew) ดังแสดง

ในรูปที่ 2.6.6



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอโดย Hilf (ที่มา : โภคินทร์ ฐ้ำเกตุ, 2554)

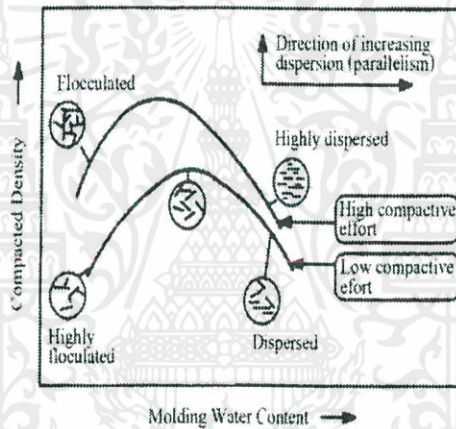
โดยพบว่าที่จุด O.M.C. ค่าอัตราส่วนช่องว่างจะมีค่าน้อยที่สุด โดยจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟเป็นจุดที่ค่าอัตราส่วนช่องว่างมาก และมีค่าระดับความอิ่มตัวน้อย เมื่อบดอัดไปก็จะได้ค่าอัตราส่วนช่องว่างที่น้อยที่สุด ซึ่งจุดนี้สามารถหาค่าสัดส่วนของอากาศได้ด้วยและพบว่าที่ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ค่าระดับความอิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 วิธีของ Hilf ทำให้ง่ายต่อการหาค่าระดับความอิ่มตัวที่จุดต่างๆ บนเส้นกราฟการบดอัด และสามารถหาปริมาณอากาศที่ความชื้นต่างๆ ได้ด้วย

### 2.6.6 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985)

เขาได้เริ่มนำผลจากการดูโครงสร้างภายในดินเปรียบเทียบกับความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัด โดยเขาสนใจว่าคุณสมบัติของดินที่บดอัดทางด้านเปียกและทางด้านแห้งมีความแตกต่างกันเกิดจากสาเหตุใด เขาสังเกตจากปัจจัยหลายๆ อย่างพบว่าในความเป็นจริงแล้วการบดอัดในสนามไม่สามารถบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ดังนั้นในการเติมน้ำจะมีช่วงหนึ่งที่มีเมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงนี้แล้วคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเป็นไปตามที่ต้องการ แต่เมื่อเติมน้ำเกินช่วงนี้ไปเป็นช่วงที่เขาไม่แนะนำ ซึ่งเขาให้เหตุผลจากการพิจารณาโครงสร้างภายในของดินเหนียวพบว่า ในช่วงการบดอัดดินทางด้านแห้ง ลักษณะโครงสร้างของดินจับตัวกันเป็นกระจุก โดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นเดียวกัน การใช้พลังงานบดอัดต่ำความเป็นกระจุกของดินมีมาก และจะน้อยลงเมื่อใช้พลังงานการบดอัดที่สูงเป็นผลให้โครงสร้างของดินชิดกันมากขึ้นด้วย เมื่อเติมน้ำเข้าไปโดยที่พลังงานคงที่ สังเกตเห็นว่าโครงสร้างของดินแน่นขึ้น อัตราส่วนช่องว่างลดลงจนกระทั่งเกินจุด O.M.C. ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างดินจะเป็นแบบขนานกันมากขึ้นเมื่อความชื้นยิ่งมากขึ้น ความเป็นระเบียบของโครงสร้างดินก็ยิ่งมากขึ้นตาม การที่โครงสร้างดินจัดเรียงตัวกันในแนวขนานถือว่าไม่ดี เพราะว่าเป็นระนาบที่อ่อนแอที่สุด โดยสรุปแล้วเขาพยายามตอบคำถามว่าทำไมจุดที่มีความหนาแน่นแห้งเท่ากันแต่ปริมาณน้ำไม่เท่ากัน เมื่อเขาใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูพบว่าการบดอัดดินในด้านแห้งมีผลทำให้โครงสร้างดิน

เป็นแบบระเกะระกะ (Flocculated Structure) ในทางตรงกันข้าม เมื่อเติมน้ำเกินจุด O.M.C. เป็นการบดอัดทางด้านเปียก มีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบขนาน (Dispersed Structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.6.7 เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นแห้งเท่ากัน โดยเปรียบเทียบดินบดอัดทางด้านแห้งกับดินบดอัดทางด้านเปียกพบว่า

- กำลังของดินสูงกว่า เนื่องจากความเครียด (Strain) ของดินต่ำกว่า
- ค่าความชื้นได้ของน้ำสูงกว่า เนื่องจากในมวลดินมีช่องว่างมากกว่า
- มีการหดตัวน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณน้ำในมวลดินมีน้อยกว่า
- มีค่าการบวมตัวมากกว่า เนื่องจากมีช่องว่างที่น้ำสามารถสัมผัสกับพื้นผิวได้มากกว่า



รูปที่ 2.22 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน (ที่มา : โภคินทร์ ฐ้ำเกตุ, 2554)

### 2.6.7 การบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

การบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ (Compaction Test) คือ การศึกษาหาความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ที่ทำให้เกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) หลังการบดอัดดิน เนื่องจากในระหว่างก่อสร้าง จำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพงานบดอัดดิน เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าดินในโครงการก่อสร้าง มีความหนาแน่นเพียงพอ และมีคุณภาพเหมาะสมเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงต้องมีการนำตัวอย่างดิน ซึ่งเป็นดินที่มาจากแหล่งเดียวกับที่ใช้ในโครงการก่อสร้างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้ไปใช้เพื่อเปรียบเทียบกับ การบดอัดดินในสนาม ในปี ค.ศ. 1930 R.R. Proctor ได้พัฒนาทฤษฎี การบดอัดดิน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น และความหนาแน่นของดิน ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวเป็นวิธีที่ใช้ทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการจนถึงปัจจุบัน เรียกว่า วิธีทดสอบแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางวิศวกรรมโยธาทั่วไป แต่ในปัจจุบันยานพาหนะ ได้ถูกพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับโครงการก่อสร้างต่างๆมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลทำให้ดินที่นำมาบดอัดในโครงการก่อสร้างต่างๆ ต้องรับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีการพัฒนาวิธีการทดสอบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี 36 หน้าไปใช้

เรียกว่า วิธีทดสอบแบบโมดิฟายด์ (Modified Proctor Test) โดยเพิ่มพลังงาน ในการบดอัดดินให้มากขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับน้ำหนักของยานพาหนะ และโครงสร้างที่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น

| วิธีทดสอบ                                     | วิธีทดสอบแบบมาตรฐาน<br>(Standard Proctor Test) | วิธีทดสอบแบบโมดิฟายด์<br>(Modified Proctor Test) |
|---|--|--|
| น้ำหนักตัมบดอัด (lb)                          | 5.5  | 10.0   |
| ระยะยก (in)                                   | 12   | 18   |
| จำนวนครั้งในการตอก/ชั้น                       | 25   | 25   |
| จำนวนชั้นในการบดอัดดิน                        | 3  | 5  |
| พลังงานในการบดอัดดิน (ft-lb/ft <sup>3</sup> ) | 12,400   | 56,200   |

ตารางที่ 2.11 ตารางเปรียบเทียบวิธี Standard Proctor Test และ Modified Proctor Test (ที่มา : ศลิษา ไชยพุทธ, 2561)

## 2.6.8 เส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction Curve)

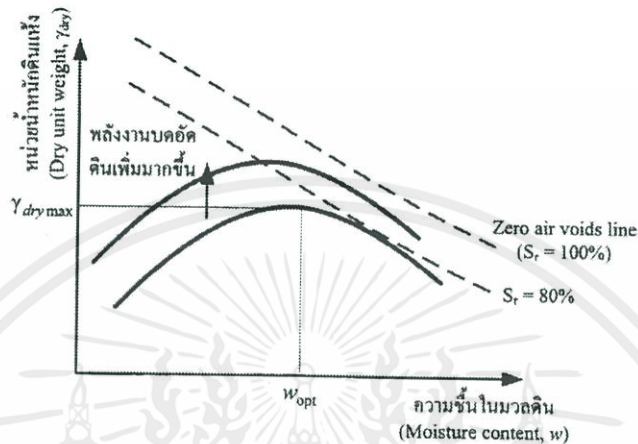
ทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ในงานบดอัดดิน คือ สมการความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับระดับชั้นความอืดตัวด้วยน้ำ

$$\gamma_{dry} = \left( \frac{G_s}{1+e} \right) \gamma_w = \left( \frac{G_s}{1 + \frac{wG_s}{S_r}} \right) \gamma_w \quad \dots (2.6.1)$$

การบดอัดดินให้แน่นที่สุดในทางทฤษฎีคือ การพยายามทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งมากที่สุด ( $\gamma_{dry\ max}$ ) ถ้าพิจารณาจากสมการที่ 2.6.1 การที่ดินจะมีหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดนั้นดินจะต้องมีอัตราส่วนช่องว่างต่ำที่สุด ( $e_{min}$ ) และจากความสัมพันธ์ที่ว่า  $e = wG_s/S_r$  การจะควบคุมให้  $e_{min}$  นั้นจะต้องให้ดินมีค่า  $S_r = 1$  และ  $w = w_{opt}$  (optimum water content) กล่าวคือ

1.  $S_r = 1$  หมายถึง ดินจะต้องอยู่ในสภาพอืดตัวด้วยน้ำ
2.  $w_{opt}$  หมายถึง ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ไม่แห้งจนเกินไป (เพราะถ้าแห้งไปดินจะไม่อยู่ในสภาพอืดตัวด้วยน้ำ) และไม่มากจนเกินไป (เพราะจะทำให้อัตราส่วนช่องว่างมากขึ้น)

ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในมวลดิน (แกนนอน) มาเขียนกับหน่วยน้ำหนักดินแห้ง (แกนตั้ง) ของการบดอัดดิน ซึ่งเรียกว่าเส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction Curve) ดังรูปที่ 2.6.8



รูปที่ 2.23 เส้นโค้งการบดอัดดิน (ที่มา : โภคินทร์ ฐ้าเกตุ, 2554)

จากเส้นโค้งการบดอัดดินในรูปที่ 2.6.8 พบว่าหน่วยน้ำหนักดินแห้งในตอนแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด (maximum Dry Unit Weight,  $\gamma_{dry\ max}$ ) และเรียกปริมาณน้ำ ณ จุดนี้ว่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Water Content,  $w_{opt}$ ) และเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าจุดนี้จะทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งลดลง

ในทางปฏิบัติแล้ว การที่จะบดอัดดินให้อยู่ในสภาพทางทฤษฎีนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าการบดอัดดินนอกจากจะขึ้นกับปริมาณน้ำแล้ว ยังขึ้นกับระดับพลังงานกล (Mechanical Energy) ที่กระทำกับดินที่บดอัดอีกด้วย โดยพลังงานที่ให้กับดินขณะทำการบดอัดจะต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะขับไล่ฟองอากาศให้ออกจากมวลดิน จนทำให้ดินอยู่เข้าใกล้สภาวะไร้ช่องว่างอากาศ (Zero Air Voids) จากรูปที่ 2.6.8 เมื่อเพิ่มพลังงานการบดอัดดิน จะพบว่าเส้นโค้งการบดอัดดินจะเคลื่อนตัวมาทิศทางบนซ้าย โดยหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด จะมีค่ามากขึ้น แต่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม  $w_{opt}$  จะมีค่าลดลง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเส้นโค้งการบดอัดดินจะถูกควบคุมด้วยเส้นไร้ช่องว่างอากาศ (Zero Air Voids Line) เส้นโค้งการบดอัดดินจะไม่ตัดเส้นไร้ช่องว่างอากาศ สมการเส้นไร้ช่องว่างอากาศจะหาได้จากสมการที่ 2.6.1 และแทนค่า  $S_r = 1$  นั่นคือ

Zero Air Void Line: 
$$\gamma_{dry} = \left( \frac{G_s}{1+wG_s} \right) \gamma_w \quad \dots (2.6.2)$$

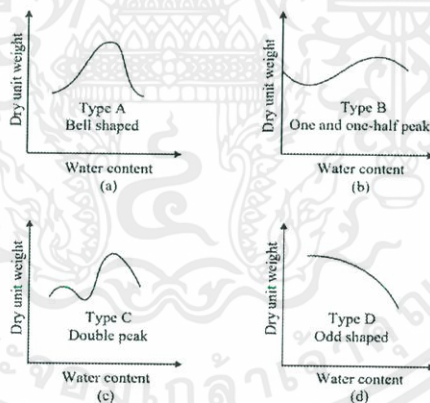
### 2.6.8.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน

ดังได้อธิบายแล้วข้างต้นว่าปริมาณความชื้นในดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อความหนาแน่นของดินบดอัดนอกเหนือจากปริมาณความชื้นแล้ว ยังมีปัจจัยอีกสองปัจจัย ซึ่งก็คือชนิดของดิน และพลังงานในการบดอัด

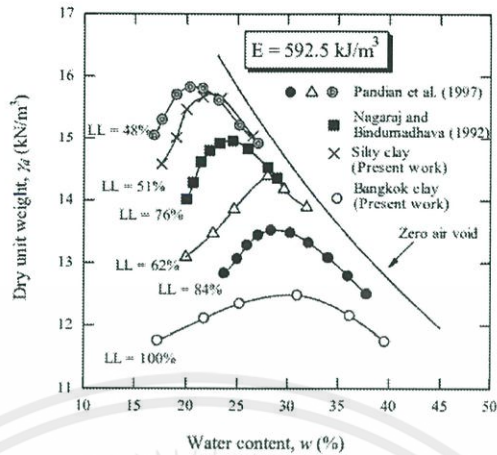
### 2.6.8.2 ชนิดของดิน

ชนิดของดินในที่นี้ครอบคลุมถึงการกระจายของเม็ดดิน รูปร่างของเม็ดดินความถ่วงจำเพาะของดินและปริมาณและชนิดของแร่ดินเหนียว

Lee and Suedkamp (1972) ศึกษากราฟการบดอัดดินของดินที่แตกต่างกัน 35 ชนิด และพบว่ากราฟเหล่านั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.6.9 ชนิด A เป็นกราฟที่มีจุดยอดเพียงจุดเดียว โดยทั่วไปมักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวประมาณร้อยละ 30-70 ชนิด B คือกราฟที่มี 1 จุดยอด และครึ่งจุดยอด ชนิด C คือกราฟที่มีสองจุดยอด กราฟชนิด B และ C มักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวน้อยกว่าร้อยละ 30 ชนิด D คือกราฟที่ไม่แสดงจุดยอดที่ชัดเจน ดินที่มีขีดจำกัดเหลวมากกว่าร้อยละ 70 อาจแสดงลักษณะกราฟเป็นแบบชนิด C หรือ D ซึ่งเป็นลักษณะกราฟที่ไม่ค่อยพบเห็น



รูปที่ 2.24 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ (ที่มา : โภคินทร์ ฐ้ำเกตุ, 2011)



รูปที่ 2.25 กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ที่มา : Horpibulsuk et al., 2005)

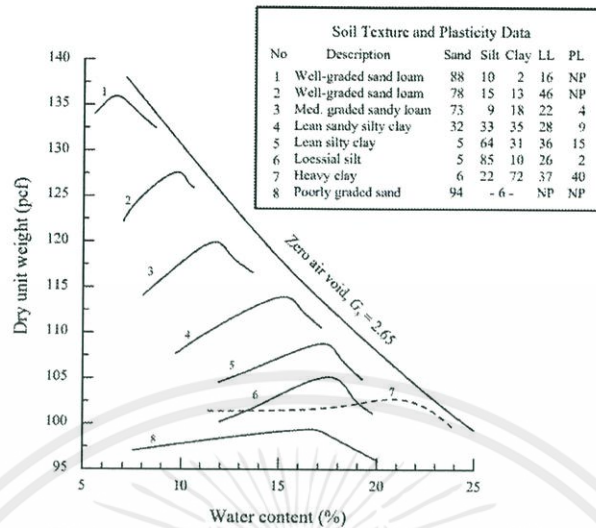
Gurtug and Sridharan (2002) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเม็ดละเอียด (Fine-Grained Soil) ที่บดอัดแบบวิธีมาตรฐาน (Standard Proctor Test) มีความสัมพันธ์โดยตารางกับพิกัดพลาสติก ดังนี้

$$O.M.C. = 0.92PL \quad \dots \quad (2.6.3)$$

$$\gamma_{d \max} = 0.98\gamma_{dPL} \quad \dots \quad (2.6.4)$$

เมื่อ  $\gamma_{dPL}$  คือหน่วยน้ำหนักแห้งที่พิกัดพลาสติก คำนวณโดยสมมติว่าพิกัดพลาสติกมีระดับความอึดตัวด้วยน้ำ เท่ากับร้อยละ 100 ความสัมพันธ์นี้ช่วยให้สามารถประมาณจุดเหมาะสม (Optimum point) ได้อย่างทันที เมื่อทราบค่า

รูปที่ 2.6.11 แสดงอิทธิพลของชนิดของดินต่อลักษณะการบดอัด กราฟการบดอัดมีลักษณะแบนสำหรับทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ (Uniformly Graded Sand) ในทางตรงกันข้ามทรายที่มีขนาดคละดี (Well-Graded Sand) จะแสดงผลทดสอบที่มีจุดยอดอย่างเห็นได้ชัดสำหรับดินเม็ดละเอียดดินที่มีขีดจำกัดเหลวสูง จะมีหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำ และปริมาณความชื้นเหมาะสมสูง ดินตะกอนจะแสดงกราฟที่เห็นจุดยอดได้ชัดเจน ขณะที่กราฟการบดอัดดินเหนียวจะมีลักษณะแบน ดินตะกอนเป็นดินที่ไวต่อปริมาณความชื้น กล่าวคือสำหรับพลังงานบดอัดค่าหนึ่ง ปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะมีผลอย่างมากต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง ส่วนดินเหนียวเป็นดินที่ไวต่อพลังงาน การเปลี่ยนแปลงพลังงานการบดอัดเพียงเล็กน้อยมีผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักแห้งอย่างมาก



รูปที่ 2.26 อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (ที่มา : Johnson and Sallberg. 1960)

### 2.6.9 พลังงานการบดอัด

พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย (E) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E = \frac{NB \times NL \times W \times H}{V_{(m)}} \quad \dots (2.6.5)$$

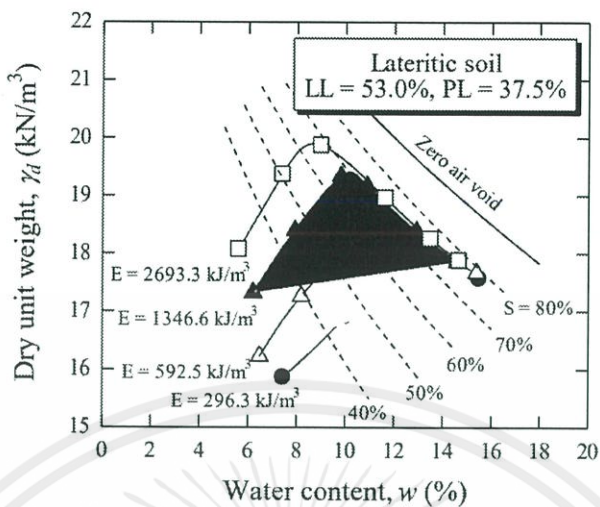
เมื่อ  $NB$  = จำนวนการตกระทบของค้อนใน 1 ชั้น (number of blows per layer)

$NL$  = จำนวนชั้นของการบดอัด (number of layers)

$W$  = น้ำหนักของค้อน (weight of hammer)

$H$  = ระยะตกระทบของค้อน (height of drop of hammer)

ถ้าพลังงานการบดอัดเปลี่ยนไป กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งจะเปลี่ยนแปลงด้วย รูปที่ 2.6.12 แสดงผลทดสอบการบดอัดของดินลูกรัง จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่พลังงานบดอัดต่างๆ ดินลูกรังประกอบด้วยกรวดเป็นมวลหลักในปริมาณร้อยละ 70 ส่วนที่เหลือเป็นทราย ดินตะกอน และดินเหนียว ดินนี้จัดอยู่ในกลุ่ม SC โดยการจำแนกตามระบบ Unified (USCS)



รูปที่ 2.27 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (ที่มา : Horpibulsuk et al., 2004)

จากรูปที่ 2.6.12 เราสามารถสรุปได้ว่า

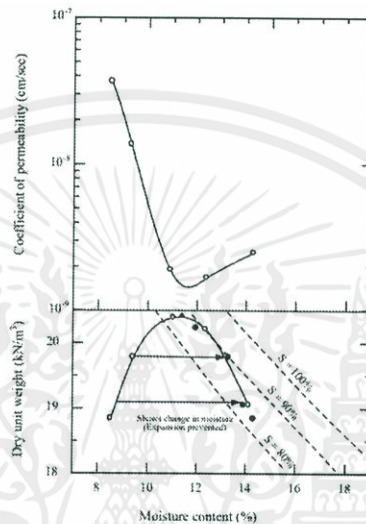
1. หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้น
2. ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มของพลังงานการบดอัด

### 2.6.10 การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม

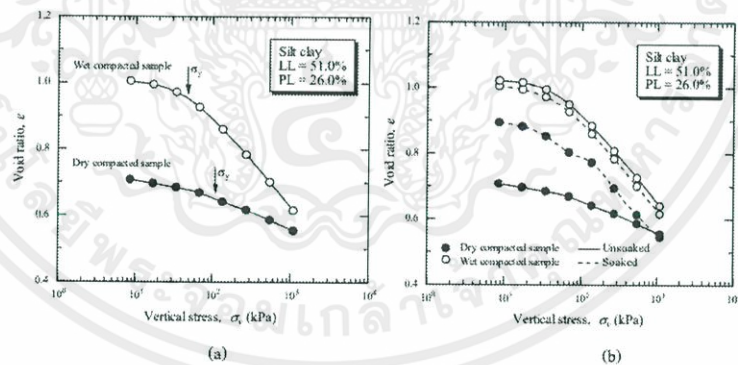
ในกรณีของดินเหนียว การเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นส่งผลให้ความสามารถในการไหลซึมลดลงในด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม (Dry Side of Optimum Moisture Content) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีค่ามากขึ้นในด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 2.6.13 นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัดจะช่วยลดสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เพราะเป็นการช่วยเพิ่มความหนาแน่นแห้งสูงสุด

เพื่อความเข้าใจถึงลักษณะการอัดตัวของดินบดอัด ผู้เขียนได้ทำการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอน ที่เก็บจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และนำเสนอผลทดสอบดังรูปที่ 2.6.14 ซึ่งแสดงอิทธิพลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อการทรุดตัวของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัดสองตัวอย่างที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน (ร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) ตัวอย่างหนึ่งบดอัดที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม อีกตัวอย่างบดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จากผลทดสอบพบว่าดินที่บดอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมมีความสามารถด้านการทรุดตัวมากกว่า ดังจะเห็นได้จากความชันของกราฟมีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ดินที่บดอัดที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมยังมีค่าความเค้นคราก ( $\sigma_y$ ) สูงกว่าแต่อย่างไรก็ตาม ดินบดอัดที่

ด้านข้างจะได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (Expansive due to Wetting) ในขณะที่ ดินบดอัดด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จะเกิดการหดตัวเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น แต่อิทธิพลของการเพิ่มปริมาณความชื้นมีน้อยมาก เนื่องจากดินบดอัดด้านเปียกมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำใกล้เคียงร้อยละ 100 ดังแสดงในรูปที่ 2.6.14b



รูปที่ 2.28 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (ที่มา : Lambe, 1962)

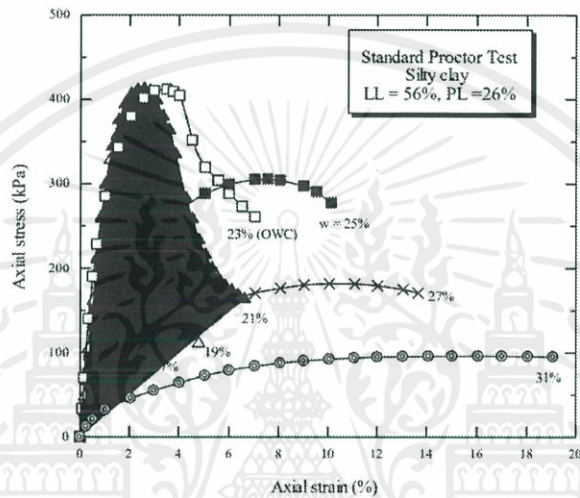


รูปที่ 2.29 ลักษณะการหดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวบดอัดที่ด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณ ความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (ที่มา : สุขสันต์, 2545)

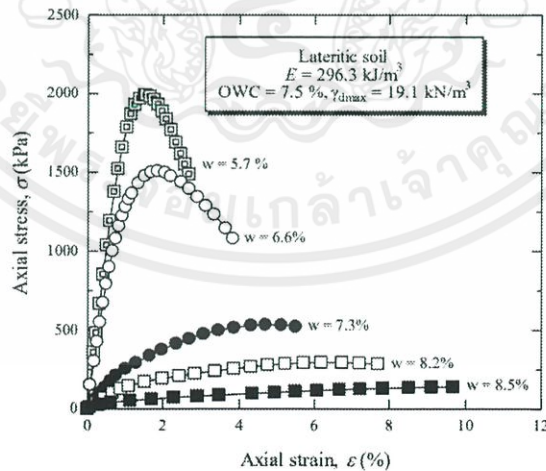
อิทธิพลของปริมาณความชื้นต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินบดอัดจะมีความแตกต่างกันตามแต่ชนิดของดิน (ดูรูปที่ 2.6.15 และ 2.6.16) สำหรับดินเม็ดละเอียด (รูปที่ 2.6.15) ดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านแห้งจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากนี้ดินบดอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมี

ค่าความเครียดที่จุดวิบัติต่ำกว่าดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านเปียก ดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จะแสดงพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว (Ductile)

สำหรับดินเม็ดหยาบ (รูปที่ 2.6.16) กำลังอัดแกนเดียวของดินบดอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มที่จะมีคุณสมบัติแบบแตกง่าย (Brittle) มากกว่าด้านเปียกเช่นเดียวกับดินเม็ดละเอียดแต่กำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบที่ด้านแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น และมีค่ามากที่สุดปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม



รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัด (ที่มา : สุขสันต์ 2545)



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินลูกรังบดอัด

### 2.6.11 ปรัชญาการבודัดงานเชื่อมและงานถนน

สำหรับดินฐานราก (ดินเดิม) ที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูง และมีการอัดตัวต่ำควรทำการבודัดดินถมที่ด้านข้างของปริมาณความชื้นเหมาะสม ในการבודัดแบบนี้ นอกจากความดันน้ำส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการבודัดจะมีค่าต่ำแล้วกำลังต้านทานแรงเฉือนรวมทั้งสติฟเนส (Stiffness) ของดินบอดัดจะมีค่าสูง

ในพื้นที่ที่ดินฐานรากเป็นดินอ่อนควรทำการבודัดดินถมที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมถึงแม้ว่าการבודัดแบบนี้จะก่อให้เกิดความดันน้ำส่วนเกินที่มาก และดินบอดัดมีกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ค่อนข้างต่ำ แต่ดินบอดัดจะมีความยืดหยุ่นสูง และสามารถต้านทานการทรุดตัวที่แตกต่าง (Differential Settlement) ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการทรุดตัวอย่างมากของดินฐานรากสำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับการเก็บกักน้ำ ควรבודัดดินถมที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม เนื่องจากดินบอดัดมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำ และมีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำดังนั้นสามารถป้องกันการลดลงของกำลังต้านทานแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวด้วยน้ำ (Strength Reduction and Volume Change due to Wetting)

## 2.7 การทดสอบ California bearing ratio (C.B.R.)

การทดสอบ California Bearing Ratio หรือเรียกสั้น ๆ ว่าการทดสอบ C.B.R. เป็นการทดสอบเพื่อหาลำกำลังรับน้ำหนักของดินที่บอดัดแน่น ทั้งวิธีการบอดัดแบบมาตรฐานและวิธีแบบสูงกว่ามาตรฐานด้วยการใช้ท่อนเหล็กพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 19.35 ตารางเซนติเมตรกดบนตัวอย่างดินที่ทำการบอดัดในแบบโมลที่เตรียมไว้ด้วยความเร็ว 0.05 นิ้วต่อนาทีแล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ได้จากการทดสอบกับวัสดุหินคลุกบอดัดแน่นบนพื้นฐานการทดสอบที่เหมือนกัน การใช้เครื่องมืออุปกรณ์การบันทึกข้อมูลและการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์

ในปี คศ.1992 California Division of Highway ได้กำหนดวิธีทดสอบการจำแนกคุณสมบัติของดินเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมในการก่อสร้างถนน และในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง จำเป็นต้องพัฒนาการก่อสร้างสนามบิน เพื่อรับน้ำหนักของเครื่องบินรบที่บรรทุกอาวุธจำนวนมาก หน่วยทหารช่างของสหรัฐอเมริกาได้นำวิธีการทดสอบคุณสมบัติแบบ C.B.R. มาใช้ในการออกแบบก่อสร้างทางวิ่งของสนามบิน จุดประสงค์ของการบอดัดดินเพื่อต้องการให้ได้กำลังของดินเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลกับการไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน การทรุดตัวและการบวมตัวของดินต่อมาเป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทั่วไปสำหรับชั้นคันทาง ชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง โดยในแบบก่อสร้างทั่วไปจะกำหนดความหนาแน่นของชั้นดินที่จะบอดัดในแต่ละชั้นเป็น % C.B.R. โดยถ้า % C.B.R. ที่ถูกกำหนดมีค่ามากเท่าใดก็แสดงว่าชั้นดินนั้นต้องบอดัดให้แน่นมากขึ้นไปด้วย การทดสอบ C.B.R. เป็นการหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินหรือหินคลุกที่บอดัดแล้ว โดยค่าที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ในรูปของหน่วยแรงต้านทานของตัวอย่างดินทดสอบที่บอดัดต่อหน่วยน้ำหนัก

มาตรฐานของหินคลุกบดอัดในระดับความลึกหรือระยะจมของแท่งกด (Penetration Piston) ที่เท่ากันแล้วเปรียบเทียบออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์

การทดสอบ C.B.R. กับตัวอย่างดินทันทีที่ทำการบดอัดเสร็จนั้นถ้ามวลดินมีปริมาณน้ำในดินต่ำกว่าค่าปริมาณน้ำในดินที่ทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (O.M.C.) ผลที่ได้จะมีค่า C.B.R. สูงกว่ามวลดินที่บดอัดโดยมีปริมาณน้ำในดินสูงกว่าค่า O.M.C. ถ้านำดินที่บดอัดไปแช่น้ำ 4 วันค่า C.B.R. ที่ใกล้เคียงกับ O.M.C. จะมีค่า C.B.R. สูงสุด การบวมตัวของดินเมื่อแช่น้ำก่อนการทดลอง C.B.R.

### 2.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น

ในการทดลองการบดอัดดินแบบมาตรฐานหรือสูงกว่ามาตรฐานนั้นจะได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำ ที่ทำให้ดินแน่นที่สุด ซึ่งดินตัวอย่างแต่ละชนิดจะได้ค่าความหนาแน่นสูงสุดไม่เท่ากันการทดลองหาค่า C.B.R. นั้นเป็นการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดแต่ละชนิด โดยทั่วไปพบว่าถ้าความหนาแน่นแห้งสูงก็จะได้ค่า C.B.R. สูงตามไปด้วย ซึ่งสมบัติของดินที่เหมาะสมในการใช้งาน ด้านงานวิศวกรรมทางจะพิจารณาจากค่าของ C.B.R. ของดินการทดสอบ C.B.R. เป็นวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินบดอัดแน่น ด้วยการใช้แท่งกดขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว กดลงบนตัวอย่างดิน โดยถ้า % C.B.R. ที่ถูกกำหนดมีค่ามากเท่าใดก็แสดงว่าชั้นดินนั้นต้องบดอัดให้แน่นมากขึ้นตามไปด้วยการทดสอบ C.B.R. เป็นการหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินแล้วเปรียบเทียบออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์โดยค่าหน่วยน้ำหนักมาตรฐาน ได้ถูกกำหนดเป็นค่ามาตรฐานโดย California Division of Highway ดังตารางที่ 2.7.1

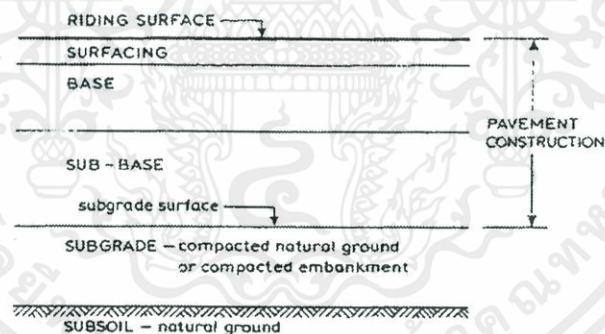
| ระยะจม (Penetration) | น้ำหนักมาตรฐาน (Standard Load) | หน่วยน้ำหนักมาตรฐาน (Standard Unit Load)                     |
|----------------------|--------------------------------|--|
| 2.54 มม. (0.1 นิ้ว)  | 1,360.8 กก. (3,000 ปอนด์)      | 70.30 กก./ซม. <sup>2</sup> (1,000 ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup> )  |
| 5.08 มม. (0.2 นิ้ว)  | 2,041.2 กก. (4,500 ปอนด์)      | 105.46 กก./ซม. <sup>2</sup> (1,500 ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup> ) |
| 7.62 มม. (0.3 นิ้ว)  | 2,852.5 กก. (5,700 ปอนด์)      | 133.59 กก./ซม. <sup>2</sup> (1,900 ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup> ) |
| 10.16 มม. (0.4 นิ้ว) | 3,129.8 กก. (6,900 ปอนด์)      | 161.71 กก./ซม. <sup>2</sup> (2,300 ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup> ) |
| 13.71 มม. (0.5 นิ้ว) | 3,538.0 กก. (7,800 ปอนด์)      | 182.81 กก./ซม. <sup>2</sup> (2,600 ปอนด์/นิ้ว <sup>2</sup> ) |

ตารางที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ของ % C.B.R.และการใช้งาน

เราสามารถกำหนดคุณสมบัติของดินจากค่า C.B.R. ว่าเหมาะที่จะนำไปใช้งานถนนหรือไม่ และเหมาะที่จะใช้ในชั้นใดของงานทางจากตารางที่ 2.7.2

| C.B.R. %   | คุณสมบัติเหมาะสมทางวิศวกรรม |                                | การจำแนกดิน<br>ความเหมาะสม การใช้งาน ระบบ<br>Unified |
|------------|-----------------------------|--------------------------------|--|
|            | ความเหมาะสม                 | การใช้งาน                      |  |
| 0-3        | ใช้ไม่ได้                   | วัสดุใช้คันทาง                 | OH,CH,MH,OL  |
| 3-7        | ไม่ดีถึงพอใช้               | วัสดุชั้นทาง                   | OH,CH,MH,OL  |
| 7-20       | พอใช้                       | วัสดุชั้นรองพื้นทาง            | OL,CL,ML,<br>SC,SM,SP                                |
| 20-50      | ดี                          | วัสดุชั้นพื้นทาง<br>รองพื้นทาง | GM,GC,SW,SM  |
| 50-80      | ดีมาก                       | วัสดุพื้นทาง                   | SP,GP,SW,SM  |
| มากกว่า 80 | ดีที่สุด                    | วัสดุพื้นทาง                   | GW,GM  |

ตารางที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า % C.B.R. กับการใช้งาน



รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะชั้นทางของงานถนน (ที่มา : Head Vol.2 ,1988)

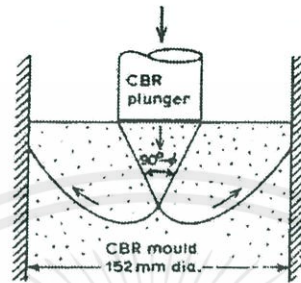
## 2.7.2 ขอบข่ายในการทดสอบหาค่า C.B.R.

การทดสอบหาค่า C.B.R เป็นวิธีการเปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงเฉือน (Shearing Resistance) ของดินตัวอย่างบดอัดแน่น โดยใช้ค่าปริมาณน้ำ ที่ O.M.C. เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด แล้วนำค่าไปเปรียบเทียบกับวัสดุดินมาตรฐานที่ได้ทดลองไปแล้ว โดยมีค่าตามตารางที่ 2.5.1

มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ AASHTO T 193 Test Method for C.B.R. (California Bearing Ratio) of Laboratory Compacted Soils ค่ากำลังของดินบดอัด %C.B.R. โดยทั่วไปแล้ว จะใช้ค่าอัตราส่วนของแรงกดที่ความลึก 0.1 นิ้ว แต่ถ้า %C.B.R.ของแรงกดที่ความลึก 0.2 นิ้ว สูงกว่า

ที่ความลึก 0.1 นิ้ว การทดลองควรจะต้องทำซ้ำ อีกครั้งและถ้าค่า % C.B.R. ค่าที่ได้ยังเป็นไปในรูปแบบ ก็ให้ใช้ค่า % C.B.R. ที่การยุบตัว 0.2 นิ้ว

ค่า C.B.R. ยังสัมพันธ์กับกำลังรับแรงเฉือนของดินอีกด้วย (แต่ไม่ใช่แรงเฉือนโดยตรง) โดย ลักษณะการ Fail ของดินใต้ Piston จะได้ดังรูปที่ 2.7.2



รูปที่ 2.33 แสดงการ Fail ของดินใต้ Piston (ที่มา : Head Vol.2 ,1988)

การทดลองหาค่า % C.B.R. มี 2 วิธี คือ

1. การทดลองแบบแช่น้ำ (Soaked Sample Test) โดยทำการทดสอบตัวอย่างดินที่บดอัดไว้ แล้วทันที

2. การทดลองแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked Sample Test) ให้ทำการทดสอบตัวอย่างดินที่ หลังจากแช่น้ำแล้ว โดยจะต้องทำการแช่ตัวอย่างดินที่ผ่านการบดอัดแล้วในน้ำไม่ต่ำกว่า 96 ชั่วโมง (4 วัน) หรือกว่าดินจะหยุดการบวมตัว ซึ่งในระหว่างนี้จะตองวัดการบวมตัว (Swell) ของดินด้วย โดย อัตราการบวมตัวของดินแช่น้ำจะเพิ่มขึ้นมากในระยะแรกและลดน้อยลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป ประมาณ 1 วันค่าบวมตัวจะเป็นข้อกำหนดหนึ่งในการเลือกใช้ วัสดุในการสร้างถนน ดินที่มีค่าบวมตัว สูงจะไม่เหมาะสำหรับใช้ทำพื้นทางถนน

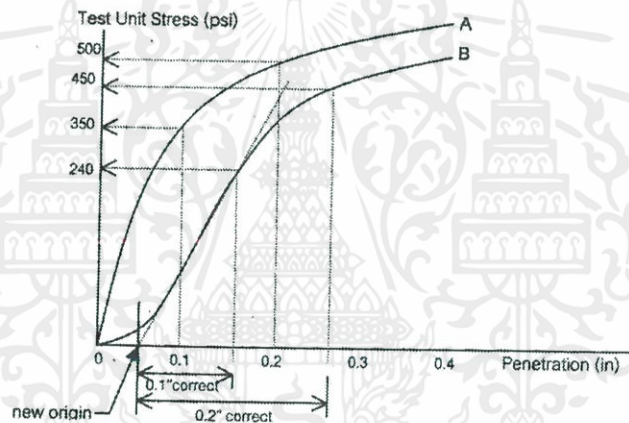
การทดสอบตัวอย่างดินแบบแช่น้ำ ก็เพื่อจำลองสภาพจริงที่อาจเกิดขึ้นได้ในถนน เช่น ใน กรณีที่มีน้ำท่วมขัง หรือในฤดูฝน โดยค่า C.B.R. ของดินตัวอย่างที่แช่น้ำจะน้อยกว่าค่า C.B.R. ที่ ทดสอบแบบแห้ง

ในการทดสอบ C.B.R. ในช่วงที่เราทำการกดทดสอบ (Penetration Test) และตอนที่เราแช่ ตัวอย่างดินในน้ำ เราจะ ใส่แผ่นน้ำหนัก (Surcharge Weight) บนตัวอย่างดินด้วยเพื่อจำลองน้ำหนัก ชั้นดินที่กดทับด้านบน น้ำหนักที่ใช้กดก็ขึ้นอยู่กับตัวอย่างดินที่เราจะทดสอบว่าสภาพในสนาม ดินมี น้ำหนักกดทับประมาณเท่าไรแล้วเลือกน้ำหนักให้ใกล้เคียงกับสภาพจริง

| มาตรฐาน           | ตุ้มบดอัด (Rammer) |        | จำนวนชั้นในการบดอัด | จำนวนครั้งในการปล่อยตุ้มต่อชั้น |
|-------------------|--------------------|--------|---------------------|---------------------------------|
|                   | น้ำหนักตุ้ม        | ระยะตก |                     |                                 |
| BS "ordinary"     | 2.5 kg             | 300 mm | 3                   | 62                              |
| BS "heavy"        | 4.5 kg             | 450 mm | 5                   | 62                              |
| ASTM "standard"   | 5.5 lb             | 12 in  | 3                   | 56                              |
| AASHTO "Modified" | 10 lb              | 18 in  | 5                   | 56                              |

ตารางที่ 2.14 แสดงค่ามาตรฐานการบดอัดตัวอย่างดินใน C.B.R. Mold

### 2.7.3 การปรับแก้โค้งการทดสอบ C.B.R. (Correction to curve)



รูปที่ 2.34 แสดงการปรับแก้โค้งการทดสอบ C.B.R. (ที่มา : Chonlatee ,2001)

การทดสอบ C.B.R. เมื่อเราเขียนกราฟระหว่างหน่วยแรงกับค่ายุบตัว กราฟจะต้องได้โค้งที่มีวงของเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด ถ้าส่วนของเส้นตรงไม่ผ่านจุดกำเนิดจะต้องทำการปรับแก้ (Correct) โดยลากเส้นให้สัมผัสกับส่วนของเส้นตรงมากที่สุดมาตัดกับแกนอนจะได้จุดเริ่มใหม่ (New Origin) ค่ายุบตัว 0.1" และ 0.2" จะต้องเริ่มวัดจากจุดนี้ดังแสดงในกราฟ B ในรูปที่ 2.7.3 (ส่วนของเส้นตรงไม่ผ่านจุดกำเนิดอาจมีสาเหตุมาจากผิวหน้าของดินบดอัดถูกรบกวน หรือได้รับการบดอัดที่ไม่ดี และอาจมีสาเหตุมาจากแท่งเหล็กกดตะกั่วตัวอย่างไม่มั่นคงก่อนการทดสอบ)

ส่วนกราฟ A ในรูปที่ 2.7.3 สามารถหาค่า Unit Load จากค่าการยุบตัวที่ได้จากการทดลองได้เลย

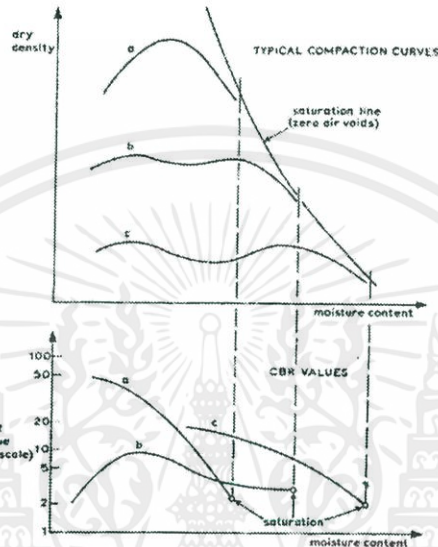
ตัวอย่างการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ C.B.R.

$$\text{ค่า C.B.R. (กราฟ A) ที่การยุบตัว 0.1"} = \frac{350}{1000} \times 100 = 35 \%$$

$$\text{ค่า C.B.R. (กราฟ A) ที่การยุบตัว 0.1"} = \frac{500}{1500} \times 100 = 33 \%$$

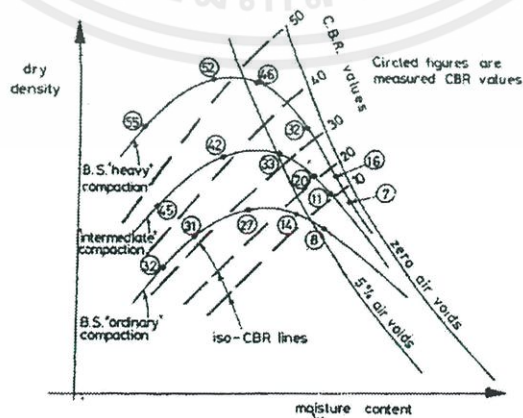
ค่า C.B.R. ที่ 0.1” มากกว่า C.B.R. ที่ 0.2” เพราะฉะนั้นไม่ต้องทดสอบตัวอย่างใหม่  
 ได้ค่า C.B.R. ของดินตัวอย่าง A = 35

### 2.7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C.B.R กับปริมาณความชื้นและความหนาแน่น



รูปที่ 2.35 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการบดอัดและ C.B.R. (ที่มา : Head Vol.2 ,1988)

ค่า C.B.R. ที่ได้จากการทดสอบจะมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในดิน ในกราฟรูป ที่ 2.7.4 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งของดินที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดินและค่า C.B.R. ที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่า C.B.R. จะมีค่าสูงสุดทางด้านแห้ง (Dry Side of Optimum) และจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น และค่า C.B.R. จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านจุดที่มีความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content) หรือลดลงอย่างมากในทางด้านเปียกนั่นเอง (Wet Side of Optimum) สังเกตกราฟ C จะมีจุดยอดสองจุดซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในการบดอัดดินเหนียวโดยเฉพาะเมื่อเรอบดอัดน้อย



รูปที่ 2.36 แสดงตัวอย่างค่า C.B.R. บนกราฟการบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ กัน (ที่มา : Head Vol.2 ,1988)

เมื่อเราทำการบันทึกค่า C.B.R. ในกราฟการบดอัด (ตัวเลขในวงกลม) ในรูปที่ 2.7.5 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อเราทำการทดสอบหาค่า C.B.R. ที่การให้พลังงานในการบดอัดและปริมาณความชื้นที่ต่างกันค่า C.B.R. ที่ได้จากตัวอย่างทดสอบจะน้อยลงในกราฟเส้นเดียวกันและเมื่อเราทำการลากเส้นประในแนวที่ค่า C.B.R. เท่ากัน เช่น 10%, 20%, 30%... จะได้เส้น Contours ที่เรียกว่า “iso-C.B.R. Lines” ซึ่งสามารถใช้ประมาณค่า C.B.R. ในกราฟการบดอัดดินได้ทำให้เราประมาณ ความชื้นที่ต้องใช้ได้ว่าถ้าเราต้องการค่า C.B.R. เหนือนี้จะต้องใส่น้ำประมาณเท่าใด

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 Improvement of Lateritic Soil by Bottom Ash and Lime (2011)

Improvement of Lateritic Soil by Bottom Ash and Lime ได้ศึกษานำดินลูกรังมาผสมกับปูนขาวกับเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าเพื่อพัฒนาคุณภาพของวัสดุเพื่อนำไปใช้ในทาง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังที่ผสมเถ้าหนักและปูนขาว อันได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปริมาณเถ้าหนักและปูนขาว และอายุการบ่ม โดยทำการทดสอบกับดินลูกรังเกรด B และเกรด D พบว่า เมื่อผสมปริมาณเถ้าหนักและปูนขาวเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความเหนียวของดินลดลง ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง และปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ปริมาณเถ้าหนักและปูนขาวที่ทำให้ค่า Unsoaked และ Soaked C.B.R. มีค่าเพิ่มสูงมากที่สุด คือประมาณ 40% ในดินลูกรังเกรดผสม B และ D เมื่อผสมเกินกว่าค่านี้ กำลังจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ค่า Unsoaked และ Soaked C.B.R. จะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น, ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นประมาณ 10 เท่าในดินลูกรังเกรด B และสูงขึ้นประมาณ 9 เท่าในดินลูกรังเกรด D และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้ดินลูกรังเกรด B มีค่าความชื้นน้ำต่ำลงประมาณ 6 เท่าและลูกรังเกรด D มีค่าต่ำลงประมาณ 8 เท่า

### 2.8.2 The Use of Ladle Furnace Slag in Soil Stabilization (2013)

The Use of Ladle Furnace Slag in Soil Stabilization ได้ทำการศึกษานำ Ladle Furnace Slag มาผสมกับดินเหนียว 3 ชนิด เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมให้ดีขึ้น โดยคุณสมบัติที่ได้ศึกษาคือ Compressive Strength, ดัชนีความเป็นพลาสติก และการบวมตัวอิสระ พบว่าดินเหนียวทั้ง 3 ชนิดค่าดัชนีพลาสติกและการบวมตัวอิสระลดลง ค่า Compressive Strength เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินเดิม

### 2.8.3 Soil Modification by the Application of Steel Slag (2014)

Soil Modification by the Application of Steel Slag ได้ศึกษานำ EAF Slag มาผสมกับดินเหนียว A-7-6 (5) จากบ่อเฒ่าหลวงมหาวิทยาลัย Covenant ประเทศ Nigeria เพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น โดยศึกษา Unconfined Compressive Strength, C.B.R., Atterberg's Limit โดยได้ผลการศึกษาว่า ผสมค่า EAF Slag ที่ 8% จะได้คุณสมบัติของดินลูกรังที่ดีที่สุด โดยได้ค่าจะเพิ่มค่า Unconfined Compressive Strength=66.7 kN/m<sup>2</sup> และ C.B.R. unsoked = 40% ลดค่า Atterberg's Limit เป็น Liquid Limit= 6.3% ,Plastic Limit= 4.0%, Plastic Index= 2.3%

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 บทนำ

ในการทดสอบวัสดุที่จะนำไปใช้ในงานทาง จะพิจารณาถึงความแข็งแรงของดินที่บดอัด กับการบวมตัวเป็นหลัก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการทดสอบการบดอัดของดินเพื่อที่จะหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสม และทำการทดสอบ C.B.R. เพื่อหาความแข็งแรงของดินเทียบกับค่ามาตรฐาน ที่ค่าความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นมากกว่า 95% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบ การบดอัดของดินตามที่มาตรฐานของกรมทางหลวงได้กำหนดไว้ ซึ่งกรมทางหลวงกำหนดให้วัสดุในชั้นพื้นทางจะต้องมีค่า C.B.R. ไม่น้อยกว่า 80% ที่ 95% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด และจะทำการทดสอบ Atterberg Limit เพื่อตรวจสอบการบวมตัวของดิน ตามการทดสอบของกรมทางหลวง โดยวัสดุที่มีค่า PI สูง จะมีการบวมตัวที่สูง ซึ่งกรมทางหลวงได้กำหนดให้วัสดุในชั้นพื้นทางจะต้องมีค่า PI ไม่เกิน 6% ในการศึกษาต่อไปนี้ มีการทดสอบหาคคุณสมบัติของดินลูกรัง (ตัวอย่างชนิด D ชนิด E ) หินคลุก และดินลูกรังผสมตะกรันถลุงเหล็ก เปรียบเทียบคุณสมบัติของดินลูกรังผสมตะกรันถลุงเหล็กกับหินคลุก เพื่อใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทาง

#### 3.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่าง

ก่อนทำการทดลองต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของดินตัวอย่างที่ใช้ ได้มีการทดสอบหาขนาดคละของดินตัวอย่าง (Grain Size Analysis) พิกัดอัดตะเบอร์ริก ( Atterberg's Limit's) การบดอัดดิน (Compaction) และ C.B.R. เพื่อเป็นข้อมูลวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 3.2.1 การทดสอบหาขนาดคละของดินตัวอย่าง (Grain Size Analysis)

(มาตรฐานอ้างอิง: AASHTO T 27-70 และ AASHTO T 88)

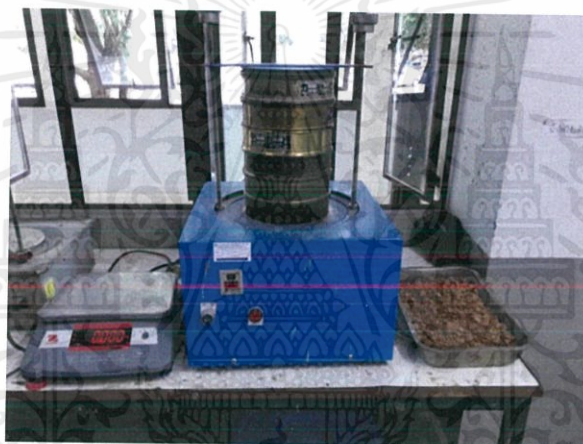
มวลดินอาจประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาด ซึ่งขนาดของเม็ดดินนี้จะมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของมวลดินอย่างมาก เช่น มีผลต่อค่าความซึมน้ำ (Permeability) อัตราการทรุดตัว (Rate of Settlement) และความสามารถในด้านกำลัง (Strength) ของมวลดิน เป็นต้น เพราะฉะนั้นเราจึงต้องทราบขนาดคละของเม็ดดินเพื่อให้ทราบคุณสมบัติของดินตัวอย่างที่จะใช้ในการศึกษาด้วย การหาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดินทำได้หลายวิธี ตามความเหมาะสมของขนาดเม็ด ดินและตามชนิดของดิน ดังนี้

1. วิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) สำหรับเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์200 เป็นส่วนใหญ่ ( 0.075 ม.ม.)

2. วิธีตกตะกอนโดยไฮโดรมิเตอร์(Hydrometer Analysis) สำหรับดินที่มีขนาดเล็กกว่า ตะแกรง เบอร์200 เป็นส่วนใหญ่ (ขนาดเล็กกว่า 0.075 ม.ม. ) เช่น ดินเหนียว (Clay) ดินเหนียวปน ตะกอน (Silty Clay)

ทั้งสองวิธีดังกล่าวอาจใช้ร่วมกันในการวิเคราะห์ขนาดของตัวอย่างเดียวกันได้ โดยในการศึกษา ครั้งนี้ ใช้หินคลุก และดินลูกรังเป็นดินตัวอย่าง จึงหาขนาดคละของเม็ดดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) เท่านั้น

### วัสดุและอุปกรณ์



รูปที่ 3.1 แสดงวัสดุและอุปกรณ์การทดสอบหาขนาดคละของดินตัวอย่าง

- 1) ถาดใส่ตัวอย่าง (Mixing Pan)
- 2) ตะแกรงร่อน (Sieve)
- 3) เครื่องเขย่าตะแกรง (Sieve Shaker)
- 4) เครื่องชั่งขนาด 2 กิโลกรัม อ่านละเอียด 0.1 กรัม
- 5) แพลงทำความสะอาดตะแกรง
- 6) ค้อนยาง ข้อนตักดิน (Soil Scoop)

## วิธีการทดลอง

1) ชั่งตะแกรงทุก ๆ ขนาดที่ใช้ โดยตาชั่งอ่านได้ถึง 0.1 กรัม โดยตะแกรงชุดหนึ่งไม่ควร เกิน 7 ใบ โดยมีขนาดละเอียดถึงเบอร์ 200 อยู่ด้วยทุกครั้ง



รูปที่ 3.2 แสดงการชั่งตะแกรง

2) ในกรณีที่ตัวอย่างดินเกาะเป็นก้อนใหญ่ให้ทุบ แยกดินออกเป็นเม็ดอิสระด้วยค้อนยาง แต่ต้องระวังอย่าให้แรงมากจนเม็ดดินแตก



รูปที่ 3.3 แสดงการใช้ค้อนยางทุบดินก้อนใหญ่

3) นำตัวอย่างดินที่อบซังน้ำหนักแล้วใส่ลงในตะแกรงที่เรียงลำดับจากหยาบไปละเอียด โดยมีฝาปิดด้านบนและมีถาด (Pan) รองด้านล่าง รวมเป็นถาดของตะแกรงนำไปเข้าเครื่องเขย่า (Sieve Shaker) เขย่านานอย่างน้อย 10 นาที



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องเขย่าดิน

- 4) ชั่งทั้งดินที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงรวมทั้งน้ำหนักตะแกรง แล้วนำไปคำนวณหาค่า %F



รูปที่ 3.5 แสดงการชั่งน้ำหนักของตะแกรงและดินที่ค้างบนตะแกรง

### วิธีการคำนวณ

$$1) \text{เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักดินที่ค้างบนแต่ละตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}} \times 100\%$$

$$2) \text{เปอร์เซ็นต์การค้างสะสม} = \text{ผลบวกสะสมของเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรงที่}$$

หยาบกว่า

$$3) \text{เปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรง (\% finer)} = 100 - \text{เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม}$$

### 3.2.2 พิกัดออตตะเบิร์ก ( Atterberg's Limit's)

(มาตรฐานอ้างอิง : AASHTO T 89 และ AASHTO T 90)

สำหรับดินลูกรัง มวลดินอาจประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาดที่มีสัดส่วนไม่เท่ากัน ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติมวลดินอย่างมาก เช่น ไปใช้ในการจำแนกประเภทดิน ความสามารถในการอัดตัว (Compressibility) ของดิน คาคคเนการทรุดตัว (Settlement) คาคคเนการซึมผ่านของน้ำในดิน (Permeability) รวมถึงใช้ในการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักของดิน และการบวมตัวของดิน เพราะฉะนั้นเราจึงจำเป็นต้องหาพิกัดออตตะเบิร์ก เพื่อทราบคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินลูกรังตัวอย่างที่จะใช้ในการศึกษาด้วย ซึ่งจะทำการทดสอบดังนี้

1. พิกัดเหลว (Liquid Limit) คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่เป็นขีดแบ่งระหว่างสถานะ Plastic กับสถานะ Liquid ของดิน หรือกล่าวได้ว่าเป็นปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดที่ทำให้ดินอยู่ในสภาวะไหลตัวได้

2. พิกัดพลาสติก (Plastic Limit) คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่แบ่งระหว่างสถานะ Plastic กับ Semi-Solid ของดิน เมื่อดินใด ๆ ก็ตามที่มีปริมาณน้ำเท่ากับ Plastic Limit ดินนั้นจะมีสถานะอยู่ระหว่าง Plastic กับ Semi-Solid ถ้ามีปริมาณน้ำมากกว่าขีดจำกัดนี้ ดินจะอยู่ในสถานะเป็น Plastic แต่ถ้าปริมาณน้ำน้อยกว่านี้ ดินจะอยู่ในสถานะ Semi-Solid

วัสดุและอุปกรณ์



รูปที่ 3.6 แสดงวัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

#### 3.2.2.1 การทดสอบหาพิกัดเหลว (Liquid Limit)

1. เครื่องเคาะดิน (Casagrande'cup)
2. มีดปาดร่องดิน (Grooving Tool)

3. ถ้วยผสมดิน

4. มีดปาดร่อง (Spatula) ขนาด 10 ซม.

### 3.2.2.2 การทดสอบหาพิกัดพลาสติก(Plastic Limit)

1. แผ่นกระจกขนาด 30 x 30 ซม.หนา 1 ซม.

2. ท่อนโลหะ ขนาด 3.2 มม. (1/8 นิ้ว)

3. ขวดฉีดน้ำ (Wash Bottle)

### วิธีการทดลอง

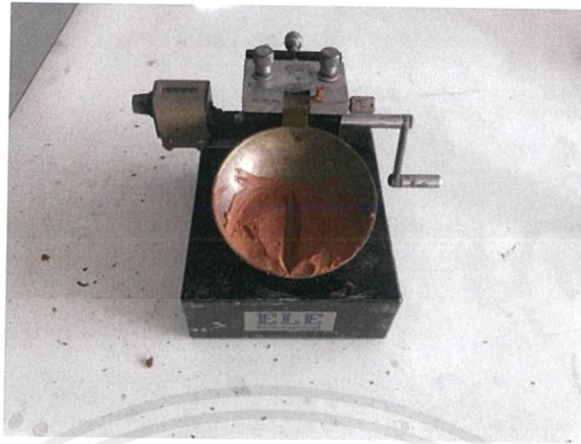
#### 3.2.2.1 การทดสอบหาพิกัดเหลว (Liquid Limit)

1. ร่อนตัวอย่างดินแห้งผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 200 กรัม (ถ้าเป็นดินเหนียวเนื้อละเอียด เช่น ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯสามารถใช้ดินในสภาพธรรมชาติได้ อาจใช้ตัวอย่างดินแบ่งดินดังกล่าวประมาณ 50 กรัม ไว้ทำ Shrinkage Limit ส่วนที่เหลือใช้ทดสอบ Liquid Limit และ Plastic Limit



รูปที่ 3.7 แสดงการร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ 40

2. นำตัวอย่างดินมาผสมน้ำโดยให้น้ำเข้าไปในเนื้อดินอย่างทั่วถึงในบางกรณีอาจจะต้องแช่ดินที่ผสมดังกล่าวทิ้งไว้ 1 คืน ใช้มีดปาด (Spatula) ตักดินปาดลงบนถ้วยทองเหลือง (Casaerade Cup) โดยความหนาของดินตรงกลางประมาณ 1 ซม. แล้วบากโดยเครื่องมือบาก (Grooving Tool) ให้เป็นร่องตรงกลาง



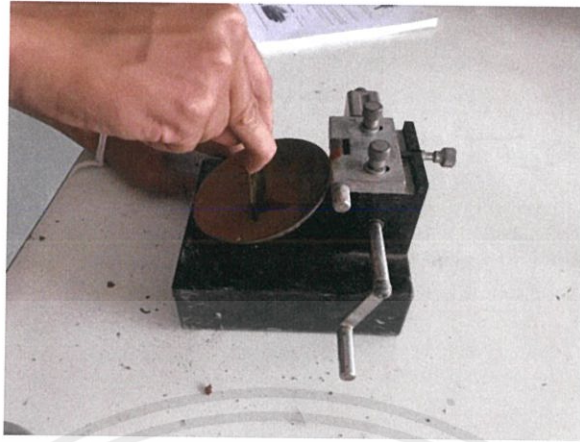
รูปที่ 3.8 แสดงการบดโดยเครื่องมือบดให้เป็นร่อนตรงกลาง

3. เคาะถ้วยทองเหลืองด้วยความเร็วสม่ำเสมอ 2 ครั้งต่อวินาที จนกระทั่งดินตอนล่างของ รอยบากเคลื่อนเข้าบรรจบกัน 1 ซม. ดังรูป แล้วจดบันทึกจำนวนครั้งของการเคาะไว้



รูปที่ 3.9 แสดงการเคาะถ้วยทองเหลือง

4. ปาดแต่งดินอีกครั้ง ทำรอยบากแล้วเคาะซ้ำ ถ้าจำนวนการเคาะเท่ากันหรือห่างกันไม่เกิน 2 ครั้งให้ใช้ค่าเฉลี่ยเป็นจำนวนการเคาะ (N) ที่ถูกต้อง นำดินบริเวณรอยบากไปหาปริมาณความชื้น (การเคาะครั้งแรก จำนวนครั้งควรจะประมาณ 40 - 50 ครั้ง ถ้ามากกว่าให้เพิ่มน้ำอีก แต่ถ้าน้อยกว่ามากให้ทำให้แห้งลง)



รูปที่ 3.10 แสดงการบดโดยเครื่องมือมือบากให้เป็นร่องตรงกลาง

5. ผสมน้ำในดินแล้วทำตามข้อ 3 และ 4 โดยให้มีจำนวนครั้งของการเคาะน้อยลงประมาณ 10 ครั้ง แล้วนำดินไปหาความชื้น ทำเช่นนี้จนได้จำนวนครั้งของการเคาะอย่างน้อย 4 ค่า (จำนวนการเคาะครั้งสุดท้ายควรอยู่ราว 5 ถึง 10 ครั้ง)



รูปที่ 3.11 แสดงการผสมน้ำในดิน

6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเคาะ ( $N$ ) และความชื้นโดยให้จำนวนการเคาะอยู่ในรูปของ Log Scale ดังรูป

7. ความสัมพันธ์ดังกล่าวควรจะเป็นเส้นตรง ค่าความชื้นที่จำนวนการเคาะ 25 ครั้ง เรียกว่า "Liquid Limit" (WL หรือ LL)

### 3.2.2.2 การทดสอบพิกัดพลาสติก (Plastic Limit)



รูปที่ 3.12 แสดงการนำดินมาผึ่งให้หมาดๆแล้วนำมาปั้นคลึงเป็นแท่งยาว

1. นำดินที่เหลือจากการทดลอง Liquid Limit มาผึ่งให้หมาดๆ แล้วนำมาปั้นคลึงเป็นแท่งยาวขนาดประมาณ 1 ซม. แล้วค่อย ๆ คลึงให้ดินเล็กลงจนมีขนาดเท่ากับ 1 หุน (1/8 นิ้ว) แล้วคลึงต่อไปเรื่อย ๆ โดยพยายามรักษารูปร่างดังกล่าวดังกล่าวจนดินเริ่มแตกปริออก ดังแสดงในรูป
2. เมื่อดินเริ่มแตก นำดินไปอบหาความชื้น ความชื้นดังกล่าวเรียกว่า Plastic Limit ( $W_p$  หรือ PL)
3. ทำซ้ำอีกครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

#### การคำนวณ

1. Liquid Limit (LL) อ่านได้จากกราฟ ที่การเคาะ 25 ครั้ง
2. Plastic Limit (PL) คำนวณจากค่าเฉลี่ยของความชื้นที่ทำได้ 2 ครั้ง
3. Plasticity Index  $PI = LL - PL$

### 3.2.3 การบดอัดดิน (Compaction Test)

(มาตรฐานอ้างอิง : AASHTO T 180)

งานส่วนใหญ่ในทางวิศวกรรมโยธา เช่น งานเขื่อน ถนน สนามบินจะใช้ดินเป็นวัสดุถม (Fill Material) ซึ่งก่อนทำการก่อสร้างงานต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น จำเป็นต้องมีการบดอัดดินเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ คือ

เพื่อทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของดิน เพื่อหาค่าความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Density) เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ในการทดลองครั้งนี้ต้องใช้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับดินลูกรังเพื่อนำไปหาค่า

C.B.R. ต่อไป เพราะฉะนั้นเราจึง ต้องทดสอบการบดอัดดินเพื่อให้ทราบคุณสมบัติของดินตัวอย่างที่จะใช้ในการศึกษาด้วย ดังนี้

### วัสดุและอุปกรณ์

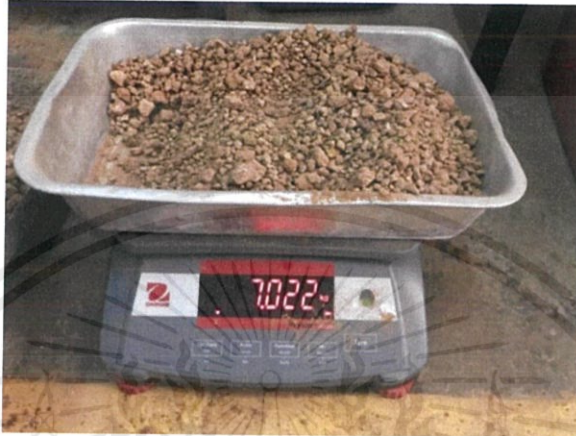


รูปที่ 3.13 แสดงวัสดุและอุปกรณ์การทดสอบการบดอัดดิน

1. ถาดผสมดิน
2. ดินที่ใช้ทำการทดสอบ
3. Hammer  $\varnothing$  2" Weight 5.5 lb. (Standard Proctor)  
Hammer  $\varnothing$  2" Weight 10.0 lb. (Modified Proctor)
4. บรรทัดเหล็กปาดดิน
5. ช้อนตักดิน
6. Mold  $\varnothing$  4" x 4.6" with collar 2.5 in high (Standard Proctor)  
Mold  $\varnothing$  6" x 5.0" with collar 2.5 in high (Modified Proctor)
7. แปรงปิดเศษดิน
8. กระบอกตวง
9. ตะแกรงร่อนดิน
10. สິ้วสำหรับตอกดิน
11. เวอร์เนียคาลิปเปอร์
12. ค้อน

## วิธีการทดลอง

1. เตรียมตัวอย่างดินแห้งประมาณ 5 kg สำหรับการทดสอบแบบ Standard Test และประมาณ 7 kg สำหรับการทดสอบแบบ Modified Test



รูปที่ 3.14 แสดงการเตรียมตัวอย่างดิน

2. นำดินร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 สำหรับการทดสอบแบบ Standard Test และ ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 สำหรับการทดสอบแบบ Modified Test



รูปที่ 3.15 แสดงการร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4

3. นำดินที่ร่อนผ่านตะแกรงแล้วใส่จากนั้นผสมน้ำประมาณ 3-4 % ของน้ำหนักดินทั้งหมดคลุกดินและน้ำให้เข้ากันดี



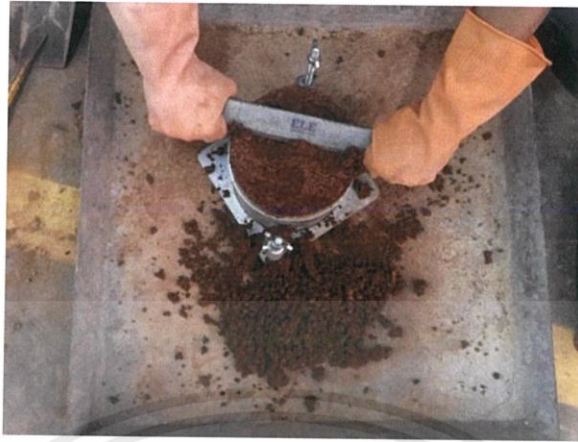
รูปที่ 3.16 แสดงการผสมดินกับน้ำ

4. ตักดินใส่ Mold ทีละชั้น โดยถ้าเป็นการทดสอบแบบ Standard Test (ใช้ Mold  $\text{Ø } 4'' \times 4.6''$ ) ให้ทดสอบทั้งหมด 3 ชั้นโดยแต่ละชั้นให้ทำการบดอัดชั้นละ 25 ครั้ง และถ้าเป็นการทดสอบแบบ Modified Test (ใช้ Mold  $\text{Ø } 6'' \times 5''$ ) ให้ทดสอบทั้งหมด 5 ชั้นโดยแต่ละชั้นให้ทำการบดอัดชั้นละ 56 ครั้ง



รูปที่ 3.17 แสดงการบดอัดดินแบบ Modified Test ทำการบดอัดชั้นละ 56 ครั้ง

5. เมื่อทำการบดอัดจนครบทุกชั้น ให้นำ Collar (Extension) ออก จากนั้นให้ปาดดินใน ส่วนบนของ Mold ออกให้ดินอยู่ในระดับเดียวกับปากขอบ Mold ส่วนบนสุด และให้นำดิน + Mold ไปชั่งเพื่อหาค่าความหนาแน่นของดินและเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาปริมาณความชื้น



รูปที่ 3.18 แสดงการปาดดินส่วนบนของ Mold ให้อยู่ในระดับเดียวกับปากขอบ Mold

6. นำดินออกจาก Mold ให้หมดและเก็บตัวอย่างดินเพื่อหา Water Content และผสมลงใน ถาดที่มีดินเหลืออยู่ จากนั้นเพิ่มปริมาณน้ำอีกประมาณ 2 - 3 % ของน้ำหนักดิน คลุกดินและน้ำให้ เข้ากัน จากนั้นทำการทดสอบซ้ำในข้อ 4 - ข้อ 6 จนค่าความหนาแน่นของดินเริ่มมีค่าลดลง โดยการ ทดสอบทั้งหมดไม่ควรเกิน 5 -6 ครั้ง



รูปที่ 3.19 แสดงการเก็บตัวอย่างดิน

### การคำนวณ

ค่าน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร (Total Unit Weight)

$$1. \text{Wet Density} = \frac{\text{Wet Weight}}{\text{Volume of mold}} \text{ lb/cu.ft}$$

$$2. \text{Dry Density} (\gamma_d) = \frac{W}{V(1+w)} \text{ lb/cu.ft}$$

เมื่อ :  $W =$  น้ำหนักดิน (Wet Weight) ใน Mold

$V =$  ปริมาตรของ Mold

$w =$  เปอร์เซ็นต์ความชื้นของดิน ("Water Content")

### 3.2.4. การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริง เรโซ (California Bearing Ratio : C.B.R.)

(มาตรฐานอ้างอิง : AASHTO T 193)

เป็นวิธีการทดสอบวัดแรงเฉือน (Shearing Resistance) ของดินที่บดอัดจนแน่นดีแล้ว (ส่วนมากจะทดสอบที่ Optimum Moisture Content) ค่า C.B.R. นำมาใช้ประโยชน์ในการออกแบบความหนาของถนนลาดยาง (Flexible Pavement) โดยการกำหนดความหนาจาก Design Charts หรืออาจใช้ช่วยในการกำหนดค่า Subgrade Modulus (K) ของดินจากตารางเปรียบเทียบเพื่อช่วยในการออกแบบถนนคอนกรีตได้อีกด้วย การทดสอบ C.B.R. ทำได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม จากตัวอย่างดินที่บดอัดแน่นตามวิธีการของ Standard หรือ Modified Proctor ดินตัวอย่างที่เตรียมสำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการจะต้องเตรียมชั้น 2 ชุด ชุดหนึ่งใช้กดทดลองหาค่า Penetration ทันทีหลังจากเตรียมตัวอย่างเสร็จ อีกชุดหนึ่งจะต้องแช่น้ำไว้ 96 ชั่วโมง เพื่อให้ดินอนน้ำจนอิ่มตัว และเพื่อจุดประสงค์จะวัดหาอัตราการบวมตัวของดินด้วย การทดสอบ C.B.R. ในการทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์อีกข้อหนึ่งคือ ใช้ค่า C.B.R. ของดินลูกรังที่ผสมกับ Slag เปรียบเทียบกับค่า C.B.R. ของหินคลุกที่ใช้ในงานถนน เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องทำการทดลองหาค่า C.B.R. ซึ่งมีอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้

วัสดุและอุปกรณ์



รูปที่ 3.20 แสดงวัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ C.B.R.

1. แบบ (Mold) สำหรับเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 7 นิ้ว พร้อม Collar สูง 2.5 นิ้ว และ Base Plate สำหรับยึด Mold และ Collar

2. Spacer Disc สูง 2.5 นิ้ว

3. Hammerหนัก 10 lb.

4. Swelling Plate พร้อมขายึด มีเกลียวปรับความสูงต่ำได้

5. สามขา (Tripod) สำหรับยึด Dial Indicator เพื่อวัดอัตราการบวมของดินเมื่อแช่น้ำ

6. Dial Indicator วัดได้ 1 นิ้ว อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว

7. น้ำหนักถ่วงทับ (Surcharge Weight) หนักแผ่นละ 5 ปอนด์

8. Penetration Piston เนื้อที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว

9. Loading Device แบบ Hydraulic Jack หรือ Screw Jack มีอุปกรณ์วัดแรงได้ 10,000 ปอนด์

10. ถังน้ำแช่ดินพร้อม Mold

11. ตะแกรงร่อนดินเบอร์ 4 และ 3/4 นิ้ว

12. เครื่องชั่ง, ภาตคลูกดิน, เหล็กปาดสันตรง (Straight Edge), กระบอกตวงน้ำ

#### การเตรียมตัวอย่าง

1. ดินตัวอย่าง ก่อนจะนำมาทดสอบจะต้องปล่อยให้แห้งในห้องปฏิบัติการ (Air Dry) แบ่งดินออกเป็นกองตามวิธี Quartering แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4” ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/4” ให้ทิ้งไปและชดเชยด้วยดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4” แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ด้วยจำนวนน้ำหนักเท่ากัน

2. หาจุด Optimum Moisture Content โดยวิธี Modified Proctor Method

## วิธีการทดสอบ

สำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ต้องมีการแช่น้ำ (Unsoaked C.B.R. Test)

1. ชั่งดินที่เตรียมไว้ประมาณ 12 ปอนด์ หรือ 6 กก. และนำดินตัวอย่างประมาณ 100 กรัม เพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Initial Water Content) ที่มีอยู่ในดินตัวอย่าง



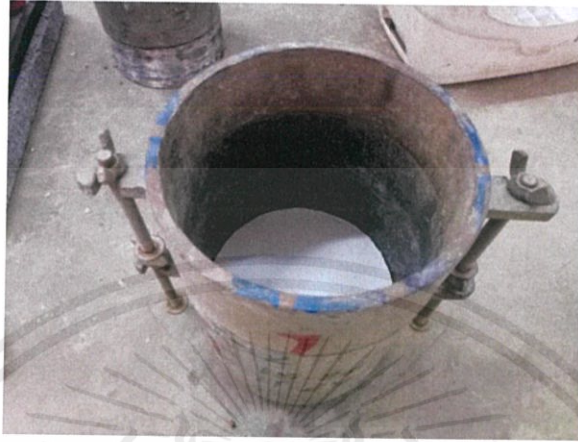
รูปที่ 3.21 แสดงการเตรียมตัวอย่างดิน

2. เตรียม Mold ไว้ 2 ชุด ชั่งน้ำหนัก Mold (เฉพาะ Mold ไม่รวม Base Plate)



รูปที่ 3.22 แสดงการชั่งน้ำหนัก Mold

3. ประกอบ Mold เข้ากับ Base Plate และ Spacer (ขนาด  $\text{Ø } 6'' \times 2''$ ) ใช้กระดาษกรอง  $\text{Ø } 6''$  ปูทับบน spacer เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะติดกับแผ่นเหล็ก



รูปที่ 3.23 แสดงการประกอบ Mold

4. กระทุ้งดินอัดแน่นใน Mold ตามวิธี Compaction Test ASTM D 1557 Optimum Moisture Content  $\pm 2\%$



รูปที่ 3.24 แสดงการบดอัดดิน

5. หลังจากบดอัดจนครบจำนวนชั้นและจำนวนครั้งแล้วถอด Collar ออก ใช้ไม้บรรทัดเหล็ก (Straight Edge) ปาดดินส่วนที่สูงเกินขอบ Mold พร้อมกับซ่อมแต่ผิวบนของดินตัวอย่างให้เรียบเสมอกับปาก Mold



รูปที่ 3.25 แสดงการปาดดินส่วนที่สูงเกินขอบ Mold

6. ถอด Base Plate และ Spacer Disc ออก นำ Mold และดินไปชั่งน้ำหนักเพื่อจะนำไปหา Wet Density

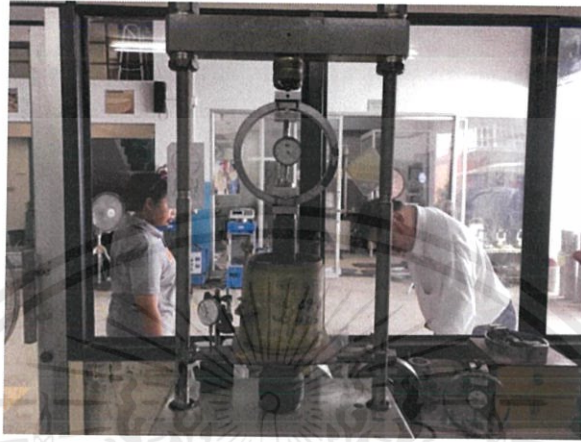


รูปที่ 3.26 แสดงการชั่งน้ำหนักดินใน Mold

7. เอากระดาษรองวางบน Base Plate เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะติดแผ่นเหล็กประกอบ Mold ที่มีดินอัดแน่นนี้เข้ากับ Base Plate โดยให้ปาก Mold ด้านที่มีดินเสมอปากวางบน Base Plate และส่วนที่มีช่องว่าง 2.5 นิ้วอยู่ด้านบน

8. วางแผ่นเหล็ก Surcharge อย่างน้อย 10 ปอนด์ ลงบนดินตัวอย่างใน Mold

9. จัดวาง Mold พร้อมดินตัวอย่างเข้าเครื่องกดทดลองซึ่งมี Piston ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว ประกอบติดอยู่ จัดให้ผิวหน้าของดินใน Mold ตะสัมผัสกับ Piston ดังกล่าว จัดเข็ม Dial Gauge ที่จะใช้วัด Penetration ให้อยู่ที่จุดศูนย์



รูปที่ 3.27 แสดงการกดทดสอบตัวอย่างดิน

10. จัดการ Load ในอัตรา 0.05 นิวตันาที พร้อมกับอ่านค่าน้ำหนักที่ตรงกับ Penetration 0, 0.025, 0.050, 0.750, 0.100, 0.150, 0.200, 0.250, 0.300, 0.400 และ 0.500 นิวตัน

11. เสร็จแล้วถอด Mold ออกจากเครื่องกดทดลองเก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้ง ประมาณ 100 กรัม (Fined Grained Soil) หรือประมาณ 500 กรัม (Coarse Grained Soil) นำไปหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Water Content)



รูปที่ 3.28 แสดงการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำไปหา Water Content

สำหรับตัวอย่างดินที่มีการแช่น้ำ (Soaked Sample) ทำข้อ 12 - 18 เพิ่มเติม

12. วางแผ่นเหล็ก Surchage หน้า 10 ปอนด์ ลงบนดินตัวอย่างใส่ Swell Plate สำหรับวัดอัตราการบวมของดิน ซึ่งมีด้านชั้นเกลียวขึ้นลงได้ติดอยู่กลาง Plate ก่อนวางแผ่นเหล็ก Surchage ลงบนดินตัวอย่างจะต้องเอากระดาษรองวางคั่นใต้แผ่น Surchage เสียก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้ดินติดแน่นกับแผ่นเหล็กหลังจากแช่น้ำแล้ว

13. แช่ Mold ที่เตรียมไว้ในข้อ 12 นี้ ในภาชนะที่เตรียมไว้ ให้น้ำท่วม Surchage ประมาณ 1 นิ้ว ใช้ Dial Gauge อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว ยึดติดกับ Tripod แล้ววางบนปาก Mold จัดให้ปลายของ Dial Gauge และสัมผัสกับก้าน Swelling Plate เพื่อวัดค่าการบวมตัวของดินต่อไป

14. แช่ดินตัวอย่างไว้ประมาณ 4 วัน จดค่าการบวมตัวจาก Dial Gauge ทุกวันจนครบ 4 วัน (ถ้าหากค่าการบวมตัวคงที่อาจจะหยุดอ่านได้หลังจากแช่น้ำแล้ว 48 ชั่วโมง)

15. หลังจากแช่ครบ 4 วันแล้ว ยก Mold ออกจากน้ำและวางตะแคง Mold เพื่อรินน้ำทิ้งและปล่อยให้แห้งไว้ 15 นาที เพื่อให้น้ำไหลออกจาก Mold จนหมด

16. นำ Mold พร้อมดินไปชั่งน้ำหนัก

17. ทำการทดสอบตามวิธีข้อ 9 - ข้อ 1

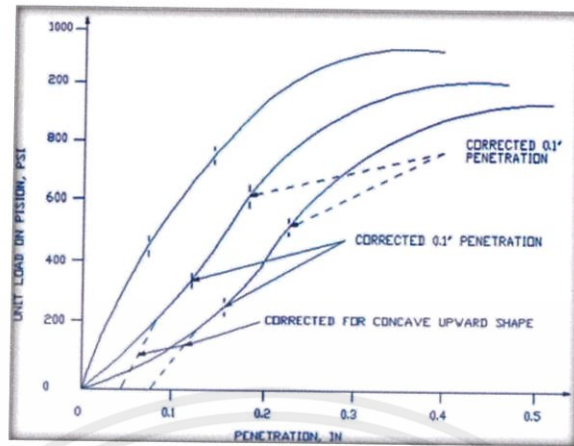
18. เก็บดินตัวอย่างจาก Soaked Sample ไปหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

การคำนวณ

1. คำนวณหาค่าแรงกดโดยสมการ

$$\text{Test unit load} = \frac{\text{penetration load}}{3} \text{ psi}$$

2. เขียนกราฟระหว่าง Test Unit Load ในแกนตั้งกับ Penetration ในแกนนอน จากค่าที่ได้ทั้ง Unsoaked และ Soaked Sample ลงในกระดาษกราฟแผ่นเดียวกัน โดยปกติแล้วจะได้อุป Curve โค้งคว่ำผ่านจุด Origin แต่บางครั้งอาจจะปรากฏว่า Curve ที่ได้มีรัศมีลักษณะโค้งหงายในช่วงแรก ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการแก้ไขให้ได้ค่าที่ถูกต้องด้วยการลากเส้นตรงให้สัมผัสกับ Curve ตรงส่วนที่มี Slope ขั้นที่สุด ไปตัดกับแกนนอนที่จุดนั้นเป็น Origin ใหม่และ Origin ใหม่จะต้องอยู่ทางด้านขวาของ Origin เดิมเสมอ เรียกว่า "Initial Correction"



รูปที่ 3.29 แสดงกราฟระหว่าง Test Unit Load ในแกนตั้งกับ Penetration ในแกนนอน

3. อ่านค่า Test Unit Load จากกราฟที่ 0.1 และ 0.2 นิ้ว จากกราฟ และคำนวณหาค่า %C.B.R. โดยค่า Standard Unit Load ใช้ค่าจากตารางที่ 1

$$CBR = \frac{\text{Test Unit Load}}{\text{Standard Unit Load}} \times 100\%$$

4. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นและ Dry Density ของดินตัวอย่างทั้งสอง
5. ถ้า % C.B.R. ที่ 0.2 “มีค่ามากกว่า % C.B.R. ที่ 0.1 ให้ทำการทดสอบอีกครั้ง ถ้าผลยังเหมือนเดิมให้ใช้ % C.B.R. ที่ 0.2”

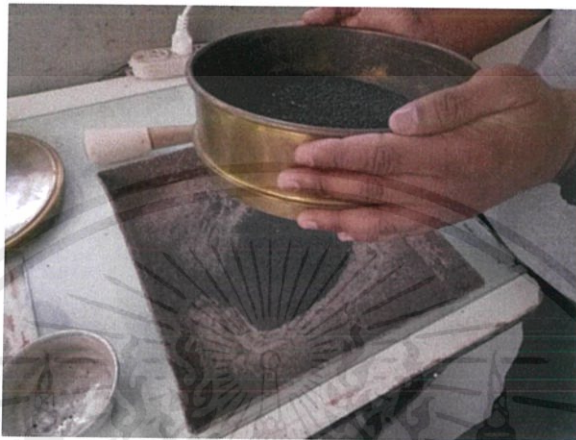
### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังผสมกับตะกรันถลุงเหล็ก

การทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังตัวอย่างผสมตะกรันถลุงเหล็กมีการผสมอัตราส่วนดินลูกรังตัวอย่างกับตะกรันถลุงเหล็กตามอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทดสอบการบดอัดดิน และการทดสอบ C.B.R.แบบ Soaked C.B.R. Test อย่างละ 3 ตัวอย่าง เมื่อได้อัตราส่วนที่เหมาะสมแล้ว จึงนำอัตราส่วนนั้นไปทดสอบคุณสมบัติให้ครบตามมาตรฐานคือการทดสอบการบดอัดดิน พิภกอัดตะเบีรก และการทดสอบ C.B.R. แบบ Unsoaked C.B.R. Test และแบบsoaked C.B.R. Test ซึ่งได้ผสมตะกรันถลุงเหล็กสองชนิดคือ EAF Slag และ LF Slag มีวิธีการดังนี้

### 3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังผสมกับ EAF Slag

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. ร่อนตะกรันถลุงเหล็กผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และนำส่วนที่ผ่านตะแกรงเพื่อใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.30 แสดงการร่อนตะกรันถลุงเหล็กผ่านตะแกรงเบอร์ 40

2. เตรียมตัวอย่างดินลูกรังเพื่อผสมกับ EAF Slag ตามอัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 3.31 แสดงอัตราส่วนของดินลูกรังกับตะกรันถลุงเหล็ก

3.เตรียมดินลูกรังที่ผสมตะกรันถลุงเหล็กแล้วซึ่งน้ำหนักประมาณ 6 กิโลกรัมเพื่อทดสอบการบดอัดดิน



รูปที่ 3.32 แสดงการเตรียมดิน

4.เตรียมดินลูกรังที่ผสมตะกรันถลุงเหล็กแล้วซึ่งน้ำหนักประมาณ 6 กิโลกรัมเพื่อทดสอบ C.B.R.

5.ร่อนตัวอย่างดินลูกรังที่ผสมตะกรันถลุงเหล็กร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 150 กรัม เพื่อทดสอบ Liquid Limit และ Plastic Limit



รูปที่ 3.33 แสดงการร่อนดินลูกรังที่ผสมกับ EAF Slag

### 3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังกับ LF Slag

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. ร่อนตะกรันถลุงเหล็กผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และนำส่วนที่ผ่านตะแกรงเพื่อใช้ในการทดสอบ



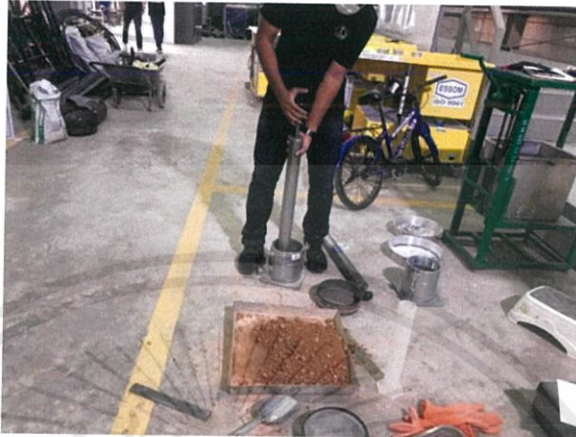
รูปที่ 3.34 แสดงการร่อน LF Slag

2. เตรียมตัวอย่างดินลูกรังเพื่อผสมกับ LF Slag ตามอัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 3.35 แสดงการเตรียมดินลูกรังผสมกับ LF Slag ตามอัตราส่วน

3.เตรียมดินลูกรังที่ผสมตะกรันถลุงเหล็กแล้วซึ่งน้ำหนักประมาณ 6 กิโลกรัมเพื่อทดสอบการบดอัดดิน



รูปที่ 3.36 แสดงการบดอัดดินลูกรังผสมกับ LF Slag

C.B.R. 4.เตรียมดินลูกรังที่ผสมตะกรันถลุงเหล็กแล้วซึ่งน้ำหนักประมาณ 6 กิโลกรัมเพื่อทดสอบ



รูปที่ 3.37 แสดงการทดสอบ C.B.R. ดินลูกรังผสมกับ LF Slag

5.ร่อนตัวอย่างดินลูกรังที่ผสมตะกรันถลุงเหล็กผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 150 กรัมเพื่อทดสอบ Liquid Limit และ Plastic Limit

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

#### 4.1 บทนำ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้ตะกรันเหล็กชนิด EAF Slag และ LF Slag เพื่อใช้ในงานก่อสร้างถนนชั้นพื้นทาง และอื่น ๆ ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมตามมาตรฐานพิจารณาถึงความแข็งแรงของดินที่บดอัด กับการบวมตัวเป็นหลัก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองนำดินลูกรังผสมกับตะกรันถลุงเหล็กเพื่อศึกษาว่าตะกรันชนิดไหนที่ทำให้ดินลูกรังพัฒนาคุณสมบัติขึ้นได้ และนำตะกรันถลุงเหล็กชนิดนั้นทำการทดสอบการบดอัดของดินเพื่อที่จะหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสม และทำการทดลอง C.B.R. แบบ Soak เพื่อหาความแข็งแรงของดินเทียบกับค่ามาตรฐาน ที่ค่าความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นมากกว่า 95% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบ การบดอัดของดินตามที่มาตรฐานของกรมทางหลวงได้กำหนดไว้ ซึ่งกรมทางหลวงกำหนดให้วัสดุในชั้นพื้นทางจะต้องมีค่า C.B.R. ไม่น้อยกว่า 80% ที่ 95% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด และจะทำการทดสอบ Atterberg Limit เพื่อตรวจสอบการบวมตัวของดิน ตามการทดสอบของกรมทางหลวง โดยวัสดุที่มีค่า PI สูง จะมีการบวมตัวที่สูง ซึ่งกรมทางหลวงได้กำหนดให้วัสดุในชั้นพื้นทางจะต้องมีค่า PI ไม่เกิน 6% เมื่อได้อัตราส่วนที่เหมาะสมตามมาตรฐานที่กำหนดแล้วนำไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของหินคลุกซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

#### 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังผสมกับตะกรันถลุงเหล็กชนิด EAF Slag และ LF Slag เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ

เพื่อให้ง่ายต่อการทดลอง จึงได้มีการนำตะกรันถลุงเหล็กประเภท และประเภท มาทำการทดลองเพื่อดูแนวโน้มของค่า C.B.R. ก่อน จึงนำดินประเภท C ผสมกับตะกรันถลุงเหล็กประเภท EAF Slag ด้วยอัตราส่วน 10% และนำดินประเภท D ผสมกับตะกรันถลุงเหล็กประเภท LF Slag ด้วยอัตราส่วน 10 % ได้ค่าดังตารางที่

| Type      | M.D.D. (g/m <sup>3</sup> ) | O.M.C. (%) | C.B.R. (Unsoak) (%) |
|-----------|----------------------------|------------|---------------------|
| C         | 2.404                      | 6.567      | 77.547              |
| C+10% EAF | 2.360                      | 8.290      | 73.273              |
| D         | 8.800                      | 2.136      | 92.034              |
| D+10%LF   | 7.690                      | 2.176      | 146.052             |

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบ Check Effect ของตะกรันทั้ง 2 ชนิด

จากตารางจะเห็นว่า ตะกรันถลุงเหล็กชนิด EAF Slag เมื่อนำไปผสมกับดินลูกรังประเภท C แล้วมีค่า C.B.R. ไม่เพิ่มขึ้นและยังลดลงด้วยซ้ำ จึงสรุปได้ว่า ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง ส่วนตะกรันถลุงเหล็กชนิด LF Slag เมื่อนำไปผสมกับดินลูกรังประเภท D จะเห็นว่าค่า C.B.R. เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จึงนำไปศึกษาต่อเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมตามมาตรฐานของกรมทางหลวงต่อไป

### 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังชนิด D และ ชนิด E ที่ใช้ในการศึกษา

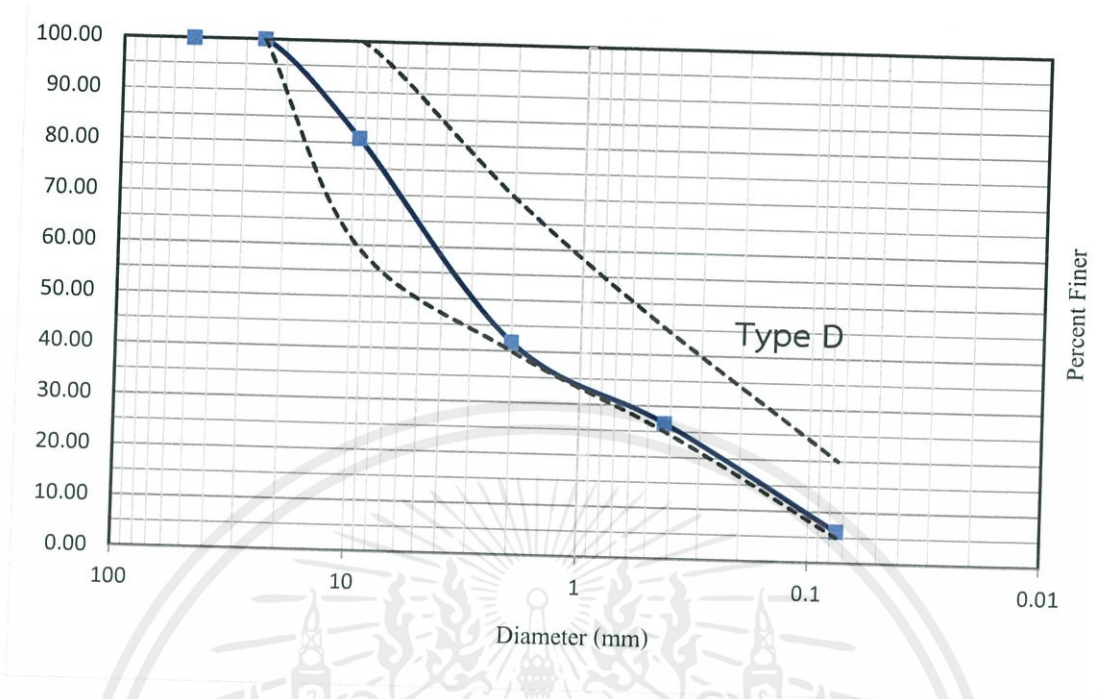
เนื่องด้วย ดินประเภท D และ E ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงนั้น เป็นดินของประเภทที่ต่ำที่สุดในการนำมาใช้ในงานถนน เราจึงเลือกดิน 2 ประเภทนี้นำมาปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม

#### 4.3.1 คุณสมบัติของดินลูกรังชนิด D

##### 1. การทดสอบขนาดคละของดินลูกรังชนิด D

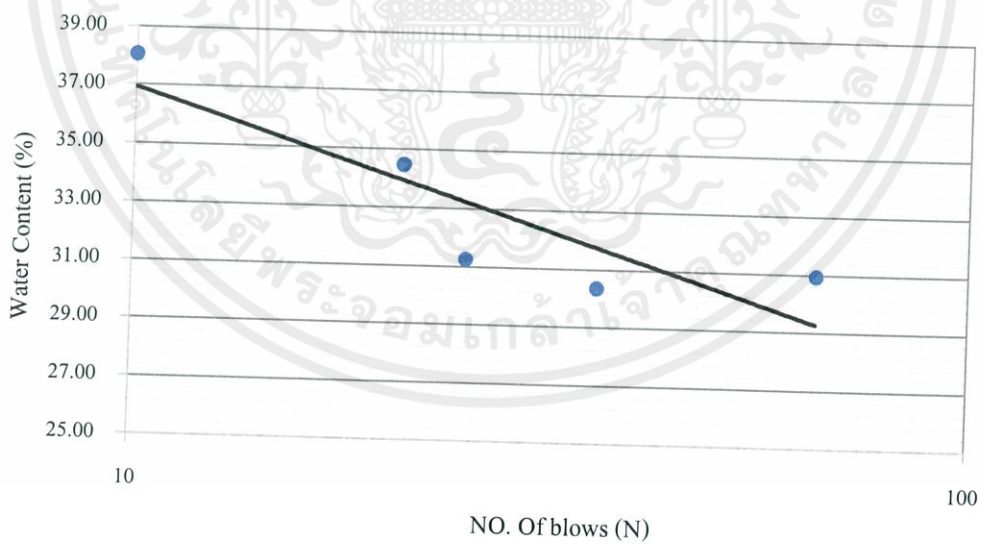
| Sieves NO. | Sieves Opening (mm) | Weight of Sieves (g) | Weight of Sieves + Soil (g) | Weight of Soil Retained (g) | Cumulative Retained (g) | Cumulative Retained (%) | Percent Finer (%) |
|------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| 2"         | 50                  | 796                  | 796                         | 0.00                        | 0.00                    | 0.00                    | 100.00            |
| 1"         | 25.00               | 822.00               | 822.00                      | 0.00                        | 0.00                    | 0.00                    | 100.00            |
| 3/8"       | 9.50                | 528.00               | 1445.00                     | 917.00                      | 917.00                  | 19.01                   | 80.99             |
| 10         | 2.00                | 689.00               | 2579.00                     | 1890.00                     | 2807.00                 | 58.20                   | 41.80             |
| 40         | 0.43                | 372.00               | 1102.00                     | 730.00                      | 3537.00                 | 73.34                   | 26.66             |
| 200        | 0.08                | 515.00               | 1501.00                     | 986.00                      | 4523.00                 | 93.78                   | 6.22              |
| PAN        | -                   | 505.00               | 805.00                      | 300.00                      | 4823.00                 | 100.00                  | 0.00              |

ตารางที่ 4.2 แสดงการกระจายขนาดคละของเม็ดดินลูกรังชนิด D



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการกระจายขนาดคละของเม็ดดินลูกรังชนิด D

## 2. การทดสอบ Atterberg Limit



รูปที่ 4.2 แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด D

Plastic Limit = 15.94 %

Liquid Limit = 33.20 %

Plastic Index = 17.26 %

### 3.การทดสอบการบดอัดดิน Compaction ดิน D

| Test NO. | M.D.D.<br>(g/m <sup>3</sup> ) | O.M.C.<br>(%) |
|----------|-------------------------------|---------------|
| 1        | 2.146                         | 8.76          |
| 2        | 2.136                         | 8.82          |
| Aaverage | 2.141                         | 8.83          |

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบการบดอัดดินลูกรังชนิด D

### 4.การทดสอบ C.B.R.

| Test NO. | C.B.R. (soak)<br>(%) | Swell<br>(%) |
|----------|----------------------|--------------|
| 1        | 7.356                | 9.002        |
| 2        | 7.632                | 9.732        |
| average  | 7.494                | 9.367        |

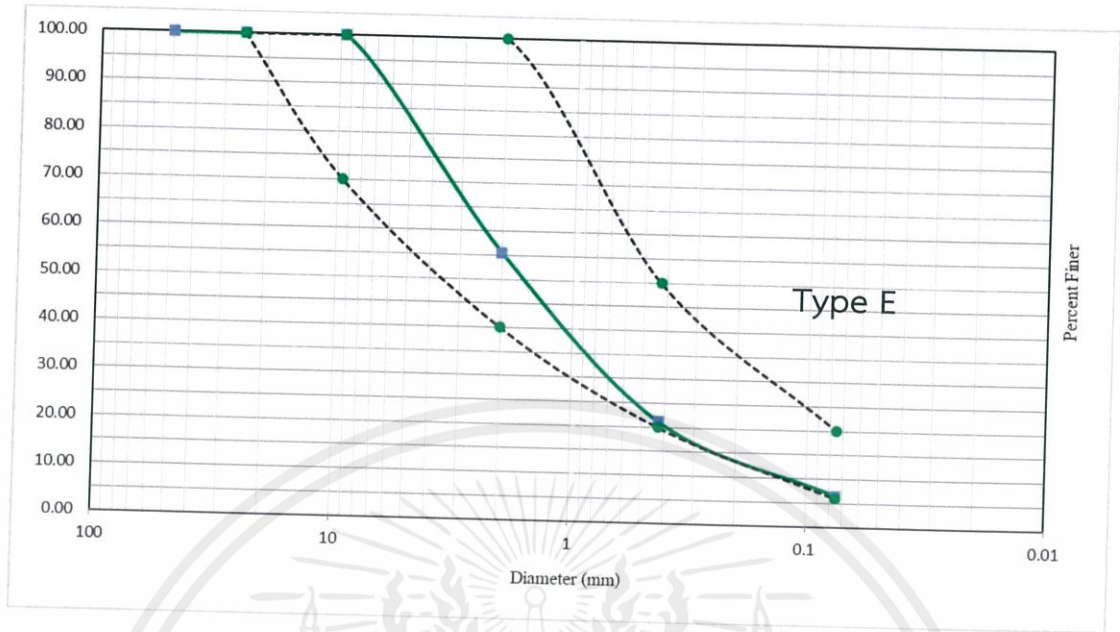
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบ C.B.R. ชนิด D

### 4.3.2 ดินลูกรังชนิด E

#### 1. การทดสอบขนาดคละของดิน

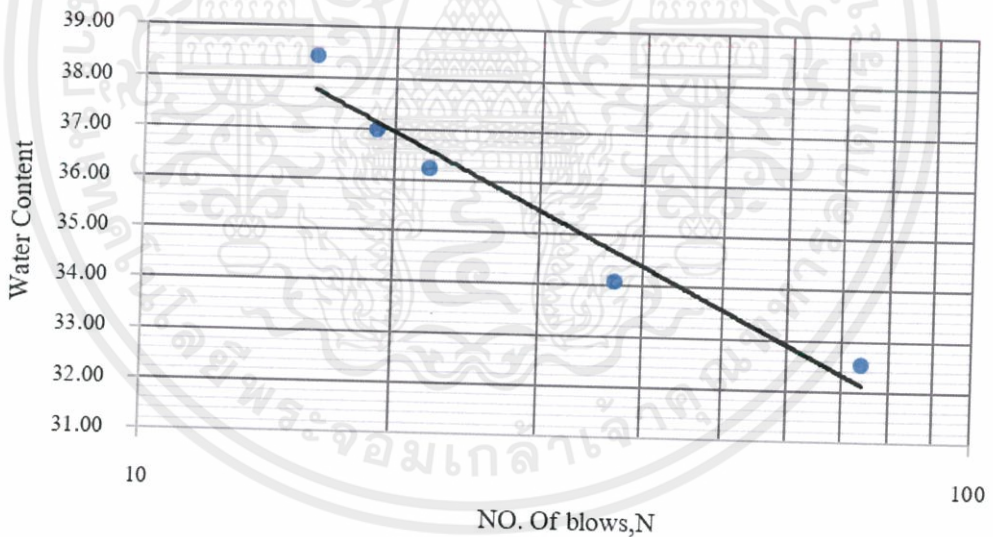
| Sieves NO. | Sieves Opening (mm) | Weight of Sieves (g) | Weight of Sieves + Soil (g) | Weight of Soil Retained (g) | Cumulative Retained (g) | Cumulative Retained (%) | Percent Finer (%) |
|------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| 2"         | 50                  | 796                  | 796                         | 0.00                        | 0.00                    | 0.00                    | 100.00            |
| 1"         | 25.00               | 822.00               | 822.00                      | 0.00                        | 0.00                    | 0.00                    | 100.00            |
| 3/8"       | 9.50                | 528.00               | 528.00                      | 0.00                        | 0.00                    | 0.00                    | 100.00            |
| 10         | 2.00                | 689.00               | 2914.00                     | 2225.00                     | 2225.00                 | 44.5                    | 55.5              |
| 40         | 0.43                | 372.00               | 2087.00                     | 1715.00                     | 3940.00                 | 78.8                    | 21.2              |
| 200        | 0.08                | 515.00               | 1250.00                     | 735.00                      | 4675.00                 | 93.5                    | 6.5               |
| PAN        | -                   | 505.00               | 830.00                      | 325.00                      | 5000.00                 | 100.00                  | 0.00              |

ตารางที่ 4.5 แสดงการกระจายขนาดคละของเม็ดดินลูกรังชนิด E



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการกระจายขนาดคละของเม็ดดินลูกรังชนิด E

### 2. การทดสอบ Atterberg Limit



รูปที่ 4.4 แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด E

Plastic Limit = 14.31 %

Liquid Limit = 36.20 %

Plastic Index = 21.89 %

### 3.การทดสอบการบดอัดดิน Compaction Type E

| Test NO. | M.D.D.<br>(g/m <sup>3</sup> ) | O.M.C.<br>(%) |
|----------|-------------------------------|---------------|
| 1        | 2.120                         | 9.000         |
| 2        | 2.186                         | 9.100         |
| average  | 2.153                         | 9.050         |

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบการบดอัดดินลูกรังชนิด E

### 4.การทดสอบ C.B.R.

| Test NO. | C.B.R. (soak)<br>(%) | Swell<br>(%) |
|----------|----------------------|--------------|
| 1        | 10.671               | 10.987       |
| 2        | 11.005               | 11.129       |
| average  | 10.838               | 11.058       |

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบ C.B.R. ชนิด E

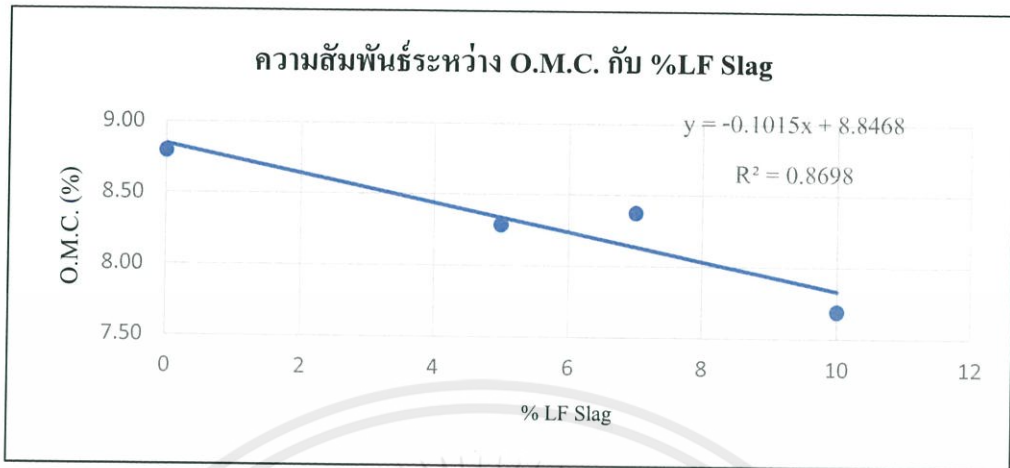
## 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังชนิด D และ E ผสมกับตะกรันถลุงเหล็กชนิด LF Slag เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม

### 4.4.1. การทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังชนิด D ผสมตะกรันถลุงเหล็กชนิด LF Slag.

#### 1.ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content)

| Soil     | O.M.C. (%) |
|----------|------------|
| D        | 8.605      |
| D+LF 5%  | 8.290      |
| D+LF 7%  | 8.375      |
| D+LF 10% | 7.690      |

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความชื้นที่เหมาะสมเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆกับดินลูกรังชนิด D

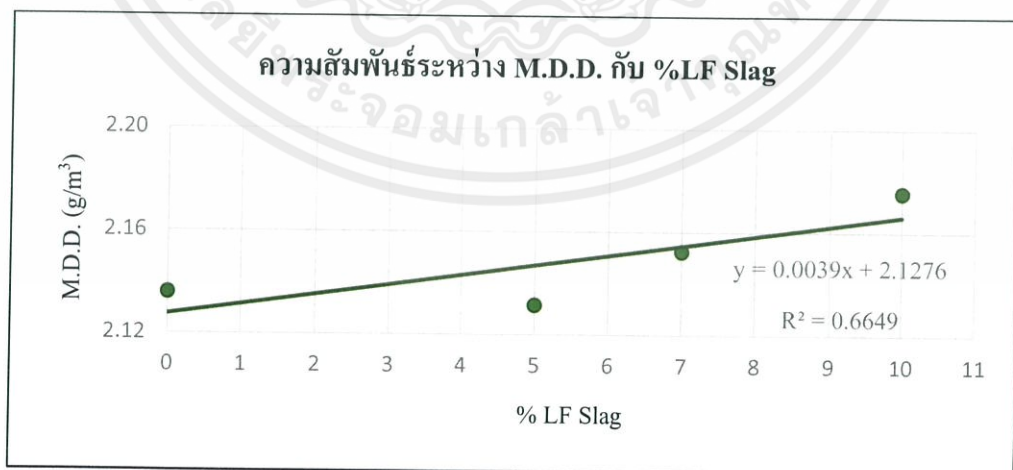


รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของดินลูกรังชนิด D

### 2.ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density)

| Soil     | M.D.D. (g/m <sup>3</sup> ) |
|----------|----------------------------|
| D        | 2.141                      |
| D+LF 5%  | 2.132                      |
| D+LF 7%  | 2.153                      |
| D+LF 10% | 2.176                      |

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงความหนาแน่นแห้งเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของดินลูกรังชนิด D



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของ ดินลูกรังชนิด D

### 3. การบวมตัว (Swell)

| Soil     | Swell (%) |
|----------|-----------|
| D        | 9.367     |
| D+LF 5%  | 2.534     |
| D+LF 7%  | 2.090     |
| D+LF 10% | 1.415     |

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าการบวมตัวเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของดินลูกรัง

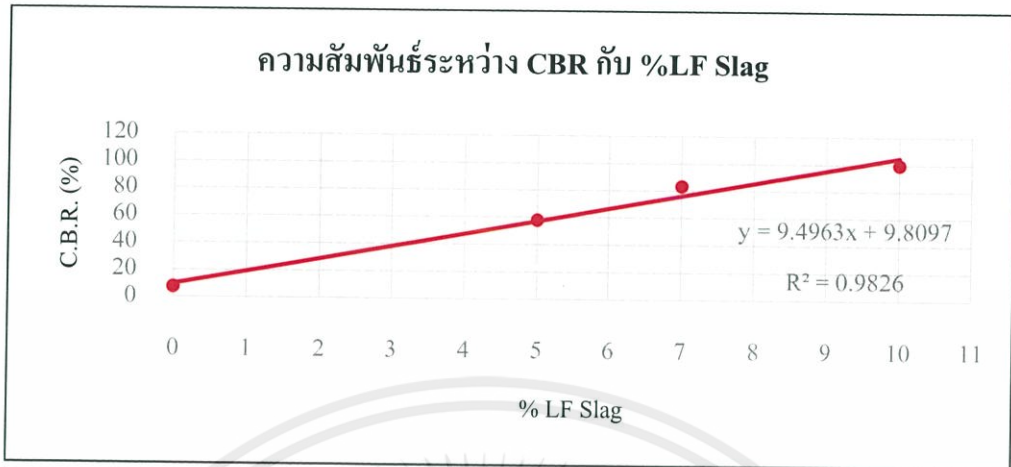


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวกับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของดินลูกรังชนิด D

### 4. California Bearing Ratio

| Soil     | C.B.R. (soak)<br>(%) |
|----------|----------------------|
| D        | 7.494                |
| D+LF 5%  | 57.947               |
| D+LF 7%  | 83.370               |
| D+LF 10% | 99.483               |

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงค่า C.B.R. เมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของดินลูกรังชนิด D

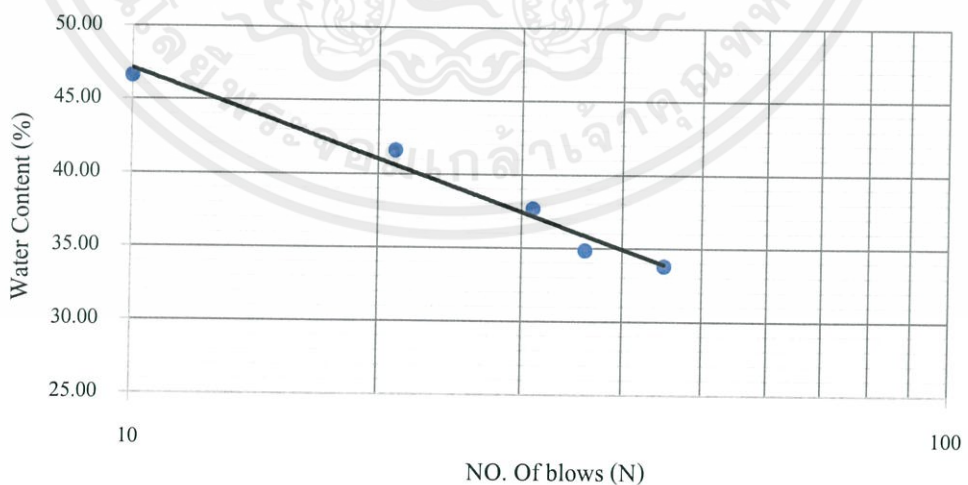


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C.B.R. กับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของดินลูกรังชนิด D

จากกราฟ ดินที่ผสมสาร LF Slag จะให้ค่า C.B.R. ตามสมการ  $Y=9.4963X + 9.8097$  โดย  $Y = \text{C.B.R.}$  ,  $X =$  เปอร์เซ็นต์ผสมของ LF Slag และจากกราฟ เมื่อแทนค่าสมการให้ได้ C.B.R. เท่ากับ 80% ซึ่งเป็นค่า C.B.R. ของชั้นพื้นทางที่ต้องการตามมาตรฐาน จะต้องผสม LF Slag ประมาณ 7.4% ดังนั้นดินลูกรังชนิด D ควรจะผสมสาร LF Slag อย่างน้อย 7.4% เพื่อให้ได้ค่า C.B.R. ที่สามารถนำไปใช้เป็นชั้นพื้นทางได้ จากนั้นนำดิน D ที่ผสมสาร LF Slag 7.4% มาทดสอบ Atterberg limit

### 5.การทดลอง Atterberg Limit ของดิน D ที่ผสมสาร LF Slag 7%

#### ตัวอย่างที่ 1



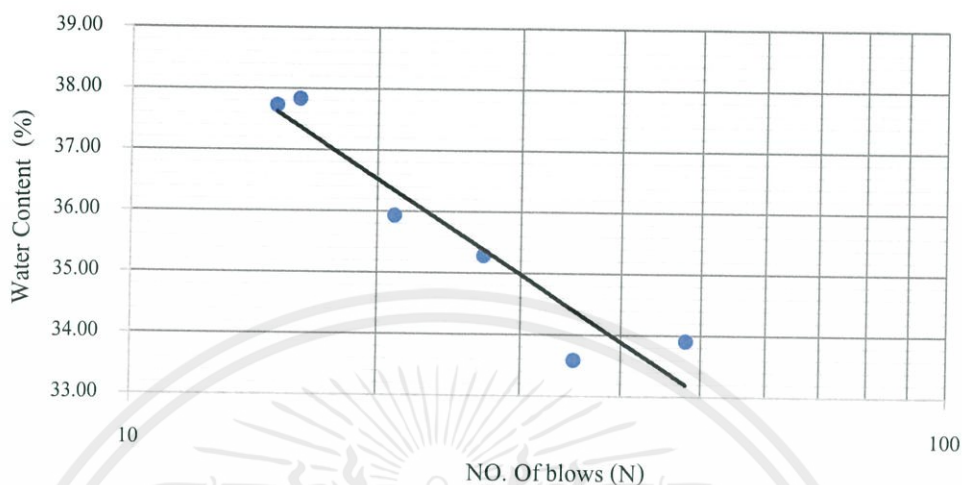
รูปที่ 4.9 แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด D ที่ผสมสาร LF Slag 7% ที่ 1

Plastic Limit = 14.60 %

Liquid Limit = 39.00 %

Plastic Index = 24.40 %

## ตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 4.10 แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด D ที่ผสมสาร LF Slag 7 % ที่ 2

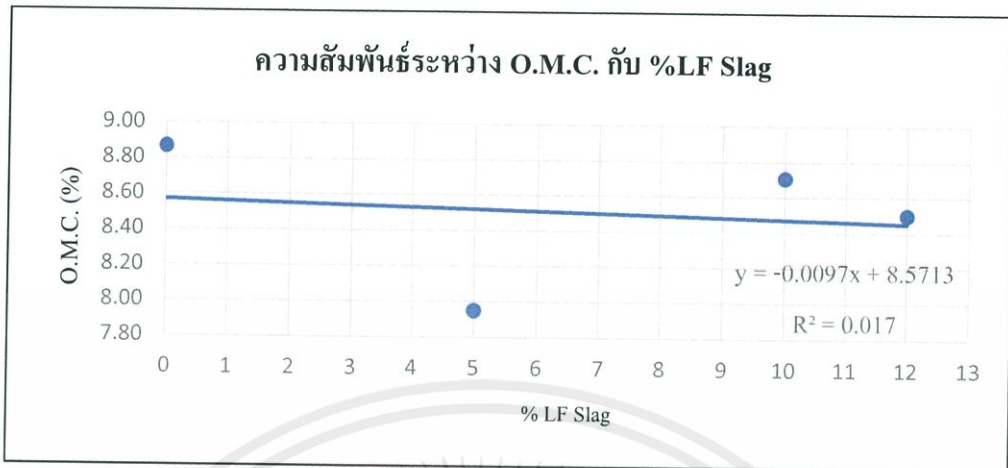
Plastic Limit = 18.15%      Liquid Limit = 35.60%      Plastic Index = 17.45%

### 4.4.2 คุณสมบัติของดินลูกรังชนิด E ผสมตะกอนลู่เหล็กชนิด LF Slag ด้วยอัตราส่วนผสมต่างกัน

#### 1. ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content)

| Soil     | O.M.C. (%) |
|----------|------------|
| E        | 9.050      |
| E+LF 5%  | 7.950      |
| E+LF 10% | 8.707      |
| E+LF 12% | 8.500      |

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความชื้นที่เหมาะสมเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆกับดินลูกรังชนิด E



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของดินลูกรังชนิด E

**2.ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density)**

| Soil     | M.D.D. (g/m <sup>3</sup> ) |
|----------|----------------------------|
| E        | 2.153                      |
| E+LF 5%  | 2.141                      |
| E+LF 10% | 2.095                      |
| E+LF 12% | 2.123                      |

ตารางที่ 4.13 ตารางแสดงความหนาแน่นแห้งเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของดินลูกรังชนิด E

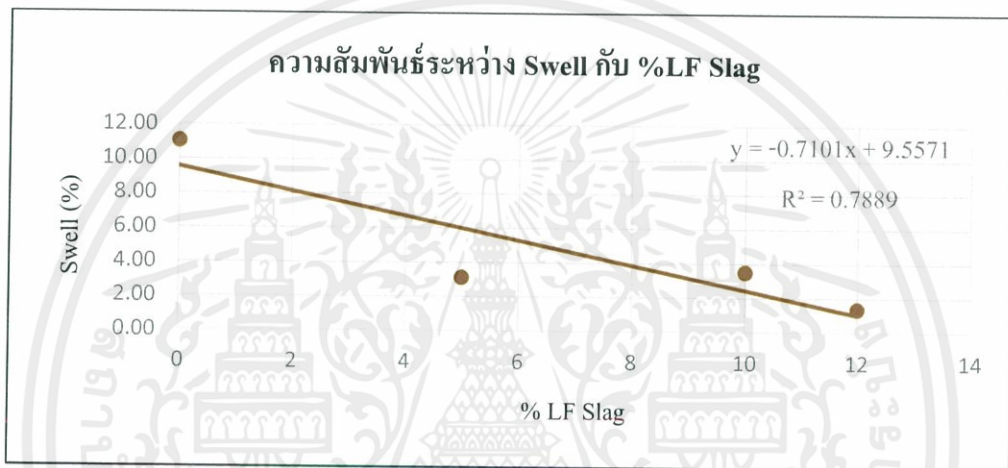


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของ ดินลูกรังชนิด E

### 3.การบวมตัว (Swell)

| Soil     | Swell (%) |
|----------|-----------|
| E        | 11.058    |
| E+LF 5%  | 3.135     |
| E+LF 7%  | 3.505     |
| E+LF 10% | 1.360     |

ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงค่าการบวมตัวเมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของดินลูกรังชนิด E

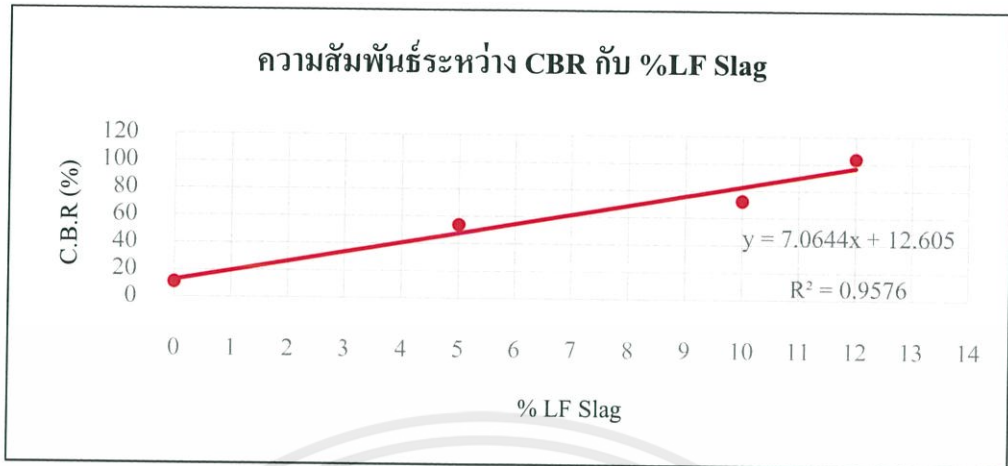


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวกับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของดินลูกรังชนิด E

### 4. California Bearing Ratio

| Soil     | C.B.R. (soak) (%) |
|----------|-------------------|
| E        | 10.838            |
| E+LF 5%  | 53.985            |
| E+LF 10% | 72.653            |
| E+LF 12% | 103.685           |

ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงค่า C.B.R. เมื่อผสม LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆของดินลูกรังชนิด E

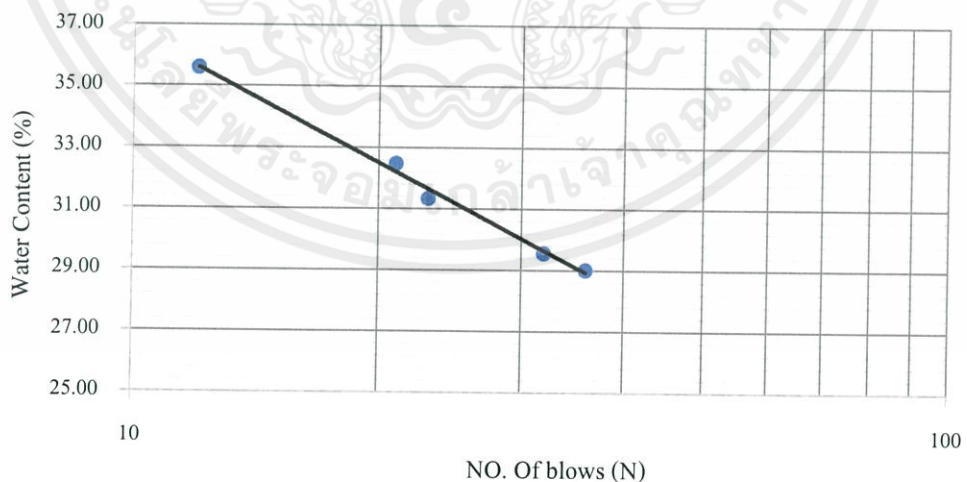


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C.B.R. กับ LF Slag ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของดินลูกรังชนิด E

จากกราฟ ดินที่ผสมสาร LF Slag จะให้ค่า C.B.R. ตามสมการ  $Y=7.0644X + 12.605$  โดย  $Y = \text{C.B.R.}$ ,  $X =$  เปอร์เซ็นต์ผสมของ LF Slag และจากกราฟ เมื่อแทนค่าสมการให้ได้ C.B.R. เท่ากับ 80% ซึ่งเป็นค่า C.B.R. ของชั้นพื้นทางที่ต้องการตามมาตรฐาน จะต้องผสม LF Slag ประมาณ 9.5% ดังนั้นดินลูกรังชนิด E ควรจะผสมสาร LF Slag อย่างน้อย 9.5% เพื่อให้ได้ค่า C.B.R. ที่สามารถนำไปใช้เป็นชั้นพื้นทางได้ จากนั้นนำดิน E ที่ผสมสาร LF Slag 9.5% มาทดสอบ Atterberg limit

### 5. การทดลอง Atterberg Limit ของดิน E ที่ผสมสาร LF Slag 9.5%

#### ตัวอย่างที่ 1



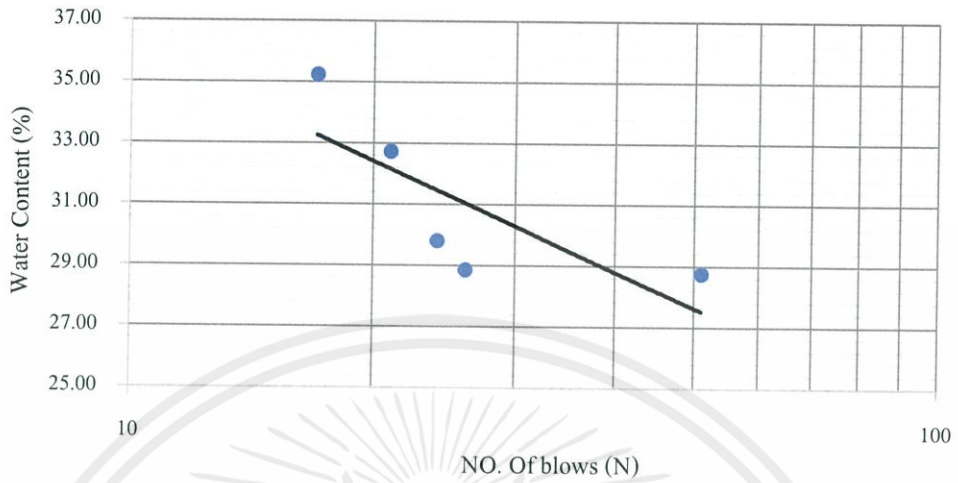
รูปที่ 4.15 แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด E ที่ผสมสาร LF Slag 9.5% ที่ 1

Plastic Limit = 19.41 %

Liquid Limit = 31.10 %

Plastic Index = 11.69 %

ตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 4.16 แสดงการหาค่า Liquid Limit ของดินลูกรังชนิด E ที่ผสมสาร LF Slag 9.5% ที่ 2

Plastic Limit = 19.32 %      Liquid Limit = 31.40 %      Plastic Index = 12.08 %

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

#### 5.1 บทนำ

ผลการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยการผสมตะกรันถลุงเหล็กชนิด EAF Slag และ LF Slag ให้มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับหินคลุกเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางโดยการผสมตะกรันถลุงเหล็กทั้งสองชนิดตามอัตราส่วนต่าง ๆ และนำไปทดสอบคุณสมบัติค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และทำการทดสอบ C.B.R. แบบ Soak เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม และนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับหินคลุกตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งได้สรุปผลไว้ในหัวข้อต่อไป

#### 5.2 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังผสมกับ EAF ,ดินลูกรังประเภท D ,ดินลูกรังประเภท E,ดินลูกรังประเภท D ผสมกับ LF Slag และดินลูกรังประเภท E ผสมกับ LF Slag สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินลูกรังที่เกิดขึ้นหลังจากผสมตะกรันถลุงเหล็กชนิด EAF พบว่า EAF ไม่สามารถทำให้คุณสมบัติของดินลูกรังดีขึ้นได้เนื่องจาก EAF Slag มีส่วนผสมของ CaO ที่น้อย จึงทำให้เมื่อผสมกับดินลูกรังแล้วจึงไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติให้ดีขึ้น และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินลูกรังที่เกิดขึ้นหลังจากผสมตะกรันถลุงเหล็กชนิด LF Slag พบว่า LF Slag สามารถทำให้คุณสมบัติของดินลูกรังดีขึ้นได้ เนื่องจากว่า LF Slag มีส่วนผสมของ CaO ที่ค่อนข้างสูง เมื่อผสมกับดินลูกรังแล้ว จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่ดีขึ้น อีกทั้งยังเป็นการนำของเสียจากขบวนการถลุงเหล็กมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ดังนั้นจึงนำมาทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานของกรมทางหลวงโดยผสมกับดินลูกรังประเภท D และดินลูกรังประเภท E และจากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับดินลูกรังประเภท D เท่ากับ ผสม LF Slag 7.4 % มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 2.14 , C.B.R. เท่ากับ 80%, PI เท่ากับ 20.92 หรือใช้สมการ  $C.B.R. = 9.4962(\%LF\ Slag) + 9.8101$  ในการคำนวณหาค่าที่ต้องการ และอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับดินลูกรังประเภท E เท่ากับ LF Slag 9.5 % มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 2.12 , C.B.R. เท่ากับ 80% , PI เท่ากับ 21.89 หรือใช้สมการ  $C.B.R. = 7.3361(\%LF\ Slag) + 9.8919$  ในการคำนวณหาค่าที่ต้องการ และ จากที่ได้ทำการสืบค้นข้อมูลปริมาณเหล็กในประเทศไทย มีกำลังที่สามารถผลิตเหล็กรวมได้ประมาณ 3 ล้านตันต่อปี ซึ่งปริมาณ Steelmaking Slag ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเหล็กนั้นจะมีปริมาณ 1-2 % ของปริมาณเหล็ก ดังนั้นใน 1 ปี จึงมีปริมาณ Steelmaking Slag ประมาณ 30,000 ตัน ซึ่งสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง เพื่อใช้ในงานก่อสร้างถนนหรือวัสดุประสงค์อื่นๆได้

สำหรับการเปรียบเทียบราคาต้นทุนในการก่อสร้างชั้นพื้นทางระหว่างหินคลุกกับดินลูกรังที่ถูกปรับปรุงโดยใช้ตะกรันถลุงเหล็กชนิด LF Slag ในอัตราส่วนที่เหมาะสม สรุปได้ว่าสามารถลดต้นทุนในงานก่อสร้างได้ ยกตัวอย่างเช่นกรณีก่อสร้างถนนระยะทาง 1 กิโลเมตร ถ้าก่อสร้างชั้นพื้นทางด้วย

หินคลุกจะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 0.456 ล้านบาท แต่ถ้าใช้ดินประเภท D ผสม LF Slag 7.4% จะมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเท่ากับ 0.118 ล้านบาท และถ้าใช้ดินประเภท E ผสมสาร LF Slag 9.4% จะมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเท่ากับ 0.116 ล้านบาท

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. นำผลที่ได้นี้ไปศึกษาต่อกับดินลูกรังประเภท A B และ C โดยผสมกับตะกรันถลุงเหล็ก LF Slag เพื่อให้ครอบคลุมประเภทของดินลูกรังที่ใช้ในงานก่อสร้างงานถนนทั้งหมดตามมาตรฐานของกรมทางหลวง และวิเคราะห์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามอัตราส่วนผสมต่าง ๆ

2. เนื่องจากตะกรันถลุงเหล็ก LF Slag คุณสมบัติคล้ายคลึงกับซีเมนต์ ให้ลองทำการบ่มแห้งไว้เพื่อดูกำลังของดินบดอัดที่ผสมตะกรัน ว่าที่ระยะเวลาการบ่มต่างกัน กำลังมีค่ามากขึ้นหรือลดลงอย่างไร

3. ทำการทดสอบ C.B.R. แบบ Unsoak ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของดิน D และ E เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ

4. เมื่อนำมาใช้งานจริงในการก่อสร้าง ควรเพิ่มเปอร์เซ็นต์สาร LF Slag เผื่อไว้ เพื่อป้องกันการเกิดความคลาดเคลื่อน (Error)

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Isaac Akinwumi. (2013). *Soil Modification by the Application of Steel Slag*. Nigeria Retrieved from <https://pp.bme.hu/ci/article/view/7239>
- [2] Juan M. Manso. (2013). *the use of ladle furnace slag in soil stabilization*. Spain Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.079>
- [3] กรมทางหลวง. (2544). มาตรฐานพื้นทางหินคลุก. สืบค้นจาก <http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs201-44.pdf>
- [4] กรมทางหลวง. (2532). มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม. สืบค้นจาก <http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs205-32.pdf>.
- [5] กิตติศักดิ์ โชติ., ประทีป ดวงเดือน.(2556), การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเถ้าก้นเตาและปูนขาว. วิทยานิพนธ์. ประเทศไทย : วิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [6] บุญญวัฒน์ ขุนอินทร.(2560).สถานการณ์อุตสาหกรรมเหมืองแร่ของไทยปี 2560 และแนวโน้มปี 2561.กองบริหารจัดการวัสดุอุตสาหกรรม:กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- [7] ผศ.ทวีศักดิ์ ศรีจันทร์อินทร์. (2558). การปรับปรุงคุณภาพของหินปลายตะแกรงสำหรับงานก่อสร้างถนน. สืบค้นจาก <http://research.rmutsb.ac.th/fullpaper/2558/2558240240244.pdf>
- [8] ผศ.สุพจน์ ศรีนิล, รศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร, ชลธี เร่บ้านเกาะ. (2555). *คู่มือปฏิบัติการทดลองปฐพีกลศาสตร์*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มีน เซอร์วิส ซัพพลาย.

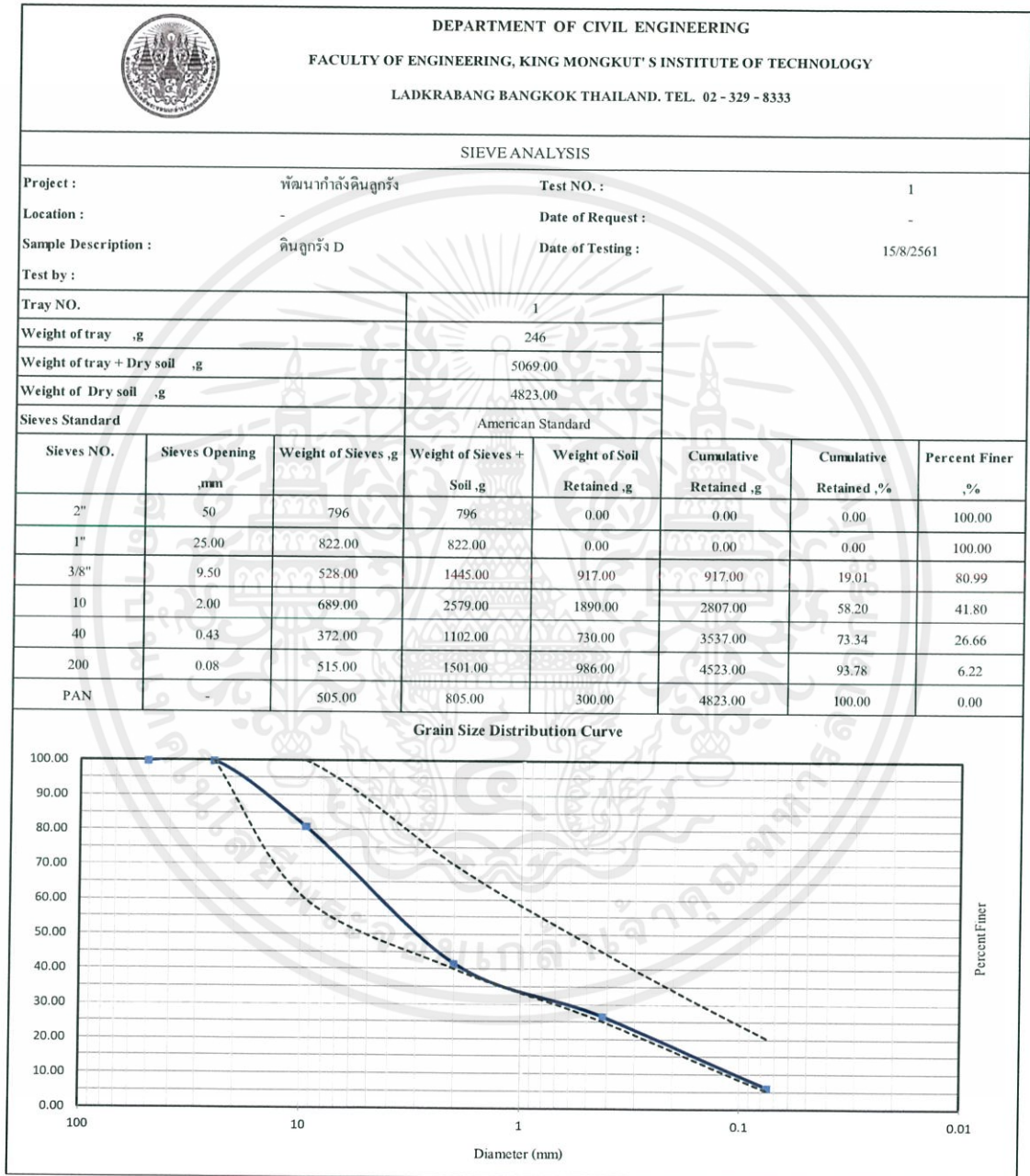
## ภาคผนวก ก

### สัญลักษณ์

|          |   |  |
|----------|---|--|
| C.B.R.   | = | California Bearing Ratio                               |
| O.M.C.   | = | Optimum Moisture Content                               |
| M.D.D.   | = | Maximum Dry Density                                    |
| PI       | = | Plasticity Index                                       |
| LL       | = | Liquid Limit   |
| PL       | = | Plastic Limit  |
| EAF Slag | = | ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า                                 |
| LF Slag  | = | ตะกรันถลุงเหล็กจากเตาอุ้มน้ำเหล็ก (Ladle Furnace Slag) |

**ภาคผนวก ข**  
**ผลการทดสอบ**


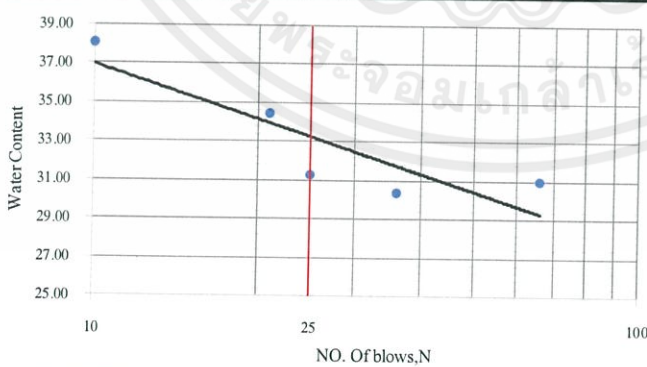
**ข.1 การทดสอบขนาดคละของดินลูกรัง**





## ข.2 การทดสอบ Atterberg Limit

### ข.2.1 การทดสอบ Atterberg Limit ดินลูกรังประเภท D

|   |                       | DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |                          |       |       |   |
|--|-----------------------|--|--------------------------|-------|-------|---|
| <b>LIQUID AND PLASTIC LIMITS</b>   |                       |  |                          |       |       |   |
| Project :  | พัฒนาท่าตั้งดินลูกรัง | Req. No :  | 1                        |       |       |   |
| Location :   | -                     | Date of Request :  | -                        |       |       |   |
| Sample From :  | -                     | Date of Testing :  | 7/9/2561                 |       |       |   |
| Sample Description :   | ดินลูกรัง D           | Test By :  | นวมินทร์, ธีรุต, ธนนันท์ |       |       |   |
| <b>PLASTIC LIMIT TEST:</b>   |                       |  |                          |       |       |   |
| TRIAL NO.  | 1                     | 2  | 3                        | 4     | 5     |   |
| CAN NO.  | 4                     | A-2-13   | M-62                     |       |       |   |
| WET SOIL + CAN .g  | 46.46                 | 23.22  | 32.91                    |       |       |   |
| DRY SOIL + CAN .g  | 44.75                 | 21.95  | 31.34                    |       |       |   |
| WT. OF CAN .g  | 33.99                 | 13.94  | 21.58                    |       |       |   |
| WT. OF DRY SOIL .g   | 10.76                 | 8.01   | 9.76                     |       |       |   |
| WT. OF WATER .g  | 1.71                  | 1.27   | 1.57                     |       |       |   |
| % WATER CONTENT  | 15.89                 | 15.86  | 16.09                    |       |       |   |
| AVERAGE  |                       |  | 15.94                    |       |       |   |
| <b>LIQUID LIMIT TEST:</b>  |                       |  |                          |       |       |   |
| Determination NO.  | 1                     | 2  | 3                        | 4     | 5     | 6 |
| NO. OF BLOWS ,N  | 36                    | 25   | 21                       | 10    | 66    |   |
| CAN NO.  | M-41                  | M-239  | M-175                    | M-240 | M-118 |   |
| WET SOIL + CAN .g  | 23.94                 | 30.74  | 31.07                    | 25.78 | 24.66 |   |
| DRY SOIL + CAN .g  | 21.72                 | 27.98  | 28.85                    | 23.07 | 22.28 |   |
| WT. OF CAN .g  | 14.41                 | 19.15  | 22.41                    | 15.95 | 14.59 |   |
| WT OF WATER .g   | 2.22                  | 2.76   | 2.22                     | 2.71  | 2.38  |   |
| WT. OF DRY SOIL .g   | 7.31                  | 8.83   | 6.44                     | 7.12  | 7.69  |   |
| % WATER CONTENT  | 30.37                 | 31.26  | 34.47                    | 38.06 | 30.95 |   |
| <div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="flex: 1;">  </div> <div style="flex: 1; padding-left: 20px;"> <p>PLASTIC LIMIT = 15.94</p> <p>LIQUID LIMIT = 33.20</p> <p>PLASTIC INDEX = 17.26</p> </div> </div> |                       |  |                          |       |       |   |



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

**LIQUID AND PLASTIC LIMITS**

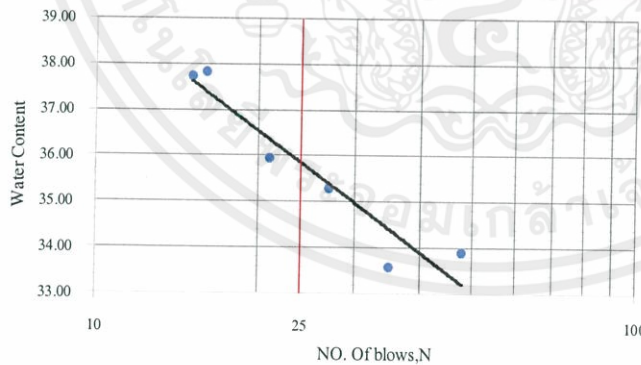
|                             |                       |                          |                       |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าสิ่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | 2                     |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Date of Request :</b> | -                     |
| <b>Sample From :</b>        | -                     | <b>Date of Testing :</b> | 7/9/2561              |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรังD            | <b>Test By</b>           | นวมินทร์,ณัฐพล,ธนันท์ |

**PLASTIC LIMIT TEST:**

| TRAL NO.           | 1     | 2     | 3     | 4 | 5 |
|--------------------|-------|-------|-------|---|---|
| CAN NO.            | M-61  | M-26  | M-28  |   |   |
| WET SOIL + CAN .g  | 29.94 | 31.75 | 25.65 |   |   |
| DRY SOIL + CAN .g  | 27.28 | 29.42 | 23.88 |   |   |
| WT. OF CAN .g      | 13.47 | 15.83 | 14.07 |   |   |
| WT. OF DRY SOIL .g | 13.81 | 13.59 | 9.81  |   |   |
| WT. OF WATER .g    | 2.66  | 2.33  | 1.77  |   |   |
| % WATTER CONTENT   | 19.26 | 17.14 | 18.04 |   |   |
| AVERAGE            |       |       | 18.15 |   |   |


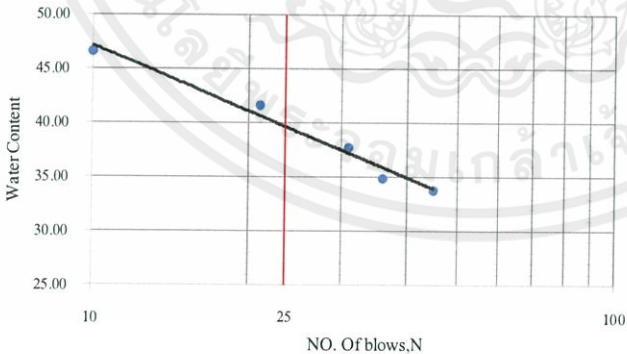
**LIQUID LIMIT TEST:**

| Determination NO.  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NO. OF BLOWS .N    | 48    | 35    | 27    | 21    | 15    | 16    |
| CAN NO.            | M-05  | M-249 | M-172 | CV-58 | M-25  | G-20  |
| WET SOIL + CAN .g  | 20.16 | 21.70 | 20.58 | 20.64 | 21.38 | 19.68 |
| DRY SOIL + CAN .g  | 18.61 | 19.99 | 19.02 | 19.31 | 19.55 | 18.14 |
| WT. OF CAN .g      | 14.04 | 14.90 | 14.60 | 15.61 | 14.70 | 14.07 |
| WT OF WATER .g     | 1.55  | 1.71  | 1.56  | 1.33  | 1.83  | 1.54  |
| WT. OF DRY SOIL .g | 4.57  | 5.09  | 4.42  | 3.70  | 4.85  | 4.07  |
| % WATER CONTENT    | 33.92 | 33.60 | 35.29 | 35.95 | 37.73 | 37.84 |



PLASTIC LIMIT = 18.15  
LIQUID LIMIT = 35.60  
PLASTIC INDEX = 17.45

## ข.2.2 การทดสอบ Atterberg Limit ดินลูกรังประเภท D + 7.4%

|    |                      | DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |           |          |          |          |          |
|---|----------------------|--|-----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>LIQUID AND PLASTIC LIMITS</b>  |                      |  |           |          |          |          |          |
| <b>Project :</b>  | พัฒนาท่าล้งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>   | 1         |          |          |          |          |
| <b>Location :</b>   | -                    | <b>Date of Request :</b>   | -         |          |          |          |          |
| <b>Sample From :</b>  | -                    | <b>Date of Testing :</b>   | 15/8/2561 |          |          |          |          |
| <b>Sample Description :</b>   | ดินลูกรัง+7.4% LF    | <b>Test By</b>   |           |          |          |          |          |
| <b>PLASTIC LIMIT TEST:</b>  |                      |  |           |          |          |          |          |
| <b>TRAL NO.</b>   |                      | <b>1</b>   | <b>2</b>  | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |          |
| CAN NO.   |                      | M-16   | M-03      | M-05     |          |          |          |
| WET SOIL + CAN .g   |                      | 23.45  | 30.47     | 25.56    |          |          |          |
| DRY SOIL + CAN .g   |                      | 22.30  | 28.25     | 24.15    |          |          |          |
| WT. OF CAN .g   |                      | 14.44  | 13.58     | 14.10    |          |          |          |
| WT. OF DRY SOIL .g  |                      | 7.86   | 14.67     | 10.05    |          |          |          |
| WT. OF WATER .g   |                      | 1.15   | 2.22      | 1.41     |          |          |          |
| % WATTER CONTENT  |                      | 14.63  | 15.13     | 14.03    |          |          |          |
| AVERAGE   |                      |  |           | 14.60    |          |          |          |
| <b>LIQUID LIMIT TEST:</b>   |                      |  |           |          |          |          |          |
| <b>Determination NO.</b>  |                      | <b>1</b>   | <b>2</b>  | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| NO. OF BLOWS ,N   |                      | 45   | 36        | 31       | 21       | 10       |          |
| CAN NO.   |                      | CV-90  | M-04      | M-07     | M-01     | C-32     |          |
| WET SOIL + CAN .g   |                      | 22.45  | 20.06     | 16.27    | 19.67    | 22.26    |          |
| DRY SOIL + CAN .g   |                      | 20.83  | 18.54     | 14.34    | 17.93    | 19.64    |          |
| WT. OF CAN .g   |                      | 16.04  | 14.18     | 9.22     | 13.75    | 14.02    |          |
| WT OF WATER .g  |                      | 1.62   | 1.52      | 1.93     | 1.74     | 2.62     |          |
| WT. OF DRY SOIL .g  |                      | 4.79   | 4.36      | 5.12     | 4.18     | 5.62     |          |
| % WATER CONTENT   |                      | 33.82  | 34.86     | 37.70    | 41.63    | 46.62    |          |
|  |                      | PLASTIC LIMIT = 14.60<br>LIQUID LIMIT = 39.00<br>PLASTIC INDEX = 24.40   |           |          |          |          |          |



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**LIQUID AND PLASTIC LIMITS**

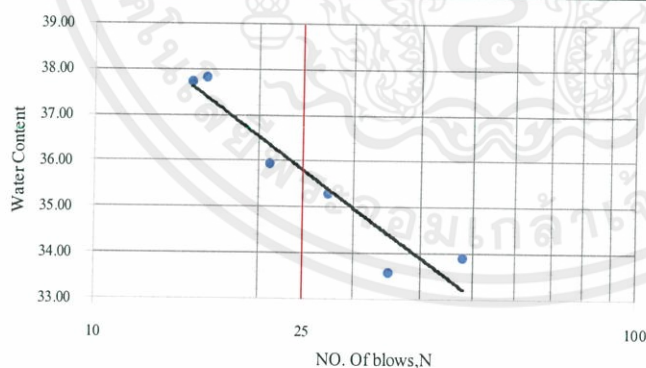
|                             |                       |                          |           |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าลิ่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | 2         |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Date of Request :</b> | -         |
| <b>Sample From :</b>        | -                     | <b>Date of Testing :</b> | 15/8/2561 |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง+LFS 7.4%    | <b>Test By</b>           |           |

**PLASTIC LIMIT TEST:**

| TRAL NO.             | 1     | 2     | 3     | 4 | 5 |
|----------------------|-------|-------|-------|---|---|
| CAN NO.              | M-61  | M-26  | M-28  |   |   |
| WET SOIL + CAN    .g | 29.94 | 31.75 | 25.65 |   |   |
| DRY SOIL + CAN    .g | 27.28 | 29.42 | 23.88 |   |   |
| WT. OF CAN       .g  | 13.47 | 15.83 | 14.07 |   |   |
| WT. OF DRY SOIL .g   | 13.81 | 13.59 | 9.81  |   |   |
| WT. OF WATER     .g  | 2.66  | 2.33  | 1.77  |   |   |
| % WATTER CONTENT     | 19.26 | 17.14 | 18.04 |   |   |
| AVERAGE              | 18.15 |       |       |   |   |


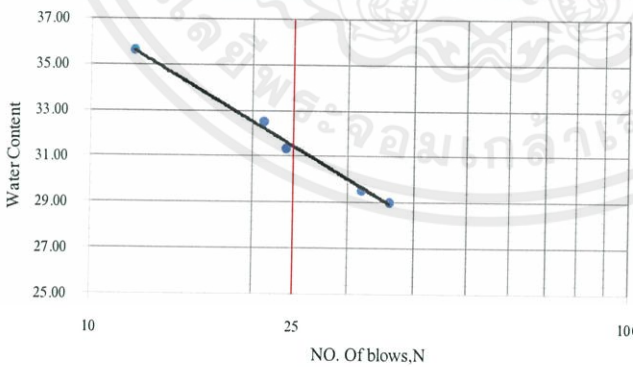
**LIQUID LIMIT TEST:**

| Determination NO.  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NO. OF BLOWS    ,N | 48    | 35    | 27    | 21    | 15    | 16    |
| CAN NO.            | M-05  | M-249 | M-172 | CV-58 | M-25  | G-20  |
| WET SOIL + CAN .g  | 20.16 | 21.70 | 20.58 | 20.64 | 21.38 | 19.68 |
| DRY SOIL + CAN .g  | 18.61 | 19.99 | 19.02 | 19.31 | 19.55 | 18.14 |
| WT. OF CAN     .g  | 14.04 | 14.90 | 14.60 | 15.61 | 14.70 | 14.07 |
| WT OF WATER   .g   | 1.55  | 1.71  | 1.56  | 1.33  | 1.83  | 1.54  |
| WT. OF DRY SOIL .g | 4.57  | 5.09  | 4.42  | 3.70  | 4.85  | 4.07  |
| % WATER CONTENT    | 33.92 | 33.60 | 35.29 | 35.95 | 37.73 | 37.84 |



PLASTIC LIMIT = 18.15  
 LIQUID LIMIT = 35.60  
 PLASTIC INDEX = 17.45

## ข.2.2 การทดสอบ Atterberg Limit ดินลูกรังประเภท E

|    |                       | DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |           |          |          |          |          |
|---|-----------------------|--|-----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>LIQUID AND PLASTIC LIMITS</b>  |                       |  |           |          |          |          |          |
| <b>Project :</b>  | พัฒนาท่าล้งดินลูกรัง  | <b>Req. No :</b>   | 1         |          |          |          |          |
| <b>Location :</b>   | -                     | <b>Date of Request :</b>   | -         |          |          |          |          |
| <b>Sample From :</b>  | -                     | <b>Date of Testing :</b>   | 25/3/2562 |          |          |          |          |
| <b>Sample Description :</b>   | ดินลูกรัง E +LFS 9.5% | <b>Test By</b>   |           |          |          |          |          |
| <b>PLASTIC LIMIT TEST:</b>  |                       |  |           |          |          |          |          |
| <b>TRAL NO.</b>   |                       | <b>1</b>   | <b>2</b>  | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |          |
| CAN NO.   |                       | M-51   | M-06      | M-27     |          |          |          |
| WET SOIL + CAN .g   |                       | 31.76  | 29.42     | 31.70    |          |          |          |
| DRY SOIL + CAN .g   |                       | 29.71  | 27.13     | 28.88    |          |          |          |
| WT. OF CAN .g   |                       | 19.28  | 14.85     | 14.72    |          |          |          |
| WT. OF DRY SOIL .g  |                       | 10.43  | 12.28     | 14.16    |          |          |          |
| WT. OF WATER .g   |                       | 2.05   | 2.29      | 2.82     |          |          |          |
| % WATER CONTENT   |                       | 19.65  | 18.65     | 19.92    |          |          |          |
| AVERAGE   |                       |  |           | 19.41    |          |          |          |
| <b>LIQUID LIMIT TEST:</b>   |                       |  |           |          |          |          |          |
| <b>Determination NO.</b>  |                       | <b>1</b>   | <b>2</b>  | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| NO. OF BLOWS ,N   |                       | 36   | 32        | 23       | 21       | 12       |          |
| CAN NO.   |                       | M-07   | S-18      | CV-90    | M-257    | J-02     |          |
| WET SOIL + CAN .g   |                       | 15.80  | 28.04     | 21.98    | 20.65    | 21.47    |          |
| DRY SOIL + CAN .g   |                       | 14.32  | 26.81     | 20.56    | 19.12    | 19.32    |          |
| WT. OF CAN .g   |                       | 9.22   | 22.65     | 16.03    | 14.41    | 13.28    |          |
| WT OF WATER .g  |                       | 1.48   | 1.23      | 1.42     | 1.53     | 2.15     |          |
| WT. OF DRY SOIL .g  |                       | 5.10   | 4.16      | 4.53     | 4.71     | 6.04     |          |
| % WATER CONTENT   |                       | 29.02  | 29.57     | 31.35    | 32.48    | 35.60    |          |
|  |                       | PLASTIC LIMIT = 19.41<br>LIQUID LIMIT = 31.10<br>PLASTIC INDEX = 11.69   |           |          |          |          |          |



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**LIQUID AND PLASTIC LIMITS**

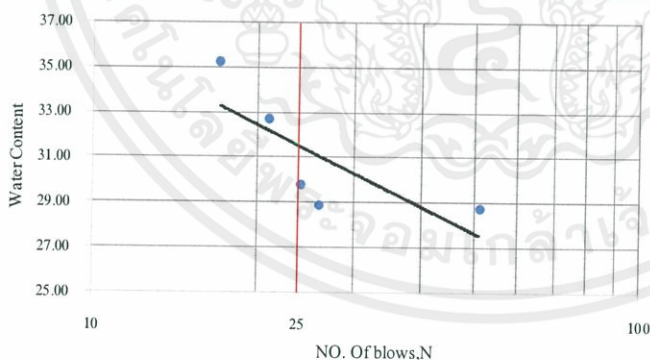
|                             |                      |                          |           |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-----------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลังดินลูกรัง  | <b>Req. No :</b>         | 2         |
| <b>Location :</b>           | -                    | <b>Date of Request :</b> | -         |
| <b>Sample From :</b>        | -                    | <b>Date of Testing :</b> | 25/3/2562 |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง E+LFS 9.5% | <b>Test By</b>           |           |

**PLASTIC LIMIT TEST:**

| TRAL NO.           | 1     | 2     | 3     | 4 | 5 |
|--------------------|-------|-------|-------|---|---|
| CAN NO.            | CV-78 | NME-5 | M-102 |   |   |
| WET SOIL + CAN .g  | 28.37 | 23.40 | 21.30 |   |   |
| DRY SOIL + CAN .g  | 25.80 | 21.98 | 20.04 |   |   |
| WT. OF CAN .g      | 13.50 | 14.10 | 13.42 |   |   |
| WT. OF DRY SOIL .g | 12.30 | 7.88  | 6.62  |   |   |
| WT. OF WATER .g    | 2.57  | 1.42  | 1.26  |   |   |
| % WATER CONTENT    | 20.89 | 18.02 | 19.03 |   |   |
| AVERAGE            |       |       | 19.32 |   |   |

**LIQUID LIMIT TEST:**


| Determination NO.  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| NO. OF BLOWS ,N    | 51    | 26    | 24    | 21    | 17    |   |
| CAN NO.            | 5-2   | M-234 | 0     | 36    | M-05  |   |
| WET SOIL + CAN .g  | 19.43 | 20.14 | 18.47 | 20.39 | 21.85 |   |
| DRY SOIL + CAN .g  | 18.02 | 19.04 | 17.45 | 19.10 | 20.01 |   |
| WT. OF CAN .g      | 13.12 | 15.23 | 14.03 | 15.16 | 14.79 |   |
| WT OF WATER .g     | 1.41  | 1.10  | 1.02  | 1.29  | 1.84  |   |
| WT. OF DRY SOIL .g | 4.90  | 3.81  | 3.42  | 3.94  | 5.22  |   |
| % WATER CONTENT    | 28.78 | 28.87 | 29.82 | 32.74 | 35.25 |   |



PLASTIC LIMIT = 19.32  
 LIQUID LIMIT = 31.40  
 PLASTIC INDEX = 12.08

### ข.3 การทดสอบการบดอัดดิน

#### ข.3.1 การทดสอบการบดอัดดิน ดินลูกรัง

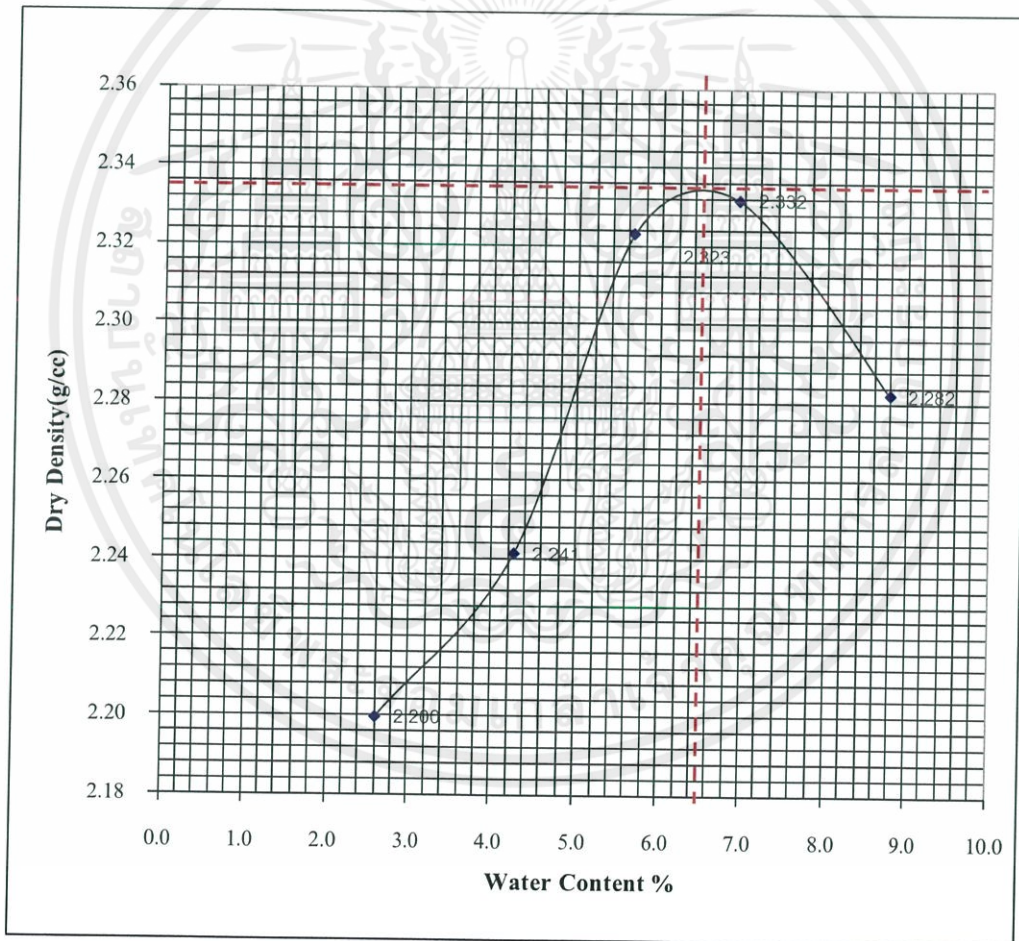
|  DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |                     |                   |                 |                 |       |       |
|--|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------|-------|
| COMPACTION TEST  |                     |                   |                 |                 |       |       |
| (Refer to ASTM D698)   |                     |                   |                 |                 |       |       |
| Project :  | พัฒนากำลังดินลูกรัง | Req. No :         | 1               |                 |       |       |
| Location :   | -                   | Date of Request : | -               |                 |       |       |
| Sample From :  | Compaction          | Date of Testing : | 16/8/2561       |                 |       |       |
| Sample Description :   | ดินลูกรัง           | Type of Testing   | Modified Protor |                 |       |       |
|  |                     | Mold Volume :     | 2135.04         | cm <sup>3</sup> |       |       |
|  |                     | Mold Weight :     | 2.768           | gm.             |       |       |
| DENSITY  |                     |                   |                 |                 |       |       |
| Determination No.  |                     | 1                 | 2               | 3               | 4     | 5     |
| Weight mold + compacted soil   | g.                  | 7,587             | 7,757           | 8,009           | 8,091 | 8,068 |
| Weight mold  | g.                  | 2,768             | 2,768           | 2,768           | 2,768 | 2,768 |
| Weight compacted soil  | g.                  | 4,819             | 4,989           | 5,241           | 5,323 | 5,300 |
| Wet density  | g / cc              | 2.26              | 2.34            | 2.45            | 2.49  | 2.48  |
| Dry density, Gd  | g / cc              | 2.20              | 2.24            | 2.32            | 2.33  | 2.28  |
| WATER CONTENT  |                     |                   |                 |                 |       |       |
| Determination No.  |                     | 1                 | 2               | 3               | 4     | 5     |
| Container No.  |                     | CV-32             | A-6             | L-3             | J-02  | M-204 |
| Weight of container + Wet soil   | g.                  | 76.61             | 85.02           | 117.09          | 54.73 | 80.70 |
| Weight of container + Dry soil   | g.                  | 75.12             | 82.12           | 111.86          | 52.04 | 75.30 |
| Weight of water , Ww   | g.                  | 1.49              | 2.90            | 5.23            | 2.69  | 5.40  |
| Weight of container  | g.                  | 18.08             | 14.08           | 19.53           | 13.22 | 13.82 |
| Weight of dry soil , Ws  | g.                  | 57.04             | 68.04           | 92.33           | 38.82 | 61.48 |
| Percentage of water content , w  | %                   | 2.61              | 4.26            | 5.66            | 6.93  | 8.78  |
| <b>Maximum Dry Density =</b>   |                     | <b>2.328</b>      | <b>g/cc</b>     |                 |       |       |
| <b>Optimum Moisture Content =</b>  |                     | <b>6.50</b>       | <b>%</b>        |                 |       |       |



COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)

|                      |                      |                   |                 |
|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | Req. No :         | 1               |
| Location :           | -                    | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction           | Date of Testing : | 16/8/2561       |
| Sample Description : | ดินลูกรัง            | Type of Testing   | Modified Protor |



Maximum Dry Density = 2.328 g/cc

Optimum Moisture Content = 6.50 %



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

*(Refer to ASTM D698)*

|                             |                      |                          |                         |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | 2                       |
| <b>Location :</b>           | -                    | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction           | <b>Date of Testing :</b> | 16/8/2561               |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง            | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |
|                             |                      | <b>Mold Volume :</b>     | 2114.11 cm <sup>3</sup> |
|                             |                      | <b>Mold Weight :</b>     | 2.651 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight mold + compacted soil g. | 7,438 | 7,712 | 7,957 | 8,128 | 7,991 |
| Weight mold g.                  | 2,651 | 2,651 | 2,651 | 2,651 | 2,651 |
| Weight compacted soil g.        | 4,787 | 5,061 | 5,306 | 5,477 | 5,340 |
| Wet density g / cc              | 2.26  | 2.39  | 2.51  | 2.59  | 2.53  |
| Dry density, Gd g / cc          | 2.21  | 2.30  | 2.40  | 2.41  | 2.32  |

**WATER CONTENT**

| Determination No.                 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Container No.                     | M-112 | M-41  | M-49  | M-240 | A-3   |
| Weight of container + Wet soil g. | 88.08 | 62.32 | 74.11 | 61.76 | 89.40 |
| Weight of container + Dry soil g. | 86.21 | 60.49 | 71.65 | 58.44 | 83.68 |
| Weight of water , Ww g.           | 1.87  | 1.83  | 2.46  | 3.32  | 5.72  |
| Weight of container g.            | 14.33 | 14.01 | 20.10 | 13.25 | 19.27 |
| Weight of dry soil , Ws g.        | 71.88 | 46.48 | 51.55 | 45.19 | 64.41 |
| Percentage of water content , w % | 2.60  | 3.94  | 4.77  | 7.35  | 8.88  |

**Maximum Dry Density = 2.440 g/cc**

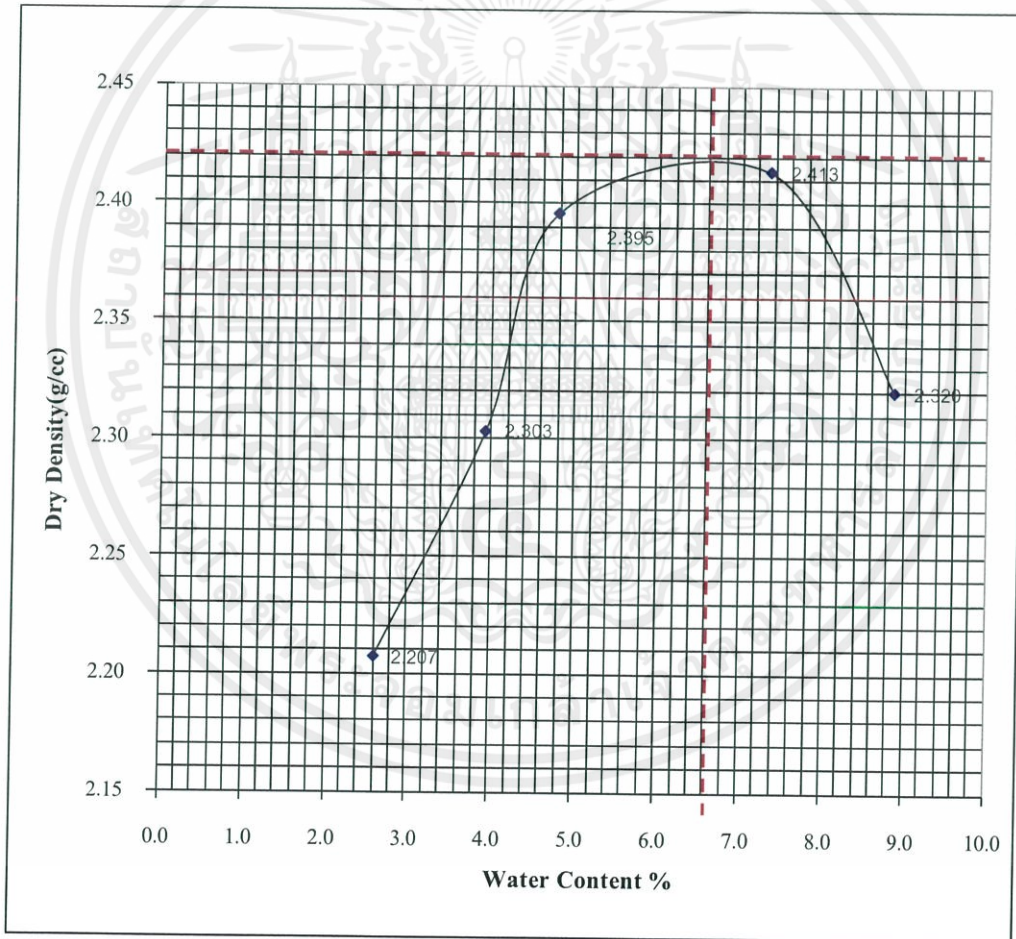
**Optimum Moisture Content = 6.60 %**



**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                      |                          |                 |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | 2               |
| <b>Location :</b>           | -                    | <b>Date of Request :</b> | -               |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction           | <b>Date of Testing :</b> | 16/8/2561       |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง            | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor |



**Maximum Dry Density = 2.440 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 6.60 %**



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                       |                          |                         |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าลิ่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | 3                       |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction            | <b>Date of Testing :</b> | 16/8/2561               |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง             | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |
|                             |                       | <b>Mold Volume :</b>     | 2114.11 cm <sup>3</sup> |
|                             |                       | <b>Mold Weight :</b>     | 2,651 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.                                 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5 |
|---|-------|-------|-------|-------|---|
| Weight mold + compacted soil      g.              | 7,523 | 7,813 | 8,158 | 8,041 | - |
| Weight mold                              g.       | 2,651 | 2,651 | 2,651 | 2,651 | - |
| Weight compacted soil                g.           | 4,872 | 5,162 | 5,507 | 5,390 | - |
| Wet density                                g / cc | 2.30  | 2.44  | 2.60  | 2.55  | - |
| Dry density, Gd                         g / cc    | 2.24  | 2.35  | 2.44  | 2.35  | - |

**WATER CONTENT**

| Determination No.                         | 1     | 2     | 3     | 4      | 5 |
|---|-------|-------|-------|--------|---|
| Container No.                             | A-4   | A-2   | A-1   | A-7    | - |
| Weight of container + Wet soil      g.    | 53.56 | 64.74 | 95.33 | 107.27 | - |
| Weight of container + Dry soil      g.    | 52.44 | 62.96 | 90.98 | 100.72 | - |
| Weight of water, Ww                    g. | 1.12  | 1.78  | 4.35  | 6.55   | - |
| Weight of container                    g. | 14.64 | 17.91 | 24.65 | 24.45  | - |
| Weight of dry soil, Ws                 g. | 37.80 | 45.05 | 66.33 | 76.27  | - |
| Percentage of water content, w      %     | 2.96  | 3.95  | 6.56  | 8.59   | - |

**Maximum Dry Density = 2.445 g/cc**

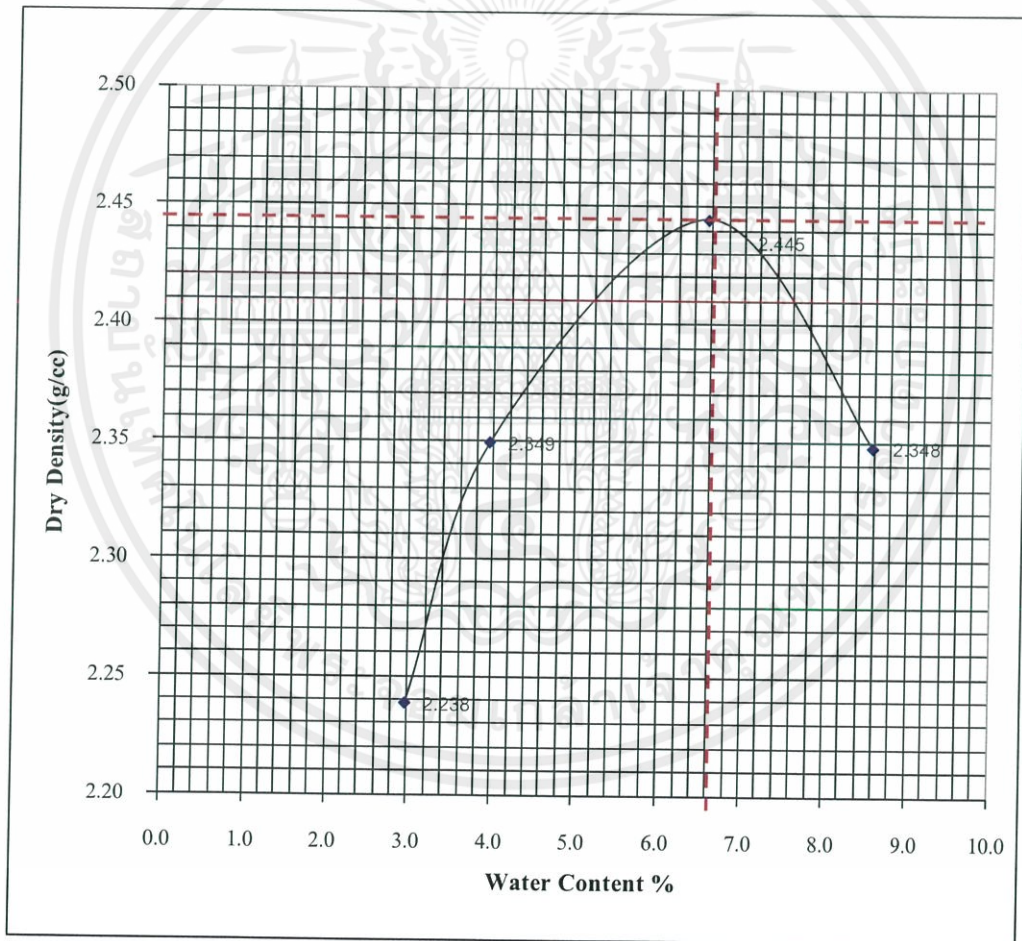
**Optimum Moisture Content = 6.60 %**



COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)

|                      |                      |                   |                 |
|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | Req. No :         | 3               |
| Location :           | -                    | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction           | Date of Testing : | 16/8/2561       |
| Sample Description : | ดินลูกรัง            | Type of Testing   | Modified Protor |



Maximum Dry Density = 2.445 g/cc

Optimum Moisture Content = 6.60 %

ข.3.2 การทดสอบการบดอัดดิน ดินลูกรัง+EAF Slag 10%



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                             |                          |                         |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าล้งดินลูกรัง        | <b>Req. No :</b>         | 1                       |
| <b>Location :</b>           | -                           | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Lab 5 Compaction            | <b>Date of Testing :</b> | 22/8/2018               |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง+10% EAF slag NO.1 | <b>Type of Testing</b>   | Modify                  |
|                             |                             | <b>Mold Volume :</b>     | 2132.20 cm <sup>3</sup> |
|                             |                             | <b>Mold Weight :</b>     | 2,672 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight mold + compacted soil g. | 7,523 | 7,876 | 8,067 | 8,132 | 8,021 |
| Weight mold g.                  | 2,672 | 2,672 | 2,672 | 2,672 | 2,672 |
| Weight compacted soil g.        | 4,851 | 5,204 | 5,395 | 5,460 | 5,349 |
| Wet density g / cc              | 2.28  | 2.44  | 2.53  | 2.56  | 2.51  |
| Dry density, Gd g / cc          | 2.17  | 2.30  | 2.34  | 2.33  | 2.27  |

**WATER CONTENT**

| Determination No.                 | 1      | 2      | 3      | 4     | 5      |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Container No.                     | M-240  | A-6    | M-204  | M-112 | J-02   |
| Weight of container + Wet soil g. | 120.40 | 118.26 | 124.07 | 82.00 | 114.57 |
| Weight of container + Dry soil g. | 115.55 | 112.12 | 115.72 | 75.93 | 104.74 |
| Weight of water , Ww g.           | 4.85   | 6.14   | 8.35   | 6.07  | 9.83   |
| Weight of container g.            | 13.23  | 14.09  | 13.83  | 14.37 | 13.18  |
| Weight of dry soil , Ws g.        | 102.32 | 98.03  | 101.89 | 61.56 | 91.56  |
| Percentage of water content , w % | 4.74   | 6.26   | 8.20   | 9.86  | 10.74  |

**Maximum Dry Density = 2.342 g/cc**

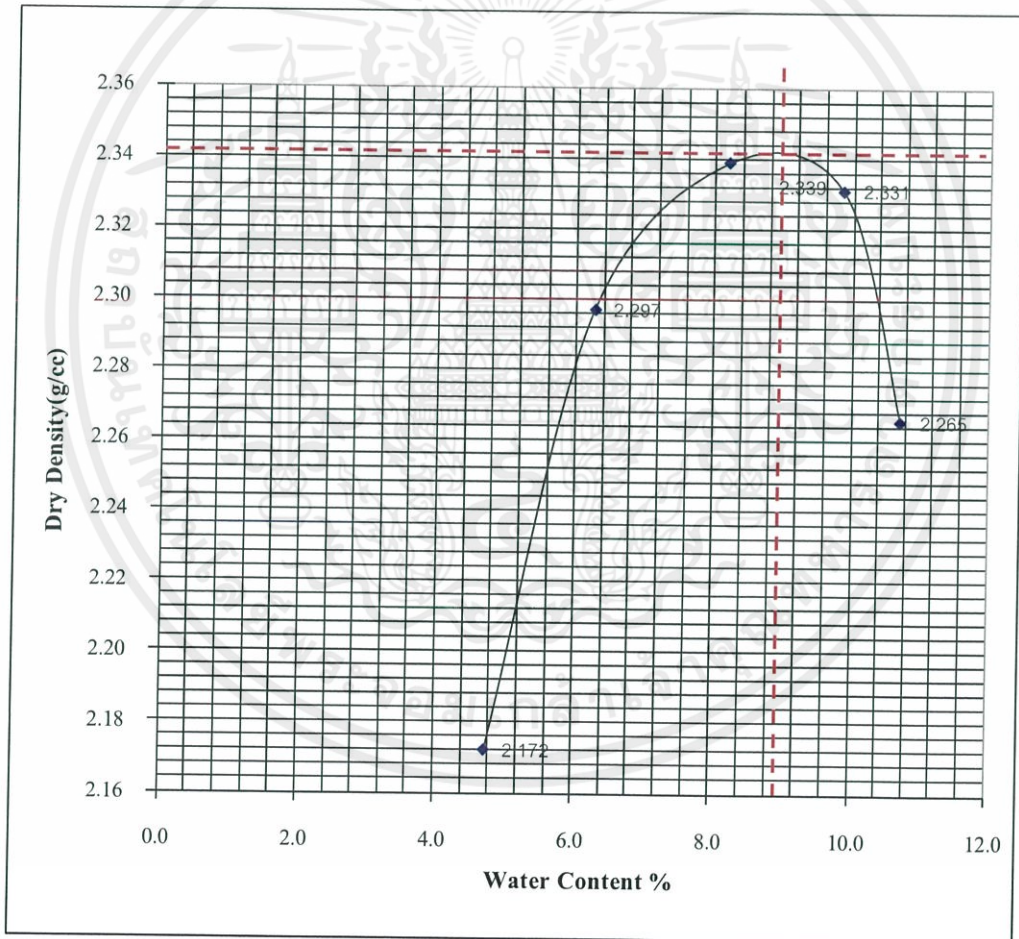
**Optimum Moisture Content = 8.49 %**



**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                             |                          |           |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง        | <b>Req. No :</b>         | 1         |
| <b>Location :</b>           | -                           | <b>Date of Request :</b> | -         |
| <b>Sample From :</b>        | Lab 5 Compaction            | <b>Date of Testing :</b> | 22/8/2018 |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง+10% EAF slag NO.1 | <b>Type of Testing</b>   | Modify    |



**Maximum Dry Density = 2.342 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 8.49 %**



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                            |                          |                         |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง       | <b>Req. No :</b>         | 2                       |
| <b>Location :</b>           | -                          | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Lab 5 Compaction           | <b>Date of Testing :</b> | 22/8/2018               |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง+10%EAF slag NO.2 | <b>Type of Testing</b>   | Modify                  |
|                             |                            | <b>Mold Volume :</b>     | 2139.04 cm <sup>3</sup> |
|                             |                            | <b>Mold Weight :</b>     | 2,783 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|---|
| Weight mold + compacted soil g. | 7,759 | 8,127 | 8,256 | 8,170 | - |
| Weight mold g.                  | 2,783 | 2,783 | 2,783 | 2,783 | - |
| Weight compacted soil g.        | 4,976 | 5,344 | 5,473 | 5,387 | - |
| Wet density g / cc              | 2.33  | 2.50  | 2.56  | 2.52  | - |
| Dry density, Gd g / cc          | 2.21  | 2.32  | 2.35  | 2.28  | - |

**WATER CONTENT**

| Determination No.                 | 1     | 2      | 3     | 4      | 5 |
|-----------------------------------|-------|--------|-------|--------|---|
| Container No.                     | M-41  | A-3    | M-23  | M-20   | - |
| Weight of container + Wet soil g. | 91.47 | 136.86 | 88.85 | 112.68 | - |
| Weight of container + Dry soil g. | 87.72 | 128.62 | 82.94 | 103.85 | - |
| Weight of water , Ww g.           | 3.75  | 8.24   | 5.91  | 8.83   | - |
| Weight of container g.            | 13.98 | 19.26  | 14.61 | 17.89  | - |
| Weight of dry soil , Ws g.        | 73.74 | 109.36 | 68.33 | 85.96  | - |
| Percentage of water content , w % | 5.09  | 7.53   | 8.65  | 10.27  | - |

**Maximum Dry Density = 2.356 g/cc**

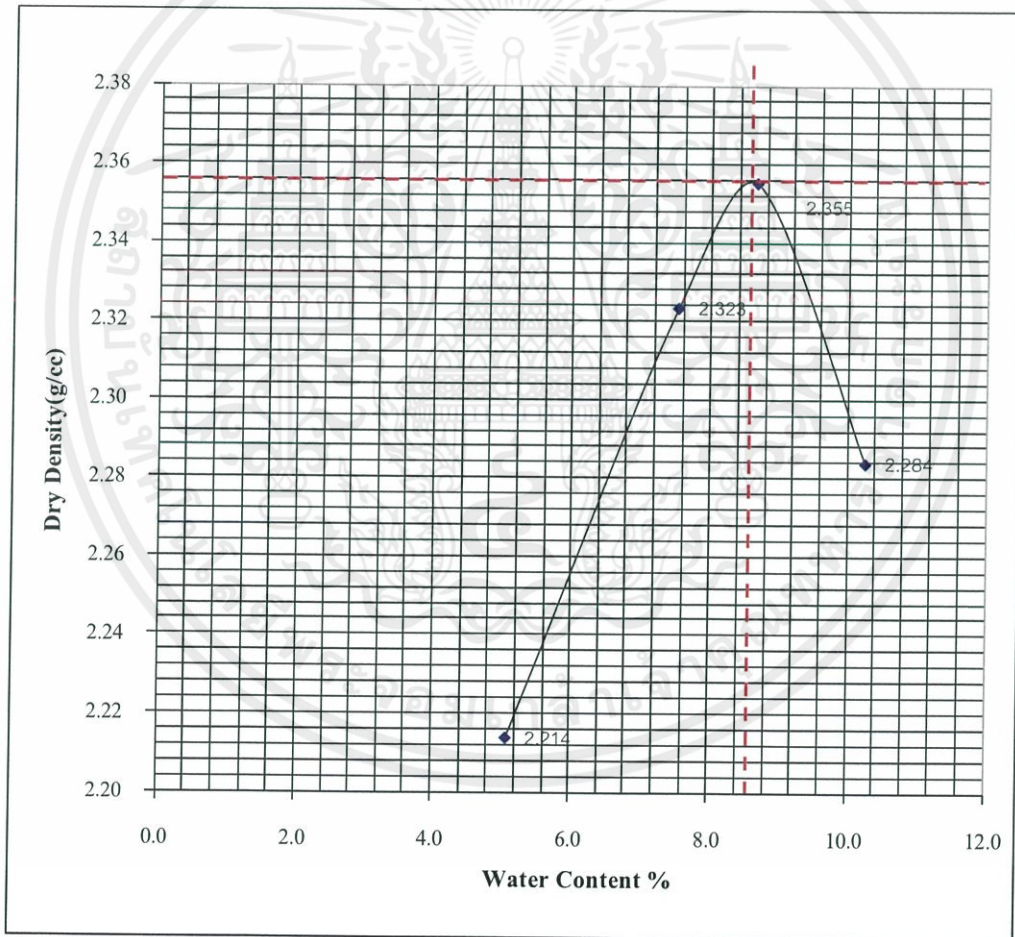
**Optimum Moisture Content = 8.30 %**



**COMPACTION TEST**

*(Refer to ASTM D698)*


|                             |                            |                          |           |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าล้งดินลูกรัง       | <b>Req. No :</b>         | 2         |
| <b>Location :</b>           | -                          | <b>Date of Request :</b> | -         |
| <b>Sample From :</b>        | Lab 5 Compaction           | <b>Date of Testing :</b> | 22/8/2018 |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง+10%EAF slag NO.2 | <b>Type of Testing</b>   | Modify    |



**Maximum Dry Density = 2.356 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 8.30 %**

ข.3.3 การทดสอบการบดอัดดิน ดินลูกรังชนิด D

|  DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |                       |                          |                 |                 |        |        |
|---|-----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|--------|--------|
| COMPACTION TEST   |                       |                          |                 |                 |        |        |
| (Refer to ASTM D698)  |                       |                          |                 |                 |        |        |
| <b>Project :</b>  | พัฒนานำกำลังดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.1  |                 |        |        |
| <b>Location :</b>   | -                     | <b>Date of Request :</b> | -               |                 |        |        |
| <b>Sample From :</b>  | Compaction            | <b>Date of Testing :</b> | 16/8/2561       |                 |        |        |
| <b>Sample Description :</b>   | ดินลูกรัง             | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor |                 |        |        |
|   |                       | <b>Mold Volume :</b>     | 2142.66         | cm <sup>3</sup> |        |        |
|   |                       | <b>Mold Weight :</b>     | 2,673           | gm.             |        |        |
| DENSITY   |                       |                          |                 |                 |        |        |
| Determination No.   |                       | 1                        | 2               | 3               | 4      | 5      |
| Weight mold + compacted soil  | g.                    | 7,090                    | 7,195           | 7,386           | 7,641  | 7,529  |
| Weight mold   | g.                    | 2,673                    | 2,673           | 2,673           | 2,673  | 2,673  |
| Weight compacted soil   | g.                    | 4,417                    | 4,522           | 4,713           | 4,968  | 4,856  |
| Wet density   | g / cc                | 2.06                     | 2.11            | 2.20            | 2.32   | 2.27   |
| Dry density, Gd   | g / cc                | 2.00                     | 2.01            | 2.07            | 2.15   | 2.06   |
| WATER CONTENT   |                       |                          |                 |                 |        |        |
| Determination No.   |                       | 1                        | 2               | 3               | 4      | 5      |
| Container No.   |                       | NME 12                   | NME 13          | NME 14          | NME 15 | NME 16 |
| Weight of container + Wet soil  | g.                    | 141.48                   | 160.15          | 148.18          | 190.78 | 156.34 |
| Weight of container + Dry soil  | g.                    | 137.57                   | 153.32          | 140.14          | 177.64 | 143.17 |
| Weight of water , Ww  | g.                    | 3.91                     | 6.83            | 8.04            | 13.14  | 13.17  |
| Weight of container   | g.                    | 14.82                    | 13.77           | 13.53           | 14.09  | 14.01  |
| Weight of dry soil , Ws   | g.                    | 122.75                   | 139.55          | 126.61          | 163.55 | 129.16 |
| Percentage of water content , w   | %                     | 3.19                     | 4.89            | 6.35            | 8.03   | 10.20  |
| <b>Maximum Dry Density</b>  |                       | =                        | <b>2.146</b>    | <b>g/cc</b>     |        |        |
| <b>Optimum Moisture Content</b>   |                       | =                        | <b>8.41</b>     | <b>%</b>        |        |        |

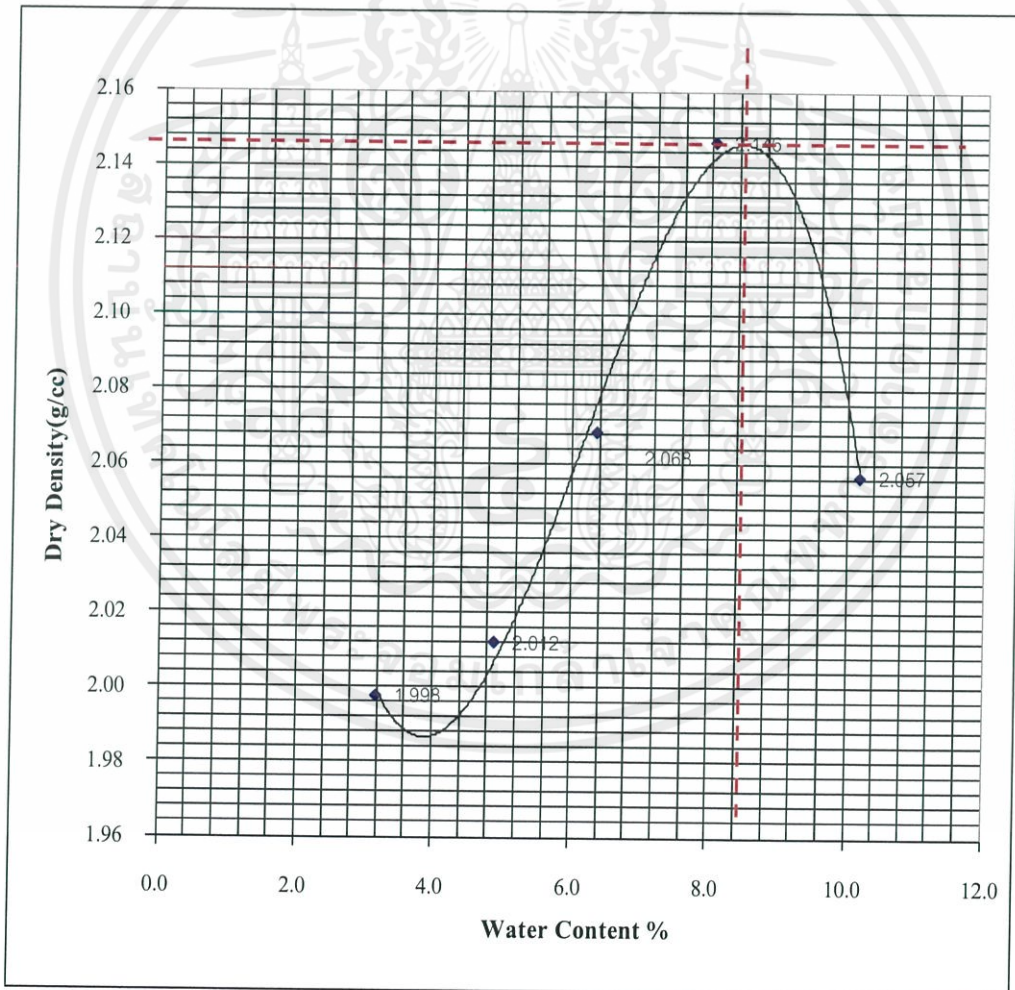


**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

*(Refer to ASTM D698)*

|                      |                      |                   |                 |
|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.1  |
| Location :           | -                    | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction           | Date of Testing : | 16/8/2561       |
| Sample Description : | ดินลูกรัง            | Type of Testing   | Modified Protor |



|                          |   |       |      |  |
|--------------------------|---|-------|------|--|
| Maximum Dry Density      | = | 2.146 | g/cc |  |
| Optimum Moisture Content | = | 8.41  | %    |  |



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

*(Refer to ASTM D698)*

|                             |                         |                          |                         |
|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | ปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | NO.2                    |
| <b>Location :</b>           | -                       | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction              | <b>Date of Testing :</b> | 16/8/2561               |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง D             | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |
|                             |                         | <b>Mold Volume :</b>     | 2142.66 cm <sup>3</sup> |
|                             |                         | <b>Mold Weight :</b>     | 2,673 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight mold + compacted soil g. | 7,081 | 7,187 | 7,373 | 7,628 | 7,517 |
| Weight mold g.                  | 2,673 | 2,673 | 2,673 | 2,673 | 2,673 |
| Weight compacted soil g.        | 4,408 | 4,514 | 4,700 | 4,955 | 4,844 |
| Wet density g / cc              | 2.06  | 2.11  | 2.19  | 2.31  | 2.26  |
| Dry density, Gd g / cc          | 1.99  | 2.00  | 2.06  | 2.14  | 2.04  |

**WATER CONTENT**

| Determination No.                 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Container No.                     | NME 6  | NME 7  | NME 8  | NME 10 | NME 11 |
| Weight of container + Wet soil g. | 136.48 | 155.05 | 143.18 | 185.75 | 151.22 |
| Weight of container + Dry soil g. | 132.77 | 148.12 | 135.14 | 172.61 | 138.07 |
| Weight of water, Ww g.            | 3.71   | 6.93   | 8.04   | 13.14  | 13.15  |
| Weight of container g.            | 14.82  | 13.77  | 13.53  | 14.09  | 14.01  |
| Weight of dry soil, Ws g.         | 117.95 | 134.35 | 121.61 | 158.52 | 124.06 |
| Percentage of water content, w %  | 3.15   | 5.16   | 6.61   | 8.29   | 10.60  |

**Maximum Dry Density = 2.136 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 8.80 %**

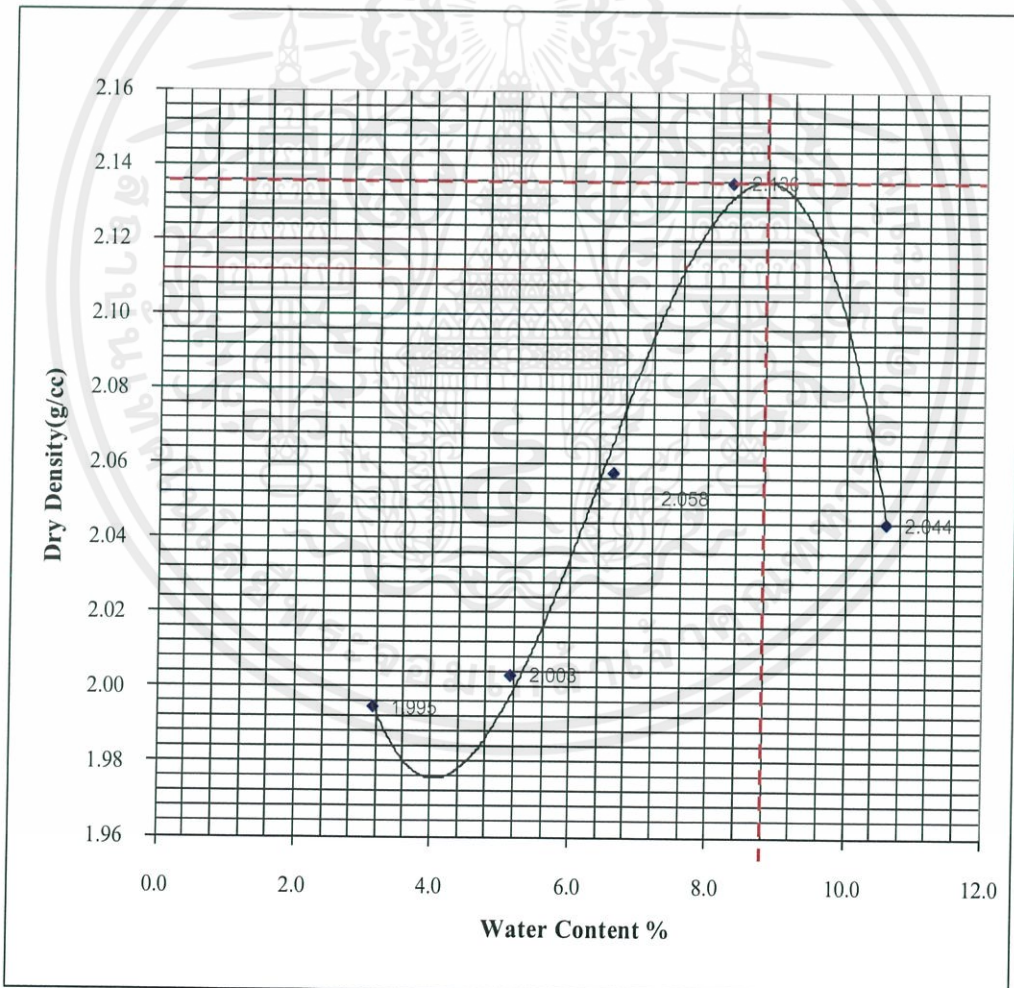


SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)


|                      |                         |                   |                 |
|----------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | ปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง | Req. No :         | NO.2            |
| Location :           | -                       | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction              | Date of Testing : | 16/8/2561       |
| Sample Description : | ดินลูกรัง D             | Type of Testing   | Modified Protor |



Maximum Dry Density = 2.136 g/cc

Optimum Moisture Content = 8.80 %

ข.3.4 การทดสอบการบดอัดดิน ดินลูกรังชนิด D+LF Slag 5%

|  DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |                     |              |             |                          |                         |        |
|--|---------------------|--------------|-------------|--------------------------|-------------------------|--------|
| COMPACTION TEST  |                     |              |             |                          |                         |        |
| (Refer to ASTM D698)   |                     |              |             |                          |                         |        |
| <b>Project :</b>   | พัฒนากำลังดินลูกรัง |              |             | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.1          |        |
| <b>Location :</b>  | -                   |              |             | <b>Date of Request :</b> | -                       |        |
| <b>Sample From :</b>   | Compaction          |              |             | <b>Date of Testing :</b> | 16/1/2562               |        |
| <b>Sample Description :</b>  | D+5% LF             |              |             | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |        |
|  |                     |              |             | <b>Mold Volume :</b>     | 2132.86 cm <sup>3</sup> |        |
|  |                     |              |             | <b>Mold Weight :</b>     | 2,724 gm.               |        |
| DENSITY  |                     |              |             |                          |                         |        |
| Determination No.  |                     | 1            | 2           | 3                        | 4                       | 5      |
| Weight mold + compacted soil   | g.                  | 7,190        | 7,386       | 7,625                    | 7,653                   | 7,515  |
| Weight mold  | g.                  | 2,724        | 2,724       | 2,724                    | 2,724                   | 2,724  |
| Weight compacted soil  | g.                  | 4,466        | 4,662       | 4,901                    | 4,929                   | 4,791  |
| Wet density  | g / cc              | 2.09         | 2.19        | 2.30                     | 2.31                    | 2.25   |
| Dry density, Gd  | g / cc              | 2.03         | 2.07        | 2.13                     | 2.12                    | 2.00   |
| WATER CONTENT  |                     |              |             |                          |                         |        |
| Determination No.  |                     | 1            | 2           | 3                        | 4                       | 5      |
| Container No.  |                     | CV-72        | P4          | M-112                    | M-27                    | M-25   |
| Weight of container + Wet soil   | g.                  | 165.70       | 120.45      | 156.95                   | 156.57                  | 217.37 |
| Weight of container + Dry soil   | g.                  | 160.83       | 114.91      | 146.30                   | 144.56                  | 195.97 |
| Weight of water, Ww  | g.                  | 4.87         | 5.54        | 10.65                    | 12.01                   | 21.40  |
| Weight of container  | g.                  | 17.30        | 18.65       | 14.36                    | 14.72                   | 18.79  |
| Weight of dry soil, Ws   | g.                  | 143.53       | 96.26       | 131.94                   | 129.84                  | 177.18 |
| Percentage of water content, w   | %                   | 3.39         | 5.76        | 8.07                     | 9.25                    | 12.08  |
| <b>Maximum Dry Density</b>   | =                   | <b>2.127</b> | <b>g/cc</b> |                          |                         |        |
| <b>Optimum Moisture Content</b>  | =                   | <b>8.38</b>  | <b>%</b>    |                          |                         |        |

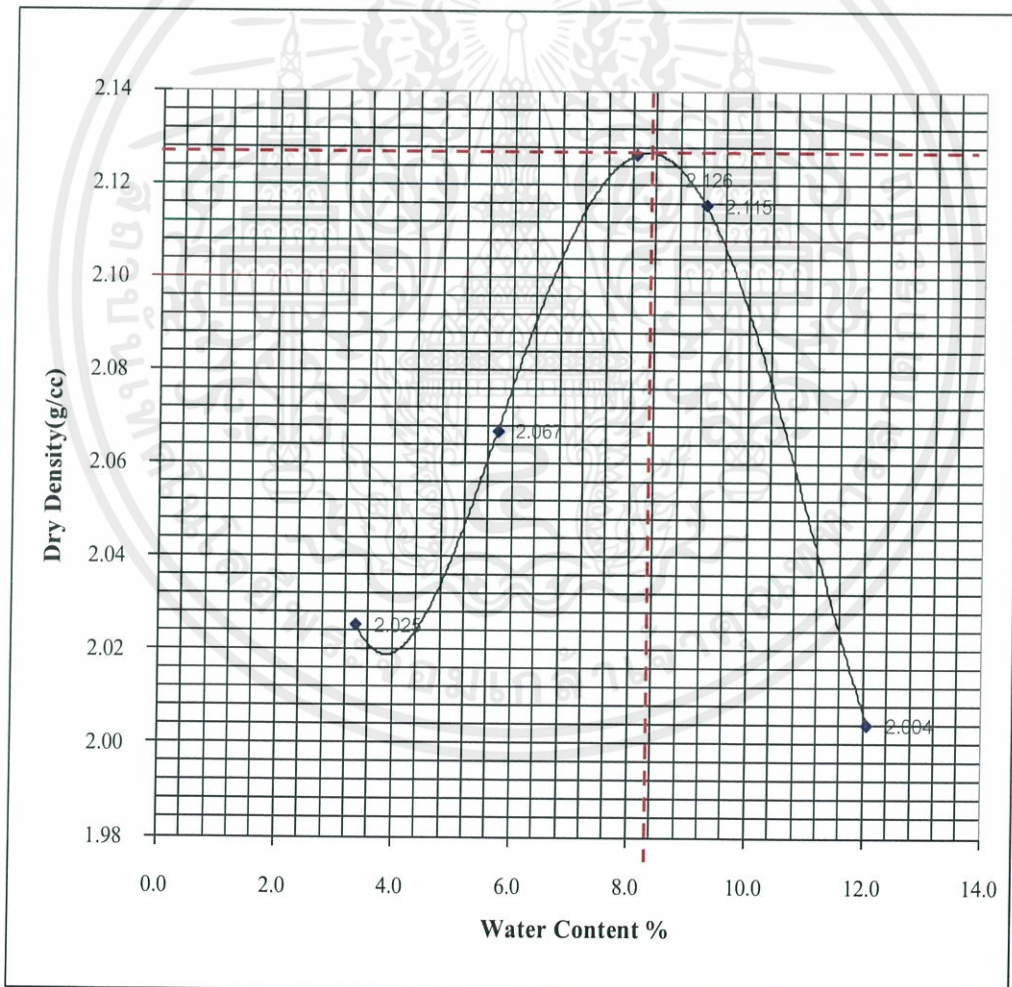


SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)

|                      |                      |                   |                 |
|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.1  |
| Location :           | -                    | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction           | Date of Testing : | 16/1/2562       |
| Sample Description : | D+5% LF              | Type of Testing   | Modified Protor |



Maximum Dry Density = 2.127 g/cc

Optimum Moisture Content = 8.38 %



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                      |                          |                         |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.2          |
| <b>Location :</b>           | -                    | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction           | <b>Date of Testing :</b> | 16/1/2562               |
| <b>Sample Description :</b> | D+5% LF              | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |
|                             |                      | <b>Mold Volume :</b>     | 2132.86 cm <sup>3</sup> |
|                             |                      | <b>Mold Weight :</b>     | 2,724 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight mold + compacted soil g. | 7,178 | 7,254 | 7,571 | 7,665 | 7,570 |
| Weight mold g.                  | 2,724 | 2,724 | 2,724 | 2,724 | 2,724 |
| Weight compacted soil g.        | 4,454 | 4,530 | 4,847 | 4,941 | 4,846 |
| Wet density g / cc              | 2.09  | 2.12  | 2.27  | 2.32  | 2.27  |
| Dry density, Gd g / cc          | 2.02  | 2.03  | 2.12  | 2.12  | 2.05  |

**WATER CONTENT**

| Determination No.                 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Container No.                     | S-18   | M-175  | M-111  | NME5   | M-46   |
| Weight of container + Wet soil g. | 245.56 | 146.79 | 141.52 | 149.04 | 176.59 |
| Weight of container + Dry soil g. | 238.21 | 140.66 | 133.30 | 137.59 | 160.91 |
| Weight of water , Ww g.           | 7.35   | 6.13   | 8.22   | 11.45  | 15.68  |
| Weight of container g.            | 22.41  | 13.23  | 18.65  | 14.08  | 13.52  |
| Weight of dry soil , Ws g.        | 215.80 | 127.43 | 114.65 | 123.51 | 147.39 |
| Percentage of water content , w % | 3.41   | 4.81   | 7.17   | 9.27   | 10.64  |

**Maximum Dry Density = 2.136 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 8.20 %**

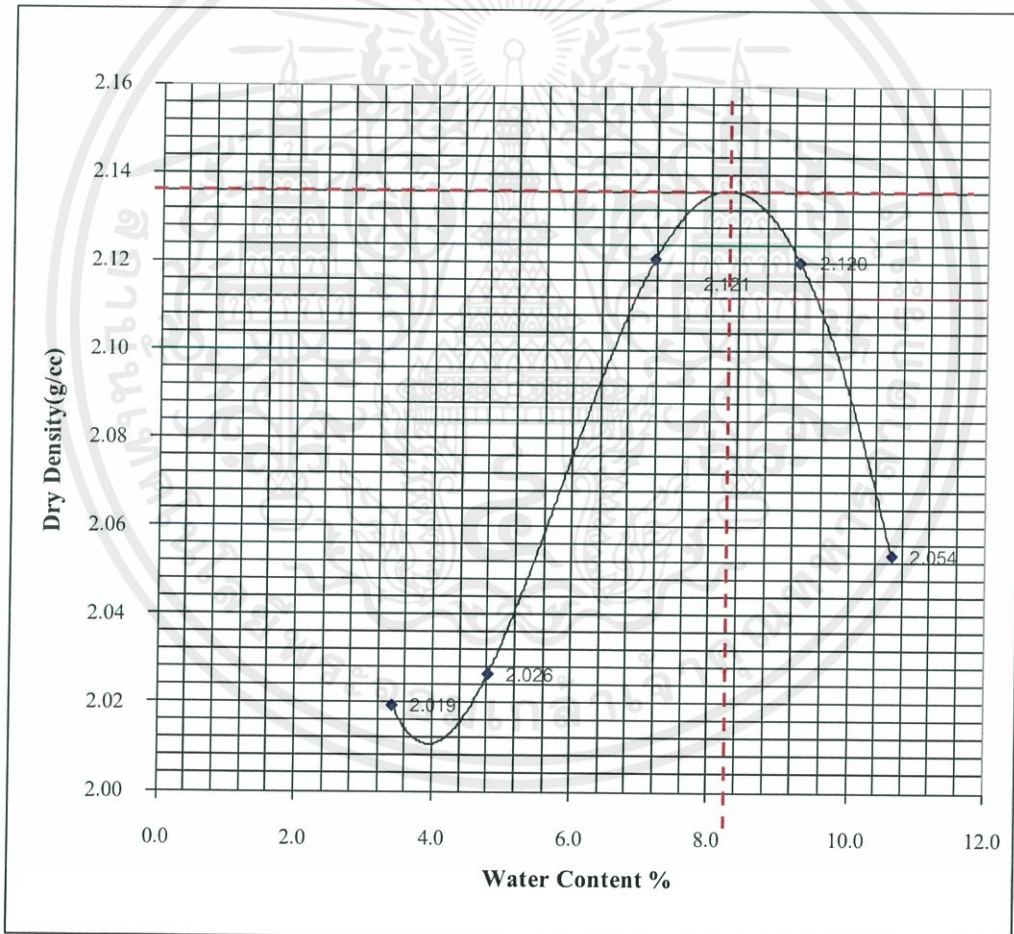


DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)


|                      |                      |                   |                 |
|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.2  |
| Location :           | -                    | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction           | Date of Testing : | 16/1/2562       |
| Sample Description : | D+5% LF              | Type of Testing   | Modified Protor |



Maximum Dry Density = 2.136 g/cc

Optimum Moisture Content = 8.20 %

ข.3.5 การทดสอบการบดอัดดิน ดินลูกรังชนิด D+LF Slag 7%

|  DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |                     |        |        |                   |                         |        |
|--|---------------------|--------|--------|-------------------|-------------------------|--------|
| COMPACTION TEST  |                     |        |        |                   |                         |        |
| (Refer to ASTM D698)   |                     |        |        |                   |                         |        |
| Project :  | พัฒนากำลังดินลูกรัง |        |        | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.1          |        |
| Location :   | -                   |        |        | Date of Request : | -                       |        |
| Sample From :  | Compaction          |        |        | Date of Testing : | 25/1/2562               |        |
| Sample Description :   | D+7% LF             |        |        | Type of Testing   | Modified Protor         |        |
|  |                     |        |        | Mold Volume :     | 2132.86 cm <sup>3</sup> |        |
|  |                     |        |        | Mold Weight :     | 2,724 gm.               |        |
| DENSITY  |                     |        |        |                   |                         |        |
| Determination No.  |                     | 1      | 2      | 3                 | 4                       | 5      |
| Weight mold + compacted soil   | g.                  | 7,137  | 7,206  | 7,338             | 7,601                   | 7,657  |
| Weight mold  | g.                  | 2,724  | 2,724  | 2,724             | 2,724                   | 2,724  |
| Weight compacted soil  | g.                  | 4,413  | 4,482  | 4,614             | 4,877                   | 4,933  |
| Wet density  | g / cc              | 2.07   | 2.10   | 2.16              | 2.29                    | 2.31   |
| Dry density, Gd  | g / cc              | 2.02   | 2.02   | 2.06              | 2.13                    | 2.12   |
| WATER CONTENT  |                     |        |        |                   |                         |        |
| Determination No.  |                     | 1      | 2      | 3                 | 4                       | 5      |
| Container No.  |                     | A-1    | NME12  | M-236             | CV-56                   | D6     |
| Weight of container + Wet soil   | g.                  | 127.29 | 133.19 | 152.82            | 159.10                  | 175.60 |
| Weight of container + Dry soil   | g.                  | 124.84 | 128.65 | 145.81            | 149.34                  | 161.98 |
| Weight of water , Ww   | g.                  | 2.45   | 4.54   | 7.01              | 9.76                    | 13.62  |
| Weight of container  | g.                  | 15.59  | 13.72  | 12.58             | 14.06                   | 14.89  |
| Weight of dry soil , Ws  | g.                  | 109.25 | 114.93 | 133.23            | 135.28                  | 147.09 |
| Percentage of water content , w  | %                   | 2.24   | 3.95   | 5.26              | 7.21                    | 9.26   |
| Maximum Dry Density  | =                   | 2.151  |        | g/cc              |                         |        |
| Optimum Moisture Content   | =                   | 8.20   |        | %                 |                         |        |

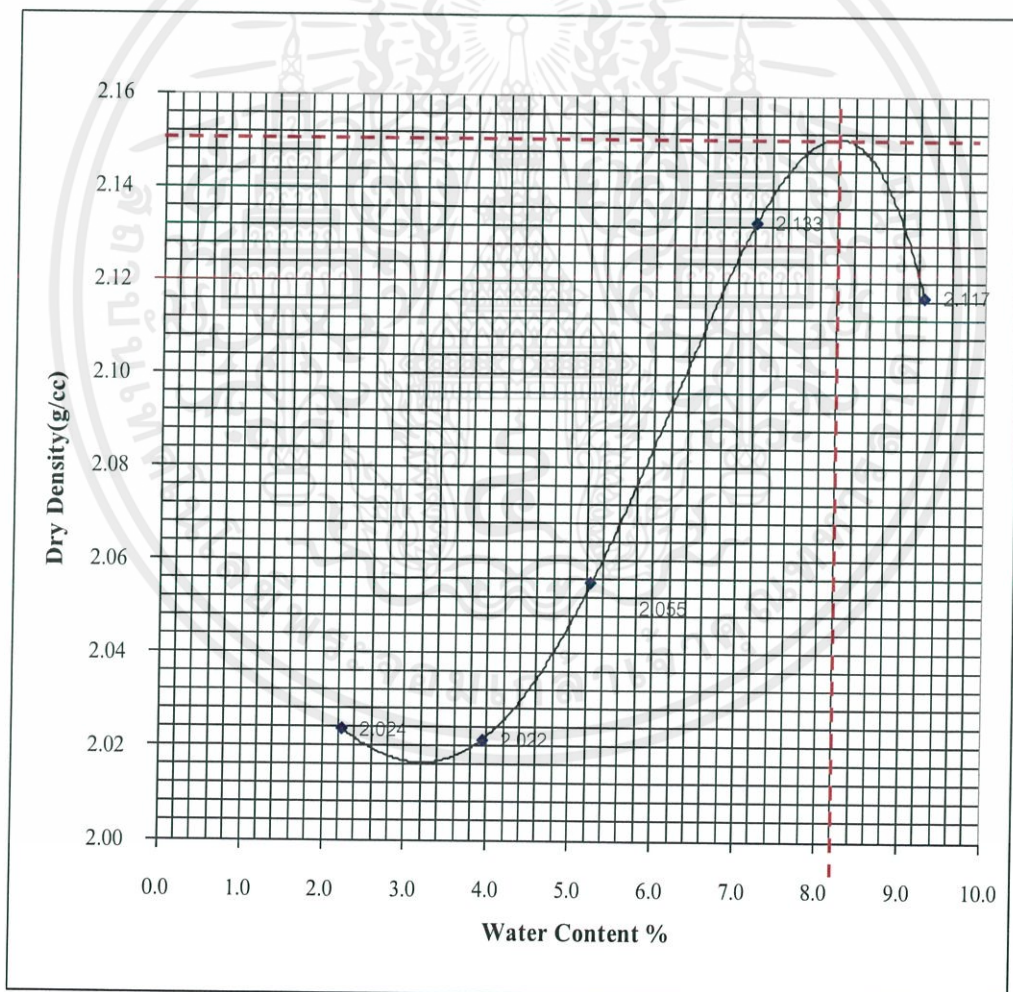


SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)

|                      |                     |                   |                 |
|----------------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนากำลังดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.1  |
| Location :           | -                   | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction          | Date of Testing : | 25/1/2562       |
| Sample Description : | D+7% LF             | Type of Testing   | Modified Protor |



Maximum Dry Density = 2.151 g/cc

Optimum Moisture Content = 8.20 %



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                      |                          |                         |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.2          |
| <b>Location :</b>           | -                    | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction           | <b>Date of Testing :</b> | 25/1/2562               |
| <b>Sample Description :</b> | D+7% LF              | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |
|                             |                      | <b>Mold Volume :</b>     | 2132.86 cm <sup>3</sup> |
|                             |                      | <b>Mold Weight :</b>     | 2,724 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight mold + compacted soil g. | 7,157 | 7,239 | 7,395 | 7,644 | 7,544 |
| Weight mold g.                  | 2,724 | 2,724 | 2,724 | 2,724 | 2,724 |
| Weight compacted soil g.        | 4,433 | 4,515 | 4,671 | 4,920 | 4,820 |
| Wet density g / cc              | 2.08  | 2.12  | 2.19  | 2.31  | 2.26  |
| Dry density, Gd g / cc          | 2.02  | 2.03  | 2.07  | 2.14  | 2.03  |

**WATER CONTENT**

| Determination No.                 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Container No.                     | A-1    | NME12  | M-236  | CV-56  | D6     |
| Weight of container + Wet soil g. | 165.33 | 200.36 | 151.78 | 166.16 | 175.54 |
| Weight of container + Dry soil g. | 161.22 | 192.80 | 144.45 | 155.40 | 159.44 |
| Weight of water, Ww g.            | 4.11   | 7.56   | 7.33   | 10.76  | 16.10  |
| Weight of container g.            | 14.58  | 18.96  | 18.37  | 15.42  | 13.91  |
| Weight of dry soil, Ws g.         | 146.64 | 173.84 | 126.08 | 139.98 | 145.53 |
| Percentage of water content, w %  | 2.80   | 4.35   | 5.81   | 7.69   | 11.06  |

**Maximum Dry Density = 2.154 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 8.55 %**

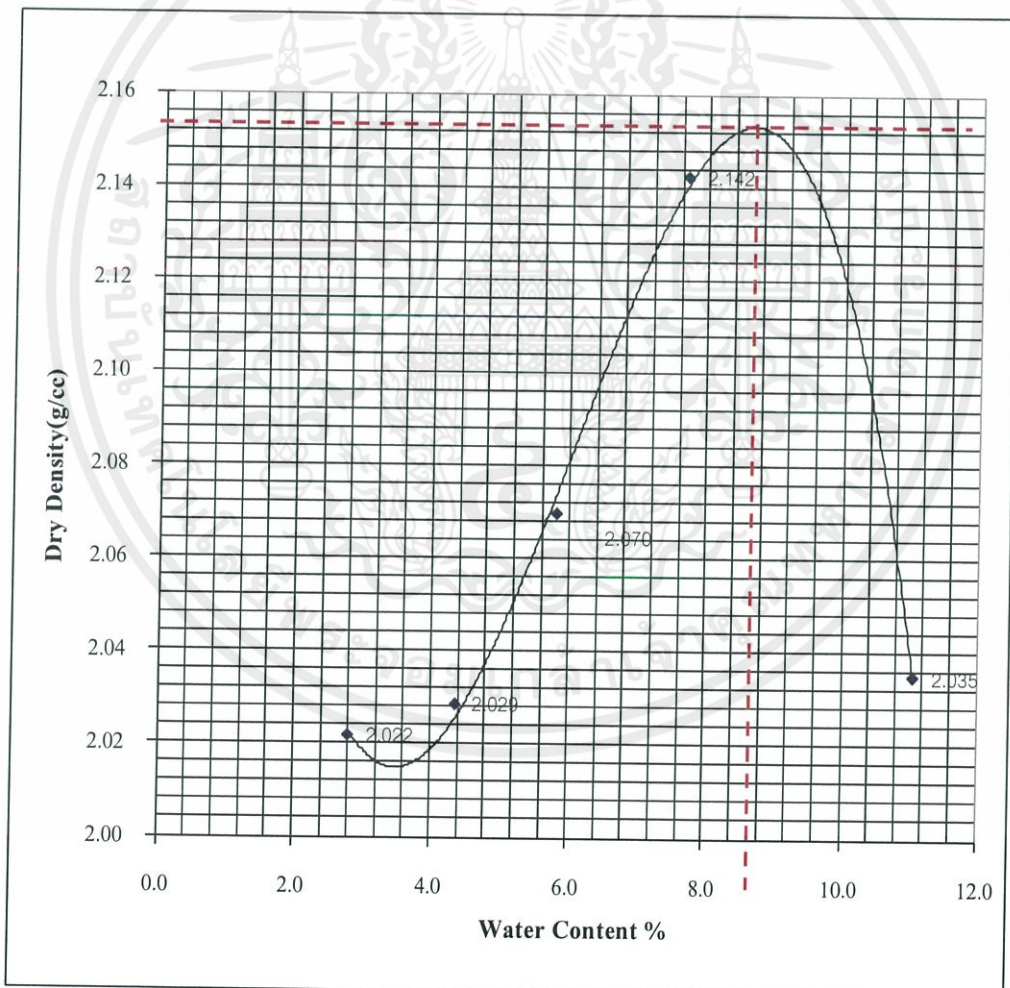


DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)


|                      |                     |                   |                 |
|----------------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนากำลังดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.2  |
| Location :           | -                   | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction          | Date of Testing : | 25/1/2562       |
| Sample Description : | D+7% LF             | Type of Testing   | Modified Protor |



Maximum Dry Density = 2.154 g/cc

Optimum Moisture Content = 8.55 %

ข.3.6 การทดสอบการบดอัดดิน ดินลูกรังชนิด D+LF Slag 10%

|  DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |                     |                          |                 |                 |        |        |
|---|---------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|--------|--------|
| COMPACTION TEST   |                     |                          |                 |                 |        |        |
| (Refer to ASTM D698)  |                     |                          |                 |                 |        |        |
| <b>Project :</b>  | พัฒนากำลังดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.1  |                 |        |        |
| <b>Location :</b>   | -                   | <b>Date of Request :</b> | -               |                 |        |        |
| <b>Sample From :</b>  | Compaction          | <b>Date of Testing :</b> | 22/8/2561       |                 |        |        |
| <b>Sample Description :</b>   | D+10% LF            | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor |                 |        |        |
|   |                     | <b>Mold Volume :</b>     | 2138.77         | cm <sup>3</sup> |        |        |
|   |                     | <b>Mold Weight :</b>     | 2,671           | gm.             |        |        |
| DENSITY   |                     |                          |                 |                 |        |        |
| Determination No.   |                     | 1                        | 2               | 3               | 4      | 5      |
| Weight mold + compacted soil  | g.                  | 7,164                    | 7,332           | 7,539           | 7,621  | 7,527  |
| Weight mold   | g.                  | 2,671                    | 2,671           | 2,671           | 2,671  | 2,671  |
| Weight compacted soil   | g.                  | 4,493                    | 4,661           | 4,868           | 4,950  | 4,856  |
| Wet density   | g / cc              | 2.10                     | 2.18            | 2.28            | 2.31   | 2.27   |
| Dry density, Gd   | g / cc              | 2.04                     | 2.07            | 2.16            | 2.12   | 2.06   |
| WATER CONTENT   |                     |                          |                 |                 |        |        |
| Determination No.   |                     | 1                        | 2               | 3               | 4      | 5      |
| Container No.   |                     | M-117                    | M-249           | M-252           | M-110  | M-250  |
| Weight of container + Wet soil  | g.                  | 139.16                   | 153.41          | 139.22          | 160.13 | 155.99 |
| Weight of container + Dry soil  | g.                  | 135.35                   | 146.27          | 132.66          | 147.73 | 143.10 |
| Weight of water , Ww  | g.                  | 3.81                     | 7.14            | 6.56            | 12.40  | 12.89  |
| Weight of container   | g.                  | 14.01                    | 14.86           | 14.10           | 14.79  | 13.83  |
| Weight of dry soil , Ws   | g.                  | 121.34                   | 131.41          | 118.56          | 132.94 | 129.27 |
| Percentage of water content , w   | %                   | 3.14                     | 5.43            | 5.53            | 9.33   | 9.97   |
| <b>Maximum Dry Density</b>  |                     | =                        | <b>2.171</b>    | <b>g/cc</b>     |        |        |
| <b>Optimum Moisture Content</b>   |                     | =                        | <b>7.78</b>     | <b>%</b>        |        |        |

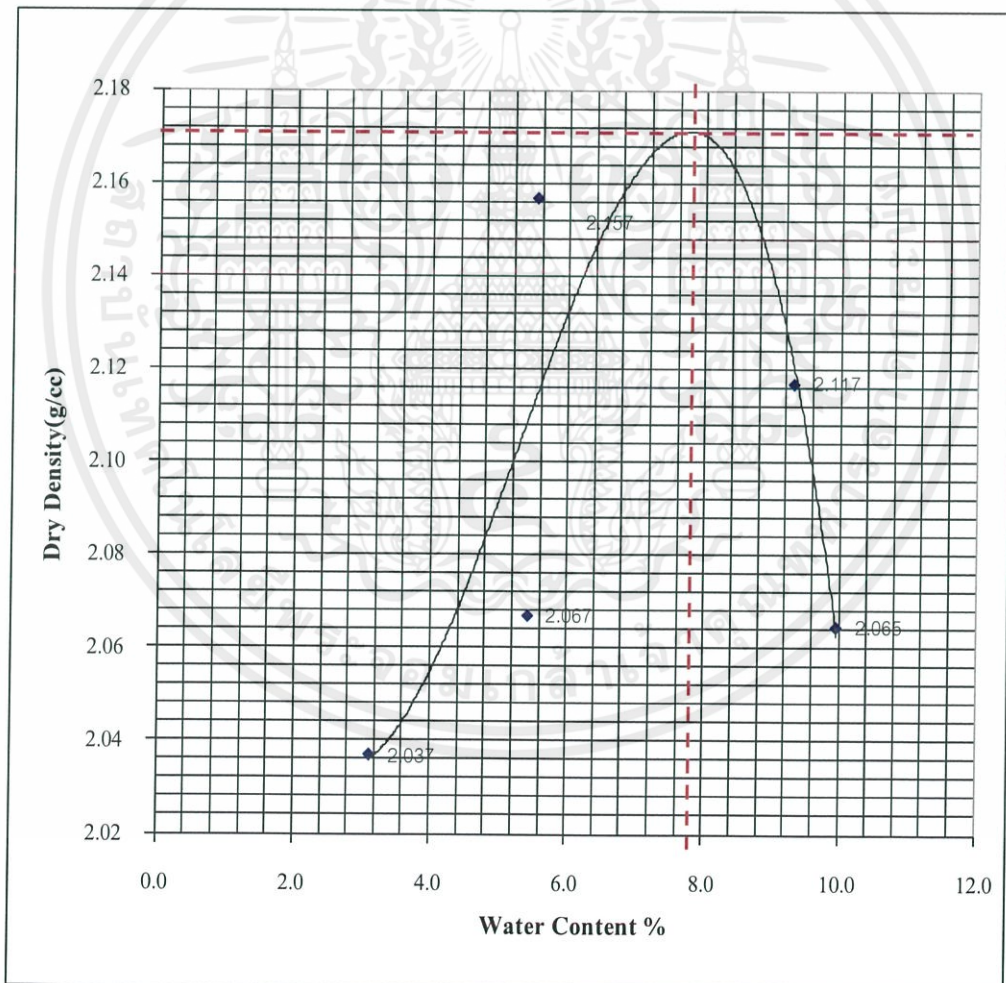


SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)

|                      |                     |                   |                 |
|----------------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนากำลังดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.1  |
| Location :           | -                   | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction          | Date of Testing : | 22/8/2561       |
| Sample Description : | D+10% LF            | Type of Testing   | Modified Protor |



Maximum Dry Density = 2.171 g/cc

Optimum Moisture Content = 7.78 %



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                     |                          |                         |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลังดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.2          |
| <b>Location :</b>           | -                   | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction          | <b>Date of Testing :</b> | 22/8/2561               |
| <b>Sample Description :</b> | D+10% LF            | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |
|                             |                     | <b>Mold Volume :</b>     | 2151.09 cm <sup>3</sup> |
|                             |                     | <b>Mold Weight :</b>     | 2,724 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight mold + compacted soil g. | 7,184 | 7,316 | 7,556 | 7,660 | 7,583 |
| Weight mold g.                  | 2,724 | 2,724 | 2,724 | 2,724 | 2,724 |
| Weight compacted soil g.        | 4,460 | 4,592 | 4,832 | 4,936 | 4,859 |
| Wet density g / cc              | 2.07  | 2.13  | 2.25  | 2.29  | 2.26  |
| Dry density, Gd g / cc          | 2.00  | 2.05  | 2.11  | 2.12  | 2.02  |

**WATER CONTENT**

| Determination No.                 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Container No.                     | M-117  | M-249  | M-252  | M-110  | M-250  |
| Weight of container + Wet soil g. | 218.30 | 146.53 | 125.29 | 135.72 | 132.86 |
| Weight of container + Dry soil g. | 211.61 | 141.04 | 118.51 | 126.28 | 120.60 |
| Weight of water, Ww g.            | 6.69   | 5.49   | 6.78   | 9.44   | 12.26  |
| Weight of container g.            | 24.22  | 13.92  | 15.50  | 15.03  | 14.90  |
| Weight of dry soil, Ws g.         | 187.39 | 127.12 | 103.01 | 111.25 | 105.70 |
| Percentage of water content, w %  | 3.57   | 4.32   | 6.58   | 8.49   | 11.60  |

**Maximum Dry Density = 2.180 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 7.60 %**

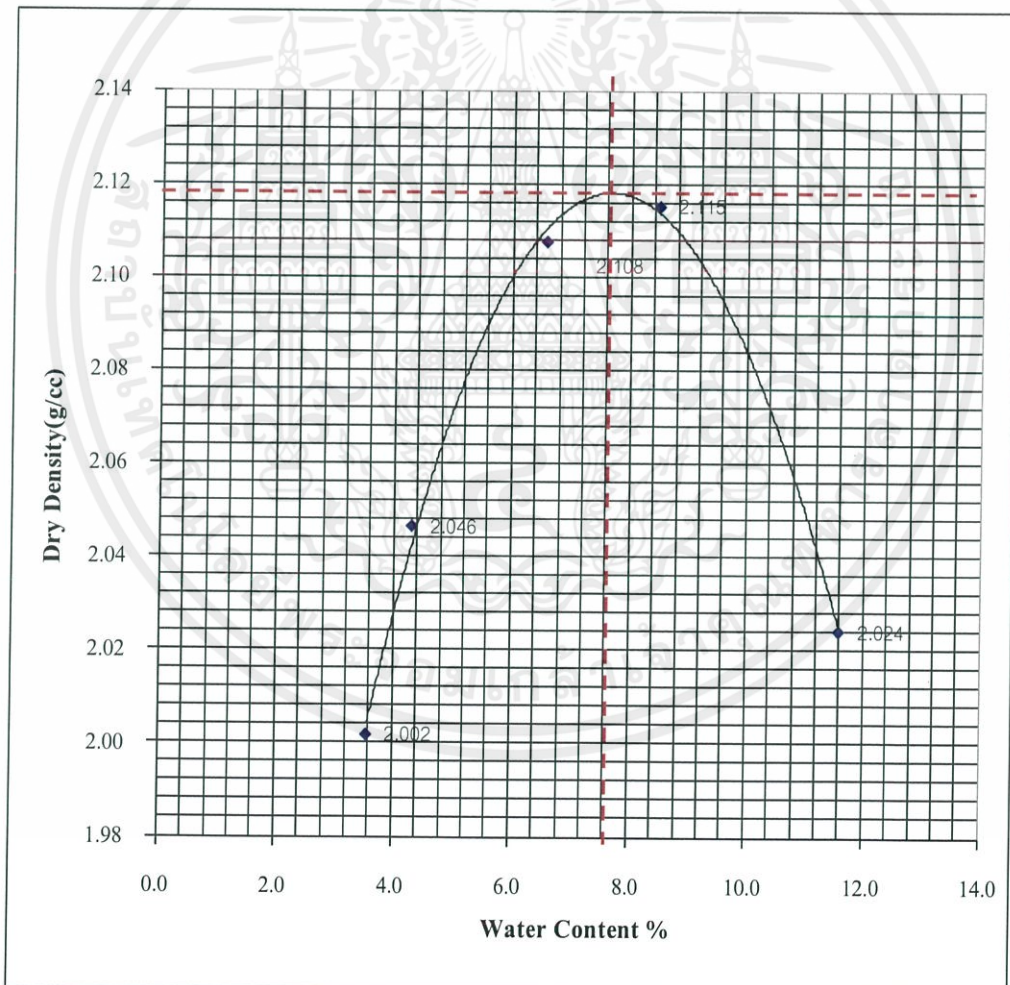


DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)


|                      |                      |                   |                 |
|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนากำลัังดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.2  |
| Location :           | -                    | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction           | Date of Testing : | 22/8/2561       |
| Sample Description : | D+10% LF             | Type of Testing   | Modified Protor |



Maximum Dry Density = 2.180 g/cc

Optimum Moisture Content = 7.60 %

ข.3.7 การทดสอบการบดอัดดิน ดินลูกรังชนิด E

|  DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |                     |        |              |                          |                         |        |
|---|---------------------|--------|--------------|--------------------------|-------------------------|--------|
| COMPACTION TEST   |                     |        |              |                          |                         |        |
| (Refer to ASTM D698)  |                     |        |              |                          |                         |        |
| <b>Project :</b>  | พัฒนากำลังดินลูกรัง |        |              | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.1          |        |
| <b>Location :</b>   | -                   |        |              | <b>Date of Request :</b> | -                       |        |
| <b>Sample From :</b>  | Compaction          |        |              | <b>Date of Testing :</b> | 9/10/2561               |        |
| <b>Sample Description :</b>   | ดินลูกรัง E         |        |              | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |        |
|   |                     |        |              | <b>Mold Volume :</b>     | 2147.92 cm <sup>3</sup> |        |
|   |                     |        |              | <b>Mold Weight :</b>     | 2,783 gm.               |        |
| DENSITY   |                     |        |              |                          |                         |        |
| Determination No.   |                     | 1      | 2            | 3                        | 4                       | 5      |
| Weight mold + compacted soil  | g.                  | 7,232  | 7,342        | 7,501                    | 7,716                   | 7,708  |
| Weight mold   | g.                  | 2,783  | 2,783        | 2,783                    | 2,783                   | 2,783  |
| Weight compacted soil   | g.                  | 4,449  | 4,559        | 4,718                    | 4,933                   | 4,925  |
| Wet density   | g / cc              | 2.07   | 2.12         | 2.20                     | 2.30                    | 2.29   |
| Dry density, Gd   | g / cc              | 2.02   | 2.03         | 2.07                     | 2.12                    | 2.06   |
| WATER CONTENT   |                     |        |              |                          |                         |        |
| Determination No.   |                     | 1      | 2            | 3                        | 4                       | 5      |
| Container No.   |                     | NME 1  | NME 2        | NME 3                    | NME 4                   | NME 5  |
| Weight of container + Wet soil  | g.                  | 107.88 | 118.72       | 117.58                   | 127.00                  | 147.66 |
| Weight of container + Dry soil  | g.                  | 105.50 | 114.26       | 111.48                   | 118.27                  | 134.29 |
| Weight of water , Ww  | g.                  | 2.38   | 4.46         | 6.10                     | 8.73                    | 13.37  |
| Weight of container   | g.                  | 16.00  | 14.53        | 13.54                    | 13.97                   | 14.02  |
| Weight of dry soil , Ws   | g.                  | 89.50  | 99.73        | 97.94                    | 104.30                  | 120.27 |
| Percentage of water content , w   | %                   | 2.66   | 4.47         | 6.23                     | 8.37                    | 11.12  |
| <b>Maximum Dry Density</b>  |                     | =      | <b>2.120</b> | <b>g/cc</b>              |                         |        |
| <b>Optimum Moisture Content</b>   |                     | =      | <b>9.00</b>  | <b>%</b>                 |                         |        |

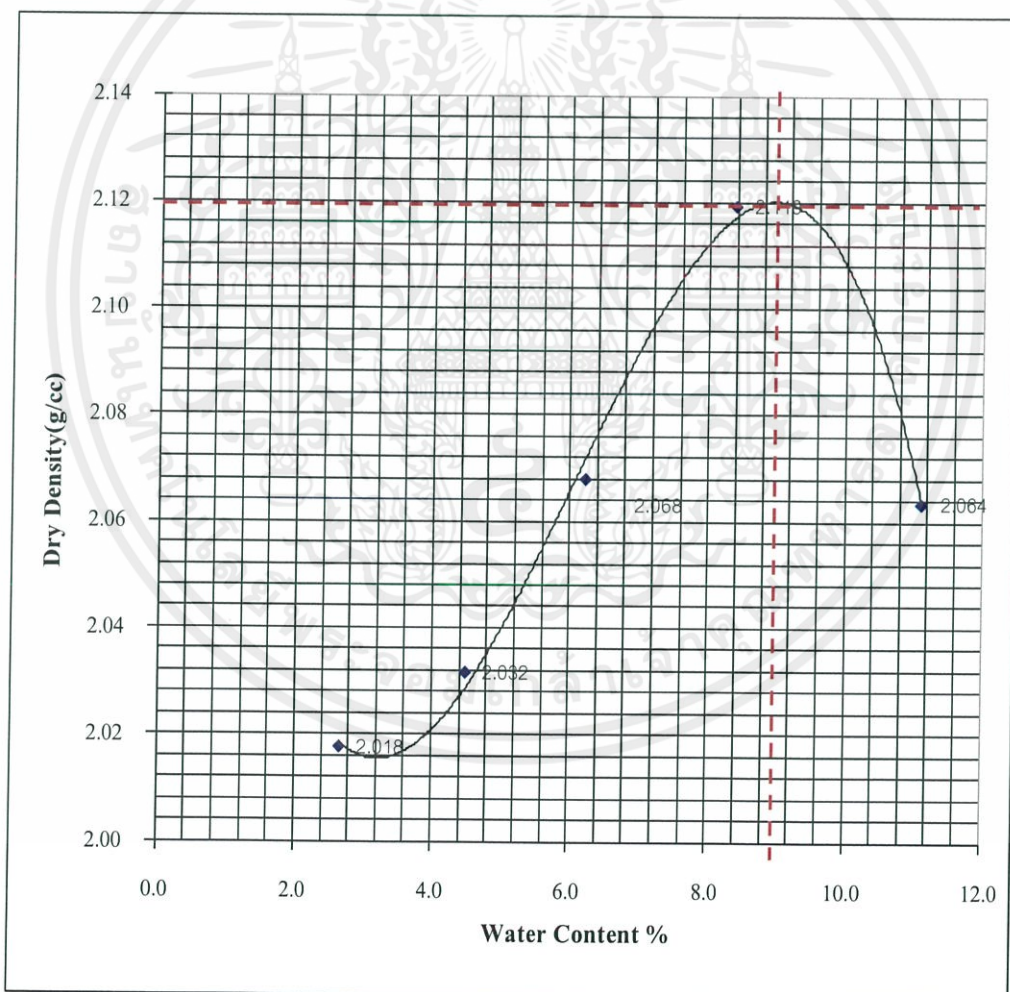


DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)

Project : พัฒนากำลัังดินลูกรัง      Req. No : ดินลูกรัง NO.1  
Location : -      Date of Request : -  
Sample From : Compaction      Date of Testing : 9/10/2561  
Sample Description : ดินลูกรัง E      Type of Testing : Modified Protor



Maximum Dry Density = 2.120 g/cc

Optimum Moisture Content = 9.00 %



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                      |                          |                         |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.2          |
| <b>Location :</b>           | -                    | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction           | <b>Date of Testing :</b> | 9/10/2561               |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง E          | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |
|                             |                      | <b>Mold Volume :</b>     | 2076.49 cm <sup>3</sup> |
|                             |                      | <b>Mold Weight :</b>     | 2,672 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.            |        | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight mold + compacted soil | g.     | 6,998 | 7,180 | 7,294 | 7,579 | 7,488 |
| Weight mold                  | g.     | 2,672 | 2,672 | 2,672 | 2,672 | 2,672 |
| Weight compacted soil        | g.     | 4,326 | 4,508 | 4,622 | 4,907 | 4,816 |
| Wet density                  | g / cc | 2.08  | 2.17  | 2.23  | 2.36  | 2.32  |
| Dry density, Gd              | g / cc | 2.03  | 2.08  | 2.09  | 2.19  | 2.09  |

**WATER CONTENT**

| Determination No.               |    | 1     | 2      | 3      | 4      | 5      |
|---------------------------------|----|-------|--------|--------|--------|--------|
| Container No.                   |    | NME 6 | NME 7  | NME 8  | NME 10 | NME 11 |
| Weight of container + Wet soil  | g. | 93.39 | 133.67 | 155.71 | 116.37 | 151.30 |
| Weight of container + Dry soil  | g. | 91.49 | 128.74 | 147.74 | 108.62 | 137.81 |
| Weight of water , Ww            | g. | 1.90  | 4.93   | 7.97   | 7.75   | 13.49  |
| Weight of container             | g. | 12.71 | 19.22  | 22.43  | 12.57  | 14.45  |
| Weight of dry soil , Ws         | g. | 78.78 | 109.52 | 125.31 | 96.05  | 123.36 |
| Percentage of water content , w | %  | 2.41  | 4.50   | 6.36   | 8.07   | 10.94  |

**Maximum Dry Density = 2.186 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 8.10 %**

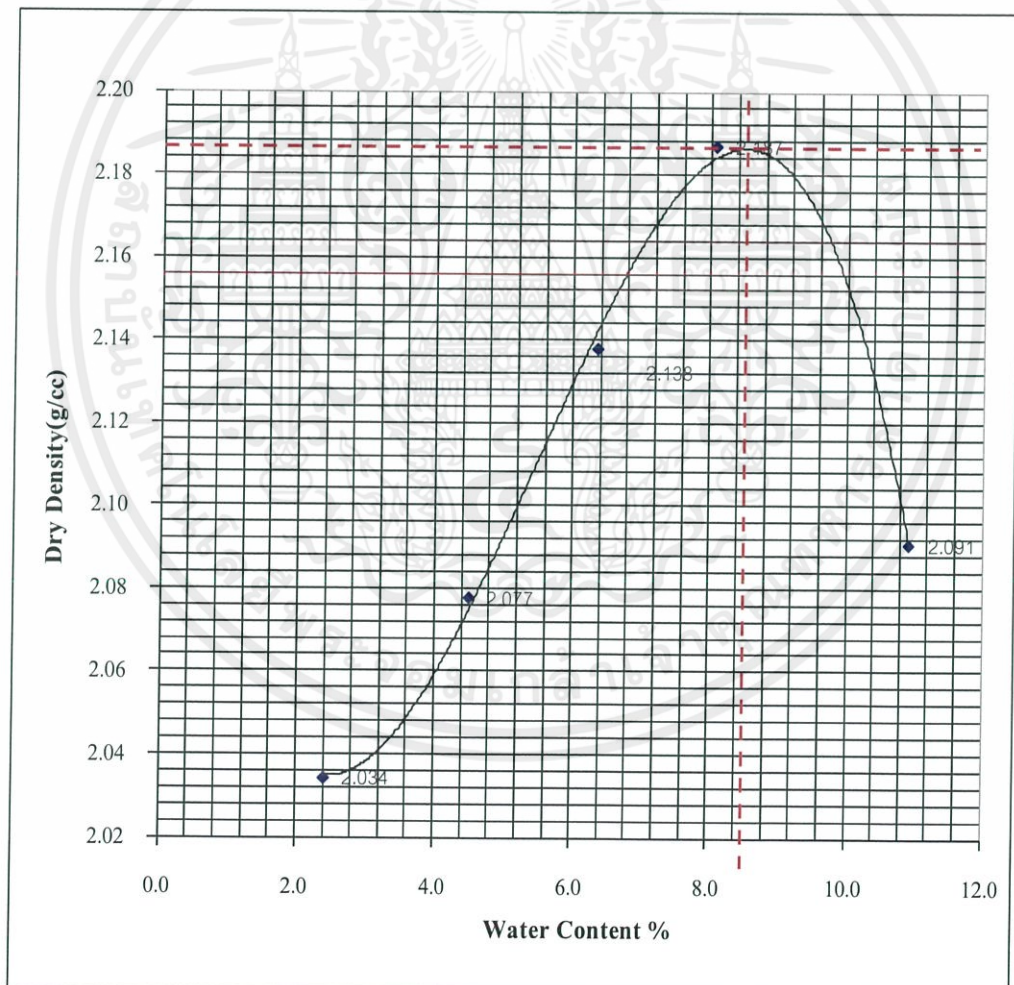


DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)

Project : พัฒนากำลั่งดินลูกรัง      Req. No : ดินลูกรัง NO.2  
Location : -      Date of Request : -  
Sample From : Compaction      Date of Testing : 9/10/2561  
Sample Description : ดินลูกรัง E      Type of Testing : Modified Protor



Maximum Dry Density = 2.186 g/cc

Optimum Moisture Content = 8.50 %



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

*(Refer to ASTM D698)*

|                             |                      |                          |                         |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.3          |
| <b>Location :</b>           | -                    | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction           | <b>Date of Testing :</b> | 9/10/2561               |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง E          | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |
|                             |                      | <b>Mold Volume :</b>     | 2147.92 cm <sup>3</sup> |
|                             |                      | <b>Mold Weight :</b>     | 2,783 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight mold + compacted soil g. | 7,048 | 7,198 | 7,351 | 7,596 | 7,643 |
| Weight mold g.                  | 2,783 | 2,783 | 2,783 | 2,783 | 2,783 |
| Weight compacted soil g.        | 4,265 | 4,415 | 4,568 | 4,813 | 4,860 |
| Wet density g / cc              | 1.99  | 2.06  | 2.13  | 2.24  | 2.26  |
| Dry density, Gd g / cc          | 1.93  | 1.96  | 2.00  | 2.07  | 2.05  |

**WATER CONTENT**

| Determination No.                 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Container No.                     | E-2    | F-5    | NME 12 | NME 9  | M-41   |
| Weight of container + Wet soil g. | 138.04 | 101.25 | 125.15 | 136.57 | 135.11 |
| Weight of container + Dry soil g. | 134.95 | 97.08  | 118.17 | 127.32 | 123.96 |
| Weight of water , Ww g.           | 3.09   | 4.17   | 6.98   | 9.25   | 11.15  |
| Weight of container g.            | 19.46  | 8.22   | 9.46   | 14.42  | 13.97  |
| Weight of dry soil , Ws g.        | 115.49 | 88.86  | 108.71 | 112.90 | 109.99 |
| Percentage of water content , w % | 2.68   | 4.69   | 6.42   | 8.19   | 10.14  |

**Maximum Dry Density = 2.071 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 9.10 %**

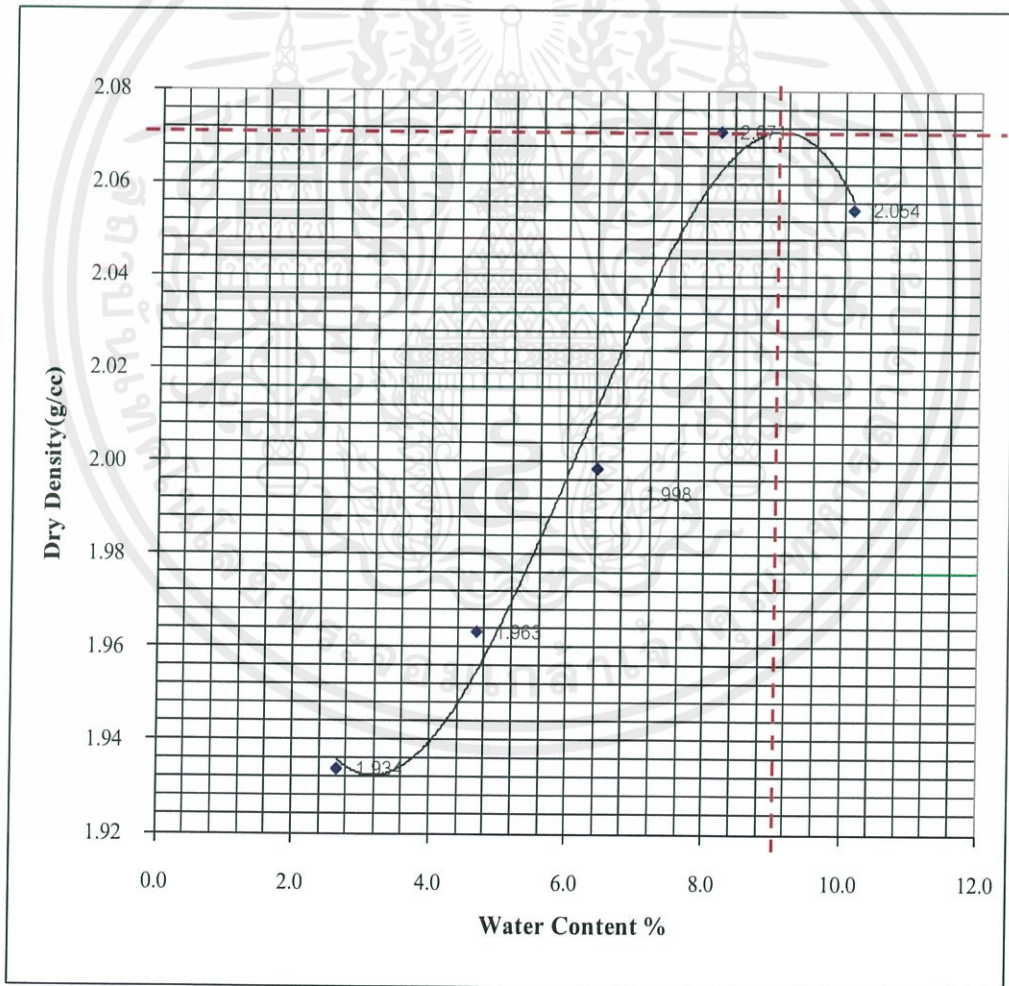


**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)


|                      |                       |                   |                 |
|----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนาท่าลิ่งดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.3  |
| Location :           | -                     | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction            | Date of Testing : | 9/10/2561       |
| Sample Description : | ดินลูกรัง E           | Type of Testing   | Modified Protor |



Maximum Dry Density = 2.071 g/cc

Optimum Moisture Content = 9.10 %

ข.3.8 การทดสอบการบดอัดดิน ดินลูกรังชนิด E+LF Slag 5%

|  DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |                     |                          |                 |                 |        |        |
|---|---------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|--------|--------|
| COMPACTION TEST   |                     |                          |                 |                 |        |        |
| (Refer to ASTM D698)  |                     |                          |                 |                 |        |        |
| <b>Project :</b>  | พัฒนากำลังดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.1  |                 |        |        |
| <b>Location :</b>   | -                   | <b>Date of Request :</b> | -               |                 |        |        |
| <b>Sample From :</b>  | Compaction          | <b>Date of Testing :</b> | 18/1/2562       |                 |        |        |
| <b>Sample Description :</b>   | E+5% LF             | <b>Type of Testing:</b>  | Modified Protor |                 |        |        |
|   |                     | <b>Mold Volume :</b>     | 2132.86         | cm <sup>3</sup> |        |        |
|   |                     | <b>Mold Weight :</b>     | 2,724           | gm.             |        |        |
| DENSITY   |                     |                          |                 |                 |        |        |
| Determination No.   |                     | 1                        | 2               | 3               | 4      | 5      |
| Weight mold + compacted soil  | g.                  | 7,136                    | 7,263           | 7,472           | 7,633  | 7,587  |
| Weight mold   | g.                  | 2,724                    | 2,724           | 2,724           | 2,724  | 2,724  |
| Weight compacted soil   | g.                  | 4,412                    | 4,539           | 4,748           | 4,909  | 4,863  |
| Wet density   | g / cc              | 2.07                     | 2.13            | 2.23            | 2.30   | 2.28   |
| Dry density, Gd   | g / cc              | 2.02                     | 2.03            | 2.10            | 2.12   | 2.07   |
| WATER CONTENT   |                     |                          |                 |                 |        |        |
| Determination No.   |                     | 1                        | 2               | 3               | 4      | 5      |
| Container No.   |                     | A-1                      | NME12           | M-236           | CV-56  | D6     |
| Weight of container + Wet soil  | g.                  | 82.04                    | 63.07           | 94.12           | 133.25 | 167.44 |
| Weight of container + Dry soil  | g.                  | 80.77                    | 60.65           | 89.66           | 124.12 | 153.59 |
| Weight of water , Ww  | g.                  | 1.27                     | 2.42            | 4.46            | 9.13   | 13.85  |
| Weight of container   | g.                  | 24.60                    | 9.49            | 14.10           | 15.42  | 14.45  |
| Weight of dry soil , Ws   | g.                  | 56.17                    | 51.16           | 75.56           | 108.70 | 139.14 |
| Percentage of water content , w   | %                   | 2.26                     | 4.73            | 5.90            | 8.40   | 9.95   |
| <b>Maximum Dry Density</b>  | =                   | <b>2.140</b>             | <b>g/cc</b>     |                 |        |        |
| <b>Optimum Moisture Content</b>   | =                   | <b>7.40</b>              | <b>%</b>        |                 |        |        |

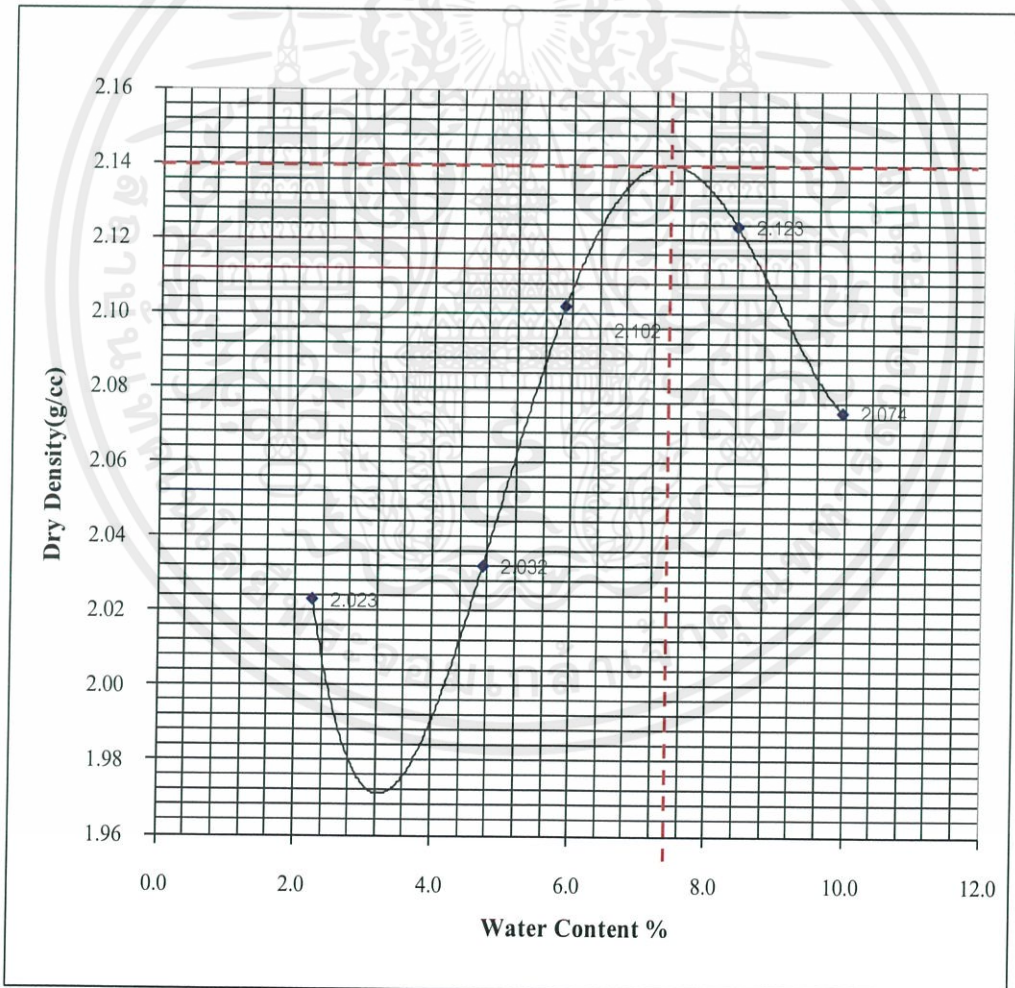


**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                      |                      |                   |                 |
|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนากำลัังดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.1  |
| Location :           | -                    | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction           | Date of Testing : | 18/1/2562       |
| Sample Description : | E+5% LF              | Type of Testing   | Modified Protor |



**Maximum Dry Density = 2.140 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 7.40 %**



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                     |                          |                         |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลังดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.2          |
| <b>Location :</b>           | -                   | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction          | <b>Date of Testing :</b> | 18/1/2562               |
| <b>Sample Description :</b> | D+5% LF             | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |
|                             |                     | <b>Mold Volume :</b>     | 2132.86 cm <sup>3</sup> |
|                             |                     | <b>Mold Weight :</b>     | 2.724 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight mold + compacted soil g. | 7,112 | 7,218 | 7,417 | 7,653 | 7,621 |
| Weight mold g.                  | 2,724 | 2,724 | 2,724 | 2,724 | 2,724 |
| Weight compacted soil g.        | 4,388 | 4,494 | 4,693 | 4,929 | 4,897 |
| Wet density g / cc              | 2.06  | 2.11  | 2.20  | 2.31  | 2.30  |
| Dry density, Gd g / cc          | 2.01  | 2.02  | 2.07  | 2.14  | 2.08  |

**WATER CONTENT**

| Determination No.                 | 1     | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-----------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Container No.                     | A-1   | NME12  | M-236  | CV-56  | D6     |
| Weight of container + Wet soil g. | 95.84 | 111.88 | 125.82 | 123.60 | 197.01 |
| Weight of container + Dry soil g. | 94.05 | 107.71 | 119.97 | 115.80 | 180.46 |
| Weight of water , Ww g.           | 1.79  | 4.17   | 5.85   | 7.80   | 16.55  |
| Weight of container g.            | 19.53 | 16.04  | 25.78  | 17.20  | 18.32  |
| Weight of dry soil , Ws g.        | 74.52 | 91.67  | 94.19  | 98.60  | 162.14 |
| Percentage of water content , w % | 2.40  | 4.55   | 6.21   | 7.91   | 10.21  |

**Maximum Dry Density = 2.142 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 8.50 %**

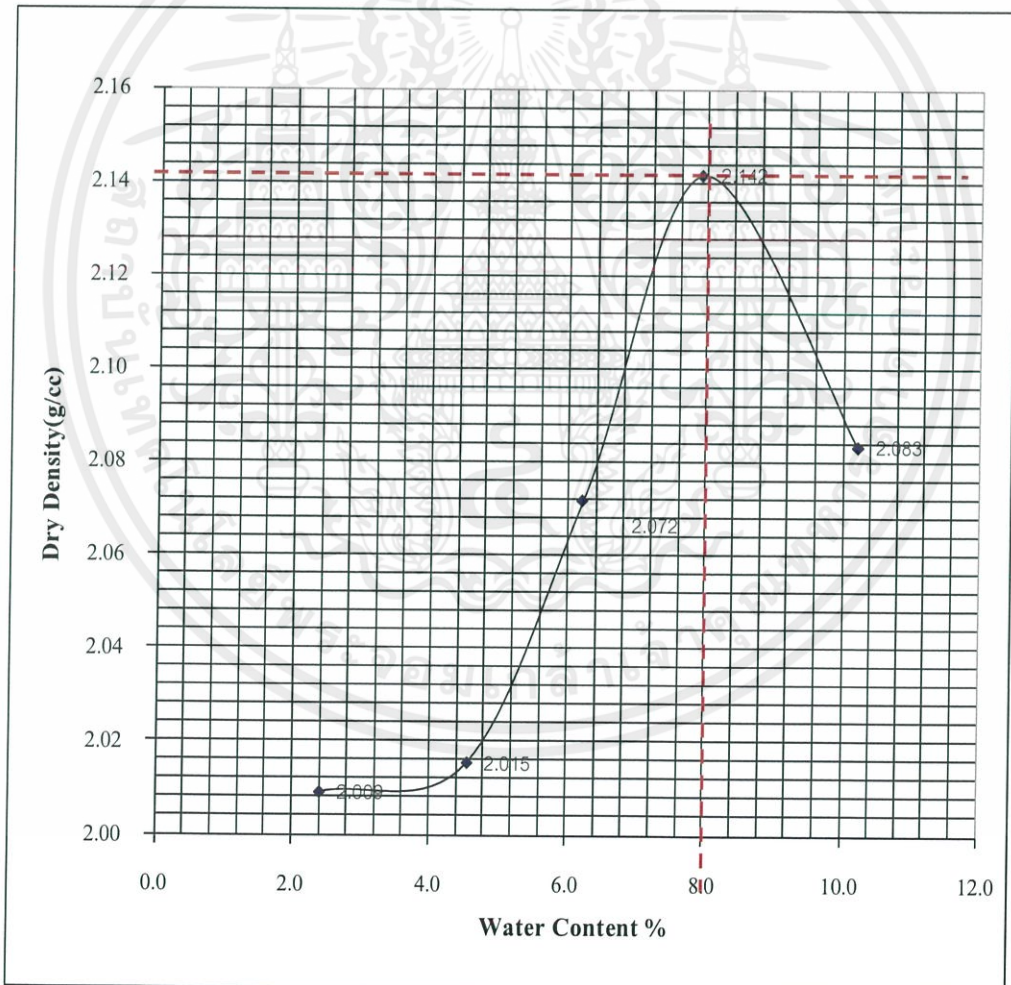


DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)


Project : พัฒนากำลังดินลูกรัง      Req. No : ดินลูกรัง NO.2  
Location : -      Date of Request : -  
Sample From : Compaction      Date of Testing : 18/1/2562  
Sample Description : D+5% LF      Type of Testing : Modified Protor



Maximum Dry Density = 2.142 g/cc

Optimum Moisture Content = 8.00 %

ข.3.9 การทดสอบการบดอัดดิน ดินลูกรังชนิด E+LF Slag 10%

|  DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |                     |                   |                 |                 |        |        |
|--|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------|--------|
| COMPACTION TEST  |                     |                   |                 |                 |        |        |
| (Refer to ASTM D698)   |                     |                   |                 |                 |        |        |
| Project :  | พัฒนากำลังดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.1  |                 |        |        |
| Location :   | -                   | Date of Request : | -               |                 |        |        |
| Sample From :  | Compaction          | Date of Testing : | 7/2/2562        |                 |        |        |
| Sample Description :   | E+10% LF            | Type of Testing   | Modified Protor |                 |        |        |
|  |                     | Mold Volume :     | 2159.28         | cm <sup>3</sup> |        |        |
|  |                     | Mold Weight :     | 2,671           | gm.             |        |        |
| DENSITY  |                     |                   |                 |                 |        |        |
| Determination No.  |                     | 1                 | 2               | 3               | 4      | 5      |
| Weight mold + compacted soil   | g.                  | 7,071             | 7,220           | 7,427           | 7,600  | 7,576  |
| Weight mold  | g.                  | 2,671             | 2,671           | 2,671           | 2,671  | 2,671  |
| Weight compacted soil  | g.                  | 4,400             | 4,549           | 4,756           | 4,929  | 4,905  |
| Wet density  | g / cc              | 2.04              | 2.11            | 2.20            | 2.28   | 2.27   |
| Dry density, Gd  | g / cc              | 1.98              | 2.01            | 2.06            | 2.10   | 2.06   |
| WATER CONTENT  |                     |                   |                 |                 |        |        |
| Determination No.  |                     | 1                 | 2               | 3               | 4      | 5      |
| Container No.  |                     | A-1               | NME12           | M-236           | CV-56  | D6     |
| Weight of container + Wet soil   | g.                  | 123.51            | 143.98          | 163.10          | 127.68 | 162.77 |
| Weight of container + Dry soil   | g.                  | 120.34            | 137.99          | 153.77          | 118.80 | 149.08 |
| Weight of water, Ww  | g.                  | 3.17              | 5.99            | 9.33            | 8.88   | 13.69  |
| Weight of container  | g.                  | 13.79             | 13.56           | 14.08           | 14.05  | 14.82  |
| Weight of dry soil, Ws   | g.                  | 106.55            | 124.43          | 139.69          | 104.75 | 134.26 |
| Percentage of water content, w   | %                   | 2.98              | 4.81            | 6.68            | 8.48   | 10.20  |
| <b>Maximum Dry Density</b>   |                     | =                 | <b>2.105</b>    | g/cc            |        |        |
| <b>Optimum Moisture Content</b>  |                     | =                 | <b>8.40</b>     | %               |        |        |

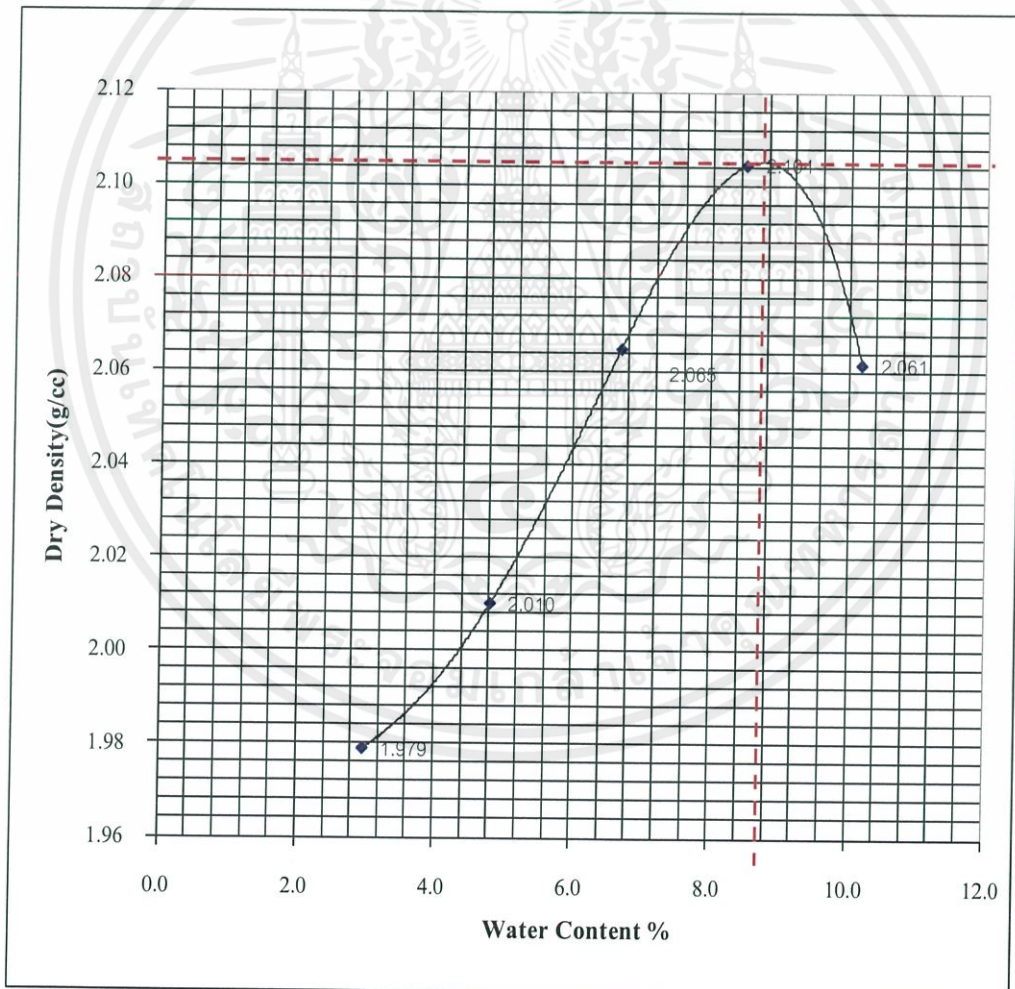


**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                       |                          |                 |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าลิ่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.1  |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Date of Request :</b> | -               |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction            | <b>Date of Testing :</b> | 7/2/562         |
| <b>Sample Description :</b> | E+10% LF              | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor |



**Maximum Dry Density = 2.105 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 8.40 %**

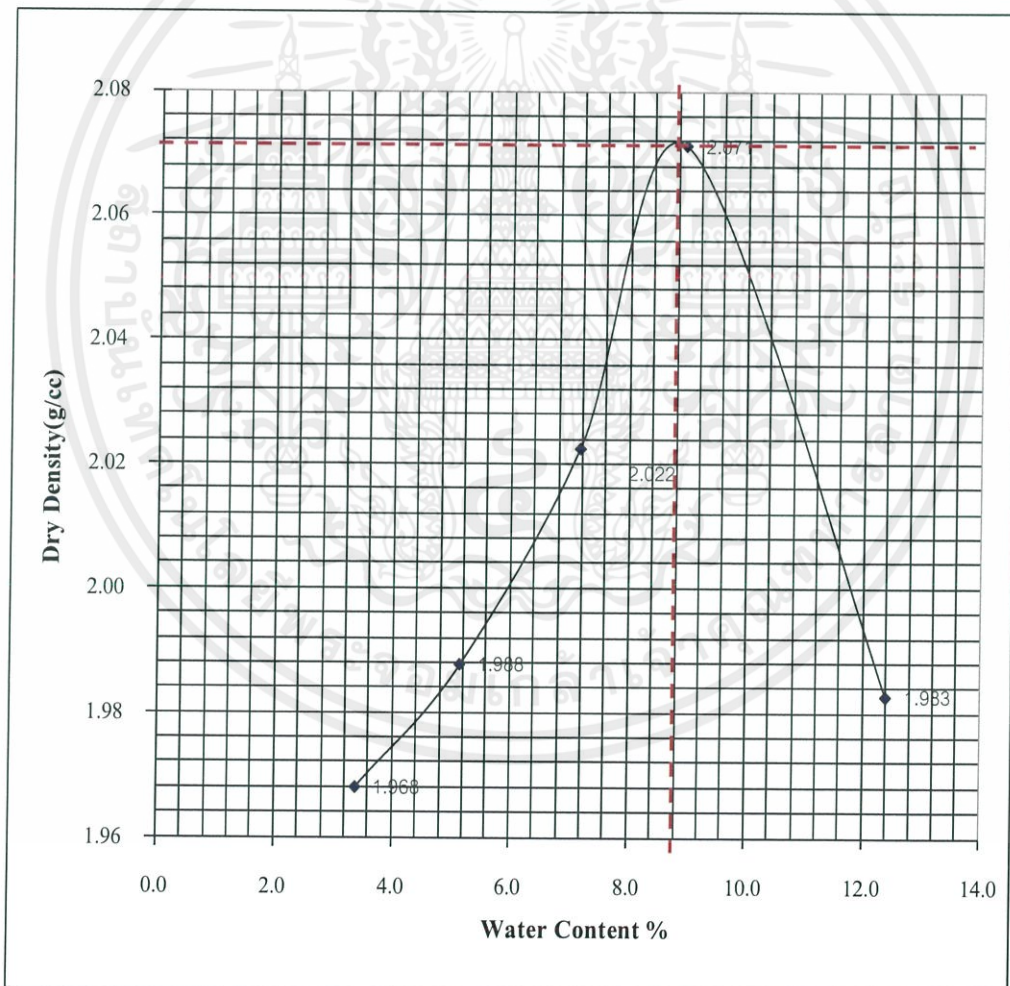


**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                       |                          |                 |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าลิ่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.2  |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Date of Request :</b> | -               |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction            | <b>Date of Testing :</b> | 7/12/2562       |
| <b>Sample Description :</b> | E+10% LF              | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor |



**Maximum Dry Density = 2.072 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 8.80 %**



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                      |                          |                         |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรังNO.3           |
| <b>Location :</b>           | -                    | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction           | <b>Date of Testing :</b> | 7/2/2562                |
| <b>Sample Description :</b> | E+10% LF             | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |
|                             |                      | <b>Mold Volume :</b>     | 2142.66 cm <sup>3</sup> |
|                             |                      | <b>Mold Weight :</b>     | 2,670 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.            |      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight mold + compacted soil | g.   | 6.995 | 7.155 | 7.321 | 7.463 | 7.587 | 7.513 |
| Weight mold                  | g.   | 2.670 | 2.670 | 2.670 | 2.670 | 2.670 | 2.670 |
| Weight compacted soil        | g.   | 4.325 | 4.485 | 4.651 | 4.793 | 4.917 | 4.843 |
| Wet density                  | g/cc | 2.02  | 2.09  | 2.17  | 2.24  | 2.29  | 2.26  |
| Dry density, Gd              | g/cc | 1.98  | 2.02  | 2.05  | 2.09  | 2.11  | 2.04  |

**WATER CONTENT**

| Determination No.              |    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
|--------------------------------|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Container No.                  |    | A-1    | NME12  | M-236  | CV-56  | D6     | P4     |
| Weight of container + Wet soil | g. | 138.32 | 126.21 | 155.10 | 155.58 | 167.19 | 159.46 |
| Weight of container + Dry soil | g. | 135.65 | 122.29 | 147.37 | 146.04 | 154.72 | 145.55 |
| Weight of water, Ww            | g. | 2.67   | 3.92   | 7.73   | 9.54   | 12.47  | 13.91  |
| Weight of container            | g. | 13.82  | 13.56  | 14.10  | 14.04  | 14.85  | 14.58  |
| Weight of dry soil, Ws         | g. | 121.83 | 108.73 | 133.27 | 132.00 | 139.87 | 130.97 |
| Percentage of water content, w | %  | 2.19   | 3.61   | 5.80   | 7.23   | 8.92   | 10.62  |

**Maximum Dry Density = 2.108 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 8.92 %**

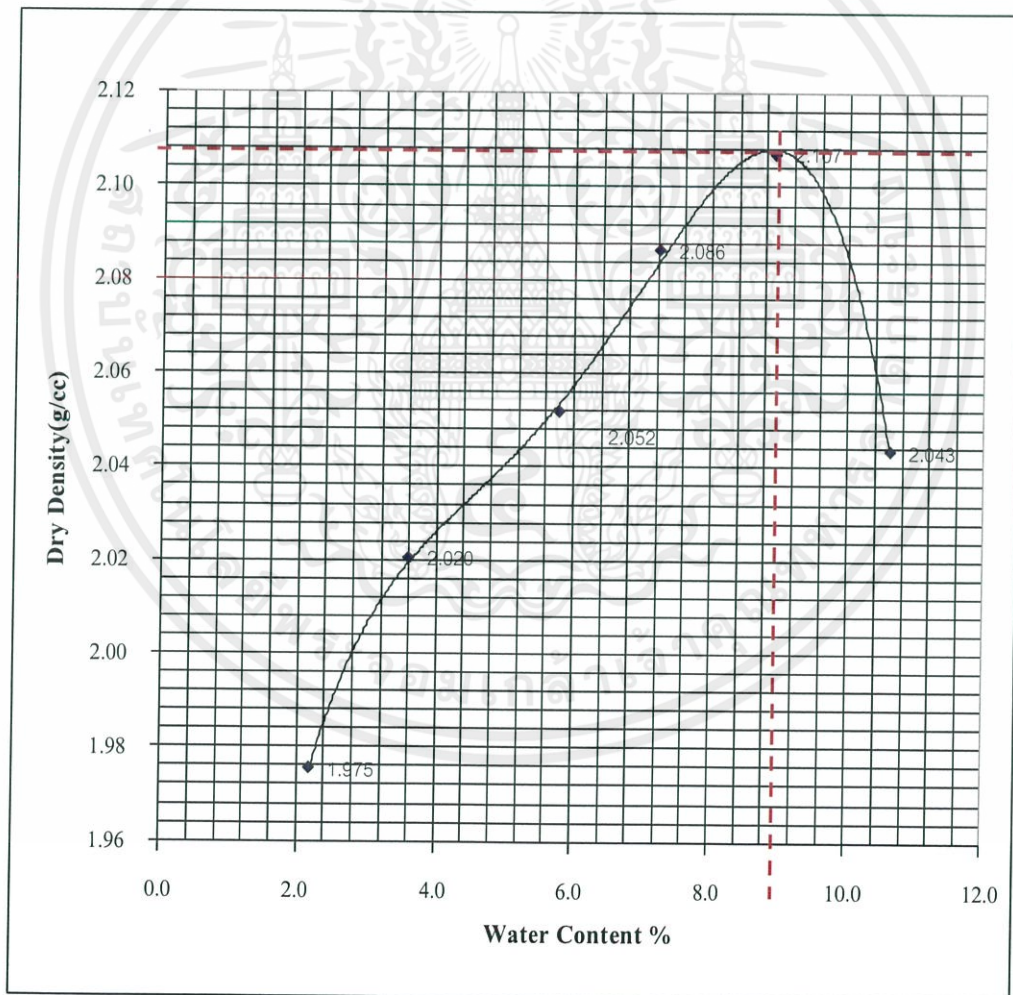


DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333

COMPACTION TEST

(Refer to ASTM D698)


|                      |                     |                   |                 |
|----------------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| Project :            | พัฒนากำลังดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรังNO.3   |
| Location :           | -                   | Date of Request : | -               |
| Sample From :        | Compaction          | Date of Testing : | 7/2/562         |
| Sample Description : | E+10% LF            | Type of Testing   | Modified Protor |



Maximum Dry Density = 2.108 g/cc

Optimum Moisture Content = 8.92 %

ข.3.10 การทดสอบการบดอัดดิน ดินลูกรังชนิด E+LF Slag 12%

|  DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br>FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br>LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333 |                      |                   |                 |                 |        |        |
|---|----------------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------|--------|
| COMPACTION TEST   |                      |                   |                 |                 |        |        |
| (Refer to ASTM D698)  |                      |                   |                 |                 |        |        |
| Project :   | พัฒนากำลั่งดินลูกรัง | Req. No :         | ดินลูกรัง NO.1  |                 |        |        |
| Location :  | -                    | Date of Request : | -               |                 |        |        |
| Sample From :   | Compaction           | Date of Testing : | 21/3/2562       |                 |        |        |
| Sample Description :  | E+12% LF             | Type of Testing   | Modified Protor |                 |        |        |
|   |                      | Mold Volume :     | 2132.86         | cm <sup>3</sup> |        |        |
|   |                      | Mold Weight :     | 2,723           | gm.             |        |        |
| DENSITY   |                      |                   |                 |                 |        |        |
| Determination No.   |                      | 1                 | 2               | 3               | 4      | 5      |
| Weight mold + compacted soil  | g.                   | 7,073             | 7,189           | 7,400           | 7,594  | 7,616  |
| Weight mold   | g.                   | 2,723             | 2,723           | 2,723           | 2,723  | 2,723  |
| Weight compacted soil   | g.                   | 4,350             | 4,466           | 4,677           | 4,871  | 4,893  |
| Wet density   | g / cc               | 2.04              | 2.09            | 2.19            | 2.28   | 2.29   |
| Dry density, Gd   | g / cc               | 1.99              | 2.01            | 2.07            | 2.12   | 2.08   |
| WATER CONTENT   |                      |                   |                 |                 |        |        |
| Determination No.   |                      | 1                 | 2               | 3               | 4      | 5      |
| Container No.   |                      | M-26              | M-07            | M-16            | M-03   | M-05   |
| Weight of container + Wet soil  | g.                   | 122.62            | 101.37          | 159.33          | 166.36 | 145.71 |
| Weight of container + Dry soil  | g.                   | 119.88            | 97.70           | 151.17          | 155.39 | 133.41 |
| Weight of water , Ww  | g.                   | 2.74              | 3.67            | 8.16            | 10.97  | 12.30  |
| Weight of container   | g.                   | 15.83             | 9.21            | 14.41           | 13.55  | 14.05  |
| Weight of dry soil , Ws   | g.                   | 104.05            | 88.49           | 136.76          | 141.84 | 119.36 |
| Percentage of water content , w   | %                    | 2.63              | 4.15            | 5.97            | 7.73   | 10.30  |
| <b>Maximum Dry Density</b>  |                      | =                 | <b>2.124</b>    | g/cc            |        |        |
| <b>Optimum Moisture Content</b>   |                      | =                 | <b>8.60</b>     | %               |        |        |





**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 02 - 329 - 8333**

**COMPACTION TEST**

*(Refer to ASTM D698)*

|                             |                     |                          |                         |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนากำลังดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.2          |
| <b>Location :</b>           | -                   | <b>Date of Request :</b> | -                       |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction          | <b>Date of Testing :</b> | 21/3/2562               |
| <b>Sample Description :</b> | E+12% LF            | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor         |
|                             |                     | <b>Mold Volume :</b>     | 2132.86 cm <sup>3</sup> |
|                             |                     | <b>Mold Weight :</b>     | 2,723 gm.               |

**DENSITY**

| Determination No.               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight mold + compacted soil g. | 7,114 | 7,218 | 7,400 | 7,603 | 7,580 |
| Weight mold g.                  | 2,723 | 2,723 | 2,723 | 2,723 | 2,723 |
| Weight compacted soil g.        | 4,391 | 4,495 | 4,677 | 4,880 | 4,857 |
| Wet density g / cc              | 2.06  | 2.11  | 2.19  | 2.29  | 2.28  |
| Dry density, Gd g / cc          | 2.00  | 2.02  | 2.06  | 2.12  | 2.05  |

**WATER CONTENT**

| Determination No.                 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Container No.                     | M-04   | M-01   | M-28   | CV-90  | M-02   |
| Weight of container + Wet soil g. | 140.43 | 144.72 | 158.72 | 211.12 | 139.64 |
| Weight of container + Dry soil g. | 137.12 | 139.10 | 149.99 | 196.69 | 127.30 |
| Weight of water, Ww g.            | 3.31   | 5.62   | 8.73   | 14.43  | 12.34  |
| Weight of container g.            | 14.18  | 13.74  | 14.11  | 15.99  | 13.87  |
| Weight of dry soil, Ws g.         | 122.94 | 125.36 | 135.88 | 180.70 | 113.43 |
| Percentage of water content, w %  | 2.69   | 4.48   | 6.42   | 7.99   | 10.88  |

**Maximum Dry Density = 2.121 g/cc**

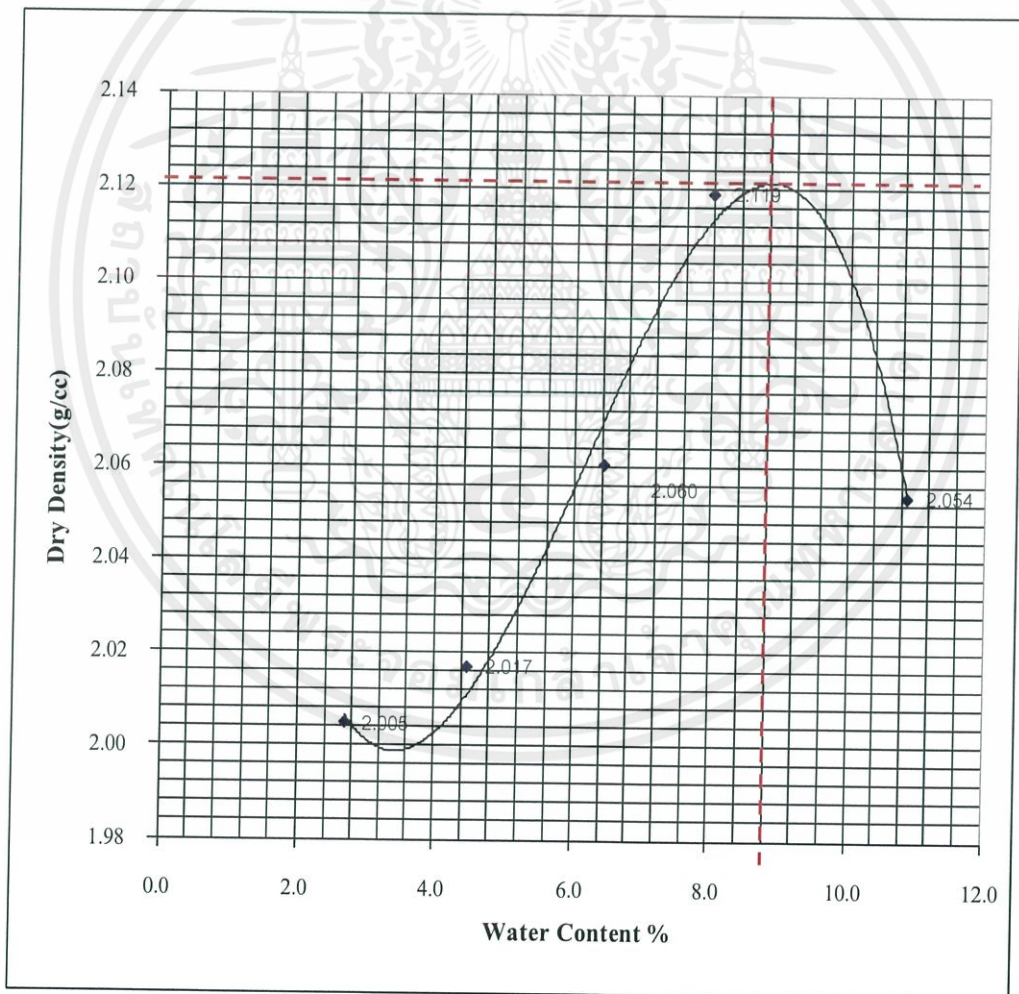
**Optimum Moisture Content = 8.40 %**



**COMPACTION TEST**

(Refer to ASTM D698)

|                             |                      |                          |                 |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าล้งดินลูกรัง | <b>Req. No :</b>         | ดินลูกรัง NO.2  |
| <b>Location :</b>           | -                    | <b>Date of Request :</b> | -               |
| <b>Sample From :</b>        | Compaction           | <b>Date of Testing :</b> | 21/3/2562       |
| <b>Sample Description :</b> | E+12% LF             | <b>Type of Testing</b>   | Modified Protor |

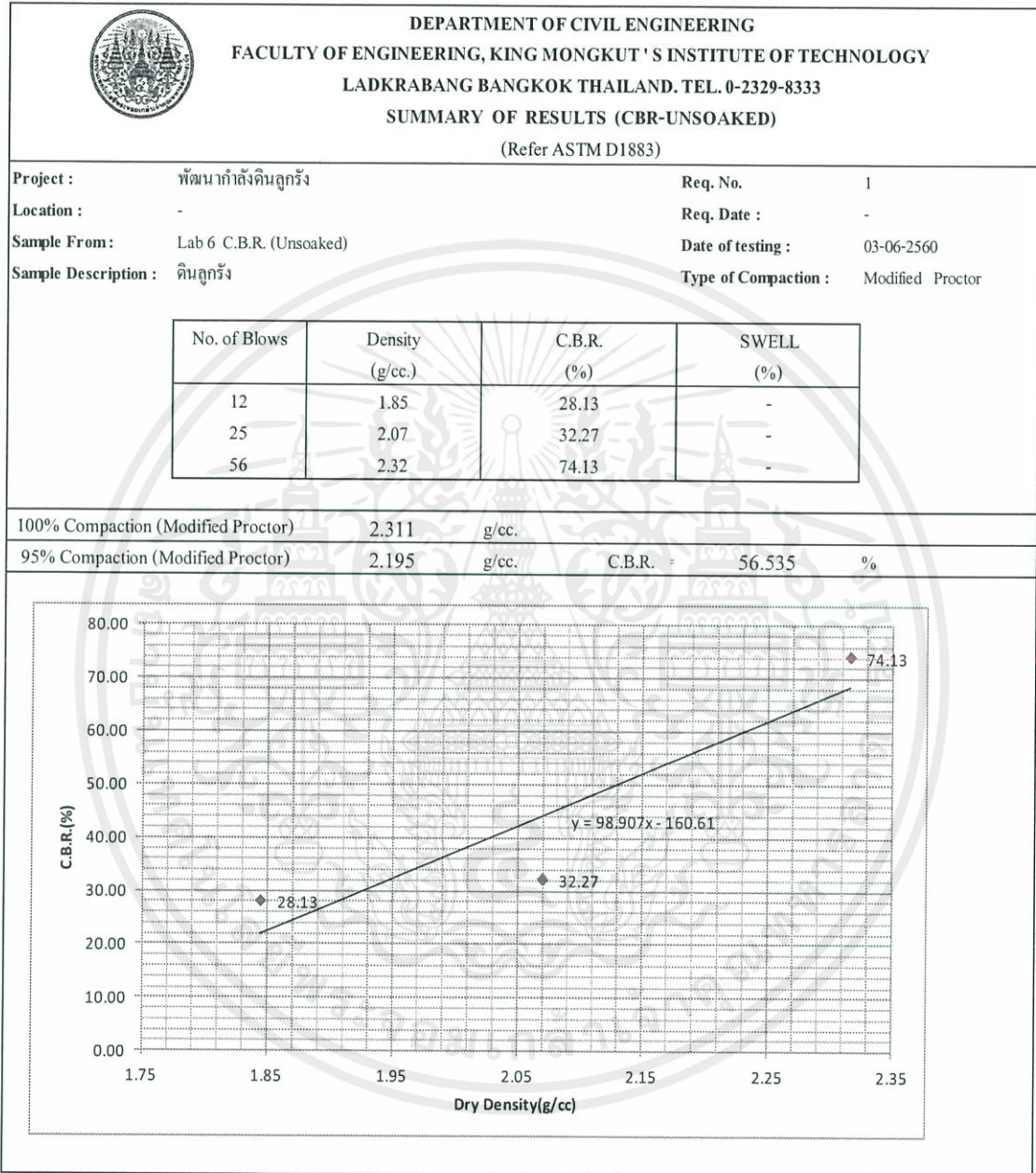


**Maximum Dry Density = 2.121 g/cc**

**Optimum Moisture Content = 8.40 %**

## ข.4 การทดสอบ C.B.R. และ Swell

### ข.4.1 การทดสอบ C.B.R. ดินลูกรัง





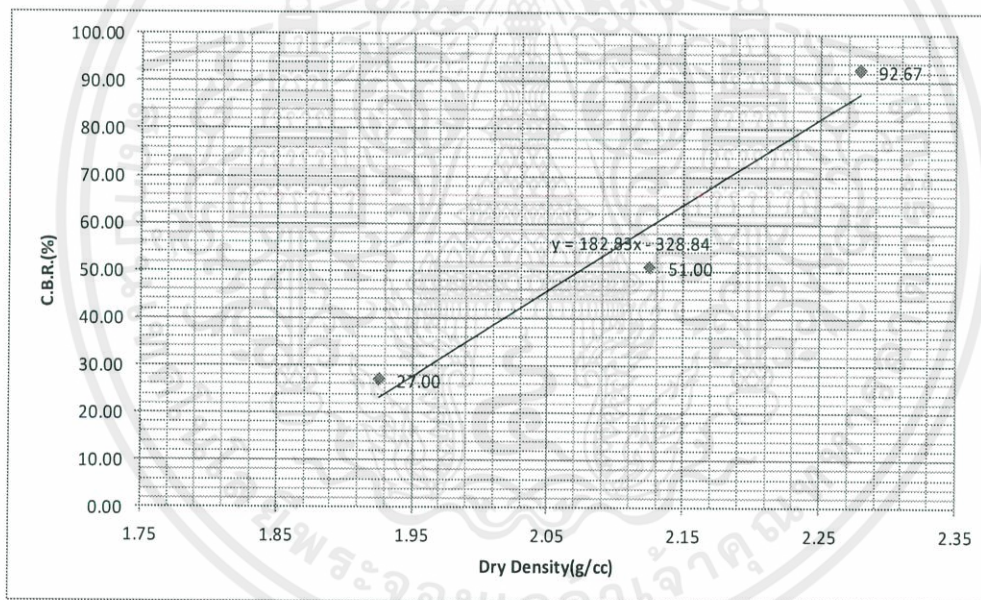
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333  
SUMMARY OF RESULTS (CBR-UNSOAKED)  
(Refer ASTM D1883)

Project : พัฒนากำลั่งดินลูกรัง  
Location : -  
Sample From : Lab 6 C.B.R. (Unsoaked)  
Sample Description : ดินลูกรัง  
Req. No. : 2  
Req. Date : -  
Date of testing : 03-06-2560  
Type of Compaction : Modified Proctor

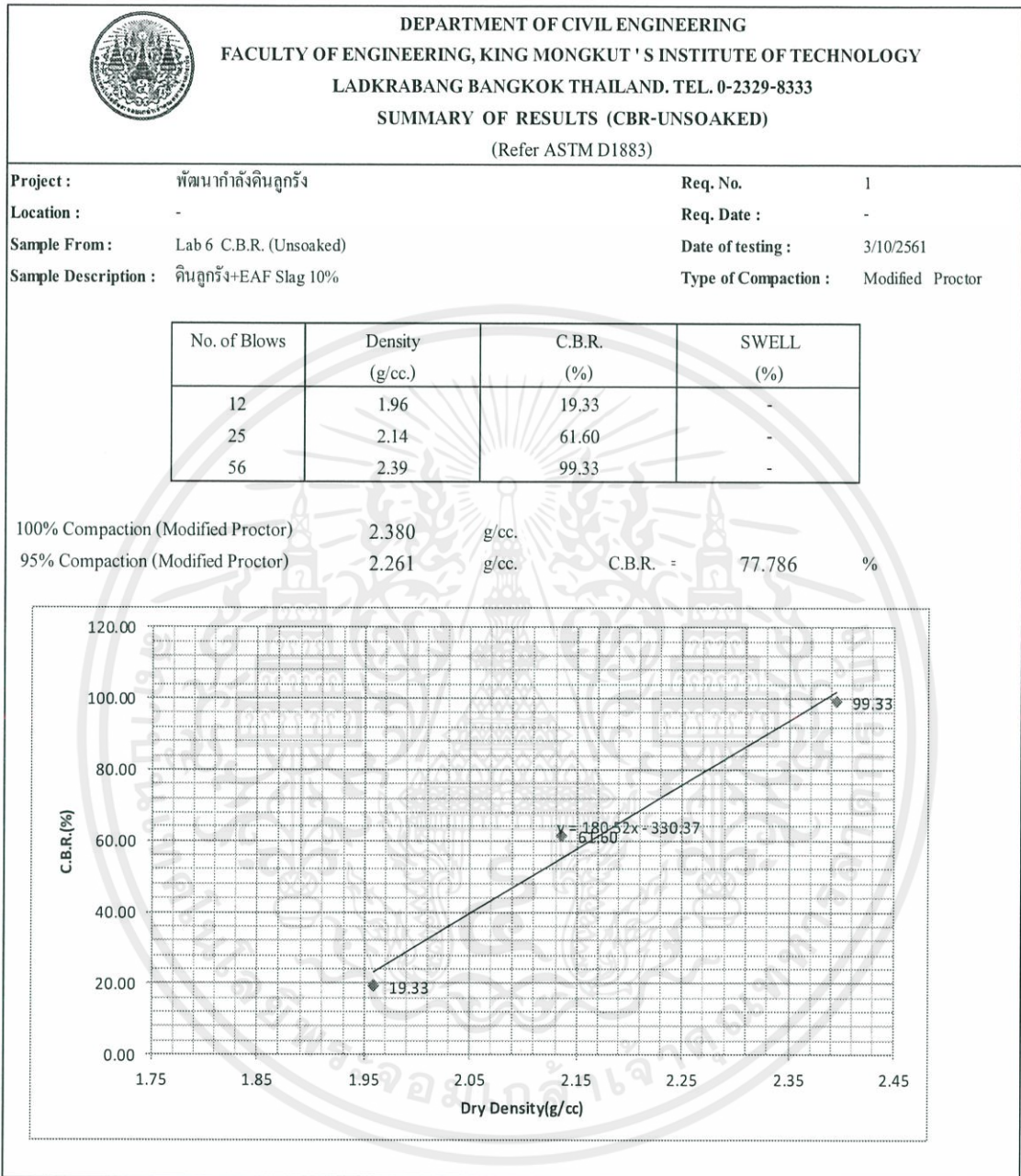
| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.93               | 27.00         | -            |
| 25           | 2.13               | 51.00         | -            |
| 56           | 2.28               | 92.67         | -            |

100% Compaction (Modified Proctor) 2.311 g/cc.

95% Compaction (Modified Proctor) 2.195 g/cc. C.B.R. = 72.554 %



#### ข.4.2 การทดสอบ C.B.R. ดินลูกรัง+EAF Slag 10%





**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333**

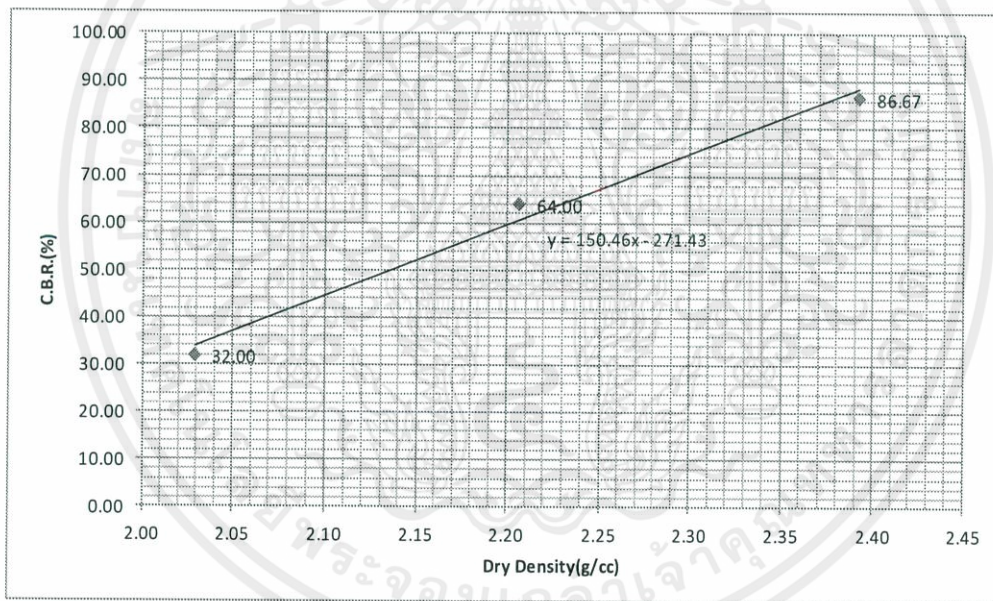
**SUMMARY OF RESULTS (CBR-UNSOAKED)**

(Refer ASTM D1883)

|                             |                         |                             |                  |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าล้งดินลูกรัง    | <b>Req. No.</b>             | 2                |
| <b>Location :</b>           | -                       | <b>Req. Date :</b>          | -                |
| <b>Sample From :</b>        | Lab 6 C.B.R. (Unsoaked) | <b>Date of testing :</b>    | 3/10/2561        |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง               | <b>Type of Compaction :</b> | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 2.03               | 32.00         | -            |
| 25           | 2.21               | 64.00         | -            |
| 56           | 2.39               | 86.67         | -            |

|                                    |       |       |          |        |   |
|------------------------------------|-------|-------|----------|--------|---|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.380 | g/cc. |          |        |   |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.261 | g/cc. | C.B.R. = | 68.760 | % |



ข.4.2 การทดสอบ C.B.R. ดินลูกรังชนิด D



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333

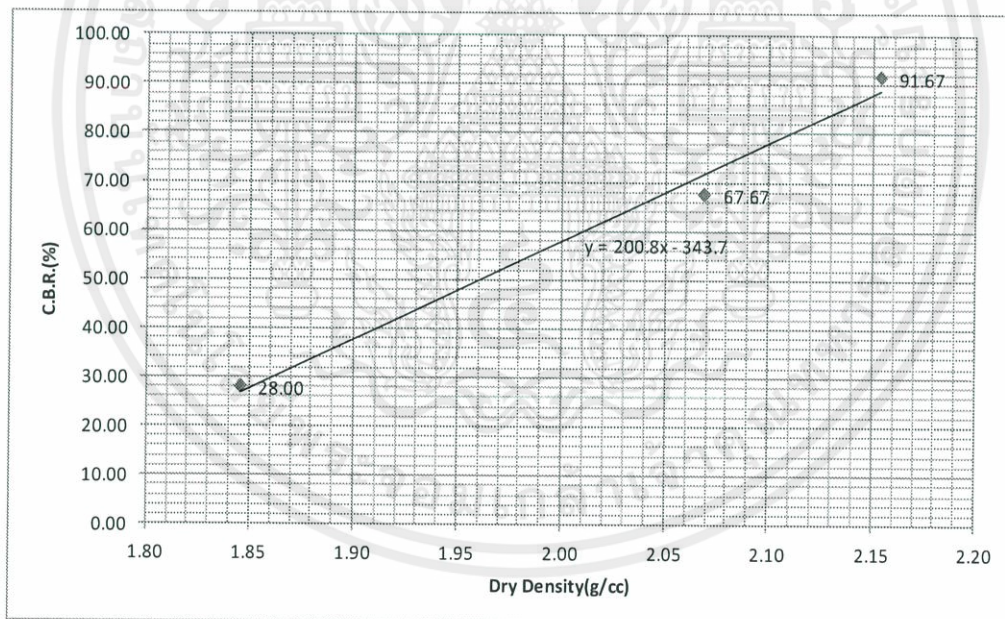
SUMMARY OF RESULTS (CBR-UNSOAKED)

(Refer ASTM D1883)

|                      |                         |                      |                  |
|----------------------|-------------------------|----------------------|------------------|
| Project :            | Soil Laboratory Testing | Req. No.             | 1                |
| Location :           | -                       | Req. Date :          | -                |
| Sample From :        | C.B.R. (Unsoaked)       | Date of testing :    | 5/10/2561        |
| Sample Description : | ดินลูกรังประเภทD        | Type of Compaction : | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.85               | 28.00         | -            |
| 25           | 2.07               | 67.67         | -            |
| 56           | 2.15               | 91.67         | -            |

100% Compaction (Modified Proctor) 2.289 g/cc.  
95% Compaction (Modified Proctor) 2.175 g/cc. C.B.R. = 92.94964 %







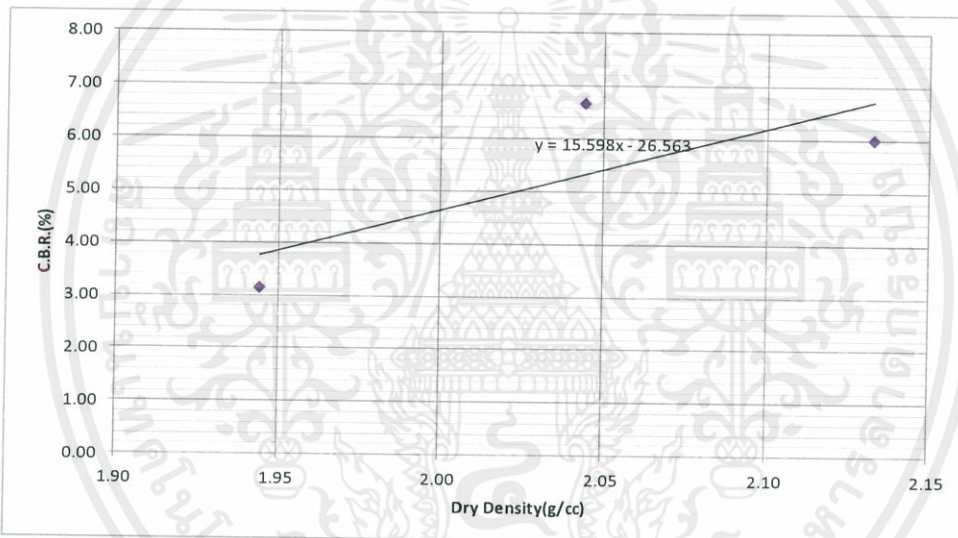
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333**  
**SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)**

(Refer ASTM D1883)

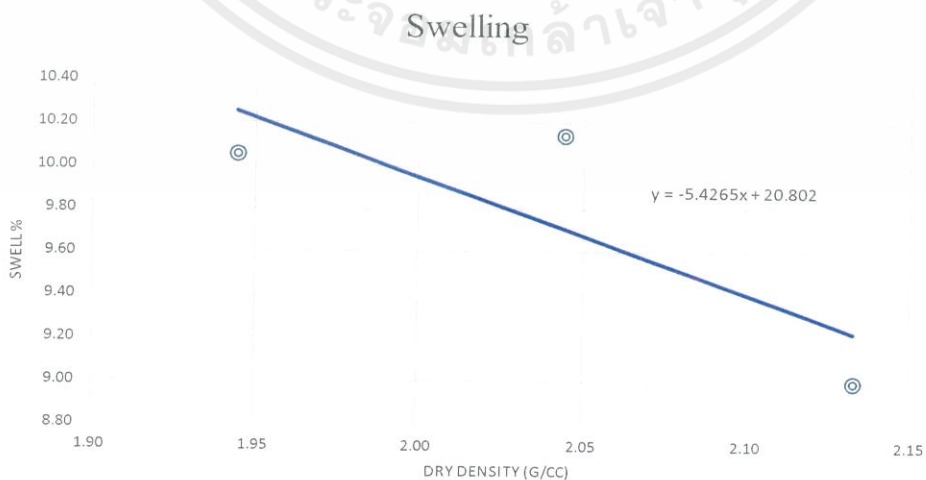
|                             |                       |                             |                  |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าลิ่งดินลูกรัง | <b>Req. No.</b>             | 1                |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Req. Date :</b>          | -                |
| <b>Sample From :</b>        | Lab 6 C.B.R. (Soaked) | <b>Date of testing :</b>    | 17/11/2561       |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง D           | <b>Type of Compaction :</b> | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.94               | 3.13          | 10.05        |
| 25           | 2.04               | 6.67          | 10.14        |
| 56           | 2.13               | 6.00          | 9.00         |

|                                    |       |       |          |       |   |
|------------------------------------|-------|-------|----------|-------|---|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.289 | g/cc. |          |       |   |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.175 | g/cc. | C.B.R. = | 7.356 | % |



|                                    |       |       |            |       |   |
|------------------------------------|-------|-------|------------|-------|---|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.289 | g/cc. |            |       |   |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.175 | g/cc. | Swelling = | 9.002 | % |





**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333**  
**SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)**

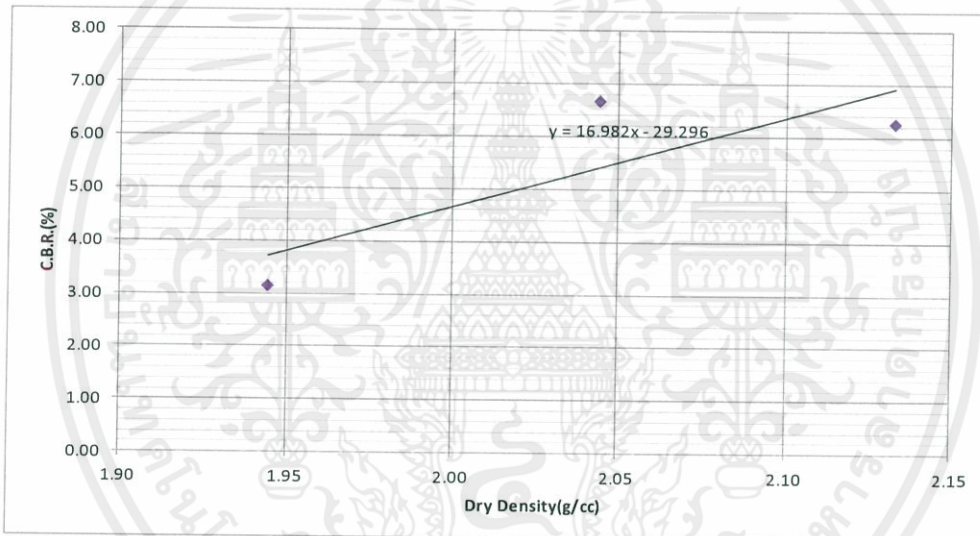
(Refer ASTM D1883)

**Project :** พัฒนากำลั่งดินลูกรัง  
**Location :** -  
**Sample From :** Lab 6 C.B.R. (Soaked)  
**Sample Description :** ดินลูกรัง D

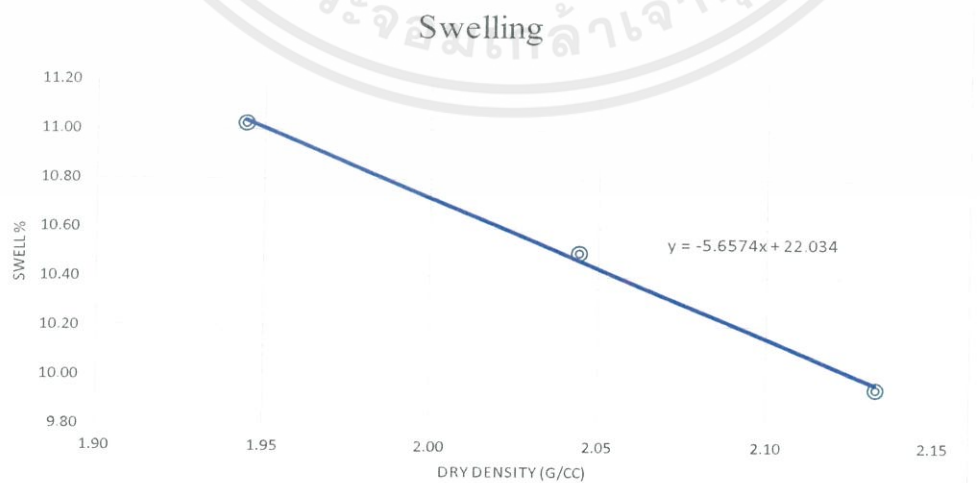
**Req. No.** 2  
**Req. Date :** -  
**Date of testing :** 17/11/2561  
**Type of Compaction :** Modified Proctor

| No. of Blows | Density (g/cc.) | C.B.R. (%) | SWELL (%) |
|--------------|-----------------|------------|-----------|
| 12           | 1.94            | 3.13       | 11.02     |
| 25           | 2.04            | 6.67       | 10.50     |
| 56           | 2.13            | 6.27       | 9.95      |


|                                    |       |       |          |         |
|------------------------------------|-------|-------|----------|---------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.289 | g/cc. |          |         |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.175 | g/cc. | C.B.R. = | 7.632 % |



|                                    |       |       |          |         |
|------------------------------------|-------|-------|----------|---------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.289 | g/cc. |          |         |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.175 | g/cc. | Swelling | 9.732 % |



ข.4.3 การทดสอบ C.B.R. ดินลูกรังชนิด D+LF Slag 5%



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
 FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
 LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333  
 SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)  
 (Refer ASTM D1883)

|                             |                       |                             |                  |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าถังดินลูกรัง  | <b>Req. No.</b>             | 1                |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Req. Date :</b>          | -                |
| <b>Sample From :</b>        | Lab 6 C.B.R. (Soaked) | <b>Date of testing :</b>    | 7/12/2561        |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง D +5%LF     | <b>Type of Compaction :</b> | Modified Proctor |


  

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.92               | 19.50         | 3.52         |
| 25           | 2.04               | 68.00         | 2.50         |
| 56           | 2.16               | 93.33         | 0.61         |

|                                    |       |       |                   |
|------------------------------------|-------|-------|-------------------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.123 | g/cc. |                   |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.017 | g/cc. | C.B.R. = 53.385 % |



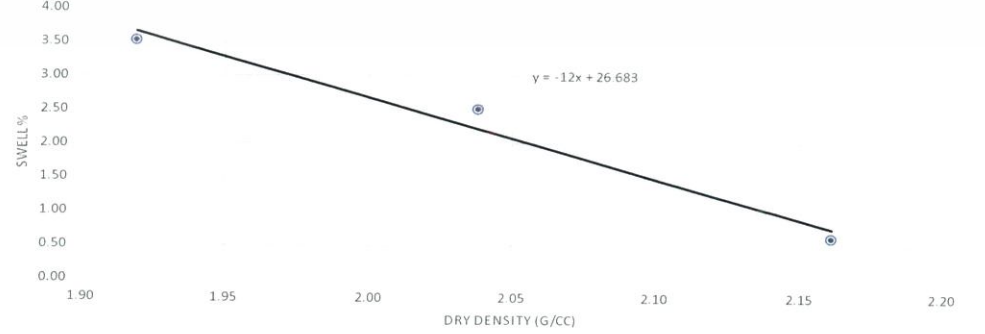
**C.B.R. (%)** vs **Dry Density (g/cc)**  
 $y = 303.58x - 558.89$

|                                    |       |       |                  |
|------------------------------------|-------|-------|------------------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.123 | g/cc. |                  |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.017 | g/cc. | Swell = 2.4808 % |

**Swelling**



**SWELL %** vs **DRY DENSITY (G/CC)**  
 $y = -12x + 26.683$



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333**  
**SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)**

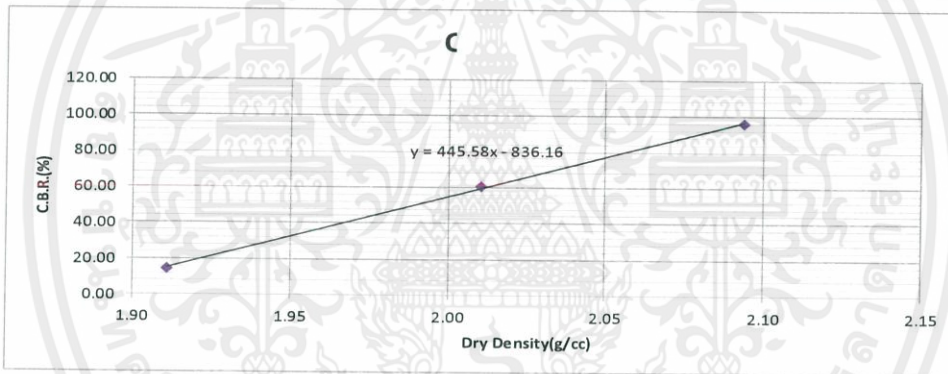
(Refer ASTM D1883)

|                             |                       |                           |                  |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าลิ่งดินลูกรัง | <b>Req. No.</b>           | 2                |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Req. Date :</b>        | -                |
| <b>Sample From :</b>        | Soil D+5% LF NO.2     | <b>Date of testing :</b>  | 7/12/2561        |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง             | <b>Type of Compaction</b> | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.91               | 14.67         | 4.98         |
| 25           | 2.01               | 61.00         | 2.32         |
| 56           | 2.09               | 96.00         | 1.20         |

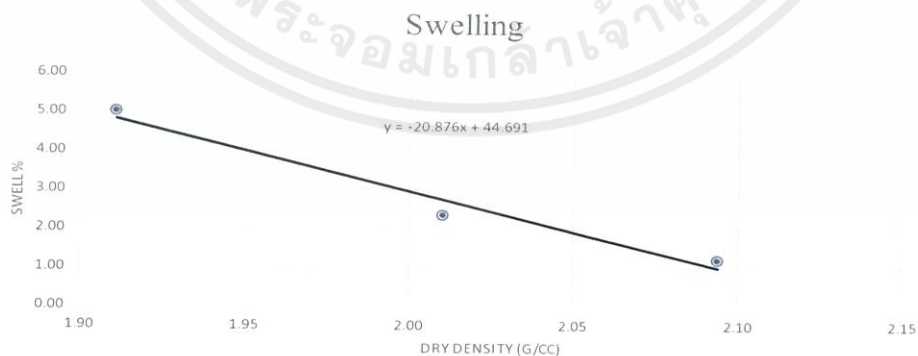
100% Compaction (Modified Proctor)      2.123

95% Compaction (Modified Proctor)      2.017    g/cc.      C.B.R. =    62.508    %

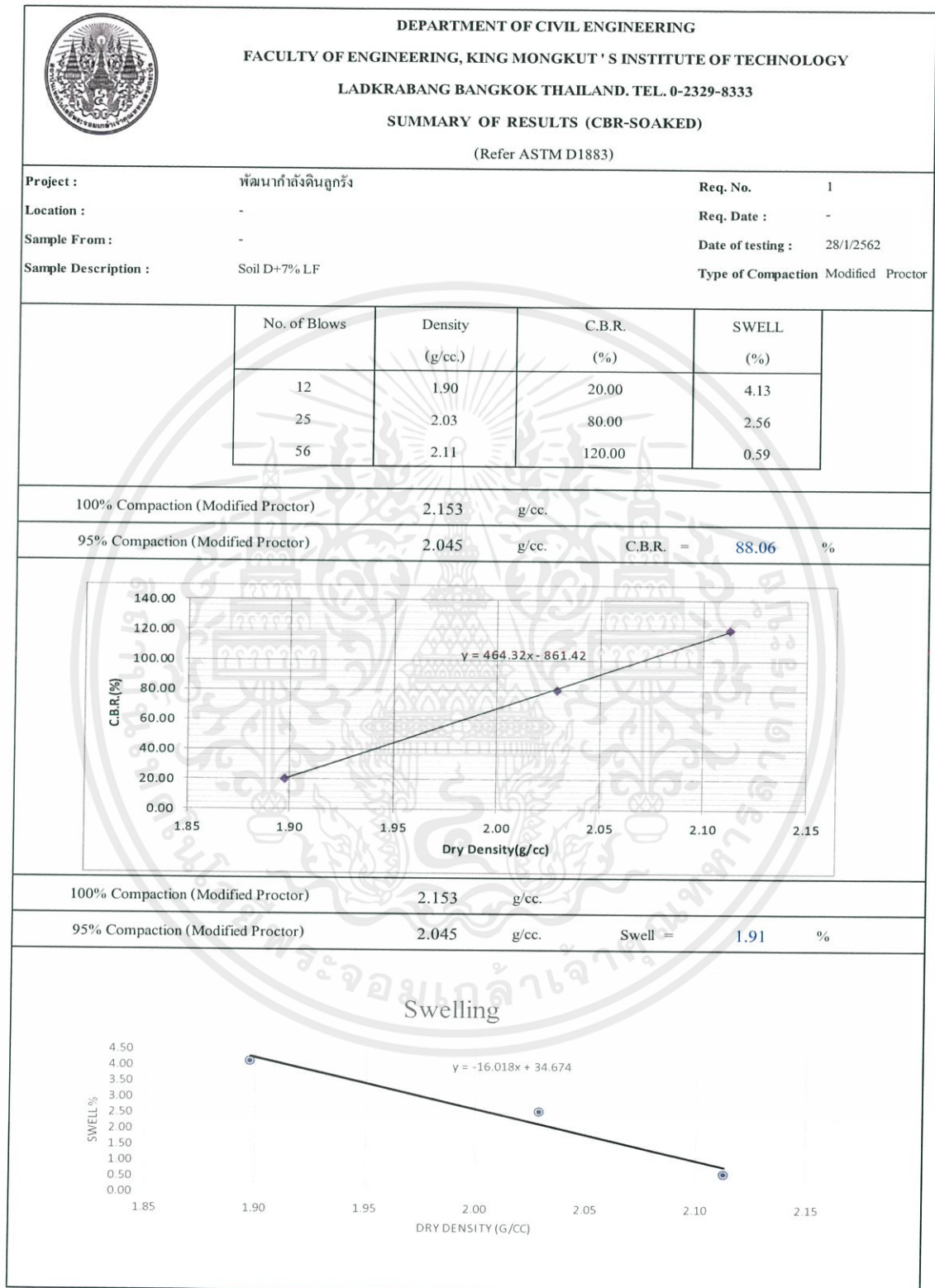


100% Compaction (Modified Proctor)      2.123

95% Compaction (Modified Proctor)      2.017    g/cc.      Swell    2.587    %



ข.4.4 การทดสอบ C.B.R. ดินลูกรังชนิด D+LF Slag 7%





**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333**

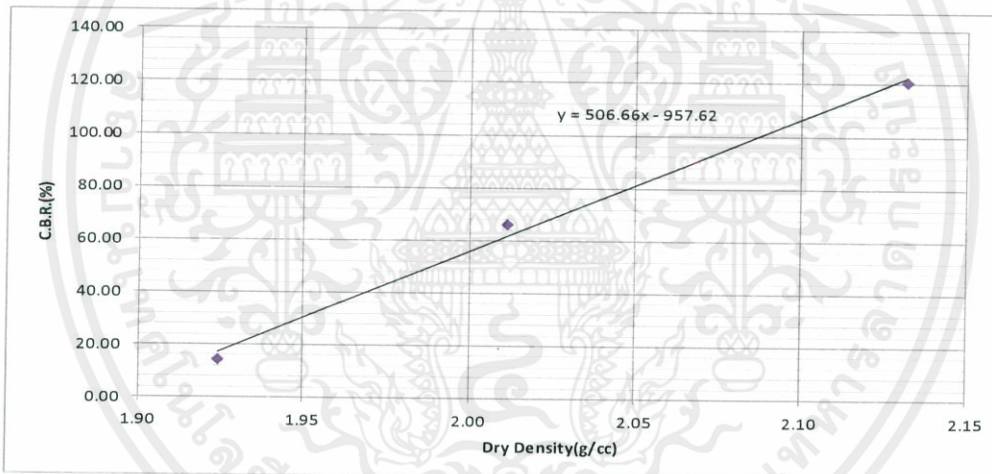
**SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)**

(Refer ASTM D1883)

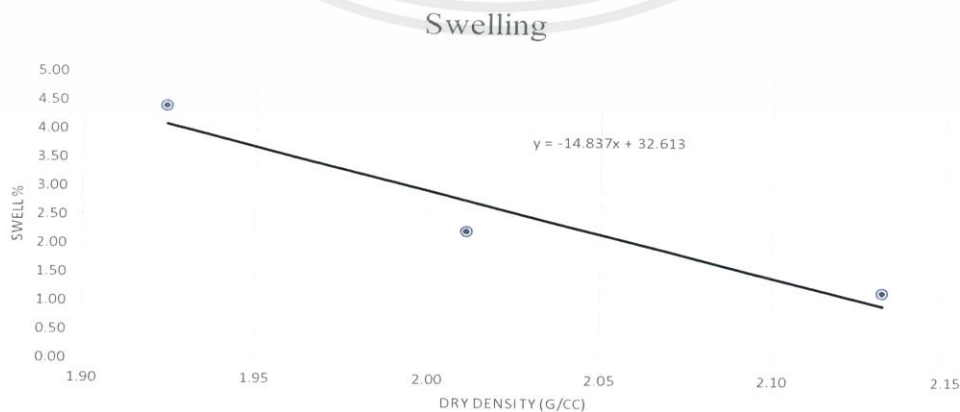
|                             |                       |                             |                  |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าลิ่งดินลูกรัง | <b>Req. No.</b>             | 2                |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Req. Date :</b>          | -                |
| <b>Sample From :</b>        | -                     | <b>Date of testing :</b>    | 28/1/2562        |
| <b>Sample Description :</b> | Soil D+7% LF          | <b>Type of Compaction :</b> | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.92               | 14.50         | 4.38         |
| 25           | 2.01               | 66.00         | 2.23         |
| 56           | 2.13               | 120.67        | 1.21         |

|                                    |       |       |                  |
|------------------------------------|-------|-------|------------------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.153 | g/cc. |                  |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.045 | g/cc. | C.B.R. = 78.68 % |



|                                    |       |       |                |
|------------------------------------|-------|-------|----------------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.153 | g/cc. |                |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.045 | g/cc. | Swell = 2.27 % |



ข.4.5 การทดสอบ C.B.R. ดินลูกรังชนิด D+LF Slag 10%



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
 FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
 LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333

SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)

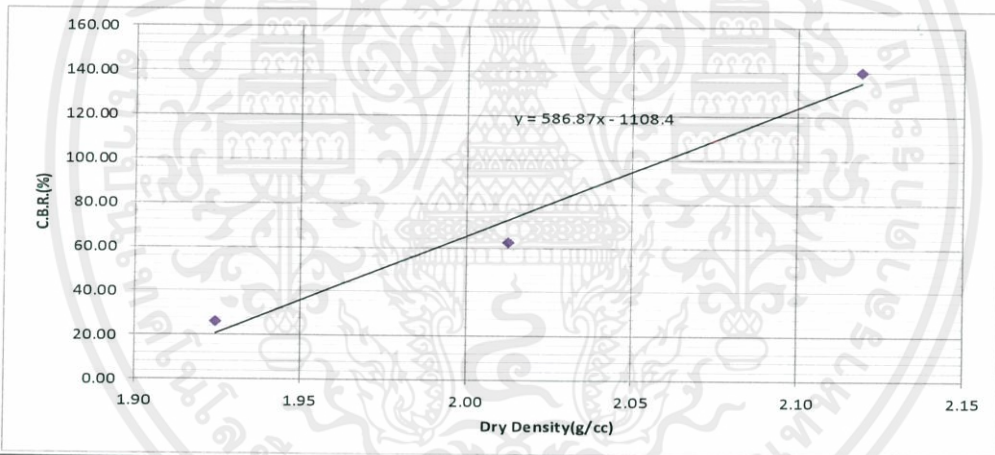
(Refer ASTM D1883)

Project : พัฒนากำลังดินลูกรัง  
 Location : -  
 Sample From : -  
 Sample Description : ดินลูกรัง D+10%LF

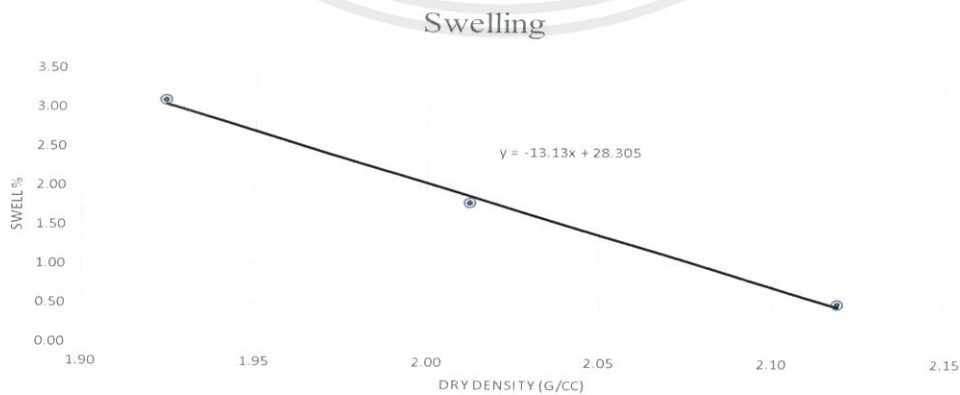
Req. No. : 1  
 Req. Date : -  
 Date of testing : 24/8/2561  
 Type of Compaction : Modified Proctor

| No. of Blows | Density (g/cc.) | C.B.R. (%) | SWELL (%) |
|--------------|-----------------|------------|-----------|
| 12           | 1.92            | 26.33      | 3.09      |
| 25           | 2.01            | 62.67      | 1.80      |
| 56           | 2.12            | 140.00     | 0.51      |

100% Compaction (Modified Proctor) 2.176 g/cc.  
 95% Compaction (Modified Proctor) 2.067 g/cc. C.B.R. = 104.778 %



100% Compaction (Modified Proctor) 2.176 g/cc.  
 95% Compaction (Modified Proctor) 2.067 g/cc. Swell = 1.163 %





**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333**

**SUMMARY OF RESULTS (CBR-UNSOAKED)**

(Refer ASTM D1883)

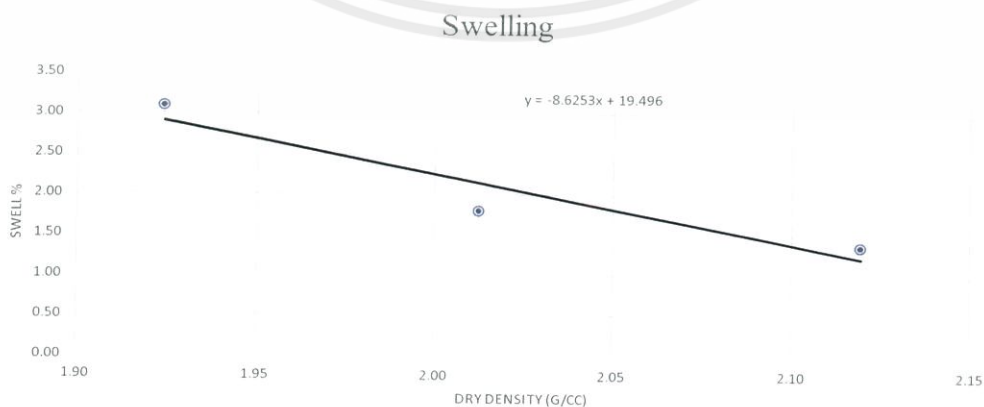
|                             |                    |                             |                  |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาดินลูกรัง     | <b>Req. No.</b>             | 2                |
| <b>Location :</b>           | -                  | <b>Req. Date :</b>          | -                |
| <b>Sample From :</b>        | -                  | <b>Date of testing :</b>    | 24/8/2561        |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง D +10%LF | <b>Type of Compaction :</b> | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.92               | 26.33         | 3.09         |
| 25           | 2.01               | 62.67         | 1.80         |
| 56           | 2.12               | 122.00        | 1.37         |

|                                    |       |       |          |        |   |
|------------------------------------|-------|-------|----------|--------|---|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.176 | g/cc. |          |        |   |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.067 | g/cc. | C.B.R. : | 94.188 | % |



|                                    |       |       |         |       |   |
|------------------------------------|-------|-------|---------|-------|---|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.176 | g/cc. |         |       |   |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.067 | g/cc. | Swell = | 1.666 | % |



ข.4.6 การทดสอบ C.B.R. ดินลูกรังชนิด E



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333

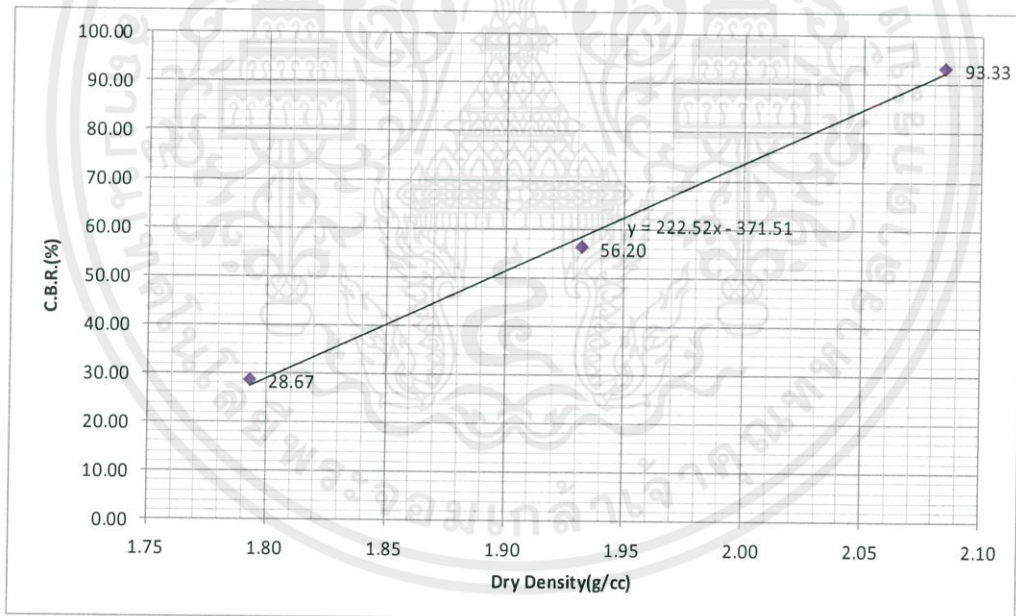
SUMMARY OF RESULTS (CBR-UNSOAKED)

(Refer ASTM D1883)

|                      |                        |                      |                  |
|----------------------|------------------------|----------------------|------------------|
| Project :            | พัฒนากำลังของดินลูกรัง | Req. No.             | 1                |
| Location :           | -                      | Req. Date :          | -                |
| Sample From :        | -                      | Date of testing :    | 17/10/2561       |
| Sample Description : | ดินลูกรัง E            | Type of Compaction : | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density (g/cc.) | C.B.R. (%) | SWELL (%) |
|--------------|-----------------|------------|-----------|
| 12           | 1.79            | 28.67      | -         |
| 25           | 1.93            | 56.20      | -         |
| 56           | 2.08            | 93.33      | -         |

|                                    |       |       |          |          |
|------------------------------------|-------|-------|----------|----------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.127 | g/cc. |          |          |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.021 | g/cc. | C.B.R. = | 78.125 % |





DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333

SUMMARY OF RESULTS (CBR-UNSOAKED)

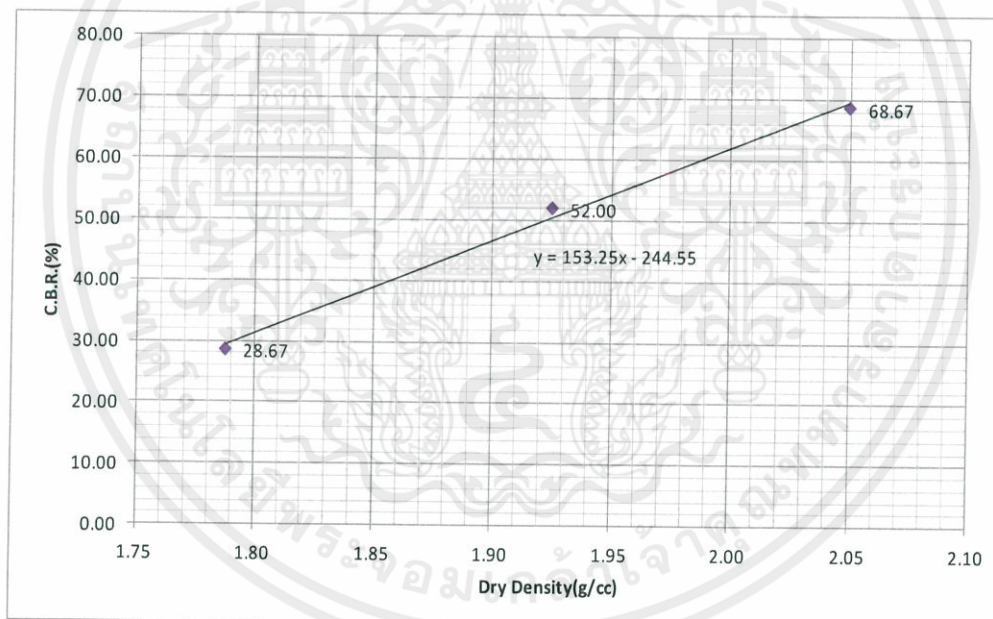
(Refer ASTM D1883)

Project : พัฒนากำลั่งของดินลูกรัง  
Location : -  
Sample From : -  
Sample Description : ดินลูกรัง E

Req. No. 2  
Req. Date : -  
Date of testing : 17/10/2561  
Type of Compaction : Modified Proctor

| No. of Blows | Density (g/cc.) | C.B.R. (%) | SWELL (%) |
|--------------|-----------------|------------|-----------|
| 12           | 1.79            | 28.67      | -         |
| 25           | 1.92            | 52.00      | -         |
| 56           | 2.05            | 68.67      | -         |

100% Compaction (Modified Proctor) 2.127 g/cc.  
95% Compaction (Modified Proctor) 2.021 g/cc. C.B.R. = 63.094 %





**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333**

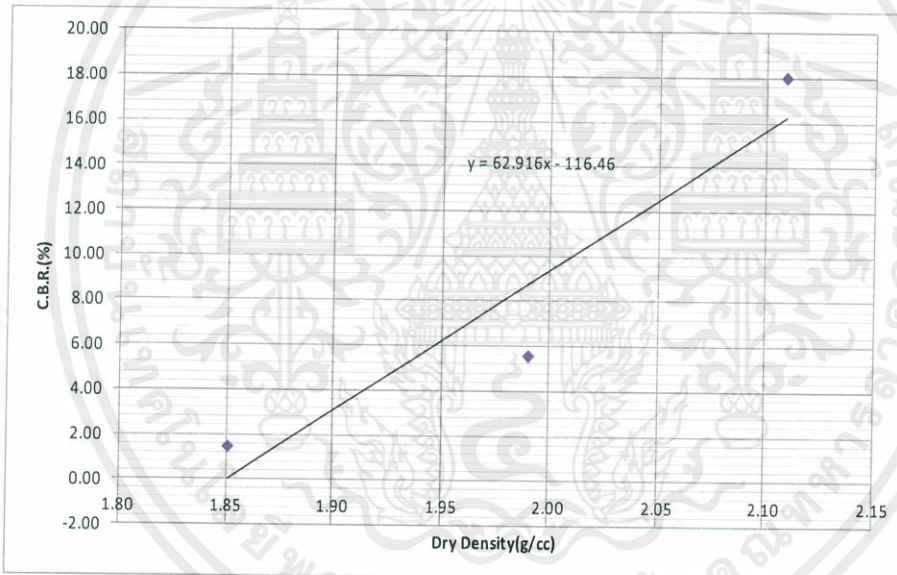
**SUMMARY OF RESULTS (CBR-UNSOAKED)**

(Refer ASTM D1883)

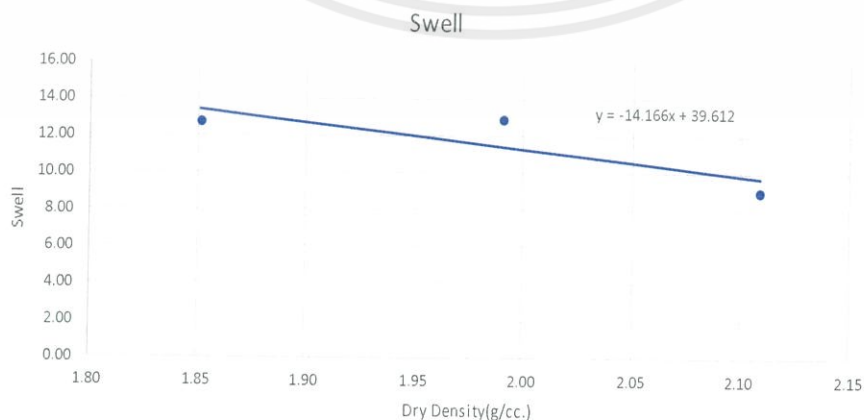
|                             |                      |                             |                  |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าส่งดินลูกรัง | <b>Req. No.</b>             | 1                |
| <b>Location :</b>           | -                    | <b>Req. Date :</b>          | -                |
| <b>Sample From :</b>        | -                    | <b>Date of testing :</b>    | 17/11/2561       |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง E          | <b>Type of Compaction :</b> | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.85               | 1.48          | 12.73        |
| 25           | 1.99               | 5.53          | 12.86        |
| 56           | 2.11               | 18.00         | 8.95         |

|                                    |       |       |                   |
|------------------------------------|-------|-------|-------------------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.127 | g/cc. |                   |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.021 | g/cc. | C.B.R. = 10.671 % |



|                                    |       |       |                  |
|------------------------------------|-------|-------|------------------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.127 | g/cc. |                  |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.021 | g/cc. | Swell = 10.987 % |





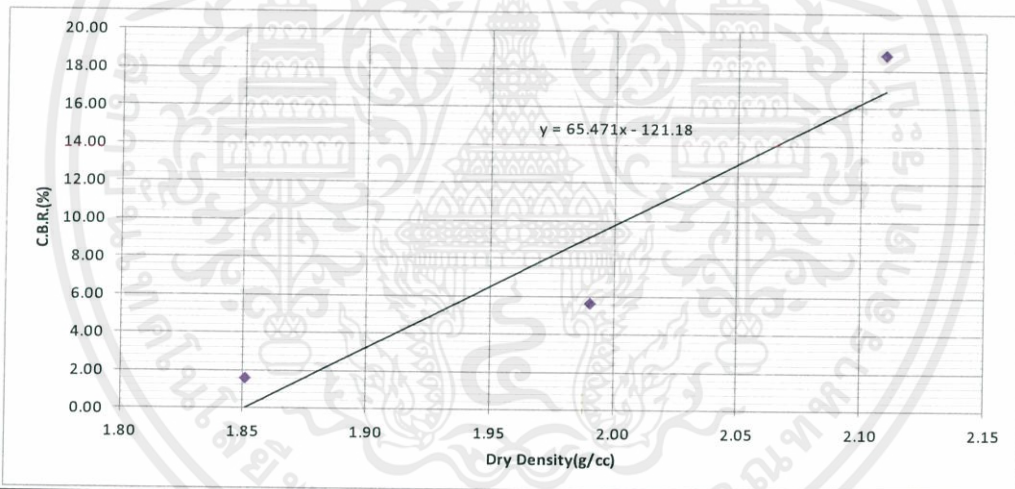
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333**

**SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)**  
 (Refer ASTM D1883)

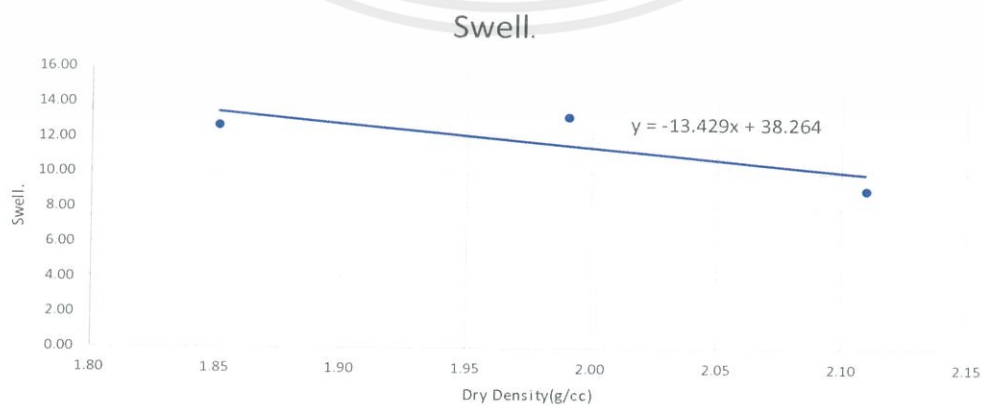
|                             |                       |                             |                  |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าลิ่งดินลูกรัง | <b>Req. No.</b>             | 2                |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Req. Date :</b>          | -                |
| <b>Sample From :</b>        | Lab 6 C.B.R. (Soaked) | <b>Date of testing :</b>    | 17/11/1961       |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง E           | <b>Type of Compaction :</b> | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.85               | 1.60          | 12.64        |
| 25           | 1.99               | 5.67          | 13.20        |
| 56           | 2.11               | 18.80         | 9.04         |


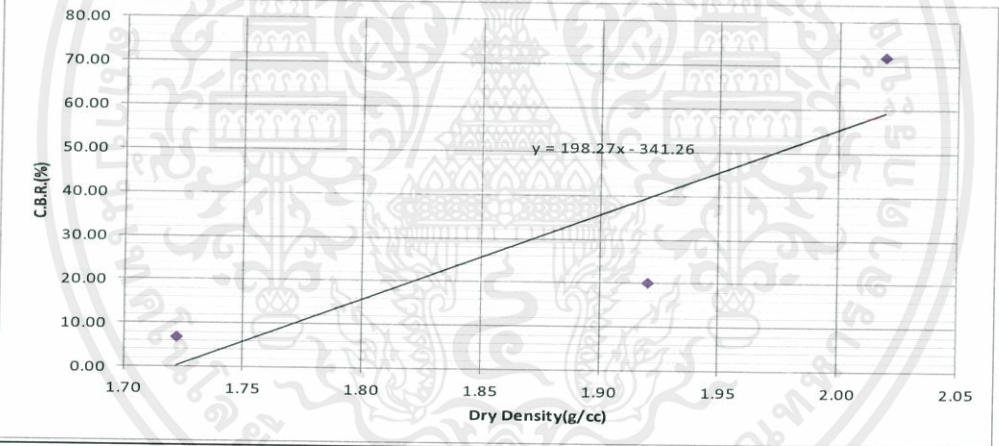
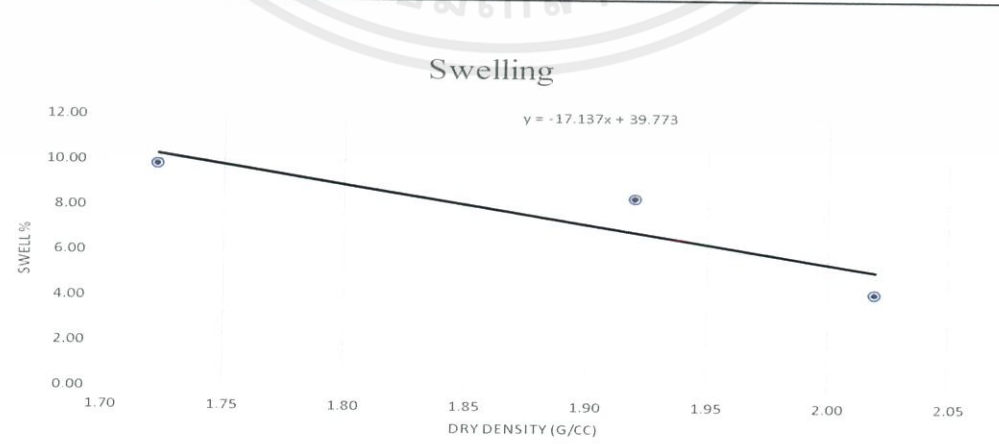
|                                    |       |       |          |        |   |
|------------------------------------|-------|-------|----------|--------|---|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.127 | g/cc. |          |        |   |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.021 | g/cc. | C.B.R. = | 11.005 | % |



|                                    |       |       |         |        |  |
|------------------------------------|-------|-------|---------|--------|--|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.127 | g/cc. |         |        |  |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.021 | g/cc. | Swell = | 11.129 |  |



ข.4.7 การทดสอบ C.B.R. ดินลูกรังชนิด E+LF Slag 5%

|    | <p>DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING<br/>                 FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY<br/>                 LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333<br/>                 SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)<br/>                 (Refer ASTM D1883)</p> |                    |               |              |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |
|---|---|--------------------|---------------|--------------|----|------|------|------|----|------|-------|------|----|------|-------|------|--|
| <p><b>Project :</b> พัฒนากำลั่งดินลูกรัง</p> <p><b>Location :</b> -</p> <p><b>Sample From :</b> Soil E+5% LF NO.1</p> <p><b>Sample Description :</b> ดินลูกรัง</p>  | <p><b>Req. No.</b> 1</p> <p><b>Req. Date :</b> -</p> <p><b>Date of testing :</b> 11/12/2561</p> <p><b>Type of Compactor</b> Modified Proctor</p>  |                    |               |              |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>No. of Blows</th> <th>Density<br/>(g/cc.)</th> <th>C.B.R.<br/>(%)</th> <th>SWELL<br/>(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">12</td> <td style="text-align: center;">1.72</td> <td style="text-align: center;">6.70</td> <td style="text-align: center;">9.76</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">1.92</td> <td style="text-align: center;">20.00</td> <td style="text-align: center;">8.35</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">56</td> <td style="text-align: center;">2.02</td> <td style="text-align: center;">72.00</td> <td style="text-align: center;">4.18</td> </tr> </tbody> </table> | No. of Blows  | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) | 12 | 1.72 | 6.70 | 9.76 | 25 | 1.92 | 20.00 | 8.35 | 56 | 2.02 | 72.00 | 4.18 |  |
| No. of Blows  | Density<br>(g/cc.)  | C.B.R.<br>(%)      | SWELL<br>(%)  |              |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |
| 12  | 1.72  | 6.70               | 9.76          |              |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |
| 25  | 1.92  | 20.00              | 8.35          |              |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |
| 56  | 2.02  | 72.00              | 4.18          |              |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |
| 100% Compaction (Modified Proctor)  | 2.137   | g/cc.              |               |              |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |
| 95% Compaction (Modified Proctor)   | 2.030   | g/cc.              | C.B.R. =      | 61.321 %     |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |
|    |   |                    |               |              |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |
| 100% Compaction (Modified Proctor)  | 2.137   | g/cc.              |               |              |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |
| 95% Compaction (Modified Proctor)   | 2.030   | g/cc.              | Swell =       | 4.982 %      |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |
| <p><b>Swelling</b></p>    |   |                    |               |              |    |      |      |      |    |      |       |      |    |      |       |      |  |



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333**

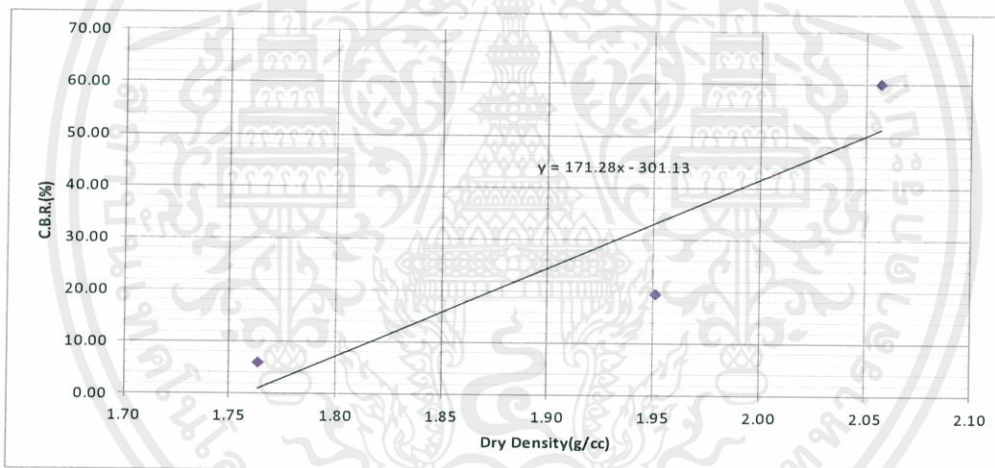
**SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)**

(Refer ASTM D1883)

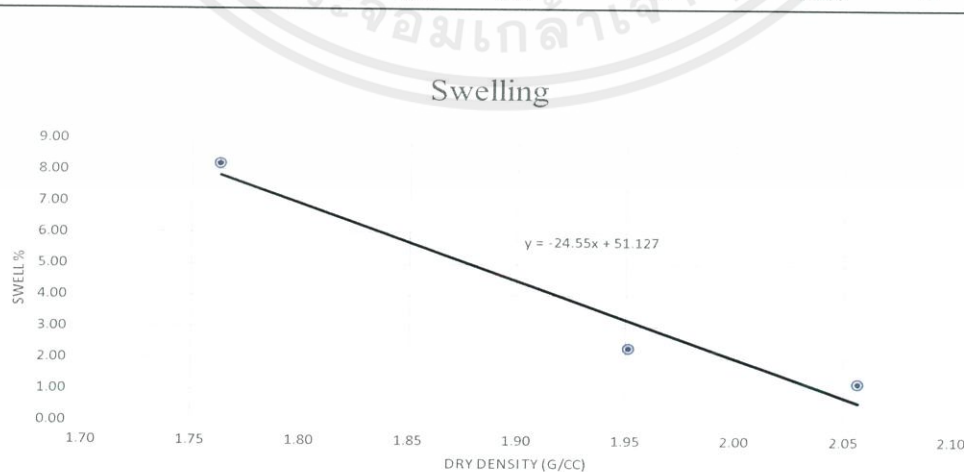
|                             |                       |                             |                  |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าตั้งดินลูกรัง | <b>Req. No.</b>             | 2                |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Req. Date :</b>          | -                |
| <b>Sample From :</b>        |                       | <b>Date of testing :</b>    | 11/12/2561       |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง E+5% LF     | <b>Type of Compaction :</b> | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.76               | 5.87          | 8.16         |
| 25           | 1.95               | 19.40         | 2.32         |
| 56           | 2.06               | 60.00         | 1.20         |


|                                    |       |       |          |          |
|------------------------------------|-------|-------|----------|----------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.137 | g/cc. |          |          |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.030 | g/cc. | C.B.R. = | 46.648 % |



|                                    |       |       |         |         |
|------------------------------------|-------|-------|---------|---------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.137 | g/cc. |         |         |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.030 | g/cc. | Swell = | 1.287 % |



ข.4.8 การทดสอบ C.B.R. ดินลูกรังชนิด E+LF Slag 10%

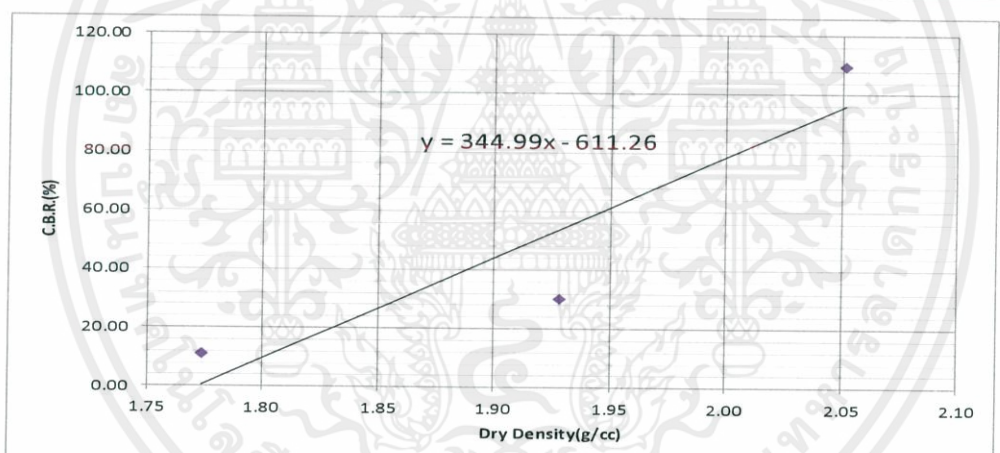


DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
 FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
 LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333  
 SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)  
 (Refer ASTM D1883)

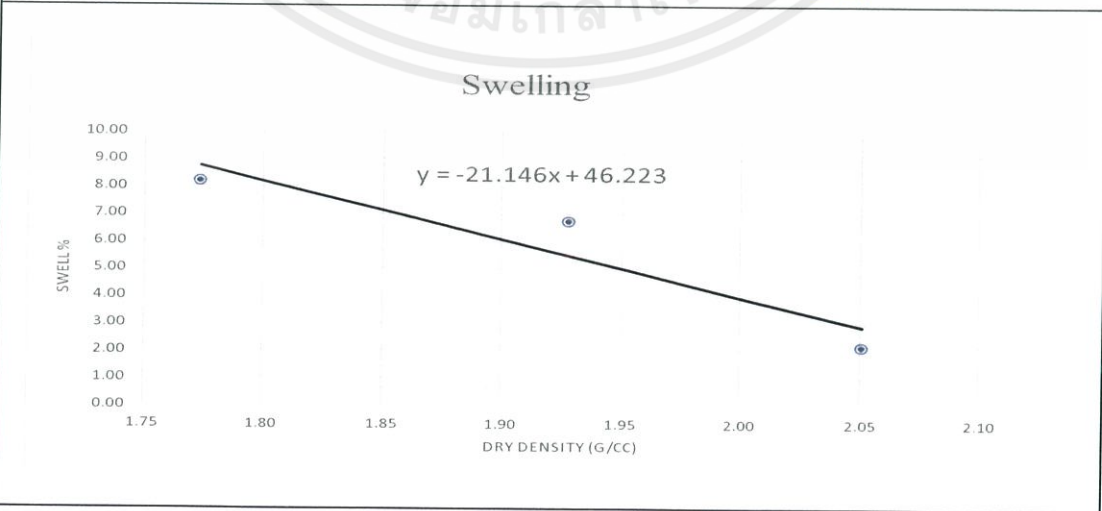
|                      |                      |                      |                  |
|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| Project :            | พัฒนาท่าส่งดินลูกรัง | Req. No. :           | 1                |
| Location :           | -                    | Req. Date :          | -                |
| Sample From :        | -                    | Date of testing :    | 10/2/2562        |
| Sample Description : | ดินลูกรัง E+10% LF   | Type of Compaction : | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.77               | 11.20         | 8.16         |
| 25           | 1.93               | 30.00         | 6.72         |
| 56           | 2.05               | 109.67        | 2.14         |

|                                    |       |       |          |          |
|------------------------------------|-------|-------|----------|----------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.095 | g/cc. |          |          |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 1.990 | g/cc. | C.B.R. = | 75.356 % |



|                                    |       |       |         |         |
|------------------------------------|-------|-------|---------|---------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.095 | g/cc. |         |         |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 1.990 | g/cc. | Swell = | 4.137 % |





**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333**

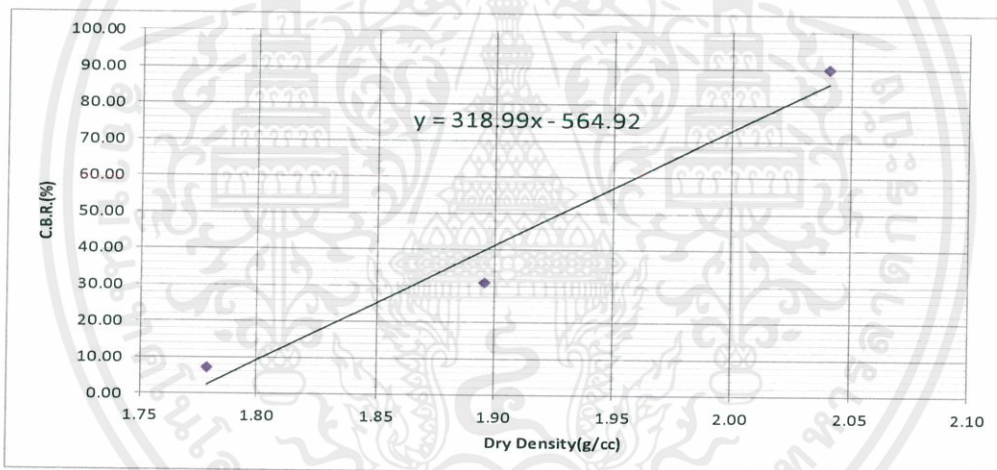
**SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)**

(Refer ASTM D1883)

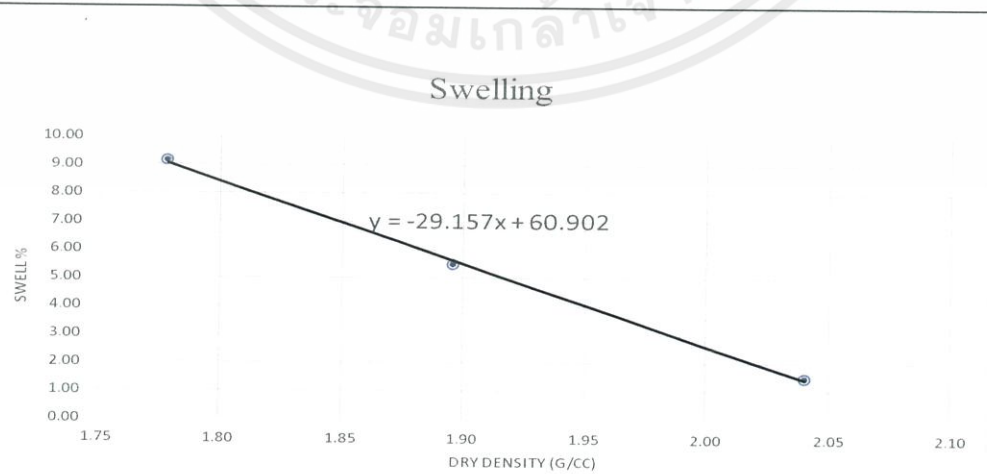
|                             |                       |                             |                  |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าลิ่งดินลูกรัง | <b>Req. No.</b>             | 2                |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Req. Date :</b>          | -                |
| <b>Sample From :</b>        |                       | <b>Date of testing :</b>    | 10/2/2562        |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง E+10% LF    | <b>Type of Compaction :</b> | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.78               | 7.27          | 9.12         |
| 25           | 1.90               | 31.00         | 5.49         |
| 56           | 2.04               | 90.00         | 1.46         |

|                                    |       |       |                   |
|------------------------------------|-------|-------|-------------------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.095 | g/cc. |                   |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 1.990 | g/cc. | C.B.R. = 69.950 % |



|                                    |       |       |                 |
|------------------------------------|-------|-------|-----------------|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.095 | g/cc. |                 |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 1.990 | g/cc. | Swell = 2.872 % |



ข.4.9 การทดสอบ C.B.R. ดินลูกรังชนิด E+LF Slag 12%



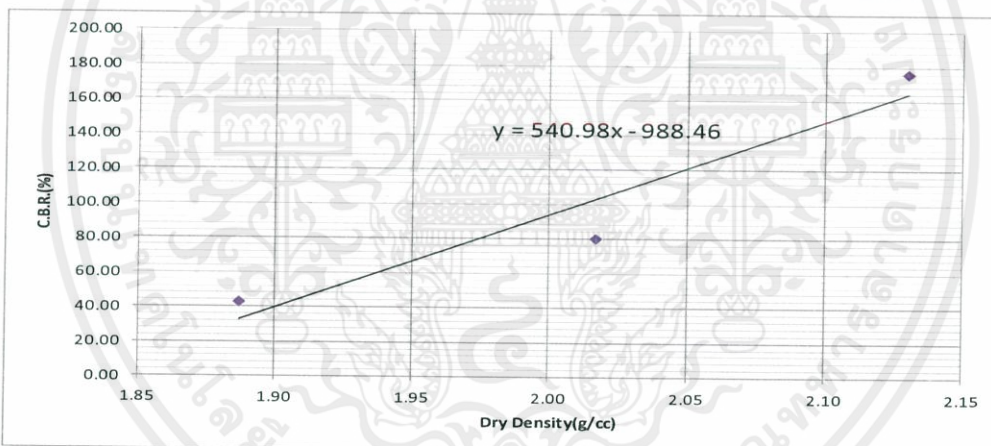
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
 FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT ' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
 LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333  
 SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)

(Refer ASTM D1883)

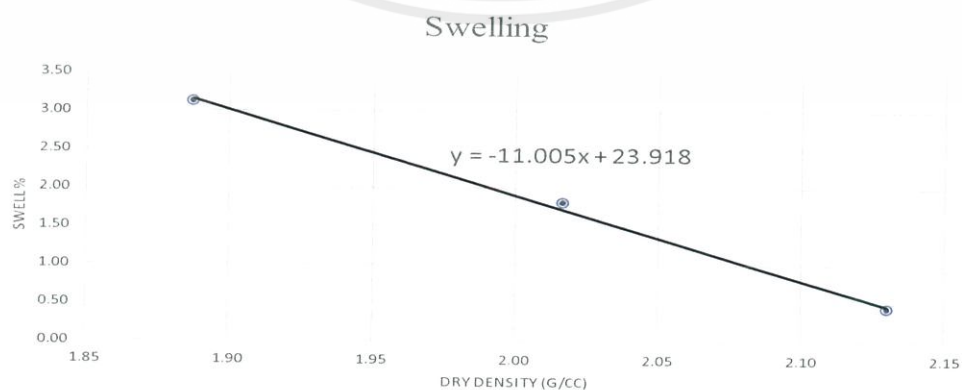
**Project :** พัฒนากำแพงดินลูกรัง **Req. No.** 1  
**Location :** - **Req. Date :** -  
**Sample From :** - **Date of testing :** 21/3/2562  
**Sample Description** ดินลูกรัง E+12% LF **Type of Compacti** Modified Proct

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.89               | 43.00         | 3.11         |
| 25           | 2.02               | 80.00         | 1.81         |
| 56           | 2.13               | 176.00        | 0.43         |

100% Compaction (Modified Proctor) 2.122 g/cc.  
 95% Compaction (Modified Proctor) 2.016 g/cc. C.B.R. = 102.102 %



100% Compaction (Modified Proctor) 2.122 g/cc.  
 95% Compaction (Modified Proctor) 2.016 g/cc. Swell = 1.976 %





**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2329-8333**

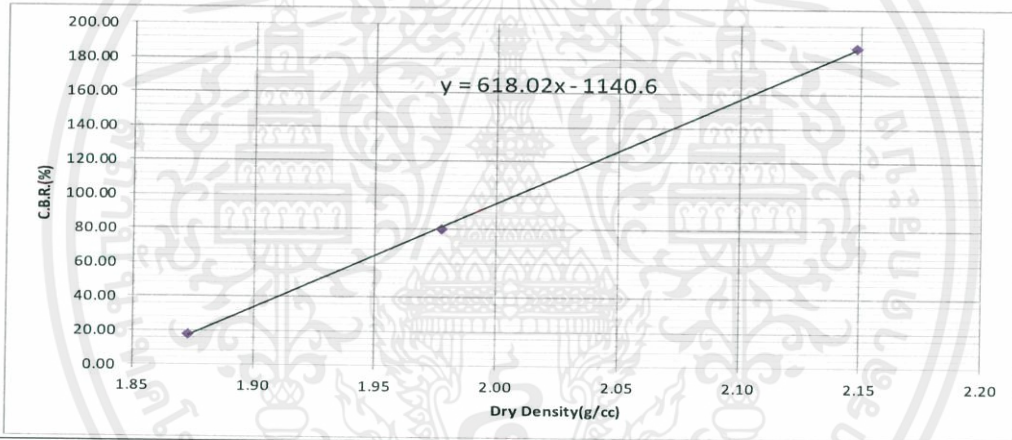
**SUMMARY OF RESULTS (CBR-SOAKED)**

(Refer ASTM D1883)

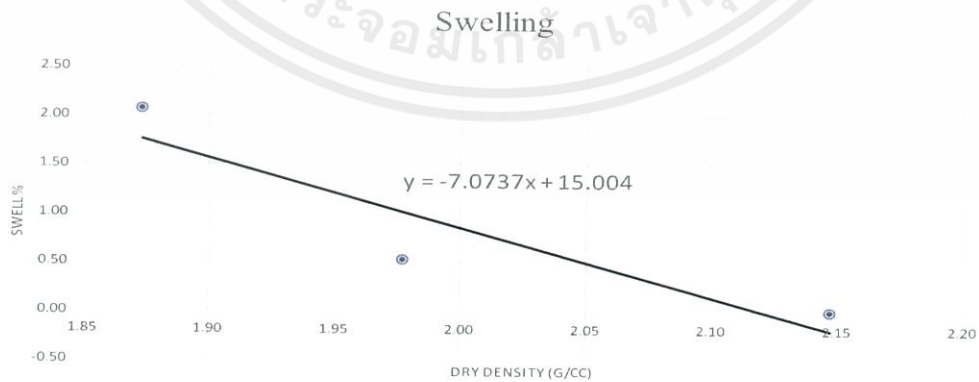
|                             |                       |                             |                  |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Project :</b>            | พัฒนาท่าตั้งดินลูกรัง | <b>Req. No.</b>             | 2                |
| <b>Location :</b>           | -                     | <b>Req. Date :</b>          | -                |
| <b>Sample From :</b>        | -                     | <b>Date of testing :</b>    | 21/3/2562        |
| <b>Sample Description :</b> | ดินลูกรัง E+12LF      | <b>Type of Compaction :</b> | Modified Proctor |

| No. of Blows | Density<br>(g/cc.) | C.B.R.<br>(%) | SWELL<br>(%) |
|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 12           | 1.87               | 18.00         | 2.06         |
| 25           | 1.98               | 80.00         | 0.52         |
| 56           | 2.15               | 187.53        | 0.00         |

|                                    |       |       |          |         |   |
|------------------------------------|-------|-------|----------|---------|---|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.122 | g/cc. |          |         |   |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.016 | g/cc. | C.B.R. = | 105.267 | % |



|                                    |       |       |         |       |   |
|------------------------------------|-------|-------|---------|-------|---|
| 100% Compaction (Modified Proctor) | 2.122 | g/cc. |         |       |   |
| 95% Compaction (Modified Proctor)  | 2.016 | g/cc. | Swell = | 0.744 | % |



## ภาคผนวก ค

### รูปภาพ

#### ค.1 รูปแสดงการพืบัติของดินลูกรัง



รูปที่ ค.1 แสดงการพืบัติของดินลูกรังประเภท D



รูปที่ ค.2 แสดงการพืบัติของดินลูกรังประเภท D +LF Slag 5%



รูปที่ ค.3 แสดงการพืบัติของดินลูกรังประเภท D +LF Slag 7%



รูปที่ ค.4 แสดงการพืบัติของดินลูกรังประเภท D +LF Slag 10%



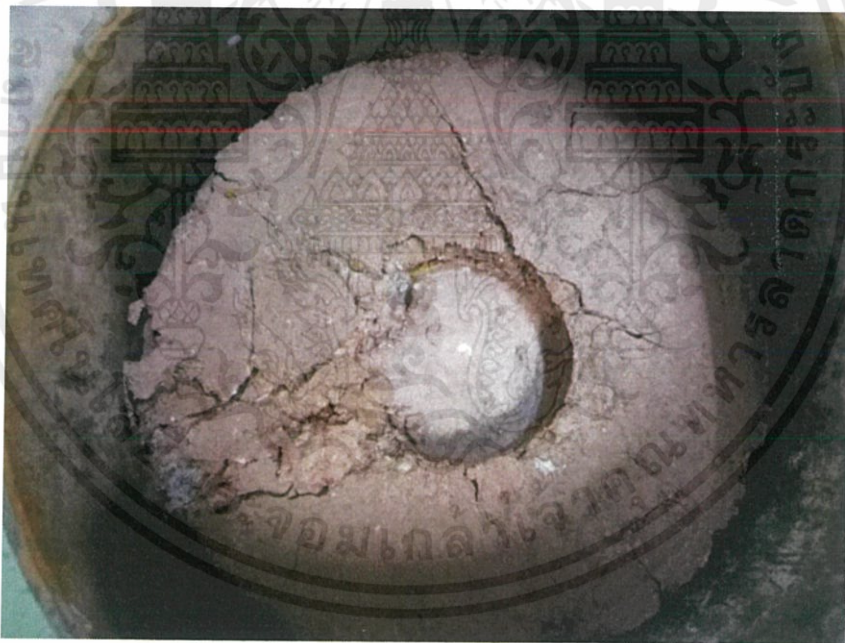
รูปที่ ค.5 แสดงการพืบัติของดินลูกรังประเภท E



รูปที่ ค.6 แสดงการพืบัติของดินลูกรังประเภท E +LF Slag 5%



รูปที่ ค.7 แสดงการพิตของดินลูกรังประเภท E +LF Slag 10%



รูปที่ ค.8 แสดงการพิตของดินลูกรังประเภท E +LF Slag 12%