# การปรับปรุงวัสดุหินผุเพื่อใช้เป็นวัสดุในงานพื้นทาง: กรณีศึกษาหินผุ ในเขตทางหลวงหมายเลข 11 จังหวัดอุตรดิตถ์

นายดุลยพล ชัยมงคล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MODIFICATION OF WEATHERED ROCK FOR USE AS BASE COURSE MATERIALS:
CASE STUDY FOR WEATHERED ROCK ALONG HIGHWAY ROUTE 11 IN UTTARADIT PROVINCE

Mr. Dunyapol Chaimongkol

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2009
Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การปรับปรุงวัสดุหินผุเพื่อใช้เป็นวัสดุในงานพื้นทาง: กรณีศึกษาหินผุในเขตทางหลวงหมายเลข 11 จังหวัดอุตรดิตถ์ |
| โดย | นายดุลยพล ชัยมงคล |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกษม ชูจารุกุล |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ดร. จิรโรจน์ ศุกลรัตน์ |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

................................................ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

................................................ ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มาโนช โลหเตปานนท์)

................................................ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกษม ชูจารุกุล)

................................................ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร. จิรโรจน์ ศุกลรัตน์)

................................................ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดุลยพล ชัยมงคล : การปรับปรุงวัสดุหินผุเพื่อใช้เป็นวัสดุในงานพื้นทาง: กรณีศึกษาหินผุในเขตทางหลวงหมายเลข 11 จังหวัดอุตรดิตถ์. (MODIFICATION OF WEATHERED ROCK FOR USE AS BASE COURSE MATERIALS: CASE STUDY FOR WEATHERED ROCK ALONG HIGHWAY ROUTE 11 IN UTTARADIT PROVINCE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. เกษม ชูจารุกุล, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. จิรโรจน์ ศุกลรัตน์, 88 หน้า.

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุที่จะนำมาก่อสร้างงานทางนั้นจำเป็นต้องใช้วัสดุที่ได้ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ในประเทศไทยวัสดุดังกล่าวนั้นเป็นวัสดุที่ค่อนข้างขาดแคลนในภาคเหนือทำให้ผู้ประกอบการต้องขนส่งวัสดุมาจากพื้นที่อื่นก่อให้เกิดต้นทุนเพิ่มในการก่อสร้าง ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำวัสดุหินผุในจังหวัดอุตรดิตถ์มาใช้เป็นชั้นพื้นทาง โดยได้นำหินผุในจังหวัดอุตรดิตถ์มาทำการทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้นคือ หาขนาดคละของวัสดุ หาค่า Atterberg Limit ค่า California Baring Ratio (CBR) และ Unconfined Compressive Strength (UCS) เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุ จากนั้นจึงนำวัสดุหินผุที่ปรับปรุงแล้วมาทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมซึ่งประกอบด้วย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และ ค่าความคงทน แสดงให้เห็นว่าวัสดุหินผุปรับปรุงในจังหวัดอุตรดิตถ์ มีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานที่ต้องการ นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่าวัสดุหินผุปรับปรุงสามารถช่วยประหยัดค่าก่อสร้าง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุหินคลุกในพื้นที่ดังกล่าว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| | |
|---|---|
| ภาควิชา...............วิศวกรรมโยธา......... | ลายมือชื่อนิสิต......................................... |
| สาขาวิชา.............วิศวกรรมโยธา........ | ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.............. |
| ปีการศึกษา..........2552.................. | ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.............. |

## 4970321921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEY WORDS: SOIL STABILIZATION / WEATHERED ROCK / BASE COURSE / CEMENT STABILIZATION

DUNYAPOL CHAIMONGKOL: MODIFICATION OF WEATHERED ROCK FOR USE AS BASE COURSE MATERIALS: CASE STUDY FOR WEATHERED ROCK ALONG HIGHWAY ROUTE 11 IN UTTARADIT PROVINCE. ADVISOR: KASEM CHOOCHARUKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: JIRAROTH SUKOLRAT, Ph.D., 88 pp.

It is widely known that construction materials for highway construction should meet Department of Highways standards. In Thailand, those materials are scarce in the Northern part; therefore, construction companies typically need to transport materials from other areas, resulting in a higher construction cost. This research aims to study the possibility of bringing weathered rock material in Uttaradit Province as base course. Such materials are subjected to preliminary tests for desired properties in terms of gradation, Atterberg Limit, California Baring Ratio (CBR), and Unconfined Compressive Strength (UCS). The stabilized materials are further tested for Resilient Modulus, and Durability Results show that stabilized materials in Uttaradit Province can satisfy the required standards. In addition, an economic analysis also reveals savings in terms of construction cost, comparing to the traditional usage of crushed rock in local area.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department:......Civil Engineering..........Student's Signature......ดุลยพล ชัยมงคล.........
Field of Study:...Civil Engineering..........Advisor's Signature..........................
Academic Year:............2008..............Co-Advisor's Signature..........................

# กิตติกรรมประกาศ

เหนือสิ่งอื่นใดขอขอบพระคุณบิดามารดา พี่ชาย และญาติพี่น้องที่ทำให้ข้าพเจ้ามีศักยภาพและกำลังเพียงพอที่จะพัฒนาจิตใจและความรู้ และคอยอุปการะเลี้ยงดูและคอยสั่งสอนข้าพเจ้าให้เป็นเช่นปัจจุบันนี้ได้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกษม ชูจารุกุล อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร. จิรโรจน์ ศุกุลรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม สำหรับคำชี้แนะ สั่งสอน ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มาโนช โลหเตปานนท์ และศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ สำหรับคำปรึกษาวิทยานิพนธ์อันมีค่ายิ่งและความกรุณาที่สละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมการขนส่ง ภาควิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้อันเป็นประโยชน์ทั้งในการทำงานวิจัยและการประกอบอาชีพในอนาคตแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง และเจ้าหน้าที่แขวงการทางอุตรดิตถ์ สำหรับให้คำแนะนำ ตลอดจนการอนุเคราะห์ในด้านข้อมูล วัสดุ และอุปกรณ์ในการทดสอบของงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ
กิตติกรรมประกาศ ฉ
สารบัญ ช
สารบัญตาราง ฌ
สารบัญภาพ ญ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย 2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 โครงสร้างทางในปัจจุบัน 3
2.2 หินผุ 6
2.3 วิธีการปรับปรุงคุณภาพวัสดุในปัจจุบัน 13
2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม 29
2.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ 30
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน 35
3.1 วิธีการดำเนินงาน 35
3.2 วิธีการทดสอบ 37
3.3 แหล่งวัสดุที่ใช้ในโครงการ 48
บทที่ 4 ผลการทดสอบ 53
4.1 ผลการทดสอบหาขนาดคละของเม็ดวัสดุ 53
4.2 การทดสอบ Atterberg Limit 54
4.3 การทดสอบ การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน 55
4.4 การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) 56


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

4.5 ผลการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) 59
4.6 ผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus, $M_R$) 64
4.7 การทดสอบหาค่าความคงทน โดยวิธี Wet and Dry Test 69
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผล 71
5.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดวัสดุกับค่า Unconfined Compressive Strength 71
5.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบระหว่าง UCS กับ Durability 71
5.3 ผลการวิเคราะห์ค่า Resilient Modulus ($M_R$) 73
5.4 การประมาณราคาวัสดุปรับปรุงคุณภาพ 73
5.5 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของราคาต่อเปอร์เซนต์ซีเมนต์ 76
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ 83
6.1 สรุปผลการวิจัย 83
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 83
รายการอ้างอิง 85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 88

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การเรียงขนาดตามตะแกรงร่อนของเม็ดวัสดุที่ใช้กับชั้นรองพื้นทาง สำหรับถนนที่มีผิวทาง เป็นวัสดุจำพวกแอสฟัลต์ 4
2.2 การเรียงขนาดตามตะแกรงร่อนของเม็ดวัสดุที่ใช้กับชั้นพื้นทางแบบ Crushed Stone Soil Aggregate สำหรับถนนที่มีผิวทาง เป็นวัสดุพวกแอสฟัลต์ 5
2.3 สรุปมาตรฐานโครงสร้างทางของกรมทางหลวง 6
2.4 ปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการปรับปรุงดินบางชนิด 15
2.5 ขนาดคละของดินที่จะปรับปรุงด้วยวิธี Plastic Soil – Cement 18
2.6 ค่ากำลังแรงอัดของดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วันและ 28 วัน 19
2.7 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ปรับปรุงดินตามขนาดของดิน Sandy Soils 21
2.8 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ปรับปรุงดินตามขนาดของดิน Clayey Soils 22
2.9 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงด้วยวัสดุบิทูมินัส 27
2.10 ค่าความลึกหรอมาตรฐานสำหรับการใช้การปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ 29
2.11 สมการถดถอยตามตัวแปรความแข็งแรงของดินเกรนิตผสมซีเมนต์ 33
2.12 ราคาเปรียบเทียบระหว่างดินแกรนิตผสมซีเมนต์กับหินคลุก ปริมาณรถบรรทุก 34
3.1 ค่าความเค้นที่กระทำต่อก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง ตามวิธีการทดสอบ AASHTO T307 47
4.1 ขนาดคละของเม็ดวัสดุหินผุจากทั้งสามแหล่ง 53
4.2 ค่า Atterberg Limit ของหินผุทั้งสามแหล่ง เทียบกับมาตรฐานชั้นพื้นทางปริมาณก 54
4.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง UCS กับ %Cement ของแหล่งต่างๆ 61
4.4 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางอันเนื่องมาจากน้ำหนักของวัสดุ 67
4.5 ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุหินผุที่ปรับปรุงแล้ว และยังไม่ได้ปรับปรุงที่ความเค้นไม่แปรเปลี่ยนจากน้ำหนักของวัสดุตรงกึ่งกลางชั้นพื้นทาง 68
4.6 ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุหินผุ 68
5.1 เปรียบเทียบค่า UCS กับ แหล่งวัสดุ 71
5.2 ค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทาง 73
5.3 เปรียบเทียบราคาระหว่างวัสดุหินคลุกกับวัสดุปรับปรุงจากสถานที่ทำการวิจัย 65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 การแบ่งชั้นของหินผุ 7
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น (Compressive Stress) และ ความเครียด (Strain) ของดินผสมปูนขาว ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆกัน 16
2.3 แนวทางการเลือกวิธีปรับปรุงดินตามหลักเกณฑ์ U.S. Air Force 19
2.4 ผลกระทบของปริมาณความชื้นที่มีต่อความหนาแน่นแห้งและ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ 23
3.1 แผนภูมิลำดับการทำงาน 36
3.2 แผนที่แสดงที่ตั้งของแหล่งวัสดุ 49
3.3 แหล่งวัสดุแหล่งที่ 1 กม.113+300 Rt. 49
3.4 วัสดุที่ใช้ทดสอบของแหล่งที่ 1 50
3.5 แหล่งวัสดุแหล่งที่ 2 กม. 114+000 Rt. 50
3.6 วัสดุที่ใช้ทดสอบของแหล่งที่ 2 51
3.7 แหล่งวัสดุแหล่งที่ 3 กม. 121+300 Lt. 51
3.8 วัสดุที่ใช้ทดสอบของแหล่งที่ 3 52
4.1 เปรียบเทียบขนาดคละของวัสดุกับมาตรฐานพื้นทาง 54
4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุจากแหล่งที่ 1 55
4.3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ของวัสดุจากแหล่งที่ 2 56
4.4 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ของวัสดุจากแหล่งที่ 3 56
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density กับ CBR ของแหล่งที่ 1 57
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density กับ CBR ของแหล่งที่ 2 57
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density กับ CBR ของแหล่งที่ 3 58
4.8 การเลือกวิธีการปรับปรุง 59
4.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของวัสดุจากแหล่งที่ 1 60
4.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของวัสดุจากแหล่งที่ 2 60
4.11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของวัสดุจากแหล่งที่ 3 61
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง UCS กับ %Cement ของทั้งสามแหล่ง 62

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ หน้า

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ %Cement ของแหล่งที่ 1 63
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ %Cement ของแหล่งที่ 2 63
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ %Cement ของแหล่งที่ 3 64
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $M_R$ กับ Stress ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ของแหล่งที่ 1 65
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $M_R$ กับ Stress ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ของแหล่งที่ 2 65
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $M_R$ กับ Stress ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ของแหล่งที่ 3 66
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $M_R$ กับ Stress รวมของทั้งสามแหล่ง ที่ได้ทำการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 68
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Accumulative Loss กับจำนวนครั้งของวัสดุแหล่งที่ 1 69
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Accumulative Loss กับจำนวนครั้งของวัสดุแหล่งที่ 2 69
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Accumulative Loss กับจำนวนครั้งของวัสดุแหล่งที่ 3 70
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง %loss กับ %Cement ของวัสดุปรับปรุง 62
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Loss กับ UCS ของวัสดุปรับปรุง 62
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างราคากับปริมาณซีเมนต์ในวัสดุปรับปรุง 65
5.4 ความอ่อนไหวของราคาหินคลุกที่ราคาน้ำมันต่างๆ 77
5.5 ความอ่อนไหวของระยะทางขนส่งหินคลุกที่ราคาน้ำมันต่างๆ 77
5.6 ความอ่อนไหวของราคาหินผุ 78
5.7 ความอ่อนไหวของราคาซีเมนต์ 78
5.8 ความอ่อนไหวของระยะทางขนส่งหินผุที่ราคาน้ำมัน 15 บาท 79
5.9 ความอ่อนไหวของระยะทางขนส่งหินผุที่ราคาน้ำมัน 20 บาท 79
5.10 ความอ่อนไหวของระยะทางขนส่งหินผุที่ราคาน้ำมัน 30 บาท 80
5.11 ความอ่อนไหวของระยะทางขนส่งหินผุที่ราคาน้ำมัน 50 บาท 80
5.12 ตัวอย่างการเลือกใช้ความสัมพันธ์ 81

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ในการก่อสร้างงานทางนั้นจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีมาตรฐานและคุณสมบัติ ตรงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ซึ่งในปัจจุบันวัสดุโครงสร้างทางที่ตรงตามมาตรฐานของแต่ละภูมิภาคเริ่มจะขาดแคลน เมื่อมีความจำเป็นในการก่อสร้างทาง หรือบูรณะบำรุงทางในพื้นที่ดังกล่าว ทำให้ต้องสั่งซื้อวัสดุจากภูมิภาคอื่นเพื่อ เป็นผลทำให้เพิ่มต้นทุนในการขนส่ง ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการก่อสร้าง นอกจากนี้การขนส่งยังมีผลกระทบต่อการเร่งการเสื่อมสภาพของชั้นทาง และก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม กรมทางหลวงจึงเห็นว่าการที่ภูมิภาคนั้นสามารถนำวัสดุในท้องถิ่นมาปรับปรุงคุณภาพแล้วสามารถนำไปใช้ทดแทนวัสดุโครงสร้างทางที่ตรงตามมาตรฐานจะทำให้ลดต้นทุนการขนส่ง และลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการขนส่งวัสดุจากท้องถิ่นอื่นได้ โดยจะต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุนั้นให้มีลักษณะใกล้เคียงกับมาตรฐานการออกแบบเดิม

ปัจจุบันพบว่า วัสดุก่อสร้างทางสำหรับชั้นพื้นทางในเขตภาคเหนือเริ่มขาดแคลน ดังนั้นจึงควรมีการทดสอบหาวัสดุทดแทน กรมทางหลวงจึงได้มีงานวิจัยในส่วนของวัสดุทดแทนโดยใช้ดินลูกรังผสมซีเมนต์ แต่วัสดุดังกล่าวมีปัญหาในการใช้งานเนื่องจากเกิดการแตกเนื่องจากการหดตัว ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงทำการเก็บตัวอย่างวัสดุหินผุในเขตพื้นที่จังหวัดอุตรดิตถ์ มาทดสอบหาความเป็นไปได้เพื่อใช้ทดแทนวัสดุชั้นพื้นทางที่ขาดแคลน โดยจะต้องมีการกำหนดคุณสมบัติเพื่อทดสอบวัสดุดังกล่าวเช่น คุณสมบัติการรับน้ำหนัก ความคงทน การบวมน้ำ เป็นต้น

ผลการวิจัยนี้จะทำให้สามารถนำวัสดุหินผุในจังหวัดอุตรดิตถ์มาเป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นพื้นทางได้และยังสามารถช่วยลดต้นทุนในการขนส่ง ซึ่งทำให้สามารถประหยัดงบประมาณในการก่อสร้างทางและสะดวกในการใช้สอยได้มากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎี ที่เกี่ยวข้องในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุต่างๆ เช่น หินผุ ดิน กรวด ทราย และ วัสดุอื่นๆ ที่มีอยู่ในจังหวัดอุตรดิตถ์ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง
2. ศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสม ในการนำวัสดุหินผุ ในจังหวัดอุตรดิตถ์ มาปรับปรุงคุณภาพ เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง
3. ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุหินผุในจังหวัดอุตรดิตถ์ และเปรียบเทียบกับมาตรฐานข้อกำหนดของกรมทางหลวง เพื่อหาวิธีการปรับปรุงที่เหมาะสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรม และคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ได้ทำการปรับปรุงเพื่อแนะนำการปรับปรุงที่เหมาะสม

5. ศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยทำการเปรียบเทียบราคาของวัสดุที่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพ กับราคาของวัสดุที่ใช้ในปัจจุบัน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และผลการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องในการออกแบบก่อสร้างโครงสร้างทางจากวัสดุที่มีอยู่ในภูมิภาคนั้นๆ
2. ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของวัสดุหินผุ เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานข้อกำหนดของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทาง
3. ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุหินผุที่จัดเก็บมาและนำเสนอวิธีการปรับปรุง
4. สรุปผลและเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนในการปรับปรุงวัสดุหินผุกับต้นทุนของวัสดุที่ตรงตามมาตรฐานจากแหล่งอื่น เพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้าง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถแก้ปัญหาการขาดแคลนวัสดุชั้นพื้นทางในจังหวัดอุตรดิตถ์ ได้
2. สามารถนำวัสดุหินผุ มาปรับปรุงคุณภาพเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้
3. สามารถลดต้นทุนในการขนส่งวัสดุตามมาตรฐานจากแหล่งที่ห่างไกลได้
4. เป็นแนวทางและวิธีการในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมาตรฐานโครงสร้างทางในปัจจุบัน ลักษณะโดยทั่วไปของหินผุ วิธีการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ วิธีการทดสอบวัสดุปรับปรุง การประมาณราคาวัสดุ และ งานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวัสดุหินผุ และวัสดุปรับปรุง

## 2.1 โครงสร้างทางในปัจจุบัน

กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานสำหรับวัสดุโครงสร้างทาง ดังนี้

### 2.1.1 ดินถมคันทาง (มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล. – ม. 102/2532)

เป็นดินที่ปราศจากหน้าดิน และวัชพืช ส่วนที่จับตัวกันเป็นก้อนหรือยึดเกาะกันจะต้องมีขนาดเล็กกว่า 50 มิลลิเมตร มีขนาดเท่ากันสม่ำเสมอ และมีค่าความหนาแน่นแห้งไม่น้อยกว่ 1,440 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องทำการควบคุมหรือกำหนดจะมีดังนี้

1. มีค่า CBR เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาค่า CBR ไม่น้อยกว่ากำหนดไว้ในแบบ ที่ความหนาแน่นแห้งของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด ที่ได้จากการทดลอง Compaction Test แบบมาตรฐาน
2. การบวมตัว (Swelling) จากการทดลองหาค่า CBR ต้องไม่เกินร้อยละ 4 ที่ความหนาแน่นแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด

### 2.1.2 ทรายถมคันทาง (มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล. – ม. 103/2532)

เป็นทรายที่ปราศจากก้อนดินเหนียว หน้าดิน และ วัชพืช ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องทำการควบคุมหรือกำหนดจะมีดังนี้

1. ต้องเป็นทรายหรือวัสดุ Non Plastic ที่มีขนาดไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร
2. ขนาดคละของเม็ดวัสดุต้อง มีส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 25
3. มีค่า CBR ไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ที่ความหนาแน่นแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.1.3 รองพื้นทางวัสดุมวลรวม (มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล. – ม. 205/2532)

วัสดุรองพื้นทางจะเป็นวัสดุพวกเม็ดแข็ง ทนทานที่รับน้ำหนักได้ดี และมีดินเม็ดละเอียดอยู่ปริมาณหนึ่ง เพื่อเป็นวัสดุเชื้อประสาน ถ้ามีส่วนที่ดินหรือหินเกาะรวมกันเป็นก้อนโตกว่า 5 เซนติเมตร จะต้องทำให้แตกแยกย่อย เพื่อที่การผสมและการบดอัด ทำให้ได้วัสดุ ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและคุณภาพแบบเดียวกันตลอดทุกส่วน ถ้ามีวัสดุที่โตกว่า 5 เซนติเมตรที่ไม่แตกร่วน หรือวัชพืชจะต้องกำจัดออกไป วัสดุที่จะนำมาใช้จะต้องได้จากแหล่งที่ยอมรับแล้ว และก่อนใช้งานต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้คุมงานก่อน และคุณสมบัติที่ต้องควบคุมตามมาตรฐาน ทล.ม. 205/2532 ได้กำหนดไว้ ดังนี้

1. ขนาดคละของเม็ดวัสดุ ตามการวิธีทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** การเรียงขนาดตามตะแกรงร่อนของเม็ดวัสดุที่ใช้กับชั้นรองพื้นทาง สำหรับถนนที่มีผิวทางเป็นวัสดุจำพวกแอสฟัลต์ (กรมทางหลวง, 2532)

| **ขนาดตะแกรง** | **จำนวนร้อยละที่ลอดผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 2 นิ้ว | 100 | 100 | - | - | - |
| 1 นิ้ว | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 3/8นิ้ว | 30 - 65 | 40 - 75 | 50 - 85 | 60 -100 | - |
| เบอร์ 10 | 15 - 40 | 20 - 45 | 25 - 50 | 40 - 70 | 40 - 100 |
| เบอร์ 40 | 8 - 20 | 15 - 30 | 15 - 30 | 25 - 45 | 20 - 50 |
| เบอร์ 200 | 2 - 8 | 5 - 20 | 5 -15 | 5 - 20 | 6 - 20 |

2. ขีดจำกัดอัตเตอร์เบอร์ก ค่า Liquid Limit (LL) ต้องไม่เกินร้อยละ 35 ค่า Plasticity Index (PI) ต้องไม่เกินร้อยละ 11 ตามการทดลองหาค่า Liquid Limit และ Plastic Index ตามลำดับ

3. ส่วนสึกหรอของวัสดุเม็ดหยาบ (Coarse Aggregate) ต้องไม่เกินร้อยละ 60 ตามการทดลอง Los Angeles Abrasion Test

4. ค่า CBR ที่ใช้จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ที่ความหนาแน่นแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด ตามการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

5. วัสดุมวลรวมที่นำมาผสมกันต้องมีขนาดคละสม่ำเสมอ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. การใช้วัสดุรองพื้นทางพวกหินแผ่น (Shale) ต้องมีค่าความคงทนของวัสดุ (Durability) โดยวิธี Washed Test Sample ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30

### 2.1.4 พื้นทางหินคลุก (มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล. – ม. 201/2544)

วัสดุที่นำมาใช้เป็นชั้นพื้นทาง อาจเป็นพวกหินหยาบ (หินโม่) หรือกรวดหยาบ (กรวดโม่) และข้อกำหนดวัสดุพื้นทางแบบพื้นทางหินคลุก (Crushed Rock Soil Aggregate Type) ได้กำหนดไว้ดังนี้

1. มีขนาดคละกันสม่ำเสมอแบบจากใหญ่ไปหาเล็กบดทับแน่นอยู่บนชั้นรองพื้นทาง ตารายละเอียดในแบบก่อสร้างและพวกวัสดุจะต้องเรียงขนาดตามตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** การเรียงขนาดตามตะแกรงร่อนของเม็ดวัสดุที่ใช้กับชั้นพื้นทางแบบ Crushed Stone Soil Aggregate สำหรับถนนที่มีผิวทาง เป็นวัสดุพวกแอสฟัลต์ (กรมทางหลวง, 2544)

| ขนาดตะแกรง | จำนวนร้อยละที่ลอดผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก | |
|---|---|---|
| | A | B |
| 2 นิ้ว | 100 | 100 |
| 1 นิ้ว | - | 75 - 95 |
| 3/8นิ้ว | 30 – 65 | 40 - 75 |
| เบอร์ 10 | 15 – 40 | 20 - 45 |
| เบอร์ 40 | 8 – 20 | 15 - 30 |
| เบอร์ 200 | 2 – 8 | 5 - 20 |

ในกรณีที่ใช้พวกกรวดย่อย พวกที่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 4 จะต้องมีหน้าแตกไม่น้อยกว่าร้อยละ 60

2. ขีดจำกัดอัตเตอร์เบอร์ก ค่า Liquid Limit (LL) จะต้องไม่เกินร้อยละ 25 ค่า Plasticity Index (PI) จะต้องไม่เกินร้อยละ 6

3. ส่วนสึกหรอของวัสดุเม็ดหยาบโดยการทดสอบ Los Angeles Abrasion จะต้องไม่เกินร้อยละ 40

4. ค่า CBR ที่ใช้จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ที่ความหนาแน่นแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด ตามการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

5. ค่าของส่วนที่ไม่คงทนตามการทดลองหาความคงทน (Soundness) เป็นจำนวน 5 รอบต้องไม่เกินร้อยละ 9

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร ต้องไม่มากกว่าสองในสามของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลิเมตร

### 2.1.5 สรุปมาตรฐานโครงสร้างทางของกรมทางหลวง

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปมาตรฐานของวัสดุโครงสร้างทางของกรมทางหลวงได้ดังตารางที่ 2.3

**ตารางที่** 2.3 สรุปมาตรฐานโครงสร้างทางของกรมทางหลวง

| **ชั้นทาง** | Swelling | $\rho_d$ (kg/m$^3$) | Grain Size | LL | PI | LA. Abrasion | Lab Soaked CBR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ดินถมคันทาง | □ 4% | □ 1,440 | เล็กกว่า 50 มม. | - | - | - | ตามแบบ |
| ทรายถมคันทาง | - | - | เล็กกว่า 9.5 มม. และมีส่วนเล็กกว่า #200 □ 25% | NP | NP | - | □ 10% |
| รองพื้นทางวัสดุมวลรวม | - | - | ตารางที่ 2.1 | □ 35% | □ 11% | □ 60% | □ 25% |
| พื้นทางหินคลุก | - | - | ตารางที่ 2.2 | □ 25% | □ 6% | □ 40% | □ 80% |

## 2.2 หินผุ

หินผุ เกิดจากการผุและการแตกหักของหินชนิดต่างๆทั้ง หินอัคนี หินแปร และหินตะกอน โดยไม่ถูกพัดพาไปยังแหล่งอื่น การผุของหินแบ่งได้ 2 กระบวนการคือ การผุของหินทางฟิสิกส์ และการผุทำลายทางเคมี

### 2.2.1 การแบ่งชั้นของหินผุ

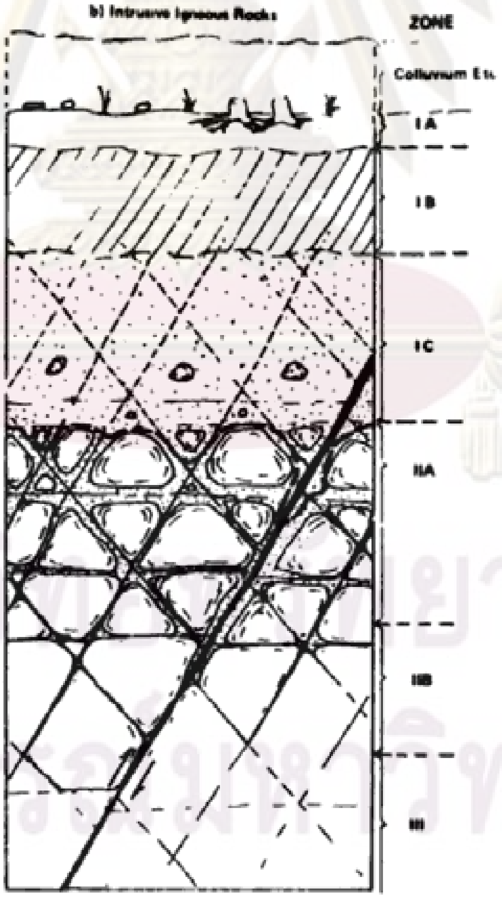
การผุของหินสามารถจำแนกออกเป็น 3 ชั้น ตามวิธีของ Deere และ Patton (1971) ดังรูปที่ 2.1 ได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**2.2.1.1 ชั้นดินผุพังในที่** (Residual Soil) เกิดจากการผุของหินซึ่งจะไม่ถูกพัดพาไป แต่จะคงอยู่ในที่เดิม หรือเกิดจากการที่อัตราการผุของหินมากกว่าอัตราการพัดพาของหินผุไปยังที่อื่น ประกอบด้วยชั้นย่อยคือ

1) ชั้น IA หรือชั้น A-horizon วัดจากพื้นผิวดินลึกลงไปตามวิธีการแบ่งชั้นดินทาง Pedology แร่และสารอินทรีย์ในชั้นนี้ได้ถูกชะล้างด้วยน้ำฝนให้ไหลซึมลงไปยังชั้น IB ต่อไป ฉะนั้น ลักษณะดินจึงเป็นเม็ดทรายมากและเป็นดินอินทรีย์ ที่เกิดจากการผุพังและ ย่อยสลายของสารอินทรีย์

2) ชั้น IB หรือชั้น B-horizon เป็นดินผุพังในที่ ที่ถูกชะล้างไหลซึมมาจากชั้น A-horizon ดินในชั้นนี้จึงมีสีคล้ำมาก และมีแร่ดินเหนียวมากโดยส่วนประกอบของสารละลายเดิถูกชะล้างออก ซึ่งจะพบการผุพังเปลี่ยนแปลงมากในชั้นนี้จนเกือบจะไม่แสดงโครงสร้างของหินเดิมและสภาพวัสดุเดิมเลย แร่ธาตุในที่มีอยู่มากในชั้นนี้ ได้แก่ ซิลิก้า อลูมิเนียม และเหล็ก ซึ่งมีประโยชน์ในด้านการประสานหรือไวต่อการแข็งตัวที่คืนตัวไม่ได้ และความชื้นยังเปลี่ยนแปรไปตามฤดูกาล จึงทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของชั้น B-horizon นี้ไม่สม่ำเสมอ




**รูปที่** 2.1 การแบ่งชั้นของหินผุ (Deere and Patton, 1971)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) ชั้น IC หรือชั้น C-horizon แสดงโครงสร้างของหินเดิมไว้ค่อนข้างชัดเจน ถึงแม้ว่าจะมีการผุพังทำลายกลายเป็นดินมากกว่าก็ตาม จึงมีโครงสร้างที่ยังประกอบด้วยรอยแยก (Joints) รอยเลื่อน (Faults) และแร่ธาตุที่ได้ผุพังไปก็ยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิมของโครงสร้างหินเดิม การผุพังทำลายในชั้นนี้ เช่นเฟลสปาร์เปลี่ยนไปเป็นแร่ดินเหนียว Kaolinite หรือแร่ดินเหนียวอื่นๆ ส่วนพวกไมก้าจะมีขนาดเล็กลงและถูกเปลี่ยนสภาพไป และแร่ธาตุอื่นๆส่วนใหญ่ที่อยู่ในหินเดิมจะผุแล้วเปลี่ยนแปลงไปจนหมดยกเว้นควอทซ์ พฤติกรรมของดินชั้นนี้ส่วนใหญ่คล้ายดิน Residual ชั้นบน โครงสร้างจะมีลักษณะของระนาบที่อ่อนแอ (Weak Plane) และไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity) วัสดุจะเป็น ทรายปนดินแป้งเสียส่วนใหญ่ ส่วนไมก้าจะมีมากและแผ่กระจายเป็นบริเวณกว้างหรือเป็นแนวยาว เนื่องจากปริมาณไมก้าที่มีอยู่มากในหินต้นกำเนิด ดิน Residual ในชั้น IC มีอีกชื่อหนึ่งว่า Saprolite ซึ่งหมายความถึงวัสดุคล้ายดินที่ยังคงรักษาสภาพโครงสร้างของหินแบบเดิมไว้ ในชั้นนี้ปริมาณของ Corestone น้อยกว่า 10% ซึ่งแตกต่างจากชั้นหินผุที่อยู่ลึกลงไปอีกโดย Corestone เป็นตัวอย่างหินที่ได้จากการเจาะสำรวจ มีการผุพังเล็กน้อยมาก หรืออาจไม่มีเลย Corestone มีชื่ออื่นเรียกว่า Lithorelicts และ Floaters ขนาดวัสดุเป็นSandy silt และ Silty sand สามารถรับแรงกดอัดได้ดี (Sowers, 1963)

2.2.1.2 **ชั้นหินผุ** (Weathered Rock) เป็นชั้นหินผุซึ่งผุพังน้อยกว่าชั้นดิน Residual มาก แบ่งย่อยออกเป็น 2 ชั้น คือ หินผุชั้นบนหรือชั้น IIA และหินผุชั้นล่างหรือชั้น IIB ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) หินผุชั้นบนหรือชั้น IIA เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้น Saprolite (C-horizon หรือดิน Residual ชั้น IC) กับชั้นหินผุชั้น IIB ซึ่งคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินในชั้นนี้มีความแปรผันไม่แน่นอน ลักษณะของวัสดุมีตั้งแต่เป็นดินจนถึงหิน (Rock-like Corestones) ปริมาณ Corestone มีตั้งแต่ 10% ถึง 95% ของปริมาณทั้งหมด และการผุพังจะเกิดขึ้นเร็วมากตามรอยแยก และรอยเลื่อนซึ่งไวต่อการผุมาก ลักษณะของเม็ดดินจะเป็นทรายขนาดกลาง ถึงทรายหยาบหรือเป็นทรายแป้ง และไมก้า โดยปกติดินชั้นนี้จะมีการซึมน้ำได้ดี เนื่องจากในชั้นนี้หินมีการผุที่แตกต่างกันมาก จึงทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมมีขอบเขตกว้างขวางมาก ส่งผลให้การแบ่งแยกชั้นดินกระทำได้ยาก

2) หินผุชั้นล่างหรือชั้น IIB มีหินผุบ้างบางส่วน สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงตามรอยต่อและสีเปลี่ยนไปบ้าง เฟลสปาร์และไมก้าได้เริ่มผุและเปลี่ยนแปรในชั้นนี้ เมื่อมีการผุพังเพิ่มขึ้นหินจะแตกตัวให้เล็กลงจากสภาพหินเดิมไปเป็นหินที่มีกำลังและความยืดหยุ่น (Modulus) ลดต่ำลง แต่ความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเม็ดหินผุบางอย่างมาเป็นแร่ใหม่ ส่วนประกอบตัวทำละลายในสารละลายมากขึ้น การ

เพิ่มรอยแยก (Joints) และรอยต่อขยายกว้างขึ้น เนื่องจากดินชั้นบนมีการผุพังมากขึ้น ทำให้ความเค้น (Stress) ที่กระทำลดลง

2.2.1.3 **ชั้นหินผุเล็กน้อยหรือไม่ผุเลย** (Relatively Unweathered, Fresh Bedrock) หรือชั้น III ในชั้นนี้แทบจะไม่มีหินผุพังเลย พวกเฟลสปาร์และไมก้ายังคงสภาพเดิม ตามรอยแยก มีรอยด่างบ้างเล็กน้อย หินดาน (Unweathered Bedrock) เป็นหินที่มีรอยแยก ซึ่งอัดกันแน่น ในทางวิศวกรรมชั้นหินผุในชั้น III นี้ถือว่าจะไม่ถูกกระทำด้วยหินเหลวร้อนจากส่วนลึกของใจกลางโลก และกระบวนการผุพังทำลายบนผิวโลก ไม่มีผลต่อการผุพังทำลายของหินในชั้นนี้

### 2.2.2 คุณสมบัติของหินผุบางชนิด

หินผุที่ได้มีการทดสอบที่ผ่านมา จะเป็นหินผุที่เกิดจากหินแกรนิตเป็นส่วนใหญ่ โดยหินแกรนิตผุมีลักษณะพิเศษ คือ เม็ดดินไม่มีเสถียรภาพเพียงพอภายใต้กรรมวิธีการผุพังทางฟิสิกส์และเคมี ทำให้เม็ดดินและแร่ธาตุต่างๆ ในหินแกรนิตผุเปลี่ยนแปลงไปตามกรรมวิธีนั้นๆ คุณสมบัติของหินแกรนิตผุจึงแปรผันไปตามสถานที่และตำแหน่ง

#### 2.2.2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินผุ

Matsuo และ Nishida (1968) กล่าวว่า คุณสมบัติทางวิศวกรรมของหินผุไม่สามารถที่จะนำมาจำแนกประเภทตามระบบทั่วไปได้ เช่น Unified Soil Classification หรือ AASHTO Classification เป็นต้น จึงได้เสนอวิธีการจำแนกประเภทโดย การหาค่าความถ่วงจำเพาะของหินผุซึ่งมีความสัมพันธ์ กับการเปลี่ยนสภาพของแร่เฟลสปาร์ ซึ่งจะแสดงถึงอัตราการผุพัง และหาปริมาณของสีแร่ในหินผุซึ่งมีความสัมพันธ์กับการแปรผันของปริมาณแร่ในหินผุซึ่งพบว่า

— ความถ่วงจำเพาะในหินผุมีช่วงการแปรผันมากกว่าดินทั่วไป เพราะค่าความถ่วงจำเพาะมากขึ้นเมื่อหินมีการผุพังมากขึ้น เมื่อเม็ดเฟลสปาร์ผุมากขึ้น อัตราส่วนช่องว่างจะเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

— ปริมาณสีแร่ดินเหนียว เนื่องจากส่วนประกอบของแร่ดินเหนียวแตกต่างกันไปในแต่ละสถานที่ ปริมาณสีของแร่ดินเหนียวยิ่งเข้มขึ้น แสดงว่า หินมีการผุพังมากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด และกำลังรับแรงอัดลดต่ำลง แต่ค่าการขยายตัว การหดตัว และค่าการอัดตัว (Compressibility) จะสูงขึ้น

Ruenkrairergsa และ Changsuwan (1978) พบว่าขนาดคละของเม็ดดินในหินแกรนิตผุ เป็นแบบขนาดคละที่ดี (Well – graded) ที่มีขนาดของเม็ดดินใหญ่สุดประมาณ 9 มม.ขนาดของเม็ดดินที่เล็กกว่าขนาดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 จะมีปริมาณตั้งแต่ 10 ถึง 50

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับอัตราการผุพังของหินแกรนิตในแต่ละสภาพอากาศและสถานที่ สำหรับหินผุที่อยู่ในชั้น Weathered Rock ซึ่งอยู่ลึกกว่าชั้นดิน Residual จะมีขนาดคละของเม็ดดินส่วนใหญ่เป็น Uniform-Graded

ค่า Atterberg Limits ของหินแกรนิตผุส่วนใหญ่มีค่า Plasticity Index ค่อนข้างต่ำหรือเป็น Non-Plastic แม้ว่าดินเม็ดละเอียดที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 จะมีปริมาณค่อนข้างสูง แต่ค่า Plasticity ของหินแกรนิตผุไม่ได้สูงขึ้นเลย เพราะดินเหล่านี้ได้มาจากการผุของแร่เฟลสปาร์เป็นส่วนใหญ่ ส่วนค่าความพรุนของหินแกรนิตผุจะแปรผันไปตามความลึก กล่าวคือ ความพรุนของหินแกรนิตผุยิ่งลดลง เมื่อความลึกเพิ่มขึ้น

### 2.2.2.2 คุณสมบัติทางเคมีของหินผุ

Ruenkrairergsa และ Changsuwan (1978) กล่าวว่า การหาความแตกต่างของคุณสมบัติทางเคมีระหว่างส่วนผิวและส่วนภายในของเม็ดเฟลสปาร์ ในตัวอย่างเม็ดและฝุ่น โดยใช้ตัวอย่างหนัก 1.5 กรัมผสมกับน้ำ 50 ซม.$^3$ ที่ปราศจากก๊าซคาร์บอนไดอ๊อกไซด์และประจุไฟฟ้าอื่นๆ หลังจากคนประมาณ 1 ชั่วโมง จึงใช้ Electrode-Type pH meter วัดค่า pH ของสารละลาย ผลที่ได้แสดงค่า pH ของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่าถ่วงจำเพาะของเฟลสปาร์เพิ่มขึ้น

### 2.2.2.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของหินผุ

Sower (1963) ได้บันทึกคุณสมบัติทางวิศวกรรมของสภาพความซึมได้ (Permeability) การยุบตัวและการอัดตัว (Consolidation and Compressibility) และการบดอัด (Compaction) โดยคุณสมบัติเหล่านี้แสดงถึงอัตราการผุพังและโครงสร้างของเม็ดดินของ Residual Soils ซึ่งคล้ายกับดินเหนียวชนิดอนินทรีย์ ที่มีสภาวะเนื้อดินเดียวกันตลอด มีค่า Plasticity Index ต่ำ ไม่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพ (Insensitivity) ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ***สภาพความซึมได้*** (Permeability)

จากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ ของตัวอย่างหินแกรนิตผุที่คงสภาพ (Undisturbed) พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนช่องว่างเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่าสภาพความซึมได้เปลี่ยนแปลงไปมาก

สภาพความซึมได้ของหินผุในแต่ละแห่งย่อมแตกต่างกันไป เช่นในกรณีที่มีแนวหินสดหรือหินผุที่ได้ผุจนกลายเป็นดินเหนียวแทรกตัวขวางอยู่ทำให้ค่าความซึมได้ลดลง ในทางตรงกันข้ามค่าความซึมได้จะสูงขึ้นมาก เมื่อเกิดการซึมผ่านรอยแยก รอยแตก Fissures และ Shear Zones ซึ่งเกิดเป็นปัญหาในการก่อสร้างฐานรากของเขื่อนหรือดินที่ขุดลึกมากๆ อาจทำให้หินแกรนิตผุเหล่านี้พังทลายลงมาได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับตัวอย่างหินแกรนิตผุที่คงสภาพหรือที่สภาพเปลี่ยนแปลงและสภาพความอิ่มตัวมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 หินแกรนิตผุทั้งสองกรณีนี้จะแสดงค่าความซึมคงที่ตลอดไม่เปลี่ยนแปลง

2) **การยุบตัวและการอัดตัว** (Consolidation and Compressibility)

Lumb (1962) บันทึกว่า การอัดตัวของหินแกรนิตผุมีน้อยมาก ค่าสัมประสิทธิ์ของการยุบตัวของดิน Residual ที่คงสภาพไม่แตกต่างไปจากดิน Residual ที่เปลี่ยนสภาพ ค่าการยุบตัวของหินแกรนิตผุไม่เปลี่ยนแปลงมากเมื่อมีสภาพความอิ่มตัวมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0

3) **การหดตัวและการขยายตัว** (Shrinkage and Expansion)

หินผุประเภท Silty sands และ Sandy silts ที่มีแร่ควอทซ์และไมก้าเป็นส่วนใหญ่ที่คงสภาพเดิมหรือถูกบดอัดแล้วจะหดตัวเมื่อแห้ง และขยายตัวเมื่อเปียกชื้น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเหล่านี้คล้ายกับดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูง ทั้งๆที่ดินประเภทนี้มีสภาพพลาสติกต่ำมาก

การหดตัวเป็นกระบวนการทางกลศาสตร์ ซึ่งความดันน้ำในช่องว่างของดินถูกดึด้วยแรง Capillary tension หินผุมีคุณสมบัติต่างจากกับดินเหนียว คือ หินผุจะขยายตัวแตกแยกออกอย่างเห็นได้ชัด โดยที่เม็ดดินที่เป็นแร่ควอทซ์และไมก้าจะหดตัวลง เมื่อถูกทำให้มีปริมาณความชื้นน้อยกว่า Shrinkage limit เมื่อโครงสร้างของเม็ดแร่ควอทซ์และไมก้าขยายตัวกลับสู่ปริมาตรเดิม เม็ดดินต่างๆจะแตกแยกออกจากกัน เกิดเป็น ดินหลวม และร่วน

การขยายตัวของดินเมื่อเปียกชื้น มักเกิดในดินที่มีพลาสติกต่ำ ซึ่ง Capillary tension ลดลงยอมให้ควอทซ์และไมก้าขยายตัว ผิวของดินที่ไม่มีน้ำหนักกระทำจะค่อยๆแตตัวอย่างช้าๆ และเกิดการขยายตัวไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำลายรอยประสานของแร่ในดินอย่างเห็นได้ชัด

4) **การบดทับ** (Compaction)

ดิน Residual และ หินผุเป็นแหล่งวัสดุที่อาจใช้สำหรับการก่อสร้างในงานทางเมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพที่ถูกวิธี ทั้งนี้เพราะวัสดุส่วนใหญ่เป็นดินเหนียว Micaceous silts และ Micaceous silty sands ซึ่งบดอัดได้ยาก ส่วนดินในชั้น Partially Weathered Zone เป็นวัสดุสามารถนำมาใช้สำหรับการก่อสร้างแต่มักจะขุด และทำให้แตกลำบาก และมี Gradation ที่ผิดปกติมาก

ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ของหินผุบดอัดแล้วในชั้น Weathered rock และชั้น Partially weathered rockโดยใช้วิธีทดลองแบบ Standard Compaction มีค่าความหนาแน่นแห้งอยู่ระหว่าง 1.25 ถึง 2.08 กรัมต่อซม.[3] ส่วนการทดสอบแบบ Modified Compaction กับตัวอย่างหินแกรนิตผุพบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ระหว่าง 1.3 ถึง 2.0 กรัมต่อซม.[3] สำหรับตัวอย่างหินแกรนิตผุเม็ดละเอียดถึงเม็ดหยาบตามลำดับ โดยมีปริมาณ

ความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Contents) อยู่ระหว่าง 8% ถึง 18% และค่า California Bearing Ratio (CBR) แปรผันจาก 10% ถึง 80% ซึ่งแสดงถึงการแปรผันของส่วนประกอบของดินและอัตราการผุพังทลายของแต่ละสถานที่และแต่ละชั้นของหินผุ และการที่หินผุมีแร่ไมก้ามากก็จะทำให้ความหนาแน่นต่ำไปด้วย

5) **กำลังต้านทานแรงเฉือน** (Shear strength)

กำลังต้านทานแรงเฉือนของตัวอย่างหินผุ สามารถหาได้จากการทดสอบหลายประเภท เช่น Unconfined compression, Direct shear, Triaxial shear และ Rotation vane shear จากผลการทดสอบแสดงว่า ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่า Confining pressure เพิ่มขึ้น ระนาบที่เกิดการวิบัติในบางครั้งไม่สามารถทำนายได้ก่อนการทดสอบว่า จะเกิดขึ้นในระนาบใด ผลการทดสอบมักแสดงการวิบัติเกิดขึ้นที่ระนาบอ่อนตัวเสมอ ส่วนการทดสอบที่สามารถกำหนดระนาบวิบัติได้ก่อน คือการทดสอบแบบ Direct shear ในบางครั้งก็ให้ผลของค่าต้านทานแรงเฉือนที่สูงเกินไป วิธีการทดสอบที่ให้ค่ากำลังต้านท้านแรงเฉือนของดินเป็นผลที่น่าพอใจคือการทดสอบโดยใช้ Triaxial shear test (Sower, 1963)

Lumb (1962) เสนอว่า ค่าแรงยึดเหนี่ยวของหินแกรนิตผุ ($C_d$) จะขึ้นอยู่กับขนาดคละของดินและสภาพความอิ่มตัวของดินส่วนค่ามุมเสียดทานภายในของหินแกรนิตผุขึ้นอยู่กับขนาดคละของดิน และอัตราส่วนช่องว่างภายในเม็ดดิน โดยสรุปผลจากการทดสอบ Drained traxial shear สามารถสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุหินผุกับคุณสมบัติ ดังสมการที่ 2.1

$$\tau = C_d + \tan\phi_d \qquad (2.1)$$

เมื่อ

$\tau$ = กำลังรับแรงเฉือนของหินแกรนิตผุ

$C_d$ = ค่าแรงยึดเหนี่ยวที่แท้จริงซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดคละของเม็ดดินและสภาพความอิ่มตัวของดิน

$\phi_d$ = ค่ามุมเสียดทานภายในที่แท้จริงซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดคละของเม็ดดินและอัตราส่วนช่องว่างของเม็ดดิน

ค่าแรงยึดเหนี่ยวของหินแกรนิตผุเม็ดหยาบอาจมีค่าต่ำลงถึง 1 ตัน/ม.$^2$ ที่สภาพความอิ่มตัวเท่ากับ 50% ส่วนหินแกรนิตผุที่มีขนาดตั้งแต่ขนาดเม็ดปานกลางถึงเม็ดละเอียดนั้นค่าแรงยึดเหนี่ยวของดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อดินมีขนาดเม็ดลดลง และยังแปรผันตามสภาพความอิ่มตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยเมื่อสภาพความอิ่มตัวเพิ่มมากขึ้น แรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดินลดลงจนถึงศูนย์ที่สภาพความอิ่มตัวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 100%

โดยทั่วไปพื้นผิวเปลือกโลกของหินแกรนิตผุมักจะมีชั้นออกไซด์ของแร่โลหะที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในบรรยากาศกับแร่ธาตุในดิน โดยปกคลุมหินแกรนิตผุอยู่ ซึ่งมีผลเด่นชัดต่อการเพิ่มเสถียรภาพของชั้นหินแกรนิตผุกล่าวคือ ช่วยลดการซึมของน้ำฝนลงไปในชั้นหินแกรนิตผุ แต่ในฤดูฝนตกชุก หินแกรนิตผุก็จะอยู่ในสภาพความอิ่มตัวโดยสมบูรณ์ ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดินจะลดลงเป็นศูนย์ในที่สุดจะเหลือแต่ค่ามุมเสียดทานภายในของหินแกรนิตผุเอง จะอาจทำให้เกิดการพังแบบเลื่อนไถลทันที นอกจากนี้แล้วเสถียรภาพของหินแกรนิตผุยังขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรณีวิทยาของโครงสร้างเดิม เช่น รอยแยก รอยเลื่อน รอยคดโค้ง และรอยผิดวิสัย เป็นต้น โดยรอยเหล่านี้จะเป็นทางที่น้ำฝนจะซึมผ่านได้ง่ายทำให้เกิดระนาบที่อ่อนแอ ซึ่งชั้นหินแกรนิตผุส่วนมากมักจะพังแบบเลื่อนไถลตามระนาบเหล่านี้ ส่วนการพังแบบเลื่อนไถลตามส่วนโค้งของวงกลม จะเกิดขึ้นกับกรณีที่ชั้นหินแกรนิตผุมีความหนามากพอที่รอยเลื่อนไถลยังคงเกิดในชั้นดินนี้

## 2.3 วิธีการปรับปรุงคุณภาพวัสดุในปัจจุบัน

การปรับปรุงคุณภาพดินแบ่งได้เป็น 4 วิธีคือ

1. การปรับปรุงดินทางกลศาสตร์
2. การปรับปรุงดินด้วยปูนขาว
3. การปรับปรุงดินด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์
4. การปรับปรุงดินด้วยวัสดุบิทูมินัส

### 2.3.1 **การปรับปรุงดินทางกลศาสตร์** (Mechanical Stabilization) (ดิเรก ลาวัณศิริ, 2540)

เป็นการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนัก โดยการเพิ่มแรงเสียดทานภายในของเม็ดดินและเพิ่มการยึดเหนี่ยว เพื่อให้สามารถที่จะจับตัวกันรักษาสภาพนั้นไว้นานที่สุด การปรับปรุงด้วยวิธีนี้มีหลายแนวทางประกอบกัน ซึ่งแบ่งได้ 2 กลุ่ม

1. การปรับปรุงโดยการกระทำกับมวลดินโดยตรง ได้แก่ การบดอัดอันจะทำให้ดินยุบตัวลง จนมีช่องว่างน้อยที่สุดและ การใช้ไฟฟ้าหรือความร้อนช่วย จนทำให้ดินมีเสถียรภาพที่สูงขึ้น

2. การปรับปรุงดินโดยการเพิ่มวัสดุใหม่หรือแยกวัสดุเก่าออกมาบางส่วน ทั้งนี้เพื่อเน้นถึงการจัดขนาดคละของวัสดุให้เหมาะสมจนเกิดความหนาแน่นมากที่สุด ตัวอย่างหนึ่งของ

การปรับปรุงดินทางกลศาสตร์คือ Soil Aggregate Stabilization ซึ่งเป็นการปรับขนาดคละของดิน ซึ่งมวลดินที่ปรับปรุงด้วย Soil Aggregate เปรียบเหมือนกับคอนกรีตซีเมนต์ โดยมวลหยาบมีบทบาทเหมือนกับ Aggregate ในคอนกรีต ขณะที่มวลละเอียดเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ โดยทั่วไปจุดประสงค์ของการเปลี่ยนขนาดคละ เพื่อให้ปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาดมีสัดส่วนที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้มวลเนื้อเดียวกันและแน่น การปรับปรุงดินด้วยวิธีนี้มักจะใช้กับชั้นรองพื้นทาง (Subbase) สำหรับโครงสร้างที่รองรับปริมาณการจราจรสูง และใช้ทำเป็นชั้นทาง (Base) และผิวทางจราจรสำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ

### 2.3.2 การปรับปรุงดินด้วยปูนขาว (Lime Stabilization)

ปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้างที่เก่าแก่ที่สุดที่ผลิตขึ้นโดยมนุษย์ และเป็นที่รู้กันว่าได้มีการนำดินเหนียวผสมกับปูนขาวมาใช้ในงานก่อสร้างมานานกว่า 5,000 ปี ชาวโรมันได้ผลิตคอนกรีตเพื่อใช้สร้างโครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง เช่น Colosseum และ Pantheon โดยการผสมปูนขาวกับขี้เถ้าที่ได้มาจากภูเขาไฟ ซึ่งมาจากเมือง Pozzuoli ประเทศอิตาลี จึงเรียกส่วนผสมนี้ว่าพอสโซลาน (Pozzalan)

การใส่สารเคมีลงในดิน เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน ส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์ คือ การควบคุมการบวมตัวหรือหดตัวของดิน กำลังรับน้ำหนัก การควบคุมการซึมของน้ำ และการปรับปรุงความทนทานต่อการกัดกร่อนของดิน และการควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน

การใช้ปูนขาวในการปรับปรุงมีหลายเหตุผล เช่น ช่วยแก้ไขดิน Subgrade ที่อ่อน ปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลหยาบ ปรับปรุงกำลังรับแรงและความทนทานของดินเม็ดละเอียด ในส่วนของการทำถนนแล้ว มักใช้ปูนขาวในการปรับปรุงดินเพื่อทำเป็น Subgrade, Subbase และ Base โดยจะไม่ใช่ทำเป็นผิวจราจรเพราะไม่สามารถต้านทานการขัดสีของยวดยานจราจรได้

ชนิดของปูนขาวที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินมีดังนี้

1. Hydrated Lime แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ Dolomitic Monohydrated Lime ($Ca(OH)_2 \cdot MgO$) และ Calcitic Hydrated Lime ($Ca(OH)_2$) โดย Dolomitic Monohydrated Lime จะให้กำลังรับแรงที่มากกว่า Calcitic Hydrated Lime

2. Quick Lime ($CaO$) จะให้กำลังรับแรงมากกว่า Hydrated Lime เนื่องจาก Quick Lime มีจำนวนของ $Ca^{2+}$ มากกว่าในน้ำหนักที่เท่ากัน ในงานปรับปรุงดินบางกรณีอาจต้องใช้ปูนขาว Quick Lime เพราะสามารถปรับปรุงดินที่เปียกให้มีกำลังเร็วกว่าปูนขาวชนิดอื่นๆ ทำให้ดินแห้งได้เร็วขึ้น แต่ใช้ปริมาณปูนขาวมากกว่าประเภทอื่นๆด้วย

การเลือกใช้ปูนขาวที่มีความบริสุทธิ์และละเอียด จะช่วยในการปรับปรุงดินให้ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยแก้ไขสภาพพลาสติก ซึ่งการเลือกใช้ดินในการปรับปรุงด้วยวิธีนี้ จะต้องคำนึงถึงประเภท

ของดิน ขนาดคละของดิน และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น ในการใช้ปูนขาวจะแก้ไขคุณสมบัติของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดสภาพพลาสติก ทั้งยังเพิ่มความสามารถในการทำงาน เพิ่มกำลัง และลดระดับการบวมได้อีกด้วย

ข้อแนะนำทั่วไปสำหรับดินที่เหมาะสมในการปรับปรุงด้วยปูนขาว จะต้องเป็นดินที่มีค่า pH สูงกว่า 7 แต่สามารถที่จะปรับปรุงดินที่มีความเป็นกรดมากสุดที่ pH 5.7 และเพื่อให้เกิดประสิทธิผล สารอินทรีย์ที่มีในดินจะต้องมีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 1% และต้องไม่มีสารซัลเฟตปะปน ปูนขาวจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับดินที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน เกิน 7% ขึ้นไป

National Lime Association (NLA) (2005) เสนอว่าค่าของ PI ของดินที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงควรมีค่ามากกว่า 12 ขึ้นไป ดังนั้นดินที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงด้วยปูนขาวได้แก่ ดินประเภท Clayey Gravel, Silty Clay และ Clay โดยเมื่อทำการแบ่งประเภทตามระบบ Unified Soil ก็คือ GC, GC-GM, SC, SC-SM, CL, ML, CH, MH และเมื่อแบ่งประเภทตามระบบ AASHTO ดินที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงด้วยปูนขาว ก็คือ A 2-5, A 2-6, A 2-7, A 5, A 6 และ A 7

จากการวิจัยของสถาบัน U.S. Air Force (2004) แนะนำให้ใช้ปูนขาวประมาณ 2-5% สำหรับดินที่มีขนาดของดินที่ร่อนผ่านตะแกรงหมายเลข 200 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50% ส่วนในดินที่มีปริมาณร่อนผ่านตะแกรงหมายเลข 200 มากกว่า 50% จะใช้ปูนขาวมากขึ้นถึง 3-7% ตารางที่ 2.4 แสดงถึงการหาปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมสำหรับดินบางประเภท

**ตารางที่ 2.4** ปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการปรับปรุงดินบางชนิด (U.S. Air Force, 2004)

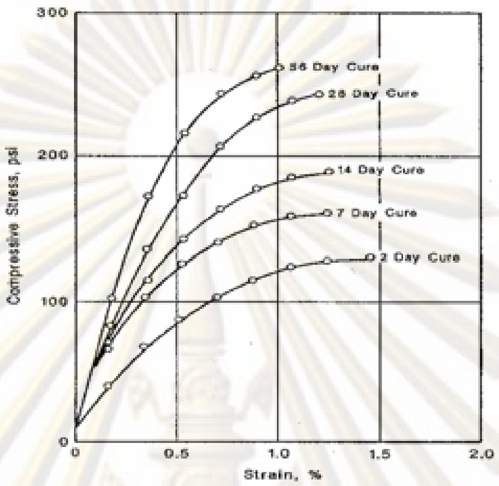
| **ชนิดของดิน** | **ปริมาณของปูนขาวที่ใช้ในการปรับปรุงโดยน้ำหนัก** | |
|---|---|---|
| | Hydrated Lime | Quicklime |
| Clayey gravels (GC, GM-GC) (A-2-6, A-2-7) | 2 - 4 | 2 - 3 |
| Silty Clays (CL) (A-6, A-7-6) | 5 - 10 | 3 - 8 |
| Clay (CH) (A-6, A-7-6) | 3 – 8 | 3 - 6 |

โดยทั่วๆไป การปรับปรุงดินด้วยวิธีนี้ทำให้ Plasticity Index ลดลง เนื่องจากเกิดการลดลงของ Liquid Limit และการเพิ่มขึ้นของค่า Plastic Limit

ลักษณะการบดอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยวิธีนี้ มีข้อสำคัญอยู่ 2 ประการ

1. ค่าร้อยละในการบดอัด
2. ค่าความหนาแน่นแห้ง ที่ใช้ในการควบคุมการก่อสร้าง

การปรับปรุงดินด้วยปูนขาวที่มีการบ่มด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกันจะมีผลต่อค่าของความเครียด (Strain) และ ความเค้น (Compressive Stress) ของดิน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างของดินที่ผสมปูนขาว 4 เปอร์เซ็นต์จะพบว่า เมื่อทำการบ่มนานขึ้นจะทำให้ค่าความเค้นสูงขึ้น และ ความเครียดที่เกิดขึ้นที่กำลังรับน้ำหนักสูงสุดลดลง




**รูปที่** 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Compressive Stress) และ ความเครียด (Strain) ของดินผสมปูนขาว ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆกัน (Little, 1995)

### 2.3.3 **การปรับปรุงดินด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์** (Cement Stabilization)

ในปัจจุบันการปรับปรุงดินโดยใช้ซีเมนต์เป็นวิธีที่สำคัญโดยปัจจัยที่ช่วยทำให้การใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นที่นิยมเกือบทุกประเทศในโลก มีดังนี้

1. ซีเมนต์สามารถหาได้ง่ายในเกือบทุกประเทศ
2. ซีเมนต์มีการผลิตจำนวนมาก ทำให้ราคาถูก
3. การใช้ซีเมนต์สามารถดูแลและควบคุมได้ง่ายกว่าการปรับปรุงด้วยวิธีอื่น
4. ข้อมูลในการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์มีมากกว่าการปรับปรุงด้วยวิธีอื่น
5. ดินเกือบทุกประเภทสามารถปรับปรุงด้วยวิธีนี้ได้ ถ้ามีการใช้ซีเมนต์ น้ำ การบดอัดและการบ่มที่เหมาะสม

#### 2.3.3.1 **ประเภทของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์**

รูปแบบง่ายๆ ของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มักจะประกอบด้วย ดิน ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และน้ำ ดินที่ปรับปรุงด้วยวิธีนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบด้วยกัน ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุนั้น นับเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องสามารถจำแนกและนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้ง 3 วิธีนี้ดังต่อไปนี้

1) Soil - Cement

การปรับปรุงด้วยวิธีนี้จะต้องมีปริมาณซีเมนต์ที่เพียงพอที่จะไปทำให้ดินแข็งและความชื้นต้องมีปริมาณที่เหมาะสมในการทำการบดอัดและเกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์ Soil – Cement มักจะถูกนำไปใช้ทำเป็นชั้นพื้นทางในบริเวณที่จอดรถ ถนน ทางวิ่งเครื่องบิน และฐานรากของสิ่งก่อสร้างใหญ่ โดยไม่สามารถใช้ทำเป็นผิวทางได้เนื่องจากมีความต้านทานต่อการขัดสีน้อย จึงต้องมีวัสดุอื่นทับหน้าแทนเพื่อป้องกันการขัดสีของยวดยาน เช่น Pavement Concrete หรือผิวทางแอสฟัลต์

2) Cement – Modified Soil

ดินบางประเภทเมื่อทำการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ อาจจะไม่สามารถประหยัดได้เช่นดินเหนียวซึ่งต้องใช้ ปริมาณซีเมนต์ในการปรับปรุงสูง ดังนั้น เพื่อทำให้เกิดการประหยัด จึงมักเติมซีเมนต์ในปริมาณที่เพียงพอที่จะทำให้ได้คุณสมบัติของดินที่จะทำเป็นชั้นรองพื้นทาง และเช่นเดียวกันกับกรณีที่ ขนาดคละของวัสดุมีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐาน เช่นมีสภาพพลาสติกสูง แลค่ารับแรงกดต่ำ ก็สามารถใช้ทำเป็นวัสดุก่อสร้างถนนได้ เมื่อมีการเติมซีเมนต์พอสมควรในกาปรับปรุงคุณสมบัติ

จากตัวอย่างข้างต้น ปริมาณซีเมนต์ที่เติมเข้าไป ไม่เพียงพอที่จะทำให้ดินแข็งพอที่จะเป็น Soil-Cement แต่ซีเมนต์ที่เพิ่มเข้าไปมีจุดประสงค์เพื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน โดยทั่วไปดินที่ถูกเลือกใช้ในการปรับปรุงจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงและมีกาเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้ง่าย เพราะว่าดินพวกนี้นำไปใช้งานได้ต่ำ และแปรเปลี่ยนสภาพพลาสติกไตามสภาพอากาศ

3) Plastic Soil – Cement

Plastic Soil – Cement มีลักษณะคล้ายกับ Soil – Cement ตรงที่มีความสามารถในการรับความทนทานและความเสถียรภาพตามเกณฑ์กำหนดเหมือนกัน แต่แตกต่างกันตรงที่ Soil – Cement ต้องใช้ความชื้นที่เพียงพอต่อการบดอัดและการเกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์ โดยที่น้ำที่ใช้ใ Plastic Soil – Cement จะต้องมีปริมาณมากกว่าเพื่อที่จะสามารถใช้เทลงในแบบหล่อสิ่งก่อสร้าง Plastic Soil – Cement มักจะนำไปใช้ทำวัสดุกันการกัดกร่อนในเส้นทางที่ชัน ทำ Lining คลอง เขื่อน เป็นต้น โดยทั่วไป Plastic Soil – Cement จะต้องการซีเมนต์มากกว่า Soil – Cement ประมาณ 4% เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ไม่แตกต่างกัน

### 2.3.3.2 **ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์**

ในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยซีเมนต์ พบว่า มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์ เช่น ชนิดของดิน ปริมาณและชนิดของซีเมนต์ ปริมาณความชื้น การผสมและบดอัด สภาวะและระยะเวลาการบ่ม และการใช้สารเคมีเพิ่มเติม เป็นต้นโดยปัจจัยเหล่านี้จะได้กล่าวในรายละเอียด ดังต่อไปนี้

**1) ชนิดของดิน**

ชนิดของดินเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ดินบางชนิดอาจจะต้องใช้ปริมาณซีเมนต์มากกว่าปกติ เช่น ดินที่มีปริมาณดินเหนียวมาก ดังนั้นในการปรับปรุงดินประเภทนี้ต้องใช้วิธีการปรับปรุงด้วยวิธีอย่างอื่นแทน

Portland Cement Association (1970) ได้มีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับคุณสมบัติของดินที่จะปรับปรุงด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จะต้องมีขนาดคละ ดังตารางที่ 2.5

**ตารางที่ 2.5** ขนาดคละของดินที่จะปรับปรุงด้วยวิธี Plastic Soil – Cement (Portland Cement Association, 1970)

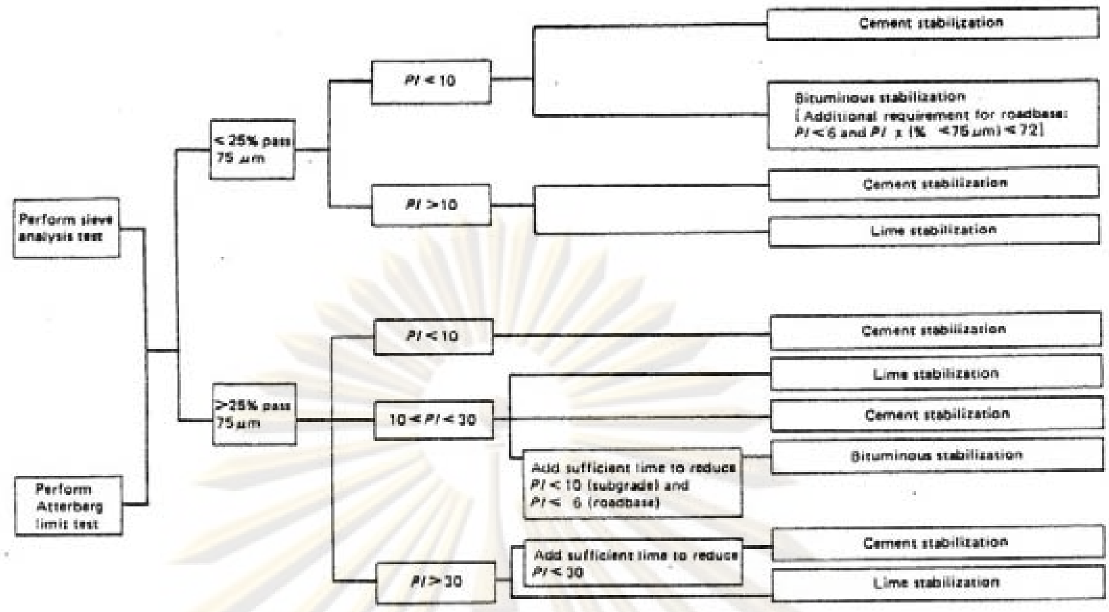
| ขนาดของตะแกรงร่อน | เปอร์เซ็นต์ผ่าน |
|---|---|
| < 4.75 mm (sieve no. 4) | น้อยที่สุด 55% |
| 2 mm (sieve no. 10) | น้อยที่สุด 35% |
| 0.075 – 2 mm (sieve no.200 – sieve no. 10) | น้อยที่สุด 25% |

U.S. Air Force (2004) ได้มีการเสนอแนะการปรับปรุงดินด้วยวิธีต่างๆที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.3 และได้แนะนำว่าค่าแนะนำสำหรับวัสดุที่จะทำการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ควรมีค่า PI < 30 เปอร์เซ็นต์ สำหรับดินทราย และ PI < 20 เปอร์เซ็นต์ และ LL < 40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับดินเม็ดละเอียด นอกจากนี้ค่า PI ของดินที่ทำการปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะต้องมีค่าไม่เกินค่าที่แนะนำในสมการที่ 2.2

$$PI \leq 20 + (50 - \%\text{material passing } \#200)/4 \qquad (2.2)$$

U.S. Air Force (2004) แนะนำว่าดินที่เหมาะสมในการปรับปรุงด้วยวิธีนี้จะต้องผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม. น้อยกว่า 35 เปอร์เซ็นต์ และ PI น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเป็นดินประเภท A-2 และ A-3 ภายใต้การจัดประเภทแบบ AASHTO ที่สามารถปรับปรุงด้วยซีเมนต์ดีที่สุดและยังได้มีการเสนอแนะว่า จำนวนซีเมนต์โดยเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักในดินควรใช้ 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับวัสดุเม็ดหยาบ 21 เปอร์เซ็นต์ สำหรับวัสดุทรายแป้ง และ 20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับดินเหนียวเพื่อพิจารณาถึงช่วงของกำลังรับแรงอัดสำหรับดินซีเมนต์ของดินเหนียวและพบว่า มีค่าน้อยกว่าดินประเภท Silty Soil และ Gravelly Soil มาก ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่** 2.3 แนวทางการเลือกวิธีปรับปรุงดินตามหลักเกณฑ์ U.S. Air Force (U.S. Air Force, 2004)

**ตารางที่ 2.6** ค่ากำลังแรงอัดของดินซีเมนต์ที่อายุ 7 วันและ 28 วัน (Portland Cement Association, 1970)

| **ชนิดของดิน** | **ค่ากำลังรับแรงอัด (psi)** | |
|---|---|---|
| | **ที่ 7 วัน** | **ที่ 28 วัน** |
| Sandy and gravelly soil:<br>AASHTO groups A-1, A-2, A-3<br>Unifies groups GW, GC, GP, GF, SW, SC, SP, SF | 300-600 | 400-1000 |
| Silty soils :<br>AASHTO groups A-4, A-5<br>Unifies groups ML, CL | 250-500 | 300-900 |
| ชนิดของดิน | ค่ากำลังรับแรงอัด (psi) | |
| | ที่ 7 วัน | ที่ 28 วัน |
| Clayed soils :<br>AASHTO groups A-6, A-7<br>Unifies groups MH, CH | 200-400 | 250-600 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณของดินเหนียวเป็นปัญหาในการผสมและการบดอัดดินซึ่งดินเหนียวเมื่อเปียกแล้วมีสภาพพลาสติก จะทำให้เกิดความยุ่งยากมากในการผสมและทำให้เสียค่าใช้จ่ายมาก เพราะต้องใช้ปริมาณซีเมนต์เป็นจำนวนมาก ในการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ จะไม่ค่อยมีประสิทธิภาพสำหรับ Clay และ Silty Soil ประเภทA-6, A-7 (CL, MH, CH) ที่มีสารอินทรีย์ และต้องมีการเปลี่ยนวิธีในการปรับปรุง

จากการค้นคว้าของ Portland Cement Association (1970) พบว่าดินที่จะทำการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ไม่ควรมีปริมาณซัลเฟตเกิน 1 เปอร์เซ็นต์ และน้ำที่ใช้ในการผสม ต้องมีซัลเฟไม่เกิน 0.2 เปอร์เซ็นต์ ค่า pH ของดินที่มีค่าต่ำกว่า 12 จะทำให้กำลังรับแรงของดินลดลง

ในการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ จะต้องมีการกำหนดขอบเขตความลึกของชั้นดินในการทำการปรับปรุง เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ ถ้าชั้นดินลึกกว่า 1.5 ม. สารอินทรีย์จะมีจำนวนมากขึ้นการที่มีจำนวนสารอินทรีย์มากกว่าที่ระบุไว้ จะทำให้ไปขัดขวางกระบวนการแข็งตัวของซีเมนต์ซึ่งในการตรวจสอบสามารถทำได้ง่ายโดยนำดินผสมกับซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์ และน้ำให้เปียกจากนั้นหาค่า pH หลังจากผสมน้ำ 1 ชั่วโมง ถ้าค่า pH น้อยกว่า 12.1 ดินชนิดนี้ไม่เหมาะสมที่จะปรับปรุงด้วยวิธีนี้จึงต้องพิจารณาอีกสิ่งหนึ่งที่มีอยู่ในดิน คือ สารแคลเซียมซัลเฟต จากการวิจัยพบว่า ถ้าดินที่มีสารซัลเฟตมากกว่า 0.25 เปอร์เซ็นต์ในการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์นี้จะไม่ช่วยให้ประหยัดได้ ซึ่งทั้งนี้ปริมาณซัลเฟตในดินจะเป็นตัวบ่งชี้ เพราะซัลเฟตเมื่อรวมกับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตในซีเมนต์ จะทำให้เกิดสารที่ชื่อว่า แคลเซียมซัลโปอลูมิเนต (Calcium Sulpho Aluminate) ซึ่งจะทำให้ Soil – Cement เกิดการแตกได้

**2) ปริมาณและชนิดของซีเมนต์**

ซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงโดยทั่วๆไป จะเป็นซีเมนต์ปอร์แลนด์ ประเภทที่ 1 แต่ถ้าต้องการให้กำลังรับน้ำหนักเร็วขึ้นอาจจะต้องใช้ซีเมนต์ประเภทแข็งตัวเร็ว หรือถ้าดินมีสารซัลเฟตอยู่ด้วย อาจต้องใช้ซีเมนต์ที่ต้านทานซัลเฟต ในตารางที่ 2.7 และ 2.8 จะเป็นการสรุปปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้จากขนาดคละของดิน และจากค่าความหนาแน่นของดินประเภท Sandy Soil และ Clayey Soil ตามลำดับ

**3) ปริมาณความชื้น**

น้ำที่ใช้การปรับปรุงจะต้องมีการคำนึงเป็นพิเศษด้วยเพราะน้ำจะไปทาปฏิกิริยากับซีเมนตซึ่งมีผลต่อความยากง่ายในการบดอัด คุณสมบัติของน้ำที่ใช้ต้องสะอาด และไม่มีการปนเปื้อนจากสารที่เป็นอันตราย เช่น กรดหรือสารอินทรีย์ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของน้ำที่จะใช้ นอกจากนี้หากไม่พิจารณาถึงความชื้นในดินอาจส่งผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาของซีเมนต์ หากดินมีความชื้นสูงจะทำให้มีน้ำมากเกินไปในการทำปฏิกิริยา กัซีเมนต์ ส่วนถ้าดินมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี น้ำที่ใช้ต้องมีจานำวนลดลงเพื่อทาให้ซีเมน

ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ และสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่ต้องการ ทั้งนี้ปริมาณความชื้นในส่วนผสมจะมีผลกระทบอย่างมากต่อกำลังรับแรงและความหนาแน่น

**ตารางที่** 2.7 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ปรับปรุงดินตามขนาดของดิน Sandy Soils (Portland Cement Association, 1970)

| มวลวัสดุที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 (%) | มวลวัสดุขนาดเล็กกว่า 0.05 มม. (%) | สัดส่วนปริมาณซีเมนต์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความหนาแน่นสูงสุด (ปอนด์ต่อลูกบากศ์ฟุต) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 105 – 109 | 110-114 | 115-119 | 120-124 | 125-129 | 130 หรือมากกว่า |
| 0 – 14 | 0-18 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 |
| | 20-39 | 9 | 8 | 7 | 7 | 5 | 5 |
| | 40-50 | 11 | 10 | 9 | 8 | 6 | 5 |
| 15 – 29 | 0-18 | 10 | 9 | 8 | 6 | 5 | 5 |
| | 20-39 | 9 | 8 | 7 | 6 | 6 | 5 |
| | 40-50 | 12 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 |
| 30 – 45 | 0-18 | 10 | 8 | 7 | 6 | 5 | 5 |
| | 20-39 | 11 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 |
| | 40-50 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 6 |

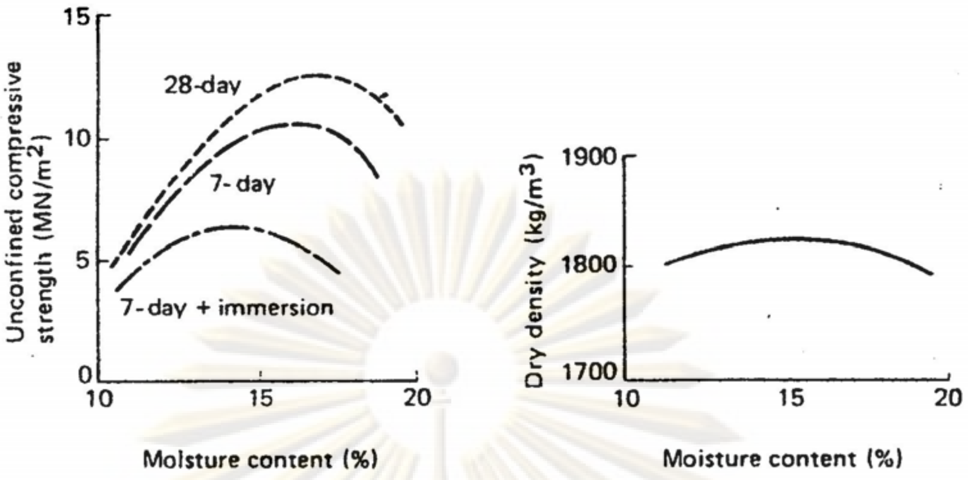
ในรูปที่ 2.4 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และ ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ของ Soil-Cement จะสังเกตเห็นได้ว่า มีค่าปริมาณความชื้น ค่าหนึ่งที่ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด แต่ค่าปริมาณความชื้นที่ตรงจุดความหนาแน่นแห้งสูงสุด ไม่จำเป็นที่จะต้องทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดสูงสุด นอกจากนี้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดยังขึ้นกับวิธีการและระยะเวลาในการบ่ม โดยทั่วๆไปค่าปริมาณความชื้น ที่ทำให้เกิดกำลังรับแรงสูงสุดสำหรับดินทรายจะอยู่ทางด้านแห้ง (Dry Side) ของ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) และการทดสอบพบว่าในดินเหนียวปริมาณความชื้น ที่ทำให้กำลังรับแรงสูงสุดไม่เพียงแต่ขึ้นกับปริมาณดินเหนียวในดินเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับชนิดของดินเหนียวด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 2.8** ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ปรับปรุงดินตามขนาดของดิน Clayey Soils (Portland Cement Association, 1970)

| AASHTO group Index | ขนาดของเม็ดวัสดุระหว่าง 0.05 มม. กับ 0.005 มม. (%) | ปริมาณซีเมนต์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ความหนาแน่นสูงสุด (ปอนด์ต่อลูกบากศ์ฟุต) | | | | | | |
| | | 90-94 | 95-99 | 100-104 | 105-109 | 110-114 | 115-119 | 120 หรือมากกว่า |
| 0-3 | 0-19 | 12 | 11 | 10 | 8 | 8 | 7 | 7 |
| | 20-39 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 8 | 7 |
| | 40-59 | 13 | 12 | 11 | 9 | 9 | 8 | 8 |
| | 60 หรือมากกว่า | - | - | - | - | - | - | - |
| 4-7 | 0-19 | 13 | 12 | 11 | 9 | 8 | 7 | 7 |
| | 0-39 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 8 |
| | 40-59 | 14 | 13 | 12 | 10 | 10 | 9 | 8 |
| | 60 หรือมากกว่า | 15 | 14 | 12 | 11 | 10 | 9 | 9 |
| 8-11 | 0-19 | 14 | 13 | 11 | 10 | 9 | 8 | 8 |
| | 20-39 | 15 | 14 | 11 | 10 | 9 | 9 | 9 |
| | 40-59 | 16 | 14 | 12 | 11 | 10 | 10 | 9 |
| | 60 หรือมากกว่า | 17 | 15 | 13 | 11 | 10 | 10 | 10 |
| 12-15 | 0-19 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 9 | 9 |
| | 20-39 | 16 | 15 | 13 | 12 | 11 | 10 | 10 |
| | 40-59 | 17 | 16 | 14 | 12 | 12 | 11 | 10 |
| | 60 หรือมากกว่า | 18 | 16 | 14 | 13 | 12 | 11 | 11 |
| 16-20 | 0-19 | 17 | 16 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 |
| | 20-39 | 18 | 17 | 15 | 14 | 13 | 11 | 11 |
| | 40-59 | 19 | 18 | 15 | 14 | 14 | 12 | 12 |
| | 60 หรือมากกว่า | 20 | 19 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่** 2.4 ผลกระทบของปริมาณความชื้นที่มีต่อความหนาแน่นแห้งและ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ (Hong, 1989)

4) **การผสมและการบดอัด**

เมื่อนำดิน น้ำ และซีเมนต์ผสมให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันมากเท่าไรจะยิ่งทำให้ควาแข็งแรง และความทนทานของ ดินซีเมนต์ มีค่ามากขึ้นเท่านั้น การผสมที่มีประสิทธิภาพสูงทำให้การใช้ปริมาณของซีเมนต์น้อย และได้กำลังรับแรงอัดตามที่ต้องการ

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำ จะเริ่มขึ้นตั้งแต่ตอนผสม และกำลังจะเกิดขึ้หลังจากหนึ่งชั่วโมง ในกรณีการทำการบดอัด จะต้องหาปริมาณความชื้นเหมาะสม เพื่อให้ส่วนผสมมีค่าความหนาแน่นมากที่สุด แต่จะทำให้กำลังและความทนทานน้อยกว่าที่ควรจะปีน ดังนั้นเมื่อทำการลดความหนาแน่นลง จะทำให้กำลังและการทนทานเพิ่มขึ้น และโดยทั่วๆไป ตามข้อระบุ การทำการบดอัดจะต้องทำเสร็จภายใน 2 ชั่วโมง นับตั้งแต่การผสมเริ่มขึ้น

5) **สภาพแวดล้อมและระยะเวลาการบ่ม**

สภาพแวดล้อมและระยะเวลาในการบ่มเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงของ ดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น เมื่ออายุในการบ่มเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดนี้ก็คล้ายกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยมีระยะเวลาต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปี

ดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะเกิดการแตกเนื่องจากการหดตัว จากสนามสังเกตได้ว่ารอยแตกจะมีความกว้าง 3-6 มม. และมีระยะห่าง 3-6 ม. โดยรอยแตกนี้มีผลมาจากปริมาณดินเหนียวที่มีมากเกินไป ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อรอยแตกจากการหดตัว มีดังนี้

1. การสูญเสียความชื้น

2. การหดตัวของ ดินซีเมนต์

3. คุณสมบัติรับแรงดึงของดินซีเมนต์

การปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์จะมีกำลังรับแรงสูงขึ้นเมื่อบ่มที่อุณหภูมิสูง ซึ่งปัจจัยอันนี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการประหยัดในประเทศที่มีภูมิอากาศอบอุ่น ตัวอย่างเช่น ประเทศแถบร้อน ซึ่งทำการบ่มดินซีเมนต์ ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส จะใช้ปริมาณซีเมนต์น้อยกว่าประเทศในแถบหนาว

6) **การใช้สารเคมีเพิ่มเติม**

เป็นการนำสารมาเพิ่มเติม เพื่อแก้ไขให้วัสดุมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ความเสียหายที่เกิดจากการมีสารอินทรีย์ในดิน สามารถแก้ไขได้โดยการเติม Hydrated lime 2 เปอร์เซ็นต์ หรือ Calcium chloride 0.5 เปอร์เซ็นต์ ก่อนทำการผสม นอกจากนี้ยังมีสารเคมีที่ใช้เติมลงในดินซีเมนต์ เพื่อปรับปรุงให้กำลังรับแรงมีค่าสูงมากในตอนต้น โดยเฉพาะสภาพอากาศหนาว และเมื่อใดที่ไม่ต้องการให้กำลังรับแรงตอนเริ่มต้นสูงมากนัก ก็สามารถลดปริมาณซีเมนต์ลงได้ โดยที่ไม่ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังในระยะเวลานานๆ โดยการเติม พวกขี้เถ้าลอยเข้าไปในดินซีเมนต์ ในดินที่มีสภาพพลาสติกสูง สามารถแก้ไขได้โดยผสมกับปูนขาวในปริมาณเล็กน้อย เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cat-ion Exchange) และเกิดการรวมตัวกัน เพื่อลดสภาพพลาสติก และปรับปรุงความสามารถในการทำงาน จากนั้นจึงเติมซีเมนต์เข้าไปเพื่อปรับปรุงการรับกำลัง

### 2.3.4 **การปรับปรุงดินด้วยวัสดุบิทูมินัส** (Bituminous Stabilization)

การปรับปรุงดินด้วยบิทูมินัส จะถูกใช้ในพื้นที่ที่ขาดแคลนมวลรวมในการทำชั้นพื้นทาง หรือในเส้นทางเศรษฐกิจ ในการปรับปรุงเพื่อผลิตชั้นพื้นทางคุณภาพสูงจะประกอบด้วยกรวด ทราย และวัสดุบิทูมินัส แต่ในการปรับปรุงดินประเภท Silty Clay จะใช้สำหรับทำ Subbase และ Subgrade เนื่องจากคุณภาพของวัสดุไม่ดีพอที่จะใช้เป็นชั้นพื้นทาง

#### 2.3.4.1 **กลวิธีในการปรับปรุงดินด้วยบิทูมินัส**

กลวิธีในการปรับปรุงดินด้วยบิทูมินัสจะแตกต่างไปจากการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และปูนขาว โดยเมื่อวัสดุบิทูมินัสกระจายเข้าไปในดิน ทำหน้าที่ดังนี้

1) **การทำหน้าที่เป็นตัวกันน้ำ**

วัสดุบิทูมินัส จะมีคุณสมบัติในการกันน้ำ สำหรับวัสดุที่ได้ทำการปรับปรุง ซึ่งใน ทาทฤษฎี วัสดุบิทูมินัสจะทำหน้าที่กันน้ำโดยทฤษฎีแรก เรียกว่า Membrane Theory ซึ่งจะมีฟิล์ม บิทูมินัสจะทำหน้าที่เคลือบอนุภาคดินหรือก้อนดิน ป้องกันการซึมของน้ำเข้าไปในดินโดยมีผลกระทต่อการลดลงของ กำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงกด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงบดอัด และ

และ Elastic Modulus ทฤษฎีที่สอง เรียกว่า Plug Theory ได้มองว่าบิทูมินัสจะทำหน้าที่คล้ายกับก้อนที่อุดช่องระหว่างดินไม่ให้น้ำไหลผ่าน

คุณลักษณะพื้นฐานที่ต้องการของวัสดุบิทูมินัส ก็คือการช่วยให้กำลังรับแรงของดินไม่ให้ถูกทำลายไปจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น ถ้ามองในแง่ของการป้องกันน้ำแล้ว ยิ่งมีปริมาณบิทูมินัสมากเท่าไหร่ ก็ยิ่งทำให้ป้องกันน้ำมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการใส่วัสดุบิทูมินัสมากเกินไปก็เหมือนกับการทำให้ดินหล่อลื่นมากไป ทำให้การบดอัดได้ผลไม่ดีเท่าที่ควรและ ทำให้ Stability มีค่าต่ำ

2) **การทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน**

วัสดุบิทูมินัสจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานที่มีประสิทธิภาพซึ่งขึ้นอยู่กับตัววัสดุเองและอนุภาคดิน โดยพิจารณาคุณสมบัติแรงตึงผิว การดูดซึมและคุณสมบัติอื่นๆ ของของเหลวและของแข็ง อย่างไรก็ตามการยึดเหนี่ยวจะเกิดขึ้นได้นั้น อนุภาคดินและตัวยึดเหนี่ยวจะต้องมีขั้วที่ต่างกันในการยึดเหนี่ยวระหว่างบิทูมินัสและอนุภาคดิน ตัววัสดุบิทูมินัสจะทำหน้าที่คล้ายสะพานคอยยึดอนุภาคเข้าด้วยกัน ดังนั้นในการผสมจึงพยายามให้วัสดุบิทูมินัสเคลือบทุก ๆ อนุภาคของดินเดิม แต่อย่างไรก็ตามถ้าใส่จำนวนของวัสดุบิทูมินัสมากเกินไปทำให้ฟิล์มที่เคลือบอนุภาคหนาเกินไป กำลังรับแรงที่เกิดขึ้นจะต่ำลง โดยกฎทั่ว ๆ ไปอาจกล่าวได้ว่ายิ่งฟิล์มของวัสดุบิทูมินัสหนาน้อยลง ยิ่งทำให้แรงตึงผิว กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัดและ Elastic Modulus มีค่ามากขึ้น

#### 2.3.4.2 วัสดุแอสฟัลต์ที่ใช้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของดิน

วัสดุแอสฟัลต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุ แบ่งได้สองประเภท คือ Emulsified Asphalt และ Cutback Asphalt โดยใช้การแบ่งตามสารละลายที่ผสมลงใน Asphalt Cement กล่าวคือ Emulsified Asphalt ก็คือ ส่วนผสมระหว่าง Asphalt Cement น้ำ และ Emulsified agent เพื่อทำให้ลดค่าความเหนียว (Viscosity) ใน Asphalt สำหรับการก่อสร้างที่ต้องการอุณหภูมิต่ำ และ Emulsified Asphalt ยังสามารถแบ่งได้ตามอัตราความเร็วในการแข็งตัว (Setting rate) ได้อีก 3 แบบคือ Rapid Set (RS) Medium Set (MS) และ Slow Set (SS) ในส่วนของแอสฟัลต์ชนิด Cutback Asphalt คือ แอสฟัสต์เหลว (Liquid Asphalt) ที่เกิดจากการผสมสารละลาย Petroleum กับ Asphalt Cement แบ่งได้ตามอัตราความเร็วในการระเหยได้ 3 แบบ คือ Rapid Curing (RC) Medium Curing (MC) และ Slow Curing (SC) วัสดุแอสฟัลต์ประเภท Rapid Curing (RC) Medium Curing (MC) Slow Curing (SC) Medium Set (MS) และ Slow Set (SS) เหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพของดิน

ตัวเลือกในการใช้ชนิดของแอลฟัสต์ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น อากาศ ชนิดของดิน และการก่อสร้างเช่น RC ใช้สำหรับถนนที่ไม่สามารถปิดการจราจรได้หลายชั่วโมง MC และ SC ใช้กับวัสดุเม็ดละเอียด

Asphalt Emulsion กำลังได้รับความนิยมมากและสามารถควบคุมการผลิตได้ดีกว่า ดินเม็ดละเอียด เหมาะกับแอสฟัลต์ประเภท SS เพราะ RS และ MS จะแตกตัวทันทีหลังจากการผสมเริ่มต้น เมื่อใดที่มีจำนวนเม็ดละเอียดพอประมาณ MS จะถูกใช้ ส่วน RS จะไม่ถูกใช้ในงานการปรับปรุงในขณะที่ Asphalt Emulsion จะต้องถูกทดสอบกับดินก่อนในห้องทดลอง เพื่อให้แน่ใจว่าการแตกตัวที่เกิดขึ้นจะไม่เร็วเกินไป

ชนิดของวัสดุบิทูมินัสที่จะนำมาใช้ขึ้นกับ

1. วิธีการก่อสร้างและเครื่องมือที่จะนำมาใช้
2. เกรดและคุณสมบัติของวัสดุบิทูมินัสที่เลือก
3. สภาพอากาศก่อนและหลังการก่อสร้าง
4. ชนิดของเครื่องมือที่ใช้
5. น้ำหนักบรรทุก

ชนิดของวัสดุบิทูมินัสที่จะใช้ขึ้นกับวิธีการก่อสร้าง และเครื่องมือที่มีอยู่ ส่วนการเลือกเกรดของบิทูมินัสนั้นขึ้นกับปริมาณอนุภาคละเอียดในมวลรวม สภาวะอากาศในการก่อสร้างและหลังการก่อสร้าง ชนิดเครื่องมือในการผสมและน้ำหนักที่กระทำต่อพื้นทาง โดยทั่ว ๆ ไป แล้วแอสฟัลตซีเมนต์มักจะใช้กับโรงผสมร้อน ขณะที่ Emulsified Asphalt จะใช้กับระบบการผสมในที่และระบบโรงผสมเย็นหรืออุ่น ส่วนใหญ่วัสดุบิทูมินัสชนิดคัทแบคไม่ควรนำมาใช้เนื่องจากมีปัญหาทางอากาศและความปลอดภัย

**2.3.4.3 วิธีการปรับปรุงดินด้วยวัสดุ บิทูมินัส**

การใช้วัสดุบิทูมินัสในการปรับปรุงดินสามารถแบ่งออก ตามคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 2.9 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 วิธีดังนี้

1) Sand – Bituminous – Material mixtures

วิธีนี้เป็นการนำวัสดุบิทูมินัสกับ Cohesionless soil เช่น ทรายแม่น้ำ ทรายขุด และ ทราสะอาดชนิดอื่น ๆ เพื่อเป็นการปรับปรุง Stability ที่มีอยู่ อันเกิดจากแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างอนุภาค ชนิดของวัสดุบิทูมินัสที่ใช้ มีดังต่อไปนี้

1. Penetration – Grade Bitumen ได้แนะนำว่าวัสดุบิทูมินัสที่เหมาะที่สุด คือมีค่า Penetration 85 -100 และ 120 -150 การใช้วัสดุบิทูมินัสชนิดนี้จะต้อง เพิ่มความร้อนให้กับทรายเสียก่อน ในการผสม และก่อสร้างต้องใช้อุณหภูมิสูงทั้งหมด โดยทั่วไปแล้วปริมาณบิทูมินัสอยู่ในช่วง 4% สำหรับอนุภาคที่มีเม็ดเรียบและกลมจนถึง 6% สำหรับอนุภาคผิวหยาบ และเป็นก้อนสี่เหลี่ยม

2. วัสดุบิทูมินัสชนิดคัทแบค ได้ถูกนำมาใช้ช่วงต้นของทศวรรษที่ 1970 ซึ่งปัจจุบันวัสดุบิทูมินัสชนิดนี้มีการใช้น้อยลง อันเนื่องมาจากเหตุผลทางด้านสิ่งแวดล้อม

3. วัสดุบิทูมินัสชนิด Emulsion เป็นวัสดุบิทูมินัสที่มักถูกนำไปใช้ในพื้นที่ที่มีสภาพอากาศอบอุ่น

**ตารางที่ 2.9** คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงด้วยวัสดุบิทูมินัส (U.S. Air Force, 2004)

| Property | | Sand - bitumen | Sand - gravel - bitumen | Soil - bitumen |
|---|---|---|---|---|
| Percent passing | standard sieves | | | |
| AASHTO | Nearest equivalent | | | |
| Sieve | BS sieve (mm) | | | |
| 1 ½ inch | 37.5 | - | 100 | - |
| 1 inch | 28 | 100 | - | - |
| ¾ inch | 20 | - | 60-100 | - |
| No. 4 | 5 | 50-100 | 35-100 | 50-100 |
| No. 10 | 2 | 40-100 | - | - |
| No. 40 | 0.425 | - | 13-50 | 35-100 |
| No. 100 | 0.15 | - | 8-35 | - |
| No. 200 | 0.063 | 5-12 | - | Good :3-20<br>Fair :0-3 and 20-30<br>Poor :>30 |
| Liquid Limit (%) | | - | - | Good :<20<br>Fair :20-30, Poor :30-40 |
| Plasticity index | | 10 | 10 | Good :<5<br>Fair :5-9<br>Poor :9-15<br>Unusable :>12-15 |

เสถียรภาพของ Sand bitumen จะเพิ่มตามขนาดโตสุดของเม็ดหยาบ และเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของวัสดุเม็ดละเอียด ซึ่งอาจจะสามารถลดปริมาณของวัสดุบิทูมินัสที่ใช้ผสมได้ อย่างไรก็ตามไม่ควรมีวัสดุเม็ดละเอียดและปริมาณแอสฟัลต์มากเกินไป ที่จะไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่รับแรงกด และเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเปราะในสารผสม ดังนั้นจึงต้องมีขีดจำกัดของปริมาณ

วัสดุผสมละเอียดสูงสุดซึ่งขึ้นกับขนาดคละของวัสดุหยาบ โดยทั่วไปวัสดุผสมละเอียดไม่ควรเกิน 12 เปอร์เซ็นต์ในขณะที่ทรายที่มีขนาดคละดี สามารถที่จะใช้วัสดุละเอียดประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ แต่ความเหมาะสม อาจจะใช้วัสดุละเอียดที่เป็นตัวเพิ่มประเภท Non-plastic ผสมในทรายได้เช่น หินฝุ่น ซีเมนต์ ขี้เถ้าลอย และนอกจากนี้ดินที่ใช้ควรมีค่า PI น้อยกว่า 6

2) Sand – Gravel – Bituminous – Material Mixtures

ส่วนผสมนี้มักจะถูกใช้ในสภาวะคล้ายกับ Sand – Bituminous – Material Mixtures เพียงแต่ว่าส่วนผสมนี้จะทำให้ขนาดคละและมีลักษณะแรงเสียดทานที่ดีขึ้นแต่มี Cohesion น้อย การเติมสารบิทูมินัสจึงทำหน้าที่เป็นทั้งสารยึดเหนี่ยวและสารกันน้ำ

3) Soil – Bituminous – Material Mixtures

วัสดุบิทูมินัสที่ใช้ในส่วนผสมนี้ เพื่อปรับปรุงปริมาณความชื้นของดินที่มีขนาดเม็ดละเอียดเป็นหลัก U.S. Air Force (2004) แนะนำให้ใช้กับดินที่มีขนาดวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาด 75 μm น้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ Plasticity Index น้อยกว่า 6 และผลคูณของ Plasticity Index กับเปอร์เซ็นต์วัสดุที่ผ่านตะแกรง 75 μm จะต้องน้อยกว่า 72 ซึ่งดินที่ถูกบดละเอียดและถูกผสมอย่างเหมาะสมกับบิทูมินัส จะสามารถปรับปรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดินที่มี PI มากกว่า 6 จะไม่สามารถปรับปรุงด้วยวิธีนี้เพราะว่าการผสมวัสดุบิทูมินัสให้ตลอดทั่วทั้งวัสดุเป็นการยาก และดินที่จะปรับปรุงด้วยวิธีนี้ควรจะมีสารอินทรีย์ น้อยหรือไม่มีเลย ดินเม็ดละเอียดที่เป็นพวกอัลคาไลน์มาก ซึ่งมักพบในพื้นที่แห้งแล้ง กึ่งแห้งแล้ง จะปรับปรุงด้วยวัสดุบิทูมินัสยาก ส่วนดินที่มีสารอินทรีย์ เช่น ดินก้นแม่น้ำหรือดินในป่า และดินที่มีค่า pH สูงและมีเกลือละลายอยู่ควรหลีกเลี่ยงวิธีนี้ เพราะจะทำให้การปรับปรุงได้ผลไม่ดี

ปริมาณแร่ดินเหนียว ที่ปรากฏในดินมีส่วนสำคัญในการปรับปรุงด้วยวิธีนี้ เช่น ดินเหนียวประเภท Kaolinite ง่ายในการปรับปรุง แต่สำหรับดินเหนียวประเภท Montmorillonite ยากในการปรับปรุงเนื่องจากปัญหาในการผสมให้เข้ากัน

ปูนขาวมักถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงร่วมกับวัสดุบิทูมินัส เพื่อใช้ใน ถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ โดยจะนำปูนขาวประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ผสมกับดิน เพื่อลดค่า Plasticity Index และปูนขาวจะมีส่วนช่วยในการผสมและการเคลือบของวัสดุบิทูมินัส การที่ใช้ปูนขาวช่วยในการปรับปรุงทำให้ได้กำลังรับแรงและต้านทานน้ำหนักมากกว่า การนำวัสดุบิทูมินัสมาใช้เพียงอย่างเดียว

ปริมาณความชื้นเป็นสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาถึงความเหมาะสมที่จะใช้ในวิธีนี้ ดินประเภท Cohesive จะไม่สามารถถูกบดได้อย่างเพียงพอ ถ้าปราศจากน้ำ โดยเฉพาะในระหว่างการผสมและการบดอัด ในช่วงการผสมน้ำจะช่วยในการกระจายวัสดุบิทูมินัสตลอดทั่วในมวลดิน ตัวอย่างเช่น ปริมาณความชื้นที่ทำให้วัสดุบิทูมินัสกระจายไปทั่วจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณวัสดุละเอียด

ในดินมีค่าเพิ่มขึ้น และการกระจายจะเป็นแบบ Uniform เมื่อปริมาณน้ำที่ใช้ใกล้เคียง Liquid Limit ของดิน

ในการบดอัด ปริมาณน้ำเป็นส่วนสำคัญเพราะเกี่ยวข้องกับ ความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) โดยจะต้องรู้ว่าปริมาณความชื้นเมื่อมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ Soil – Bituminus – Material Mixture จะแตกต่างจากปริมาณความชื้นที่ต้องการสำหรับดินเพียงอย่างเดียว

## 2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

### 2.4.1 การทดสอบ Durability โดยวิธี Wet and Dry (ASTM D599-03)

การทดสอบ Durability เป็นการหาความสึกหรอหรือที่เรียกกันว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณวัสดุในหนึ่งแท่งตัวอย่าง หลักการเบื้องต้นอิงหลักการของการทำให้เปียกและการทำให้แห้งซ้ำๆกันตามมาตรฐาน ASTM D559-03 โดยจะทดสอบกับวัสดุที่ได้ทำเป็นก้อนตัวอย่าง โดยการทำ Durability นี้ได้มีการแบ่งการทดสอบเป็นสองประเภท คือ ทดสอบกับวัสดุมวลละเอียด คือวัสดุที่มีขนาดคละที่ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร และ ทดสอบกับวัสดุที่มีขนาดคละปานกลาง คือวัสดุที่มีขนาดคละที่ผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร และค้างบนตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร ในที่นี้จะใช้การทดสอบกับวัสดุที่มีขนาดคละปานกลาง คือมีการทดสอบโดยการ นำก้อนวัสดุไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 71°c เป็นเวลา 42 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำวัสดุมาแปรงด้วยแปรงทองเหลือง ที่น้ำหนัก 13.3 นิวตัน ถือเป็นการครบรอบ ทำเป็นจำนวนทั้งหมด 12 รอบจึงจะได้ ค่า Durability และ Terrel (1979) ได้นำเสนอความสึกหรอมาตรฐานของวัสดุโดยการใช้วิธี Wet and Dry ไว้ดังตารางที่ 2.10

**ตารางที่ 2.10** ค่าความสึกหรอมาตรฐานสำหรับการใช้การปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ (Terrel, 1979)

| การแบ่งประเภทของดิน | | น้ำหนักที่เสียไปมากที่สุดที่รับได้หลังจากทำการทดสอบ สภาพความสึกหรอ (%) |
|---|---|---|
| AASHTO | Unified | |
| A-1<br>A-2-4, A-2-5<br>A-3 | GW, GP, GM, SW, SP, SM<br>GM, GC, SM, SC<br>SP | 14 |
| A-2-6, A-2-7<br>A-4<br>A-5 | GM, GC, SM, SC<br>CL, ML,<br>ML, MH, OH | 10 |
| A-6<br>A-7 | CL, CH<br>OH, MH, CH | 7 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**2.4.2 การทดสอบ โมดูลัสคืนตัว (AASHTO T307)**

วัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น โดยสมบูรณ์จะเกิดการยุบตัวถาวร (Permanent deformation) เมื่อถูกแรงกระทำ กล่าวคือเมื่อถอนแรงกระทำออกวัสดุจะไม่สามารถคืนตัว (Recover) อย่างสมบูรณ์กลับไปที่ ตำแหน่งหรือรูปร่างเดิมได้ อย่างไรก็ตามหากแรงที่กระทำนั้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงของวัสดุ (Strength) และแรงกระทำนั้นกระทำซ้ำๆเป็นจำนวนรอที่มากพอ (100 รอบขึ้นไป) การยุบตัวถาวรของวัสดุจะมีค่าน้อยมากจนอาจกล่าวได้ว่าวัสดุมีการคืนตัวเกือบสมบูรณ์ เมื่อนำค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นจากแรงกระทำในแต่ละรอบหารด้วยค่าความเครียดที่คำนวณจากการคืนตัวในแต่ละรอบจะได้ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus) ของวัสดุตามสมการที่ 2.3

$$M_R = \sigma_D/\varepsilon_r \qquad (2.3)$$

เมื่อ $M_R$ = ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)

$\sigma_D$ = ความเค้นเพิ่มที่กระทำในแต่ละรอบ (Deviator stress)

$\varepsilon_r$ = ความเครียดที่คืนตัวได้ (Recoverable strain)

การทดสอบโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ ทดสอบโดยการให้น้ำหนักกระทำซ้ำ ๆ กับก้อน ตัวอย่าเพื่อให้น้ำหนักที่กระทำนั้นเป็นลักษณะลูกคลื่น Harversine หรือคลื่นแบบอื่น ๆ น้ำหนัก ที่กระทำใแนวดิ่งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่งของก้อนตัวอย่าง จะทำให้ก้อนตัวอย่างเกิดการขยายตัวในแนวราบและขณะช่วงหยุดพักการให้น้ำหนักกระทำกับก้อนตัวอย่างจะมีคืนกลับสภาพเดิมเรียกว่าการคืนตัว (Resilient Strain) เมื่อน้ำหนักกระทำซ้ำอีกตามจานำวนครั้งที่กาหำนดจนกระทั่งค่าการคตัวมีค่าค่อนข้างคงที่

**2.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์**

ในการศึกษาถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของวัสดุนั้นจะต้องทำการเปรียบเทียบราคาโดยจำเป็นต้องทราบถึงการประมาณราคาในการก่อสร้างก่อน จึงสามารถประมาณราคาของวัสดุปรับปรุงและวัสดุที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้อย่างเหมาะสม

การวิเคราะห์ราคาค่าก่อสร้างชั้นทางสำหรับวัสดุดินซีเมนต์ ซึ่งอ้างอิงจาก Ruenkrairergsa (1982) สรุปได้ว่า การวิเคราะห์ราคาการก่อสร้างนั้น จะต้องมีการคำนึงถึงปัจจัยต่างๆดังนี้

- แหล่งของวัสดุ และที่ตั้งของโรงงานเครื่องจักรผสม
- ระยะทางขนส่งจากที่ตั้งของโรงงานเครื่องจักรผสมถึงสถานที่ก่อสร้าง

- ราคาวัสดุในท้องถิ่นที่จำเป็นในการผสม และระยะทางขนส่ง
- ผลจากน้ำหนักบรรทุก
- ลักษณะของดินเดิม และ การระบายน้ำ

<u>ปัจจัยหลักในการวิเคราะห์ราคาหินคลุก</u>

การวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบราคานั้น จำเป็นต้องเปรียบเทียบราคาการก่อสร้างโดยใช้หินคลุก กับดินซีเมนต์ ซึ่งมีปัจจัยหลักอยู่ 3 ปัจจัยคือ

- ราคาหินคลุก ที่ปากโม่ จะมีราคาที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่
- ราคาตามระยะทางขนส่งจากโรงโม่มายังสถานที่ก่อสร้าง จะมีการวิเคราะห์ราคาจากระยะทาง น้ำหนักบรรทุก และราคาน้ำมัน ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาและสถานที่ในการก่อสร้างชั้นทาง
- ราคาสำหรับการบดอัด

<u>ปัจจัยในการวิเคราะห์ราคาของวัสดุปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์</u>

- ราคาของวัสดุ (ดิน, หินผุ ฯลฯ) รวมกับค่าขนส่ง
- ราคาปูนซีเมนต์ ขึ้นกับระยะทางและช่วงของเวลาในการก่อสร้างชั้นทาง
- ราคาเครื่องจักรผสม และการติดตั้ง
- ราคาสำหรับการบดอัด

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุดังนี้

กรมโยธาธิการ (1997) ได้ทำการศึกษาวัสดุหินในหลายจังหวัดในภาคอีสาน และภาคใต้ พบว่ามีแหล่งดินในจังหวัดอำนาจเจริญ, ระนอง, สุราษฎร์ธานี และ ยะลา มีคุณสมบัติเบื้องต้นที่สามารถปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์เพื่อไปใช้ในโครงสร้างชั้นพื้นทางได้

Ruenkrairergsa and Chansuwarn (1978) ได้ทำการสำรวจและทดสอบหินผุที่เกิดจากหินแกรนิต หรือที่เรียกว่า ดินแกรนิต (Granitic soil) ซึ่งดินชนิดนี้พบมากในภาคเหนือ และแถบคาบสมุทรทางภาคใต้ และเป็นดินที่มีขนาดคละที่ดีซึ่งส่วนมากจัดอยู่ในดินประเภท A – 1 หรือ A – 2 มีความเป็นพลาสติกต่ำ ผู้ทำการวิจัยได้แนะนำไว้ว่าดินชนิดดังกล่าวเหมาะสมอย่างมากใการนำมาสร้างชั้นดินถมคันทาง และใช้ได้ดีในการนำมาสร้างชั้นรองพื้นทาง และชั้นพื้นทางในถนนที่มีการจราจรต่ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพวัสดุได้มีผู้ทำการวิจัยดังนี้

Tongmark (1966) ได้ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงดินลูกรังด้วยซีเมนต์ โดยนำดินลูกรังมาจากจังหวัดสระบุรี มาผสมซีเมนต์ในสัดส่วนต่างๆ กันจาก 6, 9 และ 12 เปอร์เซ็นต์ และบดอัดโดยวิธี Modified Proctor จากผลการวิจัยพบว่าการผสมซีเมนต์ตั้งแต่ 6 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นแห้ง 95 เปอร์เซ็นต์ จะผ่านเกณฑ์กำหนดของกรมทางหลวงคือจะได้ค่ากำลังอัด มากกว่า 250 ปอนด์/ตารางนิ้ว และสามารถใช้เป็นวัสดุพื้นทางได้

Kwai Hong (1989) ได้ทำการทดสอบการปรับปรุงดินเหนียว กับซีเมนต์ โดยนำดินบริเวณจังหวัดปทุมธานี โดยใช้สัดส่วนการผสมจาก 5, 7.5, 10, 12 และ 15 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบพบว่า ดินเหนียวที่นำมาปรับปรุงด้วยวิธีผสมซีเมนต์นั้น ไม่ผ่านเกณฑ์กำหนดของกรมทางหลวง

Nithi – Uthai (1969) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินเหนียวด้วยซีเมนต์ โดยนำดินจากกรุงเทพฯ และดินเหนียวจากภาคตะวันออก (จังหวัดจันทบุรี) โดยดินเหนียวจากกรุงเทพฯ ใช้ส่วนผสมของซีเมนต์ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดินเหนียวจากจันทบุรี ใช้สัดส่วน 5 และ 8 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบสรุปได้ว่าปริมาณซีเมนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสมในการปรับปรุงดินเหนียวจากจันทบุรีเพื่อใช้เป็นโครงสร้างชั้นพื้นทาง แต่ดินเหนียวจากกรุงเทพฯไม่พบปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในการใช้เป็นโครงสร้างชั้นพื้นทาง

Ruenkrairergsa (1980) โดยการนำหินผุชนิดหินแกรนิต (ดินแกรนิต) ที่พบมากทางภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งลักษณะของดินแกรนิตก่อนการนำมาบดอัดนั้นมีส่วนที่มีลักษณะคล้ายคลึงกิบหินแกรแต่เมื่อนำมาบดอัดแล้ว จะพบว่าส่วนที่มีลักษณะคล้ายหินนั้นแตกย่อยกลายเป็น มวลละเอียด ทราย และ ผง ซึ่งในการวิจัยนี้จะนำหินผุดังกล่าวมาผสมกับซีเมนต์เพื่อดูคุณสมบัติทางวิศวกรรม ซึ่งผู้วิจัยได้นำดินซีเมนต์มาทำให้แห้ง และได้ทำการคัดแยกเอาแต่มวลที่มีขนาดตามต้องการเพื่อนำมาผสมซีเมนต์ที่ปริมาณ 3, 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแล้วจึงนำไทดสอบหาค่า CBR UCS และค่าโมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus) ซึ่งทำให้ทราบว่าดินแกรนิตผสมซีเมนต์ที่ 3 เปอร์เซ็นต์มีค่า CBR มากกว่า 100 ค่ากำลังรับแรงอัดมีมากกว่า 17.5 ksc ซึ่งมากกว่าค่ามาตรฐานของดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง และค่าโมดูลัส มีค่ามากกว่า 200 $kN/m^2$ ซึ่งผู้วิจัยได้สรุปปัจจัยสำคัญที่สุดในการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ดินแกรนิตได้แก่ ปริมาณซีเมนต์ และ ปริมาณมวลของวัสดุที่ผ่านตระแกรง #100, #200 และ 3/8" และผู้วิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS และ ค่าโมดูลัสสัมผัสได้เป็นช่วงๆ โดยแบ่งตามความแข็งแรงที่ขึ้นกับระยะเวลาในการบ่มวัสดุดังตารางที่ 2.11

**ตารางที่ 2.11** สมการถดถอยตามตัวแปรความแข็งแรงของดินเกรนิตผสมซีเมนต์ (Ruenkrairergsa, 1980)

| สมการหมายเลข | สมการถดถอย | ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด |
|---|---|---|
| 1 | $E_1$ = -183033 + 87079 (C) | 0.900 |
| 2 | $E_1$ = -558897 + 76914 (C) +5182 ($P_{10}$) | 0.942 |
| 3 | $E_1$ = 582689 + 75726 (C) + 5773 - 11943 ($P_{3/8}$) | 0.944 |
| 4 | $E_7$ = -159,356 + 113070 (C) | 0.879 |
| 5 | $E_7$ = -642426 + 99940 (C) + 6788 ($P_{10}$) | 0.928 |
| 6 | $E_7$ = -48286 + 98003 (C) +8511($P_{10}$) -7361($P_{3/8}$) | 0.935 |
| 7 | $E_{28}$ = -246190 + 159157 (C) | 0.784 |
| 8 | $E_{28}$ = 1205224 + 133125 (C) + 13604($P_{10}$) | 0.867 |
| 9 | $E_{28}$ = -926084 + 124508 (C) +14327 ($P_{10}$) -10111($P_{200}$) | 0.896 |
| 10 | $UCS_1$ = -634 + 655 (C) | 0.904 |
| 11 | $UCS_1$ = -322+623 (C) – 51 ($I_p$) | 0.929 |
| 12 | $UCS_1$ = - 2653 + 604 (C) + 28 ($P_{10}$) | 0.926 |
| 13 | $UCS_1$ =-2131 + 576 (C) + 36 ($P_{10}$) – 35 ($P_{200}$) | 0.953 |
| 14 | $UCS_7$ = -125 + 693 (C) | 0.860 |
| 15 | $UCS_7$ = 222+ 660 (C) -45 ($I_p$) | 0.891 |
| 16 | $UCS_7$ = -1863 + 648 (C) +24 ($P_{10}$) | 0.877 |
| 17 | $UCS_7$ = -1160 + 627 (C) + 28 ($P_{10}$) -30 ($P_{200}$) | 0.896 |
| 18 | $UCS_{28}$ = -711 + 1106 (C) | 0.860 |
| 19 | $UCS_{28}$ = 1 + 1035 (C) -87 ($I_p$) | 0.904 |
| 20 | $UCS_{28}$ = 1636 + 1084 (C) -74 ($P_{200}$) | 0.914 |
| 21 | $UCS_{28}$ = -2754 +947 (C) -84 ($P_{200}$) +66 ($P_{10}$) | 0.954 |
| 22 | CBR = 343 – 4 ($P_{200}$) | 0.657 |
| 23 | CBR = 234 – 4 ($P_{200}$) + 28 (C) | 0.732 |
| 24 | CBR = - 235 – 4 ($P_{200}$) +27 (C) + 5 ($P_{3/8}$) | 0.777 |

เมื่อ E = ค่าโมดูลัสสัมผัสเริ่มต้นที่วันต่างๆ

UCS = Unconfined Compressive Strength ที่วันต่างๆ

C = เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์โดยน้ำหนัก

P = เปอร์เซ็นต์มวลที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และในส่วนสุดท้ายเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ซึ่งมีผู้ทำงานวิจัยดังนี้

Ruenkrairergsa (1982) ได้นำเสนอการเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ระหว่าง ดินแกรนิตผสมซีเมนต์กับวัสดุหินคลุก โดยทำการสำรวจโครงการก่อสร้างต่างๆที่มีระยะทางขนส่งหินคลุกตั้งแต่ 150 – 300 กิโลเมตร และวัสดุดินแกรนิตที่มระยะทางขนส่งไม่เกิน 50 กิโลเมตร ซึ่งผู้วิจัยได้สมมุติคุณสมบัติต่างๆของโครงการก่อสร้างดังนี้ ถนนมีความกว้าง 6 เมตร หนา 0.15 เมตร ซึ่งทำให้ได้ราคาของหินคลุกที่ระยะทางต่างๆ เท่ากับ 9810 – 23490 $ ต่องานก่อสร้างความยาวหนึ่งกิโลเมตร ส่วนดินแกรนิตผสมซีเมนต์นั้นผู้วิจัยได้สมมุติจากราคาเครื่องจักรซึ่งประกอบด้วยค่าเช่าเครื่องจักร และค่าน้ำมันที่เครื่องจักรต้องใช้ซึ่งเป็นราคา 2425 $ ต่องานก่อสร้างความยาวหนึ่งกิโลเมตร ปริมาณซีเมนต์ที่ผสม 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักราคา 7200 $ ต่องานก่อสร้างความยาวหนึ่งกิโลเมตร และค่าวัสดุมีมีระยะทางขนส่ง 50 กิโลเมตรราคา 3053.7 $ ต่องานก่อสร้างความยาวหนึ่งกิโลเมตร ซึ่งรวมราคาค่าใช้จ่ายของดินซีเมนต์ผสมซีเมนต์ได้เท่ากับ 12678 $ ต่องานก่อสร้างความยาวหนึ่งกิโลเมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าราคาดินแกรนิตผสมซีเมนต์จะถูกกว่าหินคลุกประมาณ 3 - 35 เปอร์เซ็นต์ต่องานก่อสร้างความยาวหนึ่งกิโลเมตร ที่ราคาหินคลุกรวมระยะทางตั้งแต่ 17.4 – 26.1 $ ต่อลูกบากศ์เมตรดังตารางที่ 2.12

**ตารางที่ 2.12** ราคาเปรียบเทียบระหว่างดินแกรนิตผสมซีเมนต์กับหินคลุก (Ruenkrairergsa, 1982)

| ราคาหินคลุก ($/ม$^3$) | ราคาหินคลุก ($/กม) | ราคาดินแกรนิตผสมซีเมนต์ ($/กม) | ส่วนต่างราคา ($/กม, %) |
|---|---|---|---|
| 10.9 | 9810 | 15213 | -5403, -36 |
| 13.0 | 11700 | 15213 | -3513, -23 |
| 15.2 | 13680 | 15213 | -1533, -10 |
| 17.4 | 15660 | 15213 | +0447, +03 |
| 19.6 | 17640 | 15213 | +2427, +14 |
| 21.7 | 19530 | 15213 | +4317, +22 |
| 23.9 | 21510 | 15213 | +6297, +29 |
| 26.1 | 23490 | 15213 | +8277, +35 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงาน

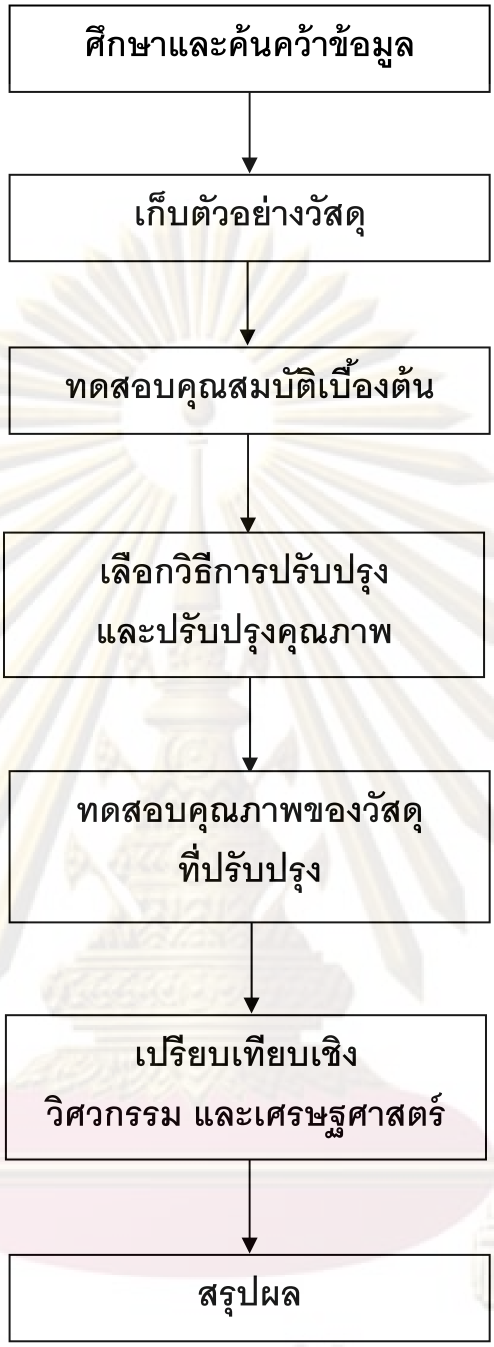
ในส่วนของบทที่ 3 จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงาน วิธีการทดสอบต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบวัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุงและวัสดุที่ทำการปรับปรุงแล้ว และแหล่งของวัสดุหินผุที่นำมาทำการทดสอบ

## 3.1 วิธีการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งวิธีการดำเนินงานออกเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และผลการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ และวิธีการปรับปรุงคุณภาพวัสดุ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุโครงสร้างทาง
2. ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุในภาคเหนือ โดยในโครงการนี้จะใช้วัสดุหินผุในเขต จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยทำการเก็บตัวอย่างจากแหล่งที่แตกต่างกันจำนวน 3 แหล่ง
3. ทดสอบหา คุณสมบัติทางวิศวกรรมของหินผุโดยการทดสอบดังนี้
    - Sieve Analysis
    - Atterberg's Limit
    - การทดสอบ Compaction test แบบสูงกว่ามาตรฐาน
    - ค่า California Baring Ratio (CBR)
    - Unconfined Compressive Strength (UCS)
    - Resilient Modulus ($M_R$)
4. ปรับปรุงคุณภาพหินผุโดย ทำการจัดเตรียมตัวอย่าง และ นำมาทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรม ของวัสดุที่ปรับปรุง โดยทำการทดสอบ
    - Unconfined Compressive Strength (UCS)
    - Durability โดยวิธี Wet and Dry
    - Resilient Modulus ($M_R$)
5. สรุปผลและเปรียบเทียบราคาและความเหมาะสมในการนำวัสดุท้องถิ่นที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพไปใช้ในการก่อสร้าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่** 3.1 แผนภูมิลำดับการทำงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

\

## 3.2 วิธีการทดสอบ

### 3.2.1 การทดสอบหาขนาดของเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง (Sieve Analysis) (มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล. – ท. 205/2517)

**วิธีการทดสอบ**

1) ทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุสำหรับวัสดุเล็กว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)

- ถ้าตัวอย่างมีส่วนละเอียดจับกันเป็นก้อนต้องทำให้ส่วนละเอียดที่จับกันเป็นก้อน แยกจากกันให้หมด แล้วนำตัวอย่างไปอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 110 ±5 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างใส่ภาชนะสำหรับใช้ล้างตัวอย่าง เทน้ำหรือน้ำยาลงไปในภาชนะจนท่วมดินตัวอย่าง แช่ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเขย่าประมาณ 10 นาที ถ้าไม่ใช้เครื่องเขย่าควรแช่น้ำไว้ในภาชนะสำหรับล้าตัวอย่างด้วย มือนานประมาณ 3-4 ชั่วโมง จากนั้นเทตัวอย่างลงบนตระแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) ถ้าหากมีตัวอย่างขนาดใหญ่ปนอยู่มาก ควรใช้ตะแกรงเบอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 200 ซ้อนไว้ข้างบน เพื่อลดปริมาณตัวอย่างบนตะแกรงเบอร์ 200 ใช้น้ำล้างจนกว่าไม่มีวัสดุผ่าตะแกรงเบอร์ 200 จากนั้นจึงเทตัวอย่างในภาชนะ แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ±5 องศาเซลเซียส
- นำตัวอย่างไปเขย่าในตะแกรงขนาดต่างๆ ตามต้องการ การเขย่านี้ต้องให้ตะแกรงเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบและแนวดิ่งรวมทั้งมีแรงกระแทกขณะเขย่า ใช้เวลาในการเขย่านานจนกระทั่งตัวอย่างผ่านตะแกรงแต่ละชนิดใน 1 นาที ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างในตะแกรงนั้น หรือใช้เวลาเขย่านานทั้งหมดประมาณ 15 นาที เมื่อเขย่าเสร็จ ต้องไม่มีก้อนตัวอย่างซ้อนกันในตะแกรง และตัวอย่างที่มีเม็ดเล็กกว่าตะแกรงขนาดเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ต้องมีตัวอย่างค้างตะแกรงแต่ละขนาดไม่เกิน 6 กรัมต่อ 1,000 ตารางมิลลิเมตร นำตัวอย่างที่ค้างแต่ละขนาดไปชั่ง

2) การทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุสำหรับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ และเล็กกว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) อาจทำได้ 2 วิธี

**วิธีที่** 1

- ถ้าตัวอย่างมีส่วนละเอียดจับก้อนใหญ่ หรือมีส่วนละเอียดจับกันเป็นก้อนต้องทำให้ส่วนละเอียดหลุดออกจากก้อนใหญ่ และส่วนละเอียดที่จับกันเป็นก้อนหลุดออกจากกันให้หมด โดยใช้ค้อนยางทุบ แล้วนำตัวอย่างไปเขย่าในตะแกรงขนาดเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) เพื่อแยกส่วนที่ค้างและผ่านตะแกรง ถ้าตัวอย่างมีมากให้แบ่งทำหลายๆ ครั้ง
- นำส่วนที่ค้างตะแกรงขนาดเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส ชั่งหามวลของตัวอย่างแห้ง หรือจะหาความชื้นของตัวอย่างเพื่อคำนวณหามวลของตัวอย่างแห้งก็ได้ แล้วนำตัวอย่างไปเขย่าในตะแกรงขนาดต่างๆ ตามต้องการ

**วิธีที่** 2

- นำตัวอย่างทั้งหมดที่ได้ ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ±5 องศาเซลเซียส ชั่งหามวลของตัวอย่างแห้ง หรือจะหาความชื้นของตัวอย่าง เพื่อคำนวณหามวลของตัวอย่างแห้ง แล้วจึงนำตัวอย่างไปดำเนินการทดลองตามข้อ 1) ถ้ามีขนาดก้อนใหญ่มากควรจัดตะแกรงที่จะล้างให้มีขนาดต่างๆ ลดหลั่นกัน

### 3.2.2 **การทดสอบหาค่า** Liquid Limit (LL) (**มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล. – ท.** 102/2515)

**วิธีการทดสอบ**

1) ให้ตรวจสอบเครื่องมือทดลอง Liquid Limit ดังนี้

- เครื่องมือทดลองต้องอยู่ในสภาพดีและมีขนาดถูกต้อง
- สลักยึดถ้วยกระทะต้องไม่สึกหรอจนถ้วยกระทะเอียง
- สกรูยึดถ้วยกระทะจะต้องแน่น
- แนวปาดดินในถ้วยกระทะจะต้องไม่สึกเป็นร่อง
- ทำการตรวจสอบเครื่องมือปาดร่องดินบ่อยๆ เพื่อให้แน่ใจว่าความกว้างของ เครื่องมือนี้ยังถูกต้องตามมาตรฐาน
- ตรวจสอบความสูงของถ้วยกระทะที่จะยกขึ้น โดยใช้ด้ามของ เครื่องมือปาดร่องดิน ซึ่งมีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 มิลลิเมตร วัดระยะตกของถ้วยกระทะให้ได้ 10 มิลลิเมตร ถ้าไม่ถูกต้องให้ปรับโดยคลายสกรูยึดถ้วยกระทะให้หลวมเสียก่อน ปล่อยให้ถ้วยกระทะขยับวางลงบนที่วัดแล้วจึงขันสกรูยึดให้แน่นดังเดิม หมุนที่หมุนถ้วยกระทะเร็วๆ หลายๆ ครั้ง เมื่อได้ยินเสียง "แก๊ก" เบาๆ แสดงว่าการตั้งถูกต้องแล้ว แต่ถ้าถ้วยกระทะยังคงสูงขึ้นไปอีกหรือไม่ได้ยินเสียง "แก๊ก" เลย จะต้องปรับเครื่องมือใหม่

2) นำตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมไว้มาเทบนแผ่นกระจก ผสมกันให้ทั่วแล้วแต่งเป็นรูปกรวย ใช้มีดปาด (Spatula) กดยอดทรงกรวย แล้วหมุนมีดปาดจนครบรอบ เพื่อทำให้กองวัสดุตัวอย่างแบนราบลงใช้มีดปาดแบ่งตัวอย่างเป็น 4 ส่วนด้วยวิธี Quartering นำส่วนตรงกันข้ามรวมกันเพื่อทดลองส่วนที่เหลือเก็บไว้ใช้ทดลองเพิ่มเติม ถ้าต้องการภายหลัง

3) นำตัวอย่างที่แบ่งมานี้ผสมกับน้ำในถ้วยกระเบื้องเคลือบ หรือบนกระจก เติมน้ำลงประมาณ 15- 20 มิลลิลิตร ใช้ Spatula ผสมไปมา และบี้จนกระทั่งดินและน้ำผสมทั่วกันแล้วเพิ่มน้ำอีกครั้ง ครั้งละประมาณ 1- 3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันจนทั่ว ใช้เวลาในการผสมทั้งหมด 5- 10 นาที

4) เมื่อผสมน้ำและคลุกจนทั่วแล้ว กะประมาณให้เคาะได้ประมาณ 40 ครั้ง นำตัวอย่างใส่ในถ้วยกระเบื้องเคลือบ ใช้แผ่นกระจกปิดข้างบน ตั้งทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 50 นาที และไม่เกิน 1 ชั่วโมง เพื่อให้ส่วนที่เป็นดินเหนียว ดูดซึมน้ำจนทั่ว

5) นำตัวอย่างใส่ลงตรงกลางถ้วยกระทะ ใช้ Spatula กดและปาดดินโดยพยายามปาดให้น้อยครั้งที่สุดและป้องกันไม่ให้มีฟองอากาศอยู่ข้างใน ให้ดินตรงกลางถ้วยกระทะหนา 10 มิลลิเมตร แล้วนำตัวอย่างที่เหลือกลับมาเก็บในถ้วยกระเบื้องเคลือบอย่างเดิม

6) จับถ้วยกระทะให้แน่นใช้เครื่องมือปาดร่องดินตัวอย่างให้เป็นร่องตรงกลางให้ได้ร่องที่สะอาดและเรียบร้อย ในกรณีที่ตัวอย่างค่อนข้างแข็งหรือมี Plasticity Index (PI) ต่ำ การกดเครื่องมือปาดร่องดินลงไปอาจจะทำให้ตัวอย่างทางด้านปลายฉีกหลุดหรือดินเคลื่อนออกจากกัน ดังนั้นให้ค่อยๆปาดจากหน้าไปหลังและหลังไปหน้า กลับไปกลับมาหลายๆ ครั้ง แต่ต้องไม่เกิน 6 ครั้ง และค่อยๆ ปาดเป็นร่องลึกลงไปเรื่อยๆ จนครั้งสุดท้ายแตะก้นถ้วยพอดี และได้ร่องดินที่สะอาดเรียบร้อย

7) หมุนเคาะถ้วยกระทะด้วยอัตรา 2 ครั้งต่อวินาที จนกระทั่งดินเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันเป็นระยะยาว 12.7 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองนับตั้งแต่ใส่ตัวอย่างลงในถ้วยกระทะจนกระทั่งเคาะเสร็จจะต้องไม่เกิน 3 นาที

8) ถ้าไม่แน่ใจว่าการทดลองในข้อ 7) ถูกต้อง ให้ทำการตรวจสอบ โดยรีบนำตัวอย่างมาผสมกันใหม่โดยเร็ว แล้วนำกลับไปทดลองใหม่ ถ้าการเคาะในครั้งนี้นับจำนวนครั้งได้เท่าเดิมหรือต่างกันหนึ่งครั้ง ถือว่าการทดลองถูกต้อง แต่ถ้าผิดกันมากกว่านั้น จะต้องนำเอาตัวอย่างมาผสมกันใหม่เพื่อให้น้ำได้ผสมกับตัวอย่างจนทั่ว แล้วนำมาทดลองอีกครั้งหนึ่ง การตรวจสอบนี้จะมีความสำคัญมากในช่วงที่ใส่น้ำลงไปมากๆ และตัวอย่างมี PI สูงเพราะตัวอย่างดูดซึมน้ำยังไมเต็มที่ขณะทำการทดลองและยังคงดูดซึมน้ำอยู่ตลอดเวลา จึงทำการทดลองมีค่าแตกต่างกัน

9) ทันทีที่เคาะจนตัวอย่างเคลื่อนที่มาสัมผัสกันยาว 12.7 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) ให้ใช้ช้อนตักตัวอย่างผ่านตรงที่ตัวอย่างเคลื่อนที่มาสัมผัสกันตลอดแนวความกว้างของตัวอย่างที่ตั้งฉากกับร่องตัวอย่างเอาตัวอย่างใส่กระป๋องปิดฝาให้แน่น แล้วนำไปชั่งหามวล และจดจำนวนครั้งที่เคาะไว้

10) รวมตัวอย่างจากถ้วยกระทะมาใส่ในถ้วยกระเบื้องเคลือบตามเดิม (หรือบนแผ่นกระจกแล้วแต่กรณี) เติมน้ำลงไปผสมให้เข้ากัน แล้วดำเนินการทดลองตามข้อ 5) ถึง 9)

11) ทำการทดลอง 4 จุด แต่ละจุดให้การเคาะต่างกันประมาณ 5-7 ครั้ง และจุดต่างๆควรอยู่ระหว่างช่วงดังต่อไปนี้

จุดที่ 1 ช่วงการเคาะ 35-40 ครั้ง

จุดที่ 2 ช่วงการเคาะ 25-35 ครั้ง

จุดที่ 3 ช่วงการเคาะ 20-30 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุดที่ 4 ช่วงการเคาะ 15-25 ครั้ง

การทดลองที่เคาะนอกช่วง 15-40 ใช้ไม่ได้

12) ถ้าหากตัวอย่างเปียกเพราะเติมน้ำมากเกินไป แล้วต้องการให้ตัวอย่างแห้งขึ้นให้เกลี่ยตัวอย่างบางๆ บนแผ่นกระจกหรือในถ้วยกระเบื้องเคลือบ ผึ่งลมไว้ชั่วครู่ แล้วทำการคลุกผสมกันใหม่ทำเช่นนี้หลายๆ ครั้ง จนกว่าตัวอย่างจะแห้งตามที่ต้องการ แต่อย่าผึ่งตัวอย่างทิ้งไว้จนผิวหน้าแข็งเป็นคราบขึ้นที่ผิวหน้า ห้ามใช้วิธีเอาตัวอย่างใหม่มาผสมเพิ่มลงไปเพื่อให้ตัวอย่างแห้งขึ้น

13) ตัวอย่างที่ใส่กระป๋อง หลังจากชั่งหามวลแล้ว (ให้ชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม) นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส อบจนแห้งและมีน้ำหนักคงที่แล้วนำออกจากเตาอบทิ้งไว้จนเย็นแล้วชั่ง มวลอบแห้ง คำนวณหาปริมาณน้ำในดิน (Water Content) ของตัวอย่างแต่ละจุด

14) ค่า Liquid Limit ของตัวอย่าง คือ ค่าความชื้นของดินที่ให้ค่าการเคาะเท่ากับ 25 ครั้ง

3.2.3 **การทดสอบหาค่า** Plastic Limit (PL) **(มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล. – ท. 103/2515)**

**วิธีการทดสอบ**

1) นำตัวอย่างประมาณ 8 กรัม มาคลุกให้เข้ากันจนทั่ว แล้วทำเป็นรูปยาววรี (Ellipsoidal Shape)

2) ใช้นิ้วมือคลึงตัวอย่างออกเป็นเส้น โดยใช้น้ำหนักกดลงแต่เพียงพอดีในอัตราการคลึง 80 ถึง 90 เที่ยวต่อนาที (คลึงไปและกลับนับเป็น 1 เที่ยว) ให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นตัวอย่างโตสม่ำเสมอกันโดยตลอด เส้นตัวอย่างจะค่อยๆ ยาวออกและเส้นผ่านศูนย์กลางจะค่อยๆเล็กลง

3) เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นตัวอย่างเล็กลงจนเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) และเส้นตัวอย่างแตกพอดี ให้ดำเนินการตามข้อ 1)

4) ถ้าเส้นตัวอย่างยังไม่แตก เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นตัวอย่างเล็กลงถึง 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) ให้หักเส้นตัวอย่างออกเป็นหกหรือแปดชิ้น ใช้นิ้วขยำทั้งสองมือจนเข้ากันดีแต่งเป็นรูปยาววรีคลึงใหม่เช่นเดียวกับข้อ 2)

5) ถ้าดำเนินการตามข้อ 4) แล้วเส้นตัวอย่างยังคงไม่แตก ให้ดำเนินการตามข้อ 4) ซ้ำใหม่จนกระทั่งเส้นตัวอย่างแตก ไม่สามารถคลึงต่อไปได้

6) ถ้าการแตกของเส้นตัวอย่างตามข้อ 5) เกิดขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดโตกว่า 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) และเส้นตัวอย่างนั้นเคยคลึงได้ขนาด 3.2 มิลลิเมตร มาก่อนแล้วให้ดำเนินการตามข้อ 11) ได้

7) การแตกของเส้นตัวอย่าง จะแสดงลักษณะผิดแผกกันไปสุดแล้วแต่ชนิดของดิน ดินบางชนิดอาจจะแตกออกเป็นก้อนเล็กๆ จำนวนมาก บางชนิดอาจแตกออกเป็นลักษณะทรงกระบอก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยเริ่มต้นแตกปริออกจากปลายทั้งสองข้างก่อน แล้วจึงแตกติดต่อไปตรงกลาง จนในที่สุดเส้นตัวอย่างจะแตกออกเป็นชิ้นบางๆ เล็กๆ หรืออาจจะแตกในลักษณะอื่นๆ

8) การปฏิบัติตามข้อ 4) สำหรับดินที่เหนียวมากในการคลึงให้เป็นเส้นแต่ละครั้งการคลึงครั้งหลังๆ จำเป็นต้องเพิ่มน้ำหนักมากขึ้น ตัวอย่างดินชนิดนี้เมื่อแตกจะแตกออกเป็นปล้องๆ มีความยาว 6 -10 มิลลิเมตร (1/4 -3/8 นิ้ว)

9) ในการคลึงแต่ละครั้งตามข้อ 4) ห้ามเปลี่ยนอัตราเร็ว หรือเปลี่ยนน้ำหนักการคลึง หรือเปลี่ยนทั้งสองอย่าง เพื่อต้องการให้เส้นตัวอย่างแตกที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร

10) สำหรับตัวอย่างที่มี Plasticity น้อยๆ ในครั้งแรกควรทำดินตัวอย่างให้มีรูปร่างยาวรีและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า 3.2 มิลลิเมตร เล็กน้อย

11) รวบรวมตัวอย่างที่แตกทั้งหมดใส่ลงในกระป๋องปิดฝารีบนำไปชั่งแล้วบันทึกมวลไว้และเอาไปอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 110 ±5 องศาเซลเซียส นำไปชั่ง บันทึกมวลดินแห้ง หามวลที่หายไป และถือว่าเป็นมวลของน้ำ

12) ให้ทำการทดลองตัวอย่าง จะทดลองตัวอย่างอย่างน้อย 2 ครั้ง แต่ผลต่างของค่า Plastic Limit (PL) จะต้องไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์

### 3.2.4 การทดสอบ Compaction test แบบสูงกว่ามาตรฐาน (มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล. – ท. 108/2517)

**วิธีการทดสอบ**

นำตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้แล้วมาคลุกเคล้าจนเข้ากันดี

1) เติมน้ำจำนวนหนึ่ง โดยปกติมักเริ่มต้นที่ประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ต่ำกว่าปริมาณน้ำในดินที่ให้ ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content)

2) คลุกเคล้าตัวอย่างที่เติมน้ำแล้วด้วยมือ หรือนำเข้าเครื่องผสมจนเข้ากันดี

3) แบ่งตัวอย่างใส่ลงในแบบซึ่งมีปลอกสวมเรียบร้อย โดยให้ดินแต่ละชั้น เมื่อบดทับแล้วมีความสูงประมาณ 1ใน3 ของ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว)

4) ทำการบดทับด้วยค้อนจำนวน 25 ครั้ง

5) ดำเนินการบดทับจนได้ตัวอย่างที่ทำการบดทับแล้วเป็นชั้นๆ จำนวน 3 ชั้น มีความสูงประมาณ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว) (สูงกว่าแบบประมาณ 10 มิลลิเมตร)

6) ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดแต่งหน้าให้เรียบเท่าระดับตอนบนของแบบ (เหลือความสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร) กรณีมีหลุมบนหน้า ให้เติมตัวอย่าง ใช้ค้อนทุบให้แน่นพอควรแล้วนำไปชั่ง จะได้มวลของดินตัวอย่าง และมวลของแบบ หักมวลของแบบออกก็จะได้มวลของดินตัวอย่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7) ในขณะเดียวกับที่ทำการบดทับตัวอย่างในแบบ ให้นำดินใส่กระป๋องอบดิน เพื่อนำไปทดลองหาปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ มวลดินที่นำไปหาปริมาณน้ำในดินให้ใช้ดังนี้

- ขนาดก้อนใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 300 กรัม
- ขนาดก้อนใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 100 กรัม

8) คำนวณหาค่าความหนาแน่นเปียก (Wet Density) และค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) เมื่อทราบปริมาณน้ำในดิน (Moisture Content)

9) ดำเนินการตามข้อ 1) ถึงข้อ 9) โดยเพิ่มปริมาณน้ำในดินขึ้นอีกครั้งละ 2% จนกว่าจะได้ความหนาแน่นลดลงจึงหยุดการทดลองหรืออาจลดน้ำที่ผสม ในกรณีที่เมื่อเพิ่มน้ำแล้วได้ควหนาแน่นลด ลง เพื่อให้เขียน Compaction Curve ได้

10) เขียน Compation Curve ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ ก็จะทราบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) และปริมาณน้ำในดินที่ให้ควาหนาแน่นแห้งสูงสุด (Optimum Moisture Content)

### 3.2.5 การทดสอบหาค่า California Baring Ratio (CBR) แบบแช่น้ำ (Soaked) (มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล. – ท. 109/2517)

**วิธีการทดสอบ**

1) การเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดลอง

- นำตัวอย่างที่เตรียมไว้แล้วมาคลุกเคล้าจนเข้ากันดีโดยใช้ปริมาณน้ำ จากการทดลอ Compaction Test ที่ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content)
- คลุกเคล้าตัวอย่างที่เติมน้ำแล้ว หรือนำเข้าเครื่องผสมจนเข้ากันดี
- นำแท่งโลหะรองใส่ลงในแบบ ซึ่งสวมปลอกเรียบร้อยแล้วและใส่กระดาษกรองลงบนแท่งโลหะรอง
- แบ่งตัวอย่างใส่ลงในแบบ โดยประมาณให้ตัวอย่างแต่ละชั้นเมื่อบดทับแล้วมีความสูงประมาณ 1 ใน 5 ของ 127.0 มิลลิเมตร (5 นิ้ว)
- ทำการบดทับโดยใช้ค้อนจำนวน 12 ครั้ง โดยเฉลี่ยการบดทับให้สม่ำเสมอเต็มหน้าที่บทับ
- ดำเนินการบดทับจนได้ตัวอย่างที่ทำการบดทับแล้วเป็นชั้นๆ จำนวน 5 ชั้น มีความสูงประมาณ 127.0 มิลลิเมตร (5 นิ้ว) หรือสูงกว่าแบบประมาณ 10.0 มิลลิเมตร
- ถอดปลอก (Collar) ออก ใช้เหล็กปาดแต่งหน้าให้เรียบเท่าระดับตอนบนของแบบ (เหลือความสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร) กรณีมีหลุมบนหน้าให้เติมตัวอย่างใช้เหล็กปาดวางทับแล้วใช้ค้อนยางทุบจนกระทั่งเหล็กปาดยุบลงถึงขอบแบบ

- คลายสกรูที่ยึดระหว่างแผ่นฐาน (Base Plate) และแบบ ยกแบบพร้อมตัวอย่างที่บดทับแล้วออก นำแท่งโลหะรองออกจากแผ่นฐาน วางกระดาษกรองแผ่นใหม่ลงบนแผ่นฐานพลิกแบบโดยให้ด้านล่างของแบบอยู่ด้านบน นำเข้าประกอบกับแผ่นฐานขันสกรูและใส่ปลอกเข้าที่ ก็จะได้ตัวอย่างที่เตรียมไว้ สำหรับทำการทดลองเพื่อหาค่า CBR ต่อไป ทำการเตรียมตัวอย่างอีก 2 ตัวอย่าง โดยทำการบดทับแต่ละชั้นด้วยค้อนจำนวน 25 ครั้งและ 56 ครั้ง ตามวิธีการข้างต้นก็จะได้ตัวอย่างทั้งสิ้น 3 ตัวอย่าง โดยมีค่าการบดทับเท่ากับ 12 ครั้ง 25 ครั้ง และ 56 ครั้ง ต่อชั้น

2) การหาความหนาแน่นในการบดทับและปริมาณน้ำในดิน

- นำตัวอย่างพร้อมแบบที่เตรียมไว้จากข้อ 1) ไปชั่งจะได้มวลของตัวอย่างและมวลของแบบ หักมวลของแบบออกก็จะได้มวลของตัวอย่างเปียก

- ในขณะเดียวกับที่ทำการบดทับตัวอย่างในแบบ ตามข้อ 1) ให้นำตัวอย่างใส่กระป๋องอบตัวอย่าง เพื่อนำไปทดลองหาปริมาณน้ำในดินด้วย มวลตัวอย่างที่นำไปหาปริมาณน้ำในดินใช้ดังนี้

- ขนาดก้อนใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 300 กรัม
- ขนาดก้อนใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 100 กรัม

- คำนวณหาค่าความหนาแน่นเปียก (Wet Density) และค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) เมื่อทราบปริมาณน้ำในดิน (Moisture Content)

3) การหาค่าการขยายตัว (Swell)

- นำแผ่นวัดการขยายตัว (Swell Plate) พร้อมแผ่นถ่วงน้ำหนักจำนวน 2 อัน สำหรับวัสดุพื้นทาง (Base) วัสดุรองพื้นทาง (Subbase) และวัสดุคัดเลือก (Selected Materials) และ 3 อัน สำหรับวัสดุดินเดิม (Subgrade) วางลงบนตัวอย่างที่เตรียมไว้แล้วตามข้อ 1) ให้แนบสนิทกับตัวอย่าง โดยขยับไปมา แล้วนำลงแช่ในน้ำให้ท่วมตัวอย่างให้หมด วางก้านสามขา (Tripod) ลงบนปลอกของแบบจัดให้ก้านของ Dial Gauge อยู่กึ่งกลางบนก้านของแผ่นวัดการขยายตัว จดค่าเริ่มต้น(Initial Reading) ที่อ่านได้จาก Dial Gauge แช่น้ำทิ้งไว้ บันทึกวันและเวลาที่อ่านค่าบ Dial Gauge และอ่านค่าบน Dial Gauge ทุกๆวัน เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การขยายตัว (Swell) ในการอ่านค่าบน Dial Gauge แต่ละครั้ง ถ้าจำเป็นต้องตั้งสามขาใหม่ ให้พยายามตั้งให้ขาของสามขาและแกนของ Dial Gauge อยู่ที่เดิมเช่นเดียวกับการอ่านค่าเริ่มต้น โดยทำเครื่องหมายไว้บนปลอก

- เมื่อครบกำหนด 4 วัน ถึงแม้ว่าการขยายตัวยังเพิ่มอยู่เรื่อยๆ เช่น ดินเหนียวหรืออาจจะเร็วกว่า 4 วัน เมื่อปรากฏว่าไม่มีการขยายตัว เช่น ทราย (เมื่ออ่านค่าการขยายตัวแต่ละวันแล้ว) ให้นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ยกแผ่นวัดการขยายตัวพร้อมแผ่นถ่วงน้ำหนักออกตะแคงแบบให้น้ำไหลประมาณ 15 นาที ระวังอย่าให้ผิวหน้าของตัวอย่างเสียหาย โดยเฉพาะวัสดุจำพวกวัสดุมวล

ละเอียด(Granular Material) เสร็จแล้วทำการชั่งหามวล เมื่อหักมวลของแบบออกก็จะทราบมวลตัวอย่างภายหลังแช่ น้ำแล้ว นำตัวอย่างเตรียมไว้เพื่อทดลอง Penetration Test ต่อไปโดยทันที

4) การทดลอง Penetration Test เพื่อหาค่า CBR

- นำตัวอย่างมาใส่แผ่นถ่วงน้ำหนักจำนวน 2 อัน สำหรับวัสดุพื้นทาง (Base) วัสดุรองพื้นทาง (Subbase) และวัสดุคัดเลือก (Selected Materials) และ 3 อันสำหรับวัสดุ Subgrade ลงบนตัวอย่าง

- นำตัวอย่างขึ้นตั้งบนที่ตั้งของเครื่องกด ตั้งให้ท่อนกดอยู่ตรงพอดีกับกึ่งกลางรูของแผ่นถ่วงน้ำหนัก

- หมุนเครื่องหรือเดินเครื่องหรือปั๊ม ขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องกดให้แผ่นฐานเคลื่อนขึ้นหรือท่อนกดเครื่องลง จนท่อนกดสัมผัสกับผิวหน้าของตัวอย่าง มีแรงกดประมาณ 4 กิโลกรัม (40 นิวตัน) ตั้งหน้าปัดของ Proving Ring หรือหน้าปัดของเครื่องวัดแรงให้เป็นศูนย์ พร้อมทั้งตั้งหน้าปัดของ Dial Gauge ที่วัด Penetration ให้เป็นศูนย์ด้วย การที่ให้มีแรงกดประมาณ 4 กิโลกรัม (40 นิวตัน) เพื่อให้แน่ใจว่าท่อนกดได้สัมผัสผิวของตัวอย่าง และไม่นำมาคิดในการหาความเค้น (Stress)

- เพิ่มแรงลงบนท่อนกด ตามวิธีการของเครื่องกดนั้นๆ ด้วยอัตราเร็วที่สม่ำเสมอเท่ากับ 1.27 มิลลิเมตร (0.05 นิ้ว) ต่อนาที โดยการอ่าน Penetration Dial Gauge เทียบกับนาฬิกาจับเวลา

- ทำการบันทึกแรงกด เมื่อ Penetration อ่านได้ที่

- 0.63 มิลลิเมตร (0.025 นิ้ว)
- 1.27 มิลลิเมตร (0.050 นิ้ว)
- 1.90 มิลลิเมตร (0.075 นิ้ว)
- 2.54 มิลลิเมตร (0.100 นิ้ว)
- 3.17 มิลลิเมตร (0.125 นิ้ว)
- 3.81 มิลลิเมตร (0.150 นิ้ว)
- 4.44 มิลลิเมตร (0.175 นิ้ว)
- 5.08 มิลลิเมตร (0.200 นิ้ว)
- 6.35 มิลลิเมตร (0.250 นิ้ว)
- 7.62 มิลลิเมตร (0.300 นิ้ว)
- 8.89 มิลลิเมตร (0.350 นิ้ว)
- 10.16 มิลลิเมตร (0.400 นิ้ว)
- 11.43 มิลลิเมตร (0.450 นิ้ว)

- 12.70 มิลลิเมตร (0.500 นิ้ว)

- เสร็จแล้วคลายแรงที่กดออก นำตัวอย่างพร้อมแบบออกจากแท่นของเครื่องกด ยกแผ่นถ่วงน้ำหนักออก

- นำตัวอย่างบริเวณที่ถูกท่อนกด ๆ ลงไปเป็นรูไปหาปริมาณน้ำในดิน

- ดำเนินการทดลอง Penetration Test ของตัวอย่างที่เตรียมไว้ 2 ตัวอย่าง โดยวิธีเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว

- เขียนกราฟความสัมพันธ์ (Curve) ระหว่างแรงกด และระยะที่ท่อนกดจมลงในตัวอย่าง (Stress vs. Penetration) เพื่อหาค่า CBR ต่อไป

- เมื่อได้ค่า CBR ของแต่ละตัวอย่างแล้ว เขียนกราฟโค้ง (Curve) ระหว่างค่า CBR กับค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) เพื่อหาค่า CBR ที่เปอร์เซ็นต์ของการบดทับที่ต้องการต่อไป

### 3.2.6 การทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) (มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล. – ท. 105/2515)

**วิธีการทดสอบ**

1) โดยวิธีควบคุมความเครียด (Strain Control method)

- วางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นกลมอันล่างของเครื่องกด แล้วเลื่อนจนแผ่นกลมอันบนของเครื่องกดแตะกับผิวบนแท่งตัวอย่าง หมุนหน้าปัดของ Dial Gauge ที่ใช้อ่านระยะทางของการกดให้เข็มชี้ที่ศูนย์ กดแท่งตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคิดเป็นความเครียดในแนวดิ่ง 0.5 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที จดแรงกด และระยะเวลาตั้งแต่เริ่มให้แรงกดจนถึงแรงกดสูงสุด จะต้องไม่เกิน 10 นาที เพิ่มแรงกดต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงกดลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่า 20 เปอร์เซ็นต์ หาปริมาณน้ำในดินโดยนำแท่งตัวอย่างเข้าอบ

- เขียนรูปสภาพแท่งตัวอย่างที่ทดลองเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยแตกร้าววัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน

2) โดยวิธีควบคุมความเค้น (Stress Control method)

- ก่อนการทดลองให้ประมาณค่าแรงกดสูงสุดของแท่งตัวอย่างวางแท่งตัวอย่าง ไว้ตรงกลางแผ่นล่างของเครื่องกดเลื่อนจนแผ่นกลมอันบนแตะกับผิวบนของแท่งตัวอย่างแล้วตั้งศูนย์บนหน้าปัดที่ใช้อ่านระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่าง ใช้แรงกดเริ่มแรกบนแท่งตัวอย่างเท่ากับ 1/15 ถึง 1/10 ของแรงกดสูงสุดที่ได้ประมาณไว้แล้วทิ้งไว้ครึ่งนาที แล้วอ่านระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างเพิ่มแรงกดต่อไป เท่ากับแรงกดแรก แล้วทิ้งไว้ครึ่งนาทีเหมือนครั้งแรก ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้แรงกดสูงสุด หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่าเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ในระหว่างการเพิ่มแรงกด ถ้าสังเกตว่าจะต้องใส่แรงกดมากกว่า 15 ครั้ง หรือน้อยกว่า 10 ครั้ง เพื่อให้ได้แรงกดสูงสุดแล้ว

จะต้องรีบเปลี่ยนแรงกดแต่ละครั้งให้มากขึ้น หรือน้อยลงทันที ในการหาปริมาณน้ำในดินอาจหาจากดินทั้งแท่งที่ทดลองเสร็จแล้ว หรือส่วนของดินที่เป็นตัวแทนแท่งตัวอย่างก็ได้

### 3.2.7 การทดสอบ Durability โดยวิธี Wet and Dry (ASTM D599-03)

**วิธีการทดสอบ**

1) เตรียมวัสดุให้เป็นก้อนวัสดุวิธีเดียวกับ Compaction Test โดยมีการบ่มก้อนวัสดุไว้เป็นเวลา 7 วัน

2) จดน้ำหนักก้อนวัสดุหลังจากที่บ่มไว้เป็นเวลา 7 วัน

3) หลังจากบ่มไว้เป็นเวลา 7 วันแล้ว นำมาแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นจากน้ำ จดน้ำหนักของก้อนวัสดุหลังจากนำขึ้นจากน้ำ

4) นำก้อนวัสดุใส่เข้าไปในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 42 ชั่วโมง และนำวัสดุออก ชั่งน้ำหนักก้อนวัสดุหลังจากอบเรียบร้อยแล้ว

5) นำก้อนวัสดุมาแปรงโดยแปรงทองเหลือง โดยทำการแปรงดังนี้ ที่ผิวบนและล่างแปรง 2-4 ครั้ง ที่ผิวด้านรอบก้อนวัสดุ แปรงขึ้นลง 18-20 ครั้ง โดยแต่ละครั้งมีน้ำหนักเท่ากับ 13.3 นิวตัน หลังจากนั้นชั่งหาน้ำหนักของก้อนวัสดุ

6) ตั้งแต่ข้อ 3) ถึง ข้อ 5) ถือเป็นการครบ 1 รอบ โดยต้องทำทั้งหมด 12 รอบ

7) หลังจากทำครบ 12 รอบแล้ว นำไปเข้าตู้อบเพื่อหาน้ำหนักของก้อนวัสดุแห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส

8) นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมด ไปหาค่าความสึกหรอต่อไป โดยคำนวณมวลที่สูญเสียไปในแต่ละรอบของการทดสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

### 3.2.8 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุที่ไม่เกาะตัว (AASHTO T307)

**วิธีการทดสอบ**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุใช้การทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T307 โดยเป็นการทดสอบแบบให้แรงกระทำซ้ำในการทดสอบแบบสามแกน (Dynamic triaxial test) โดยมีแรงกระทำต่อวัสดุดังตารางที่ 3.1

เนื่องจากในการวิจัยนี้ใช้น้ำในการถ่ายความดันไปสู่ก้อนตัวอย่าง จึงต้องนำก้อนตัวอย่างมาสวมถุงยางกันน้ำ (Rubber membrane) และทำการทดสอบ โดยการอ่านค่าการยุบตัว (Deformation) และคืนตัว (Recover หรือ Rebound) ในการแนวดิ่งของก้อนตัวอย่างจาก LVDT เพื่อนำไปคำนวณหาค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่าง ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้ชุดอุปกรณ์ตู้รับแรงดัน ปั๊มลมและเครื่องให้แรงกดในแนวดิ่งแบบกระทำซ้ำ (Repeated-load actuator) รุ่น UTM-5P ของบริษัท IPC ซึ่งสามารถทำการคำนวณและแสดงค่าโมดูลัสคืนตัวที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบที่ให้แรงกระทำ รวมทั้งคำนวณหาค่าเฉลี่ยของโมดูลัสคืนตัวในแต่ละชุดค่าความเค้นที่กำหนดไว้ ค่าโมดูลัสคืนตัวสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.1

$$M_R = \sigma_D/\varepsilon_r \qquad (3.1)$$

เมื่อ $M_R$ = ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)

$\sigma_D$ = ความเค้นเพิ่มที่กระทำในแต่ละรอบ (Deviator stress)

$\varepsilon_r$ = ความเครียดที่คืนตัวได้ (Recoverable strain)

**ตารางที่** 3.1 ค่าความเค้นที่กระทำต่อก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง ตามวิธีการทดสอบ AASHTO T307

| Test sequence | Applied stress (kPa) | | |
|---|---|---|---|
| | Confining | Deviator | Seating |
| 0 | 103.4 | 93.1 | 10.3 |
| 1 | 20.7 | 18.6 | 2.1 |
| 2 | 20.7 | 37.3 | 4.1 |
| 3 | 20.7 | 55.9 | 6.2 |
| 4 | 34.5 | 31 | 3.5 |
| 5 | 34.5 | 62 | 6.9 |
| 6 | 34.5 | 93.1 | 10.3 |
| 7 | 68.9 | 62 | 6.9 |
| 8 | 68.9 | 124.1 | 13.8 |
| 9 | 68.9 | 186 | 20.7 |
| 10 | 103.4 | 62 | 6.9 |
| 11 | 103.4 | 93.1 | 10.3 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| Test sequence | Applied stress (kPa) | | |
|---|---|---|---|
| | Confining | Deviator | Seating |
| 12 | 103.4 | 186.1 | 20.7 |
| 13 | 137.9 | 93.1 | 10.3 |
| 14 | 137.9 | 124.1 | 13.8 |
| 15 | 137.9 | 248.2 | 27.6 |

หมายเหตุ

1. ในงานวิจัยนี้ให้แรงกระทำจำนวน 20 รอบต่อหนึ่งชุดความเค้น (Sequence) โดยมีช่วงให้แรงกระทำ (Load period) เท่ากับ 0.1 วินาที และช่วงพักระหว่างแรงกระทำ (Rest period) เท่ากับ 0.9 วินาที
2. Seating stress คือความเค้นในแนวดิ่งที่กระทำต่อก้อนตัวอย่างในช่วง Rest period
3. ชุดความเค้นที่ 0 (Sequence 0) เป็นการปรับสภาพก้อนตัวอย่าง (Conditioning) จะไม่นำผลมาคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัว

### 3.3 แหล่งวัสดุที่ใช้ในโครงการ

แหล่งของวัสดุที่ใช้ในโครงการนั้นอยู่ภายในเขตทางของทางหลวงหมายเลข 11 ในจังหวัดอุตรดิตถ์ซึ่งทางโครงการได้ดำเนินการเก็บวัสดุจาก 3 แหล่งดังแสดงในรูปที่ 3.2 ประกอบด้วย

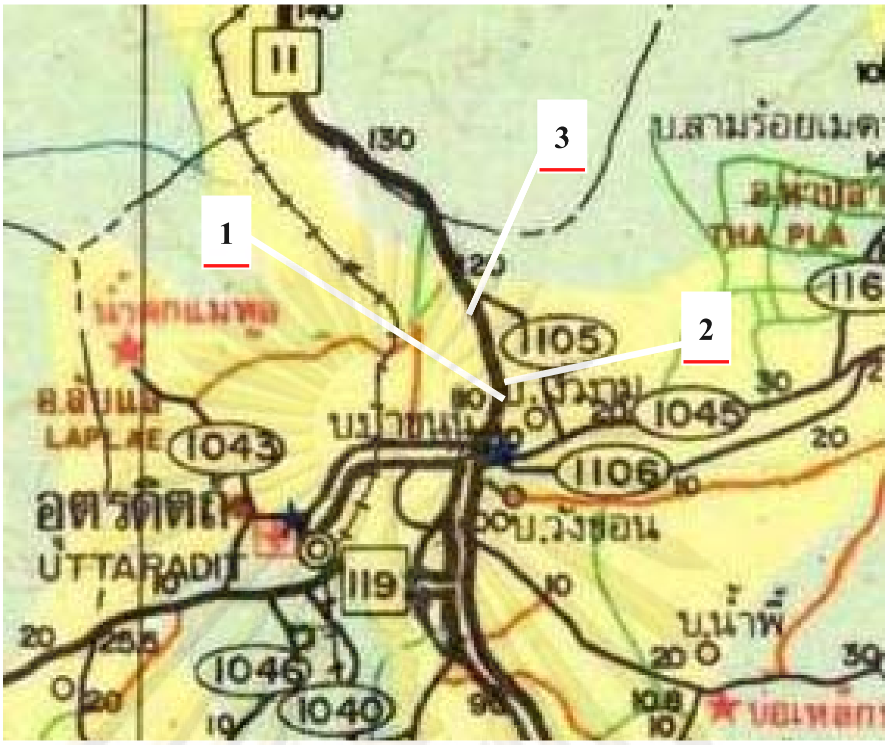
แหล่งที่ 1. ที่กม. 113+300 Rt.

แหล่งที่ 2. ที่กม. 114+000 Rt.

แหล่งที่ 3. ที่กม. 121+300 Lt.

โดยลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของวัสดุที่ได้จัดเก็บมานั้น เป็นหินผุที่เกิดจากการผุพังของหินตะกอน และสามารถจำแนกอยู่ในชั้นหินผุโซน IIA ที่เป็นชั้นหินผุที่สามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพได้ดีเพราะมีความแข็งพอสมควร ทั้งนี้เพราะชั้น IIA เป็นชั้นที่มีทั้งเนื้อดินและเนื้อหินผสมกันอยู่ ลักษณะหินของแหล่งวัสดุทั้งสามแหล่งนั้นเป็นภูเขาหินผุซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของภูเขา ในจังหวัดอุตรดิตถ์ซึ่งเป็นแหล่งวัสดุที่พบได้ง่าย ดังรูปที่ 3.3-3.8 แสดงแหล่งวัสดุและวัสดุที่ใช้ทดสอบ ของทั้ง 3 แหล่งตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่** 3.2 ที่ตั้งของแหล่งวัสดุ

**รูปที่** 3.3 แหล่งวัสดุแหล่งที่ 1 กม.113+300 Rt.

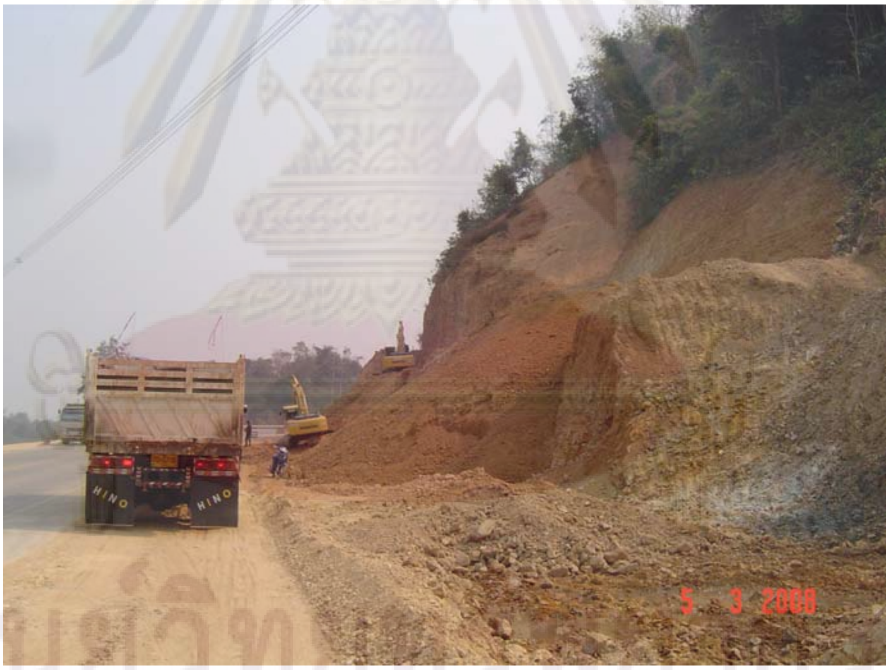
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**รูปที่** 3.4 วัสดุที่ใช้ทดสอบของแหล่งที่ 1

**รูปที่** 3.5 แหล่งวัสดุแหล่งที่ 2 กม. 114+000 Rt.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**รูปที่** 3.6 วัสดุที่ใช้ทดสอบของแหล่งที่ 2




**รูปที่** 3.7 แหล่งวัสดุแหล่งที่3 กม. 121+300 Lt.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**รูปที่** 3.8 วัสดุที่ใช้ทดสอบของแหล่งที่ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 4

# ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบโดยแบ่งผลการทดสอบออกเป็นสองช่วงคือ ผลการทดสอบของวัสดุหินผุ และผลการทดสอบของวัสดุหินผุหลังปรับปรุงคุณภาพ

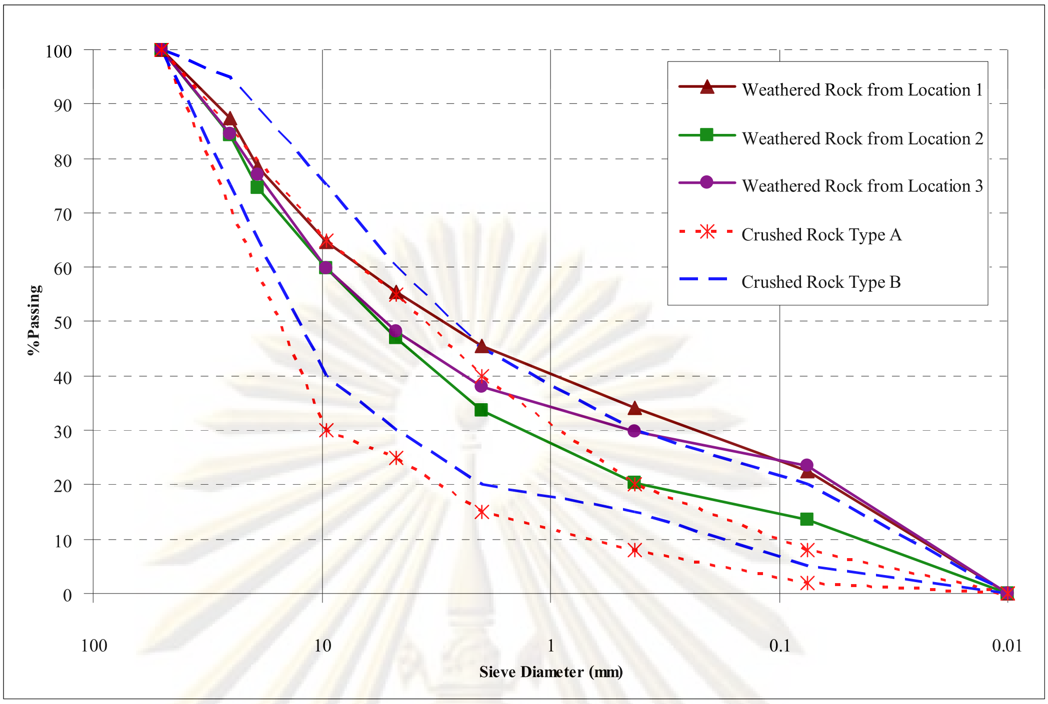
## 4.1 ผลการทดสอบหาขนาดคละของเม็ดวัสดุ

การทดสอบขนาดคละของวัสดุแสดงให้เห็นว่าวัสดุหินผุจากแหล่งที่หนึ่งและแหล่งที่สาม มีขนาดคละไม่ตรงตามมาตรฐานของชั้นพื้นทางประเภท A และ B เนื่องจากมีส่วนละเอียด (ปริมาณมวลของวัสดุที่ผ่านตะแกรง # 200) มากกว่ามาตรฐานในปริมาณที่มาก แต่วัสดุแหล่งที่สองนั้นมีขนาดคละที่ตรงตามมาตรฐานของชั้นพื้นทางประเภท B ดังแสดงตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ขนาดคละของเม็ดวัสดุหินผุจากทั้งสามแหล่ง

| **ขนาดตะแกรงร่อน (mm)** | **เปอร์เซ็นต์ผ่านของมวลวัสดุ** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **วัสดุชนิด A** | **วัสดุชนิด B** | **วัสดุแหล่งที่ 1** | **วัสดุแหล่งที่ 2** | **วัสดุแหล่งที่ 3** |
| 50 (2”) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 25 (1”) | - | - | 87.5 | 84.3 | 84.4 |
| 19 (3/4”) | - | - | 78.4 | 74.6 | 77.0 |
| 9.5 (3/8”) | 30 - 65 | 40 – 75 | 64.7 | 59.7 | 59.9 |
| 4.75 (#4) | - | - | 55.5 | 46.9 | 48.1 |
| 2 (#10) | 15 - 40 | 20 – 45 | 45.6 | 33.7 | 38.0 |
| 0.425 (#40) | 8 - 20 | 15 – 30 | 34.2 | 20.3 | 29.7 |
| 0.075 (#200) | 2 – 8 | 5 – 20 | 22.6 | 13.6 | 23.4 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่** 4.1 เปรียบเทียบขนาดคละของวัสดุกับมาตรฐานพื้นทาง

## 4.2 **การทดสอบ** Atterberg Limit

ผลการทดสอบพบว่าวัสดุทั้ง 3 แหล่งไม่ผ่านมาตรฐานของชั้นพื้นทางเนื่องจากมีความเป็น Plastic สูงเกินกว่ามาตรฐานจึงเป็นผลให้ค่า Liquid Limit (LL) และ Plastic Index (PI) สูงกว่ามาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 4.2

**ตารางที่** 4.2 ค่า Atterberg Limit ของหินผุทั้งสามแหล่ง เทียบกับมาตรฐานชั้นพื้นทาง

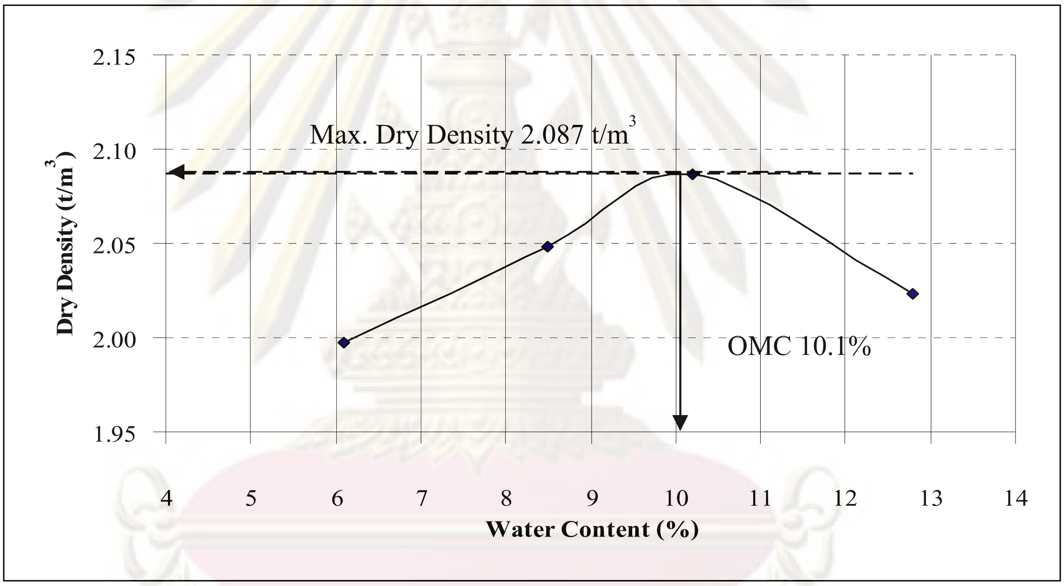
| | **มาตรฐาน** | **วัสดุแหล่งที่ 1** | **วัสดุแหล่งที่ 2** | **วัสดุแหล่งที่ 3** |
|---|---|---|---|---|
| Liquid Limit (LL) | □ 25 | 34.5 | 30.2 | 31.3 |
| Plastic Index (PI) | □ 6 | 13.5 | 8.4 | 9.3 |

ทั้งนี้จากการทดสอบเบื้องต้นทั้งสองการทดสอบที่ได้กล่าวมา ยังสามารถระบุได้อีกว่าหินผุทั้งสามแหล่ง นั้นจัดอยู่ในดินประเภท A-2-6 A-2-4 และ A-2-4 ตามการจัดจำแนกในระบบ AASHTO

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

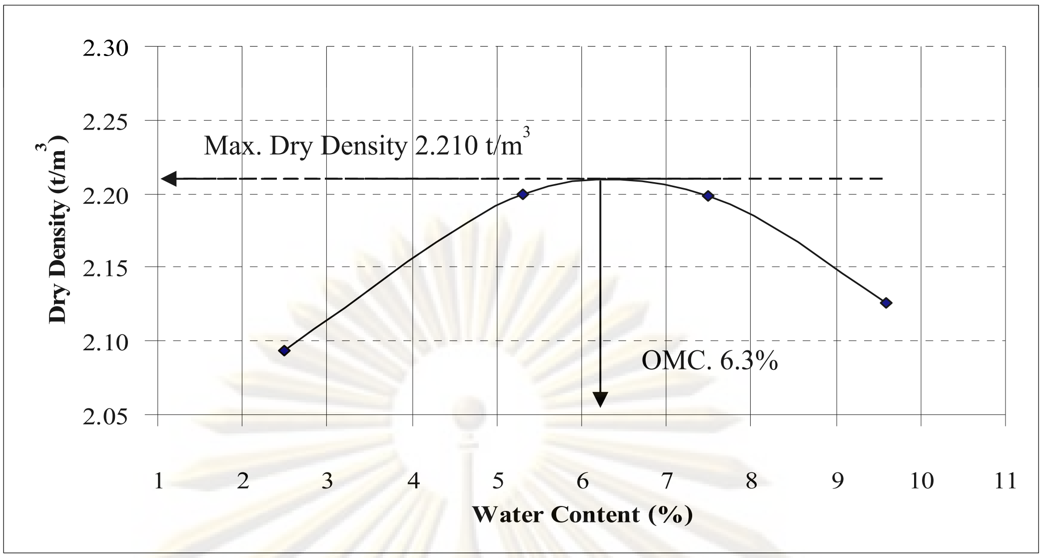
### 4.3 การทดสอบ การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

จากการทดสอบการบดอัด นั้นสามารถหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ของวัสดุทั้งสามแหล่งได้เท่ากับ 10.1 6.3 และ 12.1 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับและมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) เท่ากับ 2.087 t/$m^3$ 2.210 t/$m^3$ และ 2.010 t/$m^3$ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.4 ซึ่งเมื่อดูจากค่าปริมาณความชื้นสัมบูรณ์ (เป็นปริมาณความชื้นที่ใช้ในการผสมกับวัสดุปรับปรุง) จะสังเกตได้ว่าวัสดุหินผุจากแหล่งที่สองนั้นมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่ำ จึงอาจจะทำให้เมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์แล้วจะใช้ซีเมนตในการปรับปรุงปริมาณน้อยเนื่องจาก ใช้ปริมาณน้ำเป็นจำนวนน้อยในการผสมวัสดุปรับปรุง แลวัสดุหินผุจากแหล่งที่สามนั้นน่าจะมีแนวโน้มในการใช้ปริมาณซีเมนต์มากที่สุดเนื่องจากปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

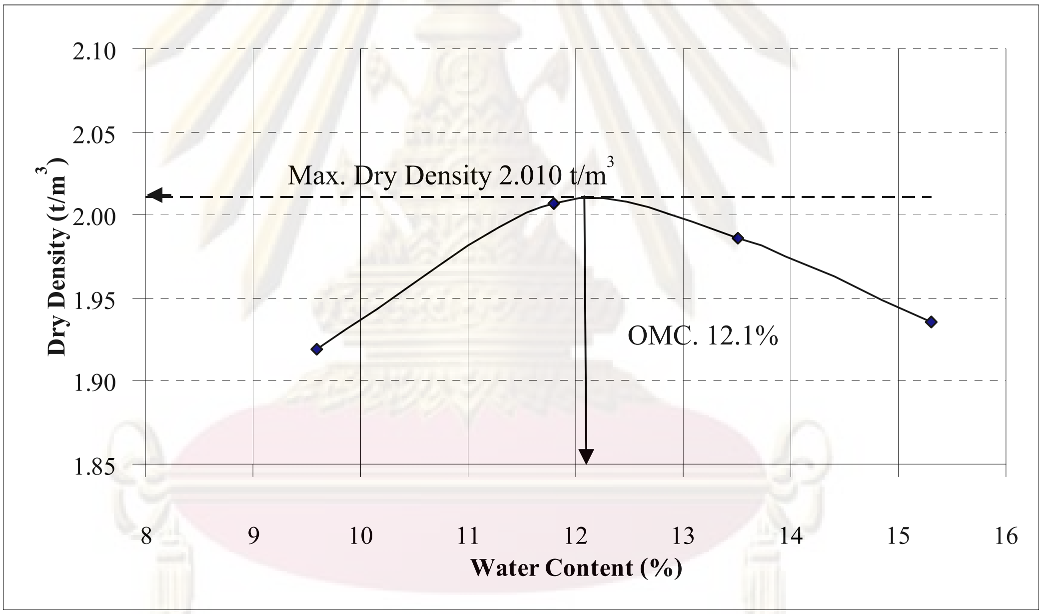



**รูปที่** 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุจากแหล่งที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



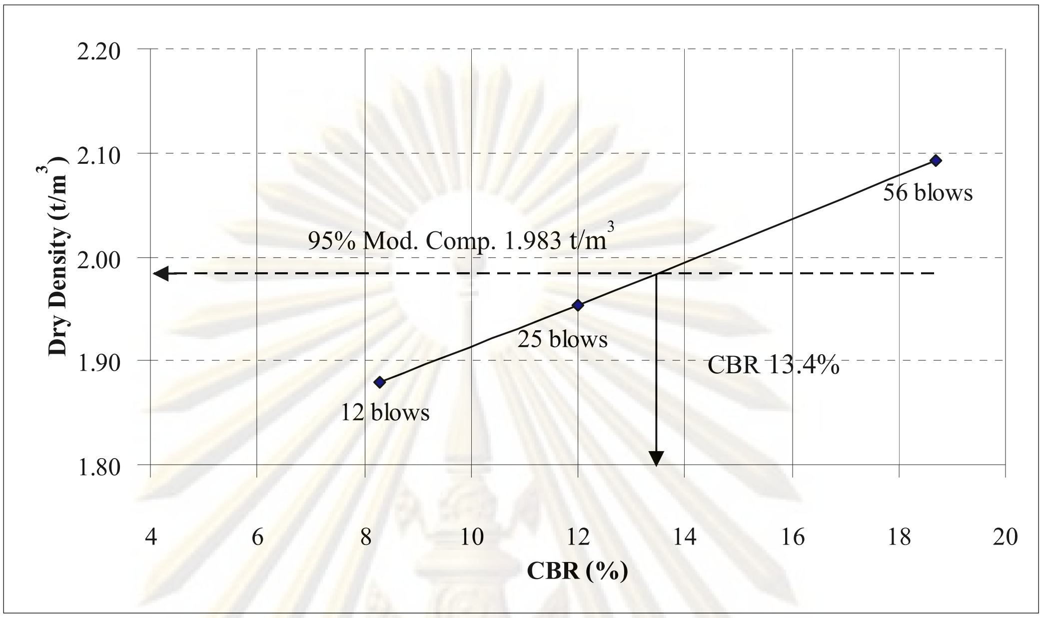

**รูปที่** 4.3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ของวัสดุจากแหล่งที่ 2



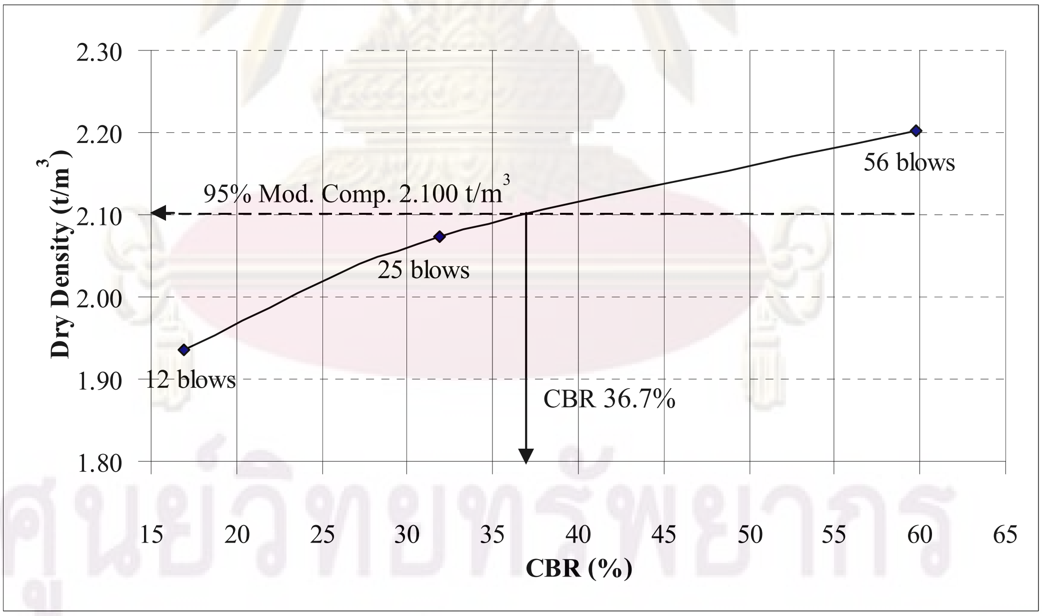

**รูปที่** 4.4 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ของวัสดุจากแหล่งที่ 3

### 4.4 **การทดสอบ** California Bearing Ratio (CBR)

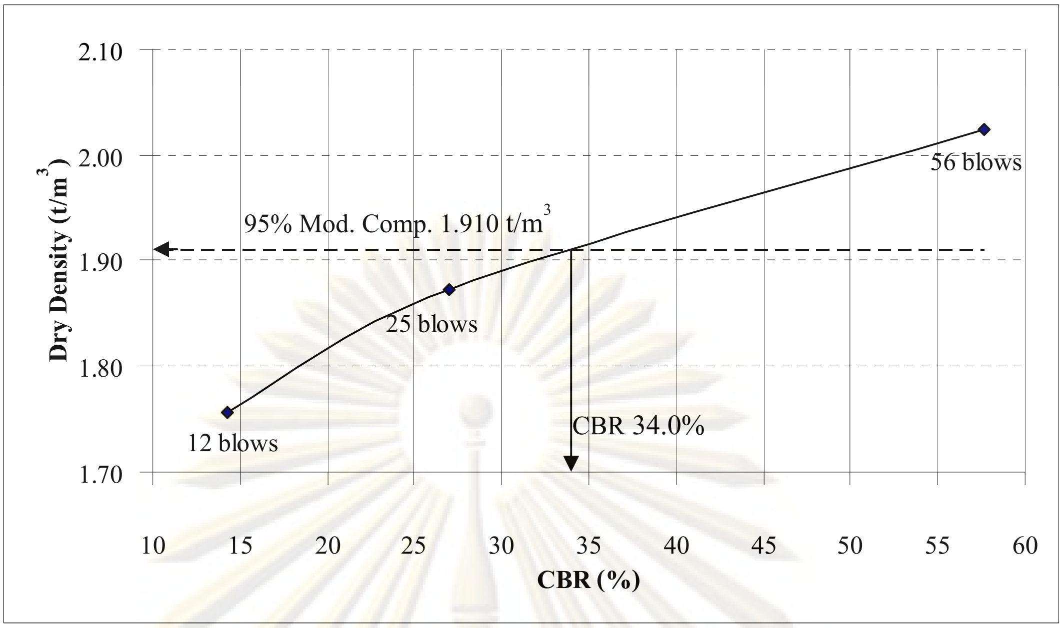
ในการทดสอบ CBR ของวัสดุทั้งสามแหล่งทดสอบโดยวัสดุจะถูกบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) จากการทดสอบ Compaction จึงทำการทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) โดยจากการทดสอบพบว่าค่า CBR ทั้งสามแหล่งเท่ากับ 13.4 36.7 และ 34.0 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานชั้นพื้นทาง ซึ่งจะต้องมีค่า CBR ไม่น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่า CBR ของวัสดุหินผุ




**รูปที่** 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density กับ CBR ของแหล่งที่ 1

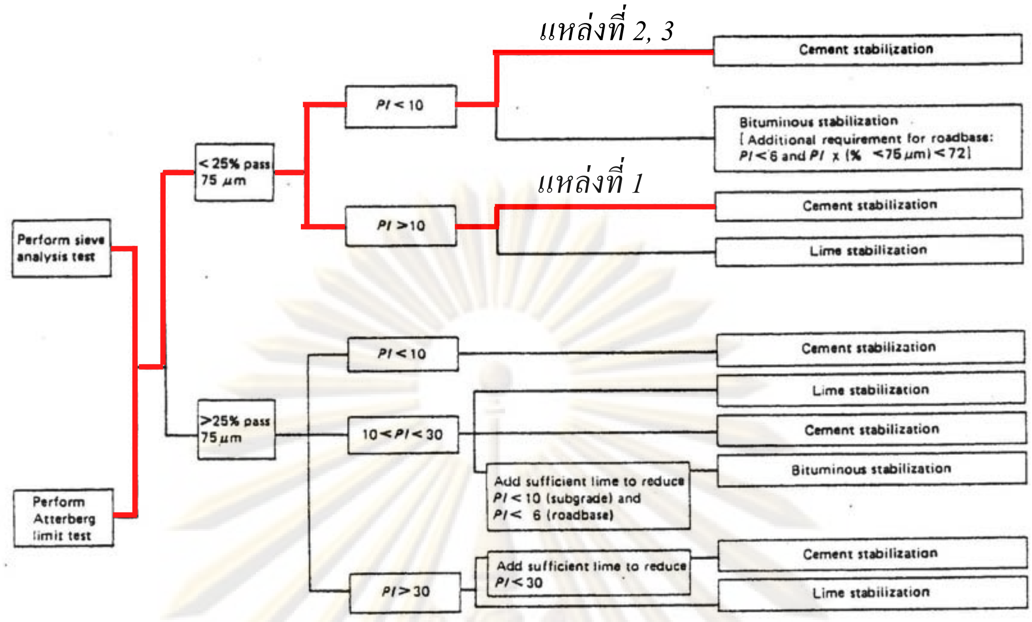



**รูปที่** 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density กับ CBR ของแหล่งที่ 2




**รูปที่** 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density กับ CBR ของแหล่งที่ 3

ดังนั้นการที่จะนำวัสดุหินผุจากทั้งสามแหล่งมาใช้เป็นชั้นพื้นทางได้จะต้องทำการปรับปรุงคุณภาพก่อน ซึ่งวิธีการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุนั้นได้เลือกวิธีการผสมซีเมนต์ เนื่องจากได้ทำการเลือกวิธีการปรับปรุงโดยใช้ วิธีที่ได้กล่าวมาแล้วตามหัวข้อที่ 2.3 กล่าวคือวัสดุทั้งสามแหล่งมีร้อยละที่ผ่านกระแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 25 และแหล่งที่ 2 และ 3 มีค่า PI น้อยกว่า 10 จึงเลือกวิธีการปรับปรุงโดยการเติมซีเมนต์ แต่แหล่งที่ 1 มีค่า PI มากกว่า 10 จึงสามารถเลือกได้ทั้งการปรับปรุงด้วยวิธีเติมซีเมนต์และวิธีเติมปูนขาว ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงเลือกวิธีการเติมซีเมนต์ในวัสดุทั้งสามแหล่งเนื่องจากจะทำให้สามารถนำวัสดุทั้งสามแหล่งมาเปรียบเทียบเชิงวิศวกรรมได้ดังรูปที่ 4.8

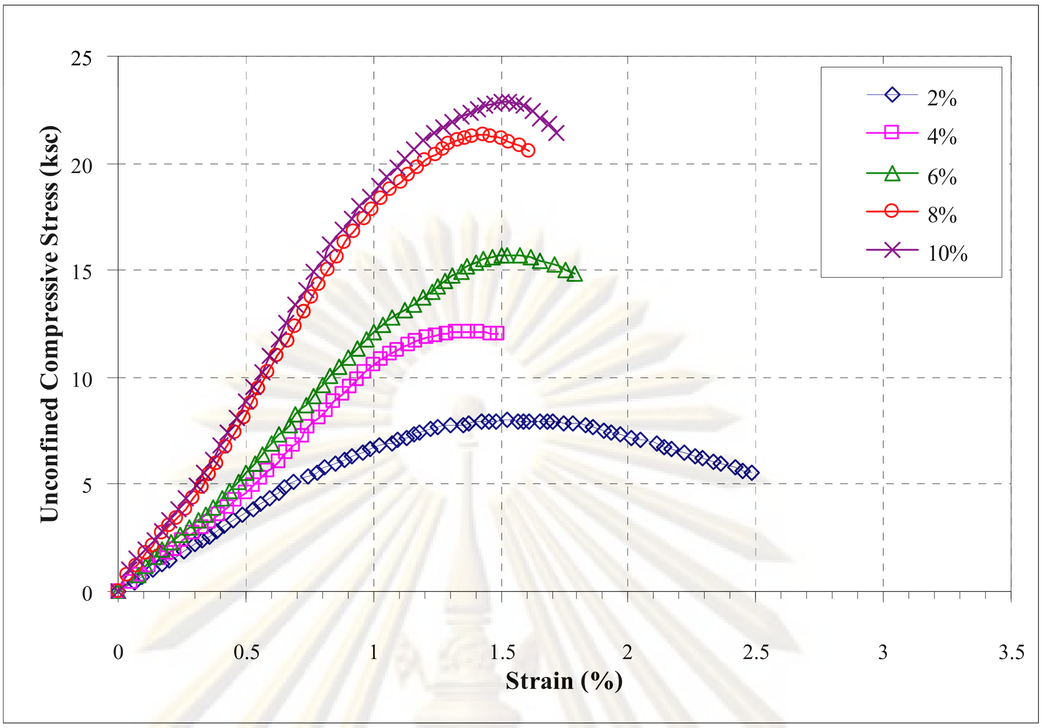



**รูปที่** 4.8 การเลือกวิธีการปรับปรุง (U.S. Air Force, 2004)

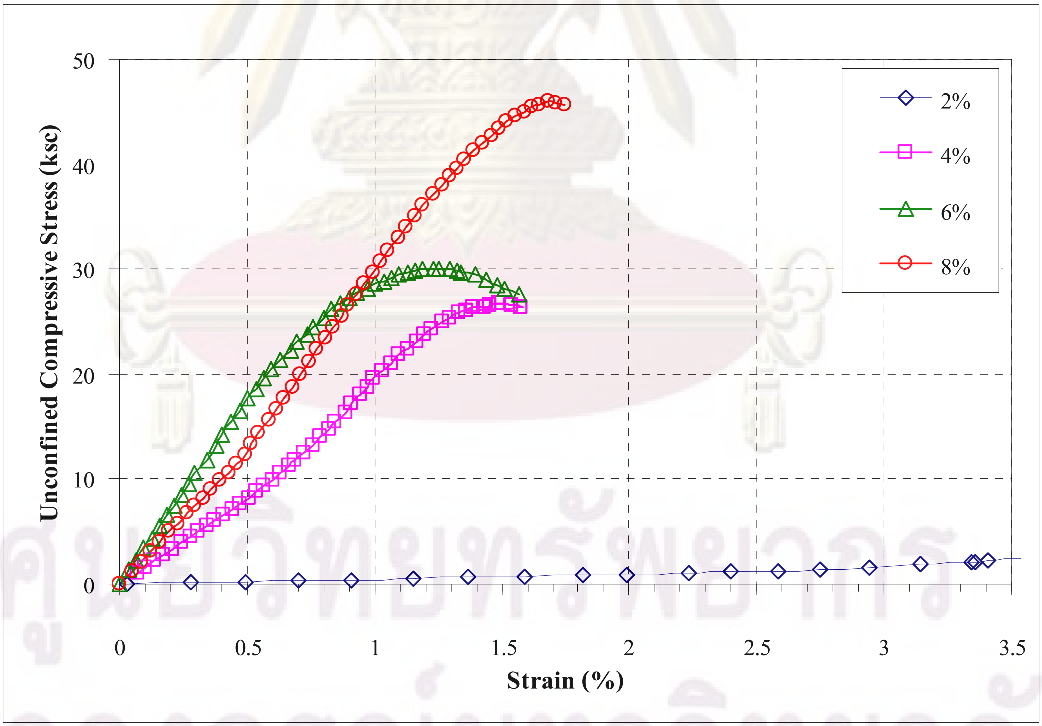
### 4.5 **ผลการทดสอบ** Unconfined Compressive Strength (UCS)

จากผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุเบื้องต้น ตามข้อ 4.2 ถึง 4.5 พบว่าวัสดุหินผุที่ใช้ทดสอบนั้นไม่ผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง กล่าวคือ มีขนาดคละของส่วนละเอียดมาก ค่าความเป็นพลาสติกสูง และค่า CBR ต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาโดยการผสมซีเมนต์ โดยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมนั้น จะใช้การผสมจาก 2, 4, 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วจึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว เพื่อหาค่าปริมาณซีเมนตที่เหมาะสมต่อไป

จากผลการทดสอบ UCS ได้ทำการทดสอบวัสดุที่มี สัดส่วนปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนัก ที 0 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยการทดสอบที่ 0 เปอร์เซ็นต์ คือ การทดสอบวัสดุก่อนการปรับปรุงคุณภาพโดยทำการทดสอบตามขั้นตอนในการทดสอบวัสดุที่ไม่ได้เติมซีเมนต์และไม่มีขั้นตอนการแช่น้ำก่อการทดสอบเนื่องจาก เมื่อนำก้อนวัสดุดังกล่าวไปแช่น้ำแล้วก้อนวัสดุไม่สามารถนำมาทดสอบต่อ ไได้ เนื่องจากวัสดุไม่มีสภาพการเชื่อมแน่น ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของวัสดุทั้งสามแหล่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.11 ตามลำดับ และค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวที่ปริมาณซีเมนต์แตกต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.12

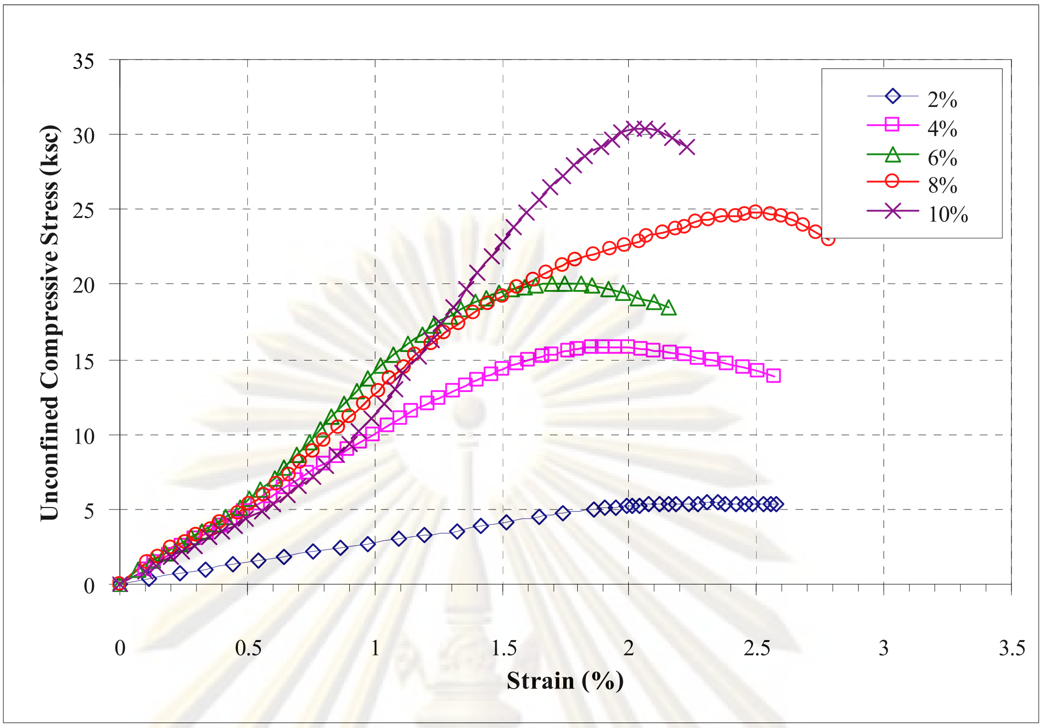



**รูปที่** 4.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของวัสดุจากแหล่งที่ 1




**รูปที่** 4.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของวัสดุจากแหล่งที่ 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

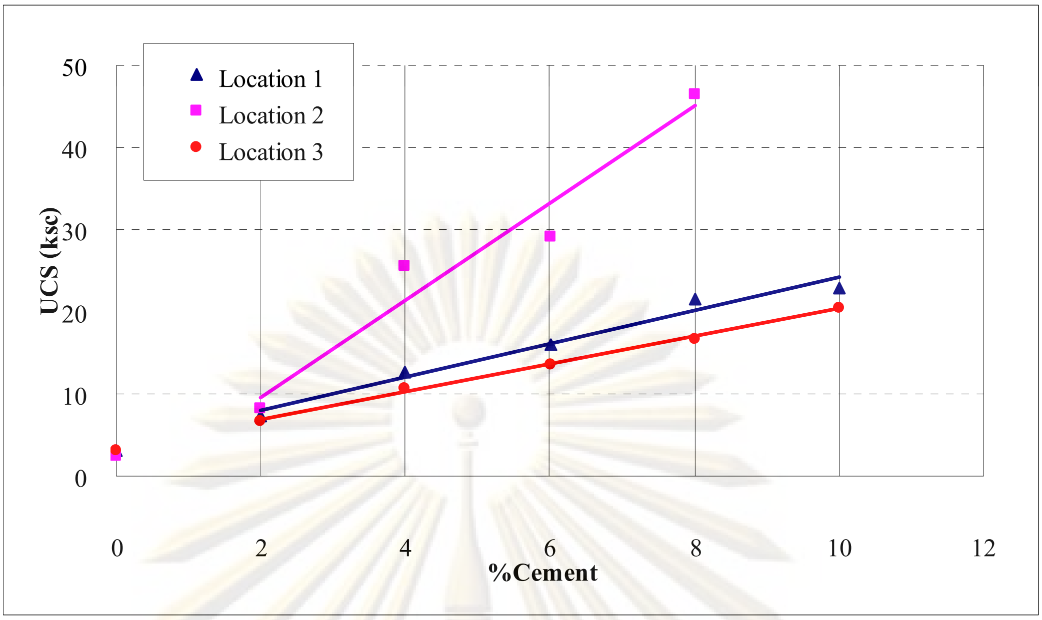



**รูปที่ 4.11** ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของวัสดุจากแหล่งที่ 3

**ตารางที่ 4.3** ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง UCS กับ %Cement ของแหล่งต่างๆ

| %Cement | UCS (ksc) | | |
|---|---|---|---|
| | **แหล่งที่ 1** | **แหล่งที่ 2** | **แหล่งที่ 3** |
| 0 | 3.18 | 2.36 | 3.17 |
| 2 | 7.23 | 8.29 | 6.59 |
| 4 | 12.78 | 25.56 | 10.75 |
| 6 | 16.09 | 29.06 | 13.58 |
| 8 | 21.65 | 46.51 | 16.77 |
| 10 | 22.90 | - | 20.50 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

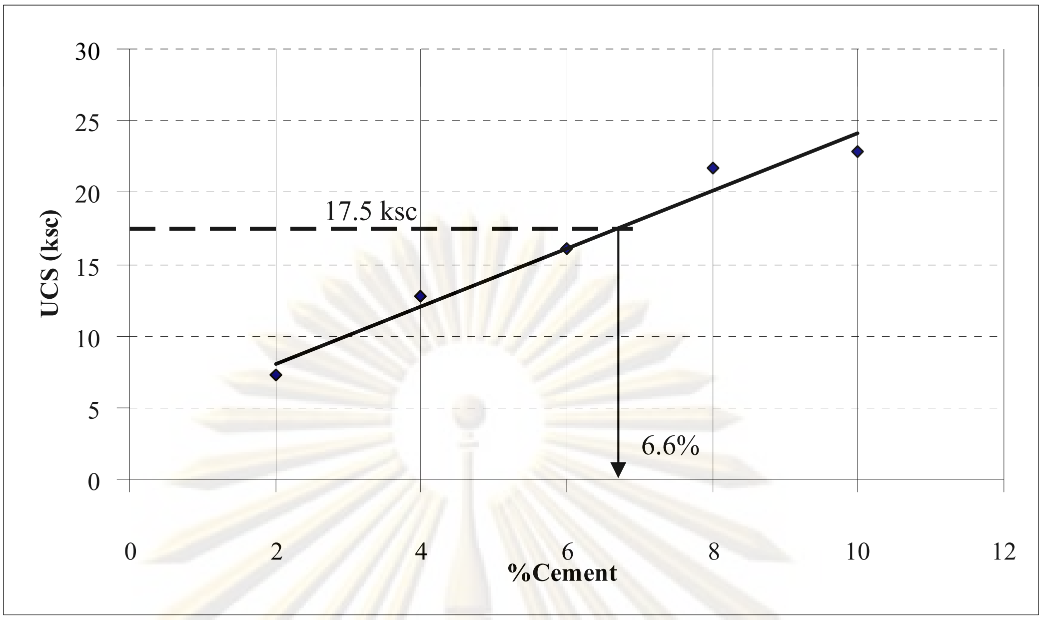



**รูปที่** 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง UCS กับ %Cement ของทั้งสามแหล่ง

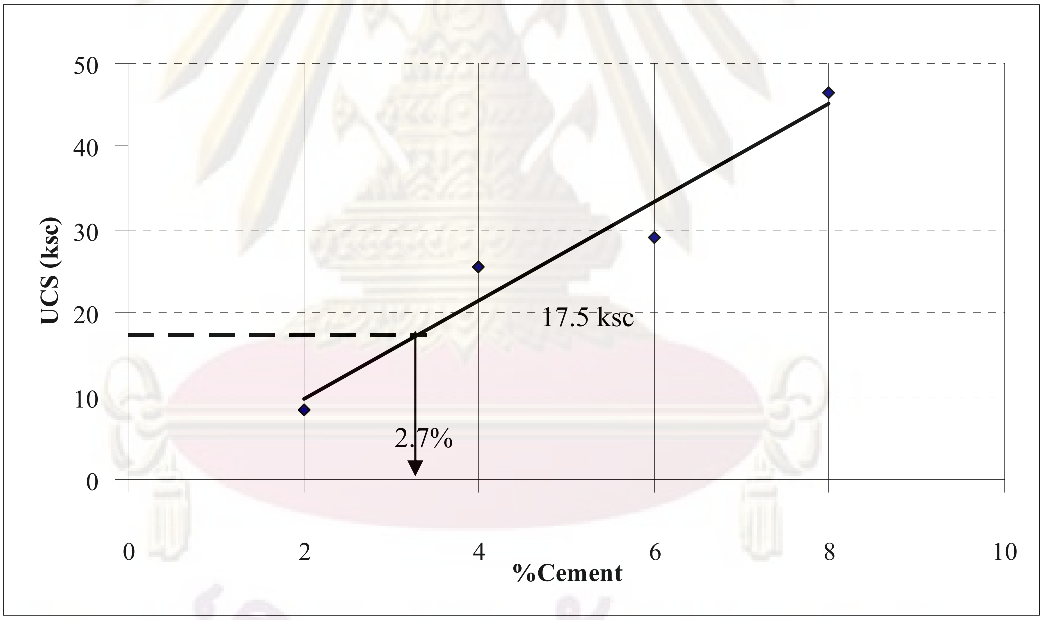
จากผลการทดสอบ จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ แต่วัสดุหินผุจากแหล่งที่สอง ในการเพิ่มปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ 2 เปอร์เซ็นต์ตามรูปที่ 4.10 นั้นจะดูเหมือนว่าค่าความแข็งแรงนั้นไม่เพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากปริมาณซีเมนต์และปริมาณน้ำในการผสมจึงทำให้ การคลุเคล้าเป็นไปได้ยาก และเมื่อสังเกตจากการเพิ่มปริมาณซีเมนต์โดน้ำหนักตั้งแต่ 4 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปนั้นมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมากจนเมื่อมีการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นถึง 46.51 ksc และมีแนวโน้มที่จะทำให้มีค่าความแข็งแรงมากกว่า 50 ksc จึงไม่ทำการทดสอบการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเนื่องจากกำลังที่สูงเกินไปจะเกินขีดจำกัดของเครื่องมือวัดแรงกระทำ (Load Cell)

เมื่อพิจารณาหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ดินซีเมนต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล. – ม. 204/2533) ที่ต้องการกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 17.5 ksc จึงนำเอาค่า ปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนัก มาหาความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว เพื่อหาสัดส่วนปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดดังรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 ทำให้ได้ค่า ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับหินผุทั้งสามแหล่งเท่ากับ 6.6 2.7 และ 8.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ

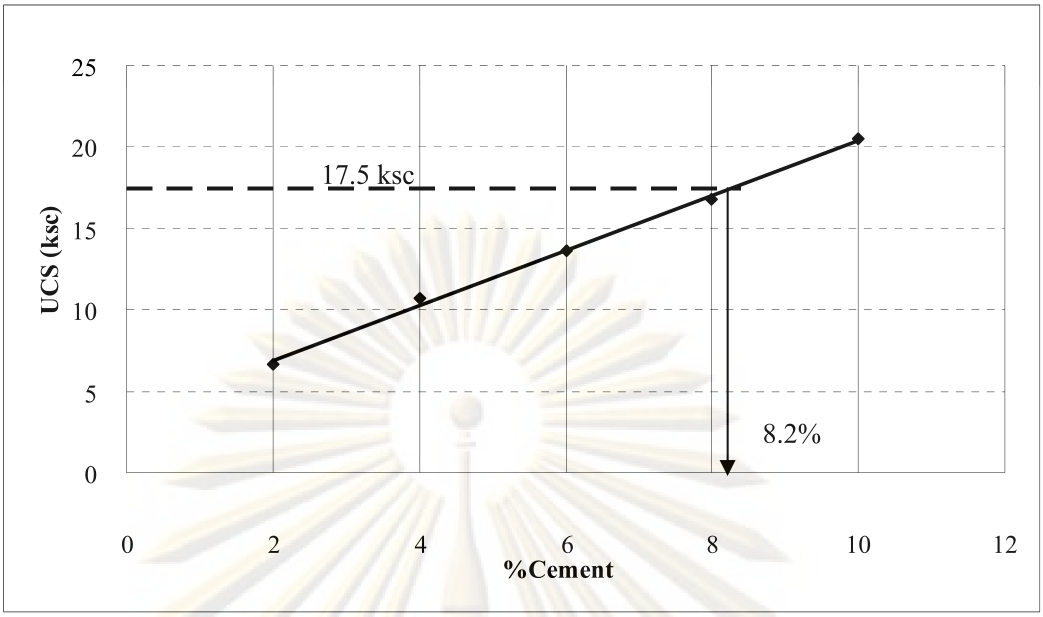
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่** 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ %Cement ของแหล่งที่ 1




**รูปที่** 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ %Cement ของแหล่งที่ 2

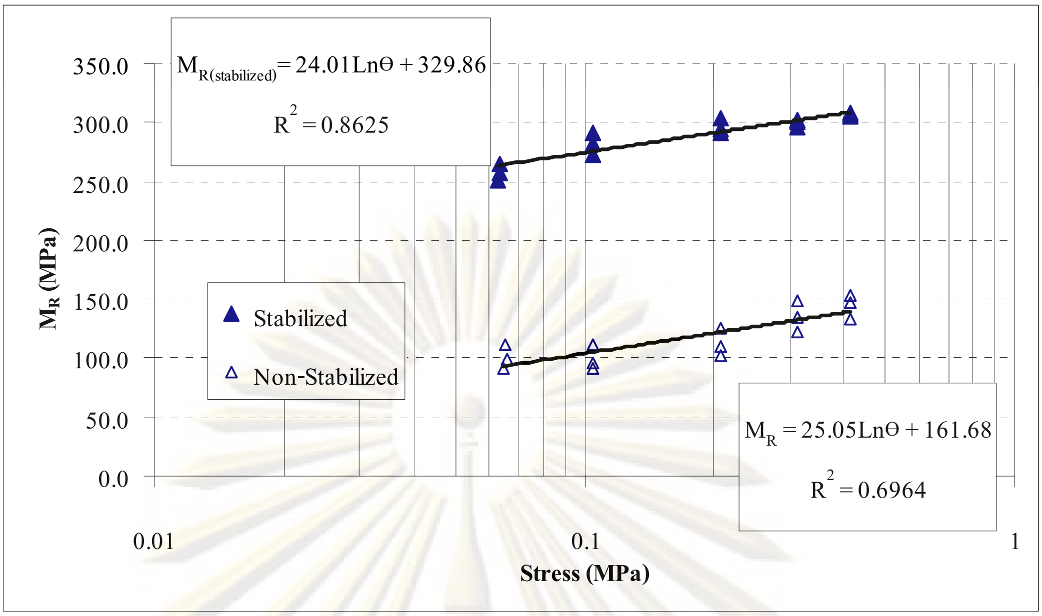



**รูปที่ 4.15** ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ %Cement ของแหล่งที่ 3

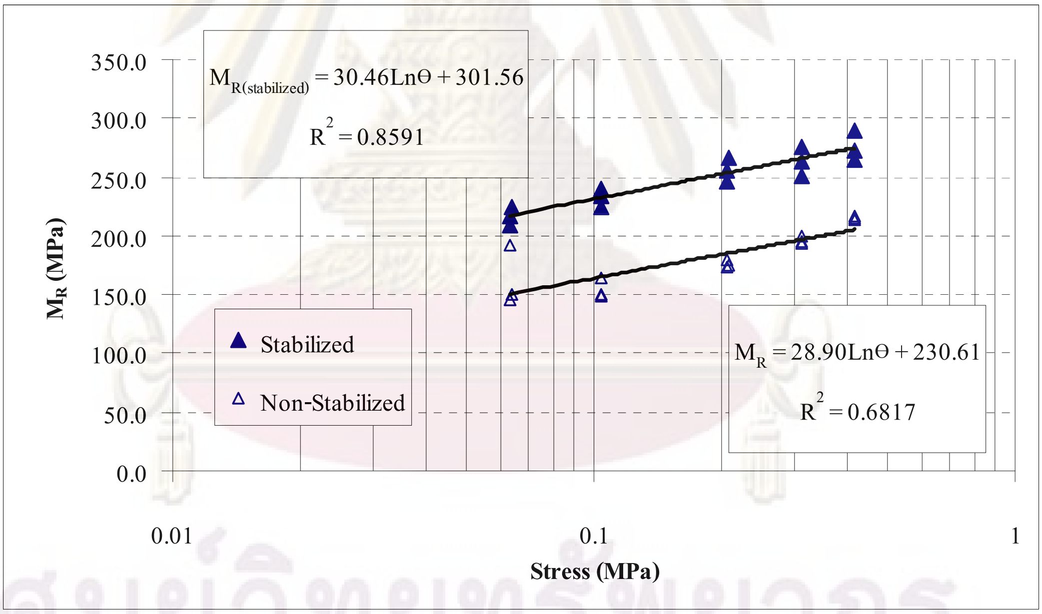
## 4.6 ผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus, $M_R$)

การทดสอบโมดูลัสการคืนตัว ของวัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพนั้นได้ใช้วิธีการทดสอบเดียวกันกับหลังการปรับปรุงคุณภาพ เนื่องจากก่อนทำการทดสอบนั้นไม่ต้องแช่น้ำจึงทำให้ ผลกาทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพ และวัสดุที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ สามารถแสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus, $M_R$) กับ Stress Invariant, □ ของวัสดุแหล่งที่หนึ่งได้ดังรูปที่ 4.16 สังเกตได้ว่า ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วอยู่ระหว่าง 251 – 307 MPa โดยมีค่าโมดูลัสการคืนตัวเฉลี่ยประมาณ 290 MPa มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด ($R^2$) ร้อยละ 86 ซึ่งมีค่ามากกว่าวัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพประมาณ 2.4 เท่า กล่าวคือวัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ มีค่าโมดูลัสการคืนตัวอยู่ระหว่าง 92 – 153 MPa โดยมีค่าโมดูลัสการคืนตัวเฉลี่ยประมาณ 120 MPa มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดร้อยละ 69

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่** 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $M_R$ กับ Stress ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของแหล่งที่ 1

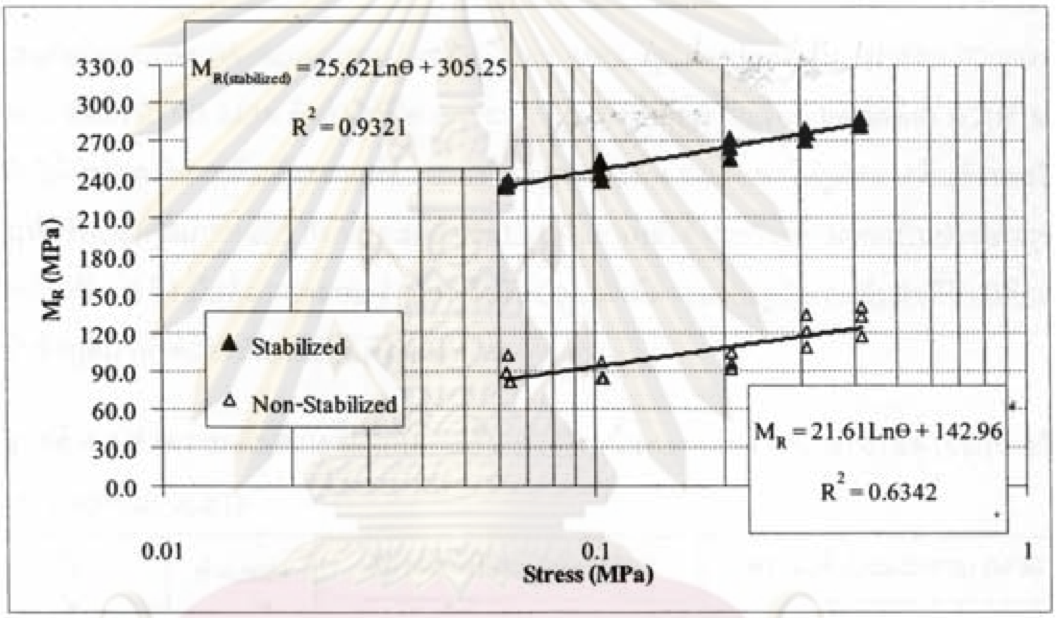



**รูปที่** 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $M_R$ กับ Stress ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของแหล่งที่ 2

ในส่วนของผลการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพ และวัสดุที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ของวัสดุแหล่งที่สองดังแสดงในรูปที่ 4.17 สังเกตได้ว่า ค่า $M_R$ อยู่ระหว่าง 209 – 290 MPa โดยมีค่าโมดูลัสการคืนตัวเฉลี่ยประมาณ 249 MPa มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดร้อยละ 86 ซึ่งมีค่ามากกว่าวัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพประมาณ 1.4 เท่า ซึ่งวัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ มีค่าโมดูลัส

การคืนตัวอยู่ระหว่าง 149 – 216 MPa โดยมีค่าโมดูลัสการคืนตัวเฉลี่ยประมาณ 182 MPa มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดร้อยละ 68

สุดท้ายในส่วนของผลการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพ และวัสดุที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ของวัสดุแหล่งที่สามดังแสดงในรูปที่ 4.18 สังเกตได้ว่า ค่า $M_R$ อยู่ระหว่าง 234 – 288 MPa โดยมีค่าโมดูลัสการคืนตัวเฉลี่ยประมาณ 262 MPa มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดร้อยละ 93 ซึ่งมีค่ามากกว่าวัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพประมาณ 1.5 เท่า ซึ่งวัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพมีค่าโมดูลัสการคืนตัวอยู่ระหว่าง 82 – 140 MPa โดยมีค่าโมดูลัสการคืนตัวเฉลี่ยประมาณ 107 MPa มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด ร้อยละ 63




**รูปที่ 4.18** ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $M_R$ กับ Stress ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของแหล่งที่ 3

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ ระหว่างค่า $M_R$, $M_{R(Stabilized)}$ กับ Θ ของวัสดุทั้งสามแหล่งทั้งที่ยังไม่ได้ปรับปรุงกับวัสดุที่มีการปรับปรุงแล้วได้ดังสมการที่ 4.1 ถึง 4.6 ตามลำดับ

วัสดุหินผุจากแหล่งที่หนึ่ง

$$M_R = 25.05Ln\Theta + 161.68 \tag{4.1}$$

$$M_{R(Stabilized)} = 24.01Ln\Theta + 329.86 \tag{4.2}$$

วัสดุหินผุจากแหล่งที่สอง

$$M_R = 28.90Ln\Theta + 230.61 \tag{4.3}$$

$$M_{R(Stabilized)} = 30.46Ln\Theta + 301.56 \tag{4.4}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัสดุหินผุจากแหล่งที่สาม

$$M_R = 21.61Ln□ + 142.96 \quad (4.5)$$

$$M_{R(Stabilized)} = 25.62Ln□ + 305.25 \quad (4.6)$$

เมื่อ $M_R$ = Resilient Modulus of Non-Stabilized Material (MPa)

$M_{R(Stabilized)}$ = Resilient Modulus of Stabilized Material (MPa)

□ = Stress Invariant (MPa)

เนื่องจาก ธันวิน สวัสดิศานต์ และคณะ (2551) ได้นำเสนอค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางดังตารางที่ 4.4 จึงพบว่าความเค้นที่กึ่งกลางของชั้นพื้นทางที่มีความหนา 20 cm. มีความเค้นในแนวดิ่ง (Vertical stress) เฉลี่ย 0.201 MPa และมีความเค้นในแนวราบ (Confining stress) เฉลี่ย 0.003 MPa จึงทำให้มีค่าความเค้นไม่แปรเปลี่ยน (Stress Invariant) 0.207 MPa ซึ่งทำให้ค่าโมดูลัสการคืนตัวของแต่ละแหล่งได้ดังตารางที่ 4.5 และค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุหินผุที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว กับที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพที่ได้จากการคำนวณเป็นช่วงได้สรุปไว้ดังตารางที่ 4.6 ซึ่งเมื่อสังเกตจะพบว่า วัสดุที่ปรับปรุงแล้วมีค่าของโมดูลัสการคืนตัวที่ใกล้เคียงกัน จึงนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ได้ ดังรูปที่ 4.19

**ตารางที่ 4.4** ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางอันเนื่องมาจากน้ำหนักของวัสดุ (ธันวิน สวัสดิศานต์ และคณะ, 2551)

| ชั้นโครงสร้างทาง | ตำแหน่ง (ความลึก) | ความเค้นในแนวดิ่ง (kPa) | | | ความเค้นในแนวราบ (kPa) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ค่าสูงสุด | ค่าต่ำสุด | ค่าเฉลี่ย | ค่าสูงสุด | ค่าต่ำสุด | ค่าเฉลี่ย |
| พื้นทาง | ด้านบน | 646 | 120 | 369 | 330 | -1 | 102 |
| | กึ่งกลาง | 363 | 73 | 201 | 84 | -52 | 3 |
| | ด้านล่าง | 212 | 48 | 109 | 105 | -271 | -49 |
| รองพื้นทาง | ด้านบน | 218 | 57 | 116 | 25 | -30 | 4 |
| | กึ่งกลาง | 135 | 36 | 73 | 25 | -56 | -3 |
| | ด้านล่าง | 96 | 27 | 54 | 37 | -107 | -10 |
| ดินเดิม | ด้านบน | 96 | 27 | 54 | 9.2 | 3 | 6 |

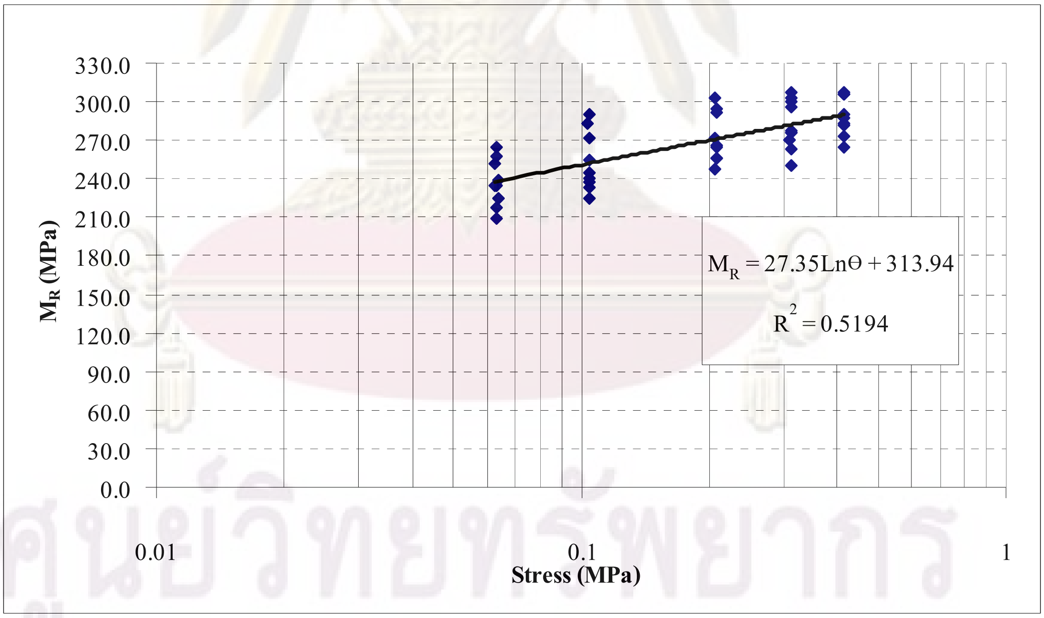
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 4.5** ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุหินผุที่ปรับปรุงแล้ว และยังไม่ได้ปรับปรุงที่ความเค้นไม่แปรเปลี่ยนจากน้ำหนักของวัสดุตรงกึ่งกลางชั้นพื้นทาง (0.21 MPa)

| แหล่งที่ | $M_R$ (MPa) | |
|---|---|---|
| | **วัสดุปรับปรุง** | **วัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุง** |
| 1 | 290 | 120 |
| 2 | 260 | 180 |
| 3 | 265 | 100 |

**ตารางที่ 4.6** ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุหินผุ

| | **วัสดุปรับปรุง** | | | | **วัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุง** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **แหล่งที่** | Range (MPa) | Average (MPa) | $R^2$ | SD | Range (MPa) | Average (MPa) | $R^2$ | SD |
| 1 | 251 - 307 | 290 | 86 | 18.6 | 92 - 153 | 120 | 69 | 20.9 |
| 2 | 209 - 290 | 249 | 86 | 22.9 | 149 - 216 | 182 | 68 | 24.9 |
| 3 | 234 – 288 | 262 | 93 | 18.5 | 82 – 140 | 107 | 63 | 19.2 |

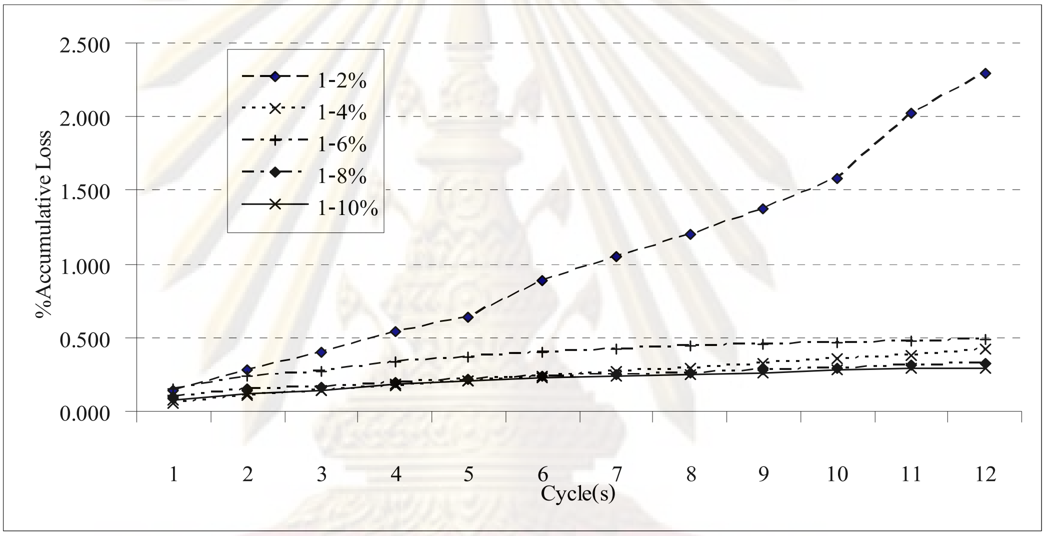



**รูปที่ 4.19** ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $M_R$ กับ Stress รวมของทั้งสามแหล่งที่ได้ทำการปรับปรุงด้วยซีเมนต์

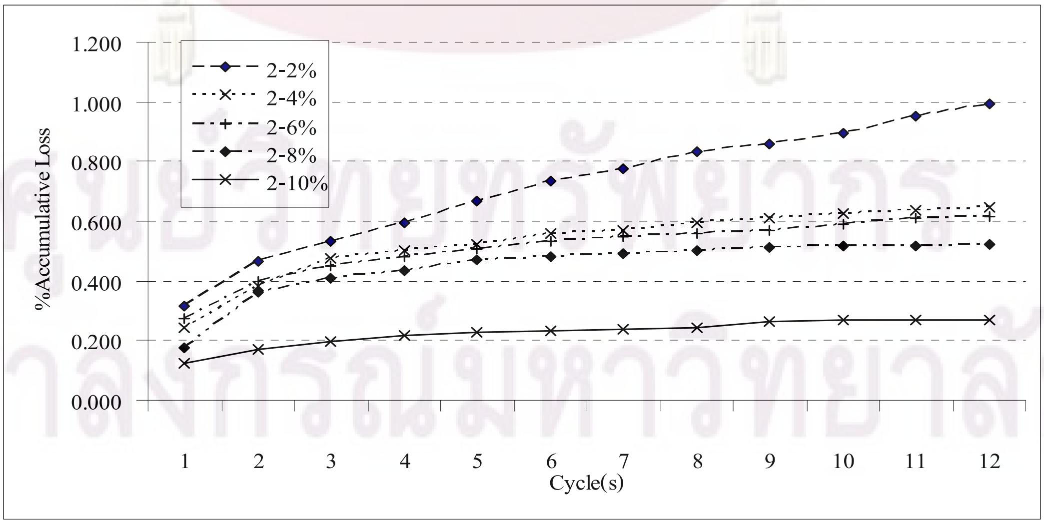
จากรูปที่ 4.19 พบว่าค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุปรับปรุงมีความสัมพันธ์กันมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดร้อยละ 52 โดยที่มีค่าโมดูลัสการคืนตัวอยู่ระหว่าง 209 – 308 MPa และมีค่าโมดูลัสการคืนตัวเฉลี่ยประมาณ 267 MPa

### 4.7 **การทดสอบหาค่าความคงทน โดยวิธี** Wet and Dry Test

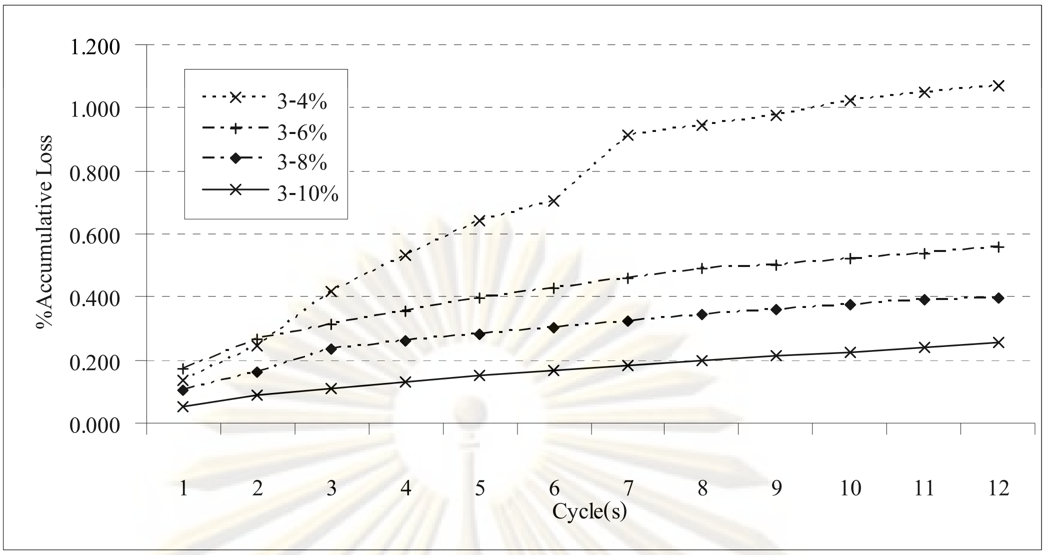
จากการทดสอบความคงทนจะเห็นว่าทั้งสามแหล่งมีร้อยละความสึกหรอรวมค่อนข้างต่ำและมีค่าใกล้เคียงกัน คือความสึกหรอรวมสูงสุดที่ได้จากการผสมซีเมนต์ที่ 2% อยู่ที่ประมาณ ร้อยละ 1.1 ถึง 2.4 ซึ่งเป็นค่าที่ผ่านตามมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.11 ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.22 ตามลำดับ




**รูปที่** 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Accumulative Loss กับจำนวนครั้งของวัสดุแหล่งที่ 1




**รูปที่** 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Accumulative Loss กับจำนวนครั้งของวัสดุแหล่งที่ 2




**รูปที่** 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % Accumulative Loss กับจำนวนครั้งของวัสดุแหล่งที่ 3

เมื่อสังเกตจากทั้งสามรูปจะมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางดียวกัน กล่าวคือในวัสดุหินผุที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักนั้นมีความสึกหรอค่อนข้างสูง และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น แต วัสดุหินผุที่มีปริมาณซีเมนต์ตั้งแต้ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักขึ้นไปนั้นมีความสึกหรอต่ำกว่าอย่างเห็นได ชัดและ มีแนวโน้มค่อนข้างจะคงที่ ทั้งนี้อาจเกิดจากการยึดเกาะกันของมวลวัสดุกับซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละโดยน้ำหนักมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามวัสดุหินผุทั้งสามแหล่งก็ผ่านตามมาตรฐานตามตารางที่ 2.11 ตั้งแต่หินผุที่มีปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยวัสดุ A-2-6 (จากแหล่งที่ 1) มีค่าการสึกหรอไม่เกินร้อยละ 10 และวัสดุ A-2-4 (จากแหล่งที่ 2 และ 3) มีค่าการสึกหรอไม่เกินร้อยละ 14

# บทที่ 5

# การวิเคราะห์ผล

## 5.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดวัสดุกับค่า Unconfined Compressive Strength

เมื่อพิจารณาขนาดคละของวัสดุทั้งสามแหล่งนั้นสามารถบอกได้ว่า วัสดุแต่ละแหล่งนั้นมีขนาดคละที่ต่างกันคือ ขนาดคละของแหล่งที่สองเป็นขนาดคละที่ดีที่สุดเนื่องจากสามารถจัดอยู่ในมาตรฐานขนาดคละของวัสดุชั้นรองพื้นทางแบบ B ได้ ส่วนแหล่งที่หนึ่งและสามเป็นขนาดคละที่รองลงมาตามลำดับและเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่ผสม กับค่า UCS ของวัสดุที่มาจากแหล่งที่ต่างกันนั้น ไม่สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์กันได้ เนื่องจากวัสดุที่นำมาวิจัยทั้งสามแหล่งมีขนาดคละที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่า UCS ในวัสดุผสมซีเมนต์อาจจะขึ้นอยู่กับขนาดคละที่ดี ทั้งนี้เพราะการที่วัสดุมีความแข็งแกร่งเพิ่มขึ้น จะมีสาเหตุมาจากมีการเกาะตัวกันได้ดีของวัสดุกับวัสดุเชื่อมประสานนั้นคือซีเมนต์ ดังจะสังเกตได้ตามตารางที่ 5.1 วัสดุแหล่งที่สองมีค่า UCS สูงขึ้นอย่างมากเมื่อผสมกับซีเมนต์เนื่องจากมีขนาดคละที่ดี ในทางกลับกัน วัสดุแหล่งที่ 1 และ 3 นั้นมีขนาดคละที่ดีรองลงมาจึงมีค่า UCS ไม่สูงมากนั้นในปริมาณซีเมนต์เท่ากัน เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีปริมาณของวัสดุมวลละเอียด (ฝุ่นหรือผง) เป็นจำนวนมากจึงทำให้การยึดเกาะและความแข็งแรงต่ำกว่าแหล่งที่ 2

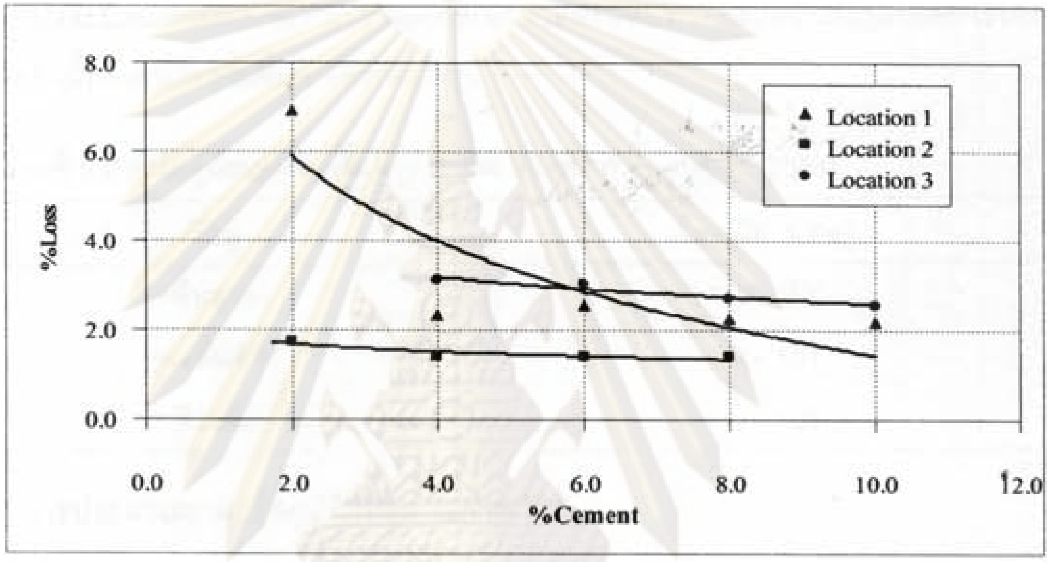
**ตารางที่** 5.1 เปรียบเทียบค่า UCS กับ แหล่งวัสดุ

| %Cement | UCS (ksc) ของแหล่งที่ | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| 2 | 7.227 | 8.287 | 6.594 |
| 4 | 12.775 | 25.555 | 10.747 |
| 6 | 16.095 | 29.059 | 13.579 |
| 8 | 21.651 | 46.505 | 16.768 |
| 10 | 22.897 | - | 20.497 |

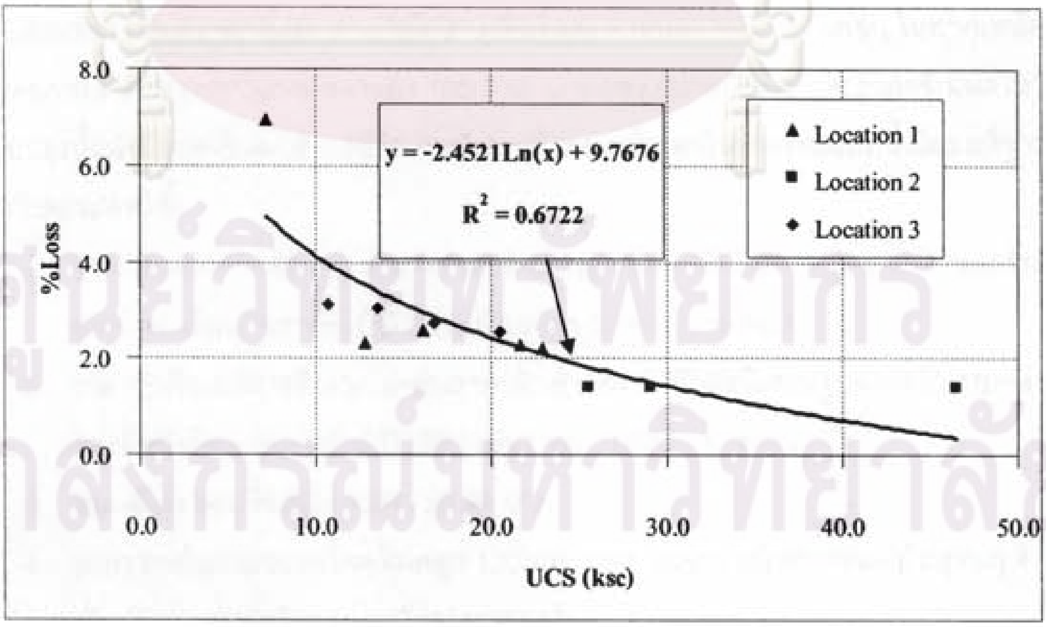
## 5.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบระหว่าง UCS กับ Durability

เมื่อพิจารณาจากค่า %Loss เทียบกับ %Cement ดังรูปที่ 5.1 พบว่า ค่าความสึกหรอของวัสดุที่ผสมด้วยซีเมนต์ จะมีค่าลดลงตามค่าปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสม แต่เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบวัสดุจากแหล่งที่ต่างกันนั้น พบว่า ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ในภาพรวมของวัสดุทั้งสามได้ เนื่องจากข้อมูลมีการกระจายสูงเป็นผลเนื่องมาจากชนิดของวัสดุเอง ดังนั้นจึงนำเอา ค่า

UCS และ %Loss มาหาความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่า วัสดุทั้งสามแหล่งนั้น สามารถอธิบายความสัมพันธ์โดยรวมได้ กล่าวคือ เมื่อมีค่า UCS เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความสึกหรอ มีค่าลดต่ำลง ซึ่งจากรูปที่ 5.2 ยังสังเกตได้อีกว่าที่ค่า UCS ต่ำนั้นยังคงมีค่า %Loss ที่ต่ำกว่ามาตรฐานตามตารางที่ 2.10 ซึ่งทำให้ทราบว่าวัสดุปรับปรุงที่มีค่า UCS ต่ำนั้นยังไม่ได้หมายความว่าจะมีความสึกหรอสูงกว่ามาตรฐาน จึงเป็นแนวโน้มในอนาคตที่จะสามารถลดค่า UCS มาตรฐาน (17.5 ksc) ลงได้ถ้าพิจารณาจากค่าความสึกหรอ เพื่อลดปริมาณซีเมนต์ที่ผสมลงได้และแก้ปัญหาการ Crack ที่เกิดจากการผสมซีเมนต์ในปริมาณมากได้อีกด้วย




**รูปที่** 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง %loss กับ %Cement ของวัสดุปรับปรุง




**รูปที่** 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Loss กับ UCS ของวัสดุปรับปรุง

### 5.3 ผลการวิเคราะห์ค่า Resilient Modulus ($M_R$)

จากค่า $M_R$ ที่ได้จากวัสดุทั้งสามแหล่งเมื่อผสมปริมาณซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมแล้ว จะได้ค่า $M_R$ ที่ใกล้เคียงกันตามตารางที่ 4.5 และเมื่อเทียบกับมาตรฐานค่า $M_R$ ของพื้นทางหินคลุก ตามตารางที่ 5.2 จะอยู่ในช่วงค่า $M_R$ ของชั้นพื้นทาง ซึ่งค่าของวัสดุปรับปรุงทั้งสามแหล่งนั้นอยู่ในช่วงของวัสดุโครงสร้างทางที่ได้จากวัสดุที่ตรงตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

จึงสรุปได้ว่า วัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์นั้นมีค่า Resilient Modulus ใกล้เคียงกับชั้นพื้นทาง ดังนั้นในการวิเคราะห์และออกแบบวิธี Analytical ที่ใช้ค่าโมดูลัสเป็นพารามิเตอร์นั้น วัสดุที่ปรับปรุงจะมีคุณสมบัติการยุบตัวใกล้เคียงกันกับวัสดุชั้นพื้นทาง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้วัสดุปรับปรุงนี้ทดแทนวัสดุชั้นพื้นทางที่ขาดแคลน

**ตารางที่** 5.2 ค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทาง (ธันวิน สวัสดิศานต์และคณะ, 2551)

| **วัสดุ** | **โมดูลัส** (MPa) |
|---|---|
| พื้นทาง | 170 – 230 |
| รองพื้นทาง | 99 – 191 |
| ดินเดิม | 50 – 105 |

### 5.4 การประมาณราคาวัสดุปรับปรุงคุณภาพ

ในการประมาณราคาวัสดุนั้นทำไปเพื่อเปรียบเทียบราคาของวัสดุหินผุปรับปรุงกับวัสดุหินคลุก เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้จริง จากการสำรวจราคาวัสดุพบว่าราคาวัสดุในแต่ละท้องที่นั้นมีราคาที่แตกต่างกันไปตามพื้นที่และค่าขนส่ง ยกตัวอย่างเช่น ในภาคเหนือนั้นหินคลุกจะราคาสูงกว่าในภาคกลางถึง 100-200 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และราคาซีเมนต์ในวัสดุปรับปรุงนั้นยังมีราคาที่แตกต่างกันอีก โดยในการวิเคราะห์ราคาในรายงานฉบับนี้ มีสมมติฐานในการวิเคราะห์ ดังนี้

1. ราคาหินคลุกอ้างอิงจาก ตารางราคาสินค้าของ สำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า ของจังหวัดอุตรดิตถ์ เดือน กุมภาพันธ์ ปี 2552 เป็นราคา 129.91 บาท/ลบ.ม.
2. ราคาปูนซีเมนต์อ้างอิงจาก ตารางราคาสินค้าของ สำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า ของจังหวัดอุตรดิตถ์ เดือน กุมภาพันธ์ ปี 2552 เป็นราคา 2,682.25 บาท/ตัน
3. สมมติให้ราคาเชื้อเพลิง 20.00-20.99 บาท
4. ระยะทางในการขนส่งวัสดุหินคลุก 130 กม. และ ระยะทางในการขนส่งวัสดุหินผุ 4 กม. (อ้างอิงจากแหล่งหินคลุก ณ โครงการก่อสร้าง)

5. กำหนดให้ระยะก่อสร้างโครงการ 20 กม. 4 ช่องจราจรโดยมีความหนาของชั้นพื้นทาง 20 ซม. ซึ่งปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับชั้นพื้นทางบดอัดเท่ากับ 56,000 ลบ.ม.

โดยตัวอย่างการคิดราคาสำหรับเปรียบเทียบวัสดุหินคลุกกับดินซีเมนต์ เป็นไปตามตัวอย่าง

1. CRUSHED ROCK SOIL AGGREGATE TYPE BASE **ปริมาณงาน 56,000.00 ลบ.ม.**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ค่าวัสดุจากปากโม่ (รวมค่าตัก) | | = | 129.91 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าขนส่ง | 130.00 กม. | = | 297.25 | บาท/ลบ.ม. |
| รวม | | = | 426.25 | บาท/ลบ.ม. |
| ส่วนยุบตัว | 426.25 × 1.50 | = | 639.38 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าดำเนินการ + ค่าเสื่อมราคา (BLEND) | | = | 16.02 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าดำเนินการ + ค่าเสื่อมราคา (บดทับ) | | = | 61.13 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าใช้จ่ายรวม (ค่างานต้นทุน) | | = | 716.53 | บาท/ลบ.ม. |

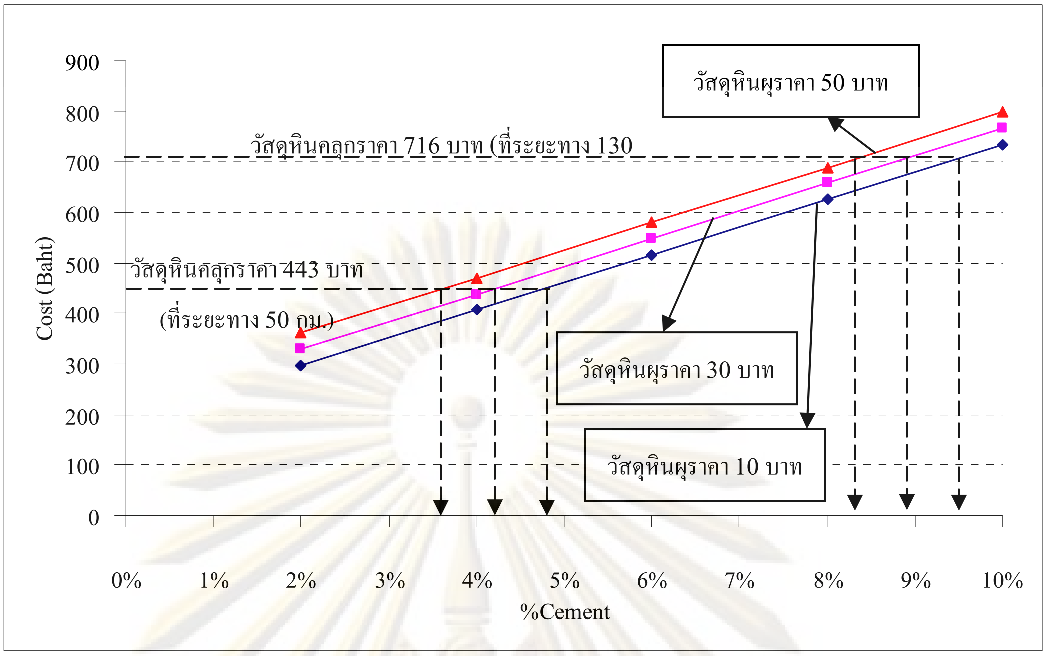
2. SOIL CEMENT BASE **ปริมาณงาน** 56,000.00 **ลบ.ม.**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ค่าวัสดุจากแหล่ง | | = | 26.50 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าดำเนินการ + ค่าเสื่อมราคา (ขุด – ขน) | | = | 25.85 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าขนส่ง | 4.00 กม. | = | 12.10 | บาท/ลบ.ม. |
| รวม | | = | 64.45 | บาท/ลบ.ม. |
| ส่วนยุบตัว | 64.45 × 1.60 | = | 103.12 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าซีเมนต์ 2.7%โดยน้ำหนัก ราคา 1,000.00 กก. @ 2,682.25 บาท | | = | 147.74 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าติดตั้งเครื่องผสม = 150,000.00 / 56,000.00 | | = | 2.68 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าดำเนินการ + ค่าเสื่อมราคา (ผสมวัสดุ) | | = | 39.73 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าดำเนินการ + ค่าเสื่อมราคา (บดทับ) | | = | 38.32 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าดำเนินการ + ค่าเสื่อมราคา (บ่มวัสดุ) | | = | 30.26 | บาท/ลบ.ม. |
| ค่าใช้จ่ายรวม (ค่างานต้นทุน) | | = | 361.85 | บาท/ลบ.ม. |

**หมายเหตุ** ระยะขนส่งวัสดุ = ระยะทางจากแหล่งถึงเครื่องผสม + ระยะทางจากเครื่องผสมถึงหน้างาน

เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบราคาเป็นช่วง และเพื่อยกตัวอย่างให้เข้าใจง่ายขึ้นในการเปรียบเทียบราคา จึงนำเสนอราคาวัสดุต่างๆจากสถานที่ในทำการวิจัยดังตารางที่ 5.3 โดยเปรียบเทียบกับหินคลุกที่ราคา 716 บาท

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 5.3** ความสัมพันธ์ระหว่างราคากับปริมาณซีเมนต์ในวัสดุปรับปรุง

**ตารางที่ 5.3** เปรียบเทียบราคาระหว่างวัสดุหินคลุกกับวัสดุปรับปรุงจากสถานที่ทำการวิจัย

| | **หินคลุก** | **วัสดุหินผุ** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **2%** | **4%** | **6%** | **8%** |
| ค่าวัสดุ | 129.00 | 26.50 | 26.50 | 26.50 | 26.50 |
| ค่าขุด-ขน | - | 25.85 | 25.85 | 25.85 | 25.85 |
| ค่าขนส่ง | 297.25 | 12.1 | 12.1 | 12.1 | 12.1 |
| ค่ายุบตัว | 213.13 | 38.67 | 38.67 | 38.67 | 38.67 |
| ค่าวัสดุผสม | - | 109.44 | 218.87 | 328.31 | 437.74 |
| ค่าผสม บดทับ และบ่ม | 77.15 | 108.31 | 108.31 | 108.31 | 108.31 |
| ค่าเครื่องจักร | - | 2.68 | 2.68 | 2.68 | 2.68 |
| ค่างานต้นทุน (รวม) | **716.53** | **323.55** | **432.98** | **542.42** | **651.85** |

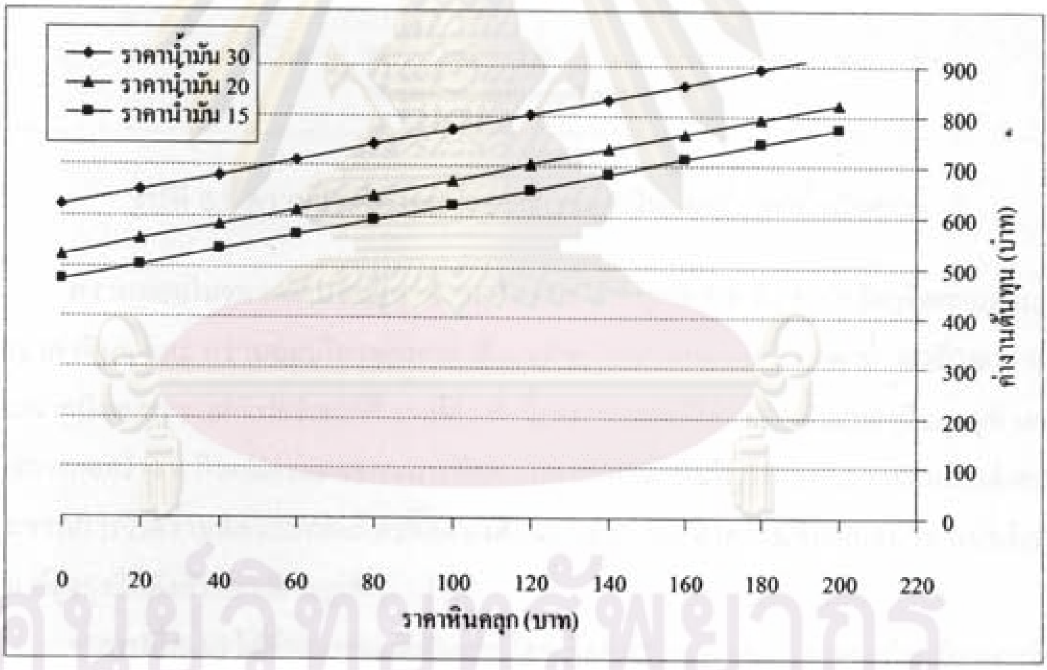
จากตารางที่ 5.3 จะสังเกตได้ว่าราคาหินผุผสมซีเมนต์มีราคาที่ถูกกว่าหินคลุกจนถึงการเติมซีเมนต์ปริมาณ 8% โดยน้ำหนักก็ยังคงถูกกว่า แต่ทั้งนี้ราคาหินคลุกที่แพงกว่านั้นเนื่องมาจากตัวแปรหลัก ก็คือระยะทางการขนส่ง แต่ถ้าระยะทางขนส่งหินคลุกนั้นเท่ากับ 50 กิโลเมตรจะทำให้ราคาหินคลุกนั้นถูกกว่าหินผุที่เติมซีเมนต์ปริมาณ 3.6% โดยน้ำหนักทันที แต่ทั้งนี้การที่เติมซีเมนตเป็นจำนวนมากยังต้องคำนึงถึงการแตกของวัสดุที่เกิดจากการหดตัว (Shrinkage Cracks)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากการที่มีปริมาณซีเมนต์มากอาจจะทำให้เกิดความร้อนในกระบวนการการแข็งตัวของวัสดุสูงขึ้นจึงทำให้น้ำระเหยได้เร็วขึ้นและทำให้เกิดการหดตัวของวัสดุมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพ และระยะเวลาในการใช้งานพื้นทางอีกด้วย

## 5.5 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของราคาต่อเปอร์เซนต์ซีเมนต์

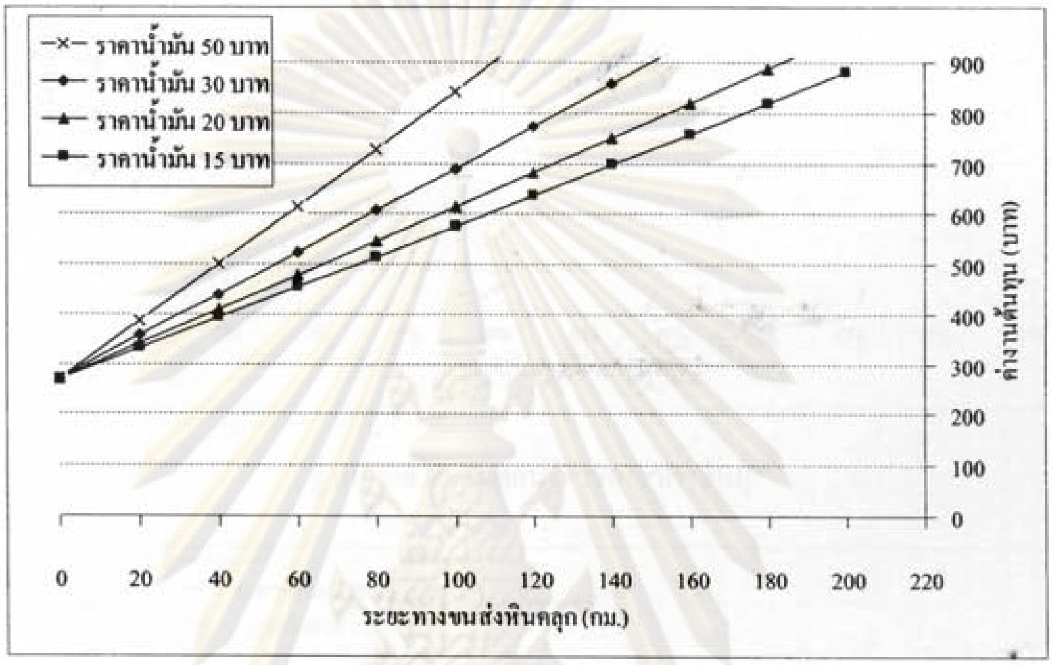
เนื่องจากไม่ได้มีเพียงแต่ระยะทางเท่านั้นที่เป็นปัจจัยทำให้เปอร์เซนต์ซีเมนต์มีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน ราคาซีเมนต์ ราคาวัสดุหินคลุก และ ราคาวัสดุหินผุ เป็นปัจจัยที่ทำให้เปอร์เซนต์ซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไปด้วย จึงจำเป็นต้องพิจรณาถึงความอ่อนไหวของราคาปัจจัยดังกล่าว เพื่อนำไปใช้ในขณะที่ราคาปัจจัยต่างๆมีการปรับเปลี่ยนราคาไปจากราคากลาง จากงานวิจัยนี้ได้นำราคาหินคลุก ระยะทางขนส่งหินคลุก ราคาหินผุ ราคาซีเมนต์ และระยะทางขนส่งหินผุ มาหาความอ่อนไวของราคาที่ราคาน้ำมันที่แตกต่างกัน และแบ่งการวิเคราะห์เป็นสองส่วนคือ ความอ่อนไหวของราคาทางด้านหินคลุก และความอ่อนไหวของราคาทางด้านหินผุ




**รูปที่** 5.4 ความอ่อนไหวของราคาหินคลุกที่ราคาน้ำมันต่างๆ

ความอ่อนไหวทางด้านหินคลุกพบว่าราคาหินคลุกที่เปลี่ยนไป และระยะทางขนส่งหินคลุกที่เปลี่ยนไปมีผลต่อค่างานต้นทุน แต่ความอ่อนไหวของราคาหินคลุกน้อยกว่าความอ่อนไหวของระยะทางเนื่องจากความชันของความสัมพันธ์น้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าระยะทางยังคงเป็นปัจจัยหลักในการเปลี่ยนแปลงราคา เมื่อมาสังเกตที่ราคาน้ำมันพบว่าราคาน้ำมันส่งผลถึงระยะทางการ

ขนส่งมากกว่าราคาวัสดุ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมันส่งผลถึงระยะทาง แต่ไม่ส่งผลถึงราคาวัสดุ แต่ในรูปที่ 5.4 ราคาน้ำมันที่สูงขึ้นทำให้ค่างานต้นทุนเพิ่มขึ้นเนื่องจากกำหนดระยะทางที่ 130 กิโลเมตร (อ้างอิงจากแหล่งหินคลุก ณ โครงการก่อสร้าง) จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงราคาน้ำมันมีผลกระทบสูง

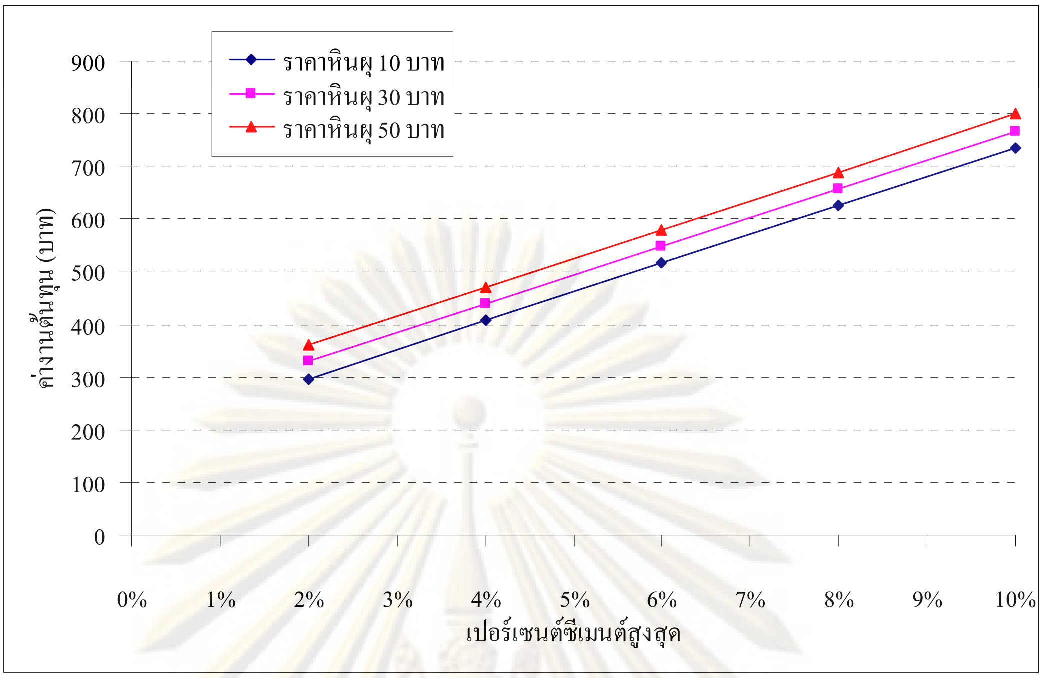



**รูปที่** 5.5 ความอ่อนไหวของระยะทางขนส่งหินคลุกที่ราคาน้ำมันต่างๆ

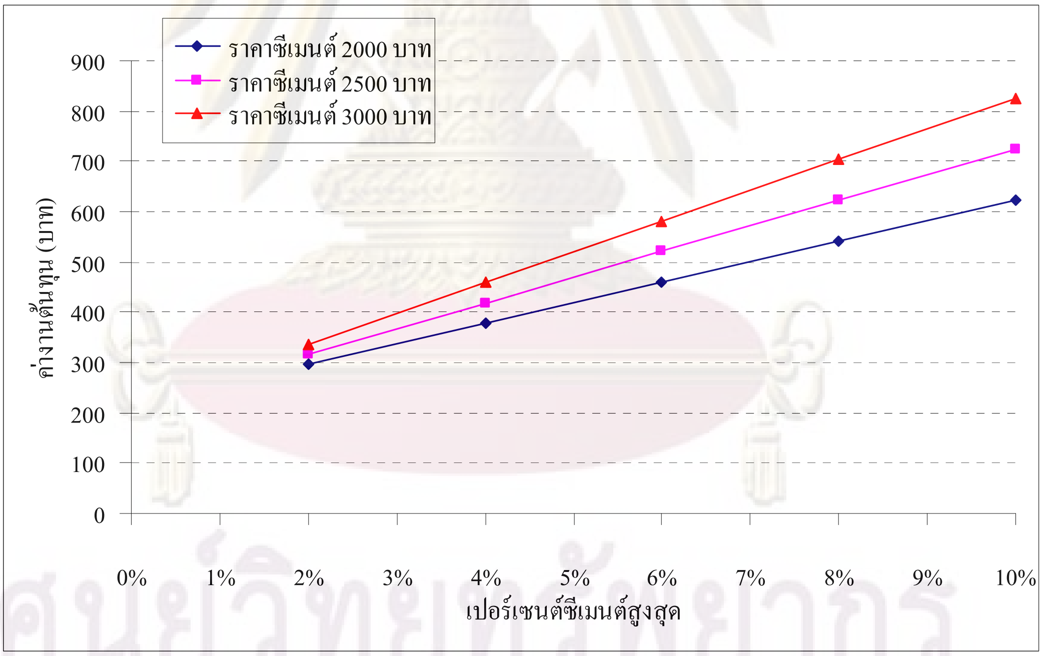
ความอ่อนไหวทางด้านหินผุหาความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.6 ถึง 5.12 โดยที่ความอ่อนไหวของราคาหินผุ และ ความอ่อนไหวของราคาซีเมนต์จะไม่นำเสนอในด้านราคาน้ำมันที่แตกต่างกันเนื่องจากมีผลกระทบต่อเปอร์เซนต์ซีเมนต์ต่ำ ทั้งนี้เพราะแหล่งที่ได้สำรวจนั้นแหล่งหินผุอยู่ห่างจากโครงการก่อสร้าง 4 กิโลเมตรผลของการเปลี่ยนแปลงราคาน้ำมันไม่ส่งผลต่อค่าวอ่อนไหวดังกล่าว และจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวทั้งสองด้านนั้นสามารถนำความสัมพันธ์มาหาเปอร์เซนต์ซีเมนต์สูงสุดได้ดังตัวอย่างตามรูปที่ 5.13

จากรูปที่ 5.13 ได้ทำการสมมุติตัวอย่างโดยเลือกที่การเปลี่ยนแปลงของราคาหินคลุกที่หินคลุกราคา 160 บาทและราคาน้ำมัน 15 บาท จึงเลือกใช้ความสัมพันธ์รูปที่ 5.4 ทางด้านการเปลี่ยนแปลงหินผุนั้นได้เลือกการเปลี่ยนแปลงระยะทางขนส่งหินผุ 10 กิโลเมตรที่ราคาน้ำมัน 15 บาท จึงเลือกความสัมพันธ์รูปที่ 5.8 ทำให้ได้เปอร์เซนต์ซีเมนต์สูงสุดเท่ากับ 8.5 เปอร์เซนต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

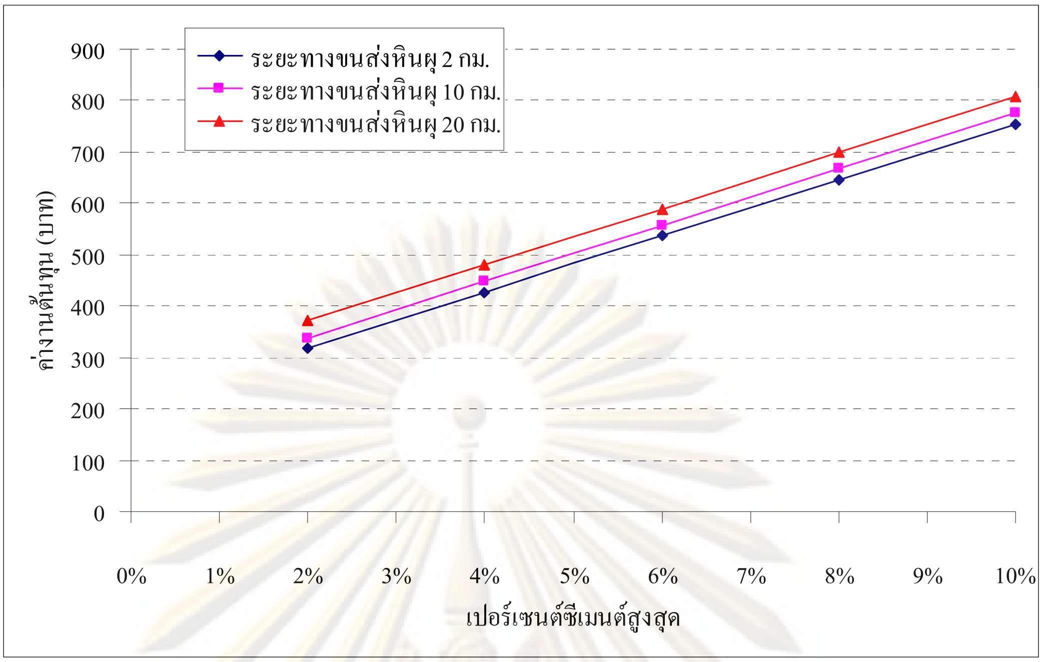



**รูปที่** 5.6 ความอ่อนไหวของราคาหินผุ

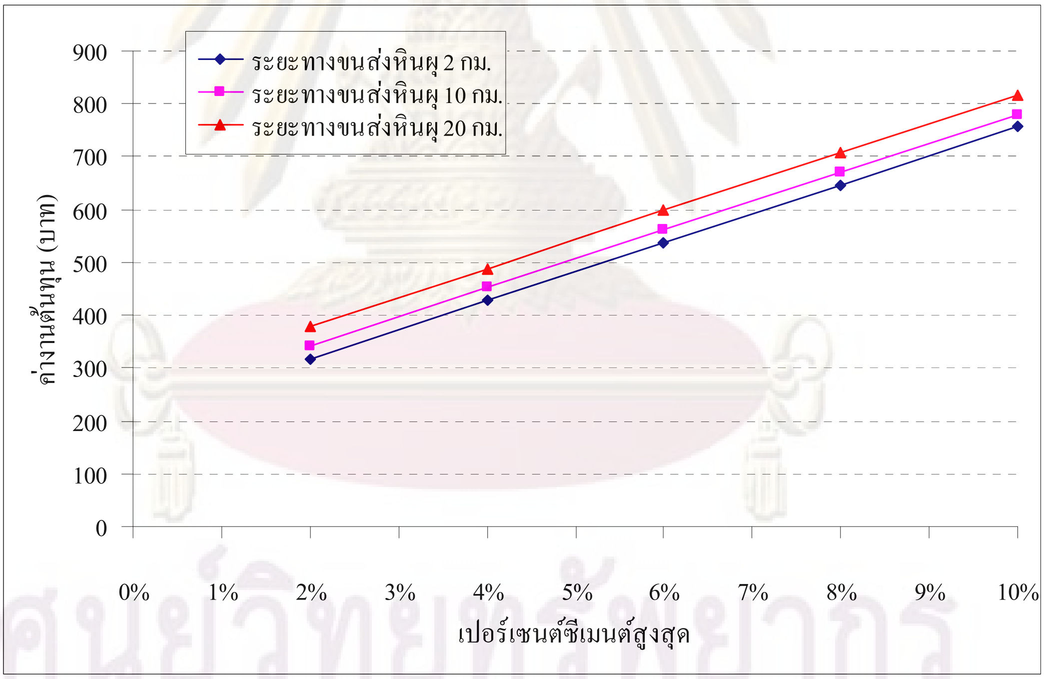



**รูปที่** 5.7 ความอ่อนไหวของราคาซีเมนต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

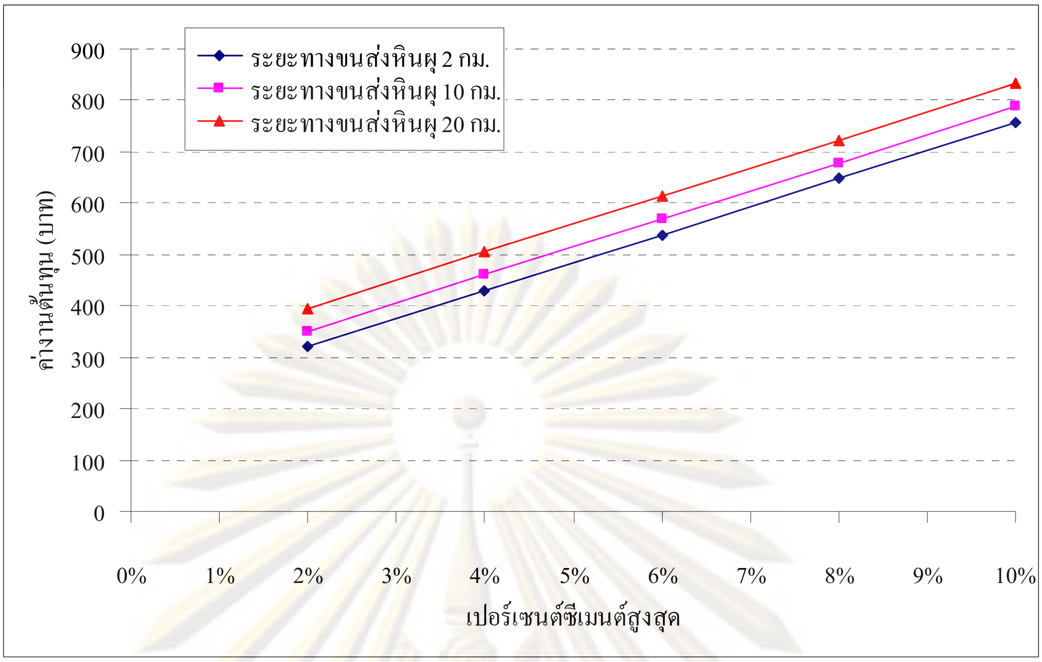



**รูปที่** 5.8 ความอ่อนไหวของระยะทางขนส่งหินผุที่ราคาน้ำมัน 15 บาท

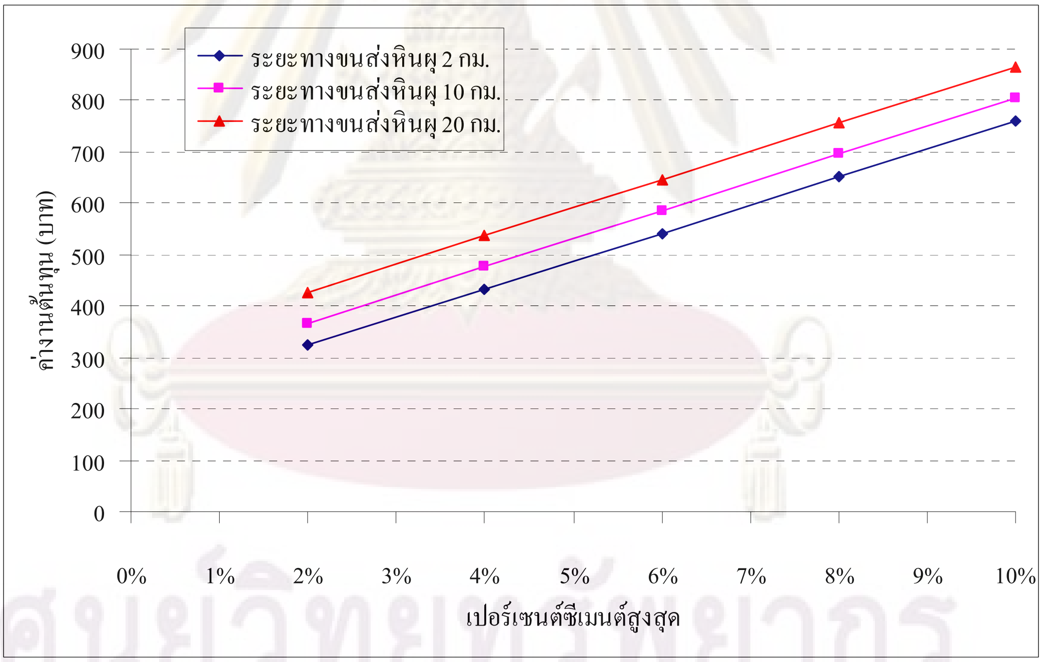



**รูปที่** 5.9 ความอ่อนไหวของระยะทางขนส่งหินผุที่ราคาน้ำมัน 20 บาท

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

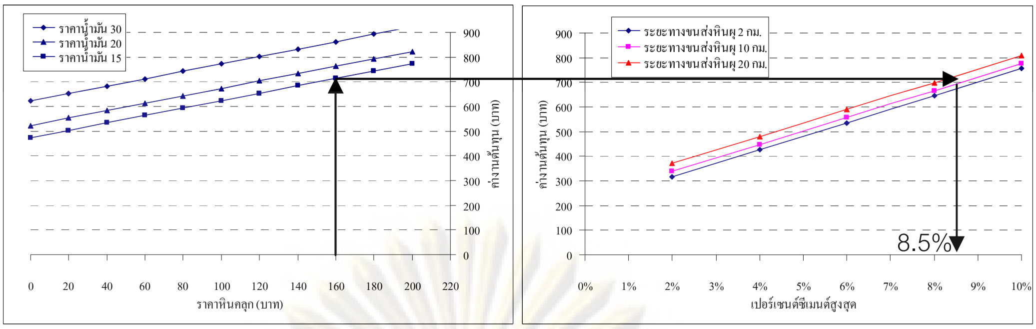



**รูปที่** 5.10 ความอ่อนไหวของระยะทางขนส่งหินผุที่ราคาน้ำมัน 30 บาท




**รูปที่** 5.11 ความอ่อนไหวของระยะทางขนส่งหินผุที่ราคาน้ำมัน 50 บาท

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่** 5.12 ตัวอย่างการเลือกใช้ความสัมพันธ์

จากรูปที่ 5.4 ถึง 5.12 จะทำให้ได้สมการความอ่อนไหวดังนี้

$$C_T = 1.5(C_C) + 324.31 + 9.9(C_G) \quad (5.1)$$

$$C_T = 271.65 + (1.895 + 0.076C_G)(D_C) \quad (5.2)$$

$$C_T = 5472(P) + 171.7+1.6(C_W) \quad (5.3)$$

$$C_T = 2.04(C_C)(P) + 214.11 \quad (5.4)$$

$$C_T = 5472(P) +(2.015 + 0.081C_G)(D_W) + 196.4 \quad (5.5)$$

เมื่อ $C_T$ = ค่างานต้นทุน

$C_C$ = ราคาหินคลุก

$C_W$ = ราคาหินผุ

$C_G$ = ราคาน้ำมัน

$C_C$ = ราคาซีเมนต์

$D_W$ = ระยะทางขนส่งหินผุ

$D_C$ = ระยะทางขนส่งหินคลุก

P = เปอร์เซนต์ซีเมนต์

สมการที่ 5.1 ถึง 5.4 เป็นสมการของความสัมพันธ์รูปที่ 5.4 ถึง 5.7 ตามลำดับ และสมการที่ 5.5 เป็นสมการของความสัมพันธ์รูปที่ 5.8 ถึง 5.11 แต่เนื่องจากระยะค่าขนส่งตั้งแต่ 1 ถึง 10 นั้นมีราคาเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีความสัมพนธ์ดังนั้น สมการที่ 5.2 และ 5.5 จึงไม่สามารถคำนวณหาค่างานก่อสร้างที่ระยะทางขนส่งดังกล่าวได้

จากการวิเคราะห์งานวิจัยนี้ทำในทราบถึงความเหมาะสมในการนำวัสดุหินผุปรับปรุงไปใช้ในโครงสร้างชั้นพื้นทางได้จริงเนื่องจากวัสดุทั้งสามแหล่งนั้น มีค่าความแข็งแรง (สังเกตจากค่า UCS) ค่าความคงทน (สังเกตจากค่า Durability) และค่า Resilient Modulus สูงกว่ามาตรฐานของกรมทางหลวงซึ่งทำให้ทราบว่าวัสดุหินผุปรับปรุงนั้นเมื่อนำไปใช้จริงอาจจะลดความหนา

ของชั้นโครงสร้างทางในการออกแบบ และมีระยะเวลาในการใช้นานกว่าวัสดุหินคลุกอีกด้วย และยังทราบอีกว่าวัสดุหินผุปรับปรุงที่ตรงตามมาตรฐานนั้นมีราคาค่างานต้นทุนต่ำกว่าวัสดุหินคลุกที่ขนส่งมาจากแหล่งอื่นที่ห่างไกลออกไปไม่ต่ำกว่า 50 กิโลเมตร อีกด้วย จึงสรุปได้ว่าวัสดุหินผุปรับปรุงนี้สามารถนำไปใช้ในโครงสร้างชั้นพื้นทางได้จริง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 6

# สรุปและข้อเสนอแนะ

## 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยการปรับปรุงคุณภาพวัสดุหินผุทั้งสามแหล่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. วัสดุทั้งสามแหล่งมีลักษณะโดยรวมใกล้เคียงกันโดยวัสดุแหล่งที่สองจะมี คุณภาพดีกว่าแหล่งที่หนึ่งและแหล่งที่สามเนื่องจากมีขนาดคละของวัสดุที่ต่างกันในส่วนของวัสดุมวลละเอียด

2. วัสดุปรับปรุงทั้งสามแหล่งสามารถนำมาใช้จริงได้โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ที่ 6.1, 2.7 และ 8.2 เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

3. เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพแล้วจะได้วัสดุที่มีค่า UCS เท่ากับ 17.5 ksc จะทำให้ค่าโมดูลัสการคืนตัว มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 209 – 308 MPa และค่าโมดูลัสการคืนตัวดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าของหินคลุก

4. ค่าความสึกหรอของวัสดุทั้งสาม โดยการทดสอบ Wet and Dry มีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนด คืออยู่ที่ 1.0 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ และพบความสัมพันธ์ระหว่าง %Loss กับ UCS ของวัสดุปรับปรุง ซึ่งเมื่อค่า UCS มากขึ้นจะส่งผลให้ %Loss มีค่าลดลง และมีแนวโน้มที่จะลดค่า UCS ที่เป็นมาตรฐานของดินผสมซีเมนต์ได้ถ้าพิจารณาจากค่าความคงทนประกอบกันไปด้วย

5. จากการวิเคราะห์ราคาค่าก่อสร้างของวัสดุปรับปรุงทั้งสามแหล่งมีราคาถูกกว่า วัสดุหินคลุกชั้นพื้นทางทั้งนี้ ราคาวัสดุหินคลุกจะแปรผันตามระยะทางขนส่ง จึงจำเป็นต้องใช้ระยะทางการขนส่งมาพิจารณาด้วย

6. เนื่องจากวัสดุแหล่งที่ 1 และ 3 ใช้ปริมาณซีเมนต์ในการผสมค่อนข้างสูงจึงอาจจะก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวของพื้นทางเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์ ซึ่งในทางปฏิบัติจำเป็นต้องมีการทดสอบก่อนจะนำไปใช้งานจริง

## 6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

### 6.2.1 ปัญหาในการวิจัย

1. จากการทดสอบวัสดุพบว่า แม้แหล่งทั้งสามจะอยู่ใกล้กันและมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกัน แต่จากการวิจัยพบว่าวัสดุทั้งสามแหล่งมีคุณสมบัติต่างกัน ดังนั้นการจะนำมาปรับปรุงควรนำวัสดุหินผุที่หาได้ตามท้องถิ่นมาทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้นก่อนทุกครั้งเพื่อให้ทราบว่าวัสดุที่จะนำมาปรับปรุงนั้นมีความเป็นไปได้ในการสร้างทางจริงหรือไม่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ในการปรับปรุงคุณภาพนั้นไม่สามารถรู้ได้ถึงปริมาณซีเมนต์ที่จะต้องเติมลงไปจึงต้องมีการเติมซีเมนต์ในปริมาณต่างๆทำให้ ต้องใช้เวลานานในการทดสอบ ดังนั้นถ้ามีข้อมูลการทดสอบที่สามารถหาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติเบื้องต้นกับปริมาณซีเมนต์ ที่เหมาะสมก็จะสามารถ ทราบปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมได้ทันที

3. การทดสอบ Durability ต้องใช้แรงในการแปรงที่คงที่จึงมีความยากลำบากในการควบคุมการทดสอบ ทั้งนี้จึงต้องมีการทดสอบแรงก่อนการทดสอบทุกครั้งและควรจะใช้บุคคลเดิมตลอดการทดสอบ

### 6.2.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรตรวจสอบขนาดคละของวัสดุหินผุที่จะนำมาปรับปรุงก่อนเนื่องจากถ้ามีปริมาณวัสดุผงละเอียดมากเกินไป วัสดุหินผุนั้นจะต้องใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพเป็นจำนวนมากจึงทำให้ไม่เหมาะสมในการใช้เป็นโครงสร้างทาง

2. หลังการปรับปรุงคุณภาพวัสดุด้วยซีเมนต์ ควรมีการตรวจสอบค่า $M_R$ เพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบด้วยวิธี Analytical ต่อไป

3. วัสดุที่ได้นำมาปรับปรุงนั้นเป็นเพียงแค่วัสดุหินผุในจังหวัดอุตรดิถต์เท่านั้น จึงแนะนำให้มีการวิจัยในภูมิภาคอื่นต่อไปเพื่อจะสามารถใช้ได้ทั่วประเทศ

4. วัสดุที่ได้นำมาปรับปรุงนั้นควรจะผลักดันให้มีการสร้างจริงเพื่อที่จะทราบถึงระยะเวลาการให้บริการและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง ที่ใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพ

5. การปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมวัสดุด้วยซีเมนต์ อาจจะมีแนวทางที่สามารถลดปริมาณซีเมนต์ที่ผสมได้ หากพิจรณาถึงค่าความคงทน แต่จำเป็นต้องมีข้อมูลที่มากกว่านี้เพื่อมาสนับสนุน แนวความคิดดังกล่าว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# รายการอ้างอิง

## ภาษาไทย


จิรชัย เหล่ามานิต. การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของหินผุบางชนิดเมื่อผสมกับน้ำปูนใส. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524

ดิเรก ลาวัณย์ศิริ. การนำวัสดุท้องถิ่นมาใช้ในงานก่อสร้างถนน. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540

ธันวิน สวัสดิศานต์, เศกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, อภิสิทธิ์ กล่ำเหม็ง. การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุโครงสร้างทางชนิดวัสดุมวลรวมที่ไม่เกาะตัว : รายงานฉบับที่ วพ. 260 กรุงเทพมหานคร: สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, 2551

ทางหลวง, กรม. มาตรฐานดินถมคันทาง[ออนไลน์]. 2532. แหล่งที่มา: http://www.doh.go/dohweb/standard/dhs/dhs102-32.pdf [11/11/51]

ทางหลวง, กรม. มาตรฐานทรายถมคันทาง[ออนไลน์]. 2532. แหล่งที่มา: http://www.doh.go/dohweb/standard/dhs/dhs103-32.pdf [11/11/51]

ทางหลวง, กรม. มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม[ออนไลน์]. 2532. แหล่งที่มา: http://www.doh.go/dohweb/standard/dhs/dhs205-32.pdf [11/11/51]

ทางหลวง, กรม. มาตรฐานพื้นทางหินคลุก[ออนไลน์]. 2544. แหล่งที่มา: http://www.doh.go/dohweb/standard/dhs/dhs201-44.pdf [11/11/51]

ทางหลวง, กรม. มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์[ออนไลน์]. 2533. แหล่งที่มา: http://www.doh.go/dohweb/standard/dhs/dhs204-33.pdf [11/11/51]

ทางหลวง, กรม. วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL) ของดิน[ออนไลน์]. 2517. แหล่งที่มา: http://www.doh.go/dohweb/standard/dhs/dhs 102-17.pdf [11/11/51]

ทางหลวง, กรม. วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index (PI) ของดิน[ออนไลน์]. 2517. แหล่งที่มา: http://www.doh.go/dohweb/standard/dhs/dhs103-17.pdf [11/11/51]

ทางหลวง, กรม. วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน[ออนไลน์]. 2517. แหล่งที่มา: http://www.doh.go/dohweb/standard/dhs/dhs105-17.pdf [11/11/51]

ทางหลวง, กรม. วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน[ออนไลน์]. 2517. แหล่งที่มา: http://www.doh.go/dohweb/standard/dhs /dhs108-15.pdf [11/11/51]



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทางหลวง, กรม. วิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR[ออนไลน์]. 2517. แหล่งที่มา: http://www.doh.go/dohweb/standard/dhs/dhs109-17.pdf [11/11/51]

ทางหลวง, กรม. วิธีการทดลองหาขนาดคละของเม็ดวัสดุ โดยผ่านกระแกรงแบบล้าง[ออนไลน์]. 2517. แหล่งที่มา: http://www.doh.go/dohweb/standard/dhs/dhs205-17.pdf [11/11/51]

**ภาษาอังกฤษ**

American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures : ASTM D559-03. United States: American Society for Testing and Materials, 2003

American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials : AASHTO T307. United States: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999

Boonjune Nithi-Uthai. Stabilization of Tropical clays with cement and secondary additive. Thesis of Asian Institute of Technology, 1969

Deere, D.U., and Patton, F.D. Slope Stability in Residual Soils. Proceedings of the fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 87-170 San Juan, Puerto Rice, June 1971.

Kanchit Tongmark. Strength and Modulus of Elasticity of Lateric soil-cement. Thesis of Asian Institute of Technology, 1966

Law Kwai Hong. Strength and Deformation Characteristics of Cement-treated Clay. Thesis of Asian Institute of Technology, 1989

Little, D.N. Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime. Westmark: Kendall/Hunt Publishing Company, 1995

Lumb, P. The properties of decomposed granite. Geotechnique, 226-243, 1962.

Matsuo, S.I. and Nishida, K. Physical and Chemical properties of Decomposed Granite Soil Grains. Vol. 8, No. 4. Japan: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1968.

National Lime Association (NLA). Lime Treated Soils Save Time & Money. Arlington, 2005

Portland Cement Association. Design and Control of Concrete Mixtures. Washington, D.C.: Portland cement Association, 1970

Ruenkrairergsa, T. and Changsuwarn, S. Some Sources and Basic Properties of Granitic Soil in Thailand. International Conference on Materials of Construction for Developing Countries, 613-631, Bangkok, 1978.

Sower, G.F. Engineering properties of residual soils derived foam igneous and metamorphic rock. Soil Mech. And Found. Engr, 39-61 Brazil, 1963.

Teeracharti Ruenkrairergsa. Economic Analysis of Soil-cement Base Construction as Compared to Crushed Rock Base. The Third International Conference on Low Volume Road, Arizona, 1982

Teeracharti Ruenkrairergsa and Somwang Changsuwarn. Some Sources and Basic Properties of Granitic Soil in Thailand. The International Conference on Materials of Construction for Developing Countries, Bangkok, 1978

Teeracharti Ruenkrairergsa. Strength Parameters of Cement Stabilized Granitic Soil by Soil Classification. The 6th Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Taiwan, 1980

U. S. Air Force. Soil Stabilization for Pavements. United States, 2004

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายดุลยพล ชัยมงคล เป็นบุตรของนายอโณทัย-นางสุชาดา ชัยมงคล มีพี่น้อง 2 คน เป็นบุตรชายคนแรก เกิดเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2526 จังหวัดกรุงเทพมหานคร ได้สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายหลักสูตร 3 ปีจากโรงเรียนเซนต์คาเบรียล และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปีการศึกษา 2548 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมการขนส่ง) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาคต้น ปีการศึกษา 2548

ขณะศึกษาอยู่ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บทความของผู้เขียนวิทยานิพนธ์ได้ถูกตีพิมพ์ในเอกสารรวมการประชุมวิชาการวิศวกรรมขนส่งแห่งชาติครั้งที่ 6 ดังนี้

ดุลยพล ชัยมงคล, เกษม ชูจารุกุล, จิรโรจน์ ศุกลรัตน์. 2552. การปรับปรุงวัสดุหินผุในจังหวัดอุตรดิตถ์เพื่อใช้เป็นวัสดุในงานชั้นพื้นทาง. เอกสารรวมการประชุมวิชาการวิศวกรรมขนส่งแห่งชาติครั้งที่6. พิษณุโลก.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย