

ความสัมพันธ์ของผลทดสอบ การรับแรงเฉือน กำลังรับแรงแบกทาน  
และกำลังรับแรงตัด สำหรับดินผสมซีเมนต์

RELATIONSHIPS OF TESTING RESULTS ON SHEAR  
STRENGTH BEARING CAPACITY AND FLEXURAL STRENGTH  
FOR SOIL CEMENT

จักรพันธ์ แก้วกัญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ความสัมพันธ์ของผลทดสอบ การรับแรงเฉือน กำลังรับแรงแบกทาน  
และกำลังรับแรงดัด สำหรับดินผสมซีเมนต์

จักรพันธ์ แก้วกัญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ความสัมพันธ์ของผลทดสอบ การรับแรงเฉือน กำลังรับแรงแบกทาน และ  
กำลังรับแรงคด สำหรับดินผสมซีเมนต์

Relationships of Test Result on Shear Strength, Bearing Capacity, and  
Flexural Strength for Soil Cement

ชื่อ - นามสกุล

นายจักรพันธ์ แก้วกัญญา

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภสิทธิ์ พงศ์สิวะสถิตย์, Ph.D.

ปีการศึกษา

2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



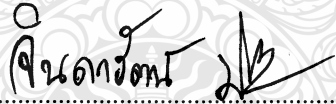
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิระศักดิ์ ละออจันทน์, Dr.-Ing)



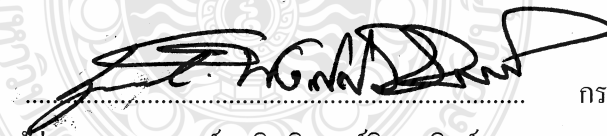
กรรมการ

(อาจารย์อรรถกิจ อาสาพรห้ประกิต, ปร.ด.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จินดารัตน์ มณีเจริญ, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภสิทธิ์ พงศ์สิวะสถิตย์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิวกอ อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 31 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความสัมพันธ์ของผลทดสอบ การรับแรงเฉือน กำลังรับแรงเบกทาน และกำลังรับแรงค้ำ สำหรับดินผสมซีเมนต์
ชื่อ –นามสกุล	นายจักรพันธ์ แก้วกัญหา
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภติทิ พงศ์วิวะสถิตย์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินผสมซีเมนต์สำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง มีการทดลอง 4 ชนิด ได้แก่ การทดสอบแรงกดอัดทิศทางเดียว, การทดสอบแคลิฟอร์เนียแบร์ริงเรโซแบบแช่น้ำ, การทดสอบกำลังรับแรงค้ำโดยวิธีกดคานสองจุด และการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยแผ่นเหล็ก ดินที่นำมาใช้ในการทดสอบมี 3 ชนิด ได้แก่ 1) ดินลูกรัง จาก อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี 2) ดินทราย จาก อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 3) ดินเหนียว จาก อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1

เริ่มจากนำดินตัวอย่างผสมซีเมนต์มาบดอัดใน โมลด์ทดสอบด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ปริมาณน้ำที่ผสมในระหว่างการบดอัดใช้เท่ากับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม สำหรับโมลด์ที่ใช้ในการทดสอบมี 4 ชนิด ได้แก่ 1) โมลด์รูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 3.5 เซนติเมตร มีความสูงเท่ากับ 7.0 เซนติเมตรสำหรับการทดสอบแรงกดอัดทิศทางเดียว 2) โมลด์รูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 15.10 เซนติเมตร มีความสูงเท่ากับ 17.7 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบแคลิฟอร์เนียแบร์ริงเรโซแบบแช่น้ำ 3) โมลด์รูปคานมีขนาดเท่ากับ 7.5x7.5x35 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังค้ำ และ 4) โมลด์รูปกล่องขนาดเท่ากับ 150x150x15 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับบรรทุก สำหรับอายุการบ่มซีเมนต์ใช้เท่ากับ 28 วัน

มีผลการทดสอบดังนี้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ผสมเพิ่มในดิน มีผลทำให้ค่าแคลิฟอร์เนียแบร์ริงเรโซแบบแช่น้ำ, ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, ค่าโมดูลัสการแตกร้าว และค่าโมดูลัสการต้านทานแรงกดของชั้นดิน มีค่าเพิ่มขึ้นตามอย่างมีนัยสำคัญ โดยความสัมพันธ์ของการทดสอบได้ถูกนำเสนอ

**คำสำคัญ:** การปรับปรุงคุณภาพดิน, วัสดุชั้นรองพื้นทาง, การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

<b>Thesis Title</b>	Relationships of Test Results on Shear Strength, Bearing Capacity, and Flexural Strength for Soil Cement
<b>Name - Surname</b>	Mr. Jakrapan Kaewkanha
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Supasit Pongsivasathit, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2016

## ABSTRACT

The aims of this research was to investigate the relationships of laboratory test results of soils mixed cement for using as a subgrade material. Four types of testing ware conducted, comprised of unconfined compression test, soaked CBR test, third point loading test, and plate bearing test. The soil samples were derived from three different sources: 1) a laterite soil from Ban Pong District, Ratchaburi Province, 2) a sand from Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom Province, and 3) a clay from Meuang District, Samut Sakhon Province. The cement used was Portland Cement Type I.

The soil sample mixed with cement ware compacted into the molds by the method of Modified Proctor Test. The quantity of water mixed in the soil sample during compaction was adjusted to the optimum moisture content. The four types of molds were used, comprised of 1) a cylinder mold (diameter 3.5 cm; height 7.00 cm) for the unconfined compression test, 2) a cylinder mold (diameter 15.10 cm; height of 17.7 cm) for the soaked CBR test, 3) a beam mold (size 7.5x7.5x35 cm<sup>3</sup>, and 4) a box mold (size 150x150x15 cm<sup>3</sup>) for the plate bearing test. The curing period was 28 days.

The results, revealed that the increasing of cement being mixed could significantly increase the values of the soaked CBR, the undrained shear strength, the modulus of rupture, and the modulus of subgrade, The relationships of these testing results have been demonstrated.

**Keywords:** ground improvement, subgrade materials, laboratory test

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภลัทธิต พงศ์วิเศษสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดารัตน์ มณีเจริญ ดร.อรรถกิจ อสาพห์ประภิต กรรมการสอบ ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย เสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่อง การศึกษาการพัฒนากำลังของวัสดุชั้นพื้นทางผสมซีเมนต์ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2559 (วช.) จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ และคณะครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ และเป็นกำลังใจจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

จักรพันธ์ แก้วกัญหา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	10
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	11
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	11
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	11
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.1 บทนำ.....	13
2.2 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์.....	13
2.3 การปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยซีเมนต์.....	15
2.4 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี.....	16
2.5 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	18
2.6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์.....	20
2.7 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์.....	31
2.8 กำลังรับแรงค้ำ.....	33
2.9 กำลังรับแรงแบกทาน.....	37
2.10 มาตรฐานดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง.....	39
2.11 การทดสอบ XRD, XRF, SEM.....	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	44
3.1 วัสดุในงานวิจัย.....	44
3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ .....	47
3.4 การเตรียมตัวอย่าง.....	47
3.5 การวิเคราะห์ผลและสรุปผล .....	51
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	53
4.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน .....	53
4.2 ผลการทดสอบ XRD,XRF,SEM .....	56
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินผสมซีเมนต์.....	65
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลการทดสอบ.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ .....	83
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
บรรณานุกรม .....	86
ภาคผนวก .....	93
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบแคลิฟอร์เนียเบร็งเรโซแบบแช่น้ำ .....	94
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัด .....	101
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด.....	108
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบกำลังรับแรงเบกทาน.....	114
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	118
ประวัติผู้เขียน.....	137



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุง ตามการจำแนกแบบ ASSHTO.....	28
ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสม สำหรับวัสดุต่างๆ.....	29
ตารางที่ 2.3 แนวทางเลือกวัสดุผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิด.....	38
ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความค้ำน้ำที่จุดพิบัติ, $A_p$ .....	50
ตารางที่ 2.5 แสดงค่า Modulus of Rupture ของดินลูกรังผสมซีเมนต์และดินลูกรังผสมซีเมนต์ กับสารผสมเพิ่ม .....	58



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	20
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติกกับเวลา.....	23
รูปที่ 2.3 ค่าพิกัดอัตราเบอร์กของดินไอโอวา หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง.....	24
รูปที่ 2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8%.....	25
รูปที่ 2.5 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12%.....	25
รูปที่ 2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 16%.....	26
รูปที่ 2.7 อิทธิพลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างผสมชั้น และการบดอัดที่มีต่อกำลังอัดของ ดินซีเมนต์ .....	31
รูปที่ 2.8 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้เวลาในการบดอัดนานขึ้น.....	32
รูปที่ 2.9 การเพิ่มของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์.....	35
รูปที่ 2.10 เครื่องมือการทดสอบหาค่ากำลังความสามารถในการรับแรงดัด (Flexural Strength) โดยวิธี Third-Point Loading .....	34
รูปที่ 2.11 แสดงการทดสอบกำลังดัดของ Beam โดยวิธี Third-Point Loading.....	36
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in Tension กับกำลังดึงและกำลังอัด ของดินซีเมนต์ .....	39
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive strength ของดินซีเมนต์.....	40
รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบ X-ray diffraction.....	41
รูปที่ 2.15 หลักการของ Bragg's Law.....	42
รูปที่ 2.16 Micro-XRF.....	43
รูปที่ 2.17 เครื่อง Iron sputtering device .....	44
รูปที่ 2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	44

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การบดอัดดิน เป็นขั้นตอนของการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อให้ดินมีความสามารถในการรับกำลังมากขึ้น ในการใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง ในงานก่อสร้างทาง หรือ ใช้เป็นลานสำหรับน้ำหนักสินค้าหรือลานกองสินค้า ซึ่งมีบทบาทอย่างยิ่งในงานก่อสร้าง เนื่องจากงานก่อสร้างประเภทนี้มีต้นทุนการในการใช้วัสดุค่อนข้างต่ำเพราะสามารถหาวัสดุที่ใช้ในบริเวณรอบๆสถานที่ก่อสร้างและการขนส่งที่มีราคาไม่สูงนักทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างไม่สูงมากนัก แต่ในปัจจุบันวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างประเภทนี้หายากขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งการขนส่งวัสดุในแหล่งพื้นที่ต่างๆมายังหน่วยงานก่อสร้างมีราคาสูงขึ้น อีกทั้งวัสดุอาจมีคุณภาพไม่ตรงกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ทั้งนี้หากการใช้วัสดุบริเวณที่ก่อสร้างหรือใกล้เคียงการก่อสร้าง หรือการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ โดยการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 สามารถทำให้ได้คุณสมบัติของดินที่ดีขึ้นในปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับการบดอัดตามคุณสมบัติของดิน และอัตราส่วนระหว่างปริมาณดินต่อซีเมนต์ที่ได้ออกแบบปรับปรุงคุณภาพดินไว้แล้ว ทำการบดอัดแทนที่ดินเดิมด้วยชุดเครื่องจักรบดอัดปรับเกลี่ยให้ได้ระดับและความแน่นตามฐานที่กำหนด ก็จะสามารถใช้เป็นชั้นรองพื้นทางหรือ ใช้เป็นลานสำหรับน้ำหนักสินค้าหรือลานกองสินค้าได้ ข้อดีที่สำคัญคือสามารถทำการปรับปรุงพื้นดินเดิมในสถานที่ก่อสร้างได้ทันที ทำให้ได้คุณสมบัติของดินที่เหมาะสมกับการออกแบบการรับน้ำหนัก ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และขนส่งวัสดุ สามารถใช้งานพื้นที่ได้รวดเร็ว มีผลกระทบต่อผู้ใช้เส้นทางน้อย ทำให้สะดวกสะดวก รวดเร็ว ประหยัด และมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ดีการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์บดอัดโดยให้ชั้นดินบดอัดดังกล่าวสามารถรับน้ำหนักแบกทานได้นั้น ยังต้องอาศัยวิธีการออกแบบโดยการทดลองผสมส่วนผสมตัวอย่างจากห้องปฏิบัติการทดสอบ และเมื่อทำการผสมและบดอัดจริงในสภาพพื้นที่ก่อสร้างแล้วจึงทำการเจาะตัวอย่าง(Coring) เพื่อนำไปทดสอบ โดยการทดลองแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Test) หรือทดสอบด้วยวิธีแรงกดทับด้วยแผ่นเหล็ก( Plate Load Test) อีกครั้งเพื่อหาค่าการรับกำลังแบกทานในสนามที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งการรับกำลังของดินบดอัดในสนามอาจมีค่าแตกต่างจากค่ากำลังที่ได้จากการออกแบบและทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน อัตราการผสม วิธีการผสม วิธีการบดอัดและระยะเวลาในการบ่ม ทั้งนี้หากสามารถคาดการณ์การรับน้ำหนักของดินที่ถูกปรับปรุง

คุณภาพด้วยซีเมนต์บดอัดในสนาม ให้ได้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงหรือเท่ากับกับการออกแบบในห้องปฏิบัติการได้ ก็จะเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่ายในควบคุมคุณภาพในงานก่อสร้างได้ดียิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนในทอมของค่าแรงกดแกนเดียว ค่า CBR แบบ แช่น้ำ ของดินซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านการรับกำลังแบกทานของดินซีเมนต์ด้วยการทดสอบการให้น้ำหนักกดบนแผ่นเหล็ก (Plate Bearing Test)

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านการรับแรงคดในทอมของค่าโมดูลัสการแตกร้าวของดินผสมซีเมนต์เพื่อเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง

1.2.4 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าแรงกดแกนเดียว ค่า CBR แบบแช่น้ำ และค่าโมดูลัสการแตกร้าว เพื่อใช้ในการทำนายค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมซีเมนต์

1.2.5 เพื่อศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมี ในตัวอย่างดิน ที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมซีเมนต์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ในกลุ่มตัวอย่างดินพื้นที่ดังนี้

1.3.1.1 ดินลูกรังบริเวณบ่อลูกรัง อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี ที่ระดับความลึกประมาณ 10 - 15 เมตร เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) โดยใส่ถุงกระสอบ

1.3.1.2 ดินทรายบริเวณบ่อทราย อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม ที่ระดับความลึกประมาณ 10-15 เมตร เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) โดยใส่ถุงกระสอบ

1.3.1.3 ดินเหนียวบริเวณ อ.เมือง จ.สมุทรสาครที่ระดับความลึก 1-2 เมตรเก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) โดยใส่ถุงกระสอบ

1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ชนิดของดิน ปริมาณความชื้น ความหนาแน่นสูงสุด คุณสมบัติทางวิศวกรรม การทดลองแรงอัดแกนเดียว(Unconfined Compression Test), การทดลองแคลิฟอร์เนีย แบร์ริง เร โชแบบแช่น้ำ (Soaked California Bearing Ratio), การทดสอบกำลังด้านทานแรงคด (Third-Point Loading), การทดสอบการให้น้ำหนักกดบนแผ่นเหล็ก (Plate Bearing Test) เพื่อใช้ในการออกแบบดินผสมซีเมนต์ในชั้นรองพื้นทาง

1.3.3 ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรม ของดินเมื่อผสมด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยทำการศึกษาการผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 3, 5, 7, 9, 11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดินแห้ง

1.3.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของดินบดอัดโดยวิธีในห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบกับกำลังของดินบดอัด โดยวิธีแบบจำลองในสนาม

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม ของตัวอย่างดินผสมซีเมนต์ในพื้นที่ที่เก็บตัวอย่าง ในลักษณะดินทั้ง 3 ชนิด

1.4.2 ทราบถึงส่วนผสมที่เหมาะสม ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ในแต่ละพื้นที่ของแต่ละชนิดตัวอย่างทดสอบ เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการจัดหาวัสดุจากพื้นที่อื่นๆ นอกบริเวณการก่อสร้าง

1.4.3 ทราบความสัมพันธ์ของค่าแรงกดแกนเดียว ค่า CBR แบบแช่น้ำ และค่าโมดูลัสการแตกร้าว เพื่อทำนายค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมซีเมนต์ ให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง

1.4.5 ทราบลักษณะองค์ประกอบทางเคมี ในตัวอย่างดิน ที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมซีเมนต์

1.4.6 สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยระดับสูงต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพของดินในทางวิศวกรรม เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและคุณสมบัติของดินทางด้านวิศวกรรม ในการใช้ดินเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางหรือชั้นพื้นทาง ในงานถนนหรืองานดินบดอัด การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์เป็นอีกวิธีการหนึ่ง เพื่อให้ได้วัสดุดินซีเมนต์สำหรับใช้ใน งานบดอัดชั้นพื้นทาง หรือชั้นรองพื้นทาง ที่มีคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ดี สามารถใช้รับน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำกับพื้นที่ และทำให้ดินบริเวณที่ถูกบดอัด มีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้นโดยสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น มีอายุการใช้งานได้ยาวนานทนต่อสภาพแวดล้อมและการรับน้ำหนักได้ดี การใช้ดินผสมซีเมนต์จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพและส่วนผสม ของวัสดุรวมรวมที่ ต้องการจะทำการบดอัดเพื่อใช้เป็นชั้นรับน้ำหนัก เพื่อลดข้อด้อยของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ จะใช้เป็นชั้นรับน้ำหนัก ดังนั้น การผสมดินกับซีเมนต์เพื่อให้ได้ความแข็งแรงของดินดังกล่าว จะต้อง ทำการทดสอบวัสดุดิน ที่จะนำมาใช้เป็นชั้นรองพื้นทางหรือชั้นพื้นทาง เพื่อหาคุณสมบัติเดิมและ คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ของวัสดุดังกล่าว ทั้งก่อนผสมและ หลังการผสมซีเมนต์ โดยทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรม และหาความสัมพันธ์ระหว่างการรับ กำลังรับแรงอัดกับกำลังรับแรงดัด ค่าการแอ่นตัวของวัสดุ ค่าการรับกำลังแบกทาน ว่ามีอิทธิพลต่อ คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ปรับปรุงแล้วอย่างไร เพื่อเป็นประโยชน์ในการพิจารณาเลือก สัดส่วนในการผสมดินกับซีเมนต์ หรือสารผสมเพิ่ม และพิจารณาเทคนิคที่ใช้ในการบดอัด และบ่ม ดินซีเมนต์ ได้อย่างเหมาะสมกับความต้องการการใช้งานของชั้นดินซีเมนต์บดอัดนั้น

#### 2.2 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์

Mills [3,4] ค.ศ. 1932 รายงานการวิจัยของ South Carolina State Highway Department ของ Dr. C.H. Moorefield ทำการศึกษาดินชนิดต่างๆ ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ทำให้ดินที่ถูก ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินผสมซีเมนต์ที่เปลี่ยนไปในทางที่ดีขึ้น และได้ทำให้เกิดการค้นคว้าเกี่ยวกับดินซีเมนต์กันอย่างกว้างขวาง เพื่อใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางและชั้น พื้นทางได้อย่างเหมาะสมในงานก่อสร้างถนนได้ โดยอัตราส่วนการผสมดินกับปูนซีเมนต์ที่ใช้ยังไม่ แน่นนอน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างถนนได้หลายสายในปี ค.ศ. 1933 และปีค.ศ.

1934 ผลการทดลองดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่า ดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ สามารถใช้เป็นวัสดุของงานก่อสร้างถนนได้ โดยสามารถใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางผสมซีเมนต์ซึ่งมีราคาถูกลงและสามารถทำการผสมได้ในหน่วยงานก่อสร้าง

Davidson [2], Terrel และคณะ[5] ค.ศ. 1935 South Carolina State Highway Department, Bureau of Public Roads และ Portland Cement Association อันเนื่องมาจากความสำเร็จของโครงการที่ได้ร่วมกันทดลองและก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ที่มีความยาว 1.5 ไมล์ ซึ่งอยู่ใกล้กับ Johnsonville และทราบกันว่าเป็นถนนดินซีเมนต์โครงการแรกที่ทำการศึกษาทดลองและวิจัยเชิงวิศวกรรมของถนนดินซีเมนต์ โดย Portland Cement Association จึงเกิดการทดลองในการทำก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ขึ้นในอีกหลายรัฐ

Davidson [2] ค.ศ. 1941-1944 การผสมดินด้วยซีเมนต์แล้วทำการบดอัดเพื่อใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง ได้ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างสนามบินในช่วงระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง มากถึง 22 ลานตารางหลา ซึ่งในขณะนั้นการก่อสร้างถนนดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ก็มีความนิยมในการก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น และยังมีการใช้ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุรองพื้นอ่างเก็บน้ำและคลอง ใช้เป็นวัสดุรองพื้นบดอัดของคลังเก็บสินค้า ใช้เป็นชั้นพื้นทางของที่จอดรถ ถนนคอนกรีต อีกด้วย

The Siam Cement Company Ltd [6] ในถนนสายวารินชำราบ-เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี ทดลองนำดินผสมซีเมนต์มาใช้เพื่อเป็นชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง โดยใช้ดินลูกรังที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ โดยกำหนดค่ากำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ไว้ไม่น้อยกว่า 852 กิโลปาสกาล สำหรับถนนประเภทที่ต่ำกว่ามาตรฐาน และกำหนดค่า CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ไว้ไม่น้อยกว่า 120 สำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ ถือเป็นถนนสายแรกในประเทศไทยที่มีความยาว 5 กิโลเมตร

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแสนะ จรัสกร [7] ได้ทำการวิจัยพบว่า พลังงานในการบดอัดมีผลอย่างมากต่อกำลังของดินซีเมนต์ โดยพบว่าค่าพลังงานในการบดอัดมีความสัมพันธ์กับกำลังของดินซีเมนต์แบบลอการิทึม (Logarithm model) โดยค่าแรงอัดแกนเดียว จะเพิ่มขึ้นในช่วงพลังงานบดอัดต่ำ และจะช้าลงเมื่อพลังงานบดอัดสูง ทั้งนี้ทำการทดสอบโดยการนำดินลูกรังและดินทรายปนดินตะกอน มาผสมกับซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆแล้วทำการหล่อในแบบหล่อทดสอบแล้วทำการบ่มตัวอย่างก่อนนำมาทำการกด โดยวิธีแรงอัดแกนเดียว ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ของการบดอัดกับค่ากำลังอัดดังกล่าว

## 2.3 การปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยซีเมนต์

Pendola, Kennady และ Hutson [13] นิยามการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ไว้ว่า เป็นกระบวนการที่เกิดร่วมกันของปฏิกิริยาทางกายภาพและปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง ดิน น้ำ และซีเมนต์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนกระบวนการในการผสมน้ำเข้ากับซีเมนต์โดยขณะที่ซีเมนต์เริ่มรวมตัวกับน้ำนั้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration of Cement) และทำให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของเม็ดดิน และเกิดการรวมตัวเป็นรูปร่างโครงข่ายของโมเลกุลที่แข็งแรงต่อเนื่องกัน ตามการคลและขนาดของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกันโดยการประสานโครงข่ายโมเลกุลของซีเมนต์กับเม็ดดิน และทำให้เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ เพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้น อีกทั้งซีเมนต์ยังแทรกตัวระหว่างช่องว่างของเม็ดดิน ทำให้ลดช่องว่าง ลดการซึมผ่านของน้ำและลดการบวมตัวของมวลดินได้

ขั้นตอนการเปลี่ยน Cation หรือการรวมตัวกันของ Cation บนผิวของเม็ดดิน โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังการผสมดินกับซีเมนต์ เรียกว่า Cation Exchange เป็นการลดลงของค่าพลาสติกของดินหลังจากการผสมซีเมนต์กับดินประเภทมีความเชื่อมแน่น มีความชื้น

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับ Lime ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิด Calcium Carbonate ทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของดินเพิ่มมากขึ้นในดินผสมซีเมนต์ เรียกว่ากระบวนการนี้ว่า กระบวนการ Carbonation

ขั้นตอนที่ต้องอาศัยระยะเวลา และเป็นระยะเวลานาน ซึ่งส่งผลทำให้กำลังของวัสดุดินผสมซีเมนต์สูงขึ้น โดยเป็นกระบวนการระหว่าง Free Lime ที่ถูกปลดปล่อยระหว่างการดำเนินปฏิกิริยาไฮเดรชันของ Silica หรือ Alumina ที่มีอยู่ในดิน ทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มมากขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยา เรียกขั้นตอนนี้ว่า Pozzolanic Reaction

Terrel และคณะ [5] ได้ทำการผสมซีเมนต์ที่เป็นซีเมนต์เพสต์กับดินเม็ดหยาบ พบว่าซีเมนต์เพสต์ทำหน้าที่ยึดอนุภาคระหว่างโมเลกุลของเม็ดดินเข้าด้วยกัน โดยยึดเกาะที่ผิวระหว่างซีเมนต์เจลและผิวอนุภาคของดิน ส่วนในดินเม็ดละเอียดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิด CSH และ CAH ในแร่ดินเหนียวที่สลายออกมาในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า pH สูง และจะทำปฏิกิริยากับ Free Lime หรือ Hydrate Lime

การปรับปรุงคุณภาพดินจึงเป็นกระบวนการที่จะทำให้ดินที่มีอยู่ตามธรรมชาติมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นกว่าคุณสมบัติเดิมของวัสดุในทางวิศวกรรม เช่น เพิ่มกำลังรับ



แรงเฉือน เพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทาน ความสามารถรับน้ำหนักจากการจราจร หรือ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ เป็นต้น โดยการเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินจะต้อง คำนึงถึงปัจจัยต่างๆหลายประการ เช่น คุณสมบัติของดิน ส่วนประกอบของดิน ราคา และความ สะดวกในการทำงาน อาจใช้ วิธีการบดอัด วิธีการทำให้แน่นด้วยเทคนิคเฉพาะ หรือ วิธีการใช้สาร ผสมเพิ่ม ซึ่งอาจอยู่ในรูปของของเหลวหรือเป็นผง มาผสมเพิ่มลงในดิน

### 2.3.1 Soil Stabilization หรือการปรับปรุงคุณภาพดิน แบ่งออกได้เป็นหลายวิธีดังนี้

2.3.1.1 Chemical Stabilization เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมีโดยการ ใช้สารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพ เช่น Cement Stabilization, Lime Stabilization, Sodium Chloride Stabilization เพื่อให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในดินเกิดการรวมตัวและยึดเกาะแน่น ระหว่างโมเลกุล และทำให้ดินมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นกว่าเดิม

2.3.1.2 Physical Stabilization เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางกายภาพ โดย การให้อุณหภูมิหรือความดันกับดิน เช่น Thermal Stabilization, Pressure Stabilization โดยไม่ทำให้ โครงสร้างภายใน และการยึดเกาะของดินเปลี่ยนไปจากเดิม

2.3.1.3 Mechanical Stabilization เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้เครื่องมือกลใน การสั่นสะเทือนชั้นดิน เช่น Sand Piling, Vibroflotation ทำให้เม็ดดินเกิดการขัดตัวกันภายในเม็ดดิน มากขึ้นเรียกว่าMechanical Interlock โดยเกิดจากค่าพลังงานที่ให้กับดิน

2.3.1.4 Electrochemical Stabilization โดยการทำให้การดูดซึมน้ำในดินลดลง โดย การให้ขั้วไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบเป็นตัวทำให้เกิดประจุไฟฟ้า ประจุที่เกิดขึ้นเป็นตัวนำน้ำให้เคลื่อนที่ ออกไปจากพื้นที่ที่ทำการปรับปรุงคุณภาพเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ลด ปริมาณความชื้นในดิน ทำให้การดูดซึมน้ำในดินน้อยลง

## 2.4 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี

ตามที่มีการปรับปรุงคุณภาพดินมีหลายวิธีดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการปรับปรุง คุณภาพดิน โดยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization) ซึ่งเป็นการใช้สารเคมีผสมเพิ่มเติมลงไป ในดิน เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาณของดินและเป็นการปรับโครงสร้างการเรียงตัวของเม็ดดิน ซึ่ง สามารถพิจารณาจากการบวมตัวของดิน และการหดตัวของดิน ปรับปรุงคุณสมบัติในการรับน้ำหนัก ของดิน การปรับปรุงการไหลซึมผ่านของน้ำในดิน และเพิ่มความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพ อากาศ โดยที่สารเคมีหรือวัสดุผสมเพิ่ม ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินที่เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว หรือเถ้าลอย ซึ่งจะทำให้ดินถูกปรับปรุงคุณภาพ และมีคุณสมบัติเป็นไปตามค่า

มาตรฐานที่กำหนดไว้ในการออกแบบ และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย สำหรับความเหมาะสมของการเลือกใช้วัสดุผสมเพิ่มนั้นจะต้องคำนึงถึงผลประโยชน์ในการทำงาน การจัดเก็บรักษาและต้องมียังประกอบที่ไม่มีพิษ รวมทั้งต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกิดขึ้นในการปรับปรุงคุณภาพดินอีกด้วย

#### 2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี

2.4.1.1 Soil Properties หรือคุณสมบัติของดิน ทั้งนี้ดินที่มีอยู่ตามธรรมชาติจะมีคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีเป็นลักษณะเฉพาะตัว อันได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Particle Size Distribution) คือสัดส่วนของทราย (Sand) ทรายแป้ง (Silt) ดินเหนียว (Clay) อินทรีย์สาร (Organic Material) และสารประกอบอื่นๆที่มีอยู่ในดิน เช่น เกลือซัลเฟต หรือ คลอไรด์ และองค์ประกอบทางเคมีของแร่ธาตุในดิน ซึ่งจัดเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติดินซีเมนต์ ซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของดินชนิดนั้นๆ โดยคุณสมบัติทั้งสองชนิดนี้มีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

2.4.1.2 Stabilizing Agent คือวัสดุผสมเพิ่มหรือสารผสมเพิ่ม วัสดุผสมเพิ่มต่างชนิดกันย่อมมีผลต่อการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเชื่อมประสาน (Cementations Compounds) รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เมื่อวัสดุผสมเพิ่มนั้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับดินโดยทั่วไปแล้ว วัสดุผสมเพิ่มชนิดเดียวกันที่ผสมกับดินในอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณที่มากกว่าจะให้กำลังของวัสดุดินซีเมนต์ ที่มากกว่าภายใต้เงื่อนไขตัวแปรคงที่และดินนั้นมีความชื้นเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

2.4.1.3 Water น้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี ปริมาณความชื้นในดินที่น้อยเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปไม่ได้ไม่สมบูรณ์ น้ำจะเป็นตัวควบคุมในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการเพิ่มกำลังของดิน ถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไป น้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยา จะยังคงเหลือกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของดินที่แข็งตัวแล้วและเป็นตัวทำให้พื้นผิวลื่นเมื่อมีแรงกระทำเป็นผลทำให้ได้กำลังของดิน ต่ำกว่าความเป็นจริง

2.4.1.4 Techniques of Stabilization กระบวนการและเทคนิคในการปรับปรุงคุณภาพของดิน วิธีในการผสม ขั้นตอนในการผสม ความเร็วในการผสม เงื่อนไขในการบ่ม ตลอดจนการเตรียมสภาพดินก่อนการปรับปรุง และการดูแลหลังการผสม (Pre and Post Treatment) จะมีผลทำให้กำลังของดินที่ได้แตกต่างกันไป

ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินจะเปลี่ยนไปหลังจากปรับปรุงคุณภาพ เช่น คุณสมบัติด้านความเหนียว (Plasticity) โดยเมื่อใส่วัสดุผสมเพิ่มลงไปดินจะทำให้ความเหนียวของ

ดินเปลี่ยนแปลง โดยคุณสมบัติด้านความเหนียวจะลดลง อันเนื่องมาจากปฏิกิริยา Hydration จะทำให้เกิด Calcium Ions แล้วมีการแลกเปลี่ยนหรือรวมตัวกันของประจุไฟฟ้ารอบเม็ดดิน ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน ทำให้เม็ดดินจะจับตัวกันเป็นก้อน ค่าคุณสมบัติด้านความเหนียวจึงลดลง

คุณสมบัติทางด้านการบดอัดของดินซีเมนต์ (Compaction) จะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ลดลง และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของดินเดิมที่ใช้ เมื่อผสมวัสดุผสมเพิ่มลงไปดิน

คุณสมบัติทางด้านกำลัง (Compressive Strength) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างเช่น ชนิดของดิน ปริมาณ และชนิดของวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น ความหนาแน่นของการบดอัด ปริมาณความชื้น ระยะเวลาในการผสม อุณหภูมิในการบ่ม

การยึดประสาน (Cementation) การเกิดปฏิกิริยา Hydration ในอัตราที่แตกต่างกันในส่วนผสมที่แตกต่างกัน เม็ดดินจะเกิดการเกาะกันเป็นก้อนและสามารถรับแรงอัดได้ ในการบดอัดดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ส่วนประกอบต่างๆ ของซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ซึ่งแยกประเภทกันสำหรับดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ ในกรณีของดินเม็ดหยาบ ปฏิกิริยาของซีเมนต์ทำหน้าที่คล้ายกับการผสมคอนกรีต ยกเว้น ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) จะไม่ไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน อนุภาคของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์ขัดตัวกันด้วย Mechanical Interlock และยึดเกาะกันด้วย Chemical Cementation เช่น ในกรณีของทรายการยึดเกาะกันมีตรงบริเวณผิวสัมผัสกัน เมื่อทรายมีการบดอัดแน่นช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมีน้อยพื้นที่สัมผัสมีมากขึ้น การยึดเกาะกันแข็งแรงขึ้นด้วย แต่ถ้าเป็นทรายที่มีขนาดเดียวกันจะมีพื้นที่สัมผัสน้อย ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้มากกว่าชนิดที่ขนาดคละกันดี กรณีดินเม็ดละเอียด ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะสูงกว่าดินเม็ดหยาบเพราะว่าดินเม็ดละเอียดจะมีพื้นที่ผิวและจุดสัมผัสมากกว่า ซีเมนต์จะเป็นตัวช่วยให้การเกาะตัวของเม็ดดินแข็งแรงขึ้น ดังนั้นนอกจากซีเมนต์จะทำให้ค่าของคุณสมบัติด้านความเหนียวลดลงแล้ว ยังเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนอีกด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเกิดตามผิวเม็ดดินไปไล่น้ำที่เกาะอยู่รอบผิวเม็ดดินออกไปและซีเมนต์เข้าไปอยู่แทนที่ ทำให้ลดการอ่อนตัวของดินเมื่อน้ำภายนอกซึมเข้าไปอีก

## 2.5 โครงสร้างของดินซีเมนต์

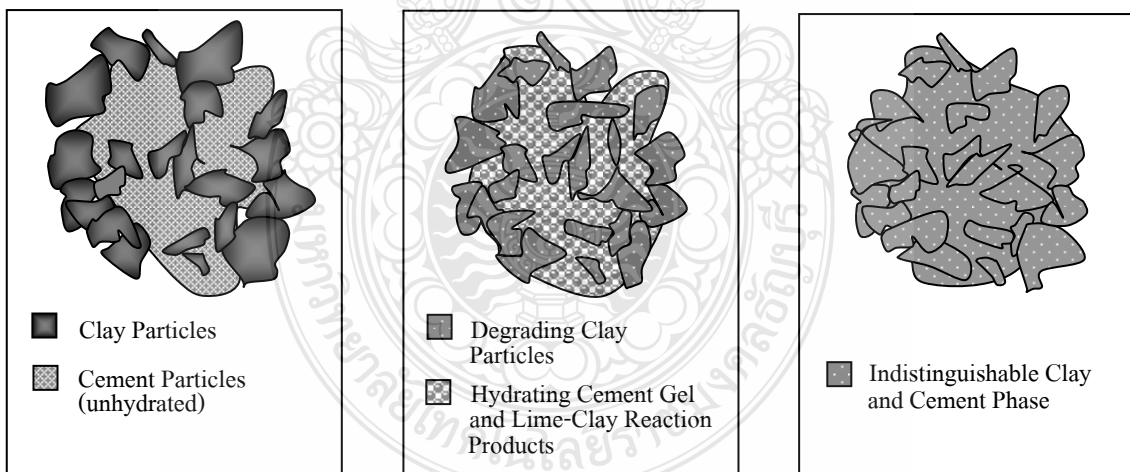
Czernin [14] ทำการวิจัยพบว่าภายใต้การบดอัดดินซีเมนต์ อนุภาคของปูนซีเมนต์ไม่ได้ผสมกับดินเพียงอย่างเดียว แต่จะทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันด้วย ภายหลังจากที่ผสมซีเมนต์กับน้ำแล้ว ทำให้เกิดสารประกอบของ CSH ในรูปของเจลในส่วนผสมของซีเมนต์และน้ำ

Mitchell และ El Jack [15] ได้กล่าวเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบและโครงสร้างของดินซีเมนต์บดอัด ดังรูปที่ 2.1 โดยแบ่งการเปลี่ยนแปลงออกเป็น 3 ระยะดังนี้

1. ช่วงที่อนุภาคของปูนซีเมนต์ ยังไม่เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ภายใต้พลังงานการบดอัด ในช่วงแรกของการบดอัดของดินซีเมนต์ แต่อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเข้าผสมรวมตัวกันกับอนุภาคของดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (a)

2. ช่วงเริ่มเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ภายใต้การบ่มระยะเวลาสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์ จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ทำให้เกิดซีเมนต์เจล แทรกไปอยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อย Lime ออกมาทำปฏิกิริยากับ Soil Silica และ Soil Alumina ที่มีอยู่ในดิน ทำให้เกิดการแยกตัวของสารทั้งสอง จากนั้นซีเมนต์เจลและสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาแทรกซึมไปตามอนุภาคของดิน จึงทำให้ลดช่องว่างระหว่างโมเลกุลของดิน ตามรูปที่ 2.1 (b)

3. ช่วงเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ ภายใต้การบ่มในระยะเวลาสั้น เกิดการยึดเกาะประสานของซีเมนต์กับเม็ดดิน อันเป็นผลทำให้ซีเมนต์เจล และขอบเขตของการแทรกซึมของซีเมนต์ กระจายทั่วก่อนดินซีเมนต์ ส่งผลให้การรับกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์ เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม ตามรูปที่ 2.1 (c)



(a) หลังบดอัดเสร็จ

(b) หลังระยะบ่มสั้นๆ

(c) หลังระยะบ่มนานๆ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์บดอัด (Mitchell และ El Jack [15])

## 2.6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์

### 2.6.1 ปริมาณและประเภทของซีเมนต์

Felt [16] พบว่า อิทธิพลกำลังอัดของดินซีเมนต์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ต่อดินที่ใช้ โดยดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็ก ส่วนดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่สูงจะมีกำลังอัดน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำกว่า และค่าความคงทนของดินซีเมนต์ เพิ่มขึ้นตามปริมาณร้อยละของซีเมนต์ที่ใช้ผสม โดยดินที่ใช้ในการทดสอบ มีดินสามชนิดคือ Loamy Sand, Medium Clay และ Silty Clay Loam มาทดสอบผสมซีเมนต์ ตั้งแต่ร้อยละ 6-30 โดยปริมาตรที่อายุ การบ่มตั้งแต่ 2 วัน จนถึง 1 ปี และผ่านสภาพภูมิอากาศ 2 แบบ คือ Wet-Dry และ Freeze-Thaw ตั้งแต่ 12 รอบ ถึง 96 รอบ

Felt [16] พบว่า ดินที่ผสมด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 3 ให้กำลังที่สูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่ซีเมนต์ประเภทที่ 3 ไม่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินทุกชนิด เช่น ดิน Sandy Loam ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 ให้กำลังอัดเป็นสองเท่าของดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่ม 7 วัน และเป็น 1.4 เท่า ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่สำหรับดิน Silty Clay Loam เมื่อผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 ทำให้กำลังอัดสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพียงเล็กน้อย อิทธิพลของประเภทของซีเมนต์โดยนำดินสองชนิดคือ Silty Clay Loam และ Sandy Loam มาผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1

Terashi, Tanaka และ Okumura [21] สรุปว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ คือ ปริมาณซีเมนต์ และปริมาณน้ำ และต่อมาก็มีการศึกษาค้นคว้าเชิงวิศวกรรมของดินซีเมนต์ มากขึ้นเรื่อย ๆ เช่น Kawasaki และคณะ [22], Nontananandh และ Yupakorn [23]

Ruenkairergsa [20,21] พบว่าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมกับดินเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ อัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ จะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน โดยพันธะเชื่อมประสาน ในดินเม็ดหยาบจะแข็งแรงกว่าในดินเม็ดละเอียด ดินที่มีดินเหนียวมาก จะให้กำลังอัดต่ำ ดังนั้นปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมกับดิน จึงควรหาจากปฏิบัติการในทดลอง

Lade และ Overton [22] ได้ศึกษาผลของพันธะการเชื่อมประสาน (Cementation) ในดินเม็ดหยาบ ภายใต้ความหนาแน่นที่เท่ากันปริมาณน้ำที่ผสมเท่ากัน และแรงดันรอบข้างต่ำ แต่แตกต่างกันที่ปริมาณซีเมนต์ที่ผสม พบว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังดึง และค่ามุม ของแรงเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น

Clare และ Pollard [23] ได้ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดิน 3 ชนิด ในประเทศอังกฤษมาผสมกับซีเมนต์ พบว่ามีอายุบ่ม 24 ชั่วโมง ดินซีเมนต์มีกำลังอัดสูงมาก เมื่อผสมดินกับซีเมนต์ประเภท High-Alumina ขณะที่ซีเมนต์ประเภทอื่นต้องมีอายุการบ่ม 5 วัน และถ้าใช้

ซีเมนต์ประเภท British Rapid Hardening ซึ่งเทียบได้กับซีเมนต์ประเภทที่ 3 พบว่าที่อายุการบ่มเท่ากัน ค่ากำลังคราก (Yield Strength) ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1

Massachusetts Institute of Technology [24] พบว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ สามมีกำลังอัดสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งประมาณ 1.5 เท่า และ 1.3 เท่า ที่ระยะบ่ม 7 วัน และ 28 วันตามลำดับ โดยได้นำดินตะกอนปนทราย และดินเหนียว (Clayey Sandy Silt) ในรัฐ ไอโอวา มาผสมกับซีเมนต์

Davidson และ Bruns [25] สรุปว่าการใช้ดินผสมด้วยซีเมนต์ประเภทสาม ในการก่อสร้างถนนจะประหยัดกว่าใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งผสมดิน เพราะการใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งต้องใช้เวลาในการบ่มอย่างน้อย 7 วัน แต่การใช้ซีเมนต์ประเภทที่สามใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่า ทำให้ได้เปรียบเรื่องระยะเวลาในการก่อสร้าง

การทดสอบ Freeze-Thaw ของดินทราย ดินตะกอน และดินเหนียว บริเวณรัฐ ไอโอวา ประเทศสหรัฐอเมริกา รายงานผลเกี่ยวกับกำลังอัด โดยวิธีและสรุปว่าการใช้ดินซีเมนต์ ประเภทสาม ในการก่อสร้างถนนจะประหยัดกว่าใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง เพราะการใช้ซีเมนต์ ประเภทที่หนึ่งต้องใช้เวลาในการบ่มอย่างน้อย 7 วัน แต่การใช้ซีเมนต์ประเภทที่สามใช้เวลาในการบ่ม น้อยกว่า ทำให้ได้เปรียบเรื่องระยะเวลาในการก่อสร้าง

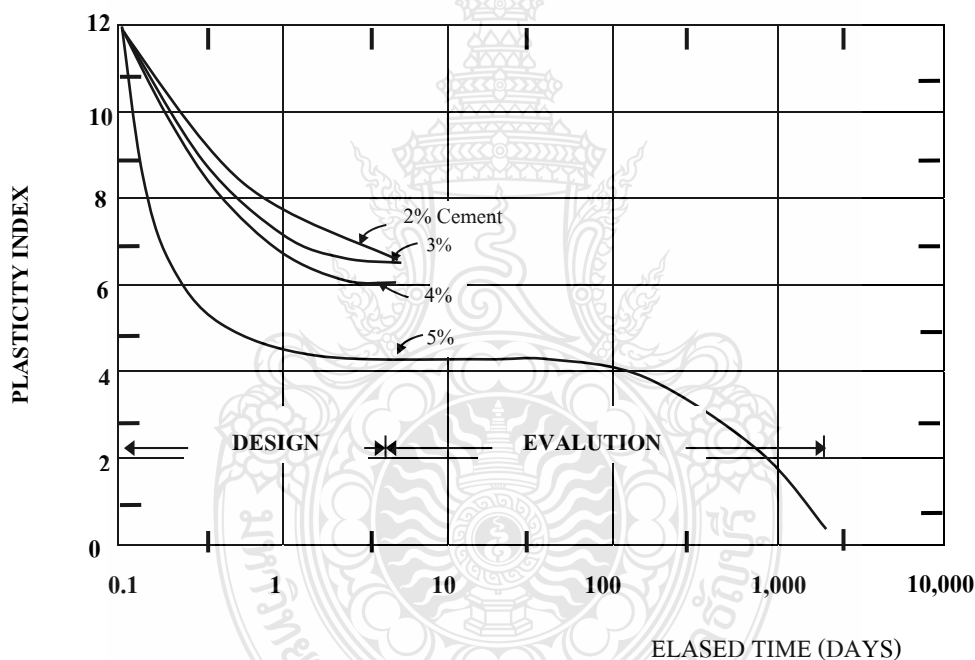
Horpibulsuk และ Miura [26], Miura และ คณะ [31] นิยาม Clay-Water/Cement Ratio (Wc/C) ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักแห้ง แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์สามารถรวมไว้ในตัวแปรตัวเดียวได้

#### 2.6.2 ปริมาณดินเหนียวและแร่ประกอบดินเหนียวที่มีอยู่ในดินซีเมนต์

Reinhold [29] พบว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น กำลังอัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นจะมี ค่าลดลง ทดลองโดยใช้ปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสม 0 -100 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำทรายมาผสมกับดิน เหนียว ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง โมดูลัสยืดหยุ่น ที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดกับ ปริมาณดินเหนียว

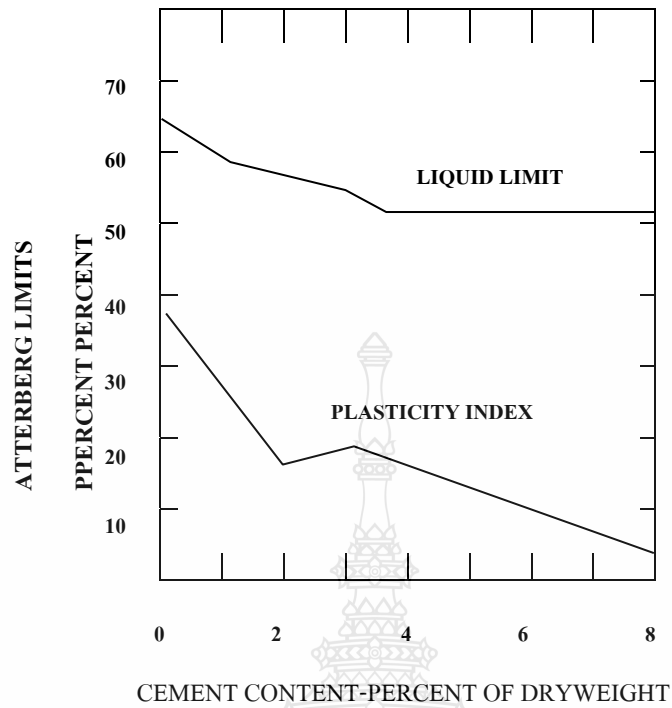
Moh, Chin และ Ng [39] วิจัยดินลูกรังในประเทศไทย ได้รายงาน ว่า ดินลูกรังที่มีค่า PI ประมาณ 11 ถึง 19 เมื่อนำมาซีเมนต์มาผสมในอัตราส่วน 4 เปอร์เซ็นต์ ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่า กำลังอัดมากกว่า 852 กิโลปาสกาล ซึ่งค่านี้เป็นข้อกำหนดของ British Road Research Laboratory และได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการบดอัดว่า ถ้าค่าร้อยละของการบดอัดลดลงเพียงเล็กน้อยจะมีผล ทำให้ค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด

Redus, [30] พบว่าปริมาณซีเมนต์ มีความสัมพันธ์ต่อการลดลงของดัชนีพลาสติกทดสอบโดยได้นำดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (Base course) ของสนามบินต่างๆ ซึ่งมีอายุการใช้งานนานหลายปี มาทำการทดสอบค่าพิคเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) โดยการหาความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติกกับเวลา ดังรูปที่ 2.2 โดยอ่านความสัมพันธ์ของค่าดังกล่าวได้ว่า ถ้าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมมีมาก ดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างรวดเร็ว และถ้าปริมาณซีเมนต์ผสมมีน้อย ดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างช้าๆ และนอกจากนี้ระยะเวลาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก็ยังมีผลต่อการลดลงของค่าดัชนีพลาสติกอีกด้วย ทั้งนี้ตรงกับผลการศึกษาวิจัยของ Spangler and Patel (1949) ซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพลาสติกกับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันใน 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.3

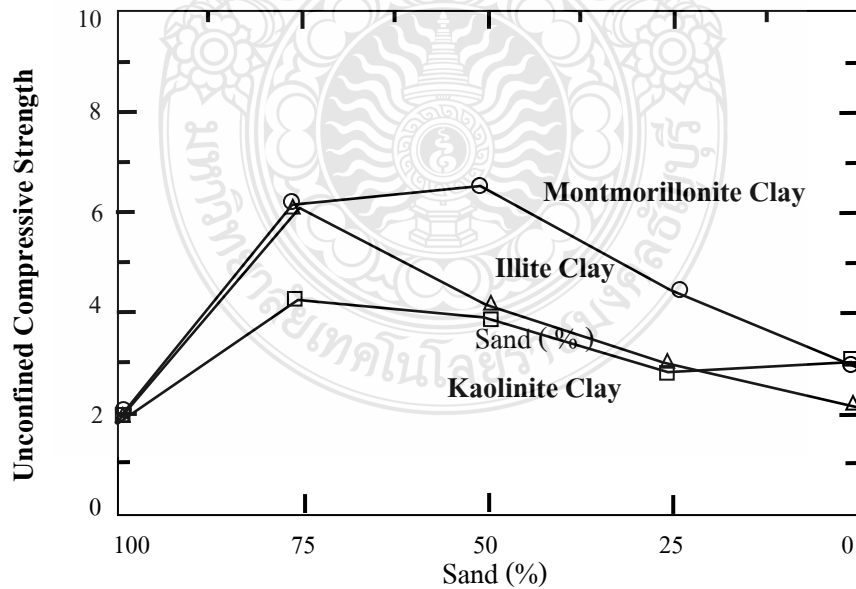


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติกกับเวลา (Redus [30])

Norling และ Peckard [32] ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณมวลรวมหยาบที่ค้ำบนตะแกรง เบอร์ 4 โดยใช้ดิน 3 ชนิด คือ ทรายหยาบ ทรายละเอียด และดินเหนียวผสมซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากันแต่แปรผันมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 แล้วทำการทดสอบหาค่าลึงที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่า Loamy Sand และ Fine Sand Loam จะมีค่าลึงอัดลดลง เมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้นเกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

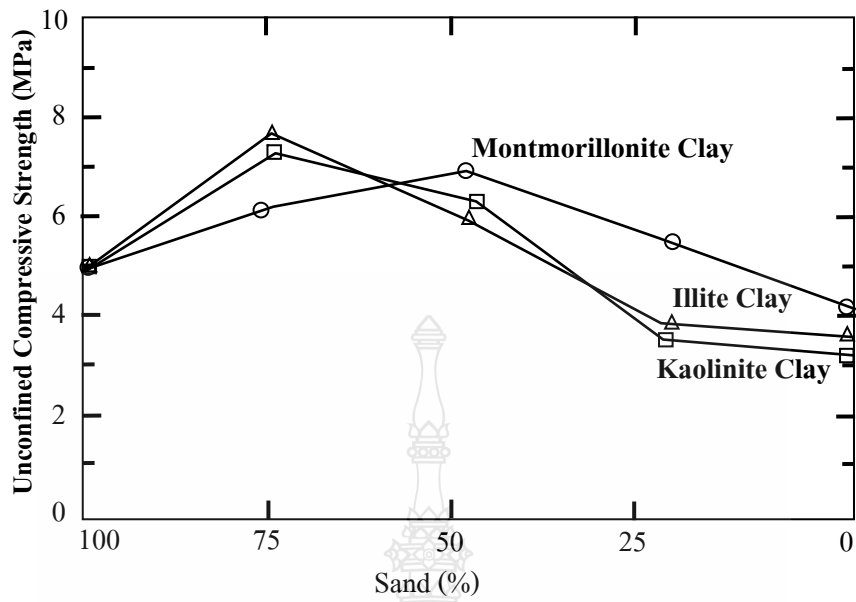


รูปที่ 2.3 ค่าพิกัดลิมิตเทอร์เบอร์เกอร์ของดิน ไอโอวา (Iowa) หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง (Spangler และ Patel [35])

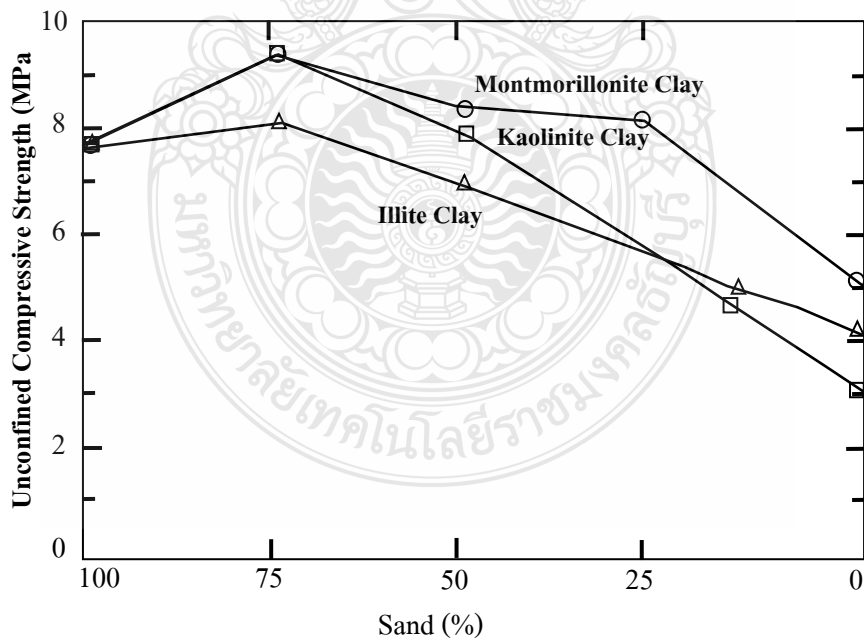


รูปที่ 2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8% (Davidson และคณะ [33])





รูปที่ 2.5 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12% (Davidson และคณะ [33])



รูปที่ 2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 16% (Davidson และคณะ [33])

Davidson และคณะ [33] สรุปว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวมากไป โดยมีค่าเกินกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ลดลง ทั้งนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ทรายผสมกับดินเหนียว ในอัตราส่วนทรายต่อดินเหนียว 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 โดยดินเหนียวที่ใช้เป็นดินเหนียวจำพวก คาโอลิไนท์ (Kaolinite), อิลไลต์ (Illite) และมอนโมริลโลไนท์ (Montmorillonite) โดยที่ดินเหนียวจำพวกมอนโมริลโลไนท์ มีแนวโน้มว่าจะมีกำลังสูงกว่าดินเหนียวจำพวกคาโอลิไนท์ และจำพวกอิลไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4, 2.5 และ 2.6

Portland Cement Association (1959) จำแนกดินกลุ่มต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์ที่ผสมกับดินตามระบบ ASSHTO ไว้ในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.1** ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุง ตามการจำแนกแบบ ASSHTO  
(ข้อมูลจาก Portland Cement Association [34])

ASSHTO SOIL GROUP	Usual range in cement Requirement (% by vol.) (% by wt.)		Estimated cement content And that used in the Moisture-density test (% by wt.)	Cement content for wet-dry and freeze- thaw test (% by wt.)
A-1-a	5-7	3-5	5	3-5-7
A-1-b	7-9	5-8	6	4-6-8
A-2	7-10	5-9	7	5-7-9
A-3	8-12	7-11	9	7-9-11
A-4	8-12	7-12	10	8-10-12
A-5	8-12	8-13	10	8-10-12
A-6	10-14	9-15	12	10-12-14
A-7	10-14	10-16	13	10-13-15

ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสม สำหรับวัสดุต่าง ๆ  
(ข้อมูลจาก Portland cement Association [34])

Type of miscellaneous material	Estimated cement contented and That used in moisture – density test		Cement contented for Wet-dry and Freeze-thaw Test (% by wt.)
	(% by vol.)	(% by wt.)	
Shell Soil	8	7	5-7-9
Limestone screening	7	5	3-5-7
Red-dog	9	8	6-8-10
Shale or disinte grated Shale	11	10	8-10-12
Callche	8	7	5-7-9
Cinders	8	8	6-8-10
Chert	9	8	6-8-10
Chat	8	7	5-7-9
Marl	11	11	9-11-13
Scoria (Retaining No.4 material)	12	11	9-11-13
Scoria (Passing No.4 material only)	8	7	5-7-9
Air-Cooled slag	9	7	5-7-9
Water-cooled slag	10	12	10-12-14

### 2.6.3 ปริมาณความชื้นขณะบดอัด

Felt [16] และ Davidson และคณะ [25] กล่าวว่า ปริมาณความชื้น และความหนาแน่นมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทราย ควรทำการบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม สำหรับดินเหนียวควรบดอัดดินที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จึงจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด โดยความชื้นกับน้ำหนักที่สูญเสียจะเกิดจากการทำ Wet-Dry และ Freeze-Thaw

Ruenkairergsa [20,21] พบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากให้ความหนาแน่นสูงสุดแล้ว ยังทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์อีกด้วย โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ของค่าปริมาณความชื้นกับค่าความหนาแน่นของดิน โดยปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะขึ้นกับความสัมพันธ์ค่า

ปริมาณความชื้นกับปริมาณความชื้นกับค่าความหนาแน่นของดินที่บดอัดมาหาค่าความสัมพันธ์ ตามวิธีการของพร็อกเตอร์ (Proctor) เพื่อนำดินซีเมนต์มาใช้ในงาน จากการทดลองหาความคงทนด้วยวิธี Freeze-Thaw ของดินตะกอนและดินเหนียวผสมซีเมนต์พบว่า ความคงทนมีค่าสูงสุดเมื่อทำการบดอัดที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย และการทำการบดอัดที่โดยปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม จะทำให้ค่าความคงทนลดลง สำหรับดินซีเมนต์ที่ความหนาแน่นสูงสุดไม่จำเป็นว่าทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและความคงทนมากที่สุดเสมอไป สำหรับดินทรายผสมซีเมนต์ความแข็งแรงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่ประมาณ 3-6 เปอร์เซ็นต์

Lightsey และคณะ [36] ศึกษาดินด้วยตัวอย่างดิน 4 ชนิด ได้แก่ Silty Loam, Sandy Loam, Silt และ Silty Clay Loam โดยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) พบว่า การบดอัดดินซีเมนต์ให้มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry-Density, MDD) ไม่ทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงมากที่สุดเสมอไปเนื่องจาก การหน่วงเวลาก่อนการบดอัด โดยที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าและสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม เมื่อผสมดินกับซีเมนต์แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 0, 2, 4 และ 6 ชั่วโมงก่อนทำการบดอัด ทำให้ทราบว่า ปริมาณน้ำส่วนเกินที่ต้องการทำปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์ เพื่อให้ได้ความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์สูงสุดนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและเวลาระหว่างการผสมควบคู่กับการบดอัด ในดินเม็ดละเอียด การเพิ่มปริมาณน้ำในการบดอัดทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสมบูรณ์ขึ้น เป็นผลทำให้คุณสมบัติของดินซีเมนต์ดีขึ้น โดยไม่ต้องมีการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด และสำหรับดินเม็ดหยาบปริมาณน้ำที่เพิ่มในการบดอัดจะเพิ่มการหล่อลื่นระหว่างเม็ดดิน ทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความคงทนเมื่อมีการหน่วงเวลาก่อนที่จะทำการบดอัดดินซีเมนต์

Clare and Pollard [23] การก่อสร้างที่ใช้ดินซีเมนต์ในพื้นที่ที่อากาศอบอุ่นจะให้กำลังอัดที่อายุ 3 เดือนแรกหลังการก่อสร้างสูงกว่าการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีอากาศหนาวมากกว่าร้อยละ 50-100 โดยที่อุณหภูมิของบริเวณทดสอบประมาณ 25 องศาเซลเซียส และทำอุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ โดยกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วันจะสูงสูงขึ้น 2-2.5 เปอร์เซ็นต์ต่ออุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส

Maner [28] ได้ทดลองวัสดุ 4 ชนิด ได้แก่ Waterproof Paper, Calcium Chloride, RC-2 Asphalt, Tar และ Asphalt Emulsion โดยในการบ่มดินซีเมนต์บดอัดที่ใช้เป็นพื้นทางพบว่า วัสดุ Bituminous Asphalt ทั้ง 3 ชนิด และ Waterproof paper นำมาใช้งานชั้นพื้นทางได้ผลดี นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินซีเมนต์ จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอากาศ

Leadabrand [39] นำ Clayey Sandy Soil และ Silty Soil ผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่ากำลังของดินซีเมนต์ พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะคล้ายกับกำลังอัดของคอนกรีต โดยที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วัน จนถึง 5 ปี กำลังอัดเพิ่มขึ้นได้มากขึ้นตามอายุของดินซีเมนต์ และยังได้ทำการเจาะเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ในสนาม จากโครงการก่อสร้างของรัฐต่าง ๆ 4 รัฐ โดยมีช่วงอายุโครงการตั้งแต่ 1 ปี ถึง 20 ปี ในประเทศสหรัฐอเมริกา มาทดสอบหาค่ากำลังอัดพบว่า แนวโน้มของกำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนาม สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มมากขึ้นตามอายุของดินซีเมนต์

Wang และ Huston [40] พบว่าการลดอุณหภูมิในการบ่มจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลงแต่จะเพิ่มความเครียดที่จุดวิบัติมากขึ้น ไม่ว่าจะทำการทดสอบแรงดึงหรือแรงอัดของดินซีเมนต์

Shackel และ Lee [41] พบว่าเมื่อมีปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดและกำลังดึงเพิ่มขึ้น ซึ่งการบ่มในอากาศจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าการบ่มแบบชื้น และยังทำให้เพิ่มขนาดโพรง (Pore Size) และปริมาตร (Pore Volume) เพิ่มขึ้นเมื่อมีอายุการบ่มมากขึ้นด้วย ส่วนการบ่มแบบชื้น เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นจะทำให้ขนาดโพรงลดลง ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาโดยการบ่มดินซีเมนต์โดยใช้ตัวอย่าง Artificial Soil ซึ่งได้จากการนำ Uniform Sand จากเมือง Botany รัฐ New South Wales ประเทศออสเตรเลียมาผสมกับ Commercial Air-Floated China Clay (Kaolin) ในอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก และผสมซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0, 3 และ 8 ซึ่งทำการบ่ม 2 ลักษณะ คือ บ่มในอากาศที่อุณหภูมิ 20°C และบ่มในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิคงที่ 20°C โดยการบ่ม 0, 1, 3, 9, 23, 44 และ 81 วัน จากนั้นทดสอบหาค่าการหดตัว หรือค่าการขยายตัว ค่ากำลังอัด ค่ากำลังดึง และวัดการกระจายตัวของโพรง (Pore Size Distribution) ของดินซีเมนต์ จากการจำลองแท่งตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Mercury Intrusion Porosimeter

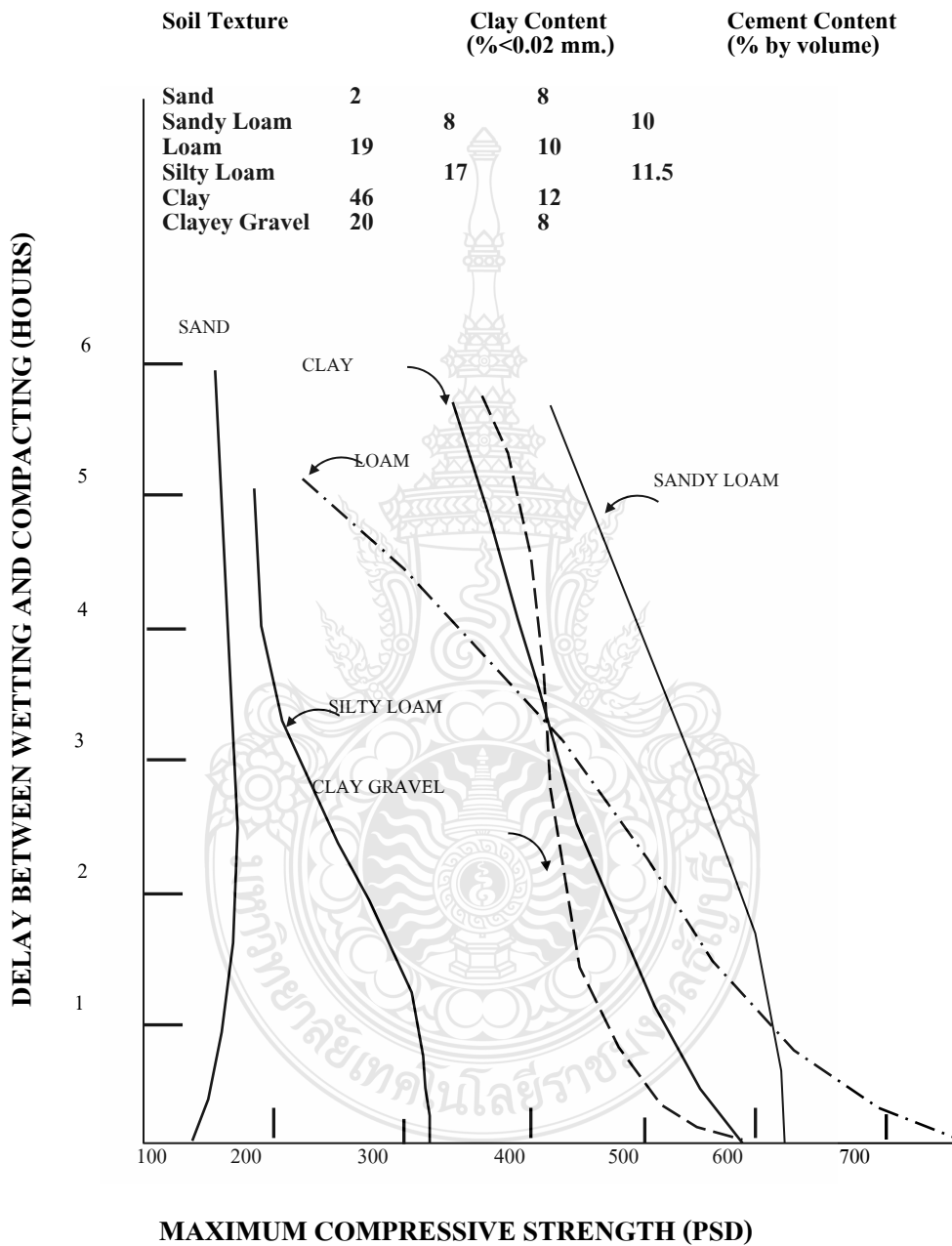
#### 2.6.4 ระยะเวลาในการผสม

Marshall [47] พบว่ากำลังอัดจะลดลงเมื่อเวลาการผสมนานขึ้น โดยได้ศึกษาผลกระทบของการหน่วงเวลาการผสมระหว่าง การผสมขึ้นและการบดอัด ที่มีผลต่อกำลังอัดดินของชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

Felt [16] กล่าวว่าดินทุกชนิดจะมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อหน่วงเวลาการผสมให้นานขึ้น โดยการหน่วงเวลาการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราวจะมีผลเสียน้อยกว่าแบบหยุดผสมเลย โดยได้ศึกษาอิทธิพลของการหน่วงเวลาต่อกำลังอัด และความคงทน โดยผสมให้นานขึ้น แล้วทิ้งไว้ก่อนบดอัด ใน

การศึกษาดัวย่างดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A-2 (LL=26, PI=11), ดินกลุ่ม A-4 (LL=35, PI=12), ดินกลุ่ม A-6-7 (LL=47, PI=26)

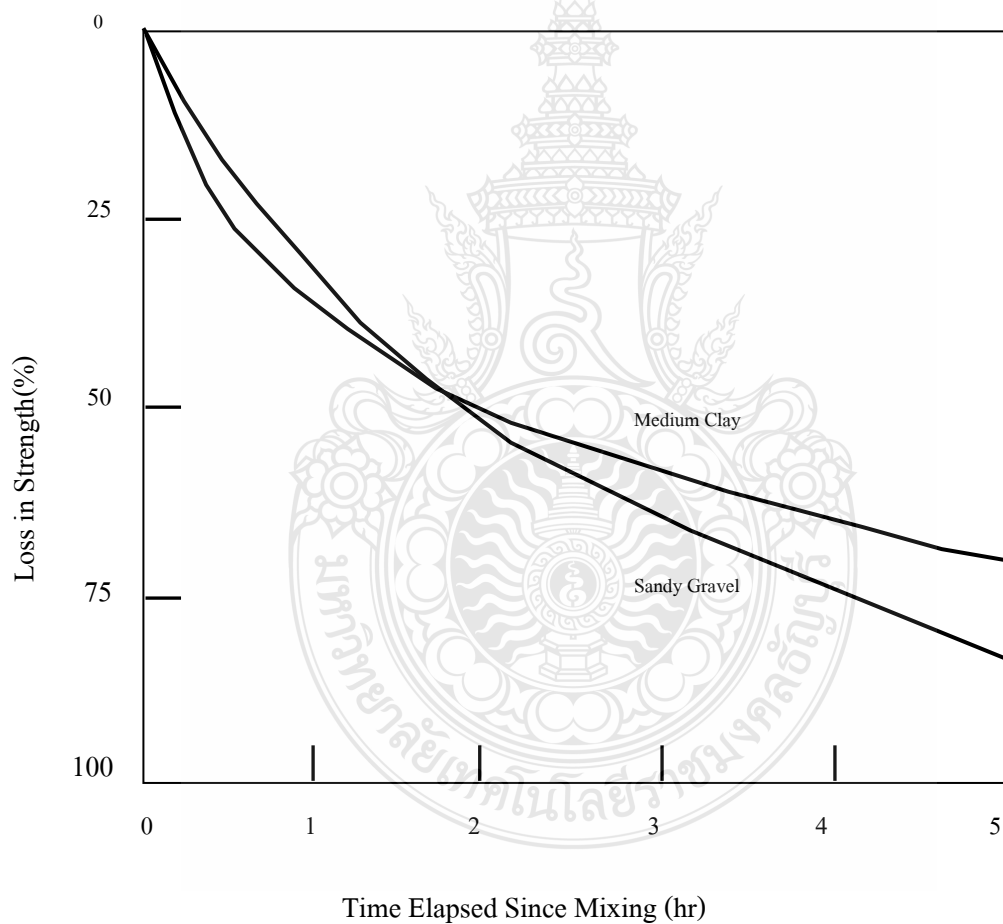
**DATA ON SOILS AND ON CEMENT-TREATED SOIL MIXTURES**



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างผสมขึ้น และการบดอัดที่มีต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Marshall, [42])

Ingles และ Metcalf [43] ทำการทดสอบดิน 2 ชนิด คือ Medium clay และ Sandy Gravel เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ในการผสมดินซีเมนต์ พบว่าเวลาการผสมที่นานขึ้น 1-2 ชั่วโมง จะทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ลดลงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ และถ้าเวลาในการผสมนานเกินกว่า 2 ชั่วโมง กำลังอัดของดินชนิด Sandy Gravel จะน้อยกว่าดินชนิด Medium clay เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.8

Horpibulsuk [44] กล่าวว่า การที่ กำลังของดินซีเมนต์บดอัดในสนามมีค่าต่ำกว่ากำลังของดินซีเมนต์ที่หาได้จากห้องทดลอง มีสาเหตุจากความไม่สม่ำเสมอของการผสมดินซีเมนต์ในสนาม



รูปที่ 2.8 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้เวลาในการบดอัดนานขึ้น (Ingles and Metcalf [43])

## 2.7 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์

Horpibulsuk และคณะ [44] ทำการทดสอบและวิเคราะห์หาการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์ โดยอาศัยสมมุติฐาน Clay-Water/Cement Ratio Hypothesis (Horpibulsuk และ Miura [44], Miura และคณะ [27]) พบว่า กำลังของดินแต่ละชนิดที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับ ตัวแปรเพียงตัวเดียว คือ Clay – Water / Cement Ratio

$$q_u = \frac{A}{B^{(w_c/c)}} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $q_u$  คือ กำลังต้านแรงอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง  
 $A$  คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน  
 $B$  คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน  
 $w_c/c$  คือ Clay-Water/Cement Ratio นิยามว่า เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์

Horpibulsuk และคณะ [44] ยังพบว่า อัตราการเพิ่มของกำลังของดินซีเมนต์ เป็นฟังก์ชันลอกกาลิทึมของอายุการบ่มดินซีเมนต์ ดังแสดงในสมการที่ 2.6 และ รูปที่ 2.9

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.038 + 0.281 \ln D \quad (2.2)$$

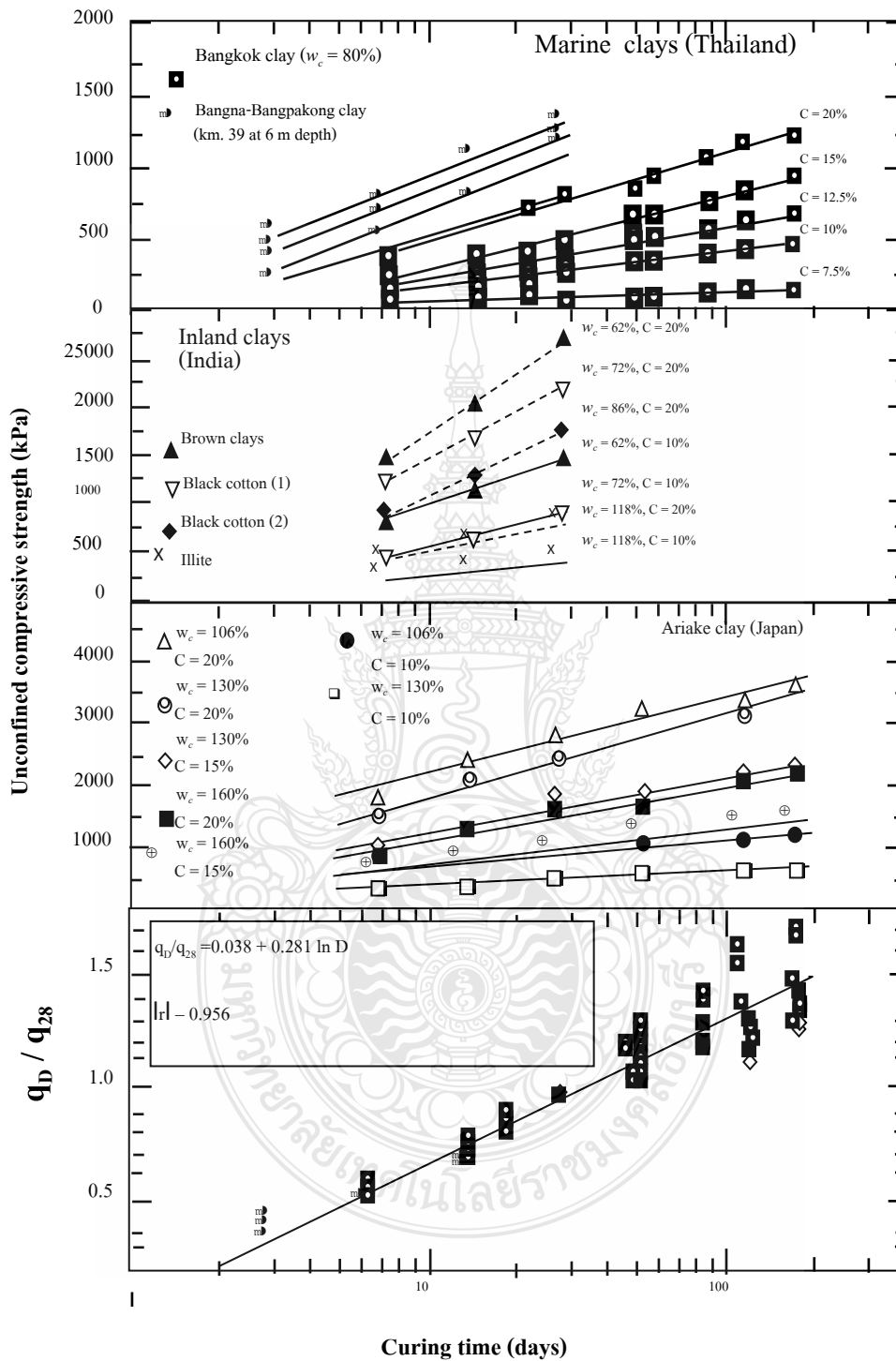
เมื่อ  $q_D$  คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม D วัน  
 $q_{28}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน  
 $D$  คือ อายุบ่ม, วัน

เมื่อรวมสมการที่ 2.1 และ 2.2 และแทนค่า B เท่ากับ 1.24 จะได้สมการที่ 2.3 ซึ่งสามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มใด ๆ โดยอาศัยเพียงแค่ผลการทดสอบเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน

$$\left[ \frac{q_{(w_c/c)_{1,D}}}{q_{(w_c/c)_{28}}} \right] = 1.24^{(w_c/c)_{28} - (w_c/c)_D} (0.038 + 0.281 \ln D) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $q$  คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่  $w_c/c$  หลังจากระยะบ่ม D วัน  
 $(w_c/c)_{28}$  คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบ บ่ม 28 วัน





รูปที่ 2.9 การเพิ่มของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk และคณะ [56])

## 2.8 กำลังรับแรงดัด

ในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นเพื่อรองรับหรือกระจายน้ำหนัก เช่น ถนน สะพาน หรือทางวิ่งของสนามบิน จะต้องมีการทดสอบหาค่าหน่วยแรงดัดของแผ่นพื้น เนื่องจากหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นมี 4 ลักษณะ คือ น้ำหนักบรรทุกที่อยู่เหนือแผ่นพื้น อุณหภูมิของแผ่นพื้น การขยายตัวและการบวมตัวของดินส่วนล่างที่กระจายน้ำหนักที่กระทำกับแผ่นพื้น แต่หน่วยแรงดัดที่มีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นพื้น ก็คือหน่วยแรงดัดที่เกิดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่มีตำแหน่งวิกฤต 3 จุด คือ น้ำหนักกระทำที่มุมแผ่นพื้นห่างจากขอบ น้ำหนักกระทำที่ขอบของแผ่นพื้นห่างจากมุม น้ำหนักที่กระทำทั้ง 3 จุด ก่อให้เกิดหน่วยแรงดัด ซึ่งหน่วยแรงเนื่องจากอุณหภูมิของแผ่นพื้น เนื่องจากการรับอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างกลางวัน และกลางคืน ก่อให้เกิดการขยายตัวและการหดตัวด้านบน และด้านล่างของแผ่นพื้นในทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้แผ่นพื้น โกงงอ ก่อให้เกิดหน่วยแรงดัด

การทดสอบการรับแรงดัด สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลาง (Center-Point Loading) และวิธีใช้แรงกดคาน 2 จุด โดยให้ตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆกัน (Third-Point Loading)

ในการศึกษาค่ากำลังความสามารถในการรับแรงดัด (Flexural Strength) ของคานซีเมนต์บดอัดสามารถทำการทดสอบโดยวิธี Third-Point Loading โดยการให้น้ำหนักกระทำบนคานช่วงเดียว (Simple Beam) แบบเป็นจุด ที่ระยะ  $1/3$  ของความยาวประสิทธิผล เพื่อหาค่าโมดูลัสแตกร้าว (R) ของตัวอย่างทดสอบ

ถ้ารอยแตกของคานตัวอย่างอยู่ในช่วงกลางหรือช่วงที่ 2 สามารถคำนวณหาค่า R ได้จากสมการ

$$R = PL/(bd^2) \quad (2.4)$$

ถ้ารอยแตกของคานตัวอย่างอยู่นอกช่วงที่ 2 วักระยะได้ไม่มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวคาน ค่า R คำนวณได้จากสมการ

$$R = 3Pa/(bd^2) \quad (2.5)$$

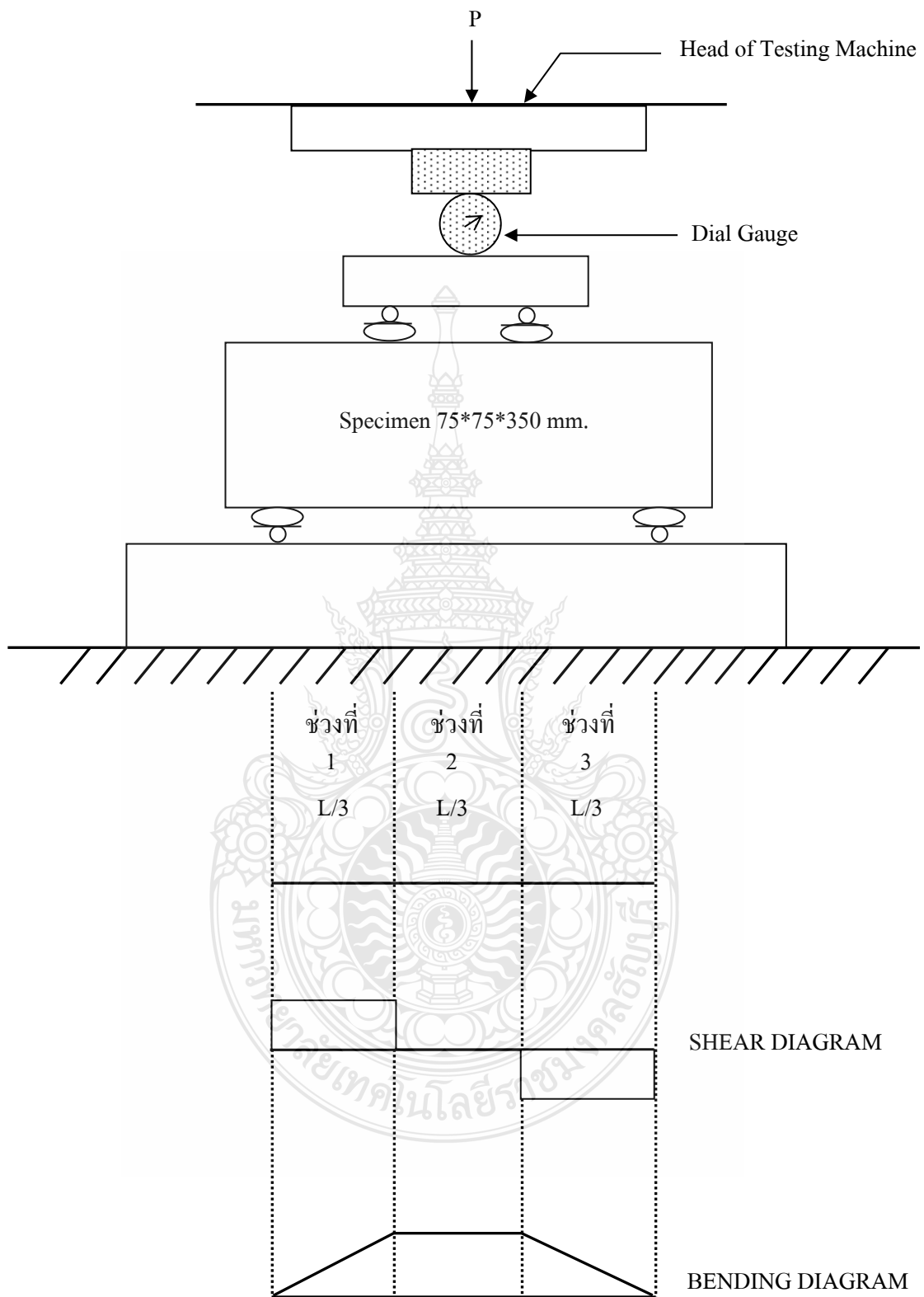
ถ้ารอยแตกของคานตัวอย่างอยู่นอกช่วงที่ 2 วัดระยะได้มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวคาน จะไม่นำค่า Applied Load ที่ได้มาคำนวณค่า R

- เมื่อ
- R = Modulus of Rupture ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
  - P = Maximum Applied Load (kg)
  - L = Span Length (cm)
  - b = Average Width of Specimen (cm)
  - d = Average Depth of Specimen (cm)
  - a = Distance between line of fracture and the nearest support, measured along the center line of the bottom surface of the beam. (cm)



รูปที่ 2.10 เครื่องมือการทดสอบหาค่ากำลังความสามารถในการรับแรงดัด (Flexural Strength)

โดยวิธี Third-Point Loading



รูปที่ 2.11 แสดงการทดสอบกำลังดัดของ Beam โดยวิธี Third-Point Loading

อุดม มาศสุวรรณ และคณะ [58] ศึกษาพฤติกรรมของดินปรับปรุงคุณภาพ โดยชนิดของดินเป็นดินเหนียวอ่อนของโครงการการปรับปรุงชายฝั่งทะเลถนนบางบอนชายทะเล โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 200, 300 และ 400 กก/ม<sup>3</sup> ของดินเหนียวเปียก พบว่าแรงอัดของดินภายใต้อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าดินซีเมนต์ที่ทดสอบมีค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ประมาณ 35 ถึง 45% ของกำลังรับแรงอัด และมีความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 213 เท่าจากค่ากำลังอัดเดิม

ธีรยุทธ สุจริตตานันท์ [59] ศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ผสมสารผสมเพิ่ม พบว่าเมื่ออายุบ่มมากขึ้นค่า Modulus of Rupture จะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้น ไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อค่า Modulus of Rupture เท่าใดนักในช่วง 7 วันแรก แต่เมื่ออายุบ่มมากขึ้นค่า Modulus of Rupture จะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้น ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงค่า Modulus of Rupture ของดินลูกรังผสมซีเมนต์และดินลูกรังผสมซีเมนต์กับสารผสมเพิ่ม (ธีรยุทธ,2542)

Cement Content (%)	Modulus of Rupture (ksc)			
	3 days	7 days	14 days	28 days
Soil – Cement 5%	5.41	10.5	8.58	11.18
Soil – Cement 10 %	5.43	11.07	11.76	17.01
Soil - Cement 5% + Reno lit	7.35	7.61	8.96	8.76
Soil – Cement 10% + Reno lit	6.48	8.22	7.98	11.78

ไพวรรณ เขียวอ่อน [61] ทำการวิจัย สาร โพลีเมอร์เคมีโรด เพื่อช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความคืนตัวของวัสดุดินผสมซีเมนต์ เมื่อมีน้ำหนักมากกระทำกับพื้นทางซึ่งจะช่วยในการกระจายน้ำหนัก โดยจากการศึกษากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของวัสดุรวมพื้นทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และสาร โพลีเมอร์เคมีโรด พบว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงกำลังรับแรงอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม เท่ากับร้อยละ 3.5 เมื่อมีปริมาณการผสมสาร โพลีเมอร์เคมีโรดที่เหมาะสม โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 5 จะสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ได้มากขึ้นถึงร้อยละ 18 และเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้มากขึ้นถึงร้อยละ 13 และเพิ่มค่าการ โกงตัวได้มากขึ้นถึง 176 สรุปได้ว่าเมื่อมีน้ำหนักมากกระทำ ค่าคุณสมบัติที่ได้รับการปรับปรุงอย่างเห็นได้ชัดคือ ค่าการ โกงตัว แสดงว่าสาร โพลีเมอร์เคมีโรด ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความคืนตัวของวัสดุ

## 2.9 กำลังรับแรงแบกทาน

ศุภกิจ นนทนานันท์ และกมล อมรฟ้า [66] ศึกษาการพัฒนากำลังของดินเหนียวอ่อนโดยใช้ซีเมนต์และปูนขาวพบว่าดินผสมซีเมนต์มีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในระยะแรก และจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ใน ระยะยาว จึงสามารถรับกำลังแบกทานได้

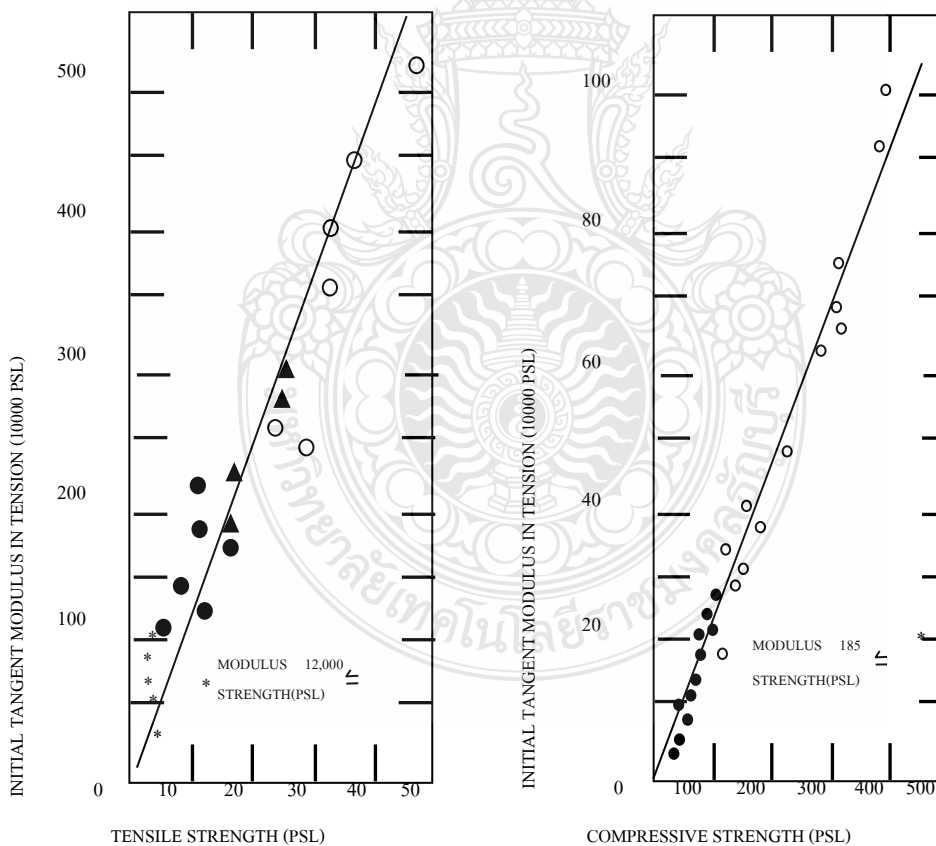
สนธยา แพทย์โนทัย และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข [68] กล่าวว่า “กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่งจะแปรผันตามอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio, w/C) เท่านั้น” จึงได้นำเสนอแบบจำลองกำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด ที่สร้างจากดินเหนียวปนดินตะกอน ซึ่ง แปรผันพลังงานบดอัด ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์และอายุบ่ม โดยแยกพิจารณาทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) โดยสมการทำนายกำลังอัดทางด้านเปียกของ OMC สร้างขึ้นจากทฤษฎีกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด ส่วนการทำนายกำลังอัดทางด้านแห้งจะอาศัยลักษณะความสมมาตรของกำลังอัดในช่วงปริมาณ ความชื้น 0.8 ถึง 1.2 เท่าของ OMC โดยมีค่าความผิดพลาดของผลการทำนายอยู่ในเกณฑ์ ที่ยอมรับโดยจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้

อาวุธ โพธิ์อุดม และคณะ[69] เสนอค่าความสัมพันธ์ เป็นสมการ  $UCS = 13.98DPI^{1.52} + 1.83$  โดยได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่าง ผลทดสอบ Unsoaked CBR, Dynamic Cone Penetrometer Penetration Index (DPI) และ Unconfined Compressive Strength (UCS) โดยทำการเก็บตัวอย่างชั้นทางเดิมจาก ถนนสาย 2034 ตอนหน้าพระลาน-บ้านครัว จังหวัดสระบุรี ที่ถูกปรับปรุง คุณภาพด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของมวลรวมแห้ง ใช้ปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความหนาแน่นสูงสุด (1.0 x OMC) และปริมาณน้ำที่สูงกว่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุ โดยทำให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นสูงสุด (1.25 x OMC) ใช้ค่าพลังงานบดอัด 277.50 ตัน/ลูกบาศก์เมตร โดยก่อนเหล็กกลมตันกดในการทดสอบแบบ Unsoaked CBR ขนาด พื้นที่หน้าตัดของท่อนเหล็ก 1 ตารางนิ้ว ในอายุการบ่มของดินซีเมนต์ เท่ากับ 2 และ 3 วัน ได้ความสัมพันธ์ผลทดสอบเป็นสมการดังกล่าวข้างต้น

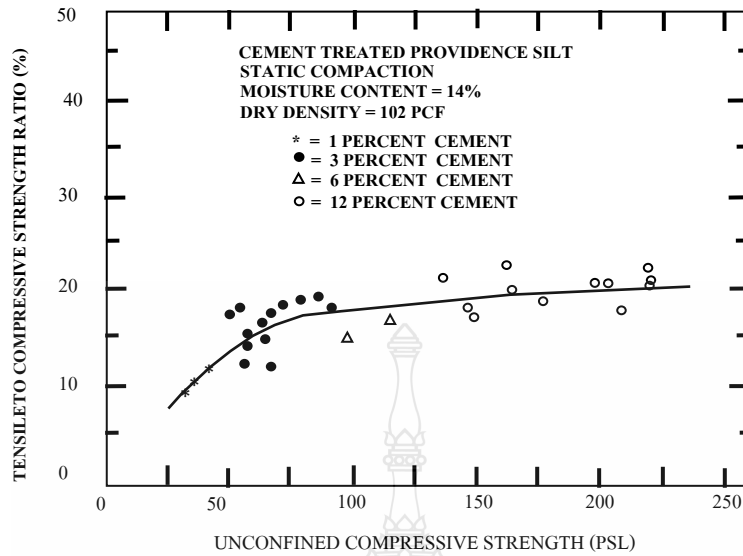
สถาพร ด่อนแก้ว, เชิดชนินทร์ หมคมลทิน และคณะ[70] ได้ประยุกต์โดยการทดสอบใช้ดินผสมโฟมอากาศ เป็นวัสดุถมคันทาง และทดสอบด้านกำลังรับแรงแบกทาน โดยได้สร้างคันดินมวลเบาขนาด กว้าง 4 เมตร ยาว 4 เมตร และสูง 1.5 เมตร และทดสอบกำลังรับแรงแบกทานของดินในสนามด้วยวิธี Plate Bearing Test ตามมาตรฐาน ASTM D1194 ใช้น้ำหนักด้านทานแบบคงที่ขนาด 3.5 ตัน ผลจากการทดสอบได้ค่ารับน้ำหนักบรรทุกทุก 44 ตันต่อตารางเมตร มีความสัมพันธ์ระหว่างการ

ทรุดตัวกับแรงแบกทานของดิน เมื่อค่าการทรุดตัวเท่ากับ 20 และ 21 มิลลิเมตร มีค่ารับน้ำหนักประลัยเท่ากับ 23 และ 24 ตันต่อตารางเมตร

Wang และ Huston [40] ได้ทำการวิจัยทดสอบหาค่ากำลังดึงและกำลังอัด ของวัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งกับดินตะกอนที่ได้จาก Glacial Deposit ใน Rhode Island พบว่าการเสียรูปที่จุดวิบัติจากการทดสอบทั้งแบบรับแรงอัดและรับแรงดึง จะมีค่าคงที่เสมอ ถ้าหากค่าความหนาแน่นแห้ง ปริมาณความชื้น และสภาพการบ่มเหมือนกัน ค่ากำลังและค่าการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบแบบรับแรงดึงจะมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการทดสอบแบบรับแรงอัด โดยค่ากำลังรับแรงดึงจะอยู่ระหว่างร้อยละ 10-20 ของค่ากำลังรับแรงอัด ส่วนค่าการเสียรูปที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงดึงจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1.0-2.5 ของค่าการเสียรูปที่จุดวิบัติ เนื่องจากแรงอัดสำหรับทุกอายุการบ่ม และปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ศึกษา และยังพบอีกด้วยว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงอัดกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงดึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลัง ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in Tension กับกำลังดึงและกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Wang และ Huston [45])



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive strength ของดินซีเมนต์ (Wang และ Huston [45])

## 2.10 มาตรฐานดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง

ในช่วงปี พ.ศ.2515 ถึงปี พ.ศ.2525 ศ.เกียรติคุณ ดร.ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และคณะนักวิจัย ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ได้ทำการเจาะเก็บตัวอย่างชั้นรองพื้นทางของถนนที่ทำการก่อสร้างและทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ในระหว่างปี พ.ศ. 2510 ถึงปี พ.ศ.2514 และได้นำมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) ของก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากสนาม มีค่าสูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ ที่อายุ 7 วันอย่างมาก ซึ่งสันนิษฐานว่า น่าจะมาจาก Pozzolanic Reaction ที่เกิดขึ้นในขณะผสมของวัสดุในสนาม ดังนั้นการกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่สูงในระยะเวลาเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยา จึงเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น (รื่นไกรฤกษ์,2539) และเนื่องมาจากการเกิด Reflective Crack บนชั้นผิวทาง Dheeragool and Ruenkairergsa (1994) จึงได้มีการเสนอให้มีการควบคุมค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมดินซีเมนต์ (Unconfined Compressive Strength) โดยกำหนดให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างดินผสมซีเมนต์ที่อายุ 7 วันไว้ไม่น้อยกว่า 250 psi (17.5 ksc.) สำหรับดินผสมซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทาง และสำหรับชั้นรองพื้นทาง มีค่าไม่น้อยกว่า 100 psi (7.0 ksc) ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ม.206/2532 กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน



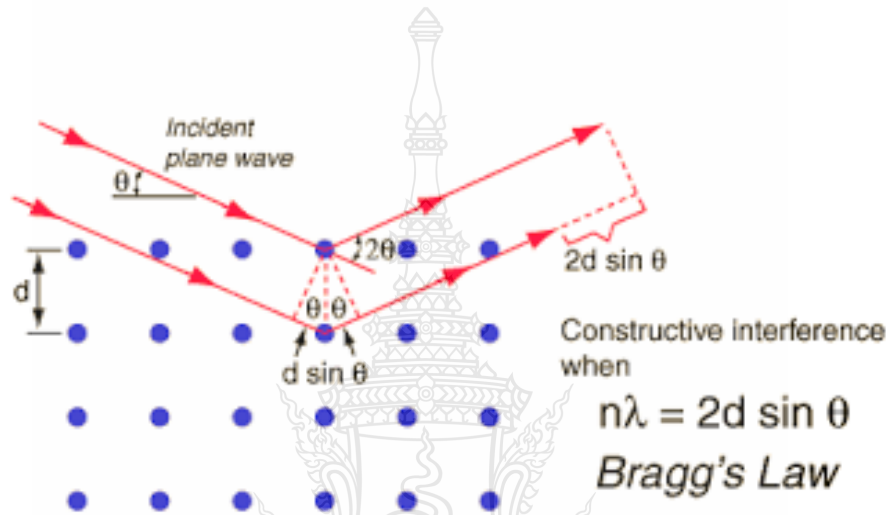
## 2.11 การทดสอบ X-Ray Diffraction(XRD), X-ray Fluorescence(XRF), Scanning Electron Microscope (SEM)

2.11.1 X-ray diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์สารหรือแร่ธาตุตัวอย่าง ทำให้ได้ทั้งสารประกอบหรือแร่ธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างที่นำมาใช้ศึกษา โดยรายละเอียดที่ได้จากการทดสอบ จะทำให้ทราบเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ในองค์ประกอบของธาตุแต่ละชนิด ซึ่งในการทดสอบตัวอย่างจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เหมือนกัน จึงทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงชนิดของสารประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของเครื่อง วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในสาร ตัวอย่าง, ขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง และค่าความเป็นผลึกของสาร ตัวอย่าง รวมถึงวิเคราะห์หาองค์ประกอบของฟิล์มบาง และค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย ดังรูปที่ 2.14 เป็นเครื่องทดสอบ X-ray diffraction



รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบ X-ray diffraction

Bragg's Law โดยหลักการการอาศัยคุณสมบัติการกระเจิงของแสงของอนุภาค เมื่อรังสีเอกซ์มีความสามารถในการทะลุทะลวงสูง ก็จะแทรกเข้าไปในโครงสร้างของผลึกซึ่งประกอบด้วยชั้นอนุภาคเรียงตัวกัน อนุภาคจะกระเจิงลำแสงและหักเหลำแสงไปเป็นมุม  $2\theta$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนลูกคลื่นที่ส่งออกมา,  $\lambda$  คือความยาวคลื่นเอกซเรย์,  $d$  คือระยะระหว่างอนุภาคในระนาบ,  $\theta$  คือมุมที่รังสีตกกระทบกระทำกับระนาบของผลึก ซึ่งค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ถูก เสนอในรูปแบบสมการดังในรูปที่ 2.15

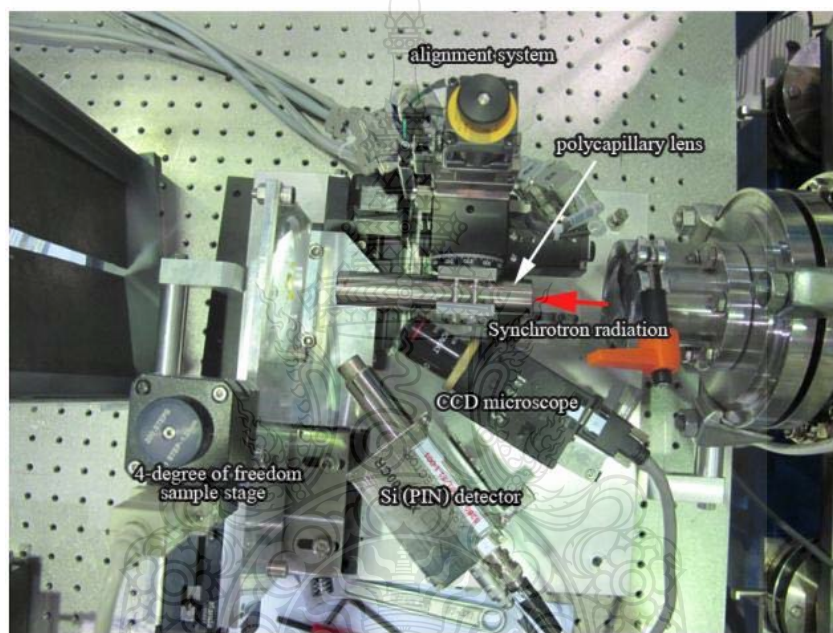


รูปที่ 2.15 หลักการของ Bragg's Law

2.11.2 X-ray Fluorescence(XRF) เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง โดยอาศัยความต่างของชั้นพลังงานของแต่ละธาตุ (สมมติชั้น K, L, M, ...) เมื่อเรากระตุ้นอะตอมของธาตุด้วยการให้พลังงานที่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในของธาตุ ทำให้เกิดที่ว่าง และเมื่ออิเล็กตรอนในชั้นนอกลงมาแทนที่ อะตอมจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ เราเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า การเรืองรังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถนำปรากฏการณ์นี้ไปใช้ในการหาชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างที่เราต้องการศึกษาได้ เรียกเทคนิคนี้ว่า "เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์" ซึ่งข้อดีของเทคนิคนี้ก็คือ การเตรียมตัวอย่างที่ไม่ยุ่งยาก และเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายคุณสมบัติของตัวอย่าง (non-destructive method) โดยทั่วไปเราจะใช้รังสีเอกซ์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการคายพลังงานของอะตอมในตัวอย่าง ในที่นี้คือ แสงซินโครตรอนในย่านของรังสีเอกซ์ และเนื่องจากแสงซินโครตรอนมีความเข้มสูง ทำให้เราสามารถโฟกัสลำรังสีเอกซ์ให้มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ ซึ่งเหมาะสำหรับการหาองค์ประกอบของธาตุที่บริเวณเล็กๆ บนตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

นอกจากนั้นยังสามารถศึกษาการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ได้ เราเรียกเทคนิคนี้ว่า Micro-X-ray Fluorescence Spectroscopy/imaging

Micro-XRF ประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญ ดังแสดงในรูป 2.16 ได้แก่เลนส์รังสีเอกซ์ (polycapillary lens) โดยจะติดตั้งอยู่บนระบบ alignment เนื่องจากต้องการความแม่นยำสูง กล้องไมโครสโคป (CCD microscope) สำหรับตรวจสอบและบันทึกภาพตัวอย่างก่อนและขณะทำการทดลอง ระบบจับยึดตัวอย่าง (sample stage) โดยตัวอย่างจะสามารถเลื่อนซ้ายขวาตั้งฉากกับแสงเพื่อทำการศึกษาการกระจายตัวของธาตุในตัวอย่าง



รูปที่ 2.16 Micro-XRF

2.11.3 Scanning Electron Microscope(SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ Electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาจะมีค่า ซึ่งสามารถใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งโดยทั่วไปไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่น

สิ้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า (3 ถึง 100 นาโนเมตร) และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ดี ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะของตัวอย่าง อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยดินตัวอย่างที่ต้องการส่องผ่าน จะต้องทำให้แห้ง และจะถูกทำให้แตกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-4 มิลลิเมตร และจะถูกนำไปติดบนแท่งติดตัวอย่าง หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการเคลือบตัวอย่างด้วยเครื่อง Iron sputtering device ดังแสดงในรูปที่ 2.17 แล้ววัตถุจึงถูกถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 เครื่อง Iron sputtering device



รูปที่ 2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุในงานวิจัย

ตัวอย่างดินที่ใช้ศึกษาวิจัยเป็นตัวอย่างดิน 3 ชนิด จาก 3 แหล่ง ดังนี้

3.1.1 ดินเหนียวบริเวณ อ.เมือง จ.สมุทรสาคร เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) โดยวิธีการเปิดหน้าดินตามสภาพที่ระดับความลึก 1.00 – 2.00 เมตร แล้วเก็บตัวอย่างใส่ภาชนะเพื่อนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการต่อไป



#### รูปที่ 3.1 การเก็บตัวอย่างดินเหนียว

3.1.2 ดินทรายบริเวณบ่อทราย อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ที่ขุดจากระดับความลึกประมาณ 10-15 เมตร ในบ่อทรายธรรมชาติ



#### รูปที่ 3.2 การเก็บตัวอย่างดินทราย

3.1.3 ดินลูกรังบริเวณบ่อลูกรัง อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี ที่ระดับความลึก 15 เมตร เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ที่ขุดขึ้นจากบ่อลูกรังธรรมชาติ ระดับความลึกประมาณ 10-15 เมตร



รูปที่ 3.3 การเก็บตัวอย่างดินลูกรัง

### 3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ดินตัวอย่างจะต้องตากให้แห้งในห้องปฏิบัติการหรืออบที่อุณหภูมิไม่เกิน 140°F แล้วนำมา ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทำการทดสอบโดยการแบ่งตัวอย่างดินออกเป็น กอง ๆ โดยวิธีการแบ่ง 4 ส่วน (Quartering) แต่ละกองให้มึ้นน้ำหนักประมาณ 6 กก. ร้อนดินกองแรก ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" และชั่งน้ำหนักดินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/4" และร้อนดินอีกกองหนึ่งใช้ ตะแกรงเบอร์ 3/4" และเบอร์ 4 ชั่งดินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ให้มึ้นน้ำหนักเท่ากับดินที่ค้างบน ตะแกรงเบอร์ 3/4" ที่จุดไว้ นำไปผสมกับดินกองแรกเพื่อทดลองต่อไป



รูปที่ 3.4 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมซีเมนต์และตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ชนิดของดิน	ปริมาณ ซีเมนต์	จำนวนตัวอย่างและวิธีการทดสอบ			
		Unconfined Compression Test	CBR Test	Third Point loading	Plate Load Test
ดินลูกรัง ราชบุรี	0%	3	3	3	2
	3%	3	3	3	2
	5%	3	3	3	2
	7%	3	3	3	2
	9%	3	3	3	2
	11%	3	3	3	2
ดินทราย นครปฐม	0%	3	3	3	2
	3%	3	3	3	2
	5%	3	3	3	2
	7%	3	3	3	2
	9%	3	3	3	2
	11%	3	3	3	2
ดินเหนียว สมุทรสาคร	0%	3	3	3	2
	3%	3	3	3	2
	5%	3	3	3	2
	7%	3	3	3	2
	9%	3	3	3	2
	11%	3	3	3	2
รวมตัวอย่าง		54	54	54	36

### 3.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เพื่อศึกษาสมบัติทางวิศวกรรม และสมบัติทางกายภาพของดินผสม

3.3.1 การทดสอบความค่าถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity, GS) ตามมาตรฐาน ASTM D 854-58

3.3.2 การทดสอบหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight,  $\gamma$ ) ทดสอบหาปริมาณความชื้น (Water Content) ตามมาตรฐาน ASTM D 2216-98

3.3.3 การทดสอบขีดพิคต์ออฟเตอร์เบอร์ก (Atterberg's Limit) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318-93

3.3.4 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) ตามมาตรฐาน ASTM D1557

3.3.5 การทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00

3.3.6 การทดสอบหาค่า CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) ตามมาตรฐาน ASTM D 1883-99

3.3.7 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Modulus of Rapture) ตามมาตรฐาน ASTM D 1635

### 3.4 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดนำมาผสมกับซีเมนต์ในอัตราส่วนซีเมนต์ต่างๆกันที่ 3% 5% 7% 9% 11% โดยน้ำหนักแห้ง จากนั้นผสมน้ำเท่าปริมาณความชื้นสูงสุดที่ทำให้ดินแน่น (Optimum Moisture Content) แล้วนำไปอัดในแบบหล่อการทดสอบ

3.4.1 แบบหล่อขนาด 6x4.58 นิ้ว ทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่า (Modified Proctor Test) ตามมาตรฐาน ASTM D1557

3.4.2 แบบหล่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.4 x 2.8 นิ้ว ทดสอบหาค่าแรงอัดแกนเดี่ยว ตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00

3.4.3 แบบหล่อขนาด 3x3x14 นิ้ว ทดสอบกำลังรับแรงดัด (Modulus of Rapture) ตามมาตรฐาน ASTM D 1635 เป็นการหาค่า Modulus of Rapture (R) หรือค่ากำลังความสามารถในการรับแรงดัดของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ โดยใช้แท่งตัวอย่างวางในลักษณะเป็น Simple Beam แล้วทำการให้แรงกดในลักษณะ Third Point Loading การทดสอบ นำแท่งตัวอย่างทดสอบมาทำการวัด



ขนาดและซั้งน้ำหนัก จากนั้นเข้าเครื่องทดสอบโดยการแบ่งแท่งตัวอย่างตามยาวเหลือบริเวณปลายไว้ 2 ส่วน ส่วนภายใน ที่เหลือแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่ากันๆ วางแท่งตัวอย่างให้ 3 ส่วนที่แบ่งไว้อยู่ตรงฐานของแท่งเลื่อนเครื่องกดให้แท่งกดด้านบนสัมผัสตรงที่แบ่งไว้ ทำการกดตัวอย่างทดสอบโดยใช้อัตรากดเท่ากับ 0.7 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วบันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุด เพื่อไปคำนวณหาค่ากำลังรับแรงค้ำ

3.4.4 การทดสอบการหาน้ำหนักบรรทุกทุกของชั้นดิน (Plate Bearing Test) ตามมาตรฐานASTM D 1194-94 การผสมดิน โดยใช้เครื่องผสมดินโดยมีอัตราส่วนการผสมดินต่อซีเมนต์ตามตารางที่ 3.1 และอัตราการผสมน้ำตามผลการทดสอบการหาความหนาแน่นสูงสุดโดยวิธีทดสอบการบดอัด Modified Proctor Test ตามมาตรฐาน ASTM D 1557



### รูปที่ 3.5 เครื่องผสมดินสำหรับแปลงทดสอบในสนาม

แปลงทดสอบการรับกำลังแบกทานในสนาม กั้นด้วยเหล็กตัวซี ขนาด 150x50x3.2 มีขนาดช่องของแปลงทดสอบ กว้าง-ยาว-สูง 1.5 เมตร x 1.5 เมตร x 0.15 เมตร โดยทำการบดอัดดินเดิมและทำการทดสอบค่าการบดอัดค่าดินเดิมแบบมาตรฐานไม่น้อยกว่า 95% ส่วนการบดอัดดินซีเมนต์ผสมในแต่ละอัตราส่วน แบ่งเป็น 3 ชั้น ชั้นละ 5 เซนติเมตร โดยแต่ละชั้นบดอัดด้วยเครื่องตบดินเป็นเวลา 5 นาที และทดสอบค่าความหนาแน่นของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ไม่น้อยกว่า 95% หลังจากนั้นทิ้งไว้ 28 วัน จึงทดสอบค่าการรับกำลังแบกทาน โดยวิธี Plate Bearing Test ASTM D 1196-93



รูปที่ 3.6 แปลงทดสอบการรับกำลังแบกทาน



รูปที่ 3.7 เครื่องบดอัดดินในสนาม



รูปที่ 3.8 ก่อนและหลังการบดอัด ทดสอบหาความหนาแน่นของดินในแปลงทดสอบ (Sand Cone Method)



รูปที่ 3.9 เครื่องมือทดสอบการการหาน้ำหนักแบกทานของชั้นดิน (Plate Bearing Test)

เป็นการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กดทับบนแผ่นเหล็กกับค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการรับน้ำหนัก โดยใช้วิธีการวัดอัตราการทรุดตัวและรักษาแรงกดอย่างต่อเนื่องควบคุมอัตราการให้แรงกดเพื่อให้เกิดการทรุดตัวของแผ่นเหล็กและจดบันทึกค่าการทรุดตัวในแต่ละช่วงเวลา การให้แรงกดตามวิธีนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า Modulus of subgrade reaction (k) โดยเรียกการทดสอบว่าเป็นวิธีการทดสอบแบบ Non-Respective Static Plate Load Test

### 3.5 การวิเคราะห์ผลและสรุปผล

3.4.1 ทราบคุณลักษณะข้อมูลพื้นฐาน ในตัวอย่างดิน รูปร่าง การจัดเรียงตัวของเม็ดดิน องค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในเม็ดดิน

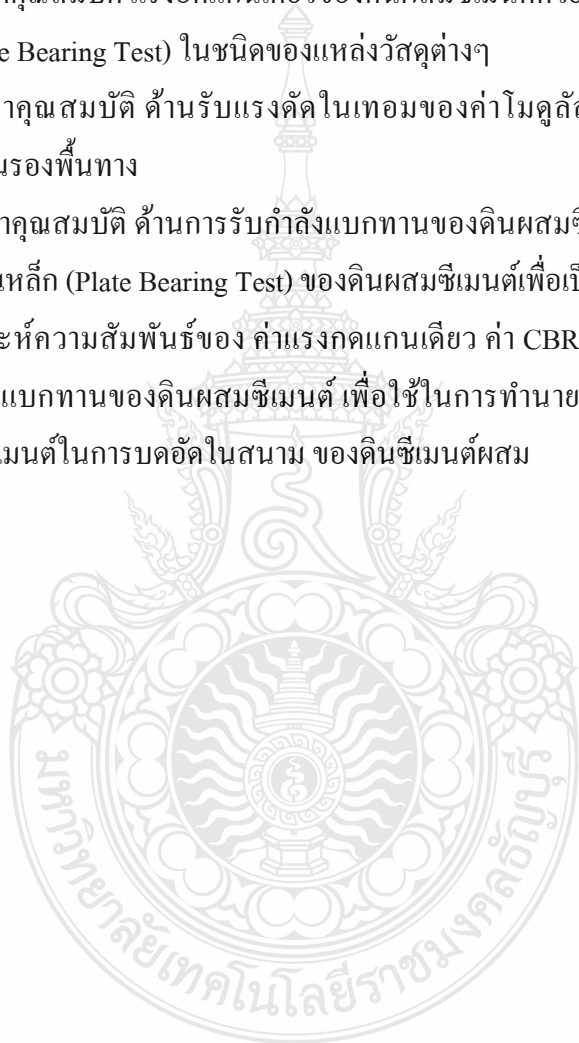
3.4.2 สรุปค่าคุณสมบัติ กำลังรับแรงเฉือนในเทอมของค่าแรงกดแกนเดียว ค่า CBR แบบ แซ่น้ำ ของดินซีเมนต์ ที่นำมาจากแหล่งวัสดุต่างๆ

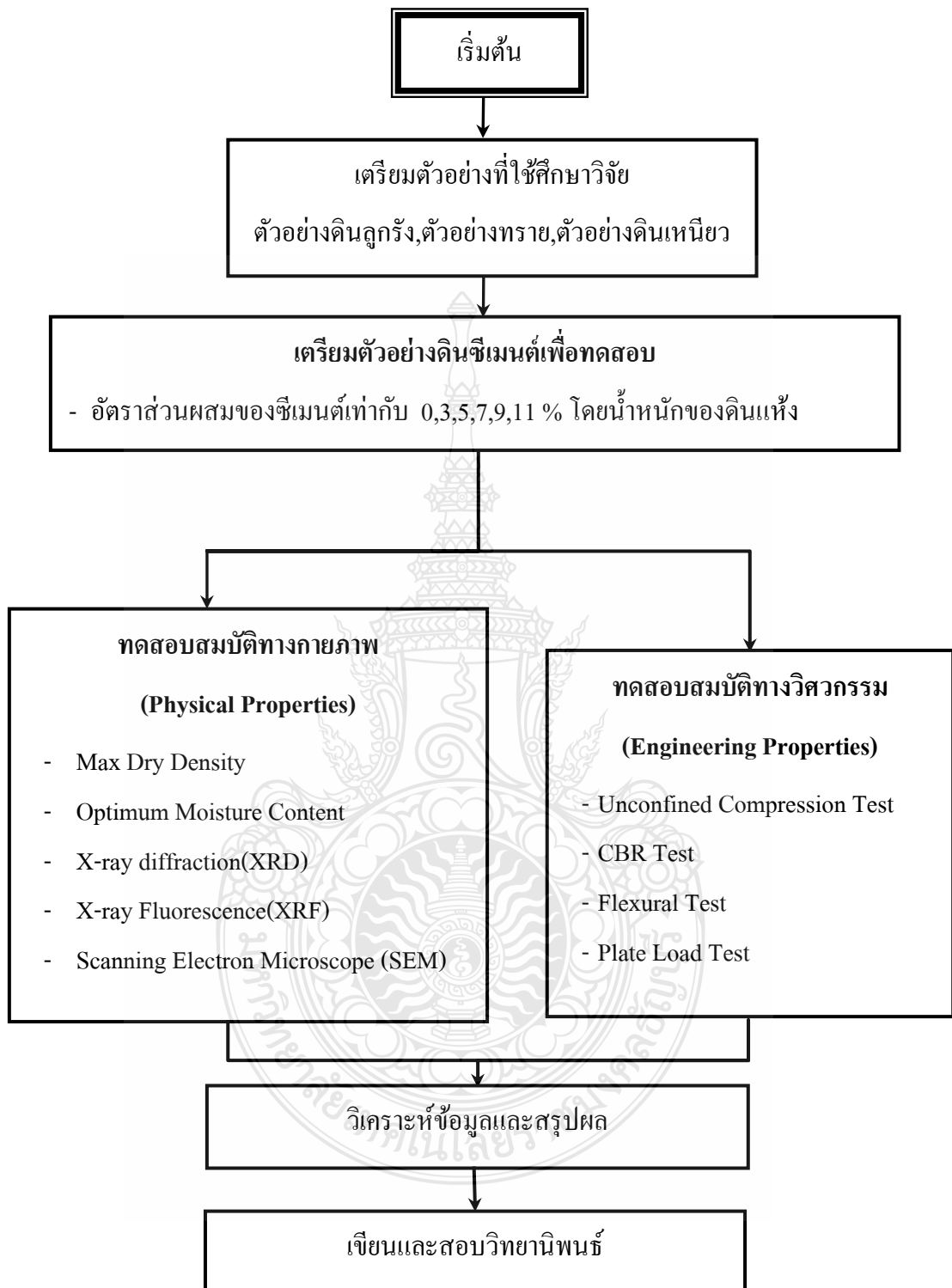
3.4.3 สรุปค่าคุณสมบัติ แรงอัดแกนเดียวของดินผสมซีเมนต์ด้วยการทดสอบการให้น้ำหนักกดบนแผ่นเหล็ก (Plate Bearing Test) ในชนิดของแหล่งวัสดุต่างๆ

3.4.4 สรุปค่าคุณสมบัติ ด้านรับแรงค้ำในเทอมของค่าโมดูลัสการแตกร้าวของดินผสมซีเมนต์เพื่อเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง

3.4.5 สรุปค่าคุณสมบัติ ด้านการรับกำลังแบกทานของดินผสมซีเมนต์ด้วยการทดสอบการให้น้ำหนักกดบนแผ่นเหล็ก (Plate Bearing Test) ของดินผสมซีเมนต์เพื่อเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง

3.4.6 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ ค่าแรงกดแกนเดียว ค่า CBR แบบ แซ่น้ำ ค่าโมดูลัสการแตกร้าว และรับกำลังแบกทานของดินผสมซีเมนต์ เพื่อใช้ในการทำนายค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมซีเมนต์ในการบดอัดในสนาม ของดินซีเมนต์ผสม





รูปที่ 3.10 แผนภูมิขั้นตอนการทดสอบ การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 4.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน

##### 4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังจังหวัดราชบุรี

จากผลการทดลองดินลูกรังจังหวัดราชบุรี สามารถจำแนกได้เป็น A-1-a ตามระบบ AASHTO โดยลักษณะดินเป็นดินชนิด (GW) คือ เป็นเม็ดกลมคละกับเม็ดเหลี่ยมมีกรวดผสมทรายมีเม็ดละเอียดปนบ้างเล็กน้อย มีขนาดระหว่างอยู่ 80-200 มม. โดยมีขนาดคละกัณฑ์ และสามารถจำแนกตามระบบ Unified โดยทราบค่า  $C_u = 28.846$  มากกว่า 4 และ  $C_c = 1.005$  ซึ่งค่าอยู่ระหว่าง 1-3 ซึ่งสามารถจำแนกกลุ่มเป็น Well-graded gravel with sand (GW) เนื่องจากเป็นดินเม็ดหยาบโดยดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 5%

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินลูกรัง คือ  $G_s = 2.74$  และจากผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) โดยวิธี Modified Proctor Compaction Test ได้ผลการทดสอบดังแสดงใน ตารางที่ 4.1

##### 4.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินทรายจังหวัดนครปฐม

จากผลการทดลองดินทรายนครปฐมสามารถจำแนกชนิดของดินได้เป็น A-1-b (0) ตามระบบ AASHTO เป็นดินชนิด Poorly Graded Sand (SP) คือ มีลักษณะเป็นเม็ดกลมมนหรือเป็นเหลี่ยม ทรายมีขนาดคละกัณฑ์ไม่ดี เป็นลักษณะทรายปนกรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้าง และตามระบบ Unified ทราบค่า  $C_u = 3.125$  น้อยกว่า 6 และ  $C_c = 1.076$  ซึ่งค่าอยู่ระหว่าง 1-3 สามารถจำแนกกลุ่มดินได้เป็น Poorly Graded Sand (SP) เนื่องจากเป็นดินเม็ดหยาบโดยเมื่อทดสอบการร่อนผ่านตะแกรงผ่านพบว่าดินตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 5% และไม่สามารถนำไปหาค่า Atterberg's Limits ได้แสดงว่าเป็นดินประเภท non-plastic

ค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายที่ทดสอบได้ คือ  $G_s = 2.56$  ซึ่งการทดลองได้มีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งในตัวอย่างดินเหนียวอาจจะมีพวกอินทรีย์สาร หรือพวกธาตุเบาต่างๆปะปนอยู่ หรือมีลักษณะเป็นฝุ่นผงปะปนอยู่ ถ้าจะนำไปใช้งานในลักษณะผสมกับคอนกรีต อาจต้องทำความสะอาดวัสดุก่อน และสำหรับผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ทดสอบ โดยวิธี Modified Proctor Compaction Test ได้ผลการทดสอบดังแสดงใน ตารางที่ 4.1

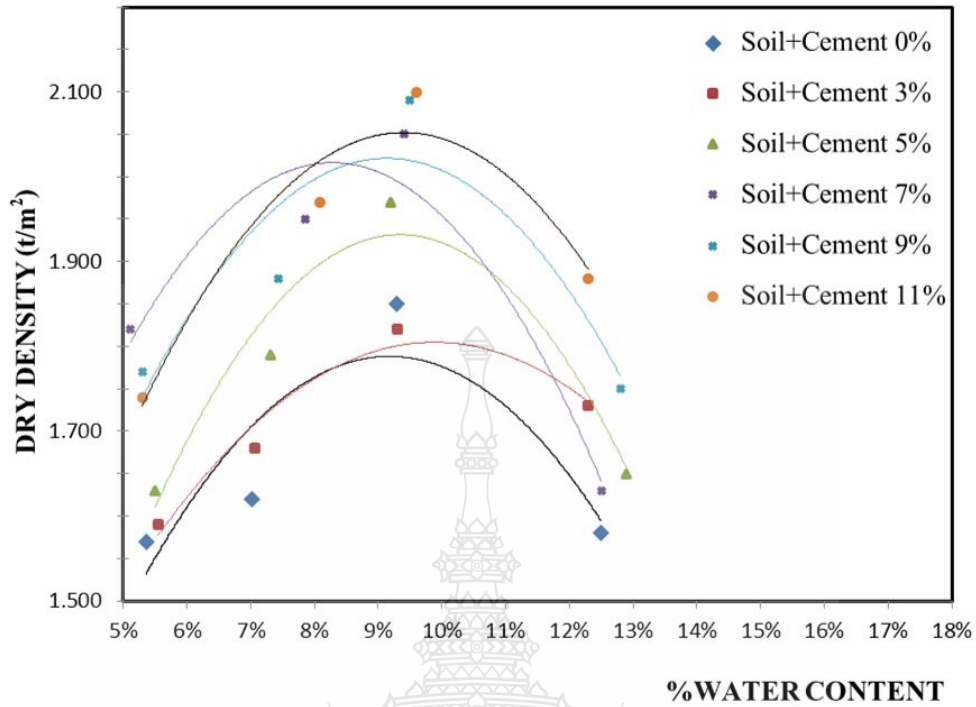
#### 4.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาคร

จากการทดลองดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาครสามารถจำแนกได้เป็น A-7-5 (0) ตามระบบ AASHTO เป็นดินเม็ดละเอียดตะกอนทรายหรือดินเหนียวปน สามารถจำแนกได้เป็นดินชนิด (CL) คือ ดินเหนียวสีดํา ขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. มีเม็ดละเอียดปนบ้าง และตามระบบ Unified ทรายค่า LL= 45 PL= 26 และ PI = 19 อยู่เหนือเส้น A line จำแนกเป็น Clay low to Medium Plasticity (CL) เป็นตะกอนทรายปนดินเหนียวที่อาจมีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง

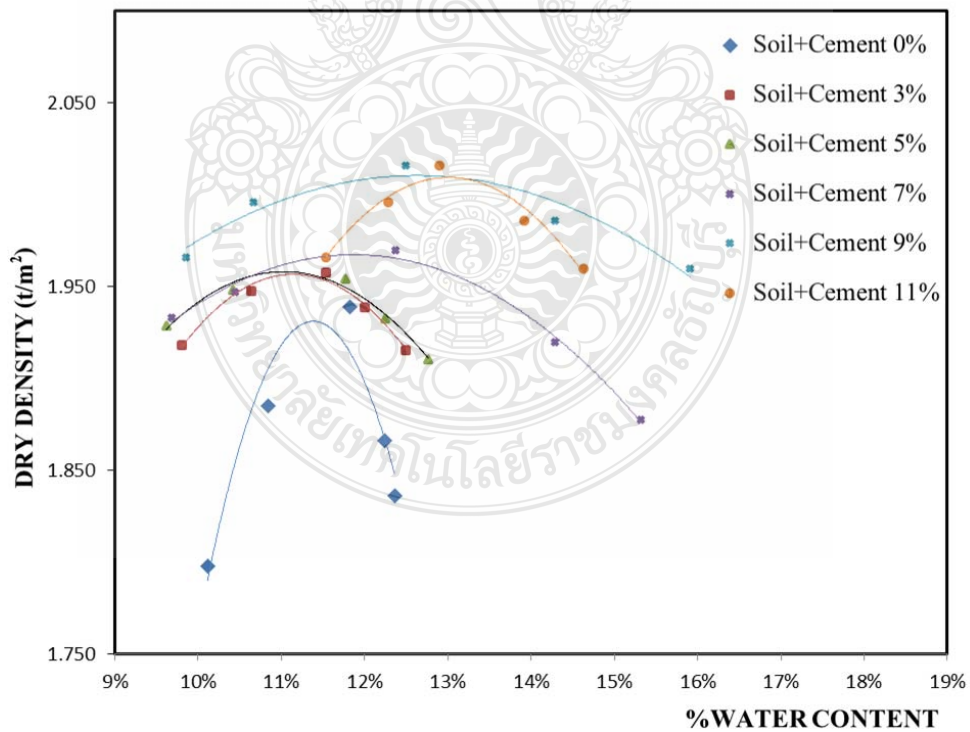
ค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียว คือ GS. = 2.65 โดยมีลักษณะเป็นดินดําและอยู่บริเวณผิวดิน จึงอาจมีอินทรีย์สารหรือธาตุเบาปนอยู่ สำหรับผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ทดสอบ โดยวิธี Modified Proctor Compaction Test ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ผลการทดลองความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MAX. DRY DENSITY) และความชื้นที่เหมาะสม(O.M.C.) ของตัวอย่างดิน

	Cement%	0	3	5	7	9	11
ดินลูกรัง จังหวัดราชบุรี	Max Dry Density(t/m3)	1.76	1.82	1.97	1.98	2.08	2.05
	O.M.C. (%)	6.50	9.20	9.50	8.50	9.20	9.70
ดินทราย จังหวัดนครปฐม	Max Dry DENSITY(t/m3)	1.95	1.96	1.95	1.97	2.01	2.02
	O.M.C. (%)	11.50	10.90	11.27	12.20	12.42	13.20
ดินเหนียว จังหวัดสมุทรสาคร	Max Dry Density(t/m3)	1.75	1.76	1.88	1.97	1.98	1.93
	O.M.C. (%)	14.35	14.25	12.27	11.30	11.80	11.50

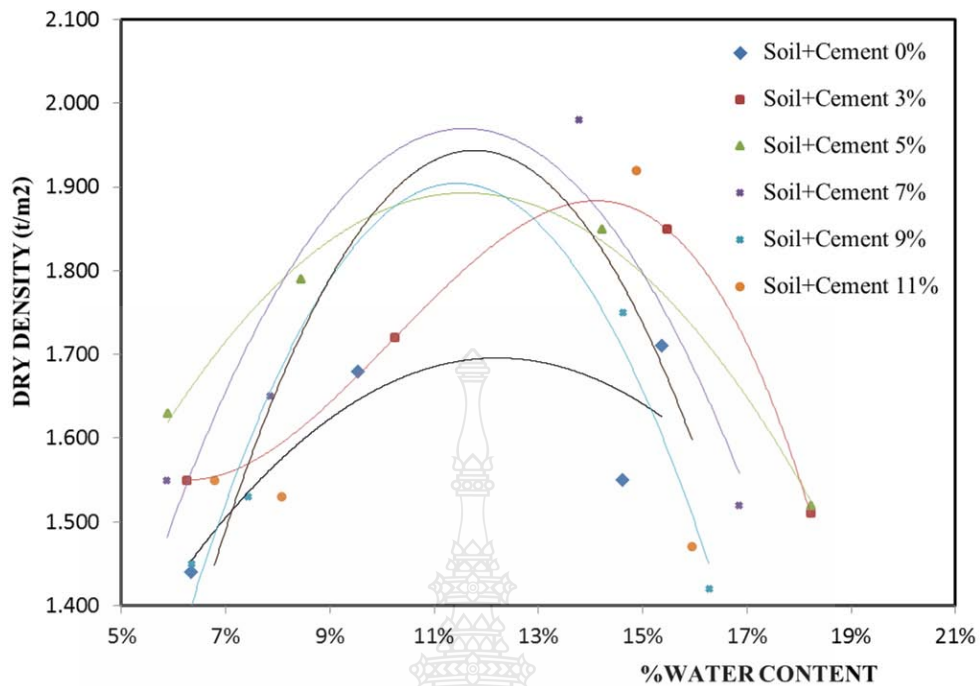


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของดินลูกรังจังหวัดราชบุรีผสมซีเมนต์



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์





รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของดินเหนียวสมุทรสาครผสมซีเมนต์

## 4.2 ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray Diffraction(XRD) และ X-ray Fluorescence(XRF)

### 4.2.1 ผลการทดสอบของดินลูกรังจังหวัดราชบุรี

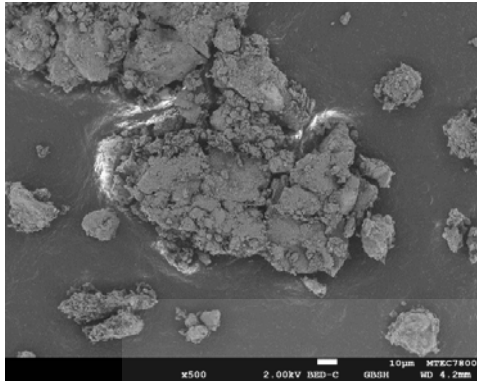
เมื่อทดสอบตัวอย่างดินลูกรัง ด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีลักษณะการเรียงตัวของดินเป็นผลึกแบบไตรคลินิก อาจเกิดเป็นผลึกแฝด รอยแยกแนวเรียบ 2 แนวเกือบตั้งฉากกัน มีความแวววาว มีลักษณะเป็นผลึกหนารูปเหลี่ยม ตามรูป 4.4 เมื่อทดสอบโดยวิธี X-ray diffraction(XRD) พบว่ามีส่วนประกอบของ Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก มุม  $2\theta$  ที่ให้ค่า Lincounts สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 26 องศา และมี Microcline( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) ตามรูป 4.7 ชาติที่พบ ได้แก่ ซิลิกอน อะลูมิเนียม เหล็ก โพแทสเซียม ไทเทเนียม แคลเซียม แมกนีเซียม โครเมียม วานาเดียม กำมะถัน นิกเกิล และเมื่อทดสอบโดยวิธี X-ray Fluorescence(XRF) พบว่ามีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  สูงถึง 73.93% และมีปริมาณ Al 19.06% ของปริมาณตัวอย่างหนึ่งหน่วย ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์ และมีเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบของธาตุ ตามตาราง 4.4

#### 4.2.2 ผลการทดสอบของดินทรายจังหวัดนครปฐม

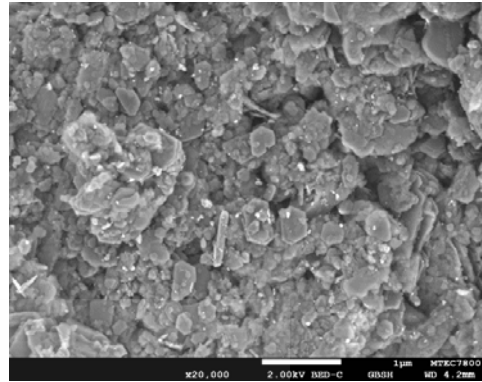
เมื่อทดสอบตัวอย่างดินทราย ด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า มีลักษณะของโมเลกุลเป็นผลึก มีการเรียงตัวซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบ ลักษณะผลึกเป็นแผ่นซ้อนกัน อาจเกิดจากการทับถมของผลึก Silica ที่มีความแวววาวคล้ายแก้ว ทับถมกันเป็นชั้นๆ ตามรูป 4.5 เมื่อทดสอบโดยวิธี X-ray diffraction(XRD) ของตัวอย่างดินทรายที่ใช้ในการวิจัยพบว่ามีส่วนประกอบของ Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีการรวมตัวของธาตุเป็นประเภทหลักคือ Microcline ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) ตามรูป 4.8 ธาตุที่พบ ได้แก่ ซิลิกอน อะลูมิเนียม เหล็ก โพแทสเซียม ไทเทเนียม แคลเซียม แมกนีเซียม โครเมียม วานเดียม กำมะถัน นิกเกิล และเมื่อทดสอบโดยวิธี X-ray Fluorescence(XRF) พบว่ามีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  สูงถึง 75.63% และมีปริมาณ Al 10.56% ของปริมาณตัวอย่างหนึ่งหน่วย ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์เช่นเดียวกับที่พบในดินลูกรัง และมีเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบของธาตุอื่นๆ ตามตาราง 4.5

#### 4.2.3 ผลการทดสอบของดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาคร

เมื่อทดสอบตัวอย่างดินทราย ด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า มีลักษณะเป็นผลึกแบบโมโนคลินิก โดยมีลักษณะเป็นเป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกันเป็นชั้นหนาๆ ซึ่งอาจมีธาตุเหล็ก แมกนีเซียม แคลไซต์ โซเดียม ลิเทียม ฟลูออรีน และไททานียม ปนอยู่จำนวนเล็กน้อย ตามรูป 4.6 เมื่อทดสอบโดยวิธี X-ray diffraction(XRD) ผลการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาครที่ใช้ในการวิจัยพบว่ามีส่วนประกอบของ Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลักในดิน และมีลักษณะเป็นดินประเภท Muscovite ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ) ตามรูป 4.9 เมื่อทดสอบโดยวิธี X-ray Fluorescence(XRF) พบว่ามีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  สูงถึง 63.28% และมีปริมาณ Al 19.13% ของปริมาณตัวอย่างหนึ่งหน่วย ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์แต่อาจน้อยกว่าดินลูกรังราชบุรี และดินทรายนครปฐมซึ่งการมีเปอร์เซ็นต์  $\text{SiO}_2$  และ Al ที่ลดลงอาจส่งผลให้ปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์ลดลง ทั้งนี้มีเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบของธาตุอื่นๆ ดังแสดงในตาราง 4.6

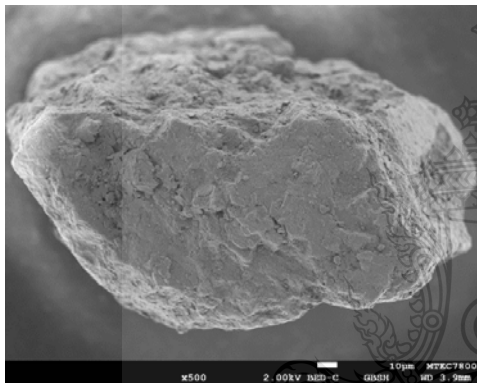


(ก)

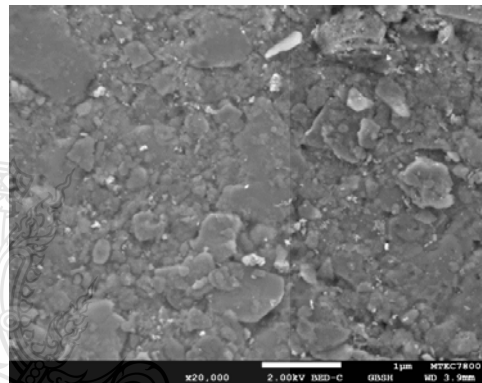


(ข)

รูปที่ 4.4 (ก) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ของ ตัวอย่างดินลูกรังจังหวัดราชบุรี

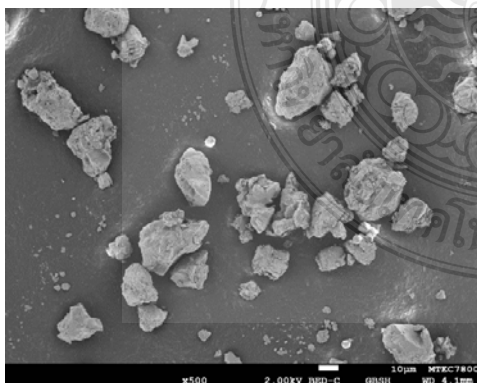


(ก)

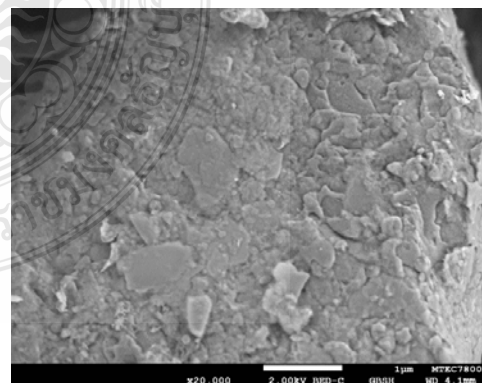


(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ของ ตัวอย่างดินทรายจังหวัดนครปฐม

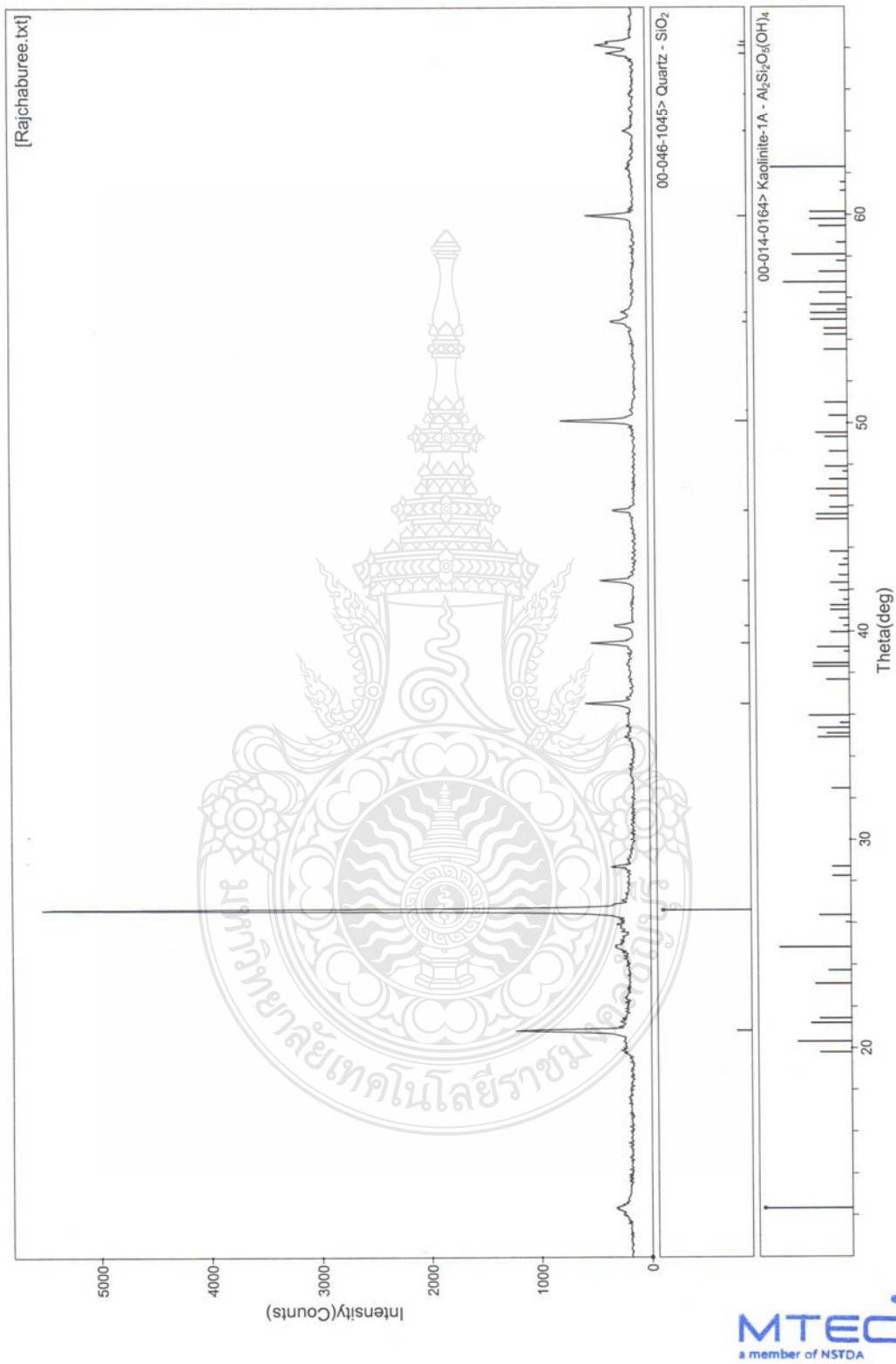


(ก)

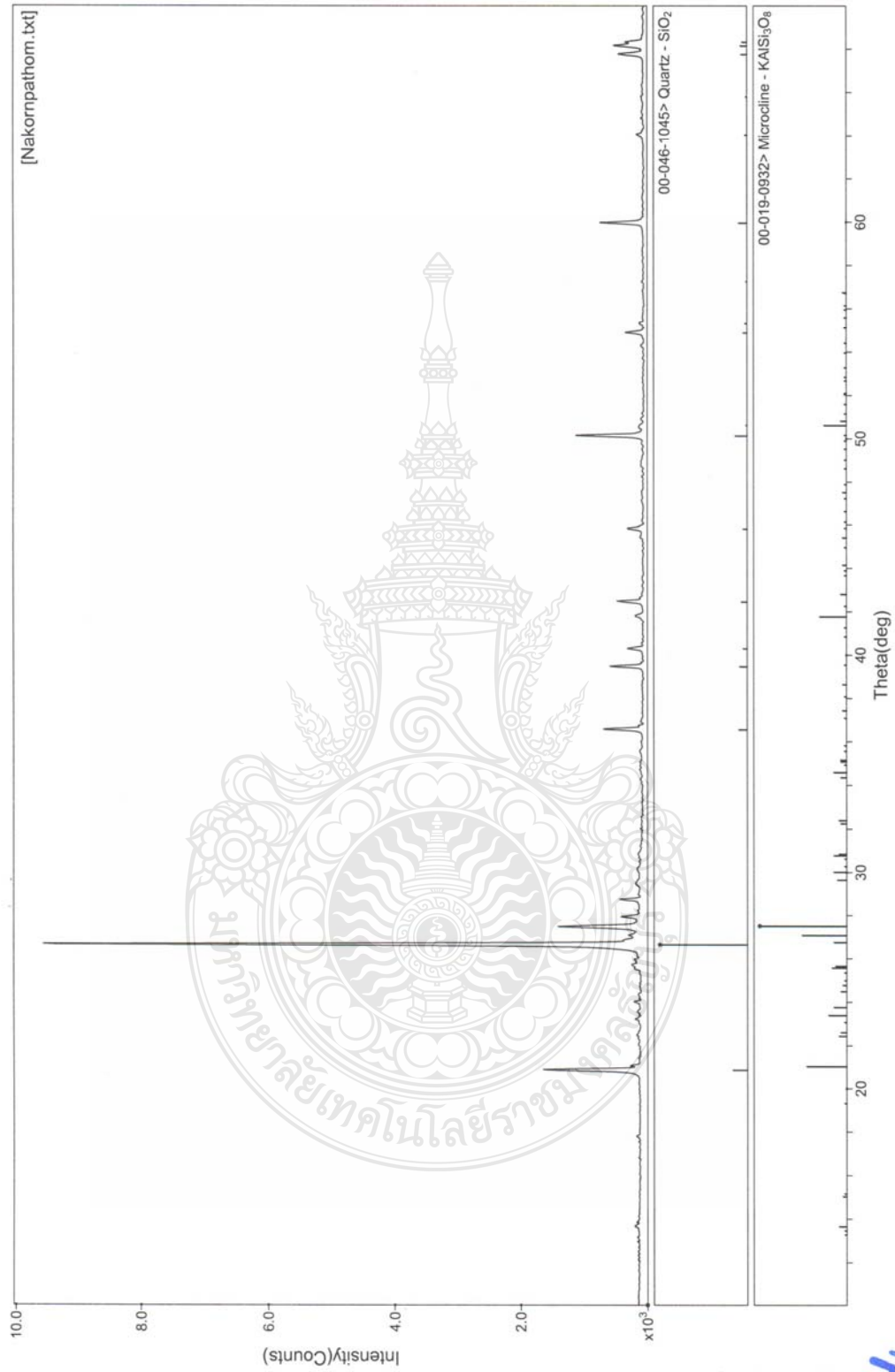


(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ข) ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ของ ตัวอย่างดินเหนียวสมุทรสาคร

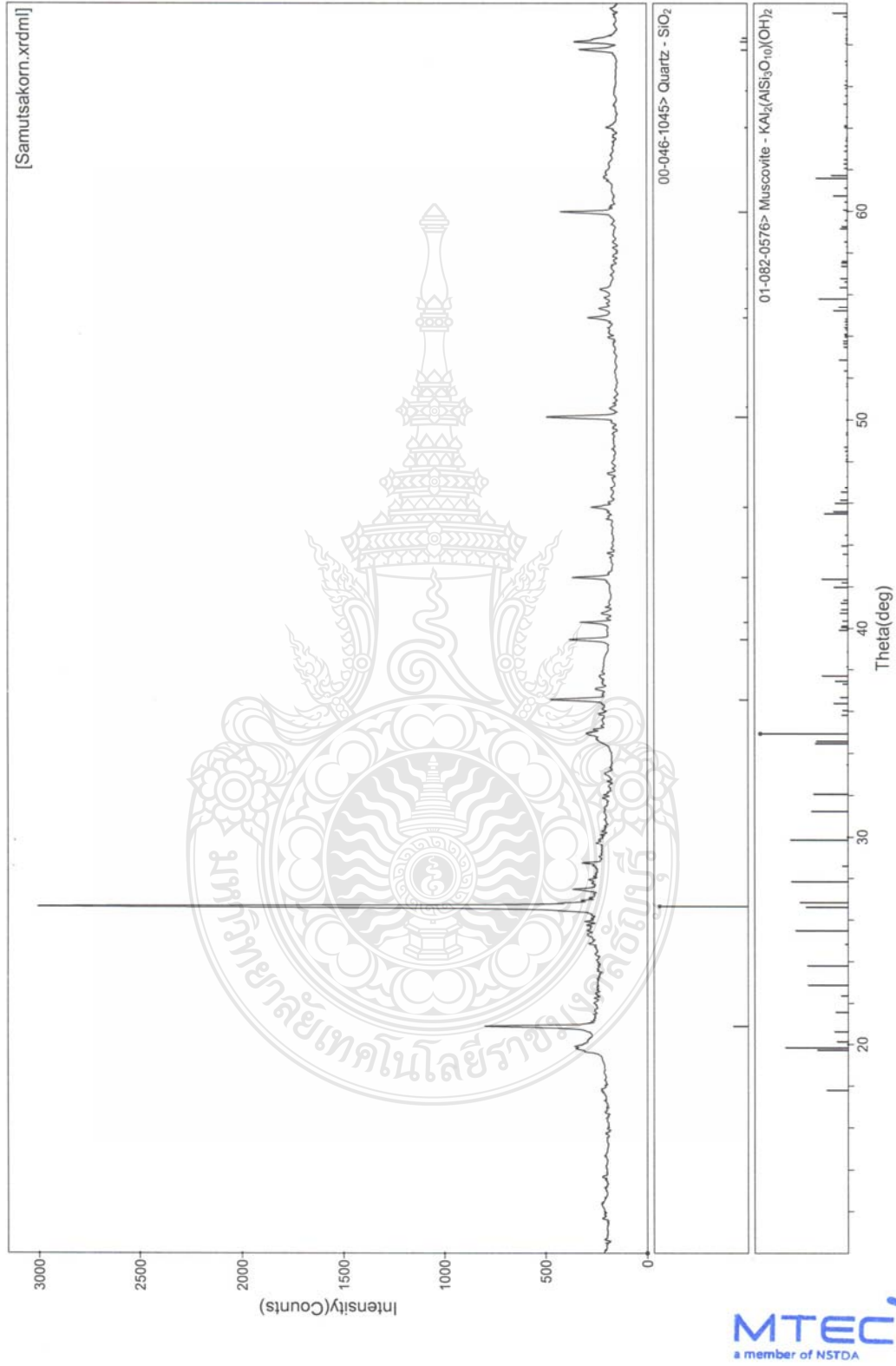


รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบ X-ray diffraction ของตัวอย่างดินลูกรังจังหวัดราชบุรี



รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบ X-ray diffraction ของตัวอย่างดินทรายแข็งหัวดินกรปฐุม

เข้จ้งหัวดินกรปฐุม



รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบ X-ray diffraction ของตัวอย่างดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาคร

ตารางที่ 4.4 ส่วนประกอบธาตุที่พบในตัวอย่างดินลูกรัง ทดสอบโดยวิธี X-ray Fluorescence

ธาตุที่พบ	ความเข้มข้น(%)	สารประกอบ	ความเข้มข้น(%)
Si	34.57	SiO <sub>2</sub>	73.96
Al	10.09	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.06
Fe	3.12	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.47
K	0.69	K <sub>2</sub> O	0.84
Ti	0.40	TiO <sub>2</sub>	0.67
Ca	0.24	CaO	0.34
Mg	0.24	MgO	0.39
Cr	0.06	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09
V	0.03	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06
Si	0.02	SO <sub>3</sub>	0.06
Ni	< 0.01	NiO	0.01
Mn	< 0.01	MnO	0.01
Zr	< 0.01	ZrO <sub>2</sub>	0.01
Sr	< 0.01	SrO <sub>2</sub>	< 0.01
Zn	< 0.01	ZnO	< 0.01
Cu	< 0.01	CuO	< 0.01
As	< 0.01	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0.01

ตารางที่ 4.5 ส่วนประกอบธาตุที่พบในตัวอย่างดินทราย ทดสอบโดยวิธี X-ray Fluorescence

ธาตุที่พบ	ความเข้มข้น(%)	สารประกอบ	ความเข้มข้น(%)
Si	35.35	SiO <sub>2</sub>	75.63
Al	5.59	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.56
K	4.75	K <sub>2</sub> O	5.72
Fe	2.18	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.12
Ca	2.05	CaO	2.87
Na	0.37	Na <sub>2</sub> O	0.50
Mg	0.31	MgO	0.51
Ti	0.31	TiO <sub>2</sub>	0.51
Ba	0.11	BaO <sub>2</sub>	0.13
Cl	0.06	ClO <sub>2</sub>	0.06
Mn	0.05	MnO <sub>2</sub>	0.07
Rb	0.05	Rb <sub>2</sub> O	0.06
Zr	0.05	ZrO <sub>2</sub>	0.06
P	0.05	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10
Si	0.03	SO <sub>3</sub>	0.07
Sr	0.01	SrO	0.01
Zn	0.01	ZnO	0.01
Ni	<0.01	NiO	< 0.01
As	<0.01	As <sub>2</sub> O	< 0.01



ตารางที่ 4.6 ส่วนประกอบธาตุที่พบในตัวอย่างดินเหนียว ทดสอบโดยวิธี X-ray Fluorescence

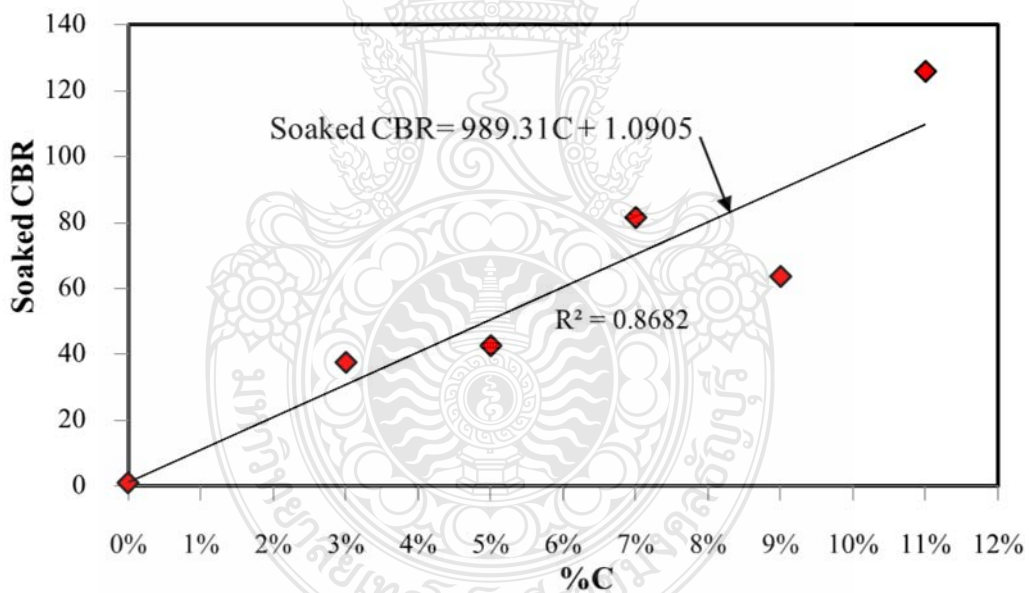
ธาตุที่พบ	ความเข้มข้น(%)	สารประกอบ	ความเข้มข้น(%)
Si	29.58	SiO <sub>2</sub>	63.28
Al	10.12	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.13
Fe	4.49	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.42
K	2.11	K <sub>2</sub> O	2.55
S	1.42	SO <sub>3</sub>	3.55
Ca	0.72	CaO	1.01
Ti	0.53	TiO <sub>2</sub>	0.89
Na	0.44	Na <sub>2</sub> O	0.60
Mn	0.22	MnO	0.28
Cl	0.11	Cl	0.11
P	0.05	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12
Sn	0.05	SnO <sub>2</sub>	0.07
Zr	0.02	ZrO <sub>2</sub>	0.03
Rb	0.02	Rb <sub>2</sub> O	0.02
Zn	< 0.01	ZnO	0.01
Cr	< 0.01	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01
Sr	< 0.01	SrO	< 0.01
Ni	< 0.01	NiO	< 0.01

### 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินผสมซีเมนต์

#### 4.3.1 ผลทดสอบของดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

##### 4.3.1.1 ค่าแคลิฟอร์เนียเบริงเรโซแบบแช่น้ำของดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

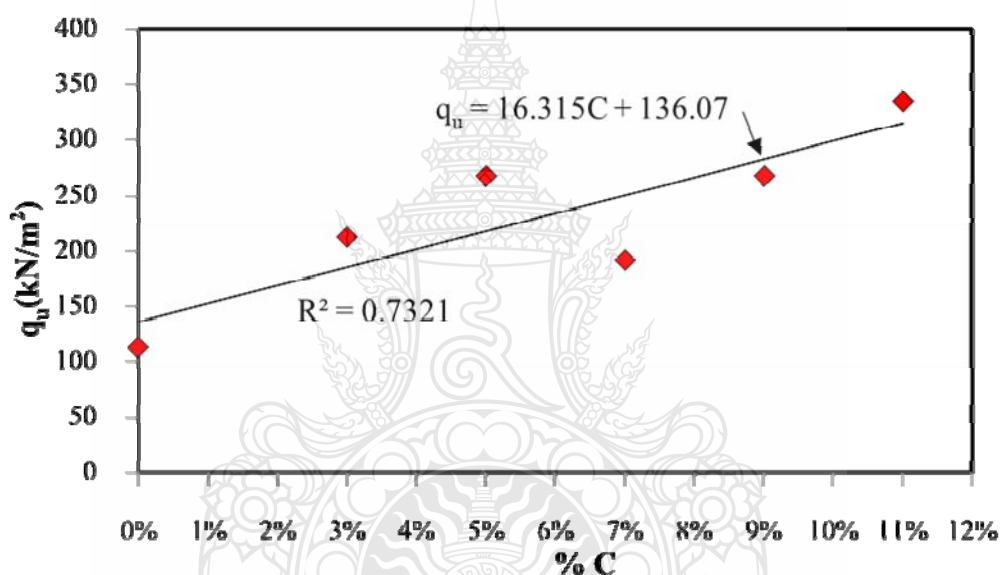
วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าค่าแคลิฟอร์เนียเบริงเรโซแบบแช่น้ำ (Soaked CBR) และค่า %Cement (C) พบว่าเมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นค่า Soaked CBR มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยนั่นคือดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์มีค่าเปอร์เซ็นต์ความต้านทานแรงเฉือนได้มากขึ้น ตามมาตรฐานสำหรับชั้นรองพื้นทางไม่ต่ำกว่า 25% และชั้นพื้นทางไม่ต่ำกว่า 80% โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ที่ 3% จะอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง และเมื่อเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ในช่วง 7% - 11% ก็อยู่ในเกณฑ์ที่จะใช้เป็นชั้นพื้นทาง ดังเส้นความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.3 มีความเชื่อมั่น  $R^2 = 0.8682$  และได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $\% \text{ Soaked CBR} = 989.31C + 1.0905$  โดยระยะเวลาของการบ่มอยู่ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR และค่า %Cement (C) ของดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

#### 4.3.1.2 ค่ากำลังแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัดของดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

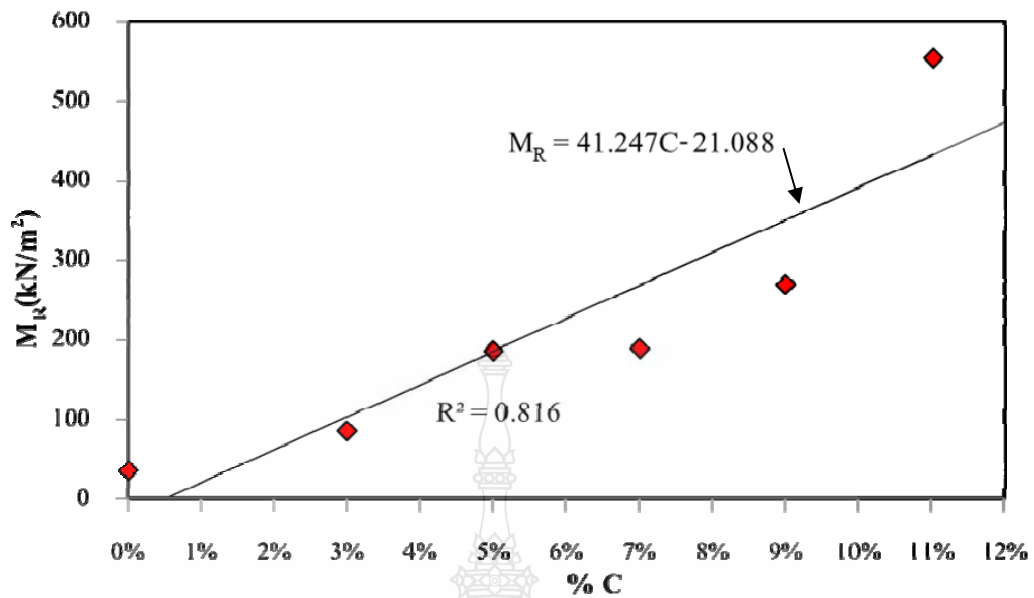
วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัด ( $q_u$ ) และค่า %Cement (C) พบว่าการพัฒนากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน มีลักษณะเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นค่า  $q_u$  มีค่าเพิ่มขึ้น ดังเส้นความสัมพันธ์แสดงในรูปที่ 4.4 มีค่าความเชื่อมั่น  $R^2 = 0.7321$  และได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $q_u = 16.315C + 0136.07$  ตามมาตรฐานด้านการรับกำลังอัดแกนเดียวของกรมทางหลวง กำหนดไว้ที่  $24.5 \text{ kg/cm}^2$  ที่อายุการบ่ม 7 วัน ซึ่งเป็นไปตามแนวโน้มของ Ruenkraitersa [20] ที่ว่าปริมาณซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_u$  และค่า % Cement (C) ของดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

#### 4.3.1.3 ค่ากำลังรับแรงคัดของดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงคัด (Modulus of Rupture,  $M_R$ ) และค่า %Cement (C) เมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นค่า  $M_R$  มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งนี้ความสัมพันธ์เป็นไปตามค่า Soaked CBR และค่ากำลังแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัดคือเมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้น Soaked CBR,  $q_u$  และค่า  $M_R$  จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ที่การบ่มอายุ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 กราฟมีค่าความเชื่อมั่น  $R^2 = 0.816$  และได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $M_R = 41.247C - 21.088$  ซึ่งค่า  $M_R$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า % Cement (C)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $M_R$  และค่า % Cement ( C ) ของดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

#### 4.3.1.4 ค่ากำลังรับแรงแบกทานของดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

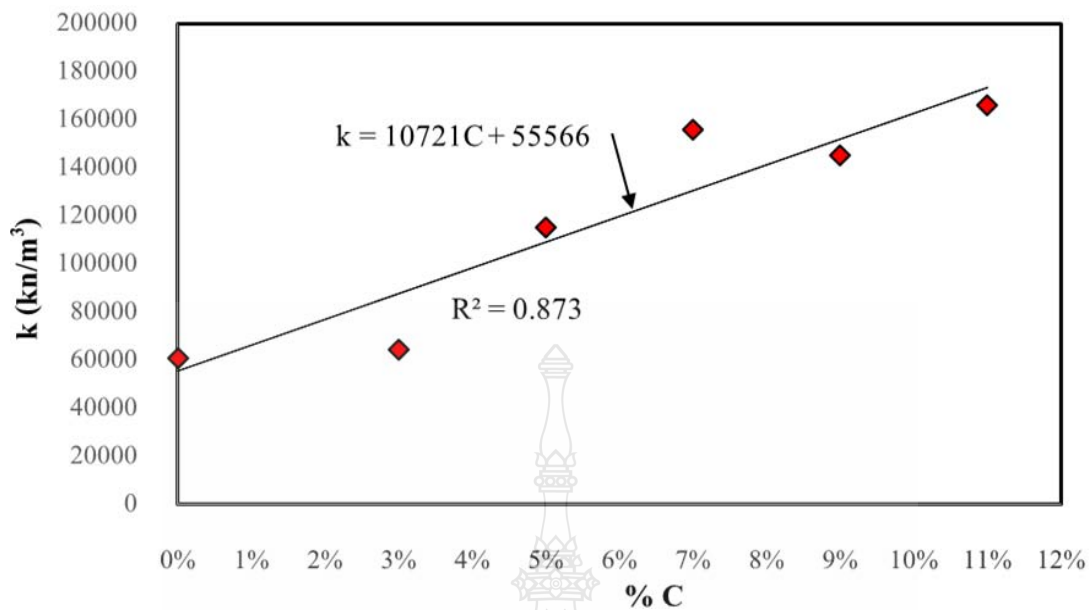
วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงแบกทานกับค่าการทรุดตัว ในรูปของค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) โดยการทดสอบ Plate Bearing Test โดยการให้แรงขนาด  $69 \text{ kN/m}^2$  ผ่านแผ่น Plate แล้ววัดค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น (Deflection) ของดินในแต่ละช่วง โดยนำมาคำนวณหาอัตราส่วนของแรงกดที่กระทำต่อดิน ต่อ ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะได้ค่า Modulus of Subgrade Reaction (k)

$$k = \frac{P}{\Delta}$$

เมื่อ  $P =$  แรงกดที่กระทำต่อดิน ( $69 \text{ kN/m}^2$ )

$\Delta =$  ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

และพบว่าค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) มีค่าสูงขึ้น ตามค่า %Cement ( C ) ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 และได้ความสัมพันธ์ของค่า k ต่อค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์เป็นสมการ  $k=10721C+55566$  มีค่าความเชื่อมั่น  $R^2=0.873$

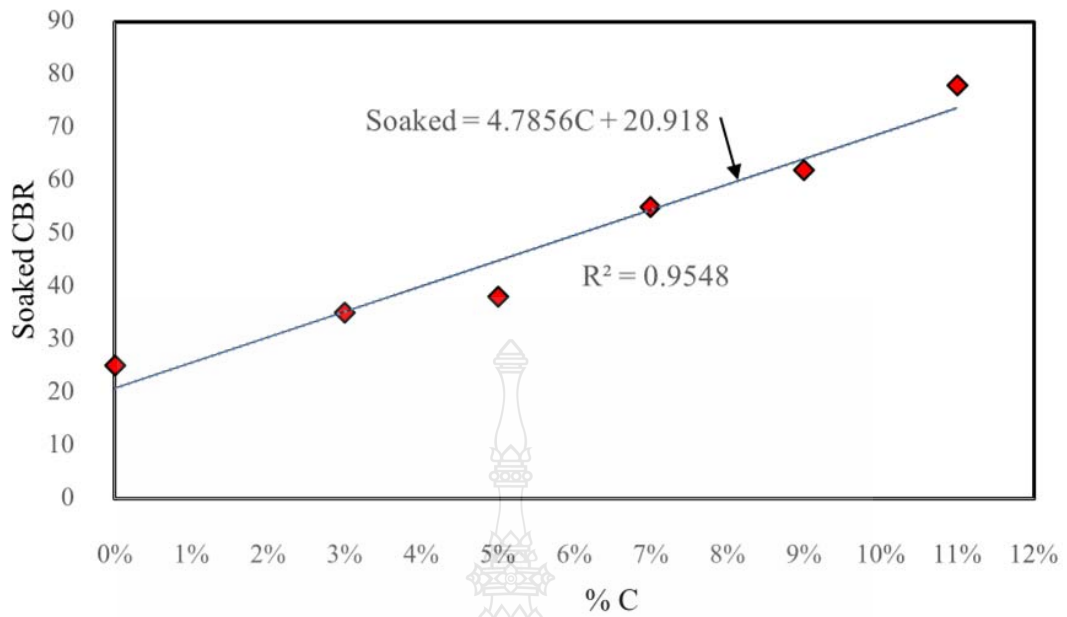


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) และค่า %Cement (C) ของดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

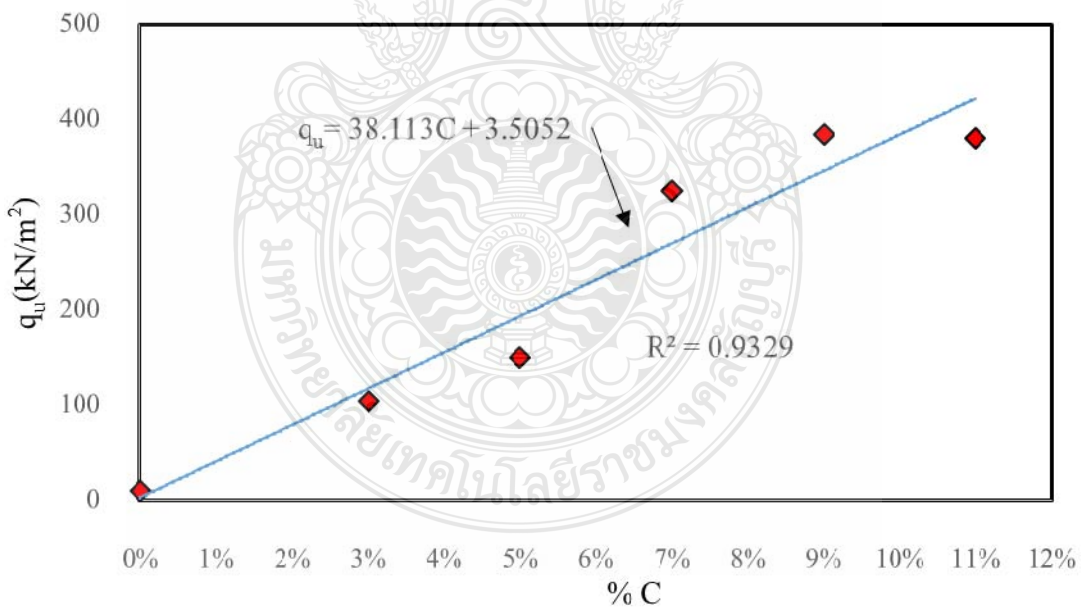
#### 4.3.2 ผลทดสอบของดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

##### 4.3.2.1 ค่าแคลิฟอร์เนียเบริงเรโซแบบแช่น้ำของดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า California Bearing Ratio แบบแช่น้ำ (Soaked CBR) และค่า %Cement (C) พบว่าดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์มีค่าเปอร์เซ็นต์ Soaked CBR แปรผันสูงขึ้นไปตามค่า %Cement (C) ที่เพิ่มมากขึ้นที่อายุการบ่มที่ 28 วัน (สนธยา แพพัฒน์นิตย์ [68]) ขึ้น ตามมาตรฐานชั้นดินบดอัดสำหรับชั้นรองพื้นทางต้องมีค่า CBR ไม่ต่ำกว่า 25% และชั้นพื้นทางไม่ต่ำกว่า 80% โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ที่ 3% จะอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง และเมื่อเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ในช่วง 7% - 11% จะอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้เป็นชั้นพื้นทาง ดังเส้นความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.7 มีค่าความเชื่อมั่น  $R^2 = 0.954$  และได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $\text{Soaked CBR} = 4.7856C + 20.918$



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR และค่า % Cement ( C ) ของดินทราย นครปฐมผสมซีเมนต์



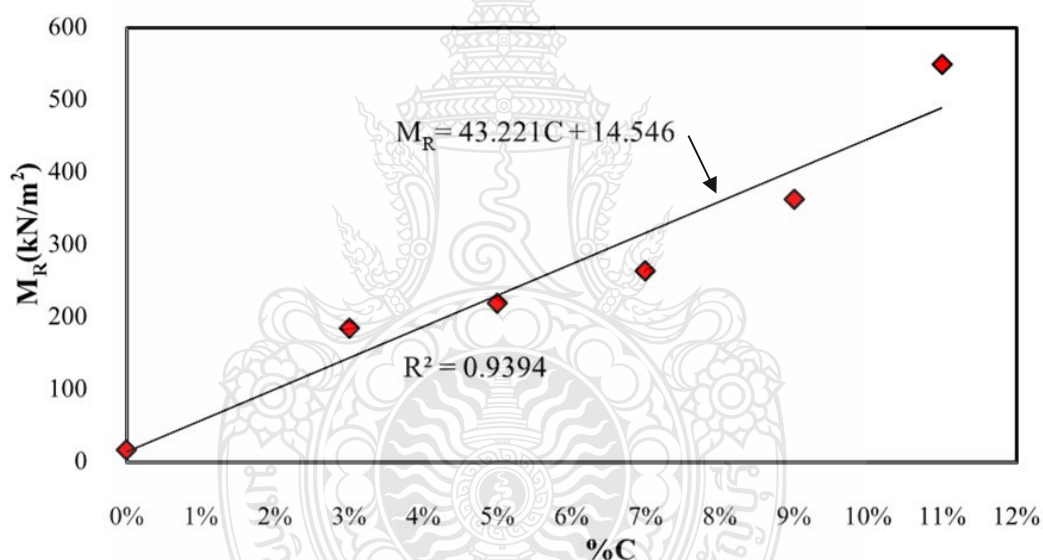
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q<sub>u</sub> และค่า % Cement( C ) ของดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

#### 4.3.2.2 ค่ากำลังแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัดของดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_u$  และค่า % Cement (C) พบว่าค่ากำลังแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัดของดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่สูงขึ้นตามลำดับที่อายุการบ่มที่ 28 วัน สำหรับเส้นความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.8 มีค่าความเชื่อมั่น  $R^2 = 0.9329$  และได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $q_u = 38.113C - 3.5052$

#### 4.3.2.3 ค่ากำลังรับแรงคัดของดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

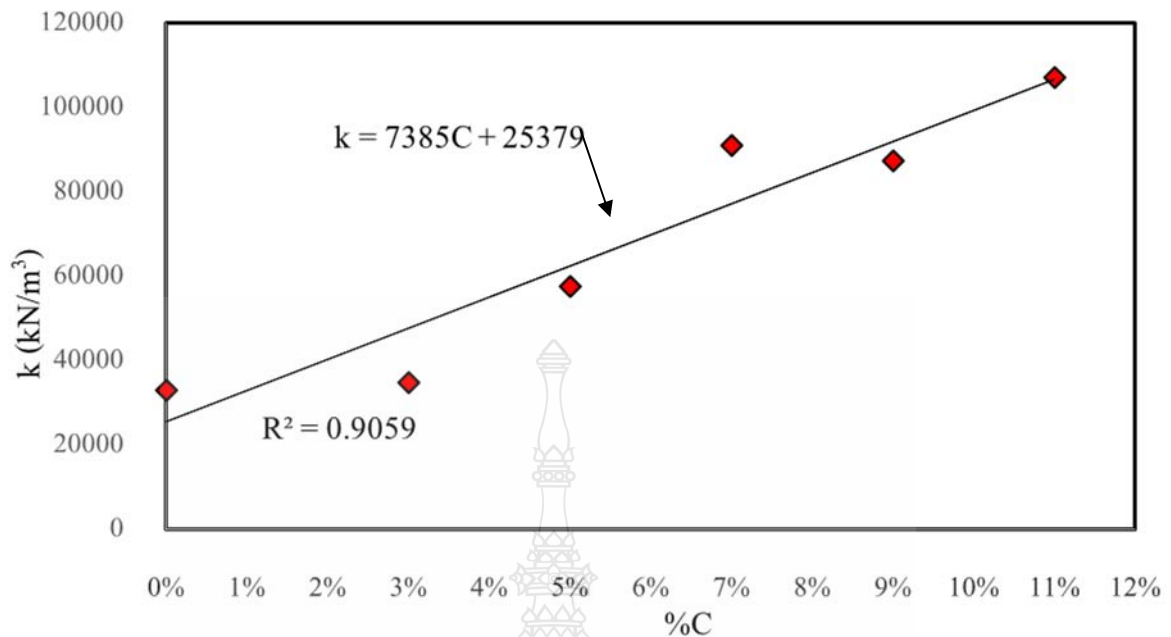
วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Rupture และค่า %Cement (C) พบลักษณะการพัฒนากำลังคัดของดินทรายผสมซีเมนต์จะแปรผันตามปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งมีค่าความเชื่อมั่น  $R^2 = 0.9394$  และได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $M_R = 43.221C - 14.546$  ซึ่งค่า  $M_R$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า % Cement (C) ตามอายุการบ่มที่ 28 วัน



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $M_R$  และค่า %Cement (C) ของดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

#### 4.3.2.4 ค่ากำลังรับแรงเบกทานของดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเบกทานกับค่าการทรุดตัว จะได้ค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) ตามค่า %Cement (C) โดยมีค่า k อยู่ในช่วง 33098 ถึง 107163 kN/m<sup>3</sup> ที่อายุการบ่มที่ 28 วัน สำหรับค่าของ Modulus of Subgrade Reaction (k) ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบจะอยู่ในช่วง 13565 ถึง 225179 kN/m<sup>3</sup> ดังเส้นความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $k = 7385C + 25379$  และมีค่าความเชื่อมั่น  $R^2 = 0.9059$



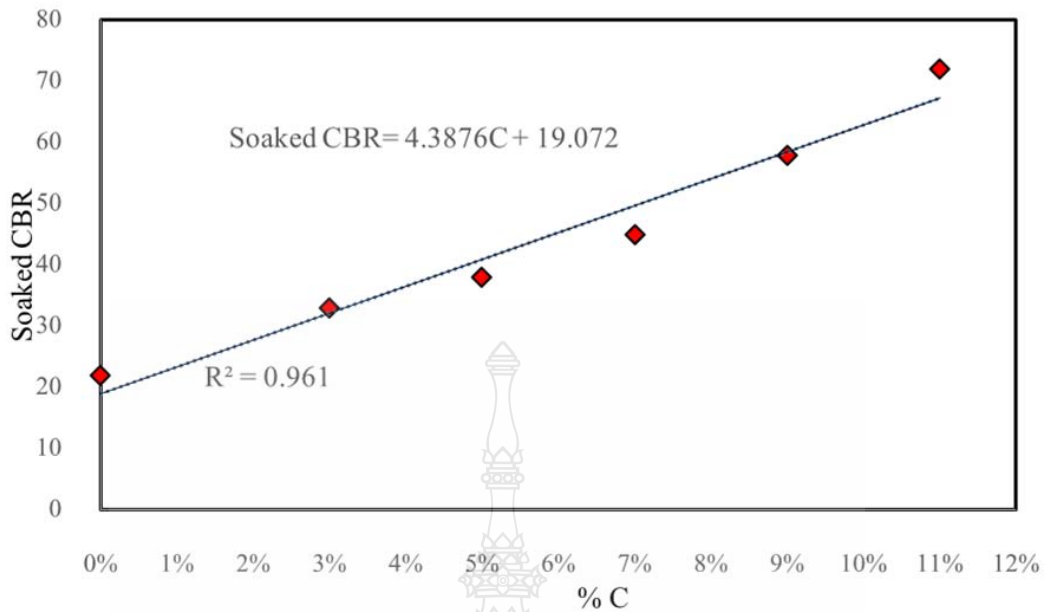
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) และค่า %Cement (C) ของทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

#### 4.3.3 ผลทดสอบของดินเหนียวสมุทรสาครผสมซีเมนต์

##### 4.3.3.1 ค่าแคลิฟอร์เนียเบริงเรโซแนนซ์แบบแช่น้ำของดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาครผสมซีเมนต์

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า California Bearing Ratio แบบแช่น้ำ (Soaked CBR) และค่า %Cement (C) พบว่าค่า Soaked CBR มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 25% ถึง 75% ซึ่งตามมาตรฐานชั้นดินบดอัดสำหรับชั้นรองพื้นทางต้องมีค่า CBR ไม่ต่ำกว่า 25% และชั้นพื้นทางไม่ต่ำกว่า 80% ดังนั้นจึงพบว่าดินเหนียวสมุทรสาครผสมซีเมนต์สามารถที่จะนำมาเป็นชั้นรองพื้นทางได้ แต่ไม่เหมาะจะนำมาเป็นชั้นพื้นทาง ทั้งนี้เส้นความสัมพันธ์ระหว่าง Soaked CBR กับ % Cement (C) ได้แสดงในรูปที่ 4.11 โดยมีค่าความเชื่อมั่น  $R^2 = 0.961$  และได้สมการแสดงความสัมพันธ์ Soaked CBR =  $4.8357C + 19.072$  ในการบ่มที่อายุ 28 วัน

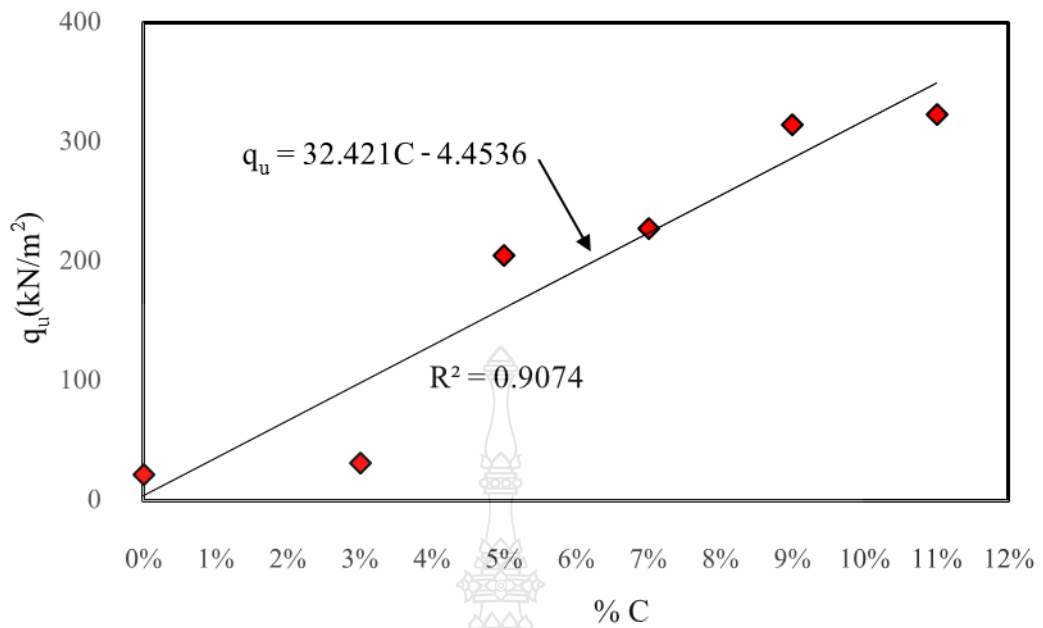




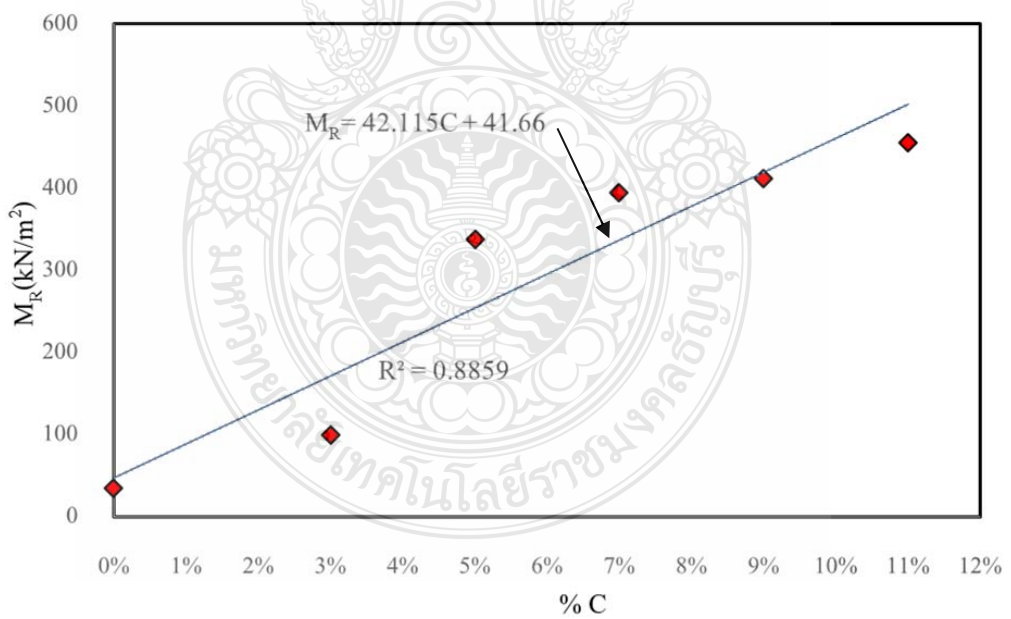
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR และค่า %Cement ( C) ของดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาครผสมซีเมนต์

#### 4.3.3.2 ค่ากำลังแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัดของดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาครผสมซีเมนต์

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_u$  และค่า %Cement ( C) พบว่าค่า  $q_u$  มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 12 ถึง 323 kN/m<sup>2</sup> และแปรผันตรงกับปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ที่การบ่มที่อายุ 28 วัน แสดงว่าดินเหนียวสมุทรสาครผสมซีเมนต์สามารถพัฒนากำลังอัดได้ โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ การบดอัด และการบ่ม ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินจะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน (Horpibulsuk et al. 2003) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 มีค่าความเชื่อมั่น  $R^2 = 0.9074$  และได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $q_u = 32.421C - 4.4536$



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_u$  และค่า %Cement ( C ) ของดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาครผสมซีเมนต์



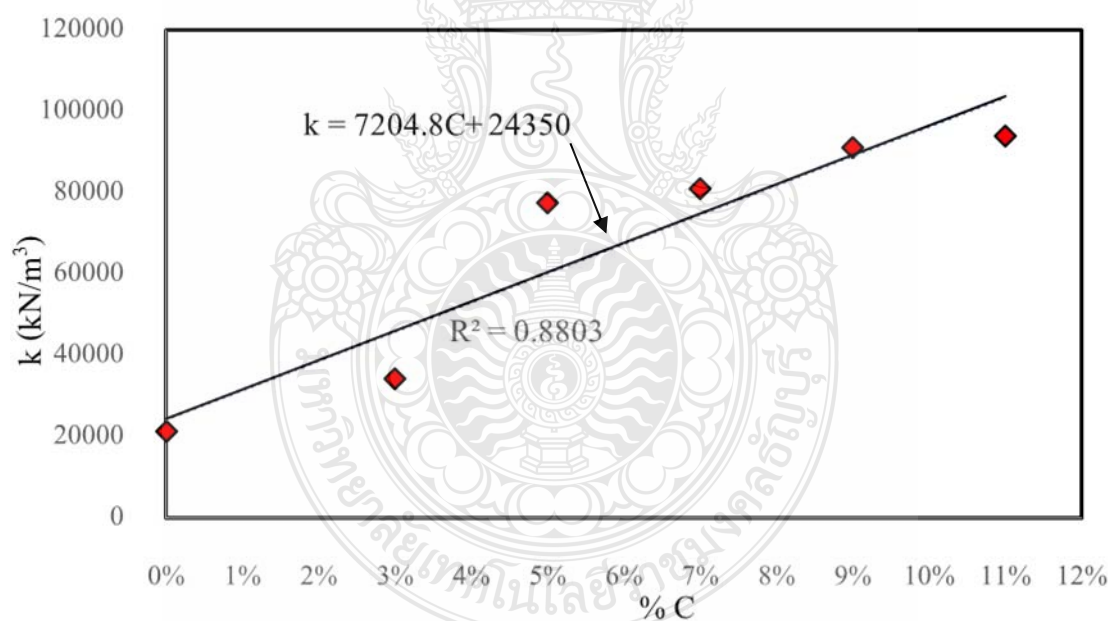
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $M_R$  และค่า %Cement ของดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาครผสมซีเมนต์

#### 4.3.3.3 ค่ากำลังรับแรงค้ำของดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาครผสมซีเมนต์

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Rupture และค่า %Cement (C) พบว่าเส้นความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ทั้งนี้ การพัฒนาการรับกำลังค้ำของดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาครผสมซีเมนต์ มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงว่าเมื่อค่า Soaked CBR และ  $q_u$  เพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่า  $M_R$  ก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยมีค่า Modulus of Rupture ( $M_R$ ) อยู่ในช่วง 35 ถึง 455  $\text{kN/m}^2$  มีความเชื่อมั่น  $R^2 = 0.8859$  และได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $M_R = 42.115C - 41.66$

#### 4.3.3.4 ค่ากำลังรับแรงเบกทานของดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาครผสมซีเมนต์

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเบกทานกับค่าการทรุดตัว จะได้ค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) เพิ่มขึ้น ตามค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 21161 ถึง 93870  $\text{kN/m}^2$  แสดงว่า ค่า k แปรผันตามค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ และได้เส้นความสัมพันธ์  $k = 7204.8C + 24350$  และมีความเชื่อมั่น  $R^2 = 0.8803$  ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) และค่า %Cement ของดินเหนียวสมุทรสาครผสมซีเมนต์

#### 4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลการทดสอบ

##### 4.4.1 ความสัมพันธ์ของค่า Soaked CBR และค่า $q_u$ ของดินผสมซีเมนต์

###### 4.4.1.1 กรณีดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

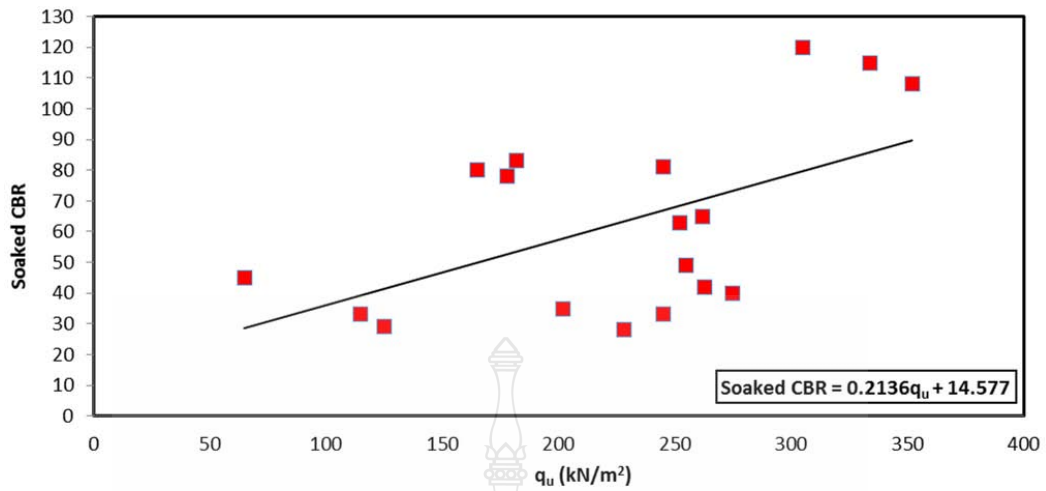
เมื่อนำผลทดสอบของค่า Soaked CBR กับค่า  $q_u$  มาหาความสัมพันธ์พบว่าค่า Soaked CBR เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $q_u$  มากขึ้น แสดงว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการรับกำลังของดินซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นที่การบ่มอายุ 28 วัน โดยมีค่า Soaked CBR อยู่ในช่วง 37.67% ถึง 123.13% และค่า  $q_u$  อยู่ในช่วง  $112 \text{ kN/m}^2 - 334 \text{ kN/m}^2$  และเส้นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับค่า  $q_u$  ดังแสดงในรูปที่ 4.15 มีสมการแสดงความสัมพันธ์  $\text{Soaked CBR} = 0.2136q_u + 14.577$  ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมระหว่างดินกับซีเมนต์โดยมีเส้นแนวโน้มของการที่สูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์

###### 4.4.1.2 กรณีดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

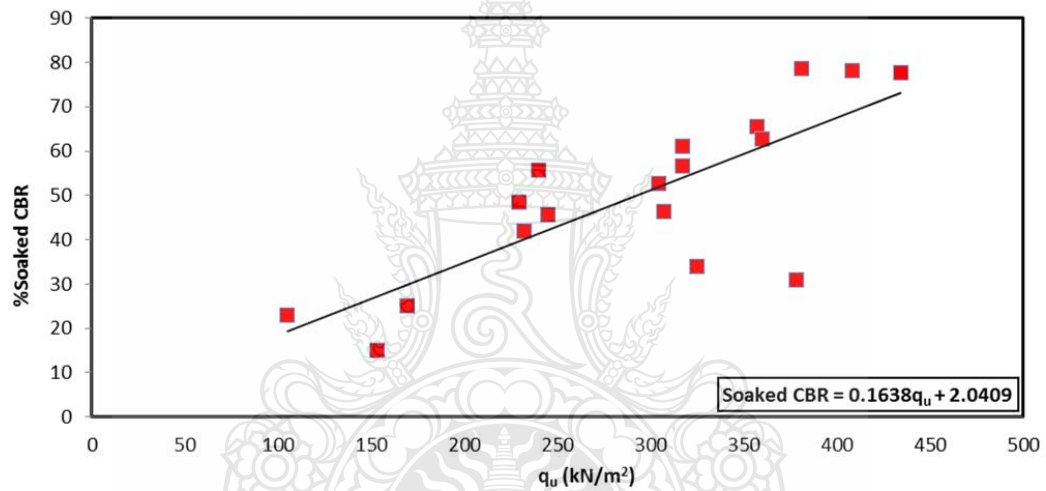
เมื่อนำผลทดสอบของค่า %CBR กับค่า  $q_u$  มาหาความสัมพันธ์พบว่าค่า Soaked CBR เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $q_u$  มากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ Soaked CBR กับค่า  $q_u$  พบว่าค่า Soaked CBR อยู่ในช่วง 22% ถึง 78% และค่า  $q_u$  อยู่ในช่วง  $25 \text{ kN/m}^2 - 375 \text{ kN/m}^2$  โดยมีการกระจายตัวของค่าในกราฟ  $q_u = 200 \text{ kN/m}^2$  ถึง  $q_u = 300 \text{ kN/m}^2$  ทำให้ค่าของ Soaked CBR ขาดไปในช่วง 40%-50% แสดงถึงผลกระทบของปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่ทำให้กำลังอัดดีขึ้นในช่วงส่วนผสมซีเมนต์ 7%-11% โดยมีเส้นแนวโน้มของการที่สูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์เช่นเดียวกับดินลูกรัง ดังแสดงในรูปที่ 4.16 มีสมการแสดงความสัมพันธ์  $\text{Soaked CBR} = 0.1638q_u + 2.0409$

###### 4.4.1.3 กรณีดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาครผสมซีเมนต์

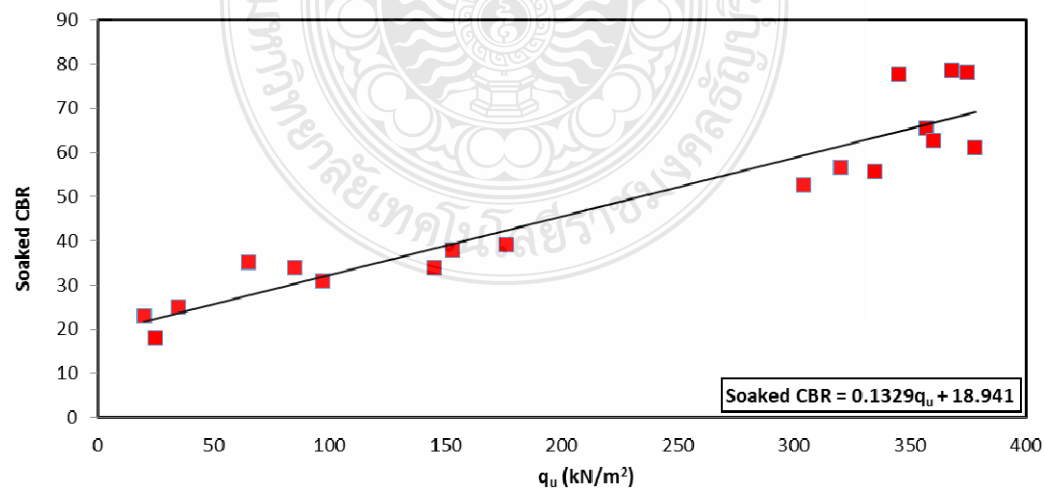
เมื่อนำผลทดสอบของค่า % Soaked CBR กับค่า  $q_u$  มาหาความสัมพันธ์พบว่าค่า Soaked CBR เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $q_u$  มากขึ้น มีค่า Soaked CBR อยู่ในช่วง 12% ถึง 75 % ส่วน ค่า  $q_u$  มีค่าสูงถึง  $375 \text{ kN/m}^2$  ซึ่งแสดงว่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์มีผลต่อกำลังที่เพิ่มเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาการบ่มที่ 28 วัน ทำให้ช่องว่างในมวลดินในส่วนผสมลดลง เป็นผลให้ได้ความสัมพันธ์ของการรับกำลังที่เพิ่มขึ้น โดยมีเส้นแนวโน้มของการที่สูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ในขณะที่ความชันของเส้นแนวโน้มลดลง แสดงว่า การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ที่สูงขึ้นทำให้ค่า  $q_u$  สูงขึ้นในช่วงหนึ่งในขณะที่ค่า Soaked CBR อาจเริ่มมีค่าลดลงดังสมการแสดงความสัมพันธ์  $\text{Soaked CBR} = 0.13291q_u + 18.941$  ซึ่งมีค่าความสัมพันธ์ของสมการที่แสดงค่าน้อยกว่าสมการของซีเมนต์ผสมลูกรังและซีเมนต์ผสมทราย แสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ค่า Soaked CBR กับ  $q_u$  ของดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ค่า Soaked CBR กับ  $q_u$  ดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ค่า Soaked CBR กับ  $q_u$  ดินเหนียวสมุทรสาครผสมซีเมนต์

#### 4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $M_R$ และค่า $q_u$ ของดินผสมซีเมนต์

##### 4.4.2.1 กรณีดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

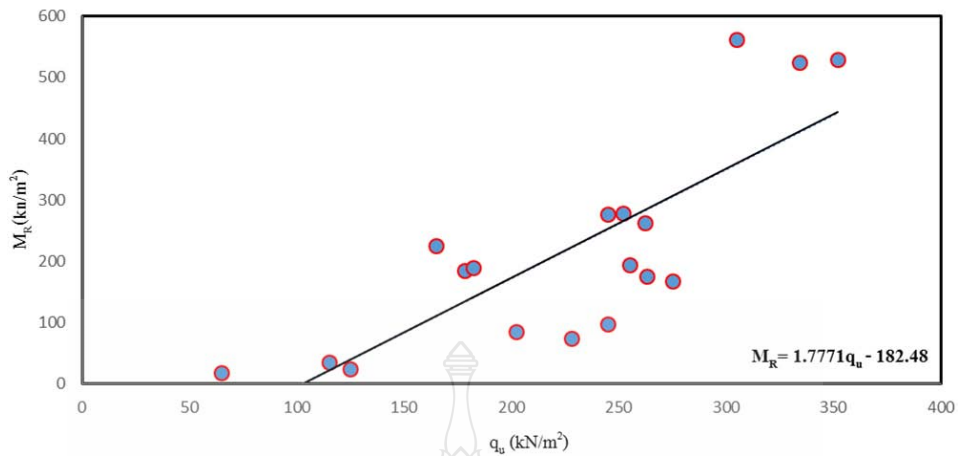
เมื่อนำค่าผลทดสอบของ  $M_R$  มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ กับค่า  $q_u$  พบว่าจากการที่ค่า  $M_R$  มีค่าเพิ่มขึ้น โดยดินลูกรังที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ สามารถรับแรงตัดได้มากขึ้นตามค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ผสมที่เพิ่มขึ้น และค่า  $q_u$  ก็มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามค่าปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $M_R$  กับค่า  $q_u$  จึงมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยพบว่าเส้นความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ได้สมการแสดงความสัมพันธ์มีค่า  $M_R = 1.777q_u - 182.48$  ซึ่งสมการมีความชันที่มีแนวโน้มในการพัฒนาการค่า  $M_R$  ได้เพิ่มขึ้นอีกในกรณีที่มีอัตราส่วนผสมซีเมนต์สูงเกินกว่า 11 เปอร์เซ็นต์

##### 4.4.2.2 กรณีดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

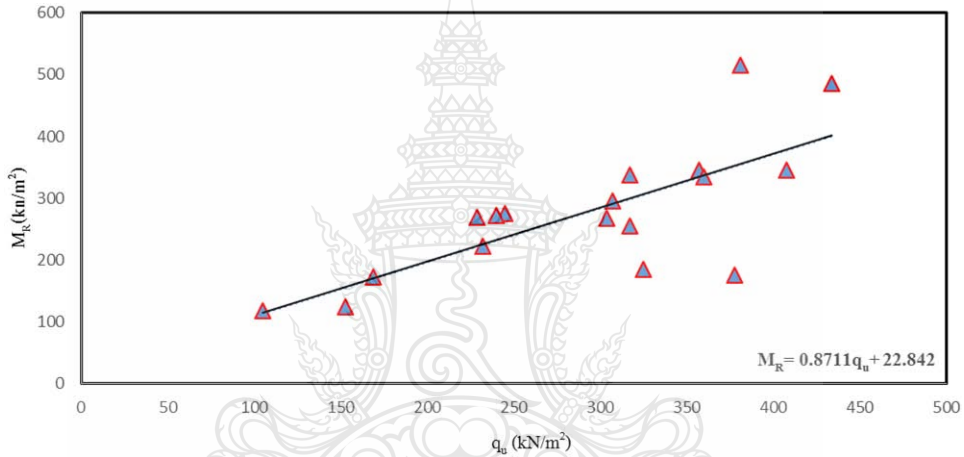
เมื่อนำผลทดสอบค่า  $M_R$  มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ กับค่า  $q_u$  พบว่าจากการที่ค่า  $M_R$  มีค่าเพิ่มขึ้นโดยดินทรายที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ สามารถรับแรงตัดได้มากขึ้นตามค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ผสมที่เพิ่มขึ้น และค่า  $q_u$  ก็มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามค่าปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน ความสัมพันธ์พบว่าค่า  $q_u$  เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $M_R$  มากขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $M_R$  กับค่า  $q_u$  พบว่าเส้นความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $M_R = 0.87114q_u + 22.842$  ซึ่งสมการมีความชันที่มีแนวโน้มน้อยกว่าดินลูกรังผสมซีเมนต์เล็กน้อย

##### 4.4.2.3 กรณีดินเหนียวสมุทรสาครผสมซีเมนต์

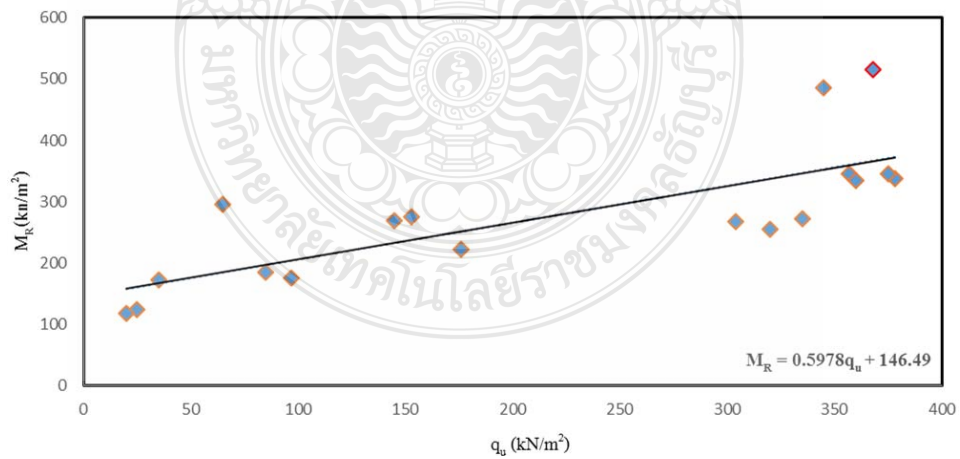
เมื่อนำผลทดสอบค่า  $M_R$  ที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ สามารถรับแรงตัดได้มากขึ้นตามค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ผสมที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับดินลูกรังและดินทราย และค่า  $q_u$  ก็มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามค่าปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน ค่า  $q_u$  มาหาความสัมพันธ์กับค่า  $M_R$  พบว่ากราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $q_u$  มากขึ้น มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $M_R$  กับค่า  $q_u$  พบว่าเส้นความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $M_R = 0.5978q_u + 146.49$  ทั้งนี้ค่าความชันของกราฟมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่า สำหรับดินเหนียว เมื่อเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมซีเมนต์สูงขึ้นค่า  $M_R$  อาจเพิ่มขึ้นอย่างไม่มากนักดังสมการความชันของเส้นแนวโน้มที่มีค่าน้อยกว่าสมการของดินทรายผสมซีเมนต์ แลดินลูกรังผสมซีเมนต์



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ค่า  $M_R$  กับ  $q_u$  ของคานาเหล็กเสริมด้วยเหล็กเสริมคอนกรีต



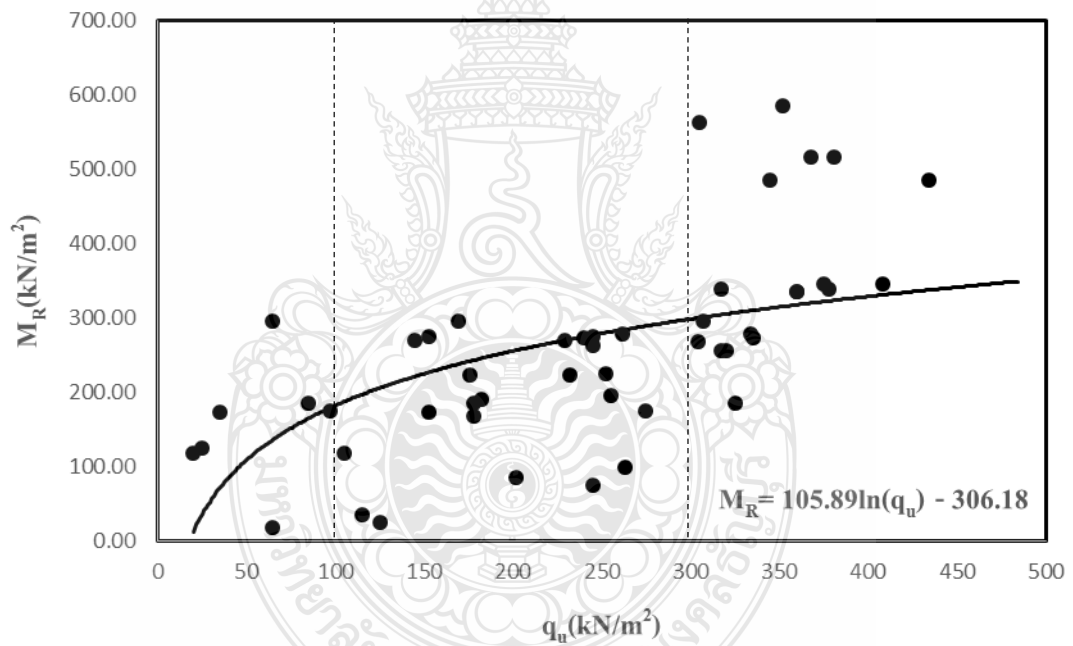
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ค่า  $M_R$  กับ  $q_u$  ของคานาทรงกลมเสริมด้วยเหล็กเสริมคอนกรีต



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ค่า  $M_R$  กับ  $q_u$  ของคานาเหล็กเสริมด้วยเหล็กเสริมคอนกรีต

#### 4.4.2.4 กรณีรวมความสัมพันธ์ระหว่าง $M_R$ และค่า $q_u$ ของดินผสมซีเมนต์

เมื่อนำค่า  $M_R$  และค่า  $q_u$  ของดินผสมซีเมนต์ในทุกระดับดินที่ได้มาเขียนกราฟแนวโน้มของความสัมพันธ์ ระหว่างค่า  $M_R$  กับค่า  $q_u$  พบว่าจากการที่ค่า  $q_u$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น ลักษณะแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของ  $M_R$  มีค่าเป็นความสัมพันธ์แบบสมการ log โดยเมื่อค่า  $q_u$  เพิ่มขึ้นในช่วงแรกค่า  $M_R$  ก็จะมีค่าสูงขึ้นในลักษณะเป็นสัดส่วนต่อกัน โดยเมื่อค่า  $q_u$  ถึงเพิ่มขึ้นถึงช่วง 100 kN/m<sup>2</sup> ความชันของกราฟจะมีค่าลดลงนั่นคือค่า  $M_R$  จะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามสมการ  $M_R = 105.89 \ln(q_u) - 306.18$  จึงพบว่าหากดินถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์โดยการเพิ่มปริมาณซีเมนต์มากขึ้นถึงแม้ว่าค่า  $q_u$  จะสามารถพัฒนาให้รับแรงได้เพิ่มมากขึ้นได้ แต่การรับแรงรับแรงตัดอาจไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนต่อกันตามค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ผสมที่เพิ่มขึ้น โดยอาจแบ่งช่วงความสัมพันธ์ออกเป็น 3 ช่วงตามแนวโน้มค่าความชันของกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ค่า  $M_R$  กับ  $q_u$  ของดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดที่ผสมซีเมนต์



#### 4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $q_u$ และค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) ของดินผสมซีเมนต์

##### 4.4.4.1 กรณีดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

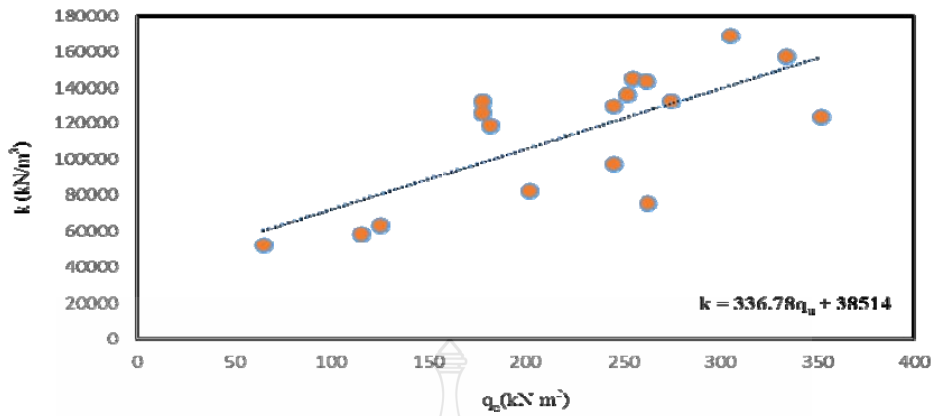
เมื่อนำผลทดสอบค่า  $q_u$  และค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์พบว่าค่า  $q_u$  เพิ่มเป็นสัดส่วนกับค่า k โดยเมื่อการมีการรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถรับแรงเฉือนได้มากขึ้นทั้งนี้จากผลการทดสอบ Soaked CBR ค่าการรับแรงเฉือนแปรผันตรงกับค่าการรับกำลังอัด เมื่อเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้ดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ มีค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น หลังจากการบดอัด และการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน ส่งผลให้เมื่อทำการทดสอบการรับกำลังแบกทานจึงมีค่าทรุดตัวน้อยลง และนำผลทดสอบมาหาค่า Modulus of subgrade reaction (k) เป็นผลให้ค่า k สูงขึ้น อยู่ระหว่าง  $58,570 \text{ kN/m}^3 - 168,000 \text{ kN/m}^3$  (215 pci-455 ซึ่งพบว่าเส้นความสัมพันธ์  $k = 336.78q_u + 38514$  ดังแสดงในรูปที่ 4.22

##### 4.4.4.2 กรณีดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

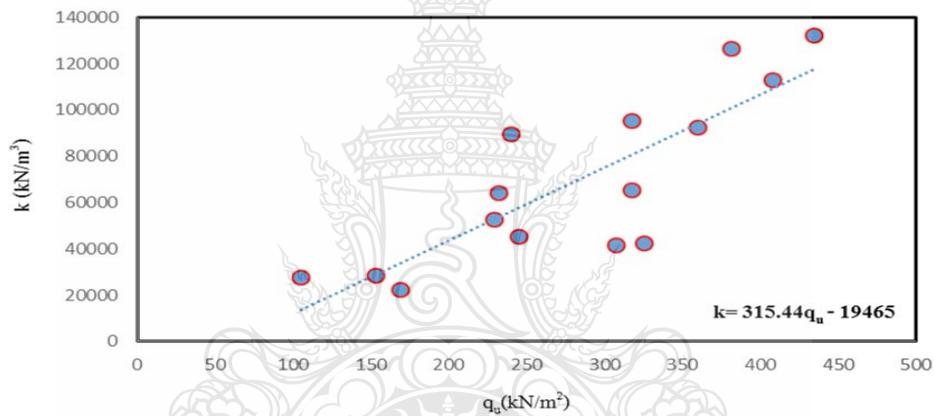
เมื่อนำผลทดสอบค่า  $q_u$  และค่า k มาเขียนกราฟความสัมพันธ์พบว่าค่า  $q_u$  เพิ่มเป็นสัดส่วนกับค่า k โดยเมื่อการมีการรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถรับแรงเฉือนได้มากขึ้นทั้งนี้จากผลการทดสอบ Soaked CBR ค่าการรับแรงเฉือนแปรผันตรงกับค่าการรับกำลังอัดเมื่อเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้มีค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการทรุดตัวที่น้อยลง เช่นเดียวกับกรณีดินลูกรังทำให้สามารถคำนวณค่า k ได้สูงขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง  $20,000 \text{ kN/m}^3 - 135,000 \text{ kN/m}^3$  ทำให้สามารถใช้ออกแบบชั้นรองพื้นทางได้ โดยพบว่ามีสมการเส้นความสัมพันธ์ของค่า k ได้  $k = 315.44q_u + 19465$  ดังแสดงในรูปที่ 4.23

##### 4.4.4.3 กรณีดินเหนียว สมุทรสาครผสมซีเมนต์

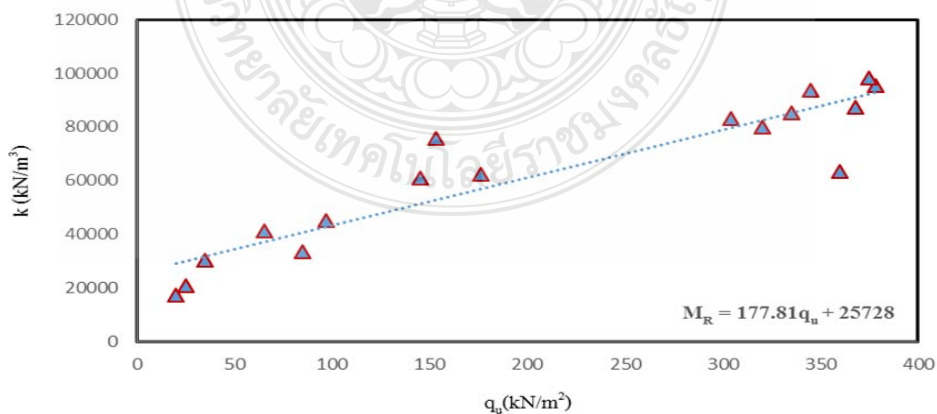
เมื่อนำผลทดสอบค่า  $q_u$  และค่า k มาเขียนกราฟความสัมพันธ์พบว่าค่า  $q_u$  เพิ่มเป็นสัดส่วนกับค่า k โดยเมื่อการมีการรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ ก็สามารถรับแรงเฉือนได้มากขึ้น ทั้งนี้จากผลการทดสอบ Soaked CBR ค่าการรับแรงเฉือนแปรผันตรงกับค่าการรับกำลังอัดเมื่อเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้มีค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นอยู่ระหว่าง  $18,000 \text{ kN/m}^3 - 105,000 \text{ kN/m}^3$  แต่สำหรับดินเหนียวนั้น ค่า  $q_u$  ที่ได้เพิ่มขึ้นนั้นยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางเท่านั้น และเมื่อนำผลทดสอบค่า  $q_u$  และค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) มาหาความสัมพันธ์พบว่าค่า  $q_u$  เพิ่มเป็นสัดส่วนกับค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) โดยมีสมการเส้นความสัมพันธ์  $k = 177.81q_u + 25728$  ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_u$  และค่า Modulus of Subgrade Reaction ( $k$ ) ของดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์



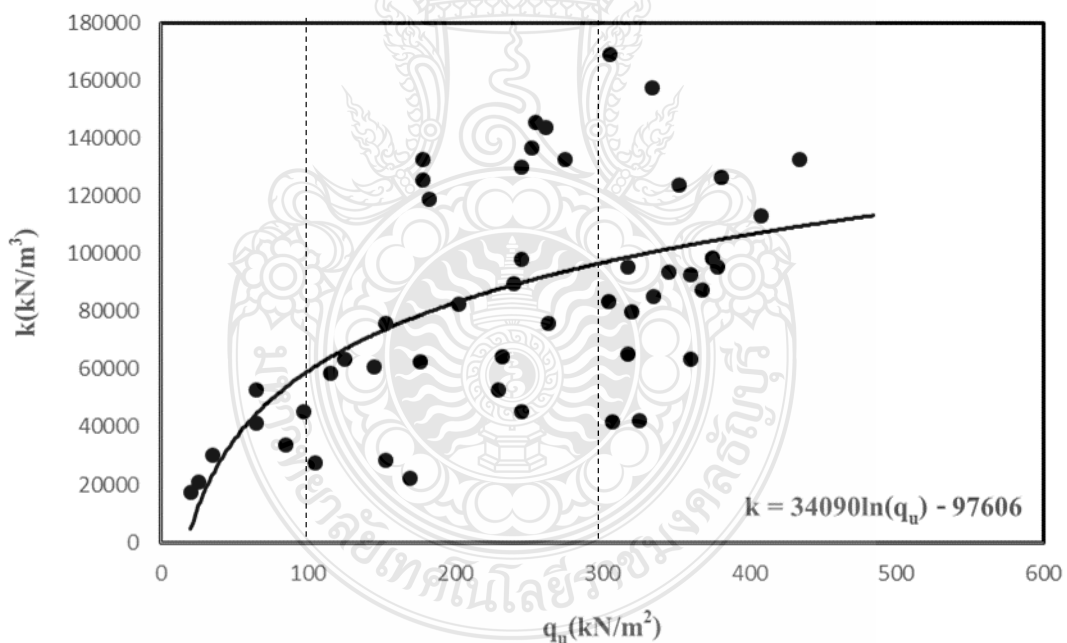
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_u$  และค่า Modulus of Subgrade Reaction ( $k$ ) ของดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_u$  และค่า Modulus of Subgrade Reaction ( $k$ ) ของดินเหนียวสมุทรสาครผสมซีเมนต์

#### 4.4.2.4 กรณีรวมความสัมพันธ์ระหว่าง $M_R$ และค่า $q_u$ ของดินผสมซีเมนต์

เมื่อนำค่า  $k$  และค่า  $q_u$  ของดินผสมซีเมนต์ในทุกชนิดดินที่ได้มาเขียนกราฟแนวโน้มของความสัมพันธ์ ระหว่างค่า  $k$  กับค่า  $q_u$  พบว่าจากการที่ค่า  $q_u$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น ลักษณะแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของ  $k$  มีค่าเป็นความสัมพันธ์แบบสมการ  $\log$  เช่นเดียวกับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า  $M_R$  โดยเมื่อค่า  $q_u$  เพิ่มขึ้นในช่วงแรกค่า  $k$  ก็จะมีค่าสูงขึ้นในลักษณะเป็นสัดส่วนต่อกัน โดยเมื่อค่า  $q_u$  ถึงเพิ่มขึ้นถึงช่วง  $100 \text{ kN/m}^2$  ความชันของกราฟจะมีค่าลดลงนั่นคือค่า  $k$  จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามสมการ  $k=34090\ln(q_u)-97606$  จึงพบว่าหากดินถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์โดยการเพิ่มปริมาณซีเมนต์มากขึ้นถึงแม้ว่าค่า  $q_u$  จะสามารถพัฒนาให้รับแรงได้เพิ่มมากขึ้นได้ แต่ค่า  $k$  อาจเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นสัดส่วนต่อกันทั้งนี้ การรับแรงรับแรงดัดก็อาจไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนต่อกันตามค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ผสมที่เพิ่มขึ้นเช่นกันนั่นคือถ้าอัตราส่วนผสมซีเมนต์มีสูงดินซีเมนต์ก็จะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุซีเมนต์นั่นเอง โดยอาจแบ่งช่วงความสัมพันธ์ออกเป็น 3 ช่วงตามแนวโน้มค่าความชันของกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ค่า  $k$  กับ  $q_u$  ของดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดที่ผสมซีเมนต์

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

##### 5.1.1 กรณีดินลูกรังราชบุรีผสมซีเมนต์

จากผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าดินลูกรังราชบุรี มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  73.93% และมีปริมาณ Al 19.06% ซึ่ง  $\text{SiO}_2$  และ Al เป็นธาตุที่มีความสำคัญในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ในดินซีเมนต์ ส่วนความสัมพันธ์ของค่า UCS, CBR,  $M_R$  และค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) ของวัสดุตัวอย่างที่นำมาหาความสัมพันธ์ทำให้เห็นได้ว่า แนวโน้มของค่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มการขึ้น โดยหลังจากดินถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์แล้ว ค่า UCS สูงขึ้น ค่า CBR,  $M_R$ , Modulus of Subgrade Reaction (k) ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อตัวอย่างดินลูกรังถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์แล้ว ทำให้ค่าการรับกำลังอัดมีค่าสูงขึ้น ตัวอย่างดินลูกรังที่ศึกษาจึงสามารถนำไปใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง และยังสามารถใช้เป็นชั้นพื้นได้อีกด้วยทั้งนี้ค่า k ที่ทดสอบได้ อยู่ในช่วงของการออกแบบตามมาตรฐาน โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_u$  และค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) ของดินลูกรัง มีค่า  $k = 336.78q_u + 38514$

##### 5.1.2 กรณีดินทรายนครปฐมผสมซีเมนต์

ดินทรายมีลักษณะเป็นเม็ดทรายปนตะกอนดินเหนียวดิน มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  75.63% และมีปริมาณ Al 10.56 ซึ่งดินสามารถจะเกิดปฏิกิริยา Hydration กับซีเมนต์ได้เมื่อนำดินมาปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ความสัมพันธ์ของค่า UCS, CBR,  $M_R$  และค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) ของวัสดุตัวอย่างที่นำมาศึกษาก็มีแนวโน้มสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยมีลักษณะเป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับปริมาณซีเมนต์ ค่า UCS สูงขึ้น ค่า CBR,  $M_R$ , Modulus of Subgrade Reaction (k) ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นเดียวกับดินลูกรังราชบุรี

ทั้งนี้ เมื่อตัวอย่างดินทรายที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์แล้ว ทำให้ค่าการรับกำลังอัดมีค่าสูงขึ้น ตัวอย่างดินทรายที่ศึกษาจึงสามารถนำไปใช้เป็นชั้นรองพื้นทางได้แต่อาจไม่เหมาะสมเป็นชั้นพื้นทาง โดยค่า  $q_u$  และค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) อาจมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ แต่เนื่องจากค่า Soaked CBR มีค่าไม่ถึง 80 ตามมาตรฐาน

### 5.1.3 ผลการทดสอบของดินเหนียวจังหวัดสมุทรสาคร

ดินเหนียวสมุทรสาคร มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  63.28% และมีปริมาณ Al 19.13% ซึ่ง  $\text{SiO}_2$  และ Al เป็นธาตุที่มีความสำคัญในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ในดินซีเมนต์ และดินเหนียวสามารถใช้เป็นชั้นรองพื้นทางได้แต่ไม่เหมาะสมจะใช้เป็นชั้นพื้นทาง โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_u$  และค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) ของดินเหนียวสมุทรสาครมีค่า  $k = 177.81q_u + 25728$

ทั้งนี้ เช่นเดียวกับดินทรายเมื่อตัวอย่างดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์แล้ว ทำให้ค่าการรับกำลังอัดมีค่าสูงขึ้น โดยค่า  $q_u$  และค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) อาจมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากค่า Soaked CBR มีค่าไม่ถึง 80 ตามมาตรฐาน เช่นเดียวกับกรณีดินทราย

ในการนำไปใช้ ผู้ออกแบบต้องเลือกความเหมาะสมของปริมาณซีเมนต์ให้ตรงกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานของดินแต่ละชนิด ทั้งนี้ควรตรวจสอบค่าคุณสมบัติอื่นของสภาพดินที่จะใช้ในพื้นที่เพิ่มเติมด้วย ซึ่งในการออกแบบส่วนผสมและบดอัดในสนามยังมีผลกระทบเนื่องจากขนาดผลของตัวอย่างและวิธีการบ่มเป็นตัวแปรอีก จึงควรศึกษาเทียบเคียงกับการทดสอบในสนามด้วยการทดสอบ Dutch cone Penetration Test (DPT) เพื่อหาความสัมพันธ์ของผลที่ได้จากห้องทดลองกับผลทดสอบในสนาม ให้ได้การสัดส่วนของเปอร์เซ็นต์ผสมซีเมนต์ที่แม่นยำขึ้น เกิดประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ อีกทั้งสามารถลดเวลาการทำงาน และลองสู่มในการออกแบบ ให้รวดเร็วยิ่งขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาทดสอบเปรียบเทียบการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบในสนาม ของดินทั้งสามชนิดที่ผสมซีเมนต์ เพื่อหาค่าสัมพันธ์ของค่าการรับกำลังที่ได้ โดยเปรียบเทียบระหว่าง ค่าทดสอบในห้องปฏิบัติการกับค่าที่ได้จากการผสมจริงในสนาม โดยการหาความสัมพันธ์ของค่า Modulus of Subgrade Reaction (k) กับ ค่า UCS เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบและคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมซีเมนต์บดอัดในสนาม เพื่อลดเวลาในการทำงานสนามและลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบในสนาม ซึ่งเป็นแนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบในเบื้องต้นเท่านั้น ดังนั้นจึงควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติม ได้แก่

5.2.1 นำข้อมูลไปใช้งานจริงในภาคสนาม แล้วนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการหลายๆครั้ง เพื่อหาค่าเปรียบเทียบปรับแก้เพื่อให้ได้ค่าที่สอดคล้องกับค่าที่ทำการผสมและบดอัดได้จริงในสนาม

5.2.2 ควรจะมีการเพิ่มจำนวนตัวอย่างการทดสอบให้มีปริมาณมากขึ้น เพื่อให้การศึกษาวิเคราะห์ผลของข้อมูล มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น

5.2.3 ควรจะศึกษาคุณสมบัติของดินชนิดอื่นๆ ในแต่ละแหล่งวัสดุ หรือในพื้นที่ ที่ใช้ผสมกับซีเมนต์ อาจจะต้องมีการศึกษาถึงสารที่นำมาทำการปรับแก้คุณภาพดินเสียก่อนที่จะนำมาปรับปรุงคุณภาพ เพื่อหาคุณสมบัติต่างๆของดิน และคุณสมบัติเมื่อผสมซีเมนต์แล้ว เพื่อให้สามารถใช้งานวัสดุได้ตรงวัตถุประสงค์การใช้งานและออกแบบ



## บรรณานุกรม

- [1] Shen, S. L., Chai, J. C. and Miura, N., "Stress distribution in composite ground of column-slab system under road pavement," in Proc.1<sup>st</sup> Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics, Elsevier Science Ltd, 2001, pp. 485-490.
- [2] Davidson, D. T., "Soil Stabilization with Portland Cement," Highway Research Board, Bulletin 292, 1961, pp. 45-151.
- [3] Mills, W. H., Jr., "Road Base Stabilization with Portland Cement," Engineering News-Record, vol. 115, No. 22, 1935, pp. 751-753.
- [4] Mills, W. H., Jr., "Stabilizing soils with Portland cement," Experiments by South Carolina Highway Department, In Highway Research Board Proceedings, vol.16, 1936, pp. 322-347.
- [5] Terrel, R. J., Barenberg, E. J., Mitchell, J. M. and Thomson, M. R., Soil Stabilization in Pavement Structure, A User's Manual Mixture Design Consideration, vol. 2, Washington D.C.: Government Printing Office, 1979.
- [6] The Siam Cement Company Ltd, "Demonstration Road Using Local Soil with Cement Stabilization," Bangkok: Siam Cement, 1965, pp. 25-26.
- [7] ชีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ สมบัติกระแสน์ จรัสกร, "กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน," รายงานการวิจัยฉบับที่ วพ.188, กรุงเทพฯ, ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรม ทางหลวง, หน้า 160-163, 2544.
- [8] Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization, "Definition of Term Relating to Soil-Portland Cement Stabilization," Highway Research Abstracts, vol. 29, No. 6, 1959, pp. 28-29.
- [9] Lambe, T. W., Michaels, A. S. and Moh, Z. C., "Improvement of Soil Cement with Alkali Metal Compounds," Highway Research Board, Bulletin 241, 1959, pp. 67-103.
- [10] Herzog, A. and Mitchell, J. K., "Reaction Accompanying the Stabilization of Clay with Cement," Highway Research Record, vol. 36, 1963, pp. 146-171.
- [11] Moh, Z. C., "Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals," Highway Research Record, vol. 86, 1965, pp. 39-61.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] Hausmann, M.R., "Engineering Principles of Ground Modification," McGraw-Hill Publ, Co, Sydney, 1990, p. 632.
- [13] Pendola, H. J., Kennady, T. W. and Hutson, W. R., "Evaluation of Factors Affecting the Tensile Properties of Cement-Treated Materials," University of Texas at Austin Research Report, vol. 98, No. 3, 1969.
- [14] Czernin, W., "Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers," New York Chemical Publishing, 1962, pp. 36-50.
- [15] Mitchell, J. K. and El Jack, S. A., "The fabric of soil-cement and its formation," In Proceedings of 14<sup>th</sup> National Conference Clay and Clay Minerals, vol. 26, 1966, pp. 297-305.
- [16] Felt, E. J., "Factors Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures," Highway Research Board, Bulletin 108, 1955, pp. 138-163.
- [17] Terashi, M., Tanaka, H. and Okumura, T., "Engineering Properties of lime treated marine soils and DMM," in Proceedings of 6<sup>th</sup> Asian Regional Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, 1979, pp. 191-194.
- [18] Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y., "Deep mixing method using cement hardening agent," in Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 1981, pp. 721-724.
- [19] Nontananandh, S., Yupakorn, A. and Jirathanathaworn, T., "Influence of Delay Compaction on Strength of Lateritic Soil Cement" in Proceedings of the 8th National Convention on Civil Engineering (NCCE), Khon Kean, p. 6, 23-25 October 2002.
- [20] Ruenkraitersa, T., "Principle of Soil Stabilization," Group Training in Road Construction, Bangkok, 1982, pp. 17-26.
- [21] Ruenkraitersa, T., "Principle of Soil Stabilization," Highways Department, Bangkok, 1982, pp. 17-27.
- [22] Lade, P.V. and Overton, D.D., "Cementation Effects in Frictional Material," Journal of Geotechnical Engineering, vol. 115, No. 9, pp. 1373-1387, 1989.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] Clare, K. E. and Pollard, A. E., "The Relationship between Compressive Strength and Age for Soil Stabilized with Four Type of Cement," Magazine of Concrete Research, vol. 3, No.8, pp. 57-64, 1951.
- [24] Massachusetts Institute of Technology, "Soil Stabilization for Highways," Massachusetts Department of Public Works and Joint, Highway Research Project, Massachusetts, vol. 81, 1954.
- [25] Davidson, D. T. and Bruns, B. W., "Comparison of Type I and Type III Portland Cement for Soil Stabilization," Highway Research Board, Bulletin 267, 1960, pp. 28-45.
- [26] Horpibulsuk, S. and Miura, N., "A new approach for studying behavior of cement stabilized clays," in Proceeding of 15<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Turkey, vol. 3, 2001, pp. 1759-1762.
- [27] Miura, N., Horpibulsuk, S. and Nagaraj, T.S., "Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content," Soil and Foundations, vol. 41, No. 5, 2001, pp. 33-45.
- [28] Ng, S. C., "Cement Stabilization of Lateritic Soils," Master of Engineering Thesis. Civil Engineering Program, No. 125, Seato Graduate School of Engineering, 1966, pp. 55-65.
- [29] Reinhold, F., "Elastic Behavior of Soil-Cement Mixtures," Highway Research Board, Bulletin 108, 1955, pp. 128-137.
- [30] Redus, J. F., "Study of Soil-Cement Base Courses on Military Airfields, Highway Research Board, Bulletin 198, 1958, pp. 13-19.
- [31] Spangler, M.G. and Patel, O.H., "Modification of a Gumbotil Soil by Lime and Portland Cement Admixtures," Highway Research Board, Proceed 29, 1949, pp. 561-566.
- [32] Norling, L. T. and Packard, R. G., "Expanded Short-Cut Test Method for Determining Cement Factors for Sandy Soil," Highway Research Board, Bulletin 198, 1958, pp. 20-31.
- [33] Davidson, D. T., Pitre, G. L., Matoes, M. and Kalankamary, P. G., "Moisture-Density, Moisture-strength and Compaction Characteristics of Cement Treated Soil Mixtures," Highway Research Board, Bulletin 353, 1962, pp. 42-63.
- [34] Portland Cement Association, Soil-Cement Laboratory Handbook, Illinois: Skokie, 1959.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [39] Moh, Z. C., Chin, Y. P. and Ng, S. C., "Cement stabilization of lateritic soil," In Proceeding 3<sup>rd</sup> Asian Regional Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1967, pp. 42-46.
- [35] Bell, F. G., "The influence of the mineral content of clay on their stabilization with cement," Association of Engineering Geologists, pp. 267-278, 1976.
- [36] Lightsey, G. R., Arman, A. and Callihan, C. D., "Change in Characteristics of Cement Stabilize Soils By Addition of Excess Compaction Moisture," Highway Research Record, vol. 315, 1970, pp. 36-45.
- [37] Highway Research Board, "Prevention of Moisture Loss in Soil-Cement with Bitumious Material," Highway Research Board, Research Report, 1949, p. 353.
- [38] Maner, A. W., "Curing Soil Cement Base," In Proceeding of Highway Research Board. Washington, DC: National Research Council, vol. 31, 1952, pp. 540-558.
- [39] Leadabrand, J. A., "Some Engineering Aspects of Soils-Cement Mixture," Mid-South Section, ASCE, pp.64-69, 27 April 1956.
- [40] Wang, M. C. and Huston, M. T., "Direct-Tensile Stress and Strain of Cement Stabilize Soil," Highway Research Record, vol. 351, 1972, pp. 19-24.
- [41] Shackle, B. and Lee, R. H. F., "Some Aspect of Curing of Soil-Cement," in The 7<sup>th</sup> Conference of the Australian Road Research Board, vol. 7 No. 7, 1974, pp. 5-17.
- [42] Marshall, T. J., "Some Properties of Soil Treated with Portland Cement," Symposium on Soil Stabilization, Australia, 1954, pp. 28-34.
- [43] Ingles, O.G. and Metcalf, J.B., "Soil Stabilization," Sydney, Butterworths, 1972, pp. 64-69.
- [44] Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. and Koga, H., "Improvement of soft marine clays by deep mixing technique," in Proceeding of 12<sup>th</sup> International Conference offshore and Polar Engineering, Kitakyushu, Japan, 2002, pp. 584-591.
- [45] Fuller, M. G. and Dabney, G. W., "Stabilizing Weak and Defective Bases with Hydrated Lime," in Roads and Streets, vol. 95, 1952, pp. 64-69.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [46] Maclean, D. J., Robinson, P. J. M. and Webb, S. B., "An Investigation of the Stabilization of Heavy Clay Soil with Cement for Road Base Construction," Roads and Road Construction, vol. 3, No. 358, 1952, pp. 287-292.
- [47] Lambe, T. W. and Moh, Z. C., "Improvement of Strength of Soil-Cement with Additives," Highway Research Board, Bulletin 183, 1957, pp. 38-47.
- [48] Davidson, D. T., Katti, R. K. and Welch, D. E., "Use of Fly Ash with Portland Cement for Stabilization of Soil," Highway Research Board, Bulletin 198, 1958, pp. 1-11.
- [49] Pinto, C. D. S., Davidson, D. T. and Leguros, J. G., "Effect of Lime on Cement Stabilization of Monmorillonitic Soils," Highway Research Board, Bulletin 353, 1962, pp. 64-83.
- [50] Wilmot, T. D., "Selection of Additive for Stabilization and Recycling of Road Pavement," Pavement Rehabilitation Workshop, Queensland, pp. 1-14, 24-25 August 1995.
- [51] Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T. S., "Assessment of strength development in cement admixed clays," in Geotechnique, vol. 53, No. 4, 2003, pp. 439-444.
- [52] Lambe, T.W., "The structure of compacted clay", Journal of Soil Mechanics and Foundation, Vol. 84, 1958, pp. 55-70.
- [53] Lambe, T. W., "Compacted clay: structure: Trans. Am. Soc.," Civil Engineers, vol. 125, No. 1, 1960, pp. 681-705.
- [54] Bishop, A.W. and Hankel, D.C., The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, The English Language Book Society and Edward Arnold (Publishers) Ltd., London, 1976.
- [55] Skempton, A.W., "The Pore Pressure Coefficients A and B", Geotechnique, Vol. 4, No. 4, 1954, pp. 143-147.
- [56] Lambe, T.W. and Whitman, R.V., "Soil Mechanics," SI Version, New York, John Wiley & Sons, 1979, p. 553.
- [57] Wissa, A. E. and Charles Cushing Ladd, "Effective stress-strength behavior of compacted stabilized soils," No. R 64-32 Res. Rept., 1964.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [58] อุดม มาศสุวรรณ และโรจนกร เลิศปิยะนันท์กุล, “การศึกษาพฤติกรรมของดินปรับปรุงคุณภาพ,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2536.
- [59] ชีรยุทธ สุจริตตานันท์, “การศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ผสมสารผสมเพิ่ม,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.
- [60] ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิวะสถิต, “การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวผสมซีเมนต์และปูนขาว,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
- [61] ไพวรรณ เขียวอ่อน, “กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างวัสดุพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และสารผสมเพิ่ม,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- [62] สารา เอียดเนียม, “ผลกระทบของทรายต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552.
- [63] ธนากร นาเชียงใต้, “พฤติกรรมของแรงดันน้ำในดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยทราย,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [64] อนุวัตร ทองคำ, “การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยวิธีผสมซีเมนต์,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538.
- [65] บันเทิง ทองฉืด, “การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยซีเมนต์ โดยวิธีผสมแห้งและผสมเปียก,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.
- [66] ทรงพล บุญมาดี, “ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2529.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [67] ศุภกิจ นนทนันทน์ และกมล อมรฟ้า ทรงพล บุญมาดี, “การพัฒนากำลังของดินที่ผสมด้วยซีเมนต์และปูนขาว” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44 : สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม, 2549
- [68] สนธยา แพ้พัฒนาภัย และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข, “กำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11 โรงแรมเมอร์ลินรีสอร์ท ภูเก็ต, 2549
- [69] อวูช โพธิ์อุดม , “การศึกษาประเมินความแข็งแรงของวัสดุผิวทางเดิมผสมซีเมนต์บดอัดแน่นในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- [70] สถาพร ค่อนแก้ว, เชิดชนินทร์ หม่อมลทิน, “การศึกษาการรับแรงแบกทานของดินผสมโฟมอากาศปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (THE RESEARCH OF BEARING CAPACITY OF CEMENT TREATED SOIL ADMIXED WITH AIRFOAM)” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2556.

ภาคผนวก



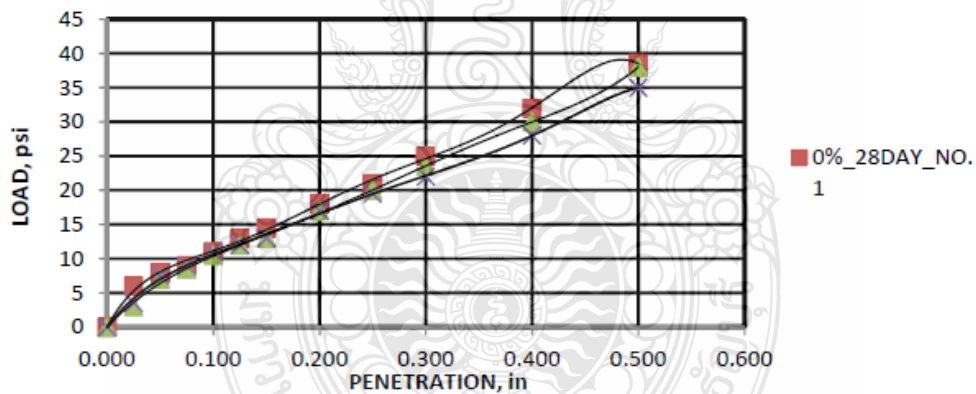
ภาคผนวก ก  
ผลการทดสอบแคลิฟอร์เนียแบริงเรโซแบบแช่น้ำ





DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
 FACULTY OF ENGINEERING  
 RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI  
 CBR LOAD TEST DATA

PENETRATION (in)	MOLD NO. 1		MOLD NO. 2		MOLD NO. 3	
	TYPE		TYPE		TYPE	
	DATE		DATE		DATE	
	DIAL READING (div)	LOAD (psi)	DIAL READING (div)	LOAD (psi)	DIAL READING (div)	LOAD (psi)
0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
0.025	63.5	6	63.5	3	63.5	3.5
0.050	127	8	127	7	127	7.5
0.075	190.5	9	190.5	8.5	190.5	9
0.100	254	11	254	10.5	254	11
0.125	317.5	13	317.5	12	317.5	12
0.150	381	14.5	381	13	381	13
0.200	508	18	508	17	508	17
0.250	630	21	630	20	630	19.5
0.300	762	25	762	23.5	762	22
0.400	1016	32	1016	30	1016	28
0.500	1270	38.5	1270	38	1270	35



Mold No.	CBR at 0.1 in %	CBR at 0.2 in %	CBR result %	REMARK
1	1.100	1.200	1.200	
2	1.050	1.133	1.133	
3	1.100	1.133	1.133	

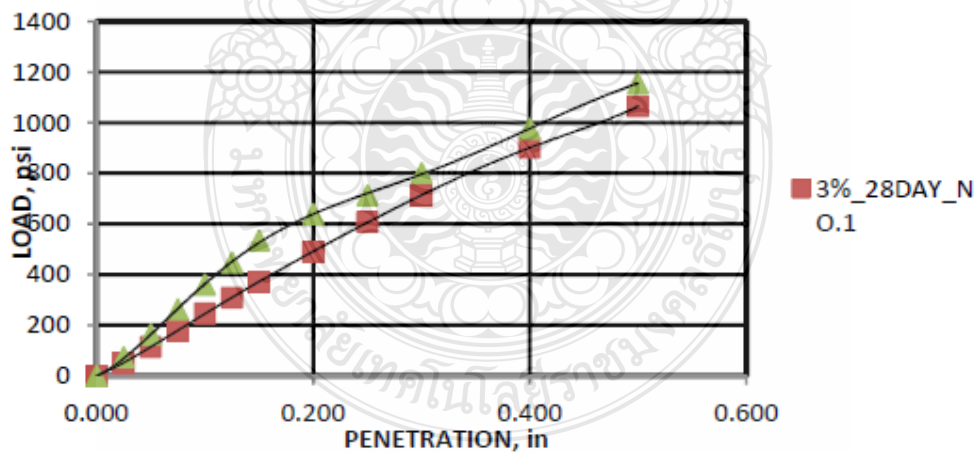




DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
 FACULTY OF ENGINEERING  
 RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

CBR LOAD TEST DATA

PENETRATION (in)	MOLD NO. 1		MOLD NO. 2		
	TYPE		TYPE		
	DATE		DATE		
	INITIAL READING (di)	LOAD (psi)	INITIAL READING (di)	LOAD (psi)	
0.000	0	0.000	0	0.000	
0.025	63.5	50	63.5	75	
0.050	127	115	127	162	
0.075	190.5	180	190.5	263	
0.100	254	247	254	359	
0.125	317.5	309	317.5	449	
0.150	381	370	381	535	
0.200	508	491	508	639	
0.250	630	608	630	714	
0.300	762	712	762	801	
0.400	1016	901	1016	976	
0.500	1270	1065	1270	1156	



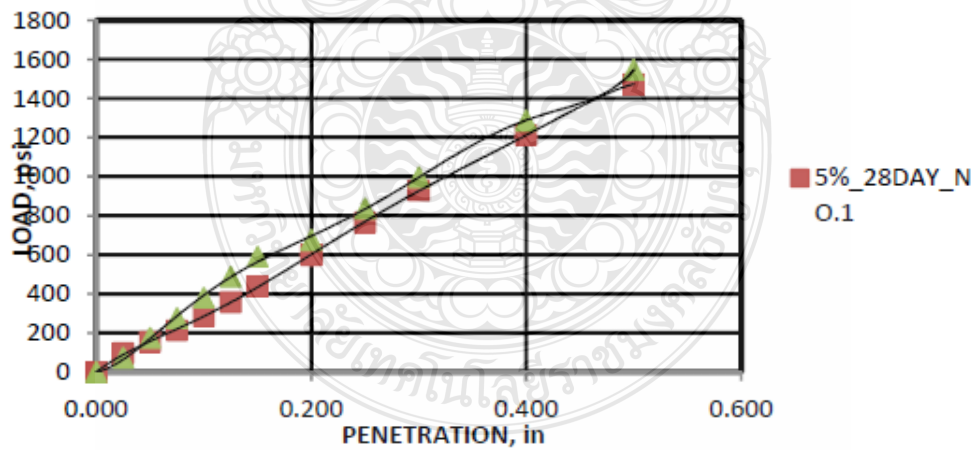
Mold No.	CBR at 0.1 in %	CBR at 0.2 in %	CBR result %	REMARK
1	24.700	32.733	32.733	
2	35.900	42.600	42.600	



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

CBR LOAD TEST DATA

PENETRATION (in)	MOLD NO. 1		MOLD NO. 2			
	TYPE		TYPE			
	DATE		DATE			
	INITIAL READING (dir)	LOAD (psi)	INITIAL READING (dir)	LOAD (psi)		
0.000	0	0.000	0	0.000		
0.025	63.5	97	63.5	73		
0.050	127	154	127	175		
0.075	190.5	214	190.5	276		
0.100	254	286	254	381		
0.125	317.5	358	317.5	488		
0.150	381	438	381	590		
0.200	508	600	508	676		
0.250	630	767	630	838		
0.300	762	929	762	998		
0.400	1016	1212	1016	1288		
0.500	1270	1474	1270	1546		

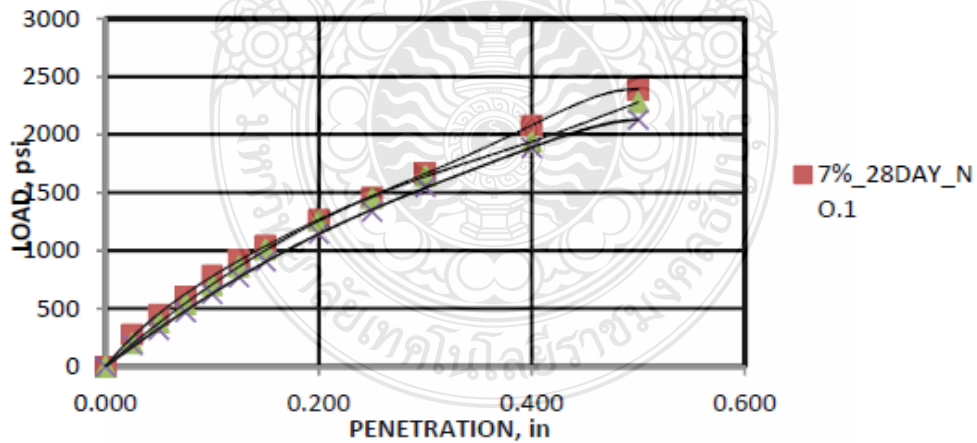


Mold No.	CBR at 0.1 in %	CBR at 0.2 in %	CBR result %	REMARK
1	28.600	40.000	40.000	
2	38.100	45.067	45.067	
3	0.000	0.000	0.000	



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
 FACULTY OF ENGINEERING  
 RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI  
 CBR LOAD TEST DATA

PENETRATION (in)	MOLD NO. 1		MOLD NO. 2		MOLD NO. 3	
	TYPE		TYPE		TYPE	
	DATE		DATE		DATE	
	INITIAL READING (dir)	LOAD (psi)	INITIAL READING (dir)	LOAD (psi)	INITIAL READING (dir)	LOAD (psi)
0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
0.025	63.5	278	63.5	200	63.5	189
0.050	127	448	127	380	127	318
0.075	190.5	604	190.5	540	190.5	473
0.100	254	788	254	704	254	628
0.125	317.5	920	317.5	863	317.5	773
0.150	381	1045	381	1010	381	909
0.200	508	1267	508	1259	508	1147
0.250	630	1460	630	1453	630	1339
0.300	762	1672	762	1645	762	1550
0.400	1016	2080	1016	1940	1016	1889
0.500	1270	2390	1270	2280	1270	2130

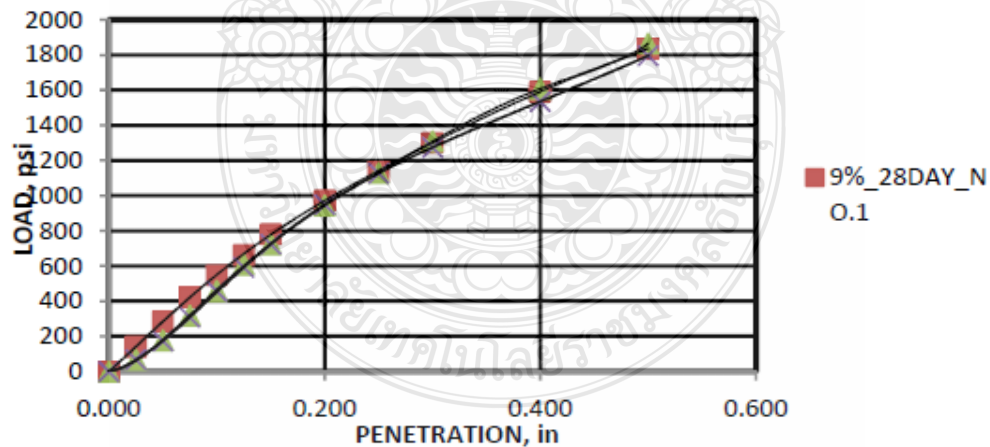


Mold No.	CBR at 0.1 in %	CBR at 0.2 in %	CBR result %	REMARK
1	78.800	84.467	84.467	
2	70.400	83.933	83.933	
3	62.800	76.467	76.467	



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
 FACULTY OF ENGINEERING  
 RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI  
 CBR LOAD TEST DATA

PENETRATION (in)	MOLD NO. 1		MOLD NO. 2		MOLD NO. 3	
	TYPE		TYPE		TYPE	
	DATE		DATE		DATE	
	INITIAL READING (div)	LOAD (psi)	INITIAL READING (div)	LOAD (psi)	INITIAL READING (div)	LOAD (psi)
0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
0.025	63.5	141	63.5	68	63.5	70
0.050	127	285	127	177	127	173
0.075	190.5	423	190.5	319	190.5	308
0.100	254	549	254	460	254	458
0.125	317.5	665	317.5	609	317.5	593
0.150	381	782	381	724	381	724
0.200	508	973	508	944	508	949
0.250	630	1138	630	1129	630	1127
0.300	762	1302	762	1310	762	1275
0.400	1016	1591	1016	1608	1016	1535
0.500	1270	1836	1270	1864	1270	1796

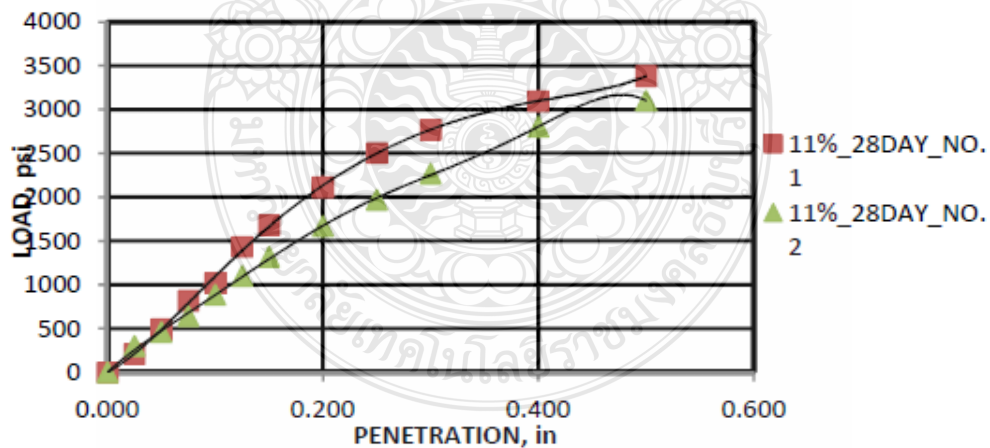


Mold No.	CBR at 0.1 in %	CBR at 0.2 in %	CBR result %	REMARK
1	54.900	64.867	64.867	
2	46.000	62.933	62.933	
3	45.800	63.267	63.267	



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
 FACULTY OF ENGINEERING  
 RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI  
 CBR LOAD TEST DATA

PENETRATION (in)	MOLD NO. 1		MOLD NO. 2		
	TYPE		TYPE		
	DATE		DATE		
	WAL READING (div)	LOAD (psi)	WAL READING (div)	LOAD (psi)	
0.000	0	0.000	0	0.000	
0.025	63.5	209	63.5	301	
0.050	127	494	127	459	
0.075	190.5	817	190.5	643	
0.100	254	1021	254	885	
0.125	317.5	1434	317.5	1103	
0.150	381	1678	381	1318	
0.200	508	2118	508	1666	
0.250	630	2504	630	1971	
0.300	762	2773	762	2268	
0.400	1016	3098	1016	2803	
0.500	1270	3382	1270	3103	



Mold No.	CBR at 0.1 in %	CBR at 0.2 in %	CBR result %	REMARK
1	102.100	141.200	141.200	
2	88.500	111.067	111.067	

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบค่ากำลังแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัด





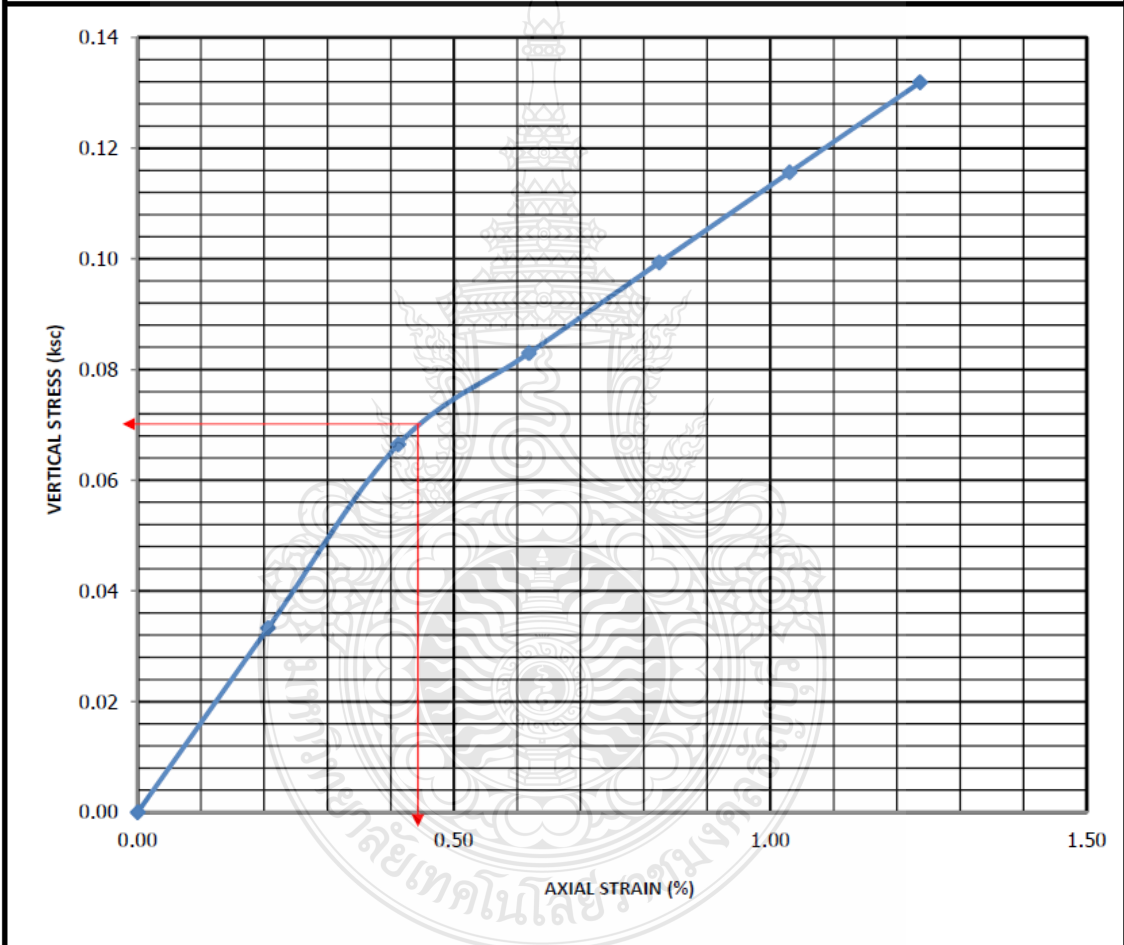
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**Unconfined Compression Test**

PROJECT	UNCONFINED TEST	OWNER	DR.SUPASIT
SOIL DESCRIPTION	SOIL + CEMENT 0 %	BORING NO.	-
LOCATION	RATCHABURI	SAMPLE DEPTH	2-4 m.
TEST NO.	3	SAMPLE NO.	UC-03
TEST BY.	PROJECT GROUP	DATE	10/1/2560



DESCRIPTION	UNDISTURBED	REBOUNDED	FAILURE MODE (UNDISTURBED)
UNDRAINED SHEAR STRENGTH, ksc	0.07		
WATER CONTENT, %	6.78		
WET UNIT WEIGHT, g/cm3	2.29		
STRAIN AT FAILURE, %	0.44		
SENSITIVITY			



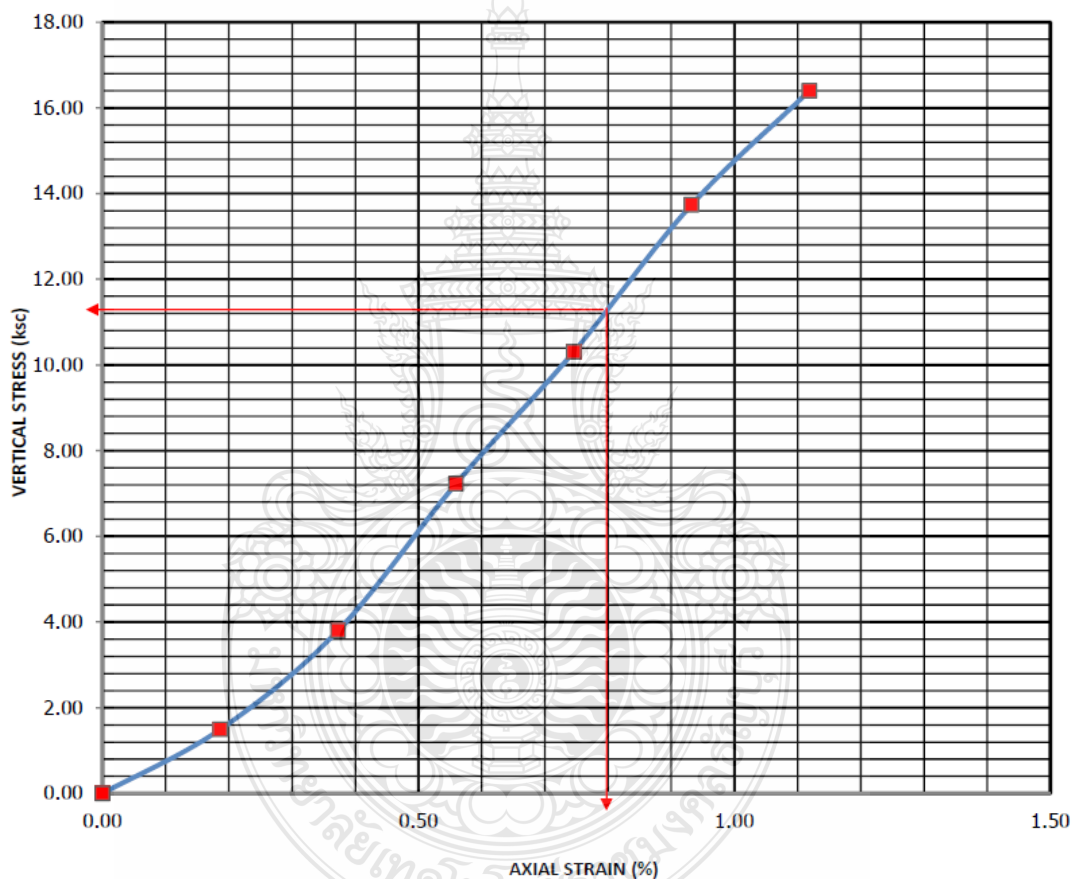
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**Unconfined Compression Test**

PROJECT	UNCONFINED TEST	OWNER	DR.SUPASIT
SOIL DESCRIPTION	SOIL + CEMENT 3%	BORING NO.	-
LOCATION	RATCHABURI	SAMPLE DEPTH	2-4 m.
TEST NO.	1	SAMPLE NO.	UC-04
TEST BY.	PROJECT GROUP	DATE	10/1/2560



DESCRIPTION	UNDISTURBED	REBOUNDED	FAILURE MODE (UNDISTURBED)
UNDRAINED SHEAR STRENGTH, ksc	11.03		
WATER CONTENT, %	8.55		
WET UNIT WEIGHT, g/cm <sup>3</sup>	2.26		
STRAIN AT FAILURE, %	0.80		
SENSITIVITY			





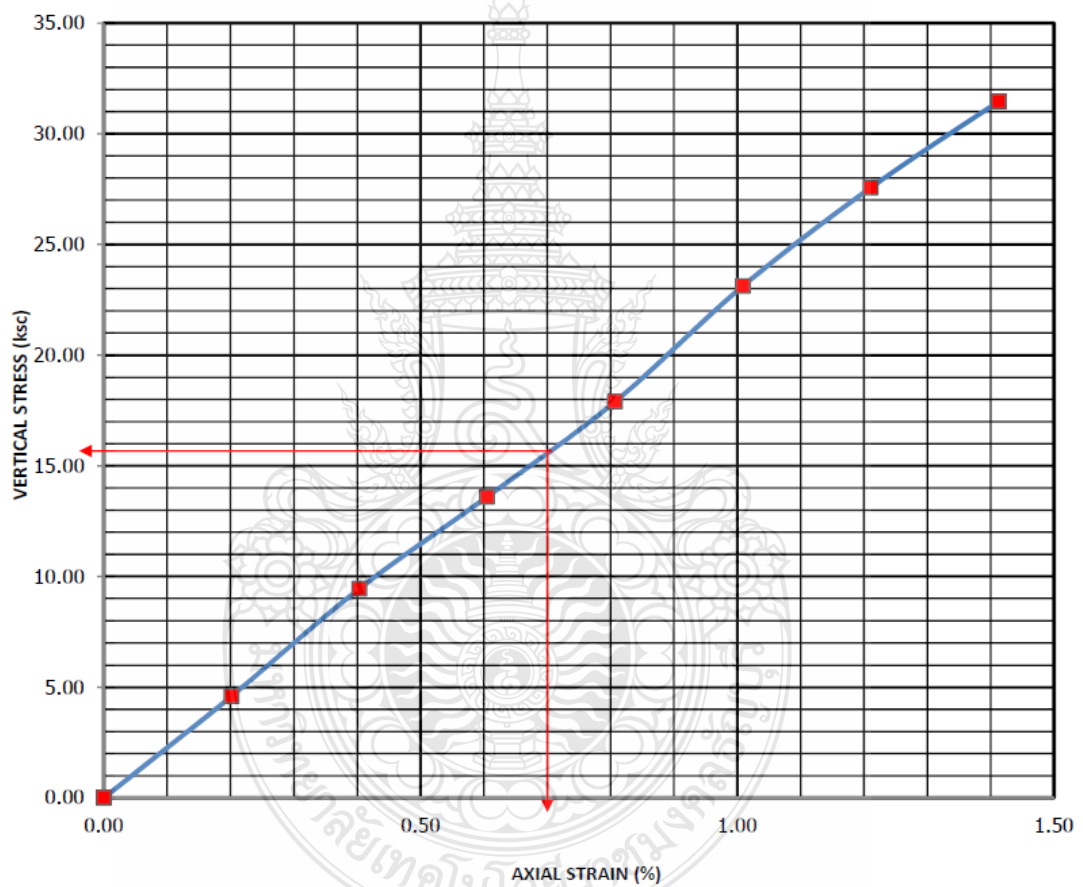
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**Unconfined Compression Test**

PROJECT	UNCONFINED TEST	OWNER	DR.SUPASIT
SOIL DESCRIPTION	SOIL + CEMENT 5%	BORING NO.	-
LOCATION	RATCHABURI	SAMPLE DEPTH	2-4 m.
TEST NO.	1	SAMPLE NO.	UC-07
TEST BY.	PROJECT GROUP	DATE	10/1/2560



DESCRIPTION	UNDISTURBED	REBOUNDED	FAILURE MODE (UNDISTURBED)
UNDRAINED SHEAR STRENGTH, ksc	15.73		
WATER CONTENT, %	9.33		
WET UNIT WEIGHT, g/cm <sup>3</sup>	2.17		
STRAIN AT FAILURE, %	0.70		
SENSITIVITY			



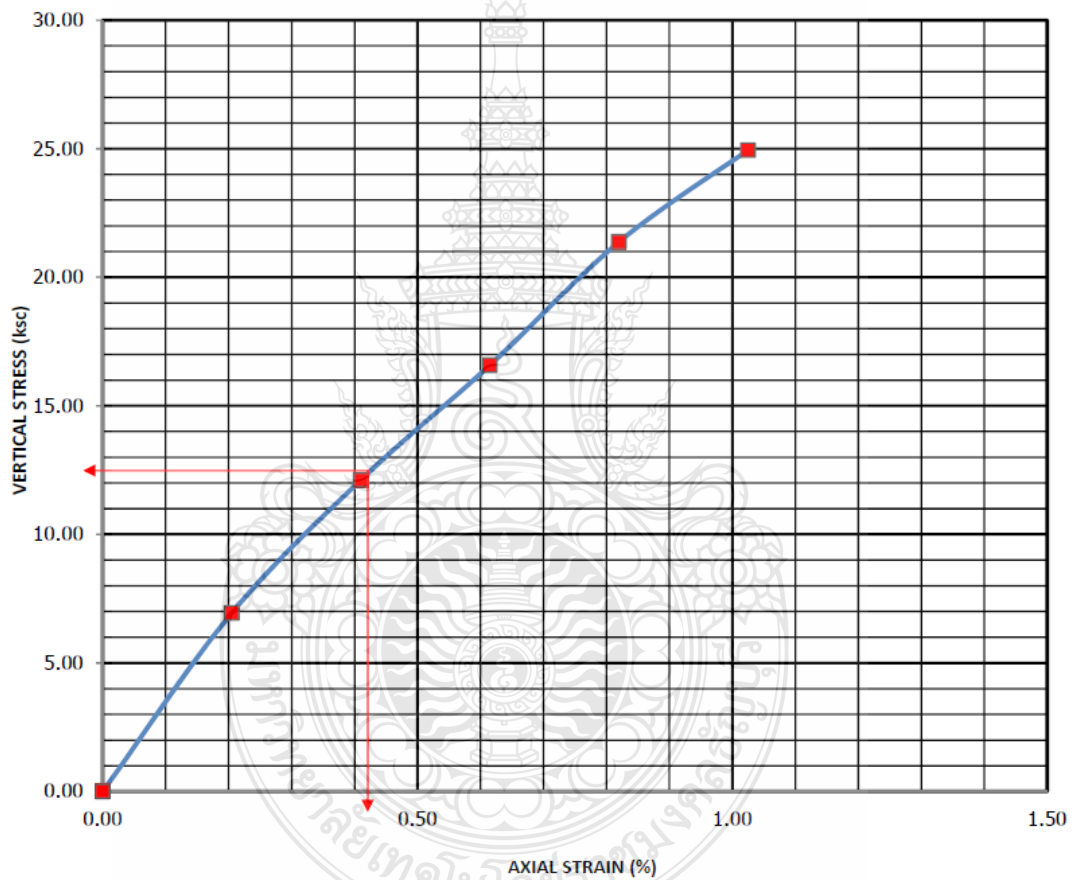
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**Unconfined Compression Test**

PROJECT	UNCONFINED TEST	OWNER	DR.SUPASIT
SOIL DESCRIPTION	SOIL + CEMENT 7%	BORING NO.	-
LOCATION	RATCHABURI	SAMPLE DEPTH	2-4 m.
TEST NO.	1	SAMPLE NO.	UC-10
TEST BY:	PROJECT GROUP	DATE	10/1/2560



DESCRIPTION	UNDISTURBED	REBOUNDED	FAILURE MODE (UNDISTURBED)
UNDRAINED SHEAR STRENGTH, ksc	12.47		
WATER CONTENT, %	9.33		
WET UNIT WEIGHT, g/cm <sup>3</sup>	2.29		
STRAIN AT FAILURE, %	0.42		
SENSITIVITY			



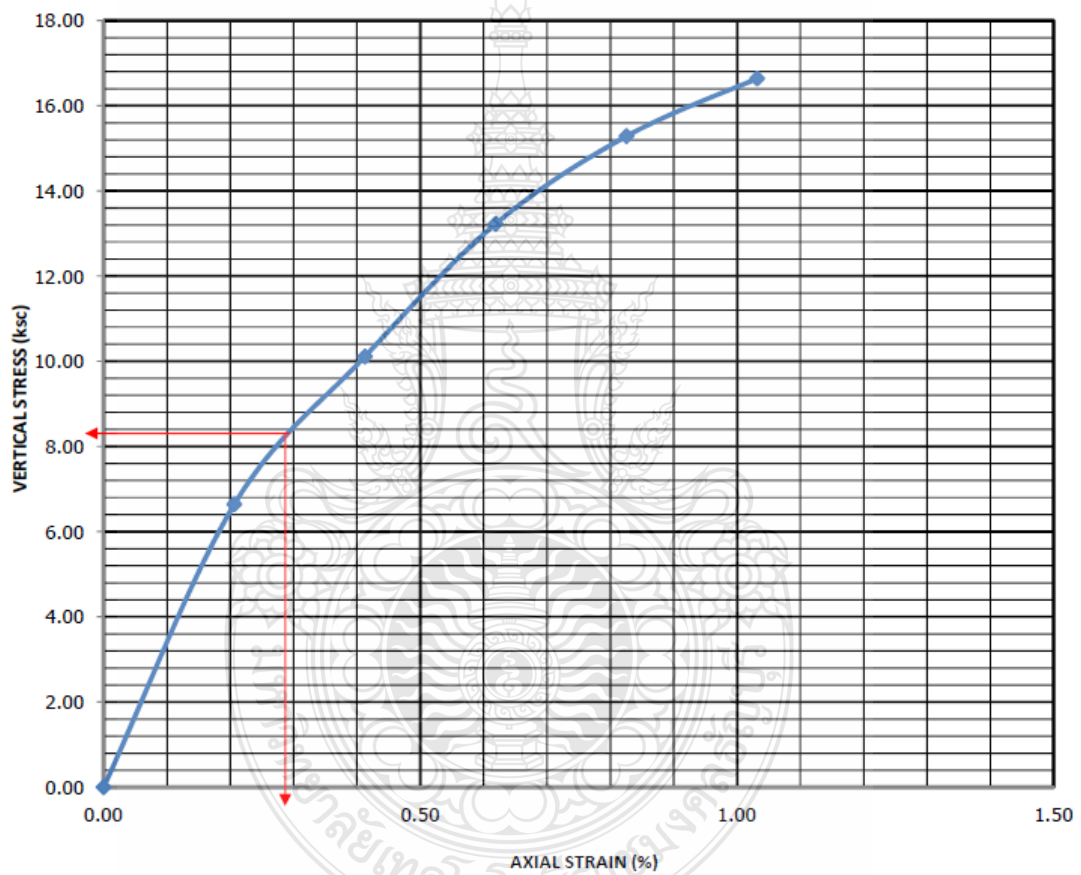
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**Unconfined Compression Test**

PROJECT	UNCONFINED TEST	OWNER	DR.SUPASIT
SOIL DESCRIPTION	SOIL + CEMENT 9 %	BORING NO.	-
LOCATION	RATCHABURI	SAMPLE DEPTH	2-4 m.
TEST NO.	3	SAMPLE NO.	UC-15
TEST BY.	PROJECT GROUP	DATE	10/1/2560



DESCRIPTION	UNDISTURBED	REBOUNDED	FAILURE MODE (UNDISTURBED)
UNDRAINED SHEAR STRENGTH, ksc	8.32		
WATER CONTENT, %	8.73		
WET UNIT WEIGHT, g/cm <sup>3</sup>	2.32		
STRAIN AT FAILURE, %	0.39		
SENSITIVITY			



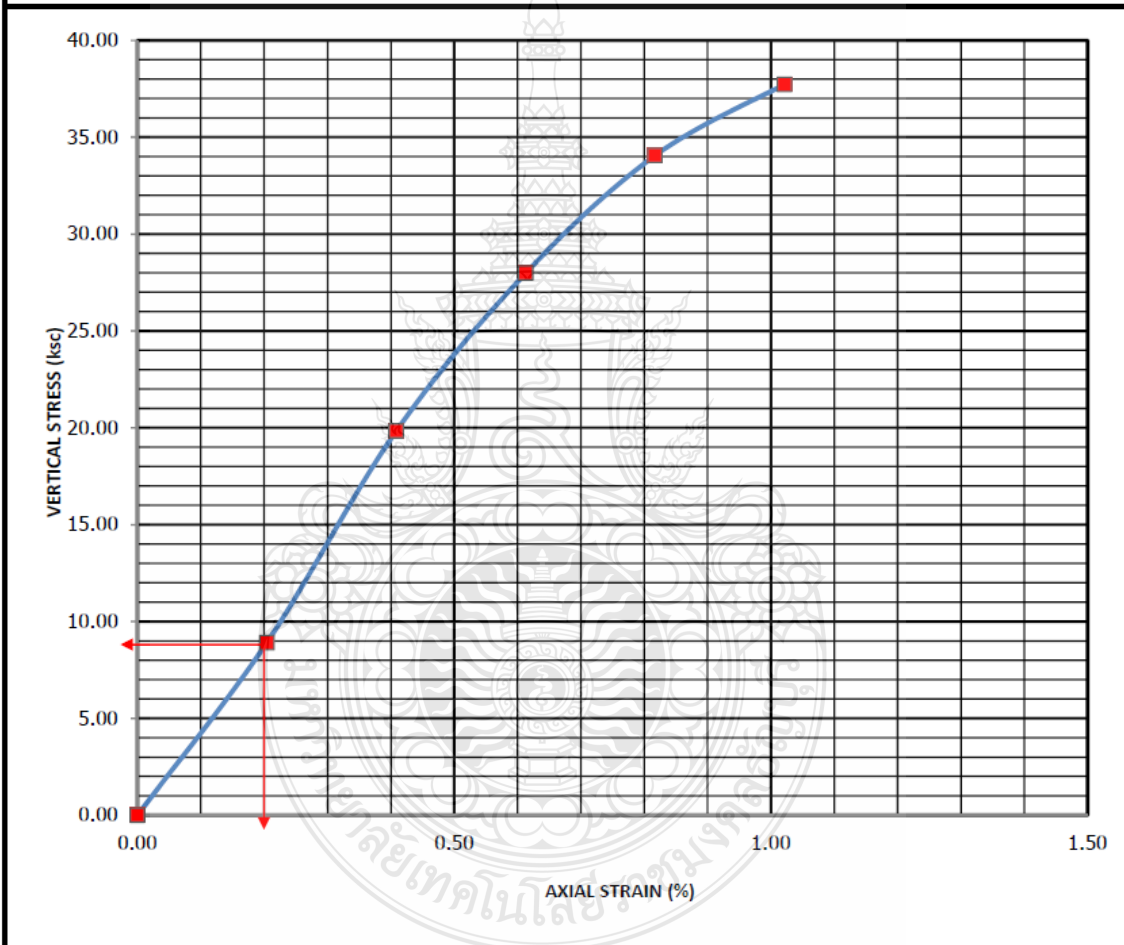
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

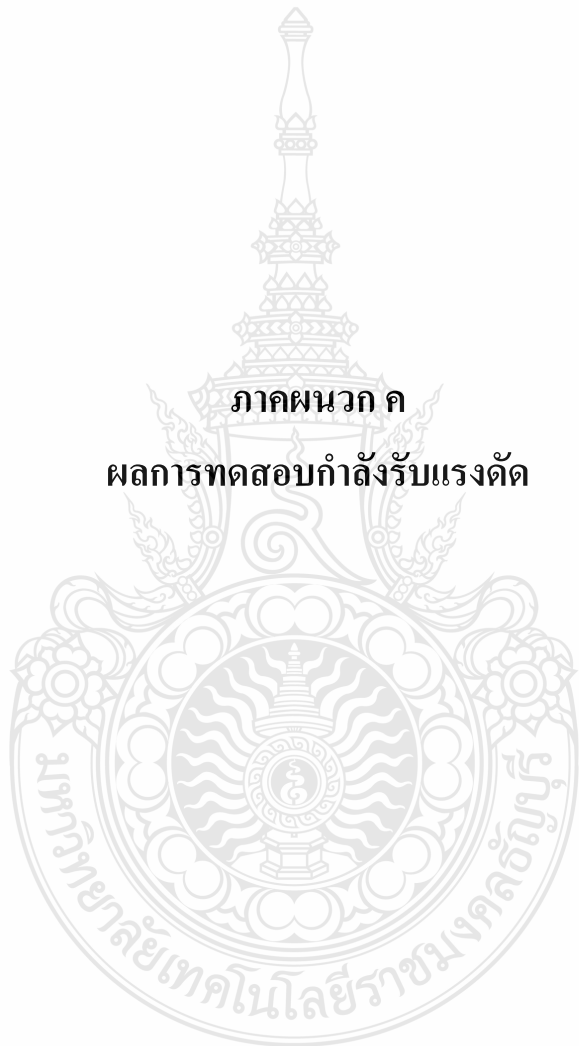
**Unconfined Compression Test**

PROJECT	UNCONFINED TEST	OWNER	DR.SUPASIT
SOIL DESCRIPTION	SOIL + CEMENT 11%	BORING NO.	-
LOCATION	RATCHABURI	SAMPLE DEPTH	2-4 m.
TEST NO.	1	SAMPLE NO.	UC-16
TEST BY.	PROJECT GROUP	DATE	10/1/2560



DESCRIPTION	UNDISTURBED	REBOUNDED	FAILURE MODE (UNDISTURBED)
UNDRAINED SHEAR STRENGTH, ksc	18.86		
WATER CONTENT, %	7.36		
WET UNIT WEIGHT, g/cm <sup>3</sup>	2.20		
STRAIN AT FAILURE, %	0.20		
SENSITIVITY			

**ภาคผนวก ค**  
**ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด**





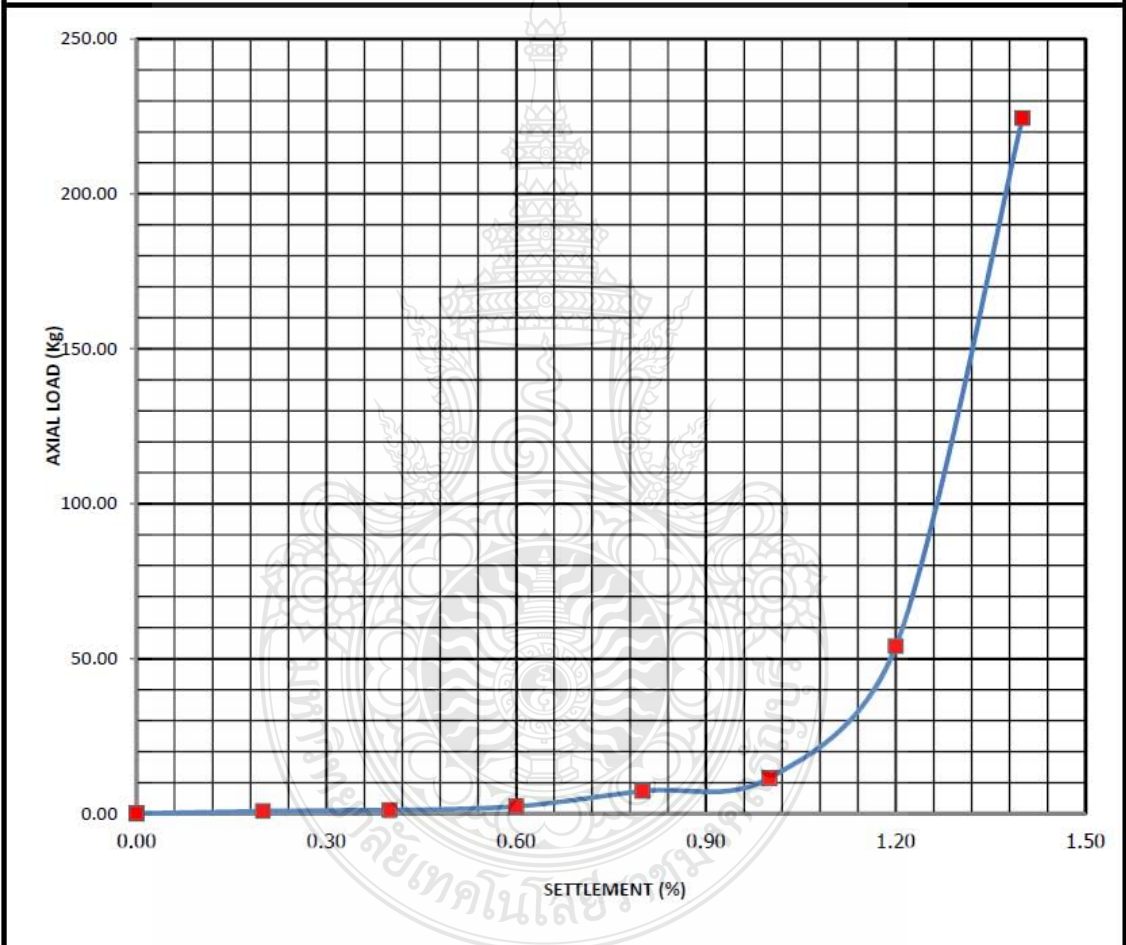
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**FLEXURAL TEST RESULT**

PROJECT	UNCONFINED TEST	OWNER	DR.SUPASIT
SOIL DESCRIPTION	SAND + CEMENT 3 %	BORING NO.	-
LOCATION	RATCHABURI	SAMPLE DEPTH	2-4 m.
TEST NO.	2	SAMPLE NO.	Fx-04
TEST BY.	PROJECT GROUP	DATE	10/1/2560



DESCRIPTION	UNDISTURBED	REBOUNDED	FAILURE MODE (UNDISTURBED)
MODULUS OF RUPTURE , Ksc	1.53		
WATER CONTENT, %	8.07		
WET UNIT WEIGHT, g/cm <sup>3</sup>	2.16		
SETTLEMENT	1.00		
AXIAL LOAD	11.49		



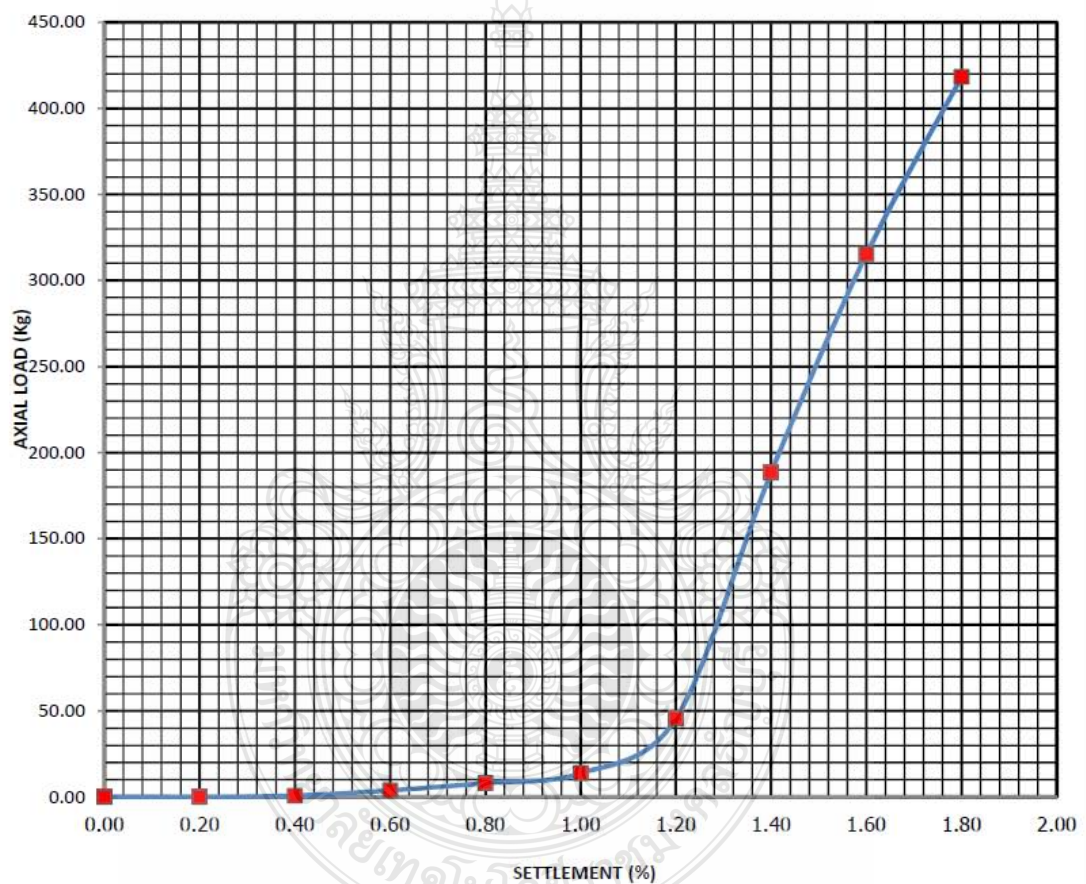
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**FLEXURAL TEST RESULT**

PROJECT	UNCONFINED TEST	OWNER	DR.SUPASIT
SOIL DESCRIPTION	SAND + CEMENT 5 %	BORING NO.	-
LOCATION	RATCHABURI	SAMPLE DEPTH	2-4 m.
TEST NO.	2	SAMPLE NO.	Fx-06
TEST BY.	PROJECT GROUP	DATE	10/1/2560



DESCRIPTION	UNDISTURBED	REBOUNDED	FAILURE MODE (UNDISTURBED)
MODULUS OF LUPTURE , Ksc	1.84		
WATER CONTENT, %	9.26		
WET UNIT WEIGHT, g/cm3	2.16		
SETTLEMENT	1.00		
AXIAL LOAD	13.79		



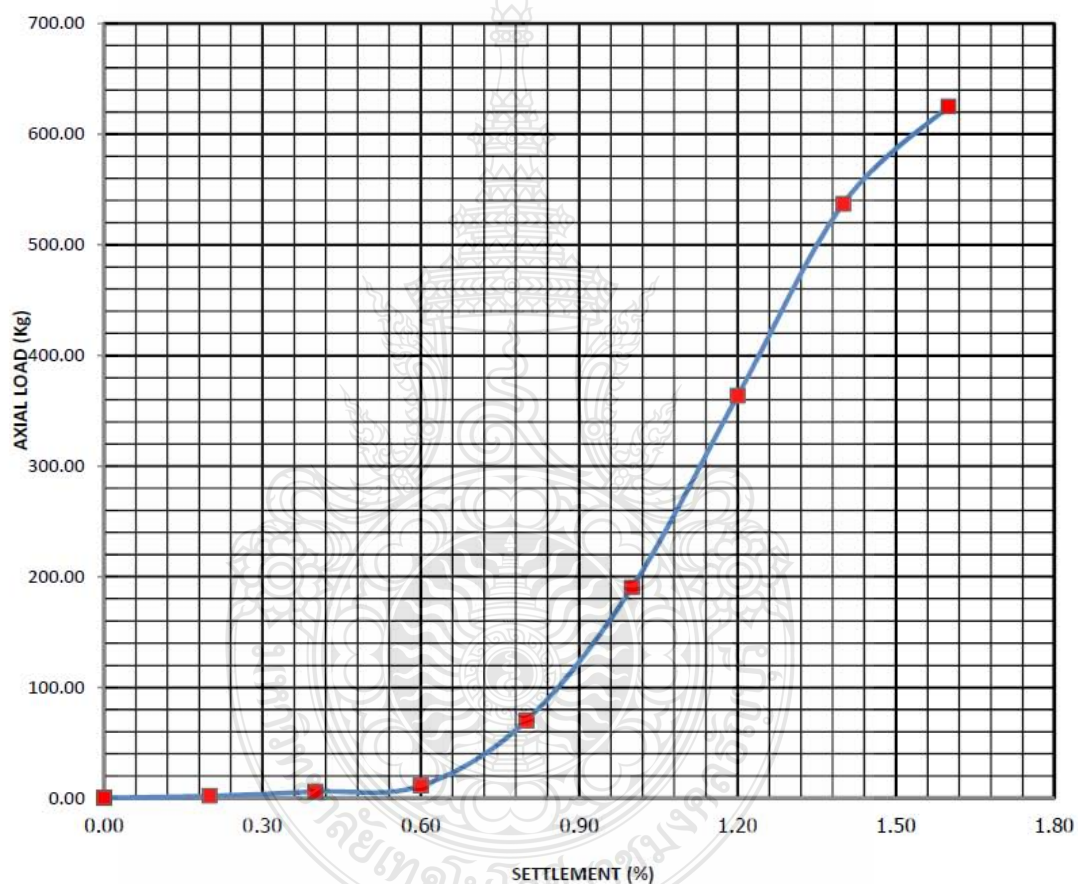
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**FLEXURAL TEST RESULT**

PROJECT	UNCONFINED TEST	OWNER	DR.SUPASIT
SOIL DESCRIPTION	SAND + CEMENT 7 %	BORING NO.	-
LOCATION	RATCHABURI	SAMPLE DEPTH	2-4 m.
TEST NO.	2	SAMPLE NO.	Fx-08
TEST BY.	PROJECT GROUP	DATE	10/1/2560



DESCRIPTION	UNDISTURBED	REBOUNDED	FAILURE MODE (UNDISTURBED)
MODULUS OF RUPTURE , Ksc	25.38		
WATER CONTENT, %	7.28		
WET UNIT WEIGHT, g/cm <sup>3</sup>	2.16		
SETTLEMENT	1.00		
AXIAL LOAD	190.35		





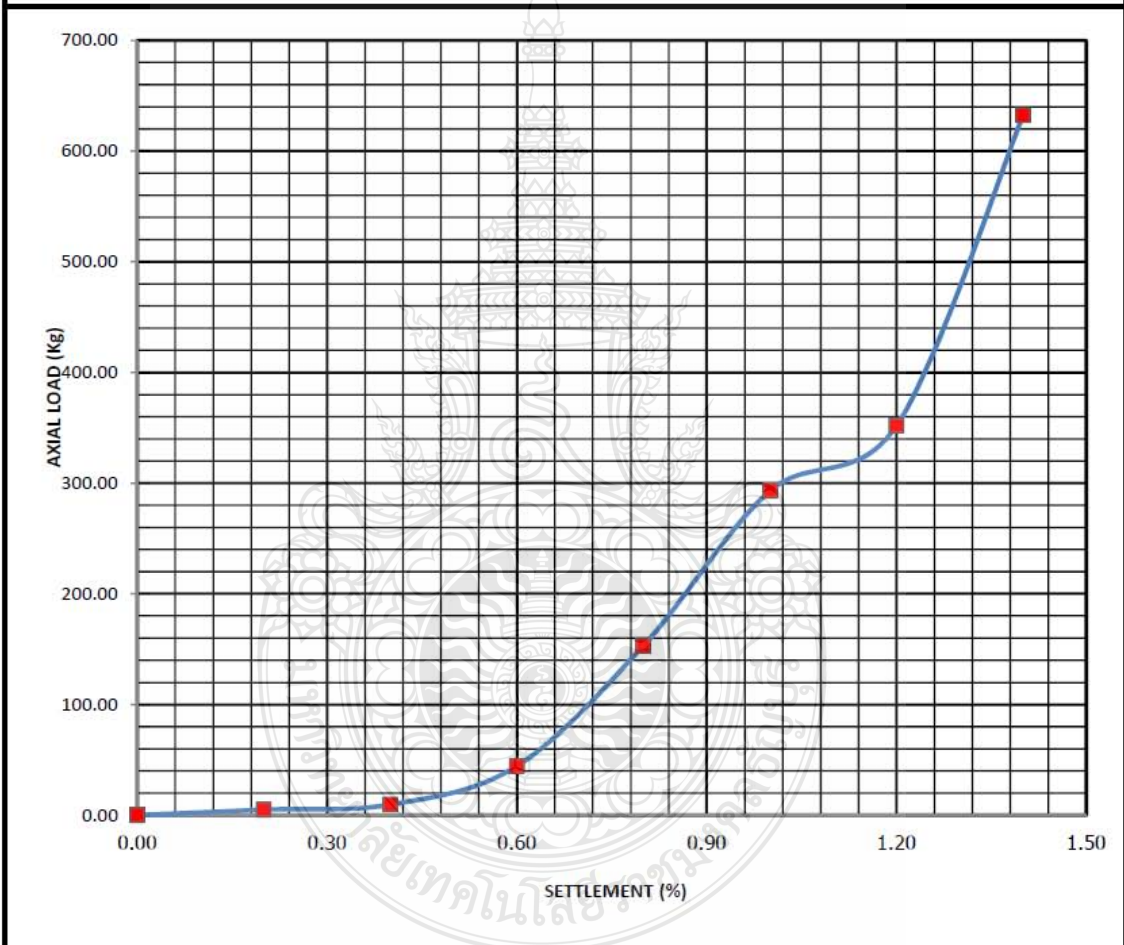
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**FLEXURAL TEST RESULT**

PROJECT	UNCONFINED TEST	OWNER	DR.SUPASIT
SOIL DESCRIPTION	SAND + CEMENT 9 %	BORING NO.	-
LOCATION	RATCHABURI	SAMPLE DEPTH	2-4 m.
TEST NO.	1	SAMPLE NO.	Fx-09
TEST BY.	PROJECT GROUP	DATE	10/1/2560



DESCRIPTION	UNDISTURBED	REBOUNDED	FAILURE MODE (UNDISTURBED)
MODULUS OF LUPTURE , Ksc	39.07		
WATER CONTENT, %	9.39		
WET UNIT WEIGHT, g/cm3	2.16		
SETTLEMENT	1.20		
AXIAL LOAD	351.98		



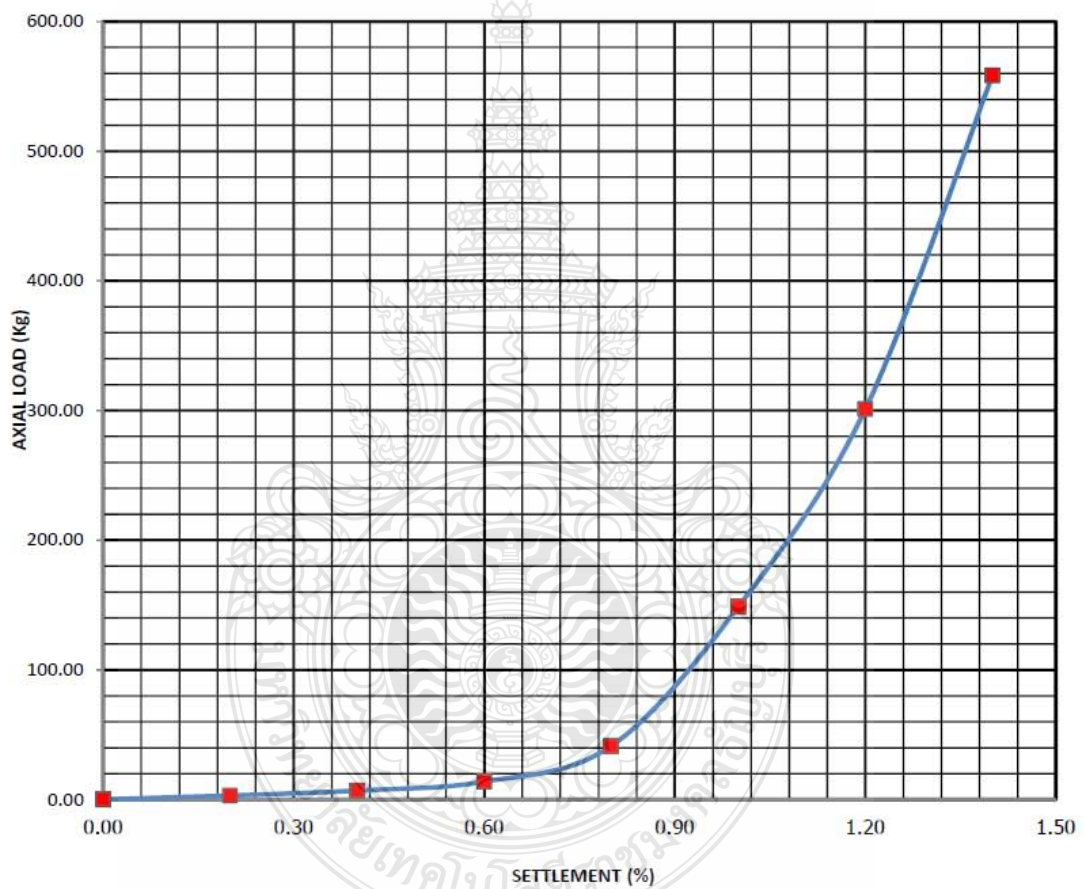
**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**FLEXURAL TEST RESULT**

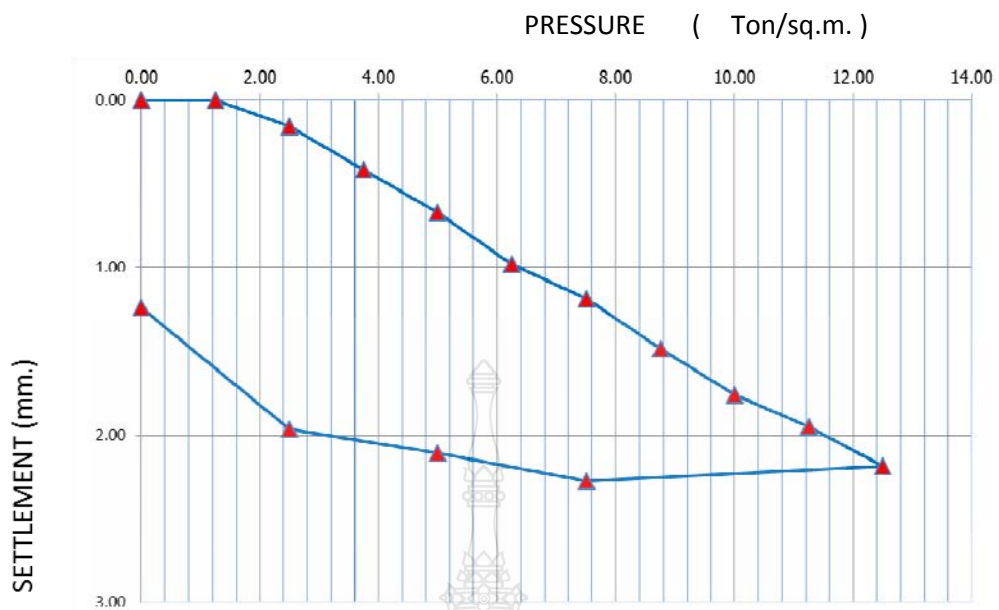
PROJECT	UNCONFINED TEST	OWNER	DR.SUPASIT
SOIL DESCRIPTION	SAND + CEMENT 11 %	BORING NO.	-
LOCATION	RATCHABURI	SAMPLE DEPTH	2-4 m.
TEST NO.	1	SAMPLE NO.	Fx-11
TEST BY.	PROJECT GROUP	DATE	10/1/2560



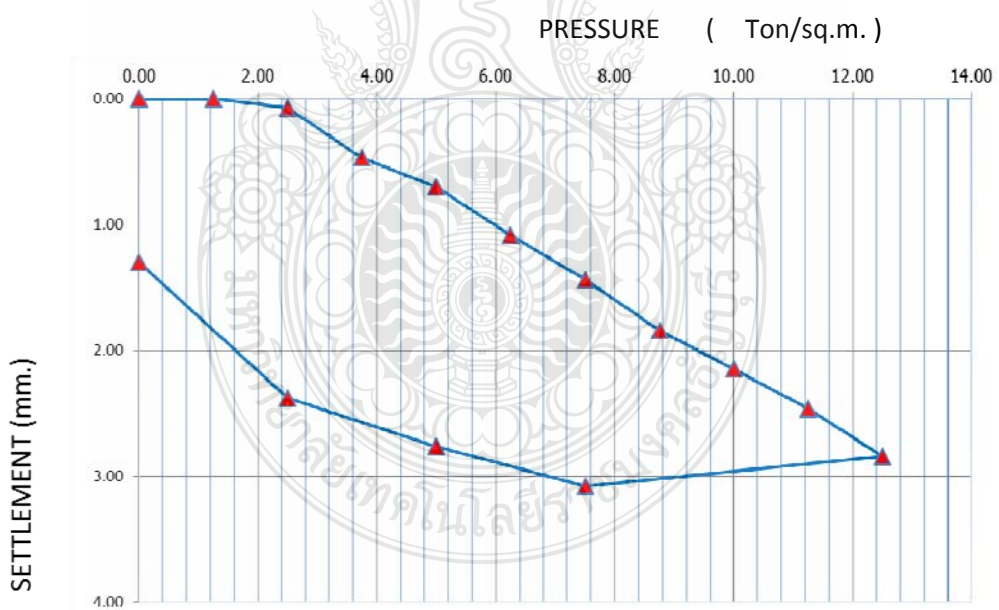
DESCRIPTION	UNDISTURBED	REBOUNDED	FAILURE MODE (UNDISTURBED)
MODULUS OF LUPTURE , Ksc	74.46		
WATER CONTENT, %	8.18		
WET UNIT WEIGHT, g/cm <sup>3</sup>	2.16		
SETTLEMENT	1.40		
AXIAL LOAD	558.41		

**ภาคผนวก ง**  
**ผลการทดสอบกำลังรับแรงแบกทาน**

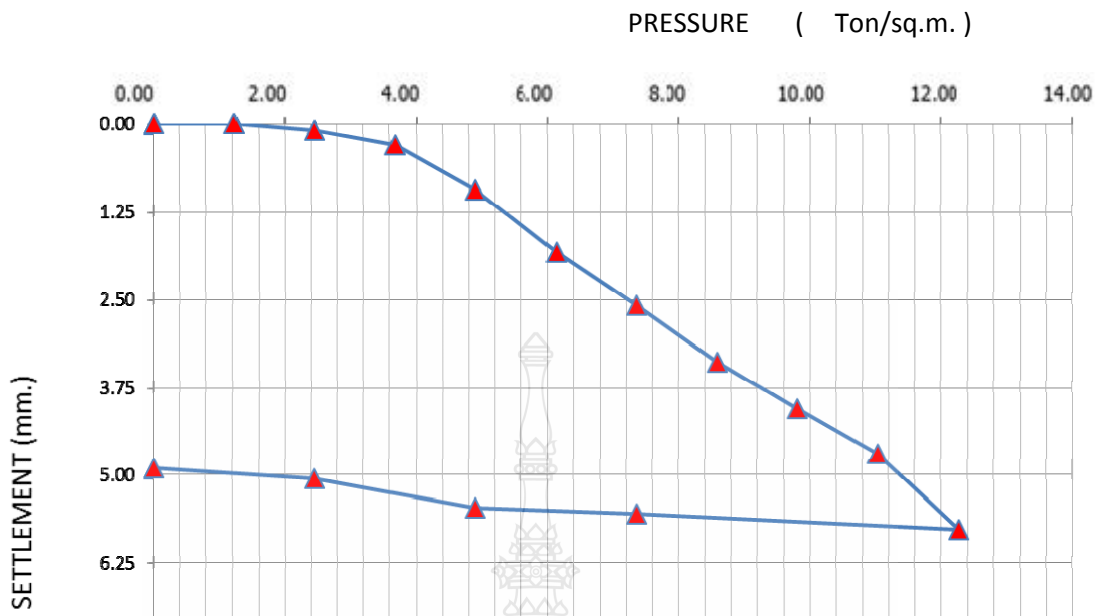




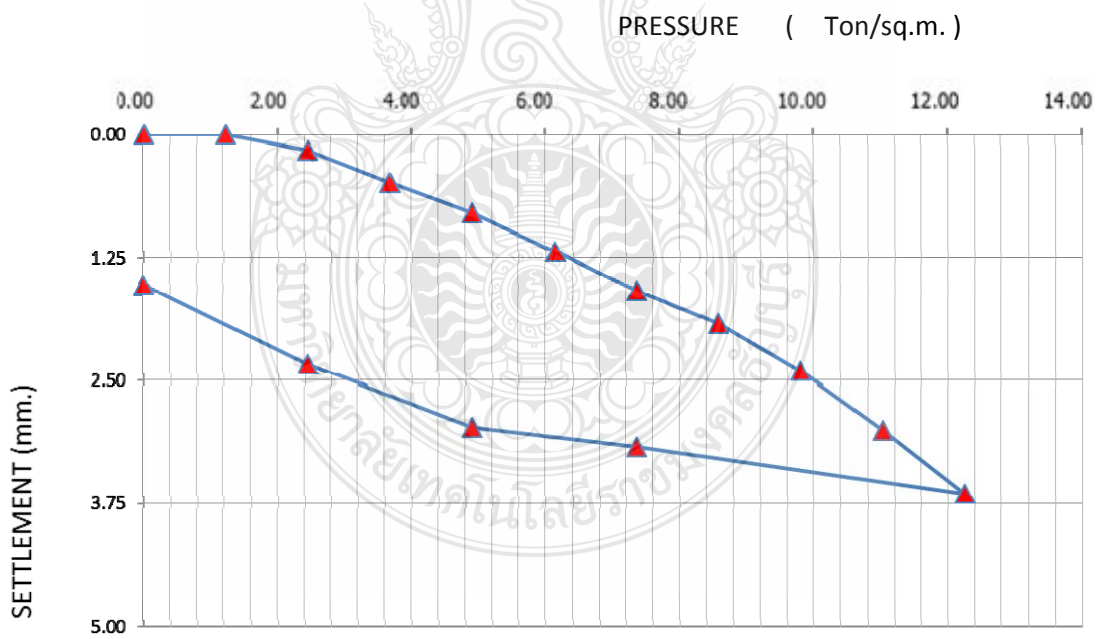
กราฟผลทดสอบ Plate bearing test ดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่ 3 %



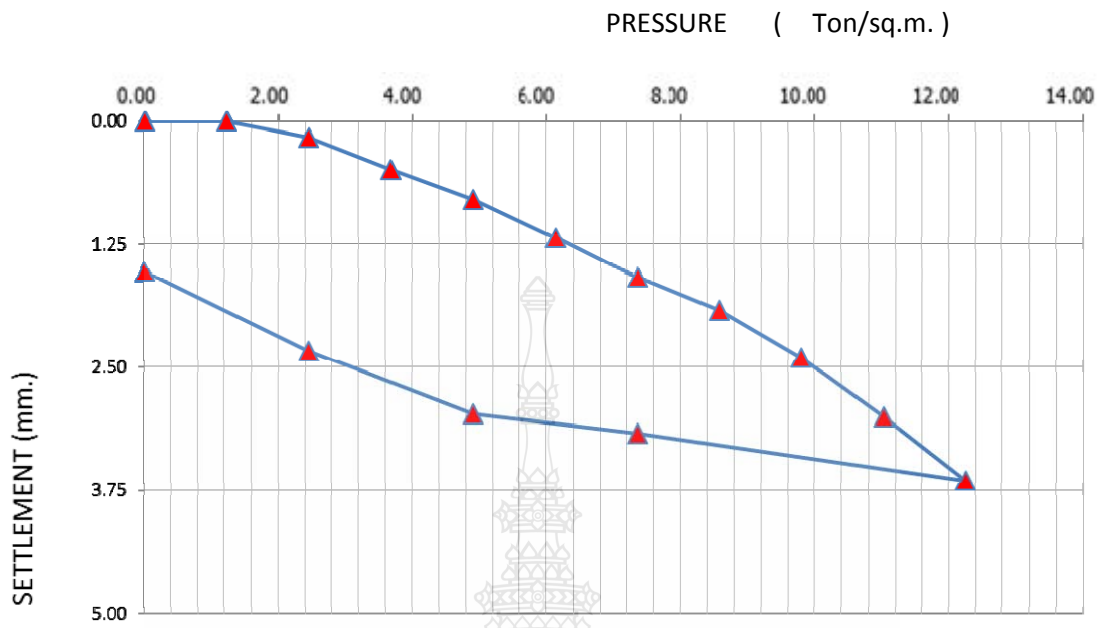
กราฟผลทดสอบ Plate bearing test ดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่ 5 %



กราฟผลทดสอบ Plate bearing test ดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่ 7 %



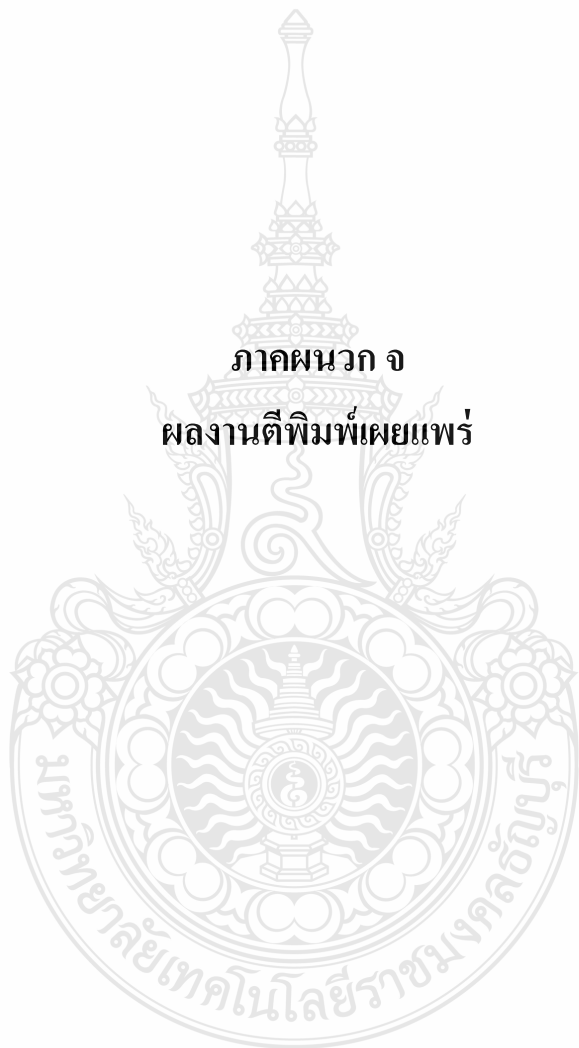
กราฟผลทดสอบ Plate bearing test ดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่ 9 %



กราฟผลทดสอบ Plate bearing test ดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่ 11 %



ภาคผนวก จ  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2  
และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการ  
ภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ครั้งที่ 3

“วิจัยสหวิทยาการและนวัตกรรม

เพื่อสรรค์สร้างสังคม และชุมชนอย่างยั่งยืน”

# Proceedings

31 มีนาคม 2560

ณ อาคารเทคโนโลยีสารสนเทศ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ  
ศูนย์พระนครหรืออยุธยา หันตรา

ISBN : 978-974-625-761-9

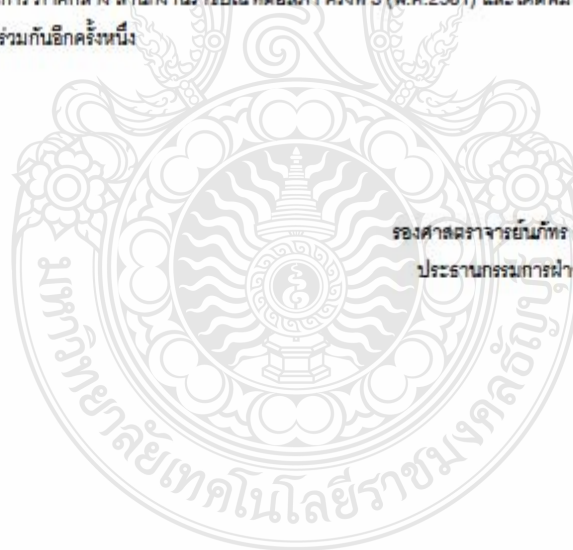
[www.ruscon.rmutsb.ac.th](http://www.ruscon.rmutsb.ac.th)



## คำนำ

นับว่าเป็นเกียรติอย่างยิ่งที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ได้จัดงานการประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2 และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการ ภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ครั้งที่ 3 และในฐานะประธานฝ่ายวิชาการ ผมมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะแจ้งให้ทราบว่ามีบทความส่งเข้าร่วมนำเสนอทั้งสิ้น 174 บทความ ได้รับการตอบรับให้เข้าร่วมนำเสนอ 153 บทความ และได้คัดเลือกบทความที่มีคุณภาพ เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ มทร.สุวรรณภูมิ และวารสารวิชาการ มทร.สุวรรณภูมิ (มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์) จำนวน 30 บทความ ในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2 และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการ ภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ครั้งที่ 3 ฉบับนี้ มีบทความที่ตีพิมพ์เผยแพร่ทั้งสิ้น จำนวน 103 บทความ เป็นบทความในสายมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ จำนวน 50 และสายวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จำนวน 53 บทความ นับว่าเป็นการพัฒนางานวิชาการและวิจัยของชาติในอีกทางหนึ่ง

ผมต้องกราบขอบคุณกองบรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าของท่านในการประเมินบทความทางวิชาการจำนวนมากและขอบคุณสำหรับคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนบทความและคณะผู้จัดประชุมวิชาการฯ ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณผู้เขียนบทความทุกท่านจาก 35 สถาบันทั่วประเทศที่ให้ความสนใจและให้เกียรติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ และหวังว่าในปีต่อไปทุกท่านจะได้เขียนบทความเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2 และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการ ภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ครั้งที่ 3 (พ.ศ.2561) และได้ตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิชาการที่มีคุณภาพร่วมกันอีกครั้งหนึ่ง



รองศาสตราจารย์นภัทร วจินเทพินทร์  
ประธานกรรมการฝ่ายวิชาการ

รายงานสืบเนื่อง

การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2

และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ครั้งที่ 3

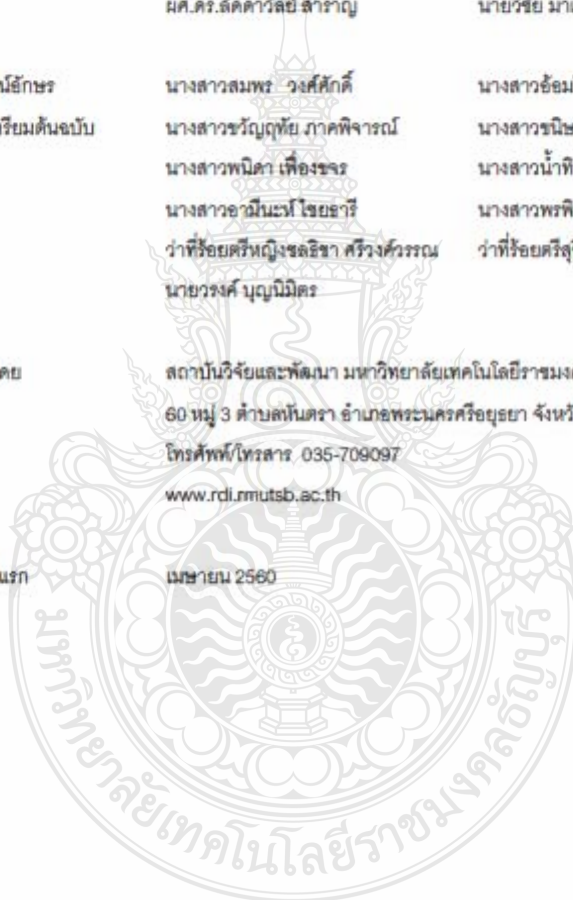
บรรณาธิการที่ปรึกษา	ผศ.ไพศาล บูรินทร์วัฒนา รศ.ระวีวรรณ สุวรรณศรี	
บรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ	ศ.ดร.สุทัยรัตน์ ณ นคร ศ.ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล ศ.ดร.สนม คุรุทเมือง ศ.ดร.วาสนา วงษ์ใหญ่ ศ.ดร.ปิติ สุนทรสุขกุล ศ.ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผลาลิน ศ.ดร.งามผ่อง คงคำทิพย์ ศ.ดร.เกตุ ฤกษ์พันธ์ รศ.อารีรัตน์ คุณดี รศ.สยาม อรุณศรีภักดิ์ รศ.ดร.สุวัฒน์ สุขมงคลสันต์ รศ.ดร.สุพักตร์ พิบูลย์ รศ.ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ รศ.ดร.สมชัย ศรีนอก รศ.ดร.ศิริณา จิตต์จรัส รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก รศ.ดร.วันชัย ยอศุศลใจ รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง	รศ.ดร.มนต์ชัย เทียนทอง รศ.ดร.ปาจรรย์ ผลประเสริฐ รศ.ดร.บุญใจ ศรีถิถิตนรากุล รศ.ดร.นงลักษณ์ จินตนาดีกุล รศ.ดร.ชูสิทธิ์ บำรุงเวช รศ.ดร.กิงพร ทองใบ รศ.ดร.กฤษมันต์ วัฒนานรงค์ ผศ.สุดแดน วิสุทธิลักษณ์ ผศ.ดร.ศิวฤทธิ์ พงศกรรังศิลป์ ผศ.ดร.ธนวัต ลิ้มปัทมาธิชัยกุล ผศ.ดร.จันทร์จิรา วงษ์ขมทอง ผศ.ดร.กิตติพงษ์ โสภณธรรมภาณ ดร.สุวัฒน์ รักขันโท ดร.สุวนิตย์ รุ่งราตรี ดร.มารยาท โยทองยศ ดร.พรเทพ ฐิณเณ คุณเลติเยร์ คามีสักดิ์
บรรณาธิการ	รศ.เนกพร วัจนเทพินทร์	
รองบรรณาธิการ	ผศ.ดร.มนตรี สังข์ทอง	

กองบรรณาธิการ	รศ.ระวีวรรณ สุวรรณศรี	ผศ.ดร.มนตรี สังข์ทอง
	รศ.ดร.ระวีวรรณ เต็มขันธ์มณี	ผศ.ดร.จันทนา แลนสุข
	รศ.ดร.กิตติ บุญเลิศนิรันดร์	ผศ.สุพจน์ สุทธิศักดิ์
	ผศ.ว่าที่ร้อยโทธนุ ทดแทนคุณ	ผศ.พินเอกหญิง ดร.นงพิมล นิมิตรอนันท์
	ผศ.ดร.ประมุข อุดมเลขกะ	ดร.สรชัย ขวรางกูร
	ผศ.ทวีศักดิ์ ศรีจันทร์อินทร์	ดร.ศรีสุดา ไชยทองลูก
	ผศ.ดร.อำนาจ ศิลวัตร	ดร.วัชรีย์ เพ็ชรวงษ์
	ผศ.ดร.สาลินันท์ บุญมี	ดร.ธารณี นวลสนธิ์
ผศ.ดร.ลัดดาวัลย์ สำราญ	นายวิชัย มาแสง	

ฝ่ายพิสูจน์อักษร และจัดเตรียมต้นฉบับ	นางสาวสมพร วงศ์ศักดิ์	นางสาวอ้อมใจ บุญหนุน
	นางสาวขวัญฤทัย ภาคพิจรรย์	นางสาวนิษฐา คำรงกุล
	นางสาวพนิดา เพ็ญขจร	นางสาวน้ำทิพย์ แยมกสิณบัว
	นางสาวอามินะห์ ไชยธำรี	นางสาวพรพิมล เขียวพินาย
	ว่าที่ร้อยตรีหญิงชลธิชา ศรีวงศ์วรรณ	ว่าที่ร้อยตรีสุวิทย์ ไส้คาเจริญ
	นายวรงค์ บุญนิมิตร	

จัดพิมพ์โดย สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ  
60 หมู่ 3 ตำบลโนนตรา อำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000  
โทรศัพท์/โทรสาร 035-709097  
[www.rdl.rmutsb.ac.th](http://www.rdl.rmutsb.ac.th)

พิมพ์ครั้งแรก เมษายน 2560



## รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)

สาขาเกษตรศาสตร์และอุตสาหกรรมอาหาร	
รศ.ดร.รวิวรรณ เต็มม้านมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.ดร.วันเพ็ญ จิตรเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รศ.ดร.ศักดิ์ดา จงแก้ววัฒนา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.สุชาดา บุญเลิศนิรันดร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.ดร.อภิรักษ์ เพียรมงคล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.ธัญวลี สงวนพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เจริญ เจริญชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ชูจิตร์ รินทะวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.นัยวิท เกล็ดมณฑ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.นิพนธ์ ภูวเกียรติกำจจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.พนิดา บุญปฤกษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ธัญวลี สวัสดิ์ธรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.วีระพล แจ่มสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผศ.สุภารัตน์ สกุลดู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีสุทธาน
ผศ.สมชาย จอมดวง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ดร.ธีระพัศร์ ศิลปสมบูรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.พิทยา ใจคำ	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ดร.วิจิตรา เทลียวตระกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ	
รศ.ดร.กิตติ บุญเลิศนิรันดร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.ดร.ดวงฤดี ศุภสิมมิลโร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ลำเจิง รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รศ.สถาพร ดีบุญมี ณ ชุมแพ	มหาวิทยาลัยเกษตรมบัณฑิต
ผศ.ดร.จตุพร เม่าพงษ์ไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ชวลิต ศรีสถาพรพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.ธานินทร์ ปัจจุไล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.พิมพ์พรรณ อ่ำพันธ์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.มนตรี สังข์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.วรวรรณ มีวาสนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.ศุภชาติร์ ศิริเชียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.สิงหนัด สกุลเชมฤทัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (ต่อ)**

ผศ.ดร.เสนีย์ พงษ์ยานี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.อำนาจ จำรัสรุ่งผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
พอ.ผศ.ดร.ปรัชญา อารีกุล	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ผศ.พินทุสร บัสนะจะโน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ราตรี เขี่ยมประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.วุฒิพงษ์ เชื้อนดิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.เจลิยว เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.ชยาคมน์ บุริมศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.นุชรัตน์ นุชประยูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.รัฐศักดิ์ พรหมมาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.วิระพงษ์ จันทร์สนาม	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
ดร.สรชัย ขวรางกูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สุนิษา ละนะเสน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สันติ ไทยอินวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.เสาวคนธ์ ชูบัว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.แสงทอง บุญยิ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.อาณัติ รัตนดิกรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.ชังคณา ไสเกื้อ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.เนนก เจริญศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

**สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย**

ศ.ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศ.ดร.ปิติ สุกนธสุภกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กฤษณ์ธรมณ์ ภูมิภักดีพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.โกศล โอฟาร์ไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รศ.ดร.จตุรงค์ สังกาพิณู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.นุรักษ์ กฤษดาบุรุษย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.บุญยิ่ง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ประเทือง อุษานวิสุทธิ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วดาพิทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.วุฒิชัย ชัยวินชัยโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

**สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย (ต่อ)**

รศ.ดร.เสถียร ธีบุญศรีรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รศ.นภัทร วัจนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.บรรจบ อรรถ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ประกาศิต ต้นคือลงการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.วิบูลย์ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ศุภชัย นาทะพันธ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รศ.อำนาจยศ ทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.กุศล พิมาพันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.เกรียงไกร อัครมาศบันลือ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.นนทโชติ อุดมศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.นิพนธ์ ภูวเกียรติกำจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.พิชัย จันทรมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.ไพฑูริย์ เกียรติสุขคนธาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.มาหามะฮูไฮมี มะแซ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.ยุทธนา กัมทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.วชิระ จงบุรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.วัลลภ ภูผา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.คมสันต์ งามขำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.นันทชัย ชูศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.ประกษ สิริสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วาณิช นิลนนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สายชล ชูดีเจือเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

**สาขาการศึกษา**

ศ.ดร.ประยูทธ อัครเอกมาสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ชานนท์ จันทร์ธา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ศิริณา จิตต์จรัส	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รศ.ดร.สำเริง รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รศ.เกรียงไกร อายุวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ณัฐวุฒิ ชวีญแก้ว	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.นภัทร วัจนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

สารบัญ (ต่อ)

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย (ต่อ)	
ความสัมพันธ์ของผลทดสอบ การรับแรงเฉือน และกำลังรับแรงดัด สำหรับดินลูกรังผสมซีเมนต์ จักรพันธ์ แก้วกัญญา และ ศุภสิทธิ์ พงศ์วิระสถิต	363
การปฏิบัติการทดสอบเพื่อตรวจสอบเส้นโค้งการหลุดตัวกับเวลาของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ใช้ ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน สมพร มั่นใจ และ ศุภสิทธิ์ พงศ์วิระสถิต	371
ผลกระทบของมวลรวมหยาบต่อคอนกรีตกำลังสูงใน 24 ชั่วโมง อาทิมา ดวงจันทร์ และ ทวีศักดิ์ ศรีจันทร์อินทร์	379
ศึกษาความสามารถในการดูดซับสังกะสีและแมงกานีสจากแหล่งน้ำอุตสาหกรรมบริเวณนิคม อุตสาหกรรมโรจนะ 3 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ด้วยวัสดุชีวมวลจากกะลามะพร้าว โสน และแกลบข้าว ปัทมดา นาควงษ์ และ ศิริประภา ตีประดิษฐ์	391
การแยกตะกอนน้ำขิงขุ่นโดยใช้ไฮโดรไซโคลนและการกรอง ศิวกร รื่นพันธ์ พิชัย สร้อยสน ธนิต สวัสดิ์เสวี และ ประธาน วงศ์ศิริเวช	398
การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นผู้รับเหมาก่อสร้างทางของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ลาวัลย์ ชันเกษตร	408
เครื่องรีไซเคิลน้ำมันเชื้อเพลิงจากการล้างชิ้นส่วนเครื่องกล ณพพร จินดาประเสริฐ ภูภูมิ พวงเจริญชัย ปฏิภาณ ถิมพระบาท และสมใจ เพียรประสิทธิ์	419
เครื่องนวดยางพาราสำหรับเกษตรกรรายย่อยในจังหวัดเลย กานต์ จันทร์	425
การออกแบบและสร้างเครื่องขยายคัลลูปปืนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ วิรัช กองสิน วีระพันธ์ ดิย์พเสน ชูศักดิ์ ชำพินท์ และ จิระวัฒน์ ใจอ่อนน้อย	432
การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ผสมเส้นใยจากธรรมชาติด้วยระบบสูญญากาศ จำพิง เจริญยศ สุทธิสาร อนันต์รัตนชัย และพิพัฒน์ สุจิตธรรมกุล	442
Switching Losses of Power Transistors Improvement by Electron beam Irradiation Pakorn Pakalpheuk Manit Jitpukdee and Apichate Maneewong	451
การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นโดยใช้วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ วิฑูรย์ โคตรมณี	458
การประเมินผลการเรียนรู้ตามมาตรฐานคุณวุฒิ ระดับอุดมศึกษาในการเรียนการสอนแบบการบูรณาการ ของสาขาสถาปัตยกรรมกับการออกแบบลานปฏิบัติธรรม วัดไร่เหลียง ตำบลบางรักพัฒนา จังหวัดนนทบุรี พรชัย โสนะพิริยกุล วราภรณ์ บุตรจันทร์ ณัฏชา โสนะพิริยกุล และ รุจ รัตนพาหุ	464
สาขาการศึกษา	
การพัฒนาโรงเรียนพระปริยัติธรรม แผนกสามัญศึกษา สู่การเป็นองค์กรแห่งการเรียนรู้ ชนันภรณ์ อารีกุล พระมหาสุตใจ คุณาพันธ์ พระทอง บุตรดี พระกิตติวีร อนุญ และ สุวิทย์ แศวรัมย์ย์	475

## 2ER-O22 : ความสัมพันธ์ของผลทดสอบ การรับแรงเฉือน และกำลังรับแรงดัด สำหรับดินลูกรังผสมซีเมนต์

Relationship of testing result on shear strength and flexural strength for laterite  
soil mixed with cement

จักรพันธ์ แก้วกัญญา<sup>1</sup> และ สุภสิทธิ์ พงศ์ศิวัชสถิตย์<sup>2</sup>  
Jakrapan Kaewkanha<sup>1</sup> and Supasit Pongsiwasathit<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษามีจุดมุ่งหมายเพื่อหาความสัมพันธ์ ระหว่าง ค่า CBR แบบแช่น้ำ และค่ากำลังรับแรงดัด กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ สำหรับกรณีดินลูกรังผสมซีเมนต์ ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ทดสอบได้แก่ดินลูกรังจาก อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี เปรียบเทียบกับปริมาณซีเมนต์ที่นำมาผสมคือ 0%, 3%, 5%, 7%, 9% และ 11% โดยน้ำหนักดินแห้งของดินตัวอย่าง ส่วนปริมาณน้ำที่ผสมในตัวอย่างใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสม เมื่อตัวอย่างดินถูกผสมด้วยซีเมนต์และน้ำ จากนั้นจะถูกบดอัดในแบบหล่อตัวอย่าง ด้วยพลังงานในการบดอัดเดียวกันกับที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน สำหรับแบบหล่อที่ใช้การทดสอบมีด้วยกัน 3 ชนิด 1) แบบหล่อทรงกระบอก ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 cm และสูง 7 cm สำหรับการทดสอบแรงกดแกนเดียว 2) แบบหล่อทรงกระบอก ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.1 cm และสูง 17.7 cm สำหรับการทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่งเชโรแบบแช่น้ำ 3) แบบหล่อรูปคาน ขนาด 7.5x7.5x35 cm<sup>3</sup> สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดโดยวิธียกคานสองจุด จากการแบ่งคานออกเป็นสามส่วนเท่าๆกัน หลังจากทำการบ่ม 28 วันแล้วนำมาทดสอบ ได้ผลดังนี้ การเพิ่มของปริมาณซีเมนต์ผสมเพิ่ม จะเพิ่มค่า CBR แบบแช่น้ำ, กำลังรับแรงเฉือนแบบแบบไม่ระบายน้ำ และค่ากำลังรับแรงดัดอย่างมีนัยสำคัญ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS, Soaked CBR และค่า  $M_u$  ได้ถูกนำเสนอ คำสำคัญ: กำลังรับแรงเฉือน, กำลังรับแรงดัด, โมดูลัสการแตกกร้าว

### Abstract

The purpose of this research was to investigate the relationship between Soaked CBR and Flexural strength with the undrained shear strength in case of soil mixed with cement. The soil sample was laterite soil from Ban Pong, Ratchaburi. The cement were mixed in soil sample with 0%, 3%, 5%, 7%, 9% and 11%, respectively by dry weight of soil. The volume of water mixed in soil sample was the optimum moisture content. The soil samples mixed with cement and water were compacted in the molds with the same test method for compaction characteristics of soil using modified effort. There were 3 types of mold as 1) The cylinder mold with a diameter of 3.50 cm and height of 7.00 cm for the unconfined compression test 2) the cylinder mold with a diameter of 15.10 cm and height of 17.7 cm for soaked CBR test 3) the beam mold with the size of 7.5x7.5x35 cm<sup>3</sup>. Third-point loading method was used to test for the flexural strength at the age of 28 days. The results were found that the increasing of mixed cement increased the Soaked CBR, the undrained shear strength, the Soaked CBR and the Flexural strength significantly. The relationship between Soaked CBR and Flexural strength with undrained shear strength was demonstrated.

Keywords: Shear strength, Flexural strength, Modulus of rupture.

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.พระนครศรีอยุธยา

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology, Pathum Thani

\* Corresponding author. E-mail: klee79const@gmail.com



### บทนำ

การบดอัดดิน เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อให้ดินมีความสามารถในการรับกำลังมากขึ้น ใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง ของงานก่อสร้างทาง หรือ ลานรับน้ำหนักสินค้า[2] มีบทบาทอย่างยิ่ง ในงานก่อสร้าง ในอดีตมีต้นทุนวัสดุค่อนข้างต่ำเพราะวัสดุที่ใช้หาได้ไม่ยากนักและการขนส่งมีราคาไม่สูง แต่ปัจจุบันวัสดุหายากขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งการขนส่งวัสดุมายังหน่วยงานก่อสร้าง มีราคาสูงขึ้น การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีขึ้น ทำการบดอัดด้วยชุดเครื่องจักรบดอัด ให้ได้ความแน่นตามมาตรฐานที่กำหนดก็สามารถใช้เป็นชั้นรองพื้นทางหรือชั้นรับน้ำหนักบรรทุกได้ [2][3][5]ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุ สามารถใช้งานพื้นที่ได้รวดเร็ว ทำให้สะดวกสะดวก รวดเร็ว ประหยัด และมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ดีการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์บดอัดโดยให้ชั้นดินบดอัดดังกล่าวรับน้ำหนักแบกทานได้นั้น ยังต้องอาศัยวิธีการออกแบบโดยการทดลองตัวอย่างจากห้องปฏิบัติการทดสอบ[8] และเมื่อทำการบดอัดจริงในสภาพพื้นที่ก่อสร้างแล้วจึงทำการเจาะตัวอย่าง(Coring)เพื่อนำไปทดสอบ การทดลองแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Test) หรือทดสอบในสนามด้วยวิธี Dynamic Cone Penetration(DCP) หรือวิธีแรงกดทับด้วยแผ่นเหล็ก (Plate Load Test) เพื่อหาค่าการรับกำลังแบกทานในสนามที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งการรับกำลังของดินบดอัดในสนามอาจมีค่าต่างจากค่ากำลังที่ได้จากการออกแบบ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน อัตราการผสม วิธีการผสม วิธีการบดอัดและระยะเวลาของการบดอัด วัตถุประสงค์เพื่อให้ดินมีความสามารถในการรับกำลังมากขึ้น และสามารถคาดการณ์การรับน้ำหนักของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์บดอัดในสนามให้ได้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงหรือเท่ากับกับการออกแบบในห้องปฏิบัติการเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่ายในควบคุมคุณภาพในงานก่อสร้างได้ดียิ่งขึ้น

### วิธีการศึกษา

ตัวอย่างดินที่ใช้ศึกษาวิจัยเป็นตัวอย่าง ดินลูกรังบริเวณปอตุ้งรัง อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี การเตรียมตัวอย่างทดสอบจะต้องตากให้แห้งในห้องปฏิบัติการหรืออบที่อุณหภูมิไม่เกิน 140°F แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" และเบอร์ 4 ซึ่งดินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ให้นำน้ำหนักเท่ากับดินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/4" ที่จุดไว้ นำไปผสมกับดินกองแรกเพื่อทดลองต่อไป

จากนั้นนำตัวอย่างดินที่ได้ผสมกับซีเมนต์ในอัตราส่วนตามตารางที่ 2 ใส่ลงในแบบหล่อตัวอย่างเพื่อทดสอบ 1) ทดสอบแรงกดแกนเดี่ยว ตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00 2.)ทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบร์ริงเรโซแนนซ์เข้า ตามมาตรฐาน ASTM D 1883-99 3)ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดโดยวิธีกดคานสองจุดตามมาตรฐาน ASTM D 1635 และเมื่อนำดินซีเมนต์ออกจากแบบหล่อตัวอย่าง ขณะที่ดินซีเมนต์เริ่มแข็งตัว ใช้วิธีโรนด้วยแผ่นพลาสติกป้องกันความชื้นไม่ให้ระเหยออกไป เก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ



รูปที่ 1 ตัวอย่างทดสอบลูกรัง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังตัวอย่าง

คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่าง	ดินลูกรัง
Natural Water Content (%)	4.62
Specific Gravity, $G_s$	2.73
Dry Density, $\rho_d$	1.95
Optimum Moisture Content, OMC	9.50



รูปที่ 2 แบบหล่อทดสอบแรงกดแกนเดียว



รูปที่ 3 แบบหล่อทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัด



รูปที่ 4 การป้อนเก็บตัวอย่าง 28 วัน ก่อนการทดสอบ



(1)



(2)



(3)

รูปที่ 5 (1)การทดสอบแรงกดแกนเดียว, (2)การทดสอบ CBR, (3)การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัด

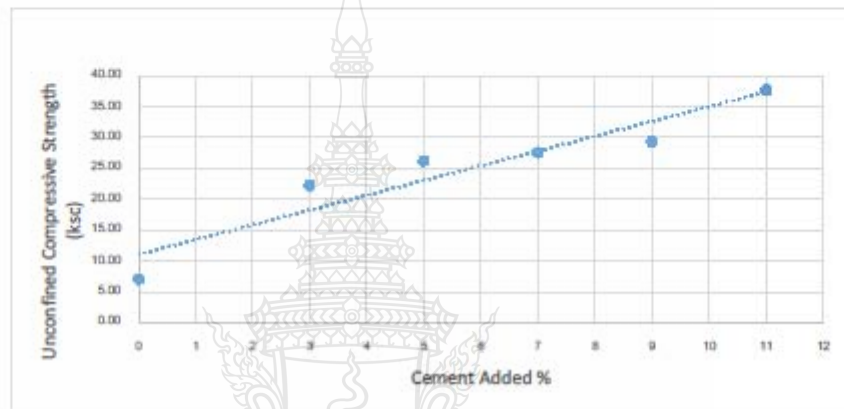
ตารางที่ 2 ค่าส่วนผสมซีเมนต์และจำนวนตัวอย่าง

ชนิดของดิน	ปริมาณซีเมนต์	จำนวนตัวอย่างและวิธีการทดสอบ		
		Unconfined Compression Test	CBR Test	Third Point loading
ดินลูกรัง	3%	3	3	3
	5%	3	3	3
	7%	3	3	3
	9%	3	3	3
	11%	3	3	3
รวมตัวอย่าง		15	15	15

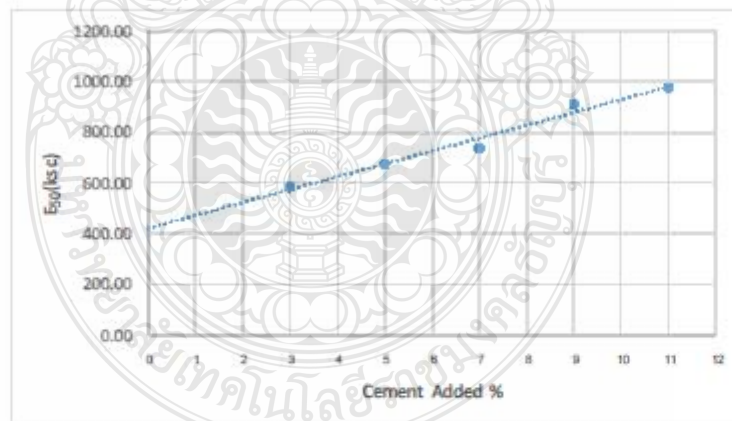
ผลการศึกษา

1. การทดสอบแรงอัดแกนเดียว

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของค่า  $q_u$  กับเปอร์เซ็นต์การผสมซีเมนต์ พบว่าค่า  $q_u$  มีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ดินที่ปรับปรุงคุณภาพ มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้ดีขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 6 และความสัมพันธ์ของค่า  $E_{50}$  กับเปอร์เซ็นต์การผสมซีเมนต์ พบว่าค่า  $E_{50}$  มีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 7



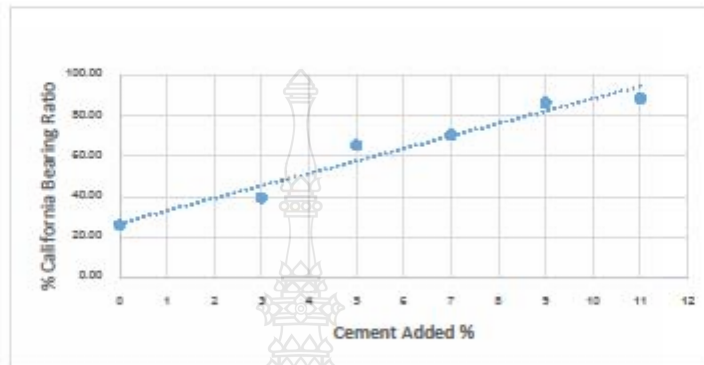
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength( $q_u$ ) กับ ปริมาณซีเมนต์ผสม(%)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ ) กับ ปริมาณซีเมนต์ผสม(%)

## 2. การทดสอบ CBR

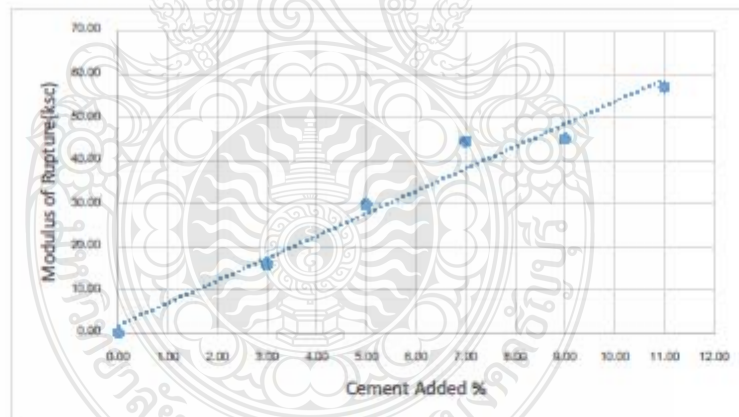
ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของค่า CBR กับเปอร์เซ็นต์การผสมซีเมนต์ พบว่าค่า CBR มีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ ดังแสดงใน รูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า California Bearing Ratio(CBR) กับ ปริมาณซีเมนต์ผสม(%)

## 3. การทดสอบแรงคัต

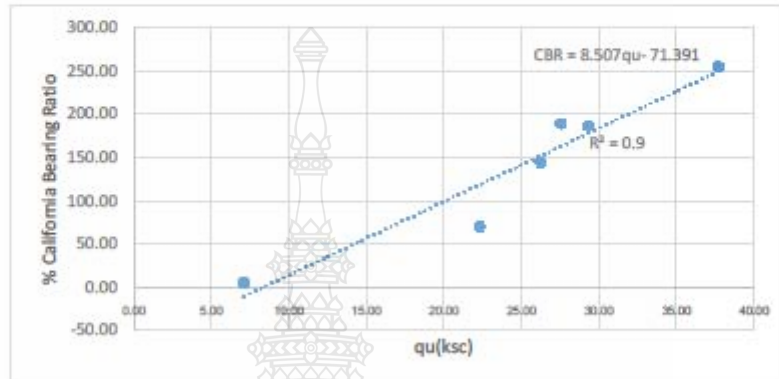
ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของค่า Modulus Of Rupture( $M_r$ ) กับ เปอร์เซ็นต์การผสมซีเมนต์ พบว่าค่า  $M_r$  มีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ ดังแสดงใน รูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus Of Rupture( $M_r$ ) กับ ปริมาณซีเมนต์ผสม(%)

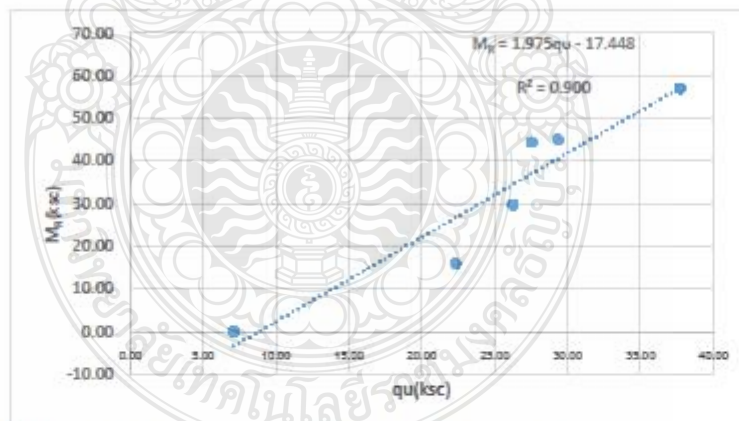
**อภิปรายผล**

นำค่า  $q_u$  และค่า CBR มาเขียนรูปความสัมพันธ์ พบว่าเส้นความสัมพันธ์มีค่าความเชื่อมั่น  $R^2=0.9144$  และได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $CBR=8.057q_u-71.391$  ซึ่งค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า  $q_u$  ที่เพิ่มขึ้นโดยกลุ่มของค่า  $q_u$  กระจายอย่างมีนัยสำคัญในช่วงส่วนผสมซีเมนต์ 5%-9%



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า California Bearing Ratio(CBR) กับ Unconfined Compressive Strength( $q_u$ )

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_u$  และค่า  $M_u$  พบว่าเส้นความสัมพันธ์มีค่าความเชื่อมั่น  $R^2=0.900$  และได้สมการแสดงความสัมพันธ์  $M_u=1.975q_u-17.448$  ซึ่งค่า  $M_u$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า  $q_u$  ที่เพิ่มขึ้นโดยกลุ่มของค่า  $q_u$  กระจายอย่างมีนัยสำคัญในช่วงส่วนผสมซีเมนต์ 5%-9%



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus Of Rupture( $M_u$ ) กับ Unconfined Compressive Strength( $q_u$ )

## สรุปการศึกษา และ ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษา ค่า UCS, CBR กับ  $M_n$  ของ วัสดุตัวอย่างที่นำมาหาความสัมพันธ์เห็นได้ว่า แนวโน้มของความสัมพันธ์กันมี ลักษณะเป็นสัดส่วนแปรผันตรง เมื่อค่า UCS สูงขึ้น CBR และ  $M_n$  ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเมื่อถูกเร่งตัวอย่าง ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์แล้ว ทำให้ค่าการรับกำลังอัดมีค่าสูงขึ้น ตัวอย่างที่ศึกษาจึงสามารถนำไปใช้เป็นชั้นรองพื้นทางได้ แต่ต้องตรวจสอบค่าคุณสมบัติอื่นเพิ่มเติมด้วย ทั้งนี้ในการผสมและบดอัดในสนามยังมีผลกระทบเนื่องจากขนาดผลของตัวอย่างและวิธีการบดเป็นตัวอย่าง จึงควรศึกษาเทียบเคียงกับการทดสอบในสนาม ด้วยการทดสอบ Dutch cone Penetration Test(DPT) หรือ ทดสอบค่ากำลังรับแรงแบกทานในสนาม(Plate Bearing Test) เพื่อหาความสัมพันธ์ของผลที่ได้จากห้องทดลองกับผลทดสอบในสนาม ทำให้ได้การคาดคะเนสัดส่วนของการผสมซีเมนต์ที่แม่นยำขึ้น เกิดประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ อีกทั้งสามารถลดเวลาการทำงาน และ ลดต้นทุนในการออกแบบ ให้รวดเร็วยิ่งขึ้น

## คำขอขอบคุณ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่อง การศึกษาการพัฒนากำลังของวัสดุชั้นพื้นทางผลผสมซีเมนต์ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2559 (วช.) จึงขอขอบคุณ ผ.อ.โกศลนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Circeo, L.T., Davidson, D.T. and David, H.T. (1962). Strength Maturity Relation of Soil-Cement Mixtures. Iowa State University for 41<sup>st</sup> Annual Meeting of the Highway Research Board. pp. 35-45.
- [2] Mills, W.H., Jr. (1935). Road Base Stabilization with Portland Cement. Engineering News Record, 115(22): 751-753.
- [3] Redus, J.F. (1958). Study of Soil-Cement Base Courses on Military Airfields. Highway Research Board. Bulletin. 196. 13-19.
- [4] Terrel, R.J., Barenberg, E.J., Mitchell, J.M. and Thomson, M.R.(1979). Soil Stabilization in Pavement Structure A User's Manual Mixture Design Consideration. Vol. 2. Washington D.C. Government Printing Office.
- [5] The Siam Cement Company Ltd.(1965). Demonstration Road Using Local Soil with Cement Stabilization. Bangkok Thailand. Siam Cement. 25-26.
- [6] Wilmot, T.D. (1995). Selection of Additive for Stabilization and Recycling of Road Pavement. Pavement Rehabilitation Workshop, 24&25 August 1995. Queensland. 1-14.
- [7] อีระชาติ รื่นโรฤกษ์ และสมบัติกระแสด จรัสกร (2544). กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน รายงานวิจัยฉบับที่ วท.188. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทางกรมทางหลวงกระทรวงคมนาคม. หน้า 160-163
- [8] อีระชาติ รื่นโรฤกษ์, อนันต์ ทวีวรรณสถิต. 2543. คุณสมบัติความเค้นความเครียดของวัสดุปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงอัดแนวตั้ง. รายงานฉบับที่วท.179 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ
- [9] สำนักวิศวกรรมและตรวจสอบ กรมทางหลวง, 2533. ทด.-ม.204/2533 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2  
และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการ ภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ครั้งที่ 3  
“วิจัยสหวิทยาการและนวัตกรรมเพื่อสรรค์สร้างสังคม และชุมชนอย่างยั่งยืน”  
31 มีนาคม 2560 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

28 กุมภาพันธ์ 2560

เรื่อง ตอบรับการนำเสนอบทความวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2

เรียน นายจักรพันธ์ แก้วกัญญา

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัยเรื่อง **ความสัมพันธ์ของผลทดสอบ การวิ่งแรงเหมือน และวันถึงวันแรงคิด สำหรับคนอุ้งรีมสมขิงหน่อ (รหัสบทความ 60111023)** เพื่อนำเสนอภาค **ภาคบรรยาย** ในการประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2 และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการ ภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ครั้งที่ 3 หัวข้อ “วิจัยสหวิทยาการและนวัตกรรมเพื่อสรรค์สร้างสังคม และชุมชนอย่างยั่งยืน” กำหนดจัดขึ้นในวันที่ 31 มีนาคม 2560 ณ อาคารเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา นั้น

ในการนี้ คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ ขอแจ้งให้ทราบว่า บทความวิจัยของท่านได้รับการตอบรับให้นำเสนอในการประชุมวิชาการดังกล่าว สำหรับตารางเวลาการนำเสนอ จะแจ้งให้ทราบในลำดับต่อไป ทั้งนี้ ผู้เข้าร่วมการประชุมวิชาการสามารถเข้าร่วมประชุมได้โดยไม่ถือเป็นวันลา และสามารถเบิกค่าใช้จ่ายต่างๆ จากต้นสังกัดได้ เมื่อได้รับอนุมัติจากผู้บังคับบัญชาแล้ว

ขอแสดงความนับถือ

รองศาสตราจารย์ ดร. จักรพันธ์  
ประธานคณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

โทรศัพท์ / โทรสาร 0 3570 9097

อีเมล: rdi@rmutsb.ac.th

http://www.ruscon.rmutsb.ac.th





## การประชุมวิชาการระดับชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2  
และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการ  
ภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ครั้งที่ 3



60 หมู่ 3 ต.สายเอเชีย (กรุงเทพฯ - นครสวรรค์) ต.หันตรา  
อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000  
โทรศัพท์ 035 709 097 แฟกซ์ 035 709 097

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายจักรพันธุ์ แก้วกัญญา
วัน เดือน ปีเกิด	31 สิงหาคม 2513
ที่อยู่	301/1 ถนนเพชรเกษม ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี
การศึกษา	ปริญญาตรีอุตสาหกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรโยธา บริษัทเอกชนฯ พ.ศ. 2538 ถึง พ.ศ. 2541 ครู วิทยาลัยเทคนิคนครปฐม พ.ศ. 2541 ครูชำนาญการ หัวหน้าแผนกวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคนครปฐม ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	08-1946-2551
อีเมล	klee79const@gmail.com

