กำลังอัดแกนเดียวของดินผสมผิวทางแอสฟัลต์ที่นำกลับใช้ใหม่และปรับปรุงด้วยซีเมนต์

นายอนิรุทธิ์ สุขแสน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT-STABILIZED SOIL AND RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)

Aniroot Suksan

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2013

กำลังอัดแกนเดียวของดินผสมผิวทางแอสฟัลต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่และปรับปรุงด้วยซีเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
ประธานกรรมการ

_____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____

(อ. ดร.จิระยุทธ สืบสุข)
กรรมการ

_____

(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)
กรรมการ

_____

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ)
กรรมการ

_____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

_____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อนิรุทธิ์ สุขแสน : กำลังอัดแกนเดียวของดินผสมผิวทางแอสฟัลต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่และปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT-STABILIZED SOIL AND RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP))
อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข, 75 หน้า.

งานวิจัยนี้เสนออิทธิพลของปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ต่อพฤติกรรมการบดอัด กำลังอัดแกนเดียว (q_u) ของดินผสมผิวทางแอสฟัลต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed asphalt pavement, RAP) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ การบดอัดและการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวได้ถูกศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมต่างๆ เมื่อปริมาณ RAP ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำเหมาะสมสำหรับการบดอัดมีแนวโน้มลดลงจนถึงจุดเหมาะสมที่ดินต่อ RAP เท่ากับ 50/50 เมื่อปริมาณ RAP มากกว่าจุดเหมาะสม หน่วยน้ำหนักแห้งจะลดลงตามปริมาณ RAP ที่เพิ่มขึ้น ปริมาณ RAP ในวัสดุผสมมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียด ตลอดจนกำลังประลัยภายใต้การทดสอบการรับแรงอัดแกนเดียว การลดลงของกำลังอัดและความแกร่งของวัสดุผสมสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณ RAP สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณซีเมนต์นั้น การพัฒนากำลังอัดของดินผสม RAP สามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วน คือ โซน Soil/RAP-cement interaction โซน Cement-soil/RAP interaction และโซน Inert เมื่อปริมาณแอสฟัลต์เพิ่มขึ้น กำลังอัดแกนเดียวลดลงเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลดินและ RAP กับซีเมนต์เชื่อมประสานลดลง Asphalt fixation point เป็นจุดจำกัดของปริมาณแอสฟัลต์ ซึ่งแบ่งระหว่างโซน Inert และโซน Deterioration Asphalt fixation point สำหรับการศึกษานี้ คือ ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากับร้อยละ 3.5 (หรืออัตราส่วนดินต่อ RAP เท่ากับ 50/50) กฎกำลังอัดของดินผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ถูกเสนอในความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ปรับปรุง ($w/C(1\text{-}kAS)$) เมื่อ AS คือ ปริมาณแอสฟัลต์ และ k คือ ค่าคงที่ของวัสดุ ซึ่งควบคุมปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและ RAP กฎกำลังอัดแบบเอกภาพสำหรับดินผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ถูกเสนอในรูปแบบฟังก์ชันกำลัง [$q_{28} = A^*/(w/C(1\text{-}kAS))^{B^*}$] เมื่อกำลังที่อายุบ่มใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการทั่วไป [$q_D/(q_{28}*\exp^{AS})=a^*+b^*\ln D$] กำลังอัดเป้าหมายที่อายุบ่มใดๆ สามารถประมาณได้โดยความสัมพันธ์ที่นำเสนอนี้ เมื่อปริมาณแอสฟัลต์มีค่าต่ำกว่า Asphalt fixation point สมการที่นำเสนอ

มีประโยชน์ในการประมาณกำลังอัดของดินผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการที่สัดส่วนผสม ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำ และอายุบ่มต่างๆ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2556 ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษา_____

ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม_____

ANIROOT SUKSAN : UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT-STABILIZED SOIL AND RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) . THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 75 PP.

UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH/LATERITIC SOIL/RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT/CEMENT STABILIZATION

This research attempts to investigate the influence of soil-water content, cement content, RAP content and material gradation on the compaction behavior, unconfined compressive strength of cement treated soil-RAP mixture. The laboratory investigations performed were compaction and unconfined compression tests of cement treated soil-RAP mixture under different mix proportions. With an increase in RAP content, the OMC tends to decrease, up to the optimum gradation with 50/50 soil/RAP ratio. The reduction in the maximum dry density is associated with an increase in the RAP content, more than the optimum point. The RAP content in the mixed materials plays a significant role in the stress-strain behavior and ultimate strength under unconfined compression test. The reduction in strength and stiffness of the mixed materials is associated with an increase in RAP content. For strength versus cement content relationship, the strength development of soil-RAP mixture is classified into three zones. Those are the soil/RAP-cement interaction, cement-soil/RAP interaction and inert zones. For strength versus asphalt content relationship, as the asphalt content increases, the unconfined compressive strength decreases due to a reduction in bonding between the solid particles (soil and RAP) and cement binder.

Asphalt fixation point is defined as the limit point of asphalt content that separates the inert from the deterioration zones. An asphalt content of 3.5% (50/50 soil/RAP ratio) was found to be the asphalt fixation point in this investigation. The strength law of cement treated soil-RAP mixture has been presented in the relationship between q_u and modified soil-water/cement ratio [$w/C(1\text{-}kAS)$], where AS is the asphalt binder content and k is a material constant, controlling the cement-RAP interaction. The unique strength law for cement treated soil-RAP mixture is proposed in the power function form [$q_{28} = A^*/(w/C(1\text{-}kAS))^{B^*}$]. When the strength at any curing time is calculated by the generalized function [$q_D/(q_{28}*\exp^{AS})=a^*+b^*\ln D$]. The target strength at any curing time of cement treated soil/RAP mixture can be predicted by the proposed strength equation if and when the asphalt content is lower than the asphalt fixation point. The proposed strength equation is useful for assessing the laboratory strength of cement treated soil/RAP mixtures under various mixed proportions, cement contents, water contents, and curing times.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Civil Engineering
Academic Year 2013

Student's Signature_____
Advisor's Signature_____
Co-Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ อันได้แก่

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำปรึกษาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.จิระยุทธ สืบสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือ สถานที่ และบุคคลากรในการวิจัย และได้ช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวิฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สละเวลาอันมีค่าของท่านในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.อภิชิต คำภาหล้า สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา สำหรับคำแนะนำทางวิชาการที่มีประโยชน์ตลอดการดำเนินการวิจัย

กลุ่มนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่เป็นกำลังสำคัญในการทดสอบในห้องปฏิบัติการตลอดการวิจัยให้เสร็จลุล่วงตามกำหนดเวลา

ท้ายนี้ คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ไปได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

อนิรุทธิ์ สุขแสน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ค

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ญ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ 4

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยซีเมนต์ 5

2.2 โครงสร้างของดินซีเมนต์ 8

2.3 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของดินที่ปรับปรุงโดยซีเมนต์ 9

2.4 การนำวัสดุเก่ามาใช้ใหม่ 14

2.5 คุณสมบัติทั่วไปของแอสฟัลต์ในงานถนนลาดยาง 16

3 วิธีการดำเนินการวิจัย 19

3.1 การเก็บและการเตรียมตัวอย่าง 19

3.2 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ 22

3.3 การเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบ 22

3.4 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว 23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล 25

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ 25

4.1.1 ดัชนีคุณสมบัติและการกระจายขนาดคละ 25

4.1.2 กราฟการบดอัด 26

4.2 พฤติกรรมทั่วไปของวัสดุดินซีเมนต์ผสม RAP ภายใต้การรับแรงอัดแกนเดียว 29

4.3 ผลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดและโซนการปรับปรุง 32

4.4 การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่ม 33

4.5 ผลของปริมาณความชื้นต่อการพัฒนากำลังอัด 38

4.6 ผลของปริมาณยางแอสฟัลต์ต่อกำลังอัด 44

4.7 กฎกำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ 45

4.8 กฎการพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่ม 48

4.9 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ 57

5 บทสรุป 59

5.1 สรุปผลงานวิจัย 59

5.1.1 อิทธิพลของปริมาณแอสฟัลต์ ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ต่อการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสมระหว่างดินผสม RAP 59

5.1.2 พฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดภายใต้การรับแรงอัดแกนเดียวและการพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่ม 60

5.1.3 สมการทำนายกำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP 60

5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป 61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง 62
ภาคผนวก 66
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 67
ประวัติผู้เขียน 75

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ข้อเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ของ Cold recycling process กับ Conventional method (Wirtgen, 1992) 15

3. 1 จำนวนตัวอย่างทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินผสม RAP เปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักดินแห้ง 21

3.2 จำนวนตัวอย่างทดสอบการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดิน ผสม RAP เทียบกับปริมาณซีเมนต์ 21

3.3 จำนวนตัวอย่างทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินผสม RAP 22

4.1 ตารางจำแนกอัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด ปริมาณความชื้นเหมาะสม และชนิดของดินตามระบบ USCS 28

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.2 ลักษณะทั่วไปของเครื่องจักรในงาน Pavement recycling (A.A.Loundon & Partner Consulting Engineers, 1995) 2

1.1 ขยะผิวทางที่รื้อจากโครงการซ่อมถนนลาดยางโครงการซ่อมแซมจากอุทกภัยปี 2554 (Suebsuk et al., 2013) 3

2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell และ El Jack, 1966) 9

2.2 โมดูลัสการคืนตัวของตัวอย่าง SSDA และ SSGDA ที่ผ่านการอบช่วงสั้นและส่วนผสมเท่ากับ 6% (Meor and Teoh, 2008) 18

2.3 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างทดสอบจาก 5 ภาคของประเทศไทย (Phromsorn et al., 2003) 18

3.1 แผนการดำเนินงานตลอดการวิจัย 20

3.2 เครื่องอัดตัวอย่างด้วยกระบอกอัดตัวอย่าง 23

3.3 เครื่องทดสอบกำลังอัดแกนเดียว 24

4.1 การกระจายขนาดคละของดินลูกรังและ RAP 25

4.2 การกระจายขนาดคละของดินลูกรังผสม RAP ที่ปริมาณต่างๆ 26

4.3 กราฟการบดอัดเปรียบเทียบระหว่างดินลูกรังและ RAP 27

4.4 กราฟการบดอัดของดินลูกรังผสม RAP ที่ปริมาณส่วนผสมต่างๆ 28

4.5 พฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงอัดของวัสดุ 29

4.6 พฤติกรรมของวัสดุดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ภายใต้การรับแรงอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ อายุบ่ม 28 วัน 30

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์อายุบ่ม 28 วัน ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 70/30 และ 30/70 31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่างๆ 32

4.9 การพัฒนากำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ 33

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์บดอัดที่ OMC 34

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มของดินลูกรัง RAP และซีเมนต์บดอัดที่ด้านแห้งของ OMC 36

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มของดินลูกรัง RAP และซีเมนต์บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC 37

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นต่างๆ 39

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นของดินลูกรังต่อ RAP 30/70 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากันในปริมาณซีเมนต์ต่างๆ 41

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและหน่วยน้ำหนักแห้งของดินลูกรังต่อ RAP 30/70 ที่ปริมาณความชื้นเท่ากันในปริมาณซีเมนต์ต่างๆ 41

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นของดินลูกรังต่อ RAP 50/50 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากันในปริมาณซีเมนต์ต่างๆ 42

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและหน่วยน้ำหนักแห้งของดินลูกรังต่อ RAP 50/50 ที่ปริมาณความชื้นเท่ากันในปริมาณซีเมนต์ต่างๆ 42

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นของดินลูกรังต่อ RAP 70/30 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากันในปริมาณซีเมนต์ต่างๆ 43

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและหน่วยน้ำหนักแห้งของดินลูกรังต่อ RAP 70/30 ที่ปริมาณเท่ากันในปริมาณซีเมนต์ต่างๆ 43

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณแอสฟัลต์ 45

4.21 แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด (Horpibolsuk et al., 2006) 46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (*w/C*) ของดินลูกรังผสม RAP ที่ปริมาณต่างๆ 47
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่ปรับปรุงแล้วของดินลูกรังผสม RAP ที่อายุบ่ม 28 วัน 48
4.24 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ OMC 49
4.25 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC 52
4.26 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC 56
4.27 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ OMC 57
4.28 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดแกนเดียวจากห้องปฏิบัติการและกำลังอัดจากสมการทำนายกำลัง อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP 80/20 ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ 58

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\gamma_{d,\max}$	=	หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด
AS	=	ปริมาณแอสฟัลต์
ASTM	=	Amarican Society for Testing Materials
C	=	ปริมาณซีเมนต์ (Cement Content)
CAH	=	Calcium Aluminate Hydrate
CSH	=	Calcium Silicate Hydrate
D	=	อายุบ่ม
E	=	พลังงานบดอัด (Energy)
exp	=	ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล
GP	=	กรวดที่มีขนาดคละไม่ดี (Poorly graded gravel)
GP,SP	=	กรวดที่มีขนาดคละไม่ดีและทรายที่มีขนาดคละไม่ดี (Poorly graded gravel and poorly graded sand)
LL	=	ขีดกำกัดเหลว
OMC	=	ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum moisture content)
PI	=	ดัชนีพลาสติก
PL	=	ขีดจำกัดพลาสติก
RAP	=	ผิวทางแอสฟัลต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed asphalt pavement)
UCS	=	กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)
SC	=	ดินทรายปนดินเหนียว (Clayey sand)
SW-SC	=	ดินทรายที่มีขนาดคละดีและดินเหนียวปนดินทราย (Well graded sand - clayey sand)
USCS	=	Unified Soil Classified System
V_v/V_{ci}	=	ปริมาตรช่องว่างต่อซีเมนต์ (Void/cement ratio)
w_c/C	=	ปริมาณน้ำในดินเหนียวต่อซีเมนต์ (Clay-water/cement ratio)
w_i	=	ปริมาณน้ำเริ่มต้น
w_n	=	ปริมาณน้ำ

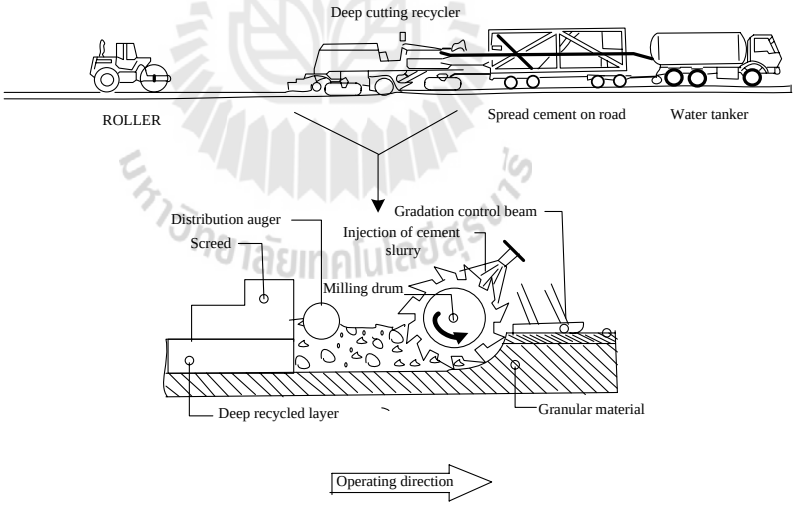
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การคมนาคมขนส่งเป็นระบบสาธารณูปโภคพื้นฐานที่สำคัญยิ่งต่อการพัฒนาประเทศทั้งทางน้ำ ทางอากาศ และทางบก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขนส่งทางบกเป็นที่นิยมแพร่หลายและเหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศของประเทศไทย การขนส่งทางบกมีความสะดวกในการก่อสร้างตลอดจนมีประสิทธิภาพสูงในการใช้งาน อีกทั้งสามารถก่อสร้างได้ครอบคลุมหลากหลายภูมิประเทศตลอดจนสามารถรองรับต่อความต้องการขยายการตัวทางเศรษฐกิจได้อย่างดี ประเทศไทยโดยกรมทางหลวงเป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบทางหลวงสายหลักของประเทศ ปัจจุบัน (พ.ศ.2556) กรมทางหลวงมีถนนในความรับผิดชอบเป็นระยะทาง 63,200 กิโลเมตร โดยแบ่งออกเป็นผิวทางลาดยาง 57,300 กิโลเมตร ถนนผิวทางคอนกรีตประมาณ 5,700 กิโลเมตรและถนนลูกรังอีกประมาณ 200 กิโลเมตร ถนนผิวทางลาดยางเป็นที่นิยมและใช้งานอย่างกว้างขวางมาก เนื่องด้วยเพราะต้นทุนในการก่อสร้างที่ต่ำกว่าผิวทางคอนกรีตในระยะทางที่เท่ากัน โดยปกติแล้วผิวทางทั่วไปเมื่อผ่านการใช้งานไปช่วงเวลาหนึ่งจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการใช้งานหรือเสียหายด้วยภัยพิบัติทางธรรมชาติทำให้ต้องมีการซ่อมแซมตามอายุการใช้งาน ในแต่ละปีหน่วยงานที่ดูแลต้องเตรียมงบประมาณไว้ซ่อมแซมผิวทางเกือบครึ่งหนึ่งของงบประมาณที่ได้รับ โดยทั่วไปแล้วการซ่อมแซมถนนหรือการรื้อเพื่อทำผิวทางใหม่จะทำการรื้อผิวทางเก่าที่หมดอายุหรือชำรุดจนถึงชั้นวัสดุชั้นพื้นทางเก่าออกก่อนที่จะซ่อมแซมโดยแทนที่ชั้นพื้นทางด้วยวัสดุใหม่ทั้งหมด อีกวิธีหนึ่งซึ่งนิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การนำวัสดุผิวทางเก่านำกลับมาใช้ใหม่บางส่วนโดยทำการบดอัดผสมกับชั้นพื้นทางเดิมเพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางใหม่และอาจปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติมซีเมนต์เพื่อเพิ่มกำลัง วิธีการนี้เรียกว่า “ การนำวัสดุผิวทางกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling)” ลักษณะการทำงานของการทำ Pavement Recycling แสดงดังรูปที่ 1.1 ผิวทางที่ถูกรื้อถอนออกบางส่วนถูกนำกลับไปใช้ในการผลิตผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ แต่ส่วนที่เหลือจะนำไปกองไว้ในสถานที่เก็บเป็นขยะที่ไม่ได้ใช้งานอีกต่อไป ในแต่ละปีมีการซ่อมผิวทางโดยการรื้อออกหลายกิโลเมตร ซึ่งก็หมายถึงจะมีขยะผิวทางเก่าที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก รูปที่ 1.2 แสดงกองผิวทางที่รื้อจากการซ่อมถนนลาดยาง ซึ่งเสียหายจากมหาอุทกภัยปี 2554 ณ ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 311 อ.เมือง จ.ลพบุรี

ผิวทางจากการซ่อมถนนลาดยางดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในงานวิศวกรรมได้ โดยเรียกว่า “Recycled asphalt pavement” หรือ RAP การนำ RAP มาใช้ในงานวิศวกรรมโดยตรง อาจประสบปัญหาการใช้เนื่องจาก RAP บดอัดได้ไม่ดีและมีกำลัดอัดต่ำแม้จะปรับปรุงด้วยซีเมนต์แล้วก็ตาม เนื่องจากขนาดคละไม่ดีและยางแอสฟัลต์ที่มีอยู่ในส่วนผสม อย่างไรก็ตามข้อดีของ RAP คือ มีวัสดุคัดเลือกชั้นดี เช่น หินคลุก เป็นส่วนผสมหลัก เมื่อนำมาผสมกับวัสดุในท้องที่ เช่น ดินลูกรัง ซึ่งมักเป็นวัสดุที่มีปัญหาการใช้งานสำหรับเป็นวัสดุชั้นพื้นทางเนื่องจากมีส่วนละเอียดเกินกว่ามาตรฐาน วัสดุผสมระหว่างดินลูกรังและ RAP จะมีขนาดคละที่ดีขึ้นซึ่งส่งผลต่อการบดอัดที่ดีและการพัฒนากำลังอัดที่ดีเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ซึ่งเพียงพอที่จะใช้งานเป็นชั้นพื้นทางได้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของอัตราส่วนผสมระหว่างดินและ RAP ต่อกราฟการบดอัด อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำและหน่วยน้ำหนักดินแห้ง การพัฒนากำลังอัดที่สัดส่วนผสมของดินต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ พฤติกรรมการรับแรงอัด ตลอดจนความคงทนของวัสดุผสม การศึกษาทำโดยใช้การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่มีส่วนผสมระหว่างดินกับ RAP และซีเมนต์ที่ปริมาณต่างๆ เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมของวัสดุผสมและการพัฒนากำลังอัดที่จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบใช้งานวัสดุรีไซเคิลชนิดนี้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป



รูปที่ 1.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องจักรในงาน Pavement recycling

(A.A.Loundon & Partner Consulting Engineers, 1995)

รูปที่ 1.2 ขยะผิวทางที่รื้อจากโครงการซ่อมถนนลาดยางโครงการซ่อมแซมจากอุทกภัยปี พ.ศ. 2554 ทางหลวงหมายเลข 311 อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี (Suebsuk et., 2013)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณ RAP ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ต่อ พฤติกรรมการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสมระหว่างดินผสม RAP

1.2.2) ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาบ่ม

1.2.3) เพื่อเสนอสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1) ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ตราช้าง

1.3.2) เตรียมวัสดุผสมที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินต่อผิวทางแอสฟัลต์เท่ากับ 100/0 90/10 80/20 70/30 60/40 50/50 40/60 30/70 20/80 และ0/100 โดยน้ำหนัก ปริมาณซีเมนต์แปรผันที่ 0 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณวัสดุผสมโดยน้ำหนัก ปริมาณเริ่มต้นของตัวอย่างเท่ากับ 0.6 0.8 1.0 1.2 และ1.4 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum moisture content, OMC)

1.3.3) ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, UCS) หาค่าหน่วยแรงและความเครียดสูงสุดของแต่ละตัวอย่าง

1.3.4) RAP ที่ใช้งานวิจัยนี้เป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจากทางหลวงหมายเลข 224 อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.นครราชสีมา กม. 1+000 ถึง 2+000 มีปริมาณยางแอสฟัลต์ประมาณ 4 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง

1.3.5) การบ่มตัวอย่างกระทำที่อุณหภูมิห้องทดลอง อายุบ่มของตัวอย่างก่อนทดสอบได้แก่ 1 7 14 28 และ 60 วัน ตามลำดับ

1.3.6) ขนาดตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร จำนวน 5 ตัวอย่าง ต่อ 1 ส่วนผสม

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ทราบถึงพฤติกรรมการรับกำลังอัดแกนเดียวของดินผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักดินแห้งต่อการบดอัด การพัฒนากำลังอัดตามเวลาของดินผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ องค์ความรู้ดังกล่าวสามารถนำมาใช้อธิบายการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ผสม RAP เพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการออกแบบชั้นพื้นทางหรือรองพื้นทางได้ต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยซีเมนต์

Lambe et al. (1959) อธิบายว่าซีเมนต์เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium silicate (C_3S), Dicalcium silicate (C_2S), Tricalcium aluminate (C_3A), Tetracalcium aluminate ferrite (C_4AF) เมื่อผสมกับน้ำและดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ได้สารประกอบ Calcium silicate hydrate (CSH), Calcium aluminate hydrate (CAH) และ Hydrate lime ที่แยกตัวออกมา ขณะเกิดปฏิกิริยา สารประกอบ CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานเมื่อน้ำระเหยออกไป นอกจากนั้น Released Hydrate Lime ที่เกิดขึ้นในขบวนการดังกล่าวยังทำให้ความเป็นด่างเพิ่มขึ้นทำให้ Colloid gel หรือ Cement gel ที่ประกอบไปด้วย CSH และ CAH เกิดการรวมตัวแล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ในดินเม็ดหยาบ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันการยึดเกาะกันของเม็ดจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่ว่า Cement paste จะไม่อุดเต็มช่องว่างอนุภาคของเม็ดดิน แรงเชื่อมยึดติดจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางด้าน Mechanical interlock ของอนุภาคเม็ดดินที่มี CSH และ CAH เกาะอยู่ที่ผิวอนุภาคของเม็ดดิน

สำหรับดินเม็ดละเอียดแรงยึดเกาะกันจะประกอบไปด้วยแรงทางด้าน Mechanical interlock และ Chemical cementation การยึดเกาะทางด้าน Chemical cementation นั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ตามผิวของเม็ดดิน โดยมีน้ำเป็นตัวกลาง การเกิดปฏิกิริยาทำให้ได้สารประกอบ CSH และ CAH เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เม็ดดินเกิดการเชื่อมกัน Davidson (1961) กล่าวว่า หลังการผสมซีเมนต์กับดินเหนียวชื้นจะทำให้ค่าพลาสติก (Plasticity) ลดลง เหตุผลน่าจะมาจากการแยกตัวของ Calcium ion ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กลไกที่เกิดขึ้นถ้าไม่มาจาก Cation exchange ถึงจะมาจากการจับกลุ่มเพิ่มขึ้นของ Cation ในดินเหนียว กระบวนการทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าที่มีอยู่อย่างหนาแน่น บริเวณอนุภาคดินเหนียว ส่งผลให้อนุภาคของดินเหนียวรวมตัวกันและตกตะกอนเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นนี้ทำให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติคล้ายดินตะกอนคือมีค่าค่าพลาสติกต่ำ Herzog and Mitchell (1963) กล่าวถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันว่าเป็นการเกิดสารประกอบ CSH

และ CAH ซึ่งเป็นปฏิกิริยาในช่วงแรกส่วนปฏิกิริยาช่วงที่สองซึ่งต้องใช้เวลานานซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่าง Calcium ion ที่เกิดจาก Released hydrated lime ของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ในเม็ดดิน เป็นผลทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการบ่ม ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยาพอสโซลานิค (Pozzolanic) Moh (1965) ได้ศึกษาเรื่องปฏิกิริยาของแร่ประกอบดินเหนียวกับซีเมนต์และสารเคมีผสมเพิ่มจำพวกโซเดียม โดยปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีดังนี้

$$\text{Cement} + H_2O \text{ ----------> } CSH + CAH + Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

$$Ca(OH)_2 \text{ ----------> } Ca_2 + 2(OH) \quad (2.2)$$

$$Ca^{2+} + 2(OH)^- + SiO_2(\text{Soil Silica}) \text{ ----------> } CSH \quad (2.3)$$

$$Ca^{2+} + 2(OH)^- + Al_2O_3(\text{Soil Alumina}) \text{ ----------> } CAH \quad (2.4)$$

Pendola et al. (1969) ได้อธิบายการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ว่าเป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีระหว่างซีเมนต์ น้ำและดินซึ่งประกอบด้วยกลไก 4 ชนิด คือ

1) Hydration of cement เป็นกระบวนการที่สำคัญ โดยขณะที่ซีเมนต์รวมตัวกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดินและก่อรูปร่างเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องมากบ้างน้อยบ้างตามการคละขนาดของเม็ดดิน กระบวนการนี้ส่งผลทำให้เม็ดดินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายที่กล่าวมาข้างต้นนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ถูกปรับปรุงแล้วยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดินทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดินรวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบ ๆ อีกด้วย

2) Cation exchange การลดลงของค่าพลาสติกของดินหลังจากการผสมซีเมนต์กับดินประเภทมีความเชื่อมแน่นที่มีความชื้น นักวิจัยในปัจจุบันเชื่อว่าเกิดจากการเปลี่ยน Cation หรือการรวมตัวกันของ Cation บนผิวของเม็ดดิน ปฏิกิริยาที่ว่าจะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังการผสมซีเมนต์

3) Carbonation คือขบวนการเชื่อมแน่นจากปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับ Lime ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด Calcium carbonate ส่งผลให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มมากขึ้น

4) Pozzolanic reaction คือกระบวนการระหว่าง Free lime ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica หรือ Alumina ที่มีอยู่ในดิน กระบวนการนี้ทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้นแต่ปฏิกิริยานี้จะต้องอาศัยระยะเวลานานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุสูงขึ้น

Terrel et al. (1979) ได้อธิบายปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ว่า การผสมซีเมนต์กับดินเม็ดหยาบซีเมนต์เพสจะทำหน้าที่ยึดอนุภาคเม็ดดินเข้าด้วยกัน โดยยึดเกาะที่ผิวระหว่างซีเมนต์เจล และผิวอนุภาค ส่วนดินเม็ดละเอียดแร่ดินเหนียวที่สลายออกมาในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า *pH* สูง จะทำปฏิกิริยากับ Free lime หรือ Hydrate lime ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด CSH และ CAH เป็นสารเชื่อมประสาน

2.2 โครงสร้างของดินซีเมนต์

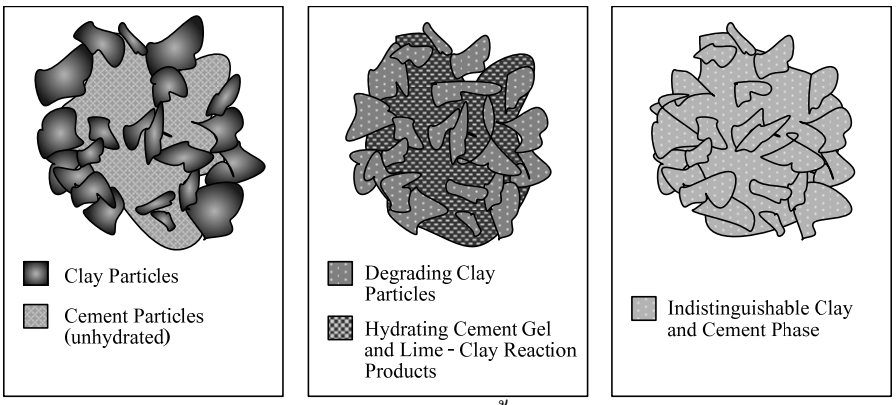
Czernin (1962) กล่าวว่าหลังจากที่ผสมซีเมนต์กับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันทำให้เกิดสารประกอบ CSH ในรูปของเจลขึ้นในส่วนผสมของซีเมนต์และน้ำ การบดอัดอนุภาคของปูนซีเมนต์มิได้ผสมกับดินเพียงอย่างเดียว แต่จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันด้วย

Mitchell and El Jack (1966) ได้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบและโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.1 โดยแบ่งเป็น 3 ระยะดังนี้

1) ภายใต้การบดอัด ช่วงนี้เป็นช่วงที่อนุภาคของปูนซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ ไฮเดรชันแต่อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเข้าผสมกับอนุภาคของดิน [ดูรูปที่ 2.1 (a)]

- ภายใต้การบ่มในระยะเวลาสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อย Lime ออกมาทำปฏิกิริยากับ Soil silica และ Soil alumina ที่มีอยู่ในดินทำให้เกิดการแยกตัวของสารทั้งสอง จากนั้นซีเมนต์เจลและสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาจะแทรกซึมไปตามอนุภาคของดิน [ดูรูปที่ 2.1 (b)]

- ภายใต้การบ่มในระยะเวลายาว จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์อันมีผลทำให้ซีเมนต์เจลและขอบเขตของการแทรกซึมกระจายไปทั่วก้อนดินซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม [ดูรูปที่ 2.1 (c)]



(a) หลังบดอัดเสร็จ (b) หลังระยะบ่มสั้นๆ (c) หลังระยะบ่มนานๆ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and El Jack, 1966)

2.3 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของดินที่ปรับปรุงโดยซีเมนต์

2.3.1) ปริมาณซีเมนต์และประเภทของซีเมนต์

Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์โดยนำดินสามชนิดคือ Loamy sand, Medium clay และ Silty clay loam มาทดลองผสมซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 6 ถึง 30 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 1 ปี และผ่านสภาพภูมิอากาศ 2 แบบ คือ Wet-dry และ Freeze-thaw ตั้งแต่ 12 รอบถึง 96 รอบ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินที่มีขนาดเม็ดเล็ก ดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่สูงจะมีกำลังอัดน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำและค่าความคงทนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ นอกจากนั้น Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดินสองชนิดคือ Silty clay loam และ Sandy loam มาผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 พบว่าดินที่ผสมด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังที่สูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่ซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะไม่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินทุกชนิด เช่น ดิน Sandy loam ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังอัดเป็นสองเท่าของดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่ม 7 วันและเป็น 1.4 เท่า ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่สำหรับดิน Silty clay loam เมื่อผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินซีเมนต์ได้รับการศึกษาอย่างจริงจังโดย Terashi et al. (1979) และต่อมาก็มีการศึกษาด้านนี้มากขึ้นเรื่อยๆ เช่น Kawasaki et al. (1981) และ Nontananandh and Yupakorn (2002) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้สรุปว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ คือ ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ สำหรับงานวิจัยในประเทศไทย Ruenkrairergsa (1982) อธิบายว่าปริมาณ

ซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ อัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน พันธะเชื่อมประสานในดินเม็ดหยาบจะแข็งแรงกว่าในดินเม็ดละเอียด ดินที่มีดินเหนียวมากจะให้กำลังอัดต่ำ ดังนั้นปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจึงควรหาจากการทดลองในห้องทดลอง

Lade and Overton (1989) ได้ศึกษาผลของพันธะเชื่อมประสาน (Cementation) ในดินเม็ดหยาบภายใต้ความหนาแน่นที่เท่ากัน ปริมาณน้ำที่ผสมเท่ากัน และแรงดันรอบข้างต่ำ แต่แตกต่างกันที่ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม พบว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังดึง และค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (Internal friction angle) จะเพิ่มขึ้น Clare and Pollard (1951) ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดิน 3 ชนิดในประเทศอังกฤษมาผสมกับซีเมนต์ พบว่าที่อายุบ่ม 24 ชั่วโมงดินซีเมนต์จะมีกำลังอัดสูงมากเมื่อผสมดินกับซีเมนต์ประเภท High-alumina ขณะที่ซีเมนต์ประเภทอื่นต้องมีอายุการบ่ม 5 วัน และถ้าใช้ซีเมนต์ประเภท British rapid hardening ซึ่งเทียบได้กับซีเมนต์ประเภทที่ 3 พบว่าที่อายุการบ่มเท่ากัน ค่ากำลังคราก (Yield strength) ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมาก Massachusetts Institute of Technology (1954) ได้นำดินตะกอนปนทรายและดินเหนียว (Clayey sandy silt) ในรัฐไอโอวามาผสมกับซีเมนต์ และพบว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะมีกำลังอัดสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 ประมาณ 1.5 เท่า และ1.3 เท่า ที่ระยะบ่ม 7 วัน และ 28 วันตามลำดับ Davidson and Bruns (1960) ได้รายงานผลเกี่ยวกับกำลังอัด โดยวิธีทดสอบ Freeze-thaw ของดินทราย ดินตะกอน และดินเหนียว บริเวณรัฐไอโอวา ประเทศสหรัฐอเมริกา และสรุปว่าการใช้ซีเมนต์ประเภท 3 ในการก่อสร้างถนนจะประหยัดกว่าใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพราะว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งต้องใช้เวลาในการบ่มอย่างน้อย 7 วัน แต่ว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่าทำให้ได้เปรียบเรื่องระยะเวลาในการก่อสร้าง

Horpibulsuk and Miura (2001) และ Miura et al. (2001) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์สามารถรวมไว้ในตัวแปรตัวเดียวได้ ตัวแปรนี้เรียกว่า Clay-water/cement Ratio (w_c / C) และถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักแห้ง และ Horpibulsuk and Miura (2001) ยังได้สร้างสมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น ระยะเวลาบ่มต่างๆ โดยอาศัยผลการทดสอบเพียงค่าเดียว

Consoli et al. (2007) แสดงให้เห็นว่าปริมาตรช่องว่างและปริมาตรซีเมนต์สามารถนำมารวมกันเป็นตัวแปรเดียวที่เรียกว่า Viod/cement Ratio (V_v/V_{ci}) ตัวแปรดังกล่าวสามารถนำมาสร้างสมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาตรช่องว่างและปริมาตรซีเมนต์ต่างๆ

2.3.2) ชนิดของดิน

Winterkorn and Chandrasekharn (1951) รายงานผลการทดสอบดินลูกรังผสมซีเมนต์ว่าจะได้ผลดีหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่ผสมอยู่ในดิน และ Degree of latterization ของดินลูกรัง Reinhold (1955) ได้นำทรายมาผสมกับดินเหนียว โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสมตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดกับปริมาณดินเหนียว จากการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าลดลง Redus (1958) ได้นำดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (Base course) ของสนามบินต่างๆ ซึ่งมีอายุการใช้งานนานหลายปีมาทำการทดสอบหาค่าพิกัดอัตตะเบิร์ก (Atterberg's limit) พบว่าปริมาณซีเมนต์มีความสัมพันธ์ต่อการลดลงของดัชนีพลาสติก กล่าวคือถ้าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมมากดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างรวดเร็ว และถ้าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมน้อยดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างช้าๆ นอกจากนี้ ระยะเวลาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก็มีผลต่อการลดลงของค่าดัชนีพลาสติก ผลการศึกษานี้ตรงกับผลการวิจัยของ Spangler and Patel (1949) ซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพลาสติกกับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันใน 1 ชั่วโมง

Norling and Peckard (1958) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณมวลรวมหยาบที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 โดยใช้ดิน 3 ชนิดคือ ทรายหยาบ ทรายละเอียด และทรายปนดินเหนียวผสมซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากัน แต่แปรผันมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 แล้วทำการทดสอบหากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน และพบว่า Loamy sand และ Fine sand loam จะมีกำลังสูงขึ้นเมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 ลดลง สำหรับ Coarse sand จะมีกำลังอัดลดลงเมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้นเกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด Davidson et al. (1962) ทำการทดลองโดยใช้ทรายผสมกับดินเหนียว ในอัตราส่วนทรายต่อดินเหนียว 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ดินเหนียวที่ใช้เป็นดินเหนียวจำพวกคาโอลิไนท์ (Kaolinite), อิลไลท์ (Illite) และมอนโมริลโอไนท์ (Montmorillonite) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวมากไป (เกินกว่า 25 เปอร์เซ็นต์) จะทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเด่นชัด โดยที่ดินเหนียวจำพวกมอนโมริลโอไนท์มีแนวโน้มว่าจะมีกำลังสูงกว่าดินเหนียวจำพวกคาโอลิไนท์ และจำพวกอิลไลท์

Moh et al. (1967) รายงานว่าดินลูกรังในประเทศไทยที่มีค่า PI ประมาณ 11 ถึง 19 เมื่อนำมาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 4 ถึง 7 จะให้ค่ากำลังอัดมากกว่า 852 กิโลปาสคาล ซึ่งเป็นข้อกำหนดของ British Road Research Laboratory ที่มีประสบการณ์ในการทดลองใช้ในแอฟริกาและยังเน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการบดอัดว่าถ้าค่าร้อยละของการบดอัดลดลงเพียงเล็กน้อยจะมีผลทำให้กำลังอัดลดลงอย่างเห็นเด่นชัด Bell (1976) พบว่าแร่ดินเหนียว Montmorillonite เมื่อทำปฏิกิริยากับ

ปูนขาวจะทำให้ Aqueous phase ลดลง ส่งผลให้สาร Cementitious ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะอยู่ในปูนขาวมีไม่เพียงพอต่อการแข็งตัว การแก้ไขโดย การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ลงไปเพื่อเพิ่ม Free lime ให้มากขึ้น โดยปกติการเพิ่มซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 15 จะทำให้ดินจำพวก Montmorillonite มีคุณภาพดีสามารถนำมาใช้งานได้

2.3.3) ปริมาณความชื้นขณะบดอัด

Felt (1955) และ Davidson et al. (1962) ศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อกำลังอัดและความชื้นกับน้ำหนักที่สูญเสียจากการทำ Wet-dry และ Freeze-thaw ได้ผลตรงกันคือ ปริมาณความชื้นและความหนาแน่นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรทำการบดอัดดินด้วยปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม ส่วนดินเหนียวควรบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อยจึงจะให้กำลังอัดสูงสุด Ruenkrairergsa (1982) ได้อธิบายว่าการนำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่บดอัดตามวิธีการของพร็อกเตอร์ (Proctor) มาใช้ในงานดินซีเมนต์นั้น พบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมนอกจากจะให้ความหนาแน่นสูงสุดแล้วยังทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์อีกด้วย สำหรับดินซีเมนต์ความหนาแน่นสูงสุดไม่จำเป็นว่าจะทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและความคงทนมากที่สุดเสมอไป จากการทดลองหาความคงทนด้วยวิธี Freeze-thaw ของดินตะกอนและดินเหนียวผสมซีเมนต์พบว่าความคงทนจะมีค่าสูงสุดเมื่อทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย การบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมจะทำให้ค่าความคงทนลดลง สำหรับดินทรายผสมซีเมนต์ความแข็งแรงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 3 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดินเหนียวเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อยจะให้ความแข็งแรงสูงสุด Lightsey et al. (1970) ได้รายงานว่าบางครั้งการบดอัดดินซีเมนต์ให้มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดก็ไม่ได้ทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงมากที่สุดเสมอไปเนื่องจากการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด จากการศึกษาดินตัวอย่าง 4 ชนิด ได้แก่ Silty loam, Sandy loam silt และ Silty clay loam บดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor test) ที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าและสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม เมื่อผสมเสร็จทิ้งไว้เป็นเวลา 0 2 4 และ 6 ชั่วโมงก่อนทำการบดอัด พบว่าปริมาณน้ำส่วนเกินที่ต้องการเพื่อให้ได้ความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์สูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดินและเวลาระหว่างการผสมควบคู่กับการบดอัด สำหรับดินเม็ดหยาบปริมาณน้ำที่เพิ่มในการบดอัดจะเพิ่มการหล่อลื่นระหว่างเม็ดดินทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความคงทนเพิ่มขึ้น ส่วนดินเม็ดละเอียดการเพิ่ม

ปริมาณน้ำในการบดอัดจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสมบูรณ์ขึ้นเป็นผลทำให้คุณสมบัติของดินซีเมนต์ดีขึ้นโดยที่ต้องไม่มีการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด

2.3.4) การบ่มดินซีเมนต์

Highway Research Board (1949) ได้รายงานเกี่ยวกับการรักษาความชื้นของดินผสมซีเมนต์ในสนามโดยการฉาบผิวทางใน 4 รัฐด้วย Bituminous seal 4 ชนิดคือ MC-2 RC-1 MC-3 และ Asphalt emulsion ว่าวัสดุฉาบผิวทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการเก็บรักษาความชื้นระหว่างการบ่ม 7 วัน ในสนามได้เป็นอย่างดี Clare and Pollard (1951) สรุปถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังของดินซีเมนต์ว่า ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วันจะสูงขึ้น 2 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ต่ออุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส การก่อสร้างที่ใช้ดินซีเมนต์ในพื้นที่ที่มีอากาศอบอุ่นจะให้กำลังอัดที่อายุ 3 เดือนแรกหลังการก่อสร้างสูงกว่าการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีอากาศหนาวกว่าร้อยละ 50 ถึง 100 Maner (1952) ได้ทดลองใช้วัสดุต่างๆได้แก่ Waterproof paper, Calcium chloride, RC-2 Asphalt, Tar และ Asphalt emulsion ในการบ่มพื้นทางดินซีเมนต์พบว่าวัสดุ Bituminous Asphalt ทั้ง 3 ชนิด และ Waterproof paper ใช้งานได้ผลดี นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นในอากาศมีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณความชื้นในดินซีเมนต์

Leadabrand (1956) นำดิน 2 ชนิด คือ Clayey sandy soil และ Silty soil มาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการเพื่อหากำลังอัดที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 5 ปี พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะคล้ายกับกำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุของดินซีเมนต์ และยังได้ทำการเจาะตัดดินซีเมนต์ในสนามจากโครงการก่อสร้างของรัฐต่าง ๆ 4 รัฐ ในประเทศสหรัฐอเมริกาโดยมีช่วงอายุตั้งแต่ 1 ถึง 20 ปีมาทดสอบหากำลังอัดพบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามสอดคล้องกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

Ng (1966) พบว่ากำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์จะแปรผันกับอุณหภูมิที่ใช้บ่ม กล่าวคืออุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 70 °F เป็น 100 °F กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 20 Wang and Huston (1972) รายงานว่าการลดอุณหภูมิในการบ่มจะทำกำลังอัดลดลงแต่จะเพิ่มความเครียดที่จุดวิบัติ ทั้งการทดสอบแรงดึง หรือแรงอัด Shackel and Lee (1974) ทำการศึกษาเรื่องการบ่มดินซีเมนต์โดยใช้ตัวอย่าง Artificial soil ซึ่งได้จากการนำ Uniform sand จากเมือง Botany รัฐ New south wales ประเทศออสเตรเลีย มาผสมกับ Comercial air-floated china clay (kaolin) ในอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก และผสมซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0 3 และ 8 ทำการบ่ม 2 ลักษณะ คือบ่มในอากาศที่อุณหภูมิคงที่ 20 °C และบ่มในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิคงที่ 20 °C โดยมีระยะบ่ม 0 1

3 9 23 44 และ 81 วัน จากนั้นทดสอบหาค่าการหดตัว หรือค่าการขยายตัว ค่ากำลังอัด ค่ากำลังดึง และวัดการกระจายตัวของโพรง (Pore size distribution) ของดินซีเมนต์จากการจำลองแท่งตัวอย่าง โดยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Mercury intrusion porosimeter พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มจะทำให้กำลังอัดและกำลังดึงเพิ่มขึ้น การบ่มในอากาศจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าการบ่มแบบชื้นและยังเพิ่มขนาดโพรง (Pore size) และปริมาตร (Pore volume) เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นด้วย ส่วนการบ่มแบบชื้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้นจะทำให้ขนาดโพรงลดลง

2.3.5) ระยะเวลาในการผสม

Marshall (1954) ศึกษาผลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างการผสมชื้น และการบดอัดที่มีผลต่อกำลังอัดของดินชนิดต่างๆ พบว่ากำลังอัดจะลดลงเมื่อเวลาการผสมนานขึ้น Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของการหน่วงเวลาต่อกำลังอัดและความคงทนโดยผสมให้นานขึ้น แล้วทิ้งไว้ก่อนบดอัด ศึกษาดิน 3 ชนิดคือ ดินกลุ่ม A-2 (LL = 26, PI = 11) ดินกลุ่ม A-4 (LL = 35, PI = 12) ดินกลุ่ม A-6-7 (LL = 47, PI = 26) พบว่า ดินทุกชนิดจะมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อหน่วงเวลาการผสมให้นานขึ้น การหน่วงเวลาการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราวจะมีผลเสียน้อยกว่าแบบหยุดผสมเลย Ingles and Metcalf (1972) ทำการทดสอบดิน 2 ชนิดคือ Medium clay และ Sandy gravel เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ในการผสมดินซีเมนต์ พบว่าเวลาการผสมที่นานขึ้น 1 ถึง 2 ชั่วโมง กำลังอัดจะลดลงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเวลาการผสมนานเกินกว่า 2 ชั่วโมง กำลังอัดของ Sandy gravel จะน้อยกว่า Medium clay เล็กน้อย Horpibulsuk et al. (2002) กล่าวว่าการที่กำลังของดินซีเมนต์ในสนามมีค่าต่ำกว่ากำลังของดินซีเมนต์ที่หาได้จากห้องทดลองมีสาเหตุจากความไม่สม่ำเสมอของการผสมดินซีเมนต์ในสนาม

2.4 การนำวัสดุเก่ามาใช้ใหม่

Gordon (1984) กล่าวถึงการใช้สารผสมเพิ่มเพื่อสร้าง Modified materials และ Bound modified materials โดยที่ Materials คือวัสดุที่เกิดจากการเติมสารผสมเพิ่มพอประมาณเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้น วัสดุประเภทนี้จะมีความต้านทานแรงดึงต่ำ Bound materials เป็นวัสดุที่เกิดจากการใส่สารผสมเพิ่มลงไปอย่างมากเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูง Kuhlman (1989) กล่าวไว้ว่า ได้มีการปรับปรุงถนนเก่าใน 12 รัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีผิวจราจรทำจากยางมะตอยโดยการนำผิวจราจรมาผสมกับซีเมนต์ แล้วใช้เป็นพื้นทางใหม่ในช่วงปี ค.ศ. 1942 ถึง 1958 ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 การปรับปรุงวัสดุเก่านี้ถูกเรียกว่า Recycling ในเวลาต่อมาวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้งานทั้งผิวจราจรยืดหยุ่นที่ชำรุดเสียหายและผิวจราจรคอนกรีตเก่าซึ่งพบว่าได้ผลดี Tabensky (1990) รายงานว่า Florida department

of transportation ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเก่าด้วยการผสมซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของถนนและ Orange country california ใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่นำกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้งกับถนนจำนวน 20 สายระหว่างปี 1950-1960 โดยใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 ถึง 7 โดยน้ำหนัก และทำผิวทางแบบแอสฟัลต์หนา 75 มิลลิเมตร ในรัฐ Arizona ได้มีการใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในการปรับคุณภาพวัสดุที่ผสมกันระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากับวัสดุชั้นล่างเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางวิ่งในสนามบิน 2 แห่งคือ Winslow municipal airport และ Mohave country airport

Wirtgen (1992) บันทึกว่า Cold recycling ใช้ในการทำชั้นพื้นทางไว้รองรับ Surface treatment หรือ Wearing course โดยทั่วไปจะใช้ความหนาประมาณ 200 ถึง 300 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของถนนที่ต้องการ ข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์ของ Cold in-place recycling เมื่อเปรียบเทียบกับ Conventional method ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ของ Cold recycling process กับ Conventional method (Wirtgen, 1992)

หัวข้อ	Conventional method	Cold recycling method
รถขุดและการขนส่ง	ต้องการ	ไม่ต้องการ
การขนย้ายรถขุด	ต้องการ	ไม่ต้องการ
การใช้รถขนย้ายวัสดุถนนเดิม	ต้องการ (ค่าใช่จ่ายสูง)	ไม่ต้องการ
สถานที่ทิ้งวัสดุ	ต้องการ (เป็นปัญหามาก)	ไม่ต้องการ
การใช้รถขนย้ายวัสดุถนนใหม่	ต้องการ (ค่าใช่จ่ายสูง)	ต้องการ (ในบางกรณี)
การตัดแต่งรูปในแต่ละชั้นทาง	ต้องการ (ค่าใช่จ่ายสูง)	ต้องการ (กรณีไม่มีเครื่องปู)
เครื่องจักรในการบดอัด	ต้องการ	ต้องการ
ระยะเวลาในการก่อสร้าง	ยาว	สั้น
ปัญหาการจราจร	มาก	น้อย

Walton (1995) บันทึกไว้ว่าการนำวัสดุเก่ามาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold in-place recycling) เป็นที่ยอมรับกันว่าประหยัดมาก และได้เริ่มมีการใช้เป็นมาตรฐานในปี ค.ศ. 1970 ในรัฐ Oregon New mexico Kansas และ Florida ต่อมาวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในหลายประเทศ เช่น ออสเตรเลีย อิตาลี รัสเซีย แคนนาดา เยอรมัน ฝรั่งเศส และอังกฤษ โดยใช้กับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำถึงปานกลางในปี ค.ศ. 1980 ปรากฏว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ในช่วง ดังกล่าวใช้ซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และยังใช้ Emulsion เป็นสารผสมเพิ่ม A.A. Loundon & Partner consulting engineers (1995) กล่าวว่า การก่อสร้างด้วยวิธี Cold in-place recycling ต้องมีการสำรวจออกแบบตามเงื่อนไขและตามสภาพถนนที่จะทำการก่อสร้างรวมทั้งประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่จะใช้งาน เพื่อที่จะสามารถวางแผนงานให้ได้ผลที่ดีที่สุด การก่อสร้างจะไม่ทำในขณะเปียกและหลีกเลี่ยงการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นที่ใช้ควรหาจากการทดลองซึ่งถ้าใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพระหว่างการบดอัดความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 75 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุที่ไม่ผสมเพิ่ม แต่ถ้าไม่ผสมซีเมนต์หรือไม่ผสมอะไรเลย ปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดต้องไม่เกินปริมาณความชื้นเหมาะสมและต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากการบดอัดและแต่งรูปเรียบร้อยแล้ว การบ่มเพื่อรักษาความชื้นทันทีซึ่งอาจใช้ยางแอสฟัลต์หรือวัสดุอย่างอื่นที่เหมาะสมก็ได้

Taha et al. (2002) ได้ทำการทดสอบการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP และพบว่าปริมาณความชื้นเหมาะและหน่วยน้ำหนักดินแห้งลดลงและกำลังอัดลดลงเมื่อเติมปริมาณ RAP มากขึ้น

2.5 คุณสมบัติทั่วไปของแอสฟัลต์ในงานถนนลาดยาง

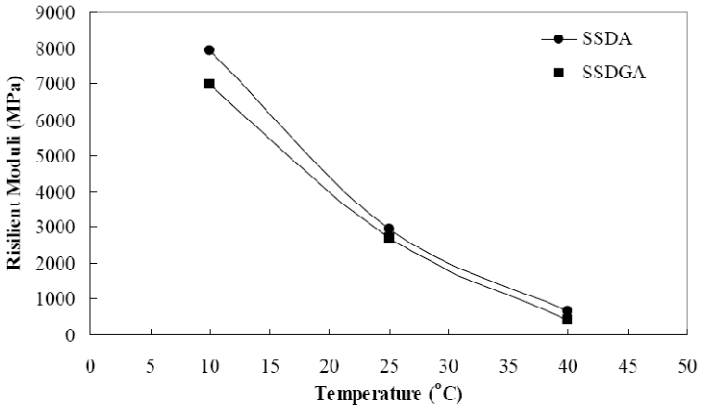
แอสฟัลต์ในความหมายด้านวิศวกรรมตามมาตรฐาน ASTM แอสฟัลต์ หมายถึง วัสดุประสานสีน้ำตาลแก่ถึงดำซึ่งส่วนประกอบหลักเป็นบิทูเมนเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือผลิตได้จากการกลั่นปิโตรเลียม บิทูเมน หมายถึง สารยึดเกาะที่มีสถานะเป็นได้ทั้งของแข็ง กึ่งของแข็ง หรือหนืด สีดำ ส่วนประกอบหลักเป็นไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลสูง เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือผลิตจากปิโตรเลียม แอสฟัลต์ซีเมนต์ หมายถึง ปิโตรเลียมแอสฟัลต์ที่เป็นผลพลอยได้ของกระบวนการกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิง ประเภทต่างๆจากปิโตรเลียมดิบ ในงานด้านวิศวกรรมนิยมใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นวัสดุก่อสร้างประเภทต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วมักใช้กับงานถนนโดยทำหน้าที่หลักเป็นวัตถุประสานในการใช้งาน จึงเป็นที่มาของคำว่า ซีเมนต์ ที่นำมาเรียกต่อท้ายคำว่าแอสฟัลต์เพื่อเน้นหน้าที่หลักของแอสฟัลต์ชนิดนี้แต่ก็หน้าที่อันสำคัญอีกประการหนึ่งของแอสฟัลต์ซีเมนต์

คือการทำหน้าที่เป็นสารกันซึมได้อย่างดีเยี่ยม คุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ก็ขึ้นอยู่กับเกรดในการผลิตตามระบบของข้อกำหนดที่ระบุไว้ในการใช้งานแต่ละประเภท

คุณสมบัติของแอสฟัลต์เป็นวัสดุจำพวกเทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic) ดังนั้นเมื่ออยู่ในอุณหภูมิปกติแอสฟัลต์จะมีสีดำสถานะกึ่งแข็งเหนียวหนืดแต่จะมีสถานะข้นเหลวไหลได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติมาก ๆ ผลิตจากปิโตรเลียมดิบหรือมีสะสมบริเวณแหล่งทับถมซากพืชตามธรรมชาติเป็นเวลานานๆ นับหลายล้านปี ส่วนประกอบเกือบทั้งหมดของแอสฟัลต์ คือ บิทูแมน (Bitumen) เป็นสารจำพวกไฮโดรคาร์บอนที่ละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ ถึงแม้ว่าในกลุ่มนักเคมีจะมีความเห็นที่แตกต่างเกี่ยวกับโครงสร้างของแอสฟัลต์แต่ก็ลงมติจัดไว้เป็น คอลลอยด์ (Colloid) ที่ส่วนประกอบหลักได้แก่ แอสฟัลทีน (Asphaltene) เป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) และมอยทีน (Maltene) เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase)

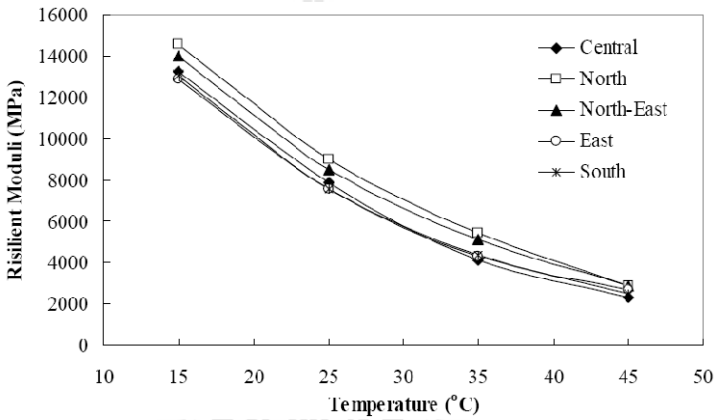
พฤติกรรมหลักทั่วไปสำหรับใช้พิจารณาสำหรับวิเคราะห์และออกแบบวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต คือ โมดูลัสการคืนตัว (Resilient modulus) และการเสียรูปแบบถาวร (Permanent deformation) พฤติกรรมการคืนตัวจะขึ้นกับอุณหภูมิแต่การเสียรูปถาวรจะขึ้นกับจำนวนรอบการรับน้ำหนักบรรทุก (Loading cycle)

Meor and Teoh (2008) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าโมดูลัสการคืนตัวของแอสฟัลต์ผสมตะกรันเหล็กแทนมวรวม โดยผลการทดสอบของตัวอย่างที่มีสัดส่วนผสมของตะกรันเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์ (SSDA) และ 50% (SSGDA) แสดงดังรูปที่ 2.2 ตัวอย่างได้รับการทดสอบที่อุณหภูมิ 10 25 และ 40 องศาเซลเซียส จากผลการทดสอบ Meor and Teoh ได้สรุปว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าโมดูลัสการคืนตัว



รูปที่ 2.2 โมดูลัสการคืนตัวของตัวอย่าง SSDA และ SSGDA ที่ผ่านการอบช่วงสั้นและส่วนผสมเท่ากับ 6% (Meor and Teoh, 2008)

Phromsorn et al. (2003) ได้ศึกษาคุณสมบัติการรับแรงดึงผ่าซีกและโมดูลัสการคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย ตัวอย่างแอสฟัลต์ที่ใช้ในการทดสอบเก็บจาก 5 พื้นที่ทั่วประเทศได้แก่ ภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคใต้ การทดสอบค่าโมดูลัสการคืนตัวของตัวอย่างทำที่อุณหภูมิทดสอบ 15 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทยที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยของ Meor and Teoh ข้างต้น



รูปที่ 2.3 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีต: ตัวอย่างทดสอบจาก 5 ภาคของประเทศไทย (Phromsorn et al., 2003)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

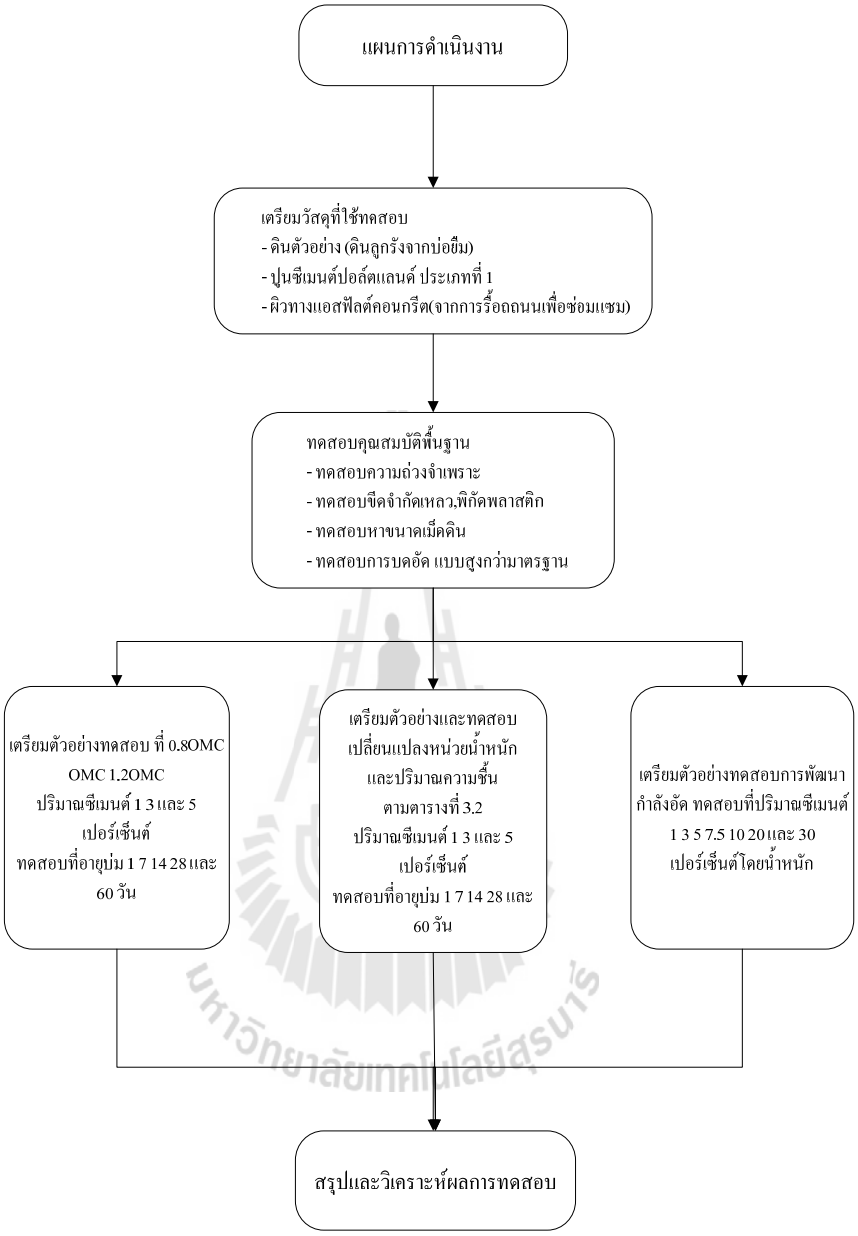
งานวิจัยนี้ศึกษาและอธิบายพฤติกรรมการรับแรงอัดและกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่างๆ โดยแบ่งลำดับการดำเนินงานเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ (1) ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักดินแห้งและปริมาณความชื้น (2) ศึกษากำลังอัดแกนเดียวที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ 0.8 1.0 และ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม และ (3) ศึกษาการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ผลการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของดินลูกรังผสม RAP ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ครั้งนี้จะนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมของวัสดุผสมปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และใช้สร้างสมการทำนายกำลังอัดของวัสดุ แผนดำเนินงานของการวิจัยในครั้งนี้ตลอดจนตัวแปรที่ศึกษาสำหรับงานวิจัยครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 3.1 ถึง 3.4

3.1 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

3.1.1) ดินตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นดินลูกรังจากบ่อยืมเพื่อให้ดินที่มีลักษณะที่เหมือนกัน และมีการปนเปื้อนน้อยที่สุด นำตัวอย่างดินไปผึ่งให้แห้งใช้ค้อนยางทุบดินที่จับตัวเป็นก้อนให้แตกตัวออกจากกันโดยให้มีขนาดเหมาะสมที่จะนำไปใช้ โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และเก็บตัวอย่างไว้ในถังพลาสติกมีฝาปิดไม่ให้มีความชื้นเพื่อรอการทดสอบต่อไป

3.1.2) RAP ได้มาจากการรื้อซ่อมแซมถนนจากทางหลวงหมายเลข 224 อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.นครราชสีมา กม. 1+000 ถึง 2+000 และถูกย่อยผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว เก็บไว้ในถังพลาสติกป้องกันความชื้นรอการการทดสอบต่อไป

3.1.3) ซีเมนต์ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นประเภทที่ 1 ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100



รูปที่ 3.1 แผนดำเนินงานตลอดการวิจัย

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินผสม RAP ที่ปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักดินแห้งต่างๆ

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
ปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักดินแห้ง	10	ปริมาณความชื้น 5 จุดและหน่วยน้ำหนักแห้ง 5 จุด
อัตราส่วนผสม	6	ปริมาณ RAP 0 30 50 70 80 และ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ปริมาณซีเมนต์	4	0 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักวัสดุผสม
อายุบ่ม	1	7 วัน
จำนวนตัวอย่างรวม	900	5 ตัวอย่าง/ปริมาณซีเมนต์/อัตราส่วนผสม/อายุบ่ม

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างทดสอบการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินผสม RAP ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

ตัวแปร	จำนวณ	หมายเหตุ
ปริมาณความชื้น	1	ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม
อัตราส่วนผสม	6	ปริมาณ RAP เท่ากับ 0 30 50 70 80 และ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ปริมาณซีเมนต์	8	1 3 5 7.5 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักวัสดุผสม
อายุบ่ม	2	7 และ 28 วัน
จำนวนตัวอย่างรวม	480	5 ตัวอย่าง/ปริมาณซีเมนต์/อัตราส่วนผสม/อายุบ่ม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินผสม RAP ที่ปริมาณ RAP ต่างๆ

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
ปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักดินแห้ง	3	0.8 1.0 และ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม
อัตราส่วนระหว่างดินตัวอย่างกับ RAP	10	ปริมาณ RAP เท่ากับ 0 20 30 40 50 60 70 80 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ปริมาณซีเมนต์	4	0 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักวัสดุผสม
อายุบ่ม	5	1 7 14 28 และ 60 วัน
จำนวนตัวอย่างรวม	3,000	5 ตัวอย่าง/ปริมาณซีเมนต์/อัตราส่วนผสม/อายุบ่ม

3.2 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ

คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ลักษณะทางวิศวกรรม ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่างและ RAP ดังนี้

3.2.1) ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854

3.2.2) การวิเคราะห์ขนาดคละทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D422

3.2.3) ขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติกสำหรับวัสดุเม็ดละเอียดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.2.4) การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1556 สำหรับวัสดุผสมระหว่างดินลูกรังและ RAP ที่อัตราส่วนผสม 100/0 80/20 70/30 60/40 50/50 40/60 30/70 20/80 10/90 และ 0/100 ตามลำดับ

3.3 การเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างทำโดยใช้เครื่องอัดตัวอย่างที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ เครื่องอัดตัวอย่างเป็นแบบหล่อทำจากเหล็กทรงกระบอกผ่าซีกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 5 เซนติเมตรและมีความสูง 10 เซนติเมตร วัสดุตัวอย่างจะผสมระหว่างดินตัวอย่าง RAP และซีเมนต์ โดยคำนวณน้ำหนักต่อก้อนเพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนักที่ต้องการ จากนั้นตัวอย่างที่ผสมแล้วถูกอัดด้วยแม่แรงไฮดรอลิคให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งตามที่คำนวณไว้ แทนการบดอัดโดยค้อนมาตรฐานหรือค้อนแบบสูงกว่ามาตรฐาน การอัดดินตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.2 เมื่อทำการอัดตัวอย่างเสร็จ ตัวอย่างจะถูก

แกะออกจากกระบอกผ่าซีกและนำตัวอย่างออก ห่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้น และทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องตามอายุบ่มที่ต้องการ หลังจากนั้นถูกนำไปทดสอบต่อไป

3.4 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

เมื่อได้ตัวอย่างครบอายุบ่มแล้วจึงนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D2166 ข้อมูลที่ต้องบันทึกในการทดสอบได้แก่ น้ำหนักบรรทุกที่กระทำ การเสียรูปของตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่าง เครื่องทดสอบกำลังอัดแกนเดียวแสดงดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.2 เครื่องอัดตัวอย่างด้วยกระบอกอัดตัวอย่าง

รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

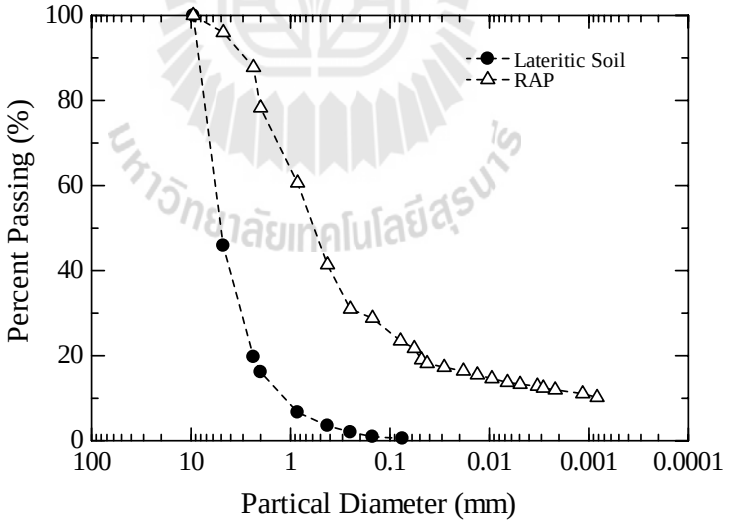
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ

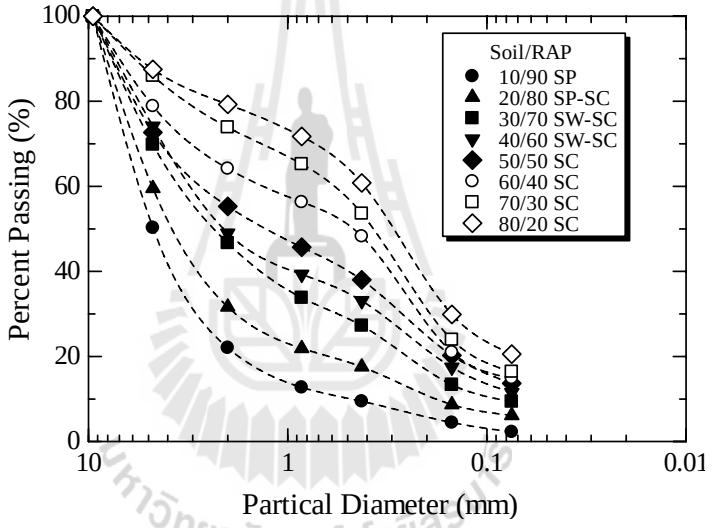
4.1.1 ดัชนีคุณสมบัติและการกระจายขนาดคละ

ดินลูกรังที่นำมาศึกษามีปริมาณดินทราย 80 เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียว 20 เปอร์เซ็นต์ ดินส่วนละเอียดมีขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 21.8 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.68 ตัวอย่างดินจำแนกดินตามระบบ Unified soil classified system (USCS) เป็นทรายปนดินเหนียว (SC) ผิวทางแอสฟัลต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed asphalt pavement, RAP) มีความถ่วงจำเพาะ 2.49 ปริมาณยาง (Asphalt binder) ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ RAP ถูกจำแนกตามระบบ USCS เป็นกรวดที่มีขนาดคละไม่ดี (GP) กราฟเปรียบเทียบขนาดคละของดินลูกรังและ RAP แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดคละของดินลูกรังและ RAP

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าดินลูกรังมีขนาดคละเอียดกว่า RAP เมื่อผสมดินลูกรังกับ RAP ที่อัตราส่วนต่างๆ ทำให้เส้นกราฟการกระจายขนาดคละของวัสดุผสมเปลี่ยนไป การเพิ่มสัดส่วนของ RAP ในส่วนผสมจะทำให้กราฟการกระจายขนาดคละของวัสดุมีแนวโน้มเป็นวัสดุเม็ดหยาบมากขึ้นสังเกตได้จากเส้นกราฟเลื่อนมาทางซ้ายมากขึ้นตามอัตราส่วนของ RAP ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 กราฟการกระจายขนาดคละของวัสดุผสมถูกนำมาใช้จำแนกชนิดของดินสำหรับแต่ละสัดส่วนผสมระหว่างดินลูกรังและ RAP เมื่อสัดส่วน RAP มีค่าระหว่าง 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์วัสดุผสมจะถูกจำแนกเป็นดินทรายปนดินเหนียว (SC) แต่เมื่อสัดส่วน RAP มีค่าระหว่าง 60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ วัสดุจะถูกกำหนดเป็นทรายที่มีดินเหนียวปนและมีขนาดคละกันดี (SW-SC) แต่เมื่อสัดส่วน RAP เพิ่มขึ้นจนถึง 100 เปอร์เซ็นต์ วัสดุจัดเป็นวัสดุที่มีขนาดคละกันไม่ดี (GP,SP)

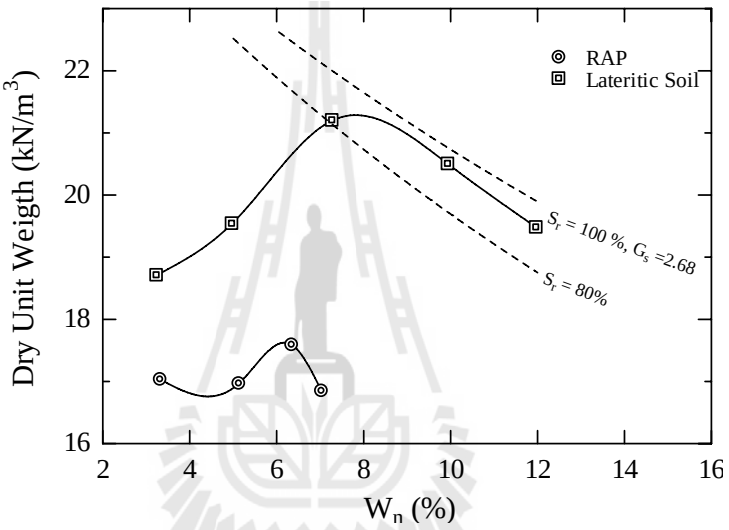


รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดคละของดินลูกรังผสม RAP ที่ปริมาณต่างๆ

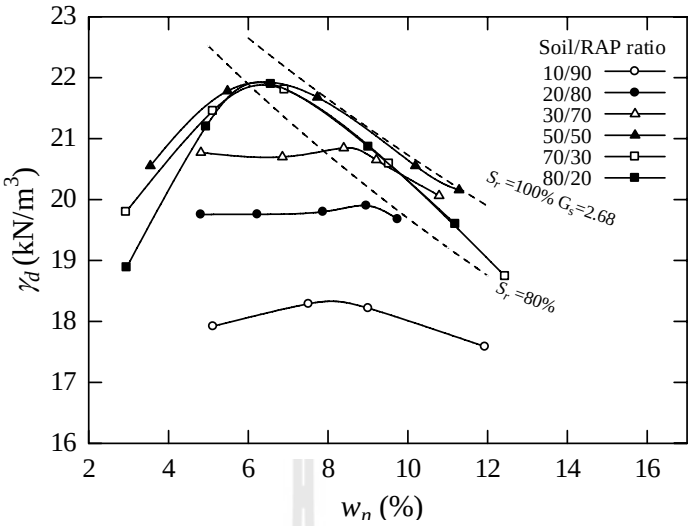
4.1.2 กราฟการบดอัด

การบดอัดของดินลูกรังทำที่พลังงานสูงกว่ามาตรฐาน (E = 56,250 กิโลจูลต่อลูกบาศก์ฟุต) หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดของดินลูกรังมีค่าเท่ากับ 21.25 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) 7.4 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกราฟการบดอัดของ RAP มีค่าหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดและ OMC เท่ากับ 17.5 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และ 6.2 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ กราฟบดอัดของวัสดุทั้งสองแสดงดังรูปที่ 4.3 หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดของดินลูกรังสูงกว่า RAP ชัดเจนเนื่องจาก RAP มีขนาดคละไม่ดีและขนาดคละใหญ่กว่าการบดอัดลูกรังผสม RAP ที่สัดส่วนผสมต่างๆ มีผลให้ทั้งหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดและ OMC

ของแต่ละสัดส่วนแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.4 กราฟการบดอัดที่แตกต่างกันเกิดจากการกระจายขนาดคละของแต่ละอัตราส่วนแตกต่างกันส่งผลต่อความสามารถในการจัดเรียงตัวของเม็ดดินแตกต่างกัน เมื่อปริมาณดินลูกรังในส่วนผสมมากขึ้น หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ RAP ไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดมากนัก แต่เมื่อปริมาณ RAP มีสัดส่วนเกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์หน่วยน้ำหนักแห้งจะลดลงอย่างชัดเจนและสัมพันธ์กับ OMC ที่สูงขึ้นตามด้วย อัตราส่วนของดินลูกรังต่อ RAP ที่ OMC สำหรับแต่ละสัดส่วนและชนิดของดินจำแนกตามระบบ USCS แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 กราฟการบดอัดเปรียบเทียบระหว่างดินลูกรังและ RAP



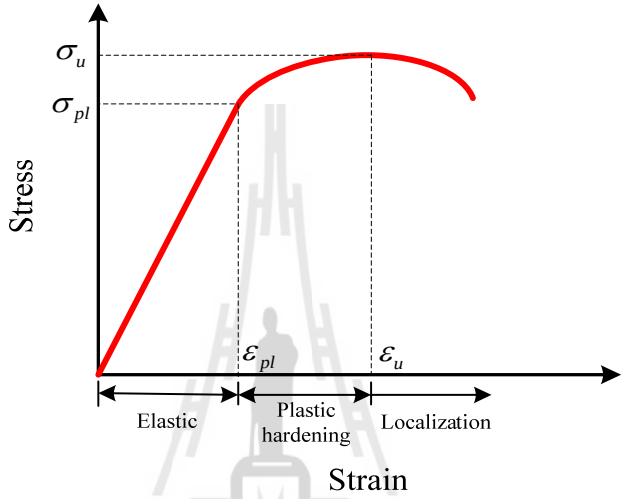
รูปที่ 4.4 กราฟการบดอัดของดินลูกรังผสม RAP ที่ปริมาณส่วนผสมต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ตารางจำแนกอัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด OMC และชนิดของดินตามระบบ USCS

Soil/RAP ratio	Compaction Energy, E (kJ/m^3)	Maximum dry density $\gamma_{d,\max}$ (kN/m^3)	Optimum moisture content, OMC (%)	Classified soil type USCS system
0/100	2692.3	17.60	6.40	GP
10/90	2692.3	18.30	8.00	SP
20/80	2692.3	19.90	8.75	SP-SC
30/70	2692.3	20.85	8.40	SW-SC
50/50	2692.3	21.85	6.40	SC
70/30	2692.3	21.58	6.40	SC
80/20	2692.3	21.90	6.40	SC
100/0	2692.3	21.25	7.40	SC

4.2 พฤติกรรมทั่วไปของวัสดุดินซีเมนต์ผสม RAP ภายใต้การรับแรงอัดแกนเดียว

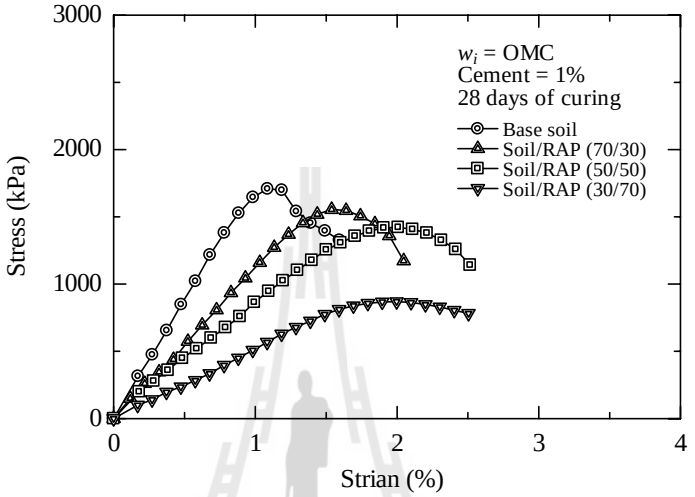
ผลการทดลองพฤติกรรมการรับแรงอัดภายใต้แรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างวัสดุผสมระหว่างดินลูกรังและ RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์สรุปได้ดังรูปที่ 4.5 พฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดสามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ช่วงยืดหยุ่น (Elastic recovery) ช่วงแข็งแรงขึ้นด้วยความเครียด (Plastic hardening) และช่วงอ่อนจากการแตกหักเฉพาะจุด (Localization failure)



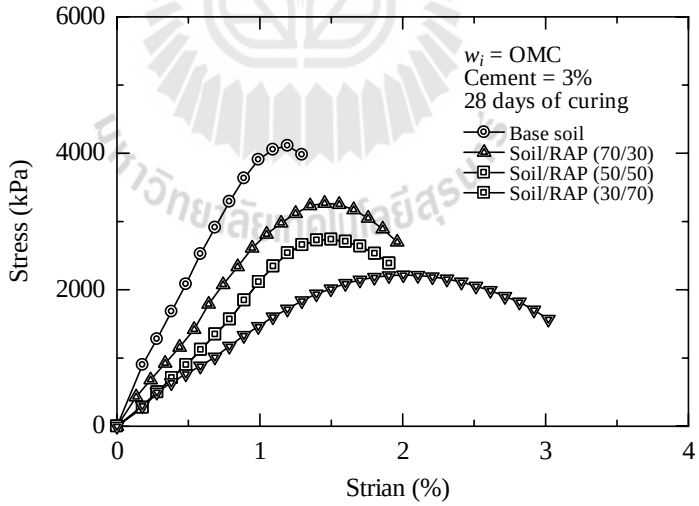
รูปที่ 4.5 พฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงอัดของวัสดุ

พฤติกรรมการรับแรงอัดของดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยซีเมนต์คล้ายกับผลการทดสอบโดยมีความเครียดที่จุดวิบัติต่ำกว่าดินลูกรังบดอัดปกติ ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ที่อายุบ่ม 28 วันแสดงดังรูปที่ 4.6 (a) ถึง 4.6 (c) จากรูปพบว่าดินลูกรังบดอัดผสมด้วยซีเมนต์มีพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะ ความเครียดที่จุดวิบัติต่ำแต่มีสติฟเนสสูงขึ้นโดยในบางตัวอย่างที่มีกำลังสูงจะไม่แสดงช่วงอ่อนลงหลังจากการแตกหัก ตัวอย่างที่มี RAP ในสัดส่วนผสมจะมีกำลังอัดและสติฟเนสต่ำมีความเครียดที่จุดวิบัติสูงกว่าดินลูกรัง ตลอดจนแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนลงหลังจากการวิบัติ โดยตัวอย่างที่มีปริมาณ RAP ในสัดส่วนผสมมากจะแสดงพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียวอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนดินลูกรังต่อ RAP ที่เท่ากัน การเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ส่งผลให้สติฟเนสและกำลังที่จุดวิบัติสูงตามปริมาณซีเมนต์ที่ผสมแต่ความเครียดที่จุดวิบัติกลับมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันค่าสติฟเนสและกำลังที่จุดวิบัติจะมีค่าต่างกันด้วย รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมภายใต้กำลังอัดแกนเดียวของสัดส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 70/30 และ 30/70 ที่

ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบพบว่าสติฟเนสและกำลังที่จุดวิบัติของตัวอย่างที่เตรียมที่ OMC มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยความชื้นเท่ากับ 0.8 และ 1.2 เท่าของ OMC การลดลงของสติฟเนสและกำลังที่จุดวิบัติเมื่อปริมาณ RAP ในส่วนผสมเพิ่มขึ้นเกิดขึ้นเหมือนกันในทุกตัวอย่างอายุบ่ม โดยผลของการพัฒนากำลังของวัสดุที่แต่ละอายุบ่มจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

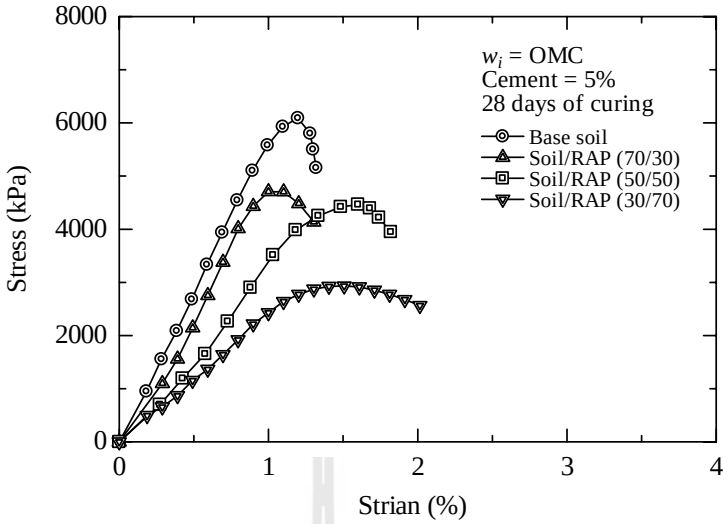


(a) ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์



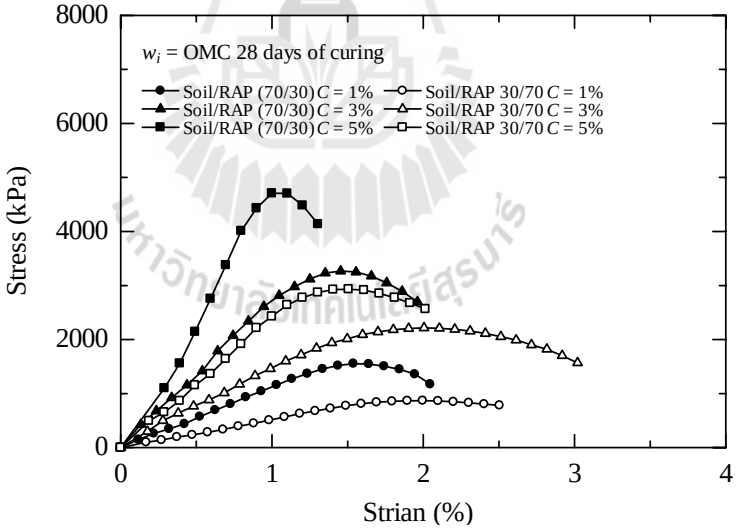
(b) ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.6 พฤติกรรมของวัสดุดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ภายใต้การรับแรงอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ อายุบ่ม 28 วัน

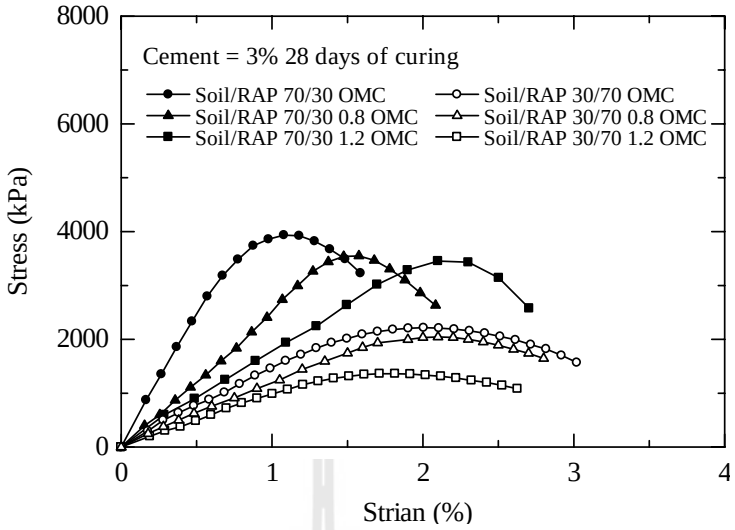


(c) ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.6 พฤติกกรมของวัสดุดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ภายใต้การรับแรงอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ อายุบ่ม 28 วัน (ต่อ)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์อายุบ่ม 28 วัน ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 70/30 และ 30/70



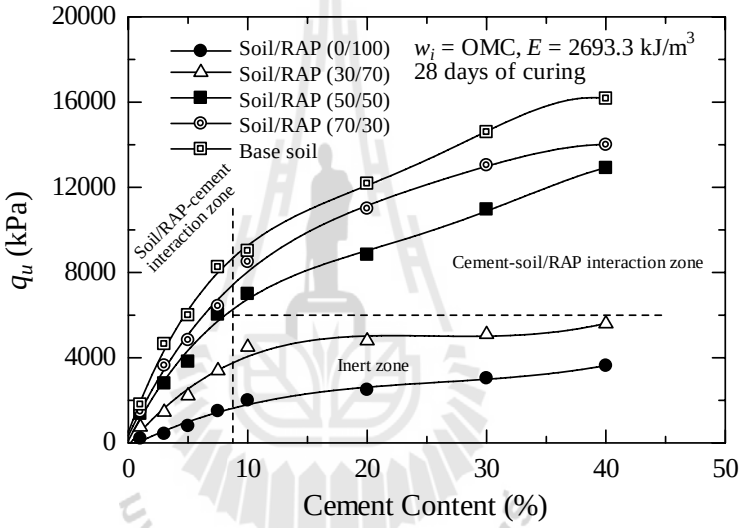
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่างๆ

4.3 ผลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดและโซนการปรับปรุง

รูปที่ 4.9 แสดงกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ที่พลังงานบดอัดเท่ากับ 2692.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ OMC และอายุบ่ม 28 วัน จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ RAP ในส่วนผสมที่มากขึ้นส่งผลต่อกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โซนการปรับปรุงดินลูกรังผสม RAP สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน โซนที่หนึ่งคือช่วงที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์อย่างชัดเจน พันธะเชื่อมประสานระหว่างจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคดินและ RAP เกิดขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ โซนนี้ถูกเรียกว่า “Soil/RAP cement interaction zone” โซนนี้เกิดขึ้นทุกสัดส่วนของปริมาณดินลูกรังต่อ RAP ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมระหว่าง 0 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ โซนที่สอง คือ “Inert zone” เป็นโซนที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นน้อยหรือไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โซนนี้ความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานที่จุดสัมผัสถูกจำกัด แม้ว่ามีการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์แต่ขาดความต่อเนื่องที่สมบูรณ์ของโครงสร้างซีเมนต์เพสซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายขนาดคละไม่ดีของส่วนผสมระหว่างดินลูกรังและ RAP ตลอดจนทำให้ความสามารถในการบดตัวไม่ดี (อัตราส่วนโพรงสูง) และปริมาณยางแอสฟัลต์ในตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น โซนที่สองนี้เกิดขึ้นเป็นช่วงสั้นหรือไม่เกิดเลยเมื่อปริมาณ RAP น้อย แต่จะชัดเจนเมื่อปริมาณ RAP สูง เช่น สัดส่วนระหว่างดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 0/100 และ 30/70 ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับการกระจายขนาดคละที่ได้อธิบายไว้

ก่อนหน้านี้ โซนที่สาม คือ “Cement Soil/RAP interaction zone” เป็นโซนที่ปริมาณปูนซีเมนต์มีมากเพียงพอที่ทำให้เกิดความสมบูรณ์ของโครงสร้างซีเมนต์เพส กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โซนนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะสัดส่วนดินลูกรังต่อ RAP ที่มีปริมาณ RAP ไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณซีเมนต์ที่ทำให้เกิดโซนนี้อยู่ระหว่าง 8 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามความชันของกราฟในโซนที่สามยังคงมีความชันต่ำกว่าโซนที่หนึ่ง

ดังนั้นจากผลการทดสอบข้างต้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังอัดแกนเดียวและการพัฒนากำลังอัดในช่วง Soil/RAP cement interaction เพราะใช้ปริมาณซีเมนต์น้อยและกำลังอัดเพียงพอต่อการใช้งานโดยทั่วไปของวัสดุในงานวิศวกรรมโยธา

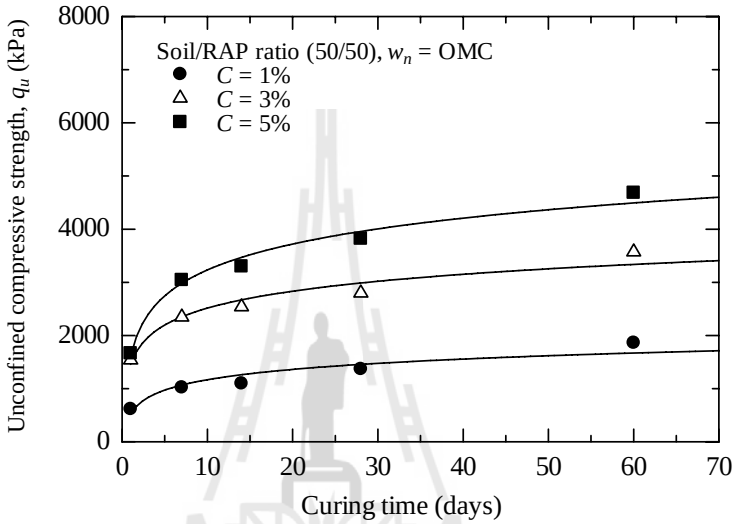


รูปที่ 4.9 การพัฒนากำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

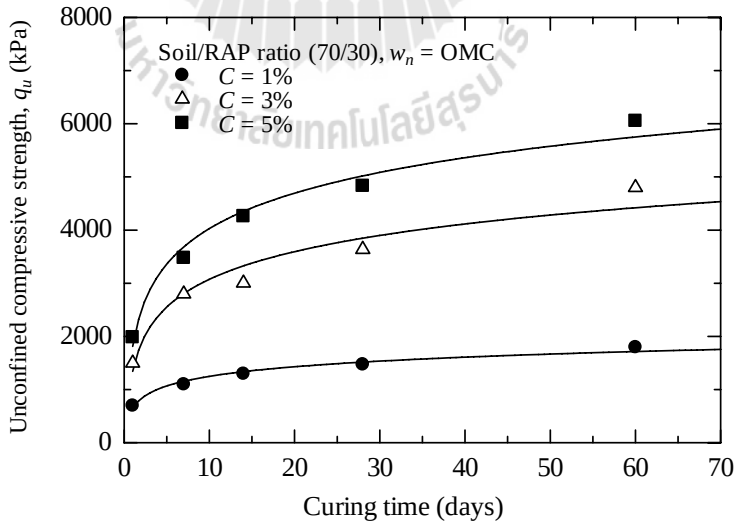
4.4 การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่ม

การพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินลูกรังผสม RAP ที่มีความชื้นเริ่มต้น OMC แสดงดังรูปที่ 4.10 (a) ถึง 4.10 (c) จากรูปพบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ตัวอย่างที่มีปริมาณซีเมนต์สูงจะมีกำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำกว่า การพัฒนากำลังอัดตามเวลาของตัวอย่างที่ปริมาณซีเมนต์ 1 เปอร์เซ็นต์มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ปริมาณซีเมนต์ที่ 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ กำลังอัดของอายุบ่ม 1 วันถึง 28 วันมีค่าแตกต่างกันมาก (40 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเทียบกับกำลังอัดที่ 28 วันถึง 60 วัน (15 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าถ้าปริมาณ RAP สูงการพัฒนากำลังอัดจะต่ำโดยจะมีลักษณะเช่นเดียวกันนี้ในทุกปริมาณซีเมนต์ กำลังอัดของตัวอย่างที่มีปริมาณซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์จะมีกำลังอัดสูงสุดเมื่อเทียบอายุบ่มเดียวกัน เนื่องจาก

ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่าตัวอย่างอื่น กลไกการพัฒนากำลังอัดจากผลของปริมาณน้ำนี้จะถูกเสนอในหัวข้อต่อไป การพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่มของตัวอย่างเตรียมที่ปริมาณความชื้น 0.8 และ 1.2 เท่าของOMC แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 แนวโน้มการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างที่เตรียมที่ปริมาณความชื้นเท่ากับด้านเปียกและด้านแห้งของ OMC มีลักษณะเหมือนกับตัวอย่างที่เตรียมที่ OMC แต่มีกำลังอัดที่ 60 วันที่ต่ำกว่า

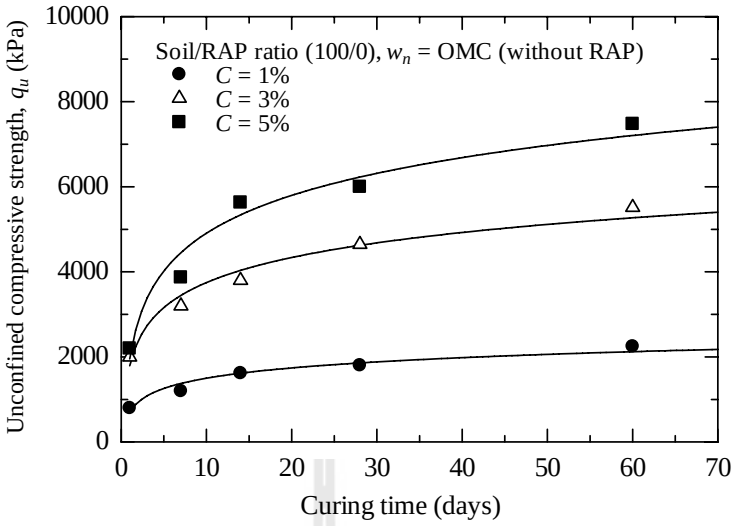


(a) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 50/50



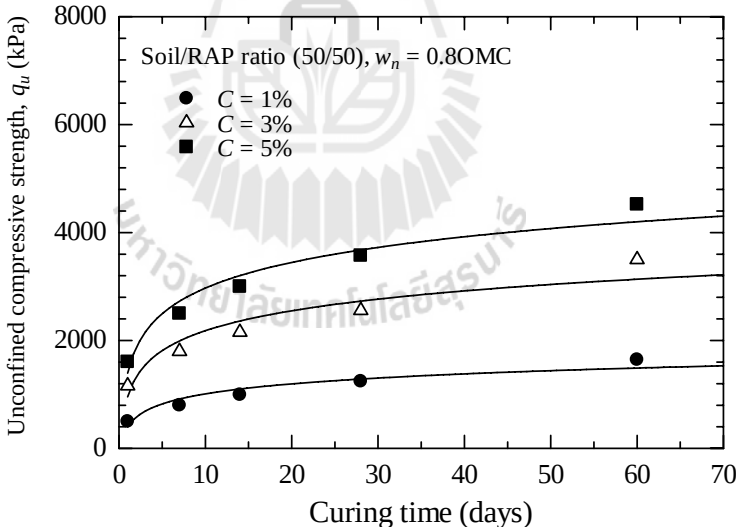
(b) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 70/30

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์บดอัดที่ OMC



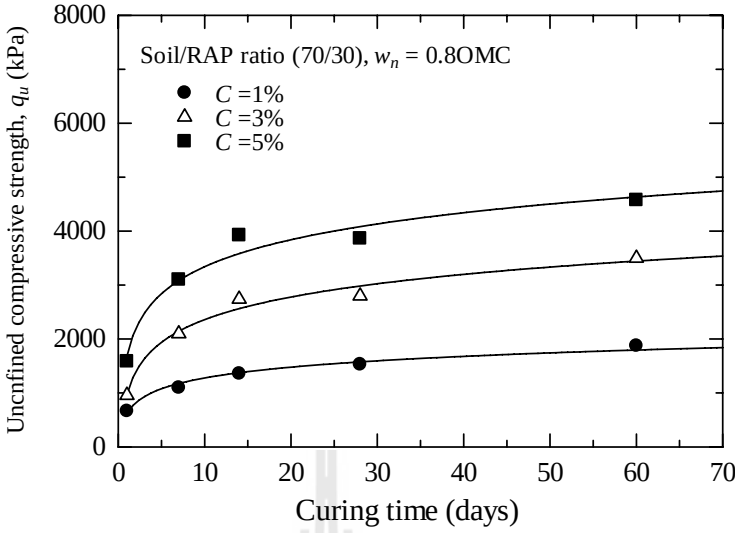
(c) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 100/0

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์บดอัดที่ OMC (ต่อ)

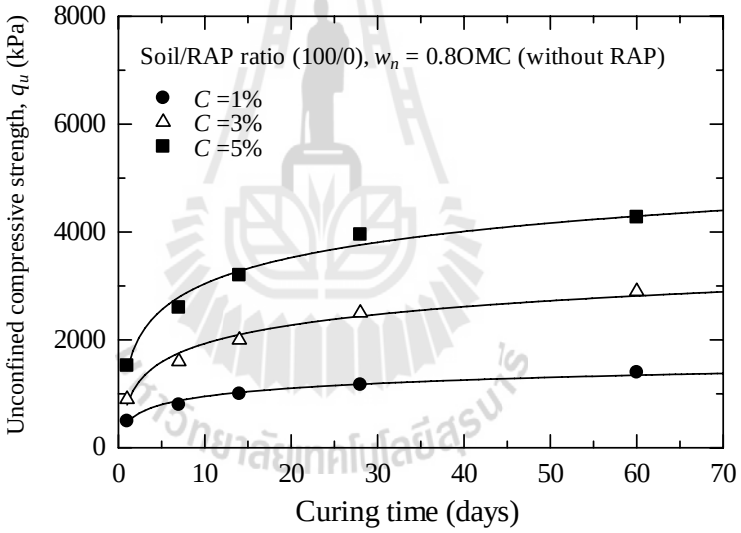


(a) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 50/50

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มของดินลูกรัง RAP และซีเมนต์บดอัดที่ด้านแห้งของ OMC

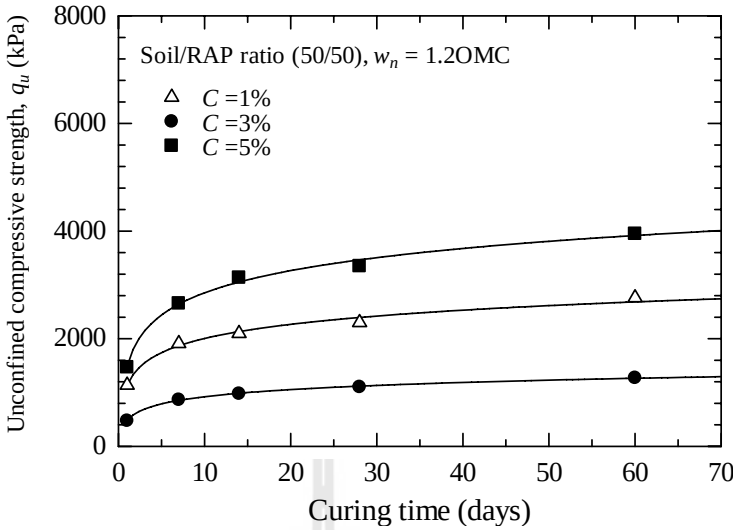


(b) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 70/30

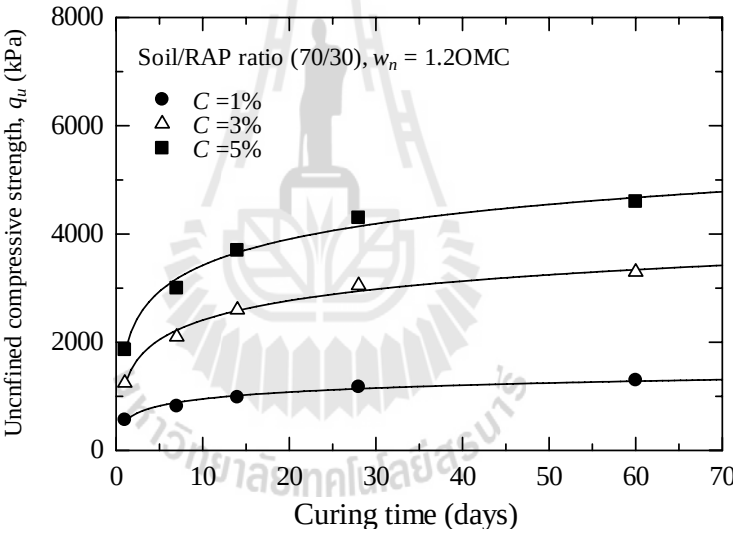


(c) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 100/0

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มของดินลูกรัง RAP และซีเมนต์บดอัดที่ด้านแห้งของ OMC (ต่อ)

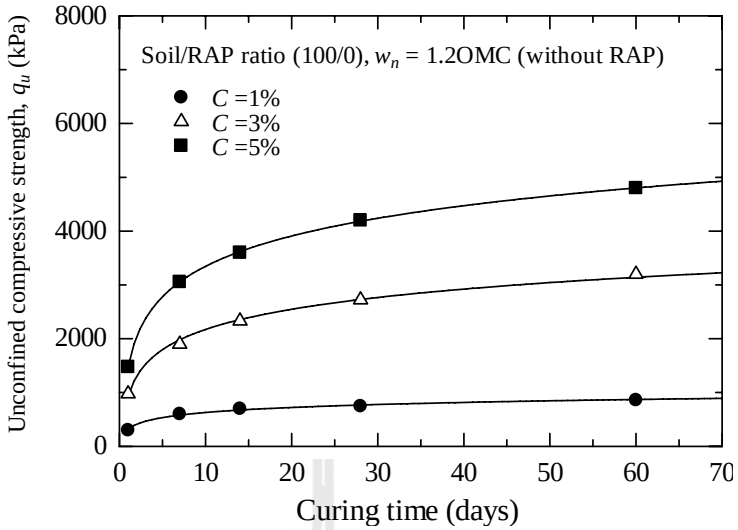


(a) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 50/50



(b) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 70/30

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มของดินลูกรัง RAP และซีเมนต์บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC



(c) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 100/0

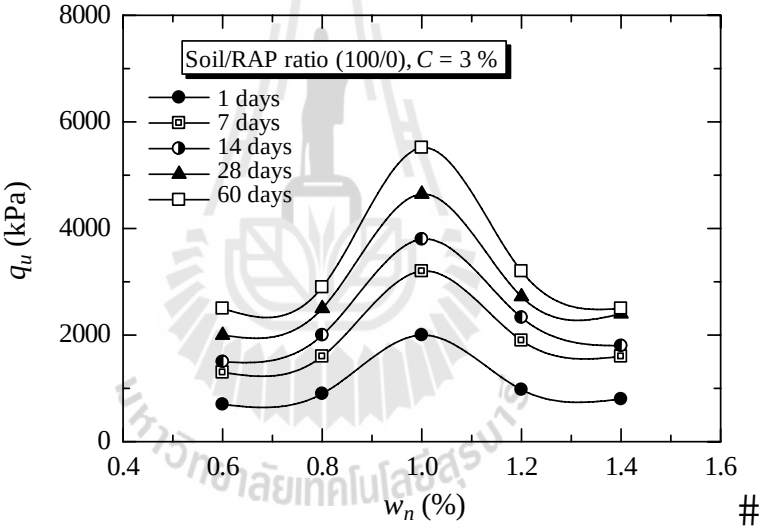
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มของดินลูกรัง RAP และซีเมนต์บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC (ต่อ)

4.5 ผลของปริมาณความชื้นต่อการพัฒนากำลังอัด

กำลังอัดของตัวอย่างที่ปริมาณความชื้น อายุบ่มและอัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.13 ที่ปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ OMC ของการบดอัดจะมีกำลังอัดสูงสุดในขณะที่ปริมาณความชื้น 0.6 และ 0.8 เท่าของ OMC จากการบดอัด (ด้านแห้ง) กำลังอัดมีค่าต่ำกว่า OMC เนื่องจากที่ปริมาณความชื้นดังกล่าวตัวอย่างมีหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำกว่าที่ OMC ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นที่ทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,\max}$) ถึงแม้ปริมาณความชื้นที่ด้านแห้งจะมีปริมาณอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (Water/cement ratio, w/C) ที่ต่ำกว่า OMC ก็ตาม ลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นเหมือนกันในทุกๆ อายุบ่ม และอัตราส่วนระหว่างดินต่อ RAP สัดส่วนดินต่อ RAP เท่ากับ (100/0) รูปที่ 4.13 (a) แสดงความแตกต่างของกำลังอัดสำหรับแต่ละปริมาณความชื้น ความแตกต่างของกำลังอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ RAP ในก้อนตัวอย่าง ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.2 และ 1.4 เท่าของ OMC (ด้านเปียก) มีกำลังอัดต่ำกว่าที่ OMC เช่นเดียวกับตัวอย่างที่ด้านแห้ง แต่จะมีกำลังอัดต่ำกว่าตัวอย่างที่ด้านแห้งของ OMC เล็กน้อย เนื่องจากตัวอย่างที่ด้านแห้งมี w/C ต่ำกว่าแต่มีหน่วยน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกันไม่มาก รูปที่ 4.14 4.16 และ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินลูกรังผสม RAP เท่ากับ 30/70 50/50 และ 100/0 ตามลำดับ ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ โดยที่เตรียมตัวอย่างที่หน่วยน้ำหนักที่เท่ากัน จากการทดสอบพบว่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มีปริมาณซีเมนต์และอัตราส่วนดิน

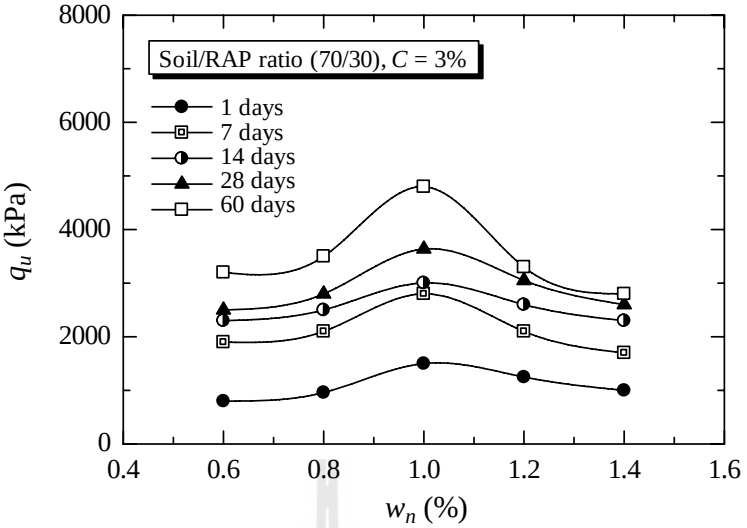
ลูกรังต่อ RAP เท่ากันแต่มีปริมาณความชื้นแตกต่างกันจะมีกำลังอัดของตัวอย่างแตกต่างกันเล็กน้อย แม้ว่าตัวอย่างจะมีปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันก็ตาม โดยตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นต่ำจะมีกำลังสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจาก *w/C* มีค่าต่ำกว่า ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP ที่เท่ากันแต่มีหน่วยน้ำหนักแห้งต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 4.15 4.17 และ 4.19 จากการทดสอบพบว่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งที่แตกต่างจะความแตกต่างกันมากแม้ว่าตัวอย่างมีอัตราส่วน *w/C* ที่เท่ากันก็ตาม ตัวอย่างที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะให้กำลังอัดสูงที่สุดด้วย

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างแม้จะมีอัตราส่วน *w/C* ที่แตกต่างกันแต่มีหน่วยน้ำหนักที่เท่ากันจะมีกำลังไม่แตกต่างกันมาก กำลังอัดที่แตกต่างของดินลูกรังผสม RAP ที่ปริมาณซีเมนต์เดียวกันจะขึ้นกับหน่วยน้ำหนักแห้งมากกว่า *w/C*

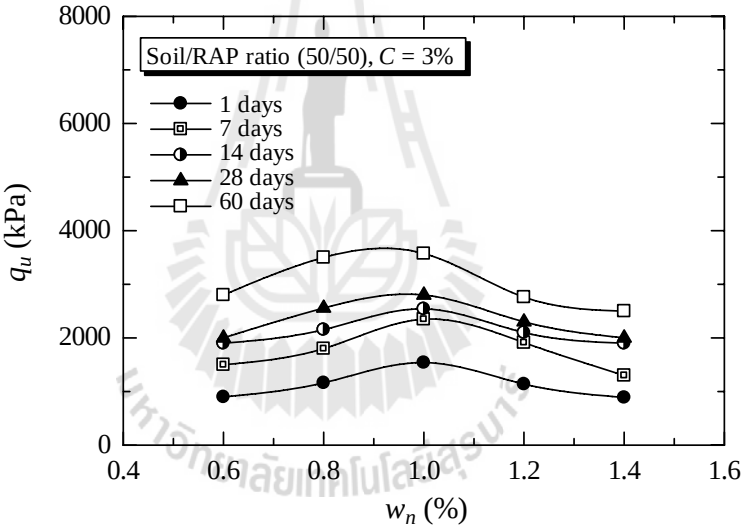


(a) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP 100/0 ผสมซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้นต่างๆ

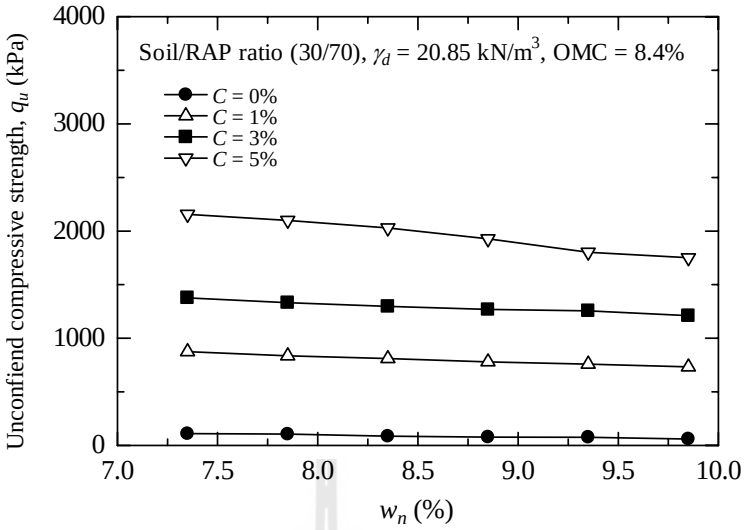


(b) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP 70/30 ผสมซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์

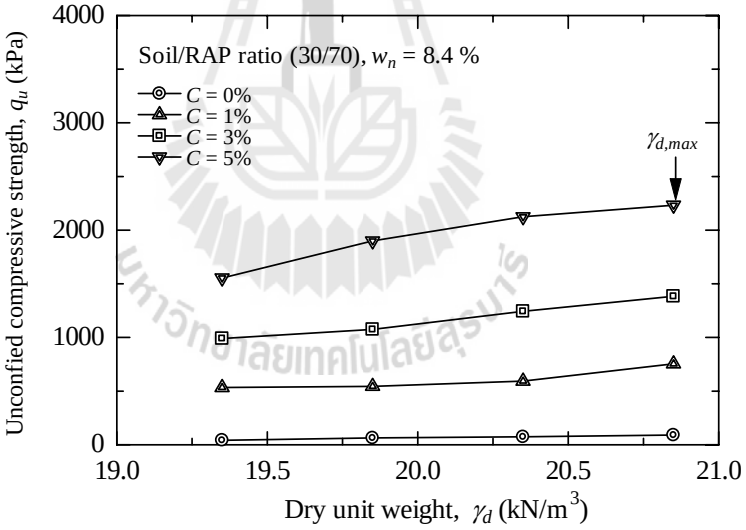


(c) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP 50/50 ผสมซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์

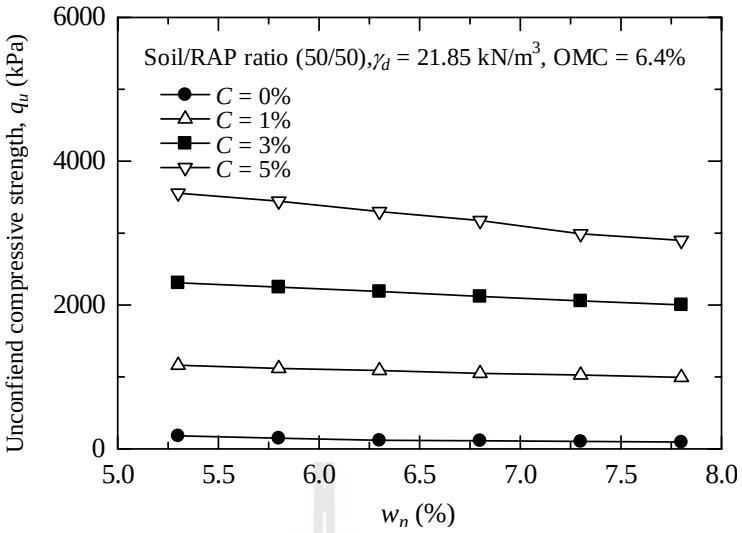
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้นต่างๆ (ต่อ)



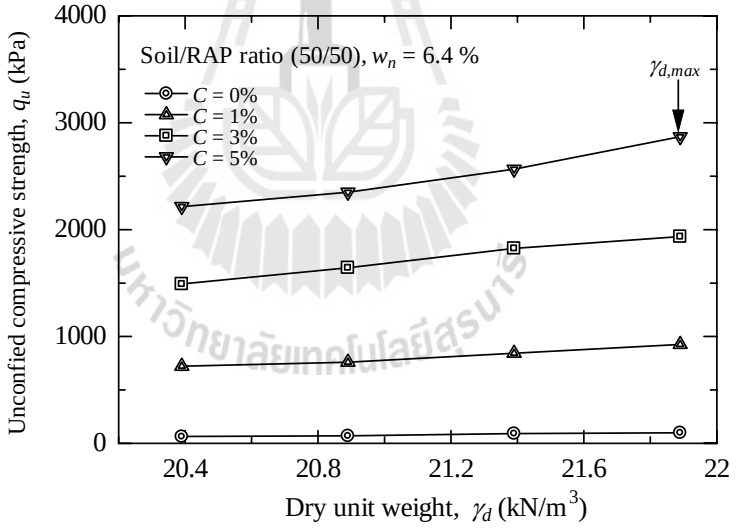
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังต่อ RAP 30/70 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากันสำหรับปริมาณซีเมนต์ต่างๆ



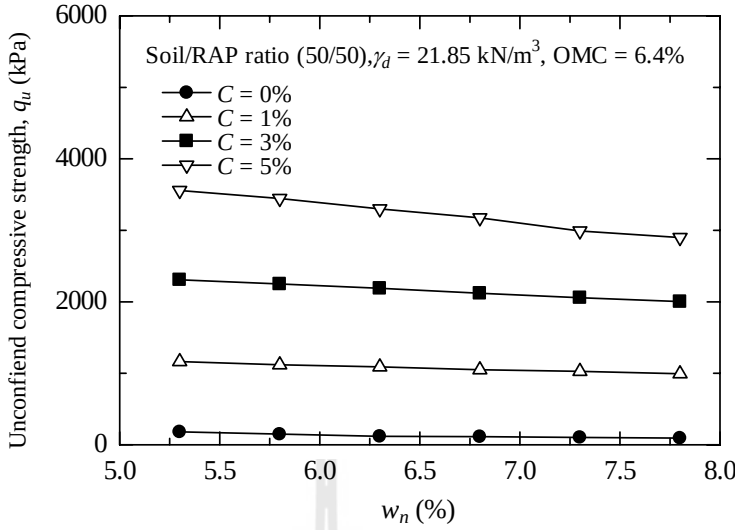
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับหน่วยน้ำหนักแห้งของดินลูกรังต่อ RAP 30/70 ที่ปริมาณความชื้นเท่ากันสำหรับปริมาณซีเมนต์ต่างๆ



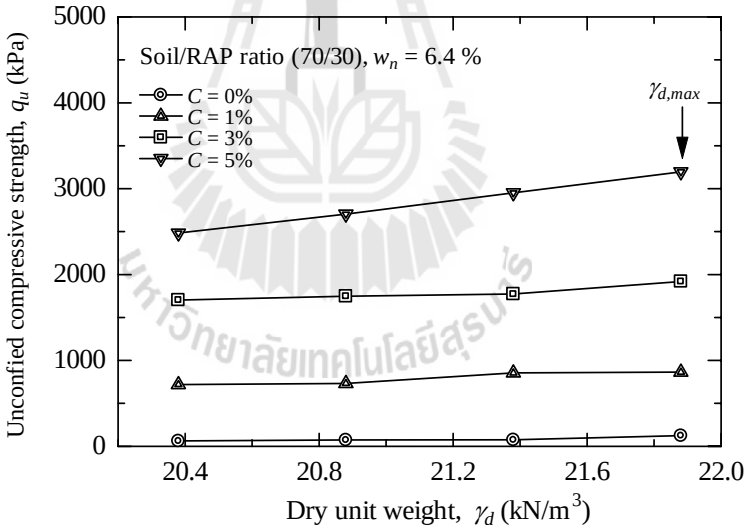
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังต่อ RAP 50/50 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากันสำหรับปริมาณซีเมนต์ต่างๆ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับหน่วยน้ำหนักแห้งของดินลูกรังต่อ RAP 50/50 ที่ปริมาณความชื้นเท่ากันสำหรับปริมาณซีเมนต์ต่างๆ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังต่อ RAP 70/30 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากันสำหรับปริมาณซีเมนต์ต่างๆ



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับหน่วยน้ำหนักแห้งของดินลูกรังต่อ RAP 70/30 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากันสำหรับปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

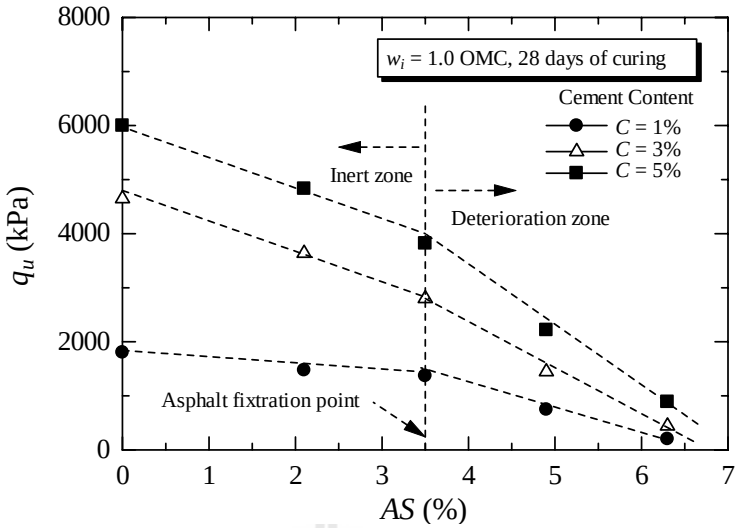
4.6 ผลของปริมาณยางแอสฟัลต์ต่อกำลังอัด

รูปที่ 4.20 แสดงผลของปริมาณแอสฟัลต์ที่ผสมใน RAP ต่อกำลังอัดของตัวอย่างที่ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ OMC ของการบดอัดและมีอายุบ่ม 28 วัน และปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ปริมาณของแอสฟัลต์สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$AS = \frac{W_{as}}{W_s} \tag{4.1}$$

เมื่อ W_{as} คือน้ำหนักของแอสฟัลต์ และ W_s คือน้ำหนักดินแห้ง RAP มีปริมาณของแอสฟัลต์ผสมอยู่ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ RAP ปริมาณของแอสฟัลต์จะในวัสดุผสมเพิ่มขึ้นตาม จากรูปพบว่าเมื่อปริมาณแอสฟัลต์ที่ผสมมีมากขึ้นทำให้กำลังอัดลดลงในทุกปริมาณซีเมนต์ โดยตัวอย่างที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ การลดลงของกำลังอัดเกิดขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีปริมาณซีเมนต์ 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ การลดลงของกำลังอัดสามารถจำแนกออกไปเป็น 2 ส่วนคือ โซนที่หนึ่งเรียกว่า “Inert zone” กำลังอัดจะลดลงน้อยเมื่อเทียบกับโซนที่สอง คือโซนเรียกว่า “Deterioration zone” ซึ่งมีการลดลงของกำลังอัดเมื่อมีปริมาณแอสฟัลต์อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาโซนการลดลงของกำลังอัดพบว่าเมื่อปริมาณแอสฟัลต์มีมากเกิน 3.5 เปอร์เซ็นต์ กำลังอัดจะลดลงอย่างมากซึ่งอยู่ใน Deterioration zone ดังนั้นจึงสามารถใช้ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์เป็นจุดแบ่งระหว่าง Inert zone และ Deterioration zone โดยเรียกจุดนี้ว่า “Asphalt fixtration point” ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์ตรงกับอัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 50/50

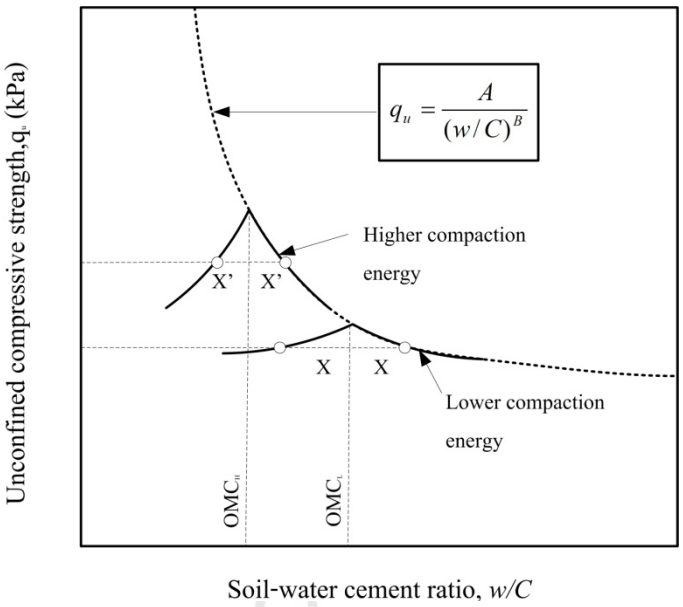
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณแอสฟัลต์

4.7 กฎกำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

Horpibulsuk et al. (2006) ได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินเม็ดหยาบผสมปูนซีเมนต์บดอัดโดยกล่าวว่า ที่อายุบ่มค่าหนึ่งกำลังอัดของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัดที่ OMC และทางด้านเปียกของ OMC จะแปรผันตามอัตราส่วนน้ำในดินต่อซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio, *w/C*) เพียงอย่างเดียว เมื่ออัตราส่วนน้ำในดินต่อซีเมนต์มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นของดิน (เปอร์เซ็นต์) ต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (เปอร์เซ็นต์) แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมปูนซีเมนต์บดอัดแสดงดังรูปที่ 4.21

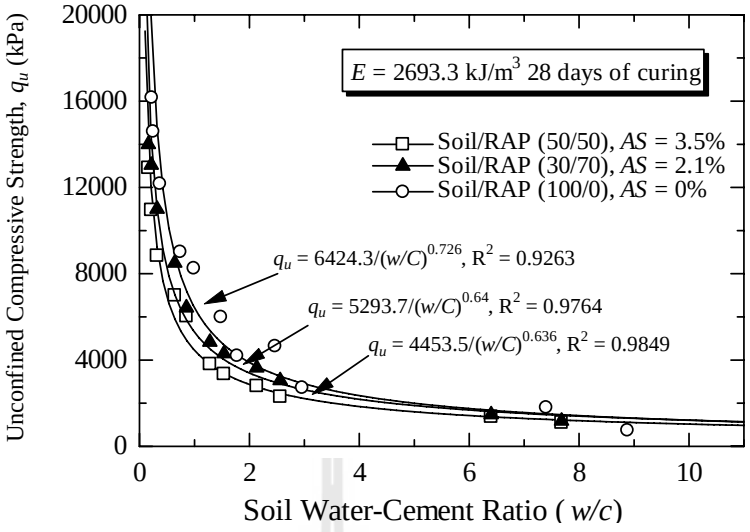


รูปที่ 4.21 แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด (Horpibulsuk et al., 2006)

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบของกำลังอัดของดินลูกรังต่อ RAP เทียบกับอัตราส่วน *w/C* ดังรูปที่ 4.22 ตามหลักการของ Horpibulsuk et al. (2006) สำหรับกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน กำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์บดอัดที่ OMC และด้านเปียกของ OMC สำหรับการบดอัดที่พลังงานเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันกำลัง (Power function) ดังนี้

$$q_u = \frac{A}{(w/C)^B} \tag{4.2}$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ ซึ่งแปรผันตามอัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรังต่อ RAP จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.22 พบว่า กำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ที่อายุบ่มค่าหนึ่งแปรผันตามปริมาณ RAP ในส่วนผสมด้วย



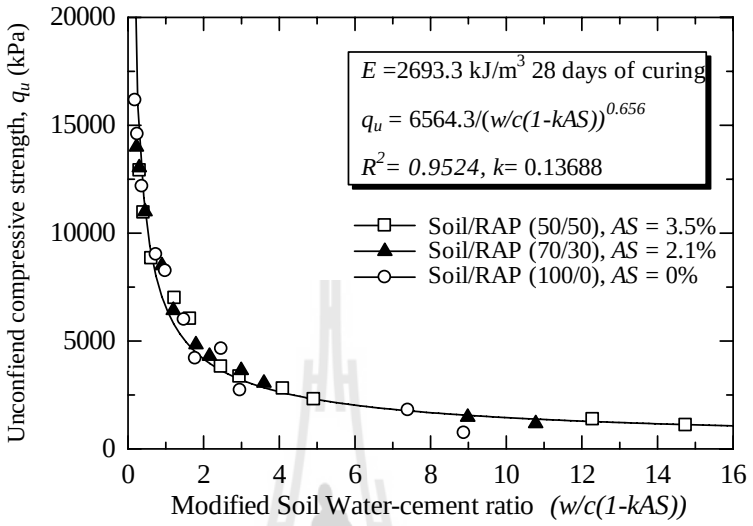
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (*w/C*) ของดินลูกรังผสม RAP ที่ปริมาณต่างๆ

ค่าพารามิเตอร์ *A* และ *B* แปรผันตามอัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรังต่อ RAP ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 100/0 จะมีค่า *A* และ *B* ที่สูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 70/30 และ 50/50 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณแอสฟัลต์ในตัวอย่างส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ *A* และ *B* ลดลง ผลดังกล่าวทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เป็นความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเอกภาพ (Non-unique) ซึ่งเป็นผลจากปริมาณ RAP ในตัวอย่าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอสมการซึ่งปรับปรุงใหม่โดยรวมอิทธิผลของปริมาณแอสฟัลต์ (*AS*) ต่อพารามิเตอร์ *A* และ *B* ซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ใหม่ดังนี้

$$q_u = \frac{A^*}{(w/c(1-kAS))^{B^*}} \tag{4.3}$$

เมื่อ A^* และ B^* เป็นค่าคงที่ใหม่ *k* เป็นค่าคงที่ของวัสดุผสมระหว่างดินลูกรังและ RAP และ *AS* คือปริมาณแอสฟัลต์ในตัวอย่าง ผลของการปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์โดยใช้พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงใหม่ทำให้สมการที่ 4.3 เป็นเอกภาพ (Unique) โดยไม่แปรผันตามปริมาณแอสฟัลต์ ปริมาณความชื้น และปริมาณซีเมนต์ สมการดังกล่าวสามารถใช้อธิบายกำลังอัดของทุกอัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรังต่อ RAP ที่อายุบ่ม 28 วัน โดยอาศัยเพียง

อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (*w/C*) และปริมาณแอสฟัลต์ในส่วนผสม ความสัมพันธ์ของกำลังและอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้พารามิเตอร์ปรับปรุงแสดงดังรูปที่ 4.23



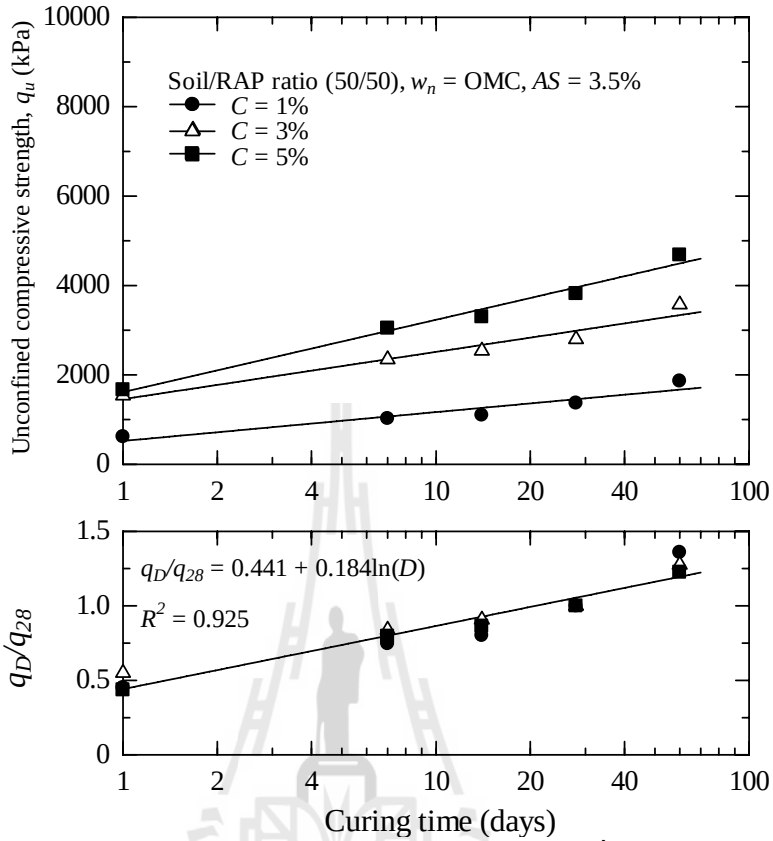
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่ปรับปรุงแล้วของดินลูกรังผสม RAP ที่อายุบ่ม 28 วัน

4.8 กฎการพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่ม

จากหัวข้อที่ 4.4 การพัฒนากำลังของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะมีการพัฒนาอยู่ 2 ช่วงคือที่อายุบ่ม 1 ถึง 28 วัน และ 28 ถึง 60 วันข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าที่อายุบ่ม 28 วันเป็นช่วงการพัฒนากำลังอัด เมื่อทำการ Normalization กำลังอัดที่อายุบ่มใดๆ ด้วยกำลังอัดที่ 28 วันในมิติของเซมิลอการิทึมตามสมการดังนี้

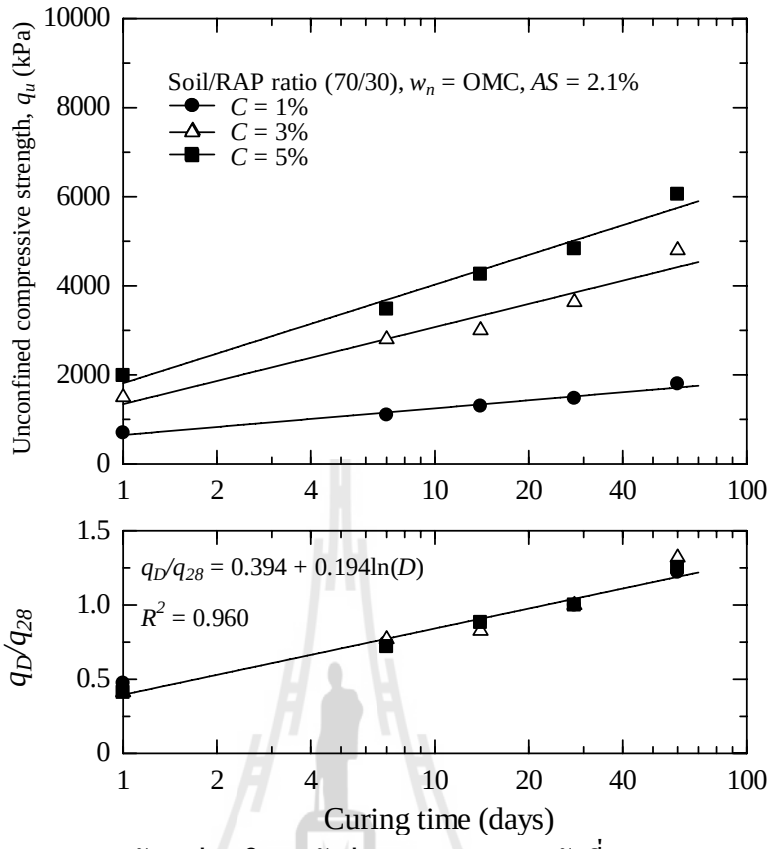
$$\frac{q_D}{q_{28}} = a + b\ln(D) \tag{4.4}$$

เมื่อ q_D คือกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่อายุบ่ม D ใดๆ q_{28} คือกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วันและ a และ b เป็นค่าคงที่จากการทำ Linear regression ผลการ Normalization กำลังอัดด้วยกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วันของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ OMC และด้านเปียกของ OMC แสดงดังรูปที่ 4.24 และ 4.25



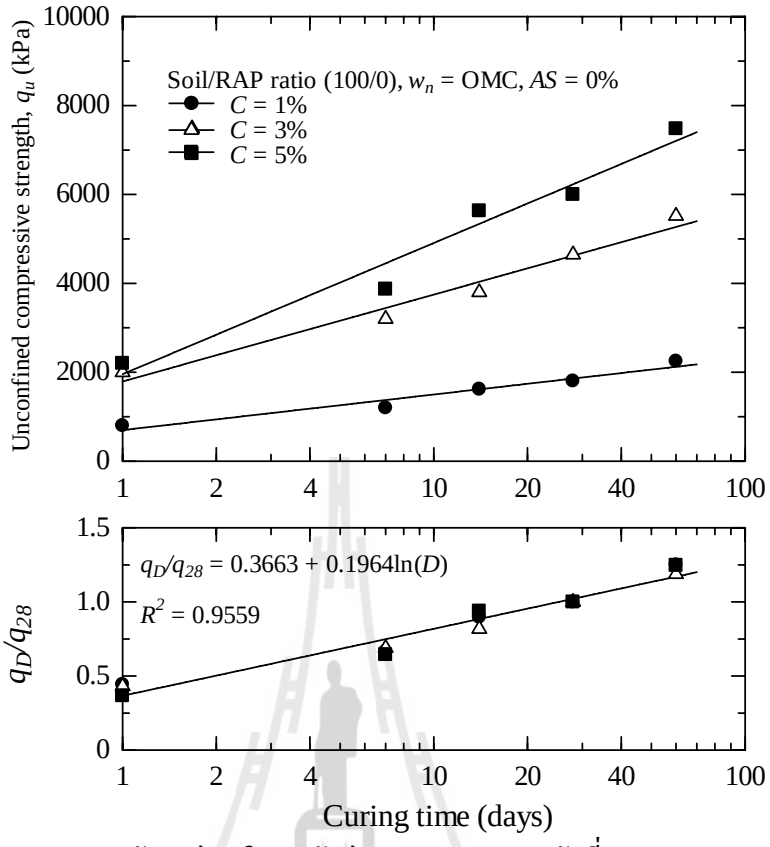
(a) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP 50/50 บดอัดที่ OMC

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ OMC



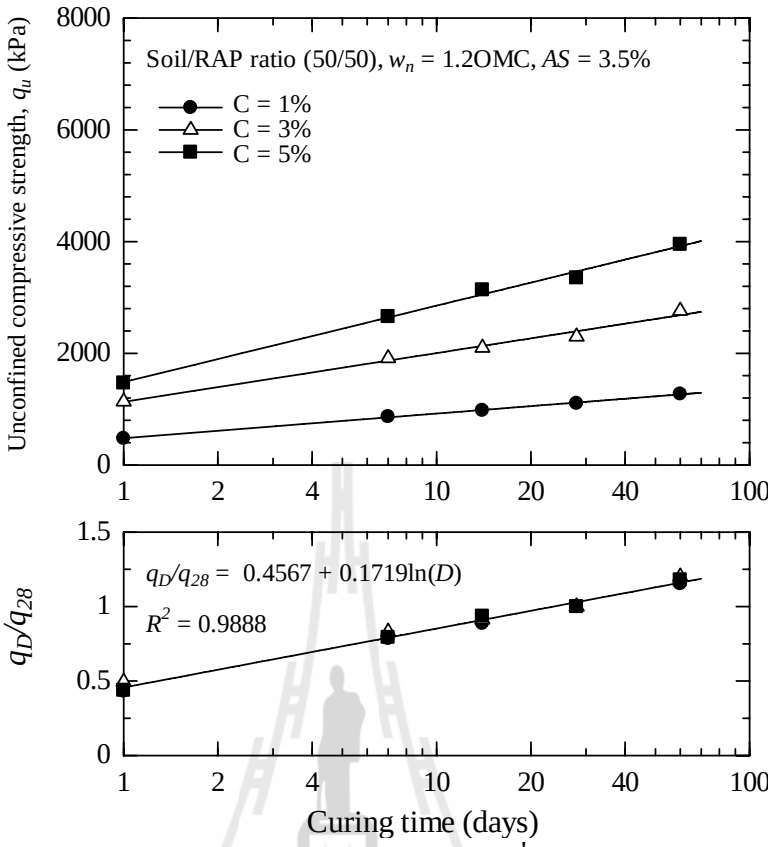
(b) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP 70/30 บดอัดที่ OMC

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ OMC (ต่อ)



(c) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP 100/0 บดอัดที่ OMC

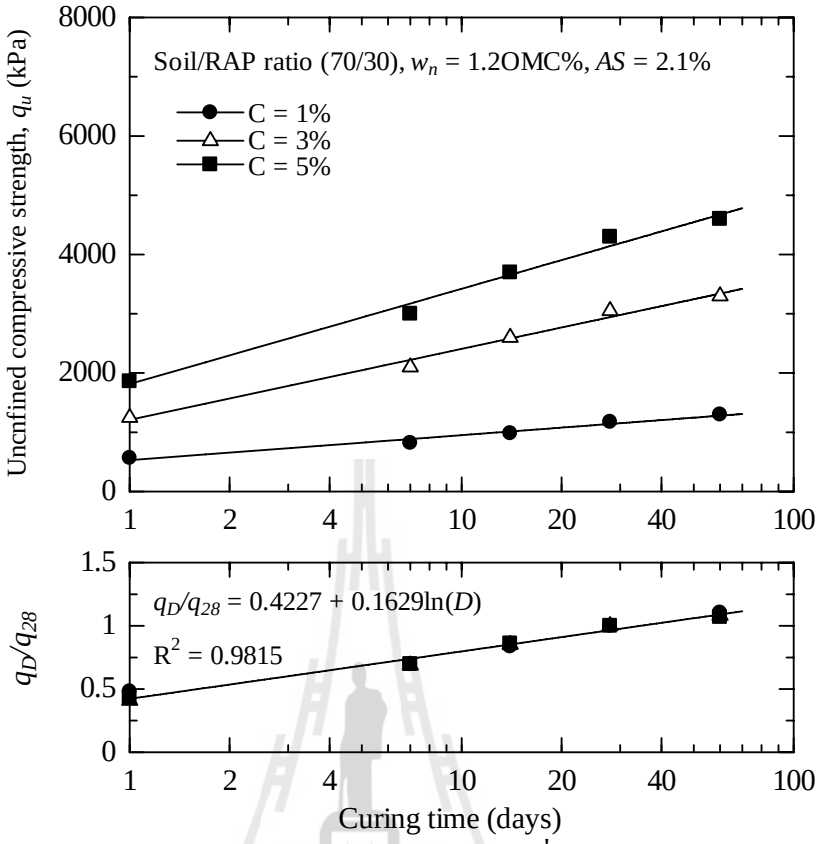
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ OMC (ต่อ)



(a) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP 50/50 บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC

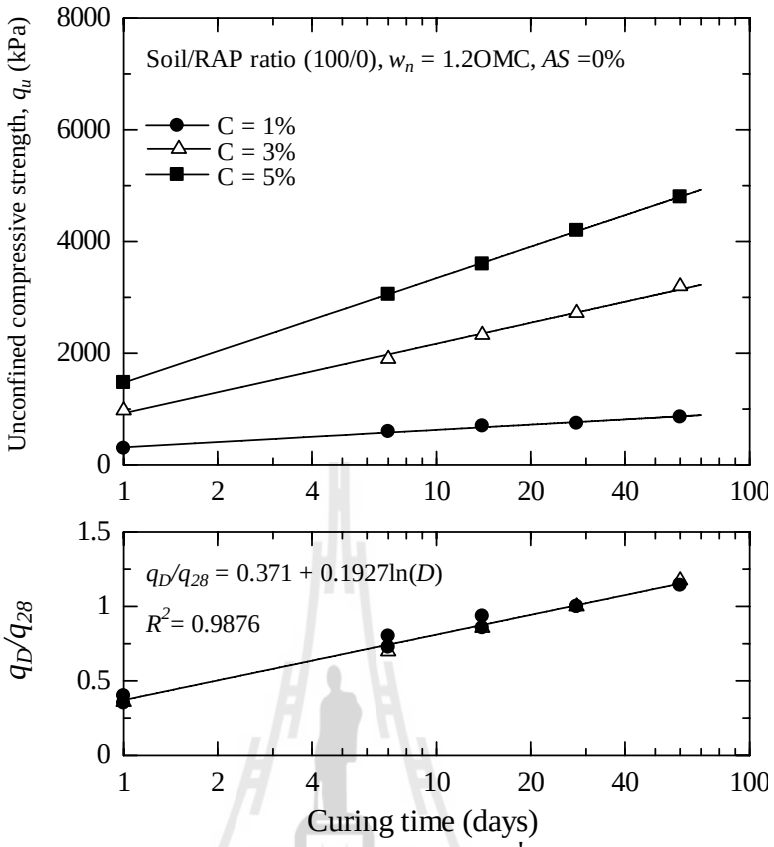
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(b) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP 70/30 บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC

รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC (ต่อ)



(c) อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP 100/0 บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC

รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC (ต่อ)

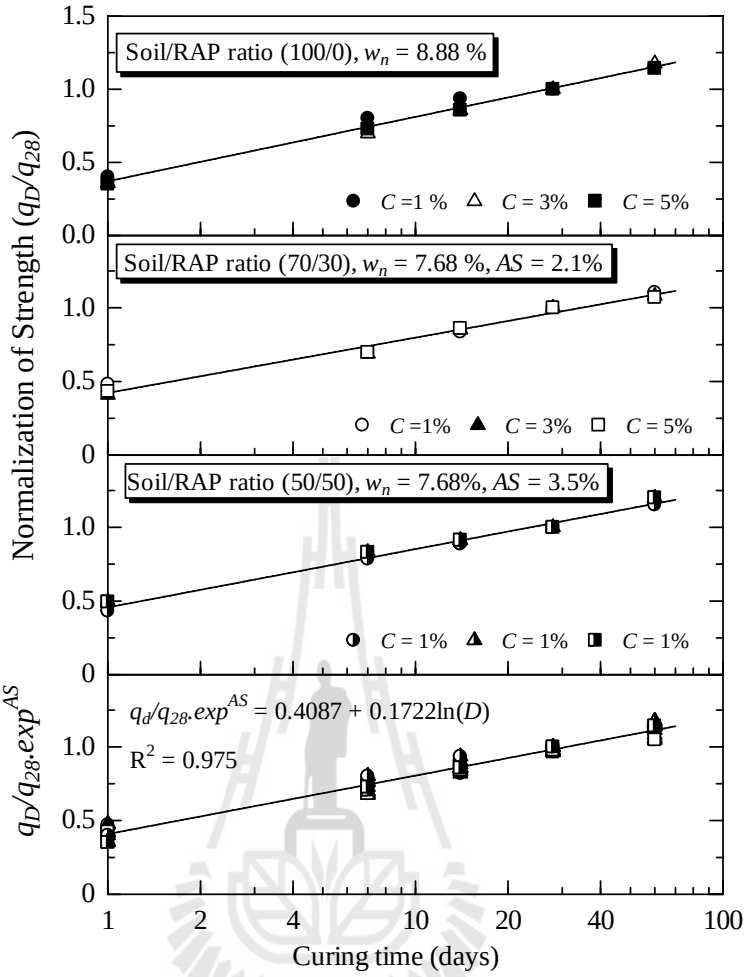
จากรูปที่ 4.24 ถึง 4.25 พบว่าเมื่อทำการ Normalization กำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP ต่างๆ ด้วยกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ทั้งด้านเปียกของ OMC และ OMC พบว่า เส้นแนวโน้มมีจุดตัดแกน y (Interception) และความชัน (Slope) ที่แตกต่างกันตามอัตราส่วนของดินลูกรังต่อ RAP ซึ่งแสดงได้จากค่า a และ b ของแต่ละสัดส่วนผสมที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ตัวแปร AS รวมเข้าไปในการทำ Normalization เมื่อคำนึงถึงผลของปริมาณแอสฟัลต์ในสัดส่วนผสมตามสมการดังนี้

$$\frac{q_D}{q_{28}.\exp^{AS}} = a^* + b^* \ln D \tag{4.5}$$

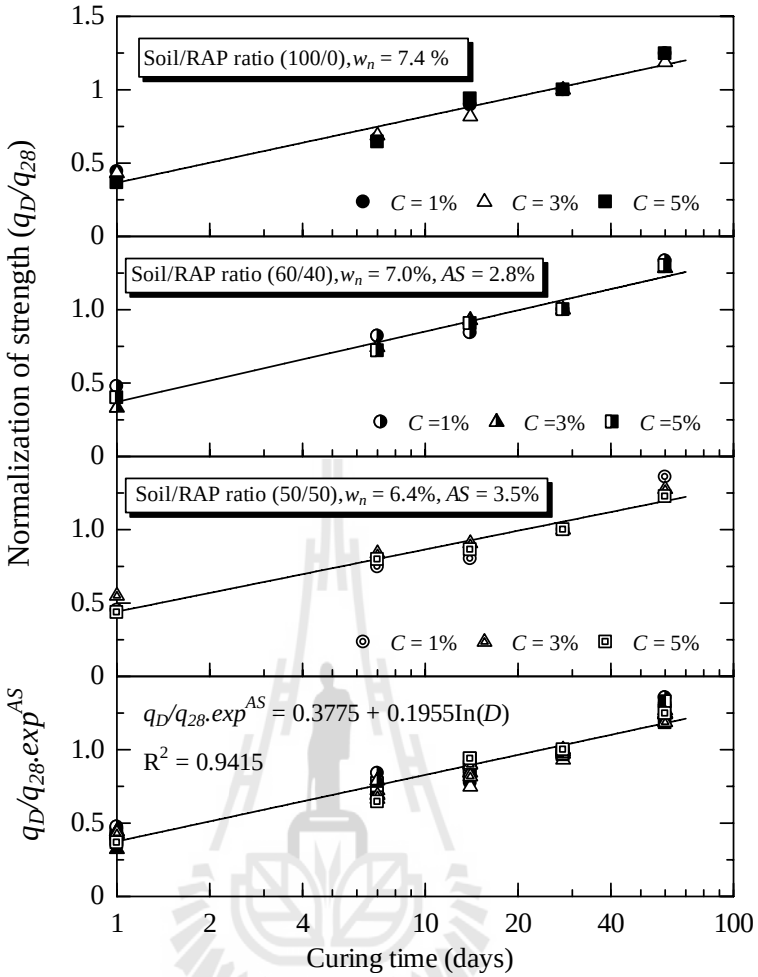
เมื่อ q_D คือกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อายุบ่ม D วันใดๆ q_{28} คือกำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่ม 28 วัน exp^{AS} คือเอกซ์โพเนนเชียลของปริมาณแอสฟัลต์ที่ผสม a^* และ b^* คือค่าคงที่ของวัสดุ ด้วยวิธีดังกล่าวทำให้สมการที่ 4.4 เป็นเอกภาพโดยขึ้นกับปริมาณซีเมนต์ อายุบ่ม และอัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP ดังแสดงในรูปที่ 4.26 สำหรับการบดอัดทางด้านเปียกของ OMC และรูปที่ 4.27 ของการบดอัดที่ OMC โดยที่ a^* และ b^* ของการบดอัดทางด้านเปียกของ OMC เท่ากับ 0.4087 และ 0.1722 ตามลำดับ และของการบดอัดที่ OMC เท่ากับ 0.3775 และ 0.1955 ตามลำดับ

ดังนั้นสมการที่ 4.4 สามารถนำไปใช้ประมาณค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ OMC และด้านเปียกของ OMC ที่อายุบ่มใดๆ ได้เพียงใช้กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วันเพียงค่าเดียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ด้านเปียกของ OMC



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์แบบ Normalization ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP และซีเมนต์ต่างๆ บดอัดที่ OMC

4.9 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

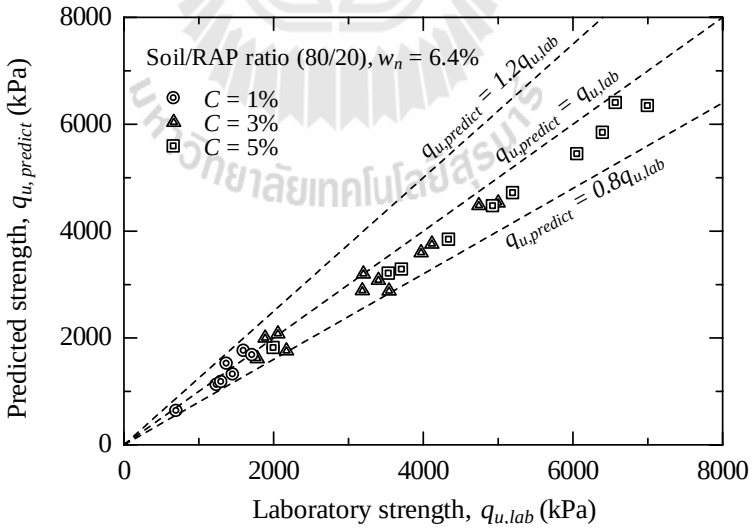
จากหัวข้อที่ 4.7 และ 4.8 ได้อธิบายกฎกำลังอัดและการพัฒนากำลงอัดตามอายุบ่มของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ การประมาณกำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่อายุบ่มใดๆ ทำได้โดยอาศัยเพียงกำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP ที่อายุบ่ม 28 วัน และปริมาณแอสฟัลต์ที่ผสม กำลังของวัสดุดินลูกรังผสม RAP ที่อายุบ่ม 28 วันสามารถคำนวณได้จากกฎกำลังอัด ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมและการทำนายกำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1) ใช้สมการที่ 4.3 เพื่อคำนวณหากำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วันโดยต้องทราบค่าปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ *(w/C)* ของตัวอย่าง และปริมาณแอสฟัลต์ที่ผสมในตัวอย่าง และใช้ค่า A^* B^* และ k เท่ากับ 6583.3 0.656 และ 0.13688 ตามลำดับ

2) เมื่อทราบค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วันจากขั้นตอนที่ 1 ตรวจสอบค่าปริมาณความชื้นของตัวอย่างว่าอยู่ที่ OMC หรือที่ด้านเปียกของ OMC

3) นำ q_{28} ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาแทนในสมการที่ 4.4 แทนค่า AS ด้วยปริมาณแอสฟัลต์ที่ผสมและ D คืออายุบ่มที่ต้องการทราบค่ากำลัง โดยที่ a^* และ b^* ของตัวอย่างที่ OMC เท่ากับ 0.4087 และ 0.1722 ตามลำดับ และ a^* และ b^* ของการบดอัดที่ OMC เท่ากับ 0.3775 และ 0.1955 ตามลำดับ

รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดที่ทำนายตามวิธีข้างต้นและกำลังอัดจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างดินลูกรังผสม RAP 80/20 ที่เตรียมตัวอย่างที่ OMC ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ พบว่ากำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการทำนายกำลังมีความแม่นยำในการทำนายกำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP ที่อายุบ่มและปริมาณซีเมนต์ต่างๆ เมื่อทราบเพียงสัดส่วนผสมและอัตราส่วน *w/C*



รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดแกนเดียวจากห้องปฏิบัติการและกำลังอัดจากสมการทำนายกำลัง อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP 80/20 ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังอัดแกนเดียวและความคงทนของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และเสนอแนวทางการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ สำหรับปริมาณ RAP ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น และอายุบ่มใดๆ ผลงานวิจัยตามวัตถุประสงค์การวิจัยสามารถสรุปดังนี้

5.1.1 อิทธิพลของปริมาณแอสฟัลต์ ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ ต่อการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสมระหว่างดินผสม RAP

ผลการศึกษาพบว่า หน่วยน้ำหนักแห้งที่ OMC จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ RAP ไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อปริมาณ RAP เกินค่า 50 เปอร์เซ็นต์แล้วหน่วยน้ำหนักแห้งจะลดลงอย่างชัดเจนซึ่งสัมพันธ์กับ OMC ที่สูงขึ้นด้วย ปริมาณแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสมมีค่าลดลง ตัวอย่างที่มี *w/C* ต่ำจะให้กำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วน *w/C* ที่สูงกว่า การพัฒนากำลังจากการปรับปรุงดินลูกรังผสม RAP ด้วยซีเมนต์แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ (1) Soil/RAP cement interaction zone (2) Cement Soil/RAP interaction zone และ (3) Inert zone โซน Soil/RAP cement interaction เป็นโซนที่ใช้จริงในทางปฏิบัติซึ่งจะเกิดขึ้นทุกสัดส่วนของปริมาณดินลูกรังต่อ RAP โดยมีปริมาณซีเมนต์ที่ผสมอยู่ระหว่าง 0 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาปริมาณ RAP ในมิติของปริมาณแอสฟัลต์ที่มีในส่วนผสมพบว่าปริมาณแอสฟัลต์ที่ผสมมีมากขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลงในทุกๆ ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมการลดลงของแบ่งได้ 2 ช่วง คือ Inert zone และ Deterioration zone ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์เป็นจุดแบ่งระหว่าง Inert zone และ Deterioration zone เรียกว่า Asphalt fixtration point ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์ตรงกับอัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 50/50

5.1.2 พฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดภายใต้การรับแรงอัดแกนเดียวและการพัฒนากำลังอัดตามอายุบ่ม

ผลการศึกษาพบว่า ความเครียดที่จุดวิบัติมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณ RAP ในส่วนผสม กำลังอัดประลัยและสติฟเนสมีค่าลดลง กำลังอัดของตัวอย่างที่บดอัดด้วยหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ OMC ให้กำลังอัดประลัยสูงกว่าการบดอัดที่ด้านเปียกและด้านแห้งของ OMC กำลังอัดของตัวอย่างมีเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม การพัฒนากำลังอัดช่วงบ่ม 1 ถึง 28 วัน มีค่ามากกว่าช่วงอายุบ่ม 28 วัน 60 วัน อย่างชัดเจน การพัฒนากำลังอัดและอายุบ่มมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นในมิติเซมิลอการิทึมและสามารถทำการ Normalization ด้วยกำลังที่อายุบ่ม 28 วัน เพื่อสร้างความสัมพันธ์ที่เป็นเอกภาพโดยไม่ขึ้นกับปริมาณซีเมนต์ได้

5.1.3 สมการทำนายกำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP

จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของดินลูกรังผสมผิวทางแอสฟัลต์ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่ OMC และด้านเปียกของ OMC ขึ้นอยู่กับ (w/C) และปริมาณแอสฟัลต์ (AS) ในส่วนผสม และมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.3

$$q_u = \frac{A^*}{(w/c(1-kAS))^{B^*}} \tag{4.3}$$

เมื่อ A^* B^* และ k เป็นค่าคงที่ของวัสดุผสมระหว่างดินลูกรังและ RAP ทุกอัตราส่วนผสม ซึ่งจากผลการทดสอบค่า A^* B^* และ k มีค่าเท่ากับ 6583.3 0.656 และ 0.13688 ตามลำดับ สมการที่ (4.3) สามารถใช้ทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP ที่อายุบ่ม 28 วันได้ กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่อายุบ่มอื่นๆ สามารถใช้กฎการพัฒนากำลังอัดตามสมการที่ 4.5 ดังนี้

$$\frac{q_D}{q_{28}.\exp^{AS}} = a^* + b^* \ln D \tag{4.5}$$

เมื่อ q_D คือกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์ที่อายุบ่ม D วันใดๆ q_{28} คือกำลังอัดของดินลูกรังผสม RAP และซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่ม 28 วัน $\exp^{AS}$ คือฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลของปริมาณแอสฟัลต์ที่ผสม a^* และ b^* คือค่าคงที่ของวัสดุ จากการทำ Linear regression งานวิจัยนี้

พบว่า a^* และ b^* ของตัวอย่างที่บดอัดที่ OMC มีค่าเท่ากับ 0.4087 และ 0.1722 ตามลำดับ และสำหรับที่ด้านเปียกของ OMC มีค่าเท่ากับ 0.3775 และ 0.1955 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป

5.2.1) การใช้สมการที่ 4.5 เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มใดๆ จำเป็นต้องต้องตรวจสอบให้ชัดเจนก่อนว่าปริมาณน้ำนั้นอยู่ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมหรือที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมหรือไม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

A.A. Luondon & Partner Consulting Engineers. (1995). Cold Deep In Place Recycling: Technical Recommendations and Application Specification. **South Africa. A.A. Luondon.**

Atkinson, P.W. (1995). Advacrete/Cement Additive for Stabilization. **Pavement Rehabilitation Workshop**. (pp 1-38). Queensland.

Bell, F.G. (1976). The influence of the mineral content of clay on their stabilization with cement. **Association of Engineering Geologists**: 267 – 278.

Clare, K.E. and Pollard, A.E. (1951). The Relationship Between Compressive Strength and Age for Soil Stabilized with Four Type of Cement. **Magazine of Concrete Research**. 3(8): 57-64.

Consoli. N.C.,Foppa. D., Festugato.L., Heineck. K.S.(2007). Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. **Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**:1090-0241

Czernin, W. (1962). Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers. **New York Chemical Publishing:** 36-50.

Davidson, D.T. and Bruns, B.W. (1960). Comparison of Type I and Type III Portland Cement for Soil Stabilization. **Highway Research Board Bulletin 267**: 28-45.

Davidson, D.T. (1961). Soil Stabilization with Portland Cement. **Highway Research Board Bulletin 292**: 45-151.

Felt, E.J. (1955). Factor Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures. **Highway Research Board Bulletin 108**: 138-163.

Gordon, R.G. (1984). Recent experience and development in design and construction of cement stabilized pavement**. Australia Road Research Board Symposium.**

Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963). Reaction Accompanying the Stabilization of Clay with Cement. **Highway Research Record**. 36: 146-171.

Highway Research Board (1949). Prevention of Moisture Loss in Soil-Cement with Bitumious Material. **Highway Research Board. Research Report:** 353.

Horpibulsuk, S. and Miura, N. (2001). A new approach for studying behavior of cement stabilized clays. **Proceeding of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**. (No.3,pp 1759-1762). Turkey.

Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. and Koga, H. (2002). Improvement of soft marine clays by deep mixing technicque. **Proceeding of 12th International Conference Offshore and Polar Engineering. Kitakyushu**. (pp 584-591). Japan.

Horpibulsuk. S.,Katkan. W.,Sililerdwattana. W.,Rachan. R.(2006).Strength Development In Cement Stabilized Low Plasticity And Coarse Grained Soils : Laboratory And Field Study. **Japanese Geotechnical Society**. 46(3): 351-366

Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). Soil Stabilization. **Sydney. Butterworths:** 64-69.63

Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y. (1981). Deep mixing method using cement hardening agent. **Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. (pp721-724). Stockholm.

Kuhlman, R.H. (1989). Soil-Cement from Recycled Pavement. **Concrete International Design and Construction**. 11(5): 35-38.

Lade, P.V. and Overton, D.D. (1989). Cementation Effects in Frictional Material. **Journal of Geotechnical Engineering**. 115(9): 1373-1387.

Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1959). The role of effective stress in the behavior of expansive **Association of Engineering Geologists**: 267 – 278.

Leadabrand, J.A. (1956). Some Engineering Aspects of Soils-Cement Mixture. **Mid-South Section, ASCE**: 64-69.

Lightsey, G.R., Arman, A. and Callihan, C.D. (1970). Change in Charactoristics of Cement Stabilized Soils By Addition of Excess Compaction Moisture. **Highway Research Record**: 315: 36-45.

Maner, A.W. (1952). Curing soil-cement base. **Highway Research Board Proceeding**. 31: 540-558.

Marshall, T.J. (1954). Some Properties of Soil Treated with Portland Cement. **Symposium on Soil Stabilization**. (pp 28-34). Australia.

Massachusetts Institute of Technology, (1954). Soil Stabilization for Highways. **Massachusetts. Massachusetts Department of Public Works and Joint Highway Research Project**: 81.

Meor, O.H. and Teoh, C.Y. (2008). Effects of temperature on resilient modulus ofdense asphalt mixtures incorporating steel slag subjected to short term oven ageing. **Proceedings of world academy of science, engineering and technology**. 36: 221-225.

Mitchell. J.K. and E.L. Jack, S.A. (1966). The fabric of soil-cement and its formation. **Proceeding 14th National Conference on Clay and Clay Minerals.** 26: 297-305.

Moh, Z.C.(1965). Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals. **Highway Research Record**. 86: 39-61.

Norling, L.T. and Packard, R.G. (1958). Expanded Short-Cut Test Method for Determinning Cement Factors for Sandy Soil. **Highway Research Board Bulletin. 198**: 20-31

Pendola, H.J., Kennady, T.W. and Hutson, W.R. (1969). **Evaluation of Factors Affecting the Tensile Properties of Cement-Treated Materials.** 98(3) University of Texas at Austin Research Report.

Phromsorn, C., Anuvadesirikeart, S., Sirarom, P., and Gatenuti, V. (2003). Propertieson indirect tensile strength and resilient modulus of asphalt concrete utilized in Thailand. **Report No. RD 204 Bureau of Road Research and Development.** Department of Highway. Thailand. (In Thai)

Redus, J.F. (1958). Study of Soil-Cement Base Courses on Military Airfields. **Highway Research Board Bulletin. 198**: 13-19.

Reinhold, F. (1955). Elastic Behavior of Soil-Cement Mixtures. **Highway Research Board. Bulletin 108**: 128-137.

Ruenkrairergsa, T. (1982). Principle of Soil Stabilization. **Group Training in Road Construction**. (pp 17-27). Bankok, Thailand.

Shackel, B. and Lee, R.H.F. (1974). Some Aspect of Curing of Soil-Cement. **The 7th Conference of the Australian Road Research Board**. 7(7): 5-17.

Spangler, M.G. and Patel, O.H. (1949). Modification of a Gumbotil Soil by Lime and Portland Cement Admixtures. **Highway Research Board. Proceed.** 29: 561-566.

Suebsuk. J., Suksan. A., Horpibulsuk. S. and Kumplala. A. (2013). Unconfined Compressive Strength of Cement Treated Soil/RAP Mixture. **Third International Conference on Geotechnique.** (pp 235-240). Nagoya, Japan.

Tabensky, W. (1990). Road Recycling in US. **Shirr of Buln Buln Memo.** 83: 66-73. 65.

Taha. R., Al-Harthy. A., Al-Shamsi. K., Al-Zubeidi. M.(2002). Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. **Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**: 0899-1561.

Terashi, M., Tanaka, H. and Okumura, T. (1979). Engineering properties of lime treated marine soils and DMM. **Proceedings of 6th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. 1: 191-194.

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.

Walton, J.E. (1995). Cold In Place Recycling Result and Procedures Most Often Ask Question and Answers. **Pavement Rehabilitation Workshop**. (25 August 1995). (pp 1-15). Queensland.

Winterkorn, H.F. and Chandrasekharn, E.C. (1951). Lateritic Soil and Their Stabilization. **Highway Research Board, Bulletin.** 44**:** 10-29.

Engineering Program. **Seato Graduate School of Engineering.** 125: 55-65.

Wang, M.C. and Huston, M.T. (1972). Direct-Tensile Stress and Strain of Cement Stabilize Soil. **Highway Research Record.** 351: 19-24.

Wirtgen. (1992). Cold Recycling. **An Economic and Ecologically Construction Process**. West Germany. Wirtgen.

ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Suebsuk, J., Suksan, A., Horpibulsuk, S. (2014). Strength Assessment of Cement Treated Soil-Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixture. **International Journal of GEOMATE.** 6 (2) : 878-884.

Int. J. of GEOMATE, June, 2014, Vol. 6, No. 2 (Sl. No. 12), pp. 878-884
Geotech., Const. Mat. & Env., ISSN:2186-2982(P), 2186-2990(O), Japan

STRENGTH ASSESSMENT OF CEMENT TREATED SOIL-RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) MIXTURE

Jirayut Suebsuk[1], Aniroot Suksan[2] and Suksun Horpibulsuk[3]

[1]Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Thailand; [2,3] Institute of Engineering, Suranaree Unversity of Technology, Thailand

ABSTRACT: The article attempts to present the influence of reclaimed asphalt pavement (RAP) content on the compaction behavior and unconfined compressive strength of cement treated soil-RAP mixture. The laboratory compaction and unconfined compression tests on cement treated soil-RAP mixture were carried out with various RAP and cement contents. The porosity was adopted as a state parameter for assessing the strength of the mixed materials. The results show that with an increase in RAP content, the OMC tends to decrease, up to the optimum of soil/RAP ratio of 50/50. The asphalt fixation point is designated as a transitional point where less change in strength turns to a larger change. An asphalt content of 3.5% (50/50 soil/RAP ratio) is found to be the asphalt fixation point. The strengths, where the asphalt content is lower than the asphalt fixation point, can be predicted by the proposed generalized form of strength. This proposed equation can assess the laboratory strength of cement treated soil-RAP mixture under various mixed proportions, cement contents, water contents, and curing times.

Keywords: Reclaimed asphalt pavement, Lateritic soil, Unconfined compressive strength, Cement stabilization

1. INTRODUCTION

Reclaimed asphalt pavement (RAP) is defined as pavement materials containing asphalt and aggregates which have been removed and/or reprocessed [1]. Rehabilitation of asphalt concrete pavement includes the milling of asphalt concrete layer, which produces a great amount of RAP. Those RAP from the rehabilitation of asphalt road are a major problem for many countries. Fig. 1 shows the on-site RAP heap from the rehabilitation of asphalt pavement failure caused by flood in the Lopburi province, Thailand. RAP can be recycled by the following applications: cold in-place recycling, cold planning, hot recycling, hot in-place recycling, and full depth reclamation [2]. Although RAP can be recycled directly as a recycled proportion of new hot mix asphalt concrete, this is generally limited to 25% (or less) of the new material according to the standard. Some RAP remain and alternative methods for disposal would need to be developed.

When used as a total substitute for natural aggregates, most RAP materials do not often meet the minimum base material requirements set forth by the standard or local state guidelines [3]. The use of RAP as a granular base is one solution available for the disposal of RAP solid waste and provides good application where no suitable materials are available [4]. RAP can be replaced by natural aggregate in pavement base or subbase if mixed with other natural aggregates [5]. However, the natural soils mixed with RAP exhibit low strength and collapse on wetting. These limitations have led to the new research efforts aimed at exploring novel stabilization methods to treat soil-RAP mixture before their use in pavement base or subbase construction [6]. The cost-effective method for stabilizing pavement material is a cold in-place mixed with cement. This method is economical and the engineering properties of materials can be controlled. The strength and resistance to deformation increase with curing time. The fundamental mechanical characteristics and some influential factors on the strength behavior (e.g., water content, cement content, curing conditions and compaction energy) of cement treated soils have been investigated extensively (e.g., [7] to [13], and others).

Fig. 1 On-site RAP heap in the Lopburi province, Thailand (photo by Jirayut Suebsuk)

Int. J. of GEOMATE, June, 2014, Vol. 6, No. 2 (Sl. No. 12), pp. 878-884

RAP are becoming increasingly popular as alternative recycled solid waste materials for pavement base applications over the last decade. Laboratory and field investigation on the use of RAP material in pavement base and subbase applications has been conducted by Rutgers University [14]. Other research works on the use of RAP have been reported in the most recent literature (e.g., [6], [15] to [17]). However, there are no methodologies based on rational criteria to assess the target strength for practical use; the conventional technique to design the mixed proportions of soil/RAP mixture is based on a trial batch.

This research therefore aims to study the influence of RAP content on the compaction behavior as well as to assess the unconfined compressive strength and strength development with curing time of cement treated lateritic soil/RAP mixture, using porosity as a state parameter.

2. LABORATORY INVESTIGATION

2.1 Lateritic Soil

The natural lateritic soil used in this study is a local problematic soil from the Nakhon-Ratchsima province, Thailand. It contains high fine particle content over the maximum criteria according to the Department of Highways (DOH) standard. It was collected from a borrowed pit in the Nakhon-Ratchasima province, Thailand, at a depth 2 to 3 m. The fine particle accounts for the significant problems on the base course structure, especially the swelling, consolidation and collapse upon drying and wetting. The grain size distribution of the soil is presented in Fig. 2. The natural soil is composed of 2% gravel, 53% sand, 25% silt, and 20% clay. The specific gravity is 2.68. The liquid and plastic limits are approximately 23% and 5%, respectively. Based on the Unified Soil Classification System (USCS), the soil is classified as clayey sand (SC).

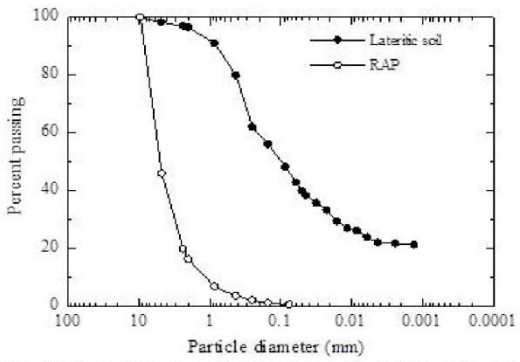


Fig. 2 The grain size distribution of lateritic soil and RAP

2.2 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

The only source of RAP material was obtained from the milling of asphalt pavement for resurfacing in the cold in-place recycling (CIR) process in the Nakhon-Ratchasima province, Thailand. This RAP contains primarily crushed limestone with 7% of asphalt content. The in-situ RAP were air-dried and then passed through a 3/8" sieve for removal of particles larger than 10 mm. The grain size distribution is also presented in Fig. 2. It indicated that approximately 100% of RAP was retained on the No. 200 sieve. The bulk specific gravity is 2.49.

2.3 Compaction and Unconfined Compression Tests

The compaction of lateritic soil, RAP and mixed materials was carried out using a 100-mm standard mold under modified Proctor energy (ASTM D 1557). The optimum moisture content (OMC) and maximum dry density ($\gamma_{d,max}$) of compacted lateritic soil under the modified Proctor are 8% and 21.2 kN/m^3, respectively; while the OMC and $\gamma_{d,max}$ of compacted 100% of RAP under the modified Proctor are 6.2% and 17.5 kN/m^3, respectively. The modified Proctor energy was performed on the untreated mixed materials to assess their OMC and $\gamma_{d,max}$.

The unconfined compressive tests were performed on the cylindrical specimens, which were compacted on the OMC of untreated materials. The lateritic soil, mixed with RAP, was treated by various contents of Portland cement type I. The RAP content used in the mix proportions varied from 0 to 90% by weight of total material, while the cement content (C) varied from 0 to 5% by weight of solid. After 24 hours of molding, the specimens were dismantled from the mold, wrapped in vinyl bags, and stored in a humidity chamber with a constant temperature (25 ± 2 °C). Unconfined compression tests were conducted on the samples after 1, 7, 14, 28, and 60 days of curing. The rate of vertical displacement was constantly kept at 1 mm/min. After finishing the test, the moisture content of the samples was measured for evaluating the porosity.

For all mixtures at each curing time and combination of moisture content and cement content, at least five samples were tested under the same condition to check the consistency of the test. In the most cases, the results under the same testing condition were reproducible with a low mean standard deviation, SD (SD < 10%), where $\bar{x}$ is the mean strength value).

Int. J. of GEOMATE, June, 2014, Vol. 6, No. 2 (Sl. No. 12), pp. 878-884

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Table 1. shows the OMC and $\gamma_{d,max}$ of soil-RAP mixture for different soil/RAP ratios but with the same compaction energy. Fig. 3a shows the compaction curve of the lateritic soil and RAP. The various compaction curves of mixed materials were presented in Fig. 3b under various soil/RAP ratios. The OMC tends to decrease as the RAP content increases up to the optimum RAP content, which is 50/50 of soil/RAP ratios. At this point, it provides a maximum dry density of 21.9 kN/m^3 associated with a moisture content of 6.4%. The reduction in the maximum dry density is associated with an increase in the RAP content, more than the optimum point. The reduction in the maximum dry density (increase in porosity) could be due to the larger particle size of RAP, where the soil-RAP mixture leads to a poorly graded material.

Table 1 The OMC and maximum dry density of soil-RAP mixtures

Soil/RAP ratio	OMC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)
80/20	7.0	21.5
60/40	6.8	21.6
50/50	6.4	21.9
40/60	7.0	21.3
20/80	8.8	19.9

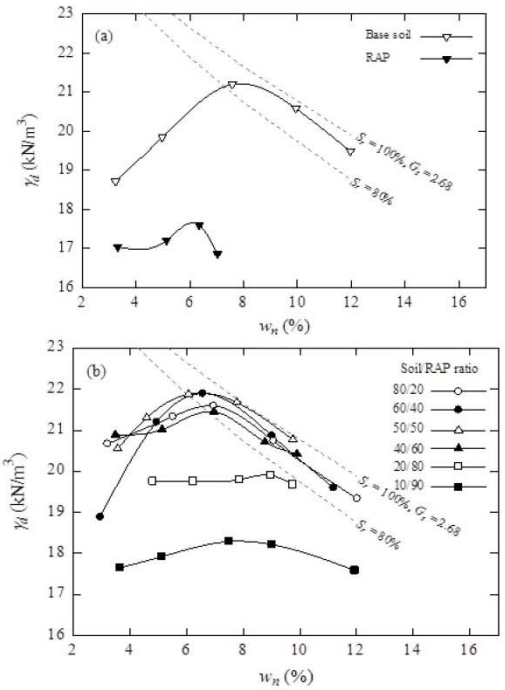


Fig. 3 Compaction curves of the lateritic soil, RAP, and mixed materials

Fig. 4 shows the typical stress-strain relationships in the unconfined compression tests of cement treated soil-RAP mixture for different RAP content but with the same cement content and curing time. The RAP content in the mixed materials has played a significant role in the stress-strain-strength behavior under unconfined compression tests. The reduction in strength and stiffness of the mixed materials are associated with a decrease in dry density.

Fig. 5 shows the effect of RAP, as represented by the asphalt binder content *AS* (%), on the strength in unconfined compression tests of cement treated soil-RAP mixture. *AS* is calculated as follows:

$$AS = \frac{W_{as}}{W_s} \quad 100\%, \tag{1}$$

where W_{as} is the weight of asphalt binder, and W_s is the weight of soil solid. As the asphalt content increases, the unconfined compressive strength significantly decreases. However, when the asphalt binder content is greater than 3.5% (50/50 of soil/RAP ratio), the change in strength is larger. The asphalt content of 3.5% can be designated as the "asphalt fixation point". The decrease in strength is due to a reduction in friction between the solid particles (soil and RAP aggregate), which is caused by the asphalt binder. The asphalt fixation point is a transitional point where less change in strength turns to a larger change. The reduction in strength is minimal when the asphalt content is lower than the asphalt fixation point; this zone is called the inert zone. The zone is also called deterioration when the asphalt content is greater than the asphalt fixation point.

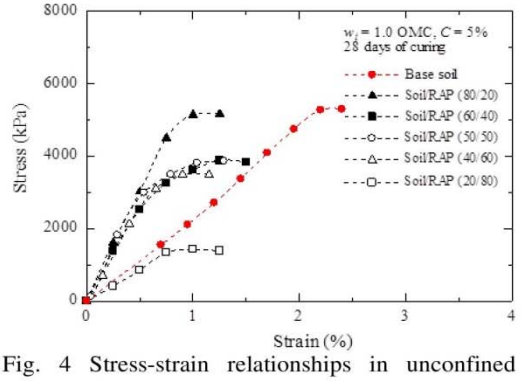


Fig. 4 Stress-strain relationships in unconfined compression test of lateritic soil and mixed materials

Int. J. of GEOMATE, June, 2014, Vol. 6, No. 2 (Sl. No. 12), pp. 878-884

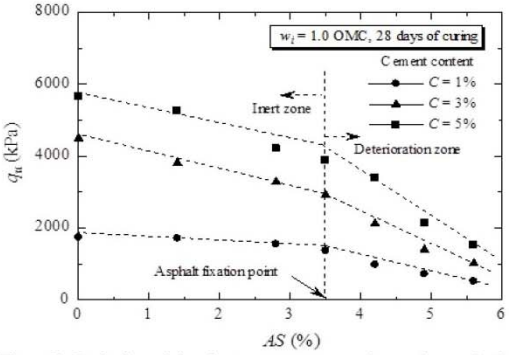


Fig. 5 Relationship between strength and asphalt content

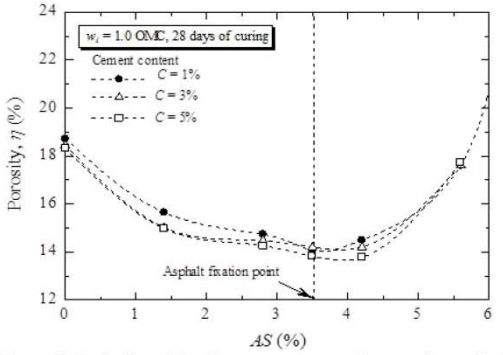


Fig. 6 Relationship between porosity and asphalt content

Fig. 6 shows the porosity η of the cement treated soil-RAP mixture. The compacted 100% lateritic soil inherently exhibits 18.5% of porosity. The increase of asphalt content in the mixed material reduced the porosity. By adding 3.5% of asphalt content, the porosity is reduced by up to about 14%. However, when the asphalt content is greater than 3.5%, the porosity increases. The increase in the porosity could be due to the lower specific gravity of RAP and the compaction behavior of the mixed material.

Fig. 7 shows the comparison of strength development in cement treated soil-RAP mixture under various RAP content but with the same cement content. As the higher asphalt content increases, the strength is lowered. The presence of asphalt binder reduces the bonding between RAP aggregate and soil. The asphalt binder is detrimental to cement treated soils. The typical strength development with curing time for cement treated soil-RAP mixtures under 20%, 40% and 50% of RAP content is shown in Figs. 8-10. The strength development with curing time (days) in a natural logarithmic scale can be expressed as a linear variation. The strength ratio plots after normalization are also shown in these figures. The normalized relation is presented in Eq. (2).

$$\frac{q_D}{q_{28}} = a + b \ln D, \tag{2}$$

where q_D is the strength after D days of curing, q_{28} is the 28-day strength, a and b are constant.

From this investigation, the values of a and b are 0.248 and 0.225 for 80/20 of soil/RAP ratio, 0.297 and 0.197 for 60/40 of soil/RAP ratio, and 0.444 and 0.178 for 50/50 of soil/RAP ratio. The normalized strength development is comparable to that proposed for cement treated low plasticity and coarse grained soils [10]. It is found that these three sets of values depend on the variation of porosity and cement

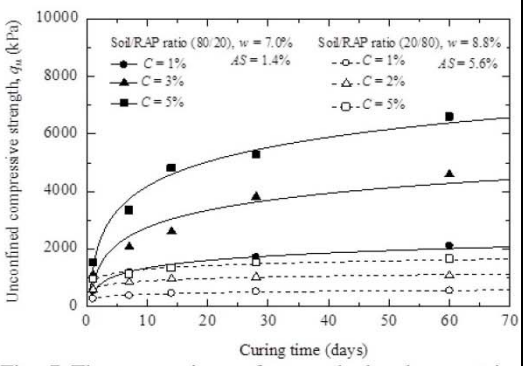


Fig. 7 The comparison of strength development in cement treated soil-RAP mixture under different RAP content

content for the range of curing time considered. The soil water/cement ratio and compaction behavior has play a significant role on the change in porosity of cement treated soil-RAP mixture. To account the material type and the water-cement ratio, the generalized relationship of strength ratio has been take the porosity into the account by the proposed generalized equation:

$$\frac{q_D}{q_{28}} \eta = a^* + b^* \ln D \tag{3}$$

where η is the porosity of treated specimens at each mixture, a^* and b^* are constant. Based on the test result of cement treated mixed materials on the inert zone, the generalization of strength development can be illustrated as in Fig. 11. The linear regression analysis gives a^* = 0.028 and b^* = 0.046. This generalization accounts for the effect of the compaction behavior of different gradation. It is evident that the asphalt content is lower than the asphalt fixation point (3.5%) and valid for the range of curing time between 1 to 60 days. For predicting the strength via the generalization Eq. (3), one

Int. J. of GEOMATE, June, 2014, Vol. 6, No. 2 (Sl. No. 12), pp. 878-884

laboratory test value of strength and porosity measured on the 28 days of curing at the same compaction energy, same cement content, and same soil/RAP ratio is needed. Using this generalization, the strength of cement treated soil-RAP (70/30 of soil/RAP ratio) mixture was predicted and compared with those of the laboratory test as shown in Fig. 12. There is some discrepancy between the predicted and laboratory strengths. However, the error from the prediction is acceptable in common engineering practice.

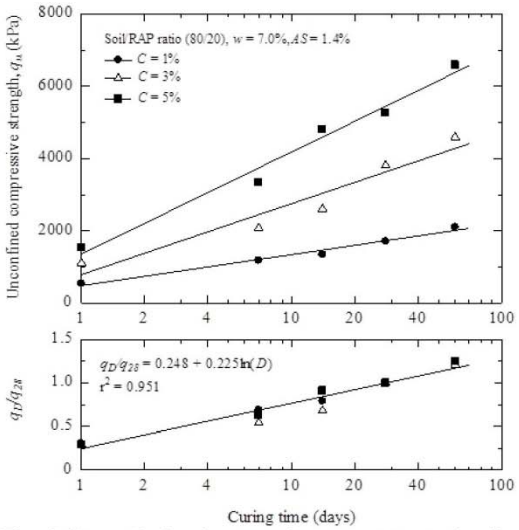


Fig. 8 Strength development in cement treated soil-RAP mixture (80/20) and its normalization

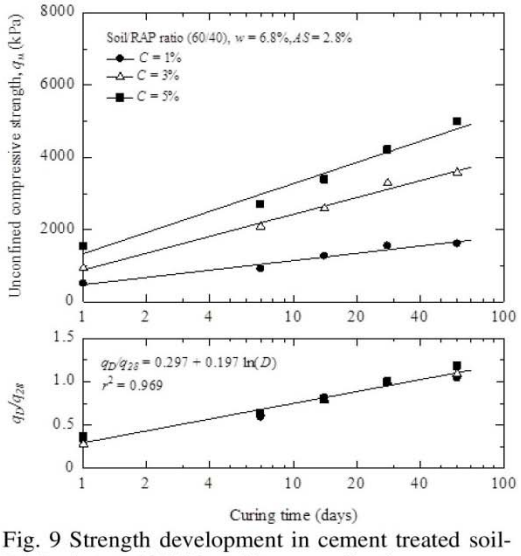


Fig. 9 Strength development in cement treated soil-RAP mixture (60/40) and its normalization

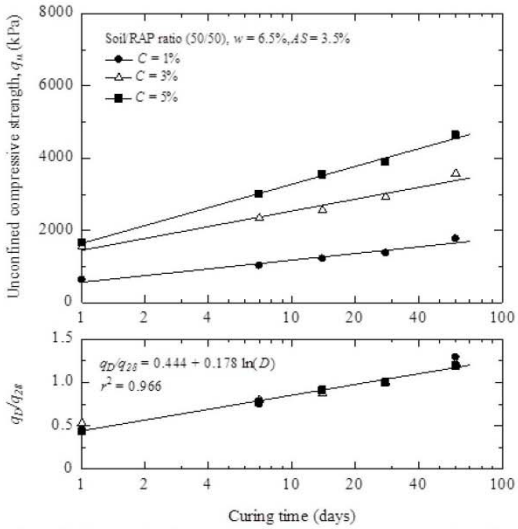


Fig. 10 Strength development in cement treated soil-RAP mixture (50/50) and its normalization

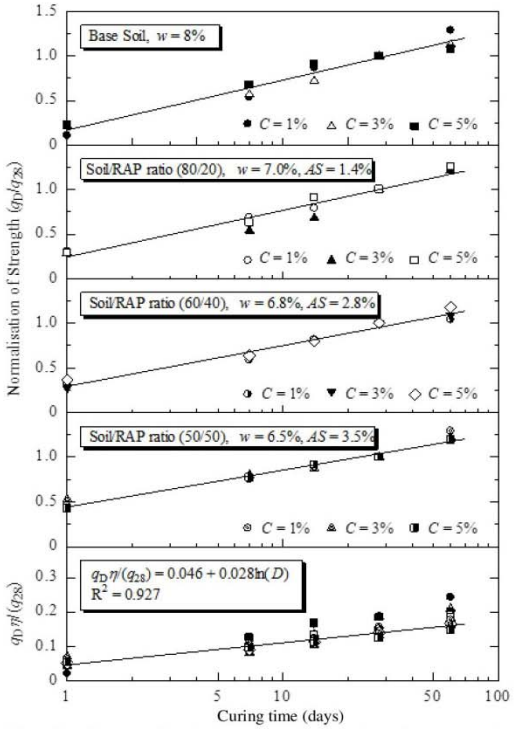


Fig. 11 Generalization of strength development in cement treated soil-RAP mixture

Int. J. of GEOMATE, June, 2014, Vol. 6, No. 2 (Sl. No. 12), pp. 878-884

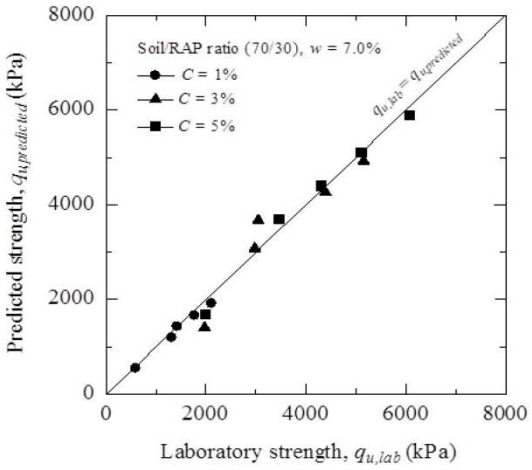


Fig. 12 Comparison between predicted and laboratory strengths

4. CONCLUSION

This article presents the unconfined compressive strength of a problematic lateritic soil mixed with RAP. The mixed materials were treated by cement to increase their strength and engineering properties. The influence of RAP content on the compaction and strength development with curing time was studied using porosity as a state parameter. The following conclusions can be drawn:

1) The OMC of mixed material is dependent directly on the mixed proportions. With an increase in RAP content, the OMC tends to decrease, up to the optimum gradation with a soil/RAP ratio of 50/50.

2) As the asphalt content increases, the unconfined compressive strength decreases due to a reduction in friction between the solid particles (soil and RAP), which is caused by the asphalt binder. The unconfined compressive strength of mixed materials is associated with the variation in porosity. Asphalt fixation point is defined as the limit point of asphalt content that separates the inert from the deterioration zones. An asphalt content of 3.5% (50/50 of soil/RAP ratio) has become the asphalt fixation point of this investigation.

3) The target strength of cement treated soil-RAP mixture can be predicted by the generalized form of strength if and when the asphalt content is lower than the asphalt fixation point. This proposed equation can assess the laboratory strength of cement treated soil-RAP mixture in which the mixed proportion, cement content, water content, and curing time vary.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This research was financially supported by the Rajamangala University of Technology Isan. The facilities provided by the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology are also very much appreciated.

6. REFERENCES

[1] Cosentino PJ, Kalajian EH, Shieh, CH, Mathurin WJK, Gomez FA, Cleary ED, and Treeratrakoon A, "Developing Specifications for Using Recycled Asphalt Pavement as Base, Subbase or General Fill Materials, Phase II", Rep. No. FL/DOT/RMC/06650-7754, Florida Institute of Technology, 2003.

[2] Attia MIE, "Characterization of the Structural Behavior of Reclaimed Asphalt Pavement as pavement base layer", Doctoral dissertations, North Dakota State University of Agriculture and applied science, 2010.

[3] Rana ASMA, “Evaluation of recycled material performance in highway applications and optimization of their use”, Ph.D. dissertation, Texas Tech Univ., Lubbock, TX., 2004.

[4] Papp WJ, Maher MH, Bennert TA, and Gucunski N, "Behavior of Construction and Demolition Debris in Base and Subbase Applications", ASCE Recycled Materials in Geotechnical Applications, Geotechnical Special Publication No. 79, 1998, pp. 122-136.

[5] Taha R, Ali A, Basma A, and Al-Turk O, "Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases" Transportation Research Record 1652, Washington, DC, 1999, pp. 264-269.

[6] Hoyos LR, Puppala AJ, and Ordonez CA, "Characterization of Cement-Fiber-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate: Preliminary Investigation", Journal of Material in Civil Engineering, ASCE, Vol. 23, No.7, 2011, pp. 977-989.

[7] Consoli NC, Rotta GV, and Prietto PDM, “The influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils” Geotechnique, Vol. 50, No. 1, 2000, pp. 99-105.

[8] Consoli NC, Prietto PDM, Carraro JAH, and Heineck KS, " Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 9, 2001, pp.774-782.

[9] Consoli NC, Foppa D, Festugato L, and Heineck KS, "Key parameters for Strength Control of Articially Cemented Soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 133, No. 2, 2007,

pp.197-205.

[10] Horpibulsuk S, Katkan W, Sirilerdwattana W, and Rachan R, "Strength Development in Cement Stabilized Low Plasticity and Coarse Grained Soils: Laboratory and Field Study", Soils and Foundations, Vol. 46, No. 3, 2006, pp. 351-366.

[11] Horpibulsuk S, Rachan R, Chinkulkijniwat A, Raksachon Y, and Suddeepong A. "Analysis of Strength Development in Cement-Stabilized Silty Clay based on Microstructural Considerations" Construction and Building Materials, Vol. 24, 2010, pp. 2011-2021.

[12] Horpibulsuk S, Rachan R, and Suddeepong A, "Assessment of Strength Development in Blended Cement Admixed Bangkok Clay", Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 4, 2011, pp.1521-1531.

[13] Horpibulsuk S, Phojan W, Suddeepong A, and Liu MD, "Strength Development in Blended Cement Admixed Saline Clay", Applied Clay Science, Vol. 55, 2012, pp. 44-52.

[14] Maher MH, and Popp WJr, "Recycled Asphalt Pavement as Base and Subbase Material" ASTM STP 1275, ASTM, West Conshohoken, Pa., 1997.

[15] Taha R, Al-Harthy A, Al-Shamsi K, and Al-Zubeidi M, "Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases" Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 14, No. 3, 2002, pp.239-245.

[16] Puppala AJ, Hoyos LR, and Potturi AK, "Resilient Moduli Response of Moderately Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 23, No. 7, 2011, pp. 990-998.

[17] Puppala AJ, Saride S, and Williammee R, "Sustainable Reuse of Limestone Quarry Fines and RAP in Pavement Base/Subbase layers", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 24, No. 4, 2012, pp. 418-429.

Int. J. of GEOMATE, June, 2014, Vol. 6, No. 2 (Sl. No. 12), pp. 878-884.
MS No. 3262 received on June 15, 2013 and reviewed under GEOMATE publication policies.
Copyright © 2014, International Journal of GEOMATE. All rights reserved, including the making of copies unless permission is obtained from the copyright proprietors. Pertinent discussion including authors' closure, if any, will be published in the June. 2015 if the discussion is received by Dec. 2014.
Corresponding Author: Jirayut Suebsuk

ประวัติผู้เขียน

นายอนิรุทธิ์ สุขแสน เกิดเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ.2532 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านพนมไพร ชั้นประถมศึกษาปีที่ 3 ถึง 6 ที่โรงเรียนเทศบาลวัดเวฬุวัน มัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย ชั้นประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างก่อสร้างที่วิทยาลัยเทคนิคร้อยเอ็ด และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2555 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบประกอบวิชาชีพวิศวกรควบคุมระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมโยธา ปี พ.ศ.2555 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยในระหว่างศึกษามีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติตามภาคผนวก ก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี