

อิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ต่อกำลังอัด
ของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์



นายอาทิตย์ อินทรา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**INFLUENCE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT
ON COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT-
STABILIZED BASE MATERIAL**



**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**

อิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ต่อกำลังอัดของ
วัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร. รัฐพล สมณา)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฏรัชต์ โชติษฐียงกูร)

กรรมการ

(ผศ. ดร. อนุชิต อุชายภักชาติ)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

อาทิตย์ อินทรา : อิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ค้อนกริตที่นำกลับมาใช้ใหม่ต่อ
กำลังอัดของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ (INFLUENCE OF RECLAIMED
ASPHALT PAVEMENT ON COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT-
STABILIZED BASE MATERIAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์
หอพิบูลสุข, 80 หน้า.

การปรับปรุงถนนด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่จำเป็นต้องขุดไส
(Mill) ผิวทางแอสฟัลต์เดิมบางส่วนทิ้ง ผิวทางเดิมนี้จัดเป็นวัสดุคัดทิ้งที่มีปริมาณมากและเป็น
ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม บทความนี้ประเมินคุณสมบัติด้านกำลังอัดและความคงทนด้านเป็ยกสลับ
แห้งของหินคลุก (CR) ผสมผิวทางแอสฟัลต์ (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ตัวแปรอิทธิพลใน
งานวิจัยนี้ประกอบด้วยปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม
ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด กำลังอัด และความคงทนของวัสดุผสม
ระหว่าง CR และ RAP ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ RAP ด้วยพลังงานการ
บดอัดที่ให้กับวัสดุผสม (พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน) ที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากยางใน
RAP มีคุณสมบัติการดูดซับพลังงานการบดอัดสูงกว่าหินคลุก ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่
อายุบ่มใดๆ และปริมาณ CR แสดงได้ด้วยสมการเชิงเส้นตรง รอบเป็ยกสลับแห้งทำให้เกิดการ
สูญเสียน้ำหนักของวัสดุผสม และส่งผลให้กำลังอัดของวัสดุผสมลดลง กำลังอัดที่รอบเป็ยกสลับ
แห้งค่าหนึ่ง ที่การบดอัดสถานะหนึ่ง (ด้านแห้ง ด้านเป็ยก และปริมาณความชื้นเหมาะสม) สามารถ
ประมาณได้จากกำลังอัดในสถานะเป็ยกเริ่มต้น (ก่อนการทดสอบเป็ยกสลับแห้ง) ผลการทดสอบ
แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมระหว่าง CR และ RAP สามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกในงานทางได้ โดย
ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดของ Portland Cement Association สำหรับทุก
อัตราส่วนผสม CR : RAP และปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่าร้อยละ 3

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

ARTIT INTRA : INFLUENCE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT
ON COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT-STABILIZED BASE
MATERIAL. THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK,
Ph.D., 80 PP.

RECLAIMED ASPHALTIC PAVEMENT/RAP/COMPRESSIVE STRENGTH/
MILL/WET-DRY TEST

Milled asphalt pavement from the pavement recycling technique is abundant and causes environmental problems. An evaluation of strength and durability against wet-dry cycles of cement stabilized Crushed Rock (CR) blend is made in this research. The influencing factor includes Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) content, water content, cement content and curing time. Test results show that dry unit weight, strength and durability of the cement stabilized CR blend decrease as RAP increases for the same modified Proctor energy because the bitumen attached on RAP surface has higher absorption capacity than CR. The relationship between strength of the cement stabilized CR blend at a given curing time and CR content is expressed by a linear function. The wet-dry cycles lead to a weight loss on the cement stabilized CR blend; hence the strength reduction. The wet-dry cycle strengths for a state of compaction (dry side or wet side or optimum water content) can be approximated from the corresponding initial soaked strength (prior to wet-dry test). The evaluation of strength and durability of the cement stabilized CR blend indicates that the stabilized CR blend can be used as an alternative pavement material. The weight loss

of the stabilized CR blend with various CR:RAP ratios for cement contents higher than 3% is lower than the recommendation by the Portland Cement Association.



School of Civil Engineering

Academic Year 2013

Student's signature _____

Advisor's signature _____

Co-Advisor's signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ กลุ่มบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่กรุณาแนะนำ ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นบุคคลสำคัญอย่างยิ่งที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

อาจารย์ ดร.รัฐพล สมณา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่คอยแนะนำ ให้คำปรึกษาในการเขียนและตรวจทานวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง อาจารย์ผู้สอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่คอยอบรมและสั่งสอนกับผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูรและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชิต อุชายภิกษิตที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่านในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ คุณณัฐญา กิ่งโลกกรวด และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่สนับสนุนเรื่องทุนการศึกษาประจำปีการศึกษา 2554 และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้วิจัยขอบพระคุณแต่ นางสุนันทา อินทรา ผู้เป็นทั้งบิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และเป็นกำลังใจให้ตลอดมาและบุคคลต่างๆ ที่อาจกล่าวถึงไม่หมด ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์อันมีค่าให้แก่ผู้วิจัย จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

อาทิตย์ อินทรา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.4.1 องค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป	4
1.4.2 ด้านเศรษฐศาสตร์	5
1.4.3 ด้านเทคนิคการก่อสร้างในอนาคต	5
2 ปรีทรรศน์วรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ประวัติความเป็นมาของถนนดินซีเมนต์	6
2.3 ประเภทของดินซีเมนต์	7
2.4 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์	8
2.5 โครงสร้างของดินซีเมนต์	10
2.6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์	11
2.6.1 ปริมาณซีเมนต์และประเภทของซีเมนต์	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 ชนิดของดิน.....	13
2.6.3 ปริมาณความชื้นขณะทำการบดอัด.....	17
2.6.4 การบ่มดินซีเมนต์.....	19
2.6.5 ระยะเวลาในการผสม.....	21
2.6.6 สารผสมเพิ่ม.....	22
2.7 กำลังของดินซีเมนต์.....	24
2.8 การนำวัสดุเก่ามาใช้ใหม่ (Recycling).....	26
3 แนวทางและวิธีการวิจัย.....	29
3.1 บทนำ.....	29
3.2 แผนการวิจัย.....	29
3.2.1 วัสดุทดสอบ.....	29
3.2.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	30
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล.....	34
4.1 บทนำ.....	34
4.2 วัสดุทดสอบและการทดสอบ.....	34
4.2.1 วัสดุทดสอบ.....	34
4.2.2 วิธีการทดสอบ.....	37
4.3 ผลทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ.....	38
4.4 กำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์.....	42
4.5 ความคงทนของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์.....	47
4.5.1 อิทธิพลของจำนวนรอบเป็ยกสลับแห้งต่อกำลังอัดของวัสดุผสม.....	48
4.5.2 ความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียกับรอบการทดสอบ.....	50
4.5.3 อิทธิพลของร้อยละการสูญเสียกับปริมาณปูนซีเมนต์.....	52
4.5.4 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับร้อยละการสูญเสีย.....	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 บทสรุป.....	63
5.1 อิทธิพลของการบดอัด อัตราส่วน ปริมาณปูนซีเมนต์ ที่มี ผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นเหมาะสม.....	63
5.2 กำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์.....	63
5.3 ความคงทนของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์.....	64
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	80



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุง ตามการจำแนกแบบ ASSHTO.....	17
2.2	ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสม สำหรับวัสดุต่างๆ.....	17
2.3	แนวทางการเลือกวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) กับวัสดุแต่ละชนิด.....	24
2.4	เปรียบเทียบข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์ของ Cold Recycling Process กับ Conventional Method.....	27
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของ CR และ RAP.....	35
4.2	ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของวัสดุผสม (CR: RAP).....	36
4.3	กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม Mix (CR:RAP = 20:80) ผสมซีเมนต์บดอัด.....	43
4.4	กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม Mix (CR:RAP = 40:60) ผสมซีเมนต์บดอัด.....	43
4.5	กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม Mix (CR:RAP = 60:40) ผสมซีเมนต์บดอัด.....	43
4.6	กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม Mix (CR:RAP = 80:20) ผสมซีเมนต์บดอัด.....	44
4.7	กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม Mix (CR:RAP = 100:0) ผสมซีเมนต์บดอัด.....	44
4.8	ข้อกำหนดด้านความคงทนของดินซีเมนต์ PCA (Portland Cement Association).....	48

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างความเสียหายของถนนที่ต้องทำการซ่อมแซม.....	2
1.2 ลักษณะทั่วไปของเครื่องจักรในงาน Pavement Recycling.....	3
2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	11
2.2 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) กับเวลา (Time)	14
2.3 ค่าพิกัดอัตราเบร็ก (Atterberg's Limit) ของดินไอโอวา (Iowa) หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง.....	14
2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8 %.....	15
2.5 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12 %.....	16
2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 16 %.....	16
2.7 อิทธิพลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างผสมชั้นและการบดอัด ที่มีต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	21
2.8 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้เวลาในการบดอัดนานขึ้น	22
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in Tension กับกำลังดึง และกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	25
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct Tensile Strength กับ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์.....	25
3.1 การแบ่งตัวอย่างด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่าง.....	30
3.2 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ.....	30
3.3 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor).....	31
3.4 ก้อนตัวอย่างหลังการบดอัด.....	32
3.5 แผนการวิจัยในห้องปฏิบัติการ.....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 การกระจายตัวของวัสดุผสม (CR: RAP).....	36
4.2 กราฟการบดอัดของหินคลุก ผิว AC เดิมและดินผสมในอัตราส่วนต่างๆ	37
4.3 กราฟการบดอัดวัสดุผสม CR กับ RAP ผสมปูนซีเมนต์.....	39
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับอัตราส่วนต่างๆ	40
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสมกับอัตราส่วนต่างๆ	41
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นเหมาะสม.....	42
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวต่ออัตราส่วน CR:RAP ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	45
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวต่ออัตราส่วน CR:RAP ที่อายุบ่ม 28 วัน.....	46
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $q_{u(CR:RAP)}/q_{uCR}$ ต่ออัตราส่วน CR:RAP ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน	46
4.10 ความสัมพันธ์กำลังอัดกับอัตราส่วนการแทนที่ของตัวอย่าง ที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งรอบที่ 1, 3 และ 6	49
4.11 ความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียกับรอบการทดสอบ ที่ปริมาณความชื้นที่ 0.80 OWC	50
4.12 ความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียกับรอบการทดสอบ ที่ปริมาณความชื้นที่ OWC	51
4.13 ความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียกับรอบการทดสอบ ที่ปริมาณความชื้นที่ 1.20 OWC	52
4.14 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับรอบการทดสอบของวัสดุผสมที่ 0.80 OWC ปูนซีเมนต์ร้อยละ 3, 5 และ 7	53
4.15 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับรอบการทดสอบของวัสดุผสมที่ OWC ปูนซีเมนต์ร้อยละ 3, 5 และ 7	54
4.16 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับรอบการทดสอบของวัสดุผสมที่ 1.20 OWC ปูนซีเมนต์ร้อยละ 3, 5 และ 7	55
4.17 Normalized $q_{u(w-d)}/q_{u0}$ กับรอบการทดสอบที่สภาวะการบดอัดต่างๆ.....	56
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ของวัสดุผสมที่ 0.80 OWC.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ของวัสดุผสมที่ OWC.....	59
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ของวัสดุผสมที่ 1.20 OWC.....	60
4.21 Normalized $q_{u(w-d)}/q_{u0}$ กับค่าร้อยละการสูญเสียที่สภาวะการบดอัดต่างๆ	61



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ทล.ท.	=	มาตรฐานวิธีการทดลอง กรมทางหลวง
ทล.ม.	=	มาตรฐาน กรมทางหลวง
AC.	=	แอสฟัลต์ติกคอนกรีต (Asphaltic Concrete)
AASHTO	=	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
CBR	=	California Bearing Ratio
CAH	=	แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (Calcium Aluminate Hydrate)
CSH	=	แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (Calcium Silicate Hydrate)
CR	=	หินคลุก (Crushed Rock)
CR:RAP	=	อัตราส่วนผสมหินคลุกต่อผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล
D	=	อายุบ่ม, วัน (Days)
GW	=	กรวดที่มีขนาดละเอียด (Well Graded Gravels)
G_s	=	ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)
ρ_{dmax}	=	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry-Density)
L	=	ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำ (Loss of weight)
LL	=	ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit)
Wet-Dry Test	=	การทดสอบเป็ยกสลับแห้งหรือความคงทนต่อสภาพแวดล้อม
w	=	ปริมาณความชื้น (Water content)
NP	=	ไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก (Non Plasticity)
0.80OWC	=	ปริมาณความชื้นที่ 0.80 ของปริมาณความชื้นเหมาะสม
OWC	=	ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content)
1.20OWC	=	ปริมาณความชื้นที่ 1.20 ของปริมาณความชื้นเหมาะสม
PCA	=	Portland Cement Association
PI	=	ดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index)
PL	=	ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$q_{u(0)}$	=	กำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์
$q_{u\text{soaked}}$	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่แช่น้ำ
$q_{u\text{ unsoaked}}$	=	กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ไม่แช่น้ำ
$q_{\text{wet-dry}}/q_{u\ 0}$	=	กำลังอัดแกนเดียวของการทดสอบเทียบกลับแห้งต่อกำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์
$q_{u(CR:RAP)}$	=	กำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์
$q_{u(CR)}$	=	กำลังอัดของหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์
RAP	=	ผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล (Reclaimed Asphaltic pavement)
SW	=	ทรายที่มีขนาดละเอียด (Well Graded Sands)
USCS	=	การจำแนกดินระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System)
UTM	=	เครื่องทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Universal Testing Machine)
$ r $	=	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation)
w/C	=	อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay-water/cement Ratio)

บทที่ 1

บทนำ

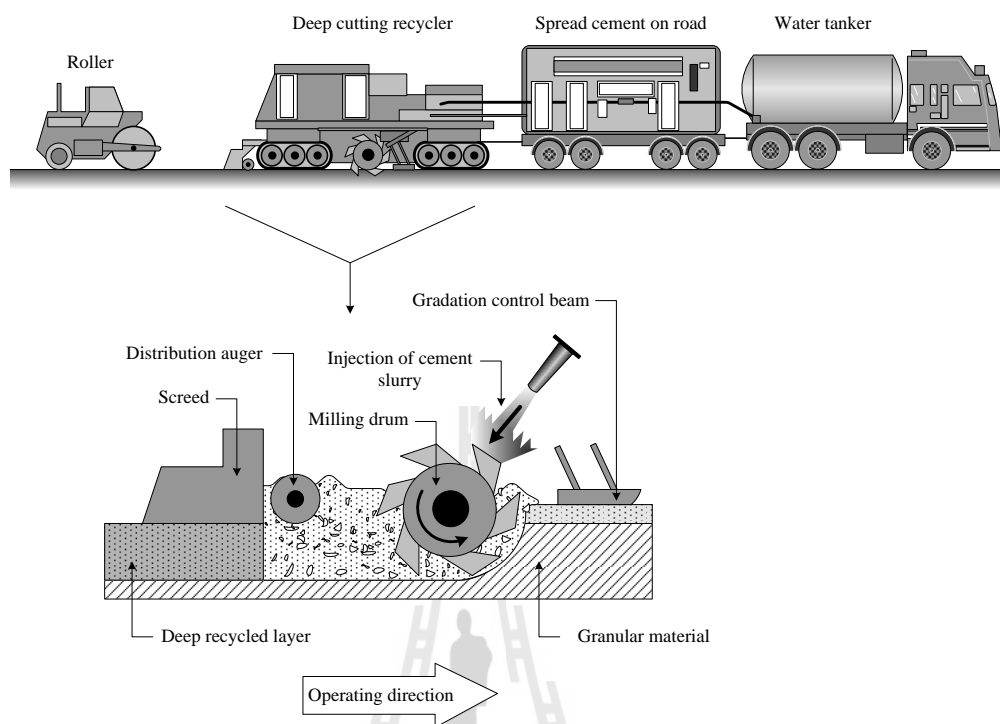
1.1 ความสำคัญของปัญหา

ถนนเมื่อทำการก่อสร้างขึ้นมาใหม่แล้วเมื่อเปิดใช้งานไประยะหนึ่ง มักจะเกิดความเสียหาย เนื่องจากการรับน้ำหนักของยานพาหนะ การเสื่อมสภาพเองของวัสดุ หรือการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ เช่น การหลอคร่อน การเกิดร่องล้อ และรอยแตกแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งถ้าไม่มีการซ่อมแซม บำรุงรักษา เพื่อให้ถนนกลับมาใช้งานได้ดี ตัวของถนนเองจะเกิดความเสียหายมากขึ้นส่งผลแก่ผู้ใช้ทาง และเพิ่มค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมที่มากขึ้น งานซ่อมบำรุงรักษาแบ่งออกเป็น 2 งานหลักๆ คือการแก้ไข และการซ่อมบำรุง การซ่อมบำรุงทำให้ถนนกลับมาใช้งานได้ตามปกติ และมีอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น อันได้แก่ การลดแรงที่จะเกิดในถนน โดยการจำกัดแรงดันลมยาง และน้ำหนักของรถบรรทุก การเสริมผิวทางเพื่อทำให้ผิวทางเรียบไม่เป็นคลื่น และการเพิ่มความแข็งแรงของถนนโดยเพิ่มความหนา ส่วนการแก้ไข คือการปรับปรุงให้ถนนสามารถรับน้ำหนักได้สูงขึ้นหรือรองรับปริมาณการจราจรที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต ได้แก่ การรื้อผิวทางเก่า ขยายและออกแบบก่อสร้างใหม่ให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุก และปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้น ซึ่งวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้วัสดุที่มีคุณภาพสูง ปัจจุบันกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยซึ่งเป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบในการก่อสร้างและบูรณะทาง ได้นำวิธีการแก้ไขถนนโดยการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุอย่างคุ้มค่า และประหยัดงบประมาณในการซ่อมแซมถนนด้วยการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ ซึ่งสามารถทำได้สองวิธี ได้แก่วิธีที่นำเอาวัสดุไปผสมใหม่ที่ได้จากโรงงานผลิต (In-Plant Recycling) และวิธีการหมุนเวียนวัสดุแบบในที่ (In-Place Recycling) มีข้อดีสำคัญคือสามารถรื้อถอนวัสดุชั้นทางและทำการปรับปรุง/ผสมใหม่ในที่ก่อสร้างได้ทันที ทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุนอกจากการใช้วัสดุโครงสร้างถนนเดิมแล้ว การซ่อมถนนด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ยังอาจผสมเพิ่มวัสดุเม็ดหยาบ หินคลุก ทราย Soil aggregate แล้วเติมวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และแอสฟัลต์ เป็นต้น เครื่องจักรที่ใช้ประกอบด้วย ส่วนประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ได้แก่ (1) ชุดห้องควบคุม ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณน้ำ และความเร็วรถ (2) ชุดชุดตัดชั้นทางเดิม ขณะที่รถเคลื่อนที่ชุดชุดตัดจะทำการขุดตัดชั้นทางเดิมจนถึงระดับความลึกที่ต้องการ ปูนซีเมนต์และน้ำ (Cement slurry) แล้วปล่อย

วัสดุที่ผ่านการผสมปูนซีเมนต์และน้ำออกทางด้านท้ายรถ จากนั้นวัสดุดังกล่าวก็จะถูกเกลี่ยและถูกบดอัดทันที เพื่อให้ได้ความแน่นตามมาตรฐานกรมทางหลวง ข้อดีของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่คือประหยัดค่าใช้จ่าย และใช้เวลาน้อย สามารถลดการจราจรติดขัด ถนนเปิดใช้ได้เร็วขึ้น และไม่ต้องเพิ่มวัสดุชั้นทางใหม่ทำให้ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม การซ่อมแซมวิธีนี้จะต้องออกแบบส่วนประกอบของดินซีเมนต์ (ขนาดผละของวัสดุ ปริมาณซีเมนต์ และระยะเวลาบ่ม) และทดสอบกำลังอัดในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งสุ่มตัดก้อนตัวอย่าง (Core sampling) ของถนนที่บดอัดแล้วไปหาลำดับอัด รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถอ้างอิงได้จากมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 213/2543



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างความเสียหายของถนนที่ต้องการซ่อมแซม



รูปที่ 1.2 ลักษณะทั่วไปของเครื่องจักรในงาน Pavement Recycling
(A.A.Loundon & Partner Consulting Engineers, 1995)

อย่างไรก็ตามการปฏิบัติงานที่ผ่านมาพบว่าการซ่อมแซมถนนด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement recycling) ลักษณะของงานบางครั้งมีการขุดใส่ (Mill) ผิวทางเดิมทิ้งเพื่อเอาผิวทางที่ไม่ต้องการออกไป ยกตัวอย่างโครงการก่อสร้างในจังหวัดนครราชสีมาของสำนักทางหลวงที่ 8 กรมทางหลวง ซึ่งมีงานซ่อมแซมถนนด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement recycling) ในปีงบประมาณ 2556 มีผิวทางที่ต้องขุดใส่ทิ้งไม่น้อยกว่า 10,000 ลูกบาศก์เมตร จากโครงการก่อสร้างดังกล่าวพบว่ามีผิวทางที่ต้องขุดใส่ทิ้งอยู่เป็นจำนวนมาก ในขณะที่งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนากำลังอัดของถนนที่ได้รับการซ่อมแซมด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่เป็นการศึกษากับตัวอย่างหินคลุกผสมปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2006) งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตเดิมต่อคุณสมบัติการบดอัด การพัฒนากำลังอัดและความคงทนของหินคลุกผสมปูนซีเมนต์บดอัด ซึ่งเป็นสภาพที่คล้ายกับถนนดินซีเมนต์ที่ซ่อมแซมโดยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ นอกจากอิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตเดิมแล้ว

ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่ม ก็เป็นตัวแปรหลักนำมาที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ ระยะเวลาบ่ม และปริมาณแอสฟัลต์ ต่อคุณสมบัติการบดอัด กำลังอัด และความคงทนของถนนดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยเทคนิคการปรับปรุงวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ในห้องปฏิบัติการ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล (Reclaimed Asphaltic pavement, RAP) ต่อกำลังอัดของวัสดุชั้นพื้นทางหินคลุก (CR) โดยนำผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิลที่ผ่านการย่อยที่มีขนาดโตสุดไม่เกิน 3/4 นิ้ว มาผสมกับวัสดุชั้นพื้นทาง หินคลุก ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40, 60 และ 80 โดยน้ำหนัก และทำการบดอัดเพื่อหาปริมาณชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด วัสดุผสมจะถูกนำมาผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 3, 5 และ 7 บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ระยะเวลาในการบ่มก่อนตัวอย่างอยู่ที่ 7 วันและ 28 วัน ทำการทดสอบเป็ยกสลับแห้ง และการทดสอบแรงอัดแกนเดียวเพื่อหาลำตัวของวัสดุตัวอย่างและนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานต่างๆเช่น กรมทางหลวง เป็นต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 องค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

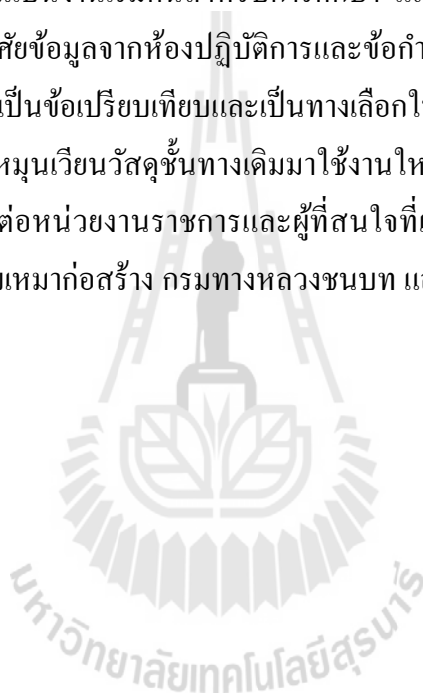
ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้ จะเป็นการปรับปรุงกำลังของดินด้วยซีเมนต์โดยอาศัยดินที่มีคุณสมบัติพื้นฐาน (Basic properties) ที่แตกต่างกันอันเกิดจากการผสมผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล (Reclaimed Asphaltic pavement, RAP) กับหินคลุก (CR) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ทฤษฎีที่จะสร้างขึ้นนี้จะเป็นทฤษฎีที่รวมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังดินซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ ชนิดของดิน ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่ม ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นต้นแบบเพื่อให้ นักวิจัยที่สนใจได้นำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยระดับสูงต่อไป ซึ่งในส่วนนี้จะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับสถาบันวิจัยและมหาวิทยาลัยต่าง ๆ

1.4.2 ด้านเศรษฐศาสตร์

หลังจากได้ผลการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานและข้อกำหนดของกรมทางหลวงโดยวิธีการทำถนนที่ซ่อมแซมด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการนำวัสดุที่เหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ในส่วนนี้จะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง เช่น บริษัทผู้รับเหมาก่อสร้าง กรมทางหลวงชนบท และกรมทางหลวง เป็นต้น

1.4.3 ด้านเทคนิคการก่อสร้างในอนาคต

งานวิจัยนี้เป็นงานเริ่มต้นสำหรับการศึกษา และวิจัยการนำวัสดุที่เหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยอาศัยข้อมูลจากห้องปฏิบัติการและข้อกำหนด ผู้วิจัยจะนำเสนอข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่างๆ เพื่อนำมาเป็นข้อเปรียบเทียบและเป็นทางเลือกในการใช้วัสดุที่เหลือใช้ สำหรับการซ่อมบำรุงถนนโดยวิธีวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement recycling) ผลงานนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อหน่วยงานราชการและผู้ที่สนใจที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง และซ่อมบำรุงถนน เช่น บริษัทผู้รับเหมาก่อสร้าง กรมทางหลวงชนบท และกรมทางหลวง เป็นต้น



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพของดินให้มีกำลังอัดสูงขึ้นสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่นการลดช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยการบดอัด การลดความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดิน การทำให้อนุภาคดินจับตัวเป็นก้อนใหญ่ (Flocculation) หรือการทำให้ดินมีขนาดคละที่ดีขึ้น และการเติมสารเชื่อมประสาน โดยในบทนี้จะทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์

2.2 ประวัติความเป็นมาของถนนดินซีเมนต์

กล่าวกันว่าความคิดเรื่องการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยการใช้สารผสมเพิ่มมีมานานกว่า 5000 ปีแล้ว โดยการผสมดินกับปูนขาว ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินให้ดีขึ้น (Terrel et al, 1979)

Davidson (1961) กล่าวถึงวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ไว้ในคำนำใน Highway Research Bulletin ว่าเริ่มต้นในปี ค.ศ.1915 เมื่อการก่อสร้างถนน Oak ในเมือง Sarasota รัฐ Florida ประสบปัญหาเครื่องผสมคอนกรีตเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ ถนน Oak จึงถูกสร้างโดยการขุดเอาดิน Shell จากอ่าวขึ้นมาผสมกับทรายและซีเมนต์แล้วทำการบดอัดด้วยรถบดไอน้ำที่มีน้ำหนัก 10 ตัน แทนการทำถนนคอนกรีตราวๆ ปี ค.ศ.1920 หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับถนนในรัฐ Iowa, South Dakota, Ohio, California และ Texas ได้เริ่มทดลองก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ แต่ผลการทดลองที่ได้มีความผันแปรอย่างมากจนไม่สามารถคาดการณ์ผลลัพท์ได้ เนื่องจากความรู้ความเข้าใจเรื่องคุณสมบัติทางวิทยาศาสตร์ของดินในขณะนั้นยังมีน้อยมาก

Mills (1935, 1936) ได้รายงานผลการค้นคว้าของ South Carolina State Highway Department ในปี ค.ศ.1932 โดย Dr.C.H. Moorefield ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของดินกับซีเมนต์ที่ใช้ก่อสร้างถนนหลายสายในปี ค.ศ.1933 และปี ค.ศ.1934 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทางของถนนที่มีราคาถูก

Davidson (1961) และ Terrel et al. (1979) ได้บันทึกตรงกันว่าในปี ค.ศ.1935 South Carolina State Highway Department, Bureau of Public Roads และ Portland Cement Association ได้ร่วมกันก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ใกล้ๆ กับเมือง Jonhsonville ซึ่งต่อมากถนนดิน

ซีเมนต์สายนี้เป็นที่รู้จักกันว่าเป็นโครงการแรกเกี่ยวกับวิศวกรรมถนนดินซีเมนต์ และจากความสำเร็จของโครงการนี้ทำให้มีการทดลองขึ้นในอีกหลายรัฐของสหรัฐอเมริกาโดยที่ Portland Cement Association เป็นผู้ทดลองสร้าง

Davidson (1961) รายงานว่า ในปี ค.ศ.1941-1944 ระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง ถนนดินซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสนามบินมากถึง 22 ล้านตารางหลา แต่ในขณะเดียวกัน การก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ก็มีปริมาณลดลงด้วย จนกระทั่งสงครามโลกครั้งที่สองยุติลง การก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ก็กลับมาเพิ่มปริมาณเพิ่มขึ้นอีก นอกจากดินซีเมนต์จะถูกใช้ทำถนนแล้ว ยังมีการใช้ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุรองพื้นทางของถนนคอนกรีต ที่จอดรถ คลังเก็บสินค้า วัสดุรองพื้นอ่างเก็บน้ำและคูคลองอีกด้วย

The Siam Cement Company Ltd. (1965) ได้ทดลองนำดินผสมซีเมนต์ มาใช้เป็นพื้นทางของถนนสาย วารินชำราบ-เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี เป็นสายแรกในประเทศไทยซึ่งมีความยาว 5 กิโลเมตร โดยดินที่ใช้เป็นดินลูกรังที่กำหนดค่า CBR ของดินซีเมนต์ไว้ไม่น้อยกว่า 120 % สำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ และกำหนดค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่า 852 กิโลปาสคาล สำหรับถนนประเภทต่ำกว่ามาตรฐาน

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์และสมบัติกระแสน จรัสกร (2544) ได้ทำการวิจัยโดยนำดินลูกรังและดินทรายปนดินตะกอนมาผสมซีเมนต์ สรุปผลได้ว่าพลังงานในการบดอัดมีผลอย่างมากต่อกำลังของดินซีเมนต์ โดยมีความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithm Model) โดยที่ค่าแรงอัดแกนเดียวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงพลังงานบดอัดต่ำ และจะช้าลงเมื่อพลังงานบดอัดสูงขึ้น

2.3 ประเภทของดินซีเมนต์

Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization (1959) ให้คำจำกัดความของ Cement-Treated Soil ว่าเป็นการนำเอาดินและซีเมนต์มาผสมกับน้ำในปริมาณที่ต้องการแล้วทำการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด ป้องกันความชื้นไม่ให้สูญเสียในระหว่างการบ่ม จากลักษณะการใช้งานและปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม สามารถแบ่งดินผสมซีเมนต์ออกได้เป็น 5 ประเภทดังนี้

- (1) **Soil-Cement** เป็นดินที่ผสมซีเมนต์เพื่อให้ได้กำลังอัดตามมาตรฐานของ Portland Cement Association (PCA), AASHTO หรือ ASTM ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้ดินซีเมนต์ดังกล่าวมีกำลังอัดหรือแรงแบกทานตามที่กำหนด สำหรับดินที่มีขนาดละเอียดจะใช้ปูนซีเมนต์ประมาณ 5-7 เปอร์เซ็นต์ และจะสูงกว่านี้

- หากดินมีขนาดละเอียดหรือมีค่าดัชนีพลาสติกสูง (Plasticity Index) กรณีที่ค่าดัชนีพลาสติกสูง ในการทำ Soil-Cement ควรทำการผสมปูนขาวเพื่อลดค่าดัชนีพลาสติกลง
- (2) **Cement Modified Silty Clay Soil** มักจะใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงของผิวหน้าดินเดิมที่เป็นดินเหนียว ที่มีลักษณะเปียกและมีความอ่อนตัวมากทำให้มีความแข็งแรงพอที่ยวดยานจะผ่านได้โดยไม่ลื่นไถล ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์
 - (3) **Cement Modified Granular Soil** จะใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเป็นพลาสติก การบวมตัว และการดูดซึมน้ำบน Cement Modified Crush Rock ที่มักจะใช้เป็นพื้นทางของถนนที่มีผิวทางทั้งแบบยึดหยุ่นและมีผิวทางเป็นคอนกรีต โดยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะมีค่าประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดิน
 - (4) **Plastic Soil-Cement** มักใช้ในงานลาดปูบนพื้นที่ลาดเอียง เช่น ปูด้านข้างถนนเพื่อการระบายน้ำ คาดท้องคลองชลประทานและกันอ่างเก็บน้ำ ดังนั้น Plastic Soil-Cement จะต้องมีสภาพเหลวมากพอที่จะนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
 - (5) **Cement Treated Soil Slurry and Grouts** เป็นซีเมนต์ที่ผสมกับวัสดุประเภททรายและน้ำโดยมีปริมาณน้ำสูงมาก อาจมีส่วนผสมเพิ่มอื่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของส่วนผสมให้มีค่า Workability สูง โดยปกติวัสดุประเภทนี้จะใช้เป็น Mudjacking Material ในงานซ่อมบำรุงถนนที่เกิดปัญหาการทรุดตัวของคันทางหรืออุกน้ำกัดเซาะ และใช้เป็น Grouting Material สำหรับยาหรืออุดรอยร้าวที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ส่งน้ำ

2.4 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์

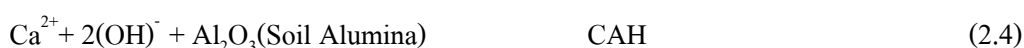
Lambe et al. (1959) อธิบายว่าซีเมนต์เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium Silicate (C_3S), Dicalcium Silicate (C_2S), Tricalcium Aluminate (C_3A), Tetracalcium Aluminate Ferrite (C_4AF) เมื่อผสมกับน้ำและดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH) , Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Hydrate Lime ที่แยกตัวออกมาขณะเกิดปฏิกิริยา สารประกอบ CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานเมื่อน้ำระเหยออกไป นอกจากนั้น Released Hydrate Lime ที่เกิดขึ้นในขบวนการดังกล่าวยังทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทำให้ Colloid Gel หรือ Cement Gel ที่ประกอบไปด้วย CSH และ CAH เกิดการรวมตัว แล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ในดินเม็ดหยาบ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การยึดเกาะกันของเม็ดจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่ว่า Cement Paste จะไม่อุดเต็มช่องว่างอนุภาคของเม็ดดิน แรงเชื่อมยึดติดจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางด้าน Mechanical Interlock ของอนุภาคเม็ดดินที่มี CSH และ CAH เกาะอยู่ที่ผิวอนุภาคของเม็ดดิน

สำหรับดินเม็ดละเอียด แรงยึดเกาะกันจะประกอบไปด้วยแรงทางด้าน Mechanical Interlock และ Chemical Cementation การยึดเกาะทางด้าน Chemical Cementation นั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ตามผิวของเม็ดดิน โดยมีน้ำเป็นตัวกลาง การเกิดปฏิกิริยาทำให้ได้สารประกอบ CSH, CAH เพิ่มขึ้น และทำให้เม็ดดินเกิดการเชื่อมกัน

Davidson (1961) กล่าวว่า หลังการผสมซีเมนต์กับดินเหนียวขึ้น จะทำให้ค่าพลาสติก (Plasticity) ลดลง เหตุผลน่าจะมาจากการแยกตัวของ Calcium ion ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กลไกที่เกิดขึ้นถ้าไม่มาจก Cation Exchange ก็น่าจะมาจากการจับกลุ่มเพิ่มขึ้นของ Cation ในดินเหนียว กระบวนการทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าที่มีอยู่อย่างหนาแน่นบริเวณอนุภาคดินเหนียว ส่งผลให้อนุภาคของดินเหนียวรวมตัวกันและตกตะกอนเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นนี้ทำให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติคล้ายดินตะกอนคือมีค่าค่าพลาสติก (Plasticity) ต่ำ

Herzog (1963) กล่าวถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันว่าเป็นการเกิดสารประกอบ CSH, CAH ซึ่งเป็นปฏิกิริยาในช่วงแรก ส่วนปฏิกิริยาช่วงที่สองซึ่งต้องใช้เวลาานาน เป็นปฏิกิริยาระหว่าง Calcium Ion ที่เกิดจาก Released Hydrated Lime ของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ในเม็ดดิน มีผลทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่นานขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวคือปฏิกิริยาพอสโซลานิก

Moh (1965) ได้ศึกษาเรื่องปฏิกิริยาของแร่ประกอบดินเหนียว กับซีเมนต์และสารเคมีผสมเพิ่มจำพวกโซเดียม และได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีดังต่อไปนี้



Pendola et al. (1969) สรุปว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นั้น เป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีระหว่างซีเมนต์ น้ำและดินซึ่งประกอบด้วยกลไก 4 ชนิดคือ

(1) **Hydration of Cement** คือกระบวนการที่สำคัญ โดยขณะที่ซีเมนต์รวมตัวกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และก่อรูปร่างเป็น

โครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องมากบ้างน้อยบ้างตามการคละขนาดของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายที่กล่าวมาข้างต้นนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ถูกปรับปรุงแล้วยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดิน ทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดิน รวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบๆ อีกด้วย

- (2) **Cation Exchange** การลดลงของค่าพลาสติกของดินหลังจากการผสมซีเมนต์กับดินประเภทที่มีความเชื่อมแน่นที่มีความชื้น เชื่อว่าเกิดจากการเปลี่ยน Cat ion หรือการรวมตัวกันของ Cat ion บนผิวของเม็ดดิน ปฏิกิริยาที่ว่าจะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังการผสมซีเมนต์
- (3) **Carbonation** คือขบวนการเชื่อมแน่นจากปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับ Lime ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด Calcium Carbonate ส่งผลให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มมากขึ้น
- (4) **Pozzolanic Reaction** คือกระบวนการระหว่าง Free Lime ที่ถูกปลดปล่อยออกมา ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica หรือ Alumina ที่มีอยู่ในดิน ทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยานี้จะต้องอาศัยระยะเวลาอันยาวนานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุสูงขึ้น

Terrel et al. (1979) กล่าวถึงปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ว่า การผสมซีเมนต์กับดินเม็ดหยาบซีเมนต์เพส จะทำหน้าที่ยึดอนุภาคเม็ดดินเข้าด้วยกัน โดยทำการยึดเกาะที่ผิวระหว่างซีเมนต์เจล และผิวอนุภาค ส่วนดินเม็ดละเอียด แร่ดินเหนียวที่สลายออกมาในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า pH สูง จะทำปฏิกิริยากับ Free Lime หรือ Hydrate Lime ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิด CSH และ CAH

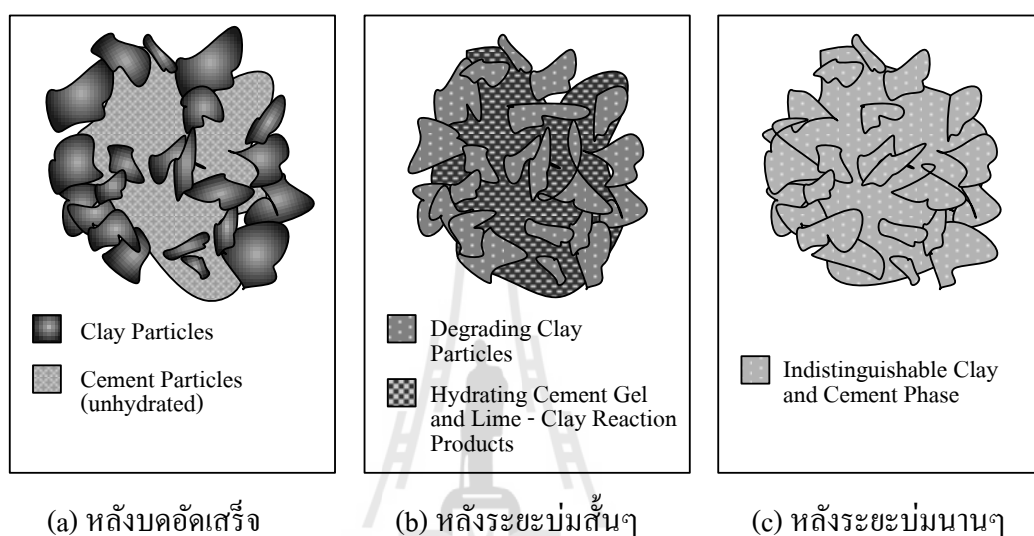
2.5 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Czernin (1962) กล่าวว่าหลังจากที่ผสมซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันทำให้เกิดสารประกอบ CSH ในรูปของเจลขึ้นในส่วนผสมของซีเมนต์และน้ำ ดังนั้นจึงสามารถที่จะเข้าใจได้ว่าภายใต้การบดอัด อนุภาคของปูนซีเมนต์มิได้ผสมกับดินเพียงอย่างเดียว แต่จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันด้วย

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

- (1) ภายใต้การบดอัด ช่วงนี้เป็นช่วงที่อนุภาคของปูนซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน แต่อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเข้าผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1 (a)

- (2) ภายใต้การบ่มในระยะเวลาสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อย Lime ออกมาทำปฏิกิริยากับ Soil Silica และ Soil Alumina ที่มีอยู่ในดินทำให้เกิดการแยกตัวของสารทั้งสอง จากนั้นซีเมนต์เจลและสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาจะแทรกซึมไปตามอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1 (b)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell และ El Jack, 1966)

- (3) ภายใต้การบ่มในระยะเวลายาว จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ อันมีผลทำให้ซีเมนต์เจลและขอบเขตของการแทรกซึมกระจายไปทั่วก้อนดินซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม ดังรูปที่ 2.1 (c)

2.6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์

2.6.1 ปริมาณซีเมนต์และประเภทของซีเมนต์

Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์โดยนำดินสามชนิดคือ Loamy Sand, Medium Clay และ Silty Clay Loam มาทดลองผสมซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 6 ถึง 30 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 1 ปี และผ่านสภาพภูมิอากาศ 2 แบบคือ Wet-Dry และ Freeze-Thaw ตั้งแต่ 12 รอบถึง 96 รอบ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินที่มีขนาดเม็ดเล็ก ดินที่มีปริมาณดิน

เหนียวผสมอยู่สูงจะมีกำลังอัดน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำ และค่าความคงทนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้

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

คุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินซีเมนต์ ถูกศึกษาอย่างจริงจังโดย Terashi et al. (1979) และต่อมาก็มีการศึกษาด้านนี้มากขึ้นเรื่อยๆ เช่น Kawasaki et al. (1981), Nontananandh and Yupakorn (2002) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้สรุปว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์คือ ปริมาณน้ำ และปริมาณซีเมนต์

Ruenkairergsa (1982) อธิบายว่าปริมาณซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ อัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน พันธะเชื่อมประสานในดินเม็ดหยาบจะแข็งแรงกว่าในดินเม็ดละเอียด ดินที่มีดินเหนียวมากจะให้กำลังอัดต่ำ ดังนั้นปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจึงควรหาจากการทดลองในห้องทดลอง

Lade and Overton (1989) ได้ศึกษาผลของพันธะเชื่อมประสาน (Cementation) ในดินเม็ดหยาบ ภายใต้อุณหภูมิและความหนาแน่นที่เท่ากัน 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 ซึ่งเทียบได้กับซีเมนต์ประเภทที่สาม พบว่าที่อายุการบ่มเท่ากัน ค่ากำลังคราก (Yield Strength) ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมาก

Massachusetts Institute of Technology (1954) ได้นำดินตะกอนปนทราย และดินเหนียว (Clayey Sandy Silt) ในรัฐโอไฮโอ มาผสมกับซีเมนต์ และพบว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่สามจะมีกำลังอัดสูงกว่า ดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง 1.5 เท่า และ 1.3 เท่า ที่ระยะบ่ม 7 วัน และ 28 วันตามลำดับ

Davidson and Bruns (1960) ได้รายงานผลเกี่ยวกับกำลังอัด โดยวิธีทดสอบ Freeze-Thaw ของดินทราย ดินตะกอน และดินเหนียว บริเวณรัฐไอโอวา ประเทศสหรัฐอเมริกา และสรุปว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทสาม ในการก่อสร้างถนนจะประหยัดกว่าใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง เพราะว่า การใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งต้องใช้เวลาในการบ่มอย่างน้อย 7 วัน แต่การใช้ซีเมนต์ประเภทที่สาม จะใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่า ทำให้ได้เปรียบเรื่องระยะเวลาในการก่อสร้าง

Horpibulsuk and Miura (2001) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ สามารถรวมไว้ในตัวแปรตัวเดียวได้ ตัวแปรนี้เรียกว่า Clay-water/cement Ratio (w/C) และถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักผึ่งแห้ง และ ยังได้สร้างสมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น ระยะเวลาบ่มต่างๆ โดยอาศัยผลการทดสอบเพียงค่าเดียว

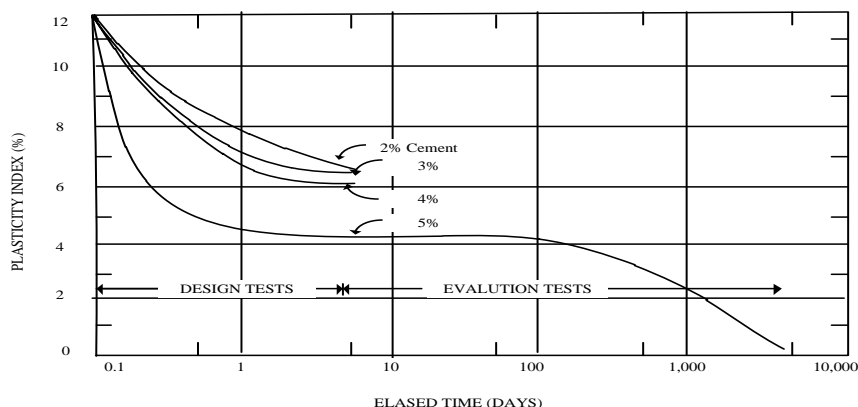
ทรงพล บุญมาดี (2529) ได้ทำการทดสอบกำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ และสรุปว่า กำลังอัดของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยที่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจะลดลง

สุเชษฐ์ เอี่ยมเขย(2531) ได้ทำการทดสอบความคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่อดินซีเมนต์โดยนำดินลูกรังมาผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ในปริมาณต่างๆ และสรุปได้ว่าปูนซีเมนต์จะเพิ่มความคงทนและลดค่าน้ำหนักสูญเสีย ซึ่งกำลังอัดจะมีค่าตรงข้ามกับร้อยละการสูญเสีย

2.6.2 ชนิดของดิน

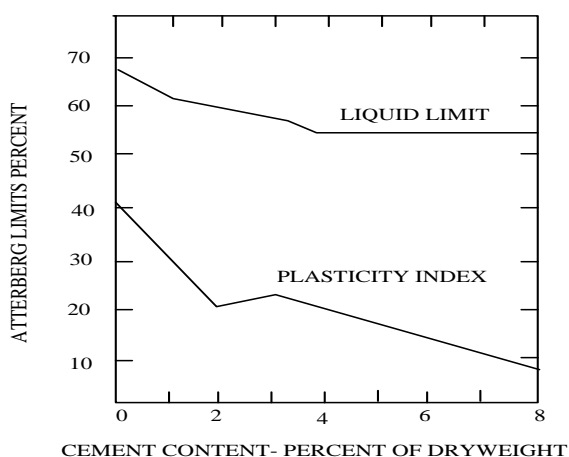
Winterkorn and Chandrasekharn (1951) รายงานผลการทดสอบดินลูกรังผสมซีเมนต์ว่าจะได้ผลดีหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่ผสมอยู่ในดิน และ Degree of Lateralization ของดินลูกรัง

Reinhold (1955) ได้นำทรายมาผสมกับดินเหนียว โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสมตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่น ที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดกับปริมาณดินเหนียว พบว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น กำลังอัด และ โมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าลดลง



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติกกับเวลาข้อมูลจาก Redus, 1958

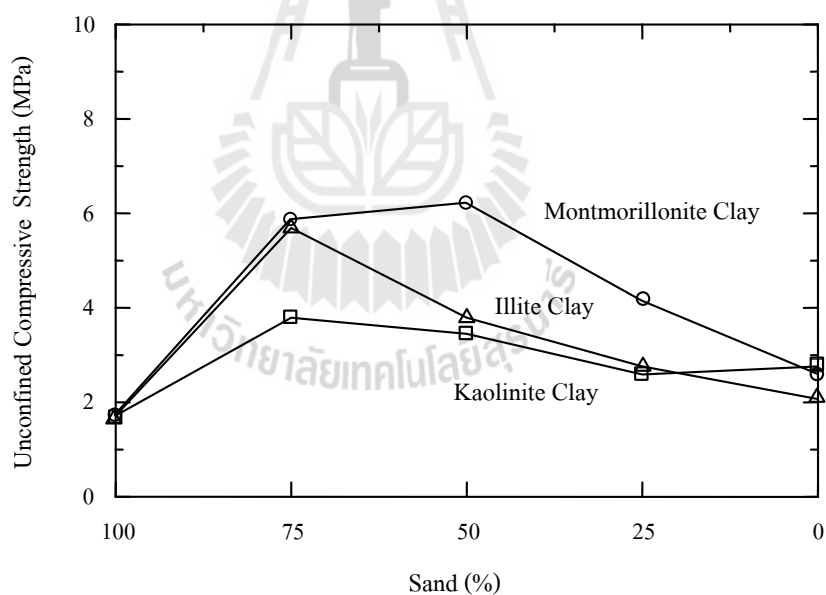
Redus (1958) ได้นำดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (Base Course) ของสนามบินต่างๆ ซึ่งมีอายุการใช้งานนานหลายปี มาทำการทดสอบหาค่าพิคต์ออตตะเบอร์ก (Atterberg's Limit) พบว่าปริมาณซีเมนต์มีความสัมพันธ์ต่อการลดลงของดัชนีพลาสติก ดังรูปที่ 2.2 กล่าวคือถ้าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมมาก ดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างรวดเร็ว และถ้าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมน้อย ดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างช้าๆ นอกจากนี้ ระยะเวลาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก็มีผลต่อการลดลงของค่าดัชนีพลาสติก ผลการศึกษานี้ตรงกับผลการวิจัยของ Spangler and Patel (1949) ซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพลาสติกกับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันใน 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.3



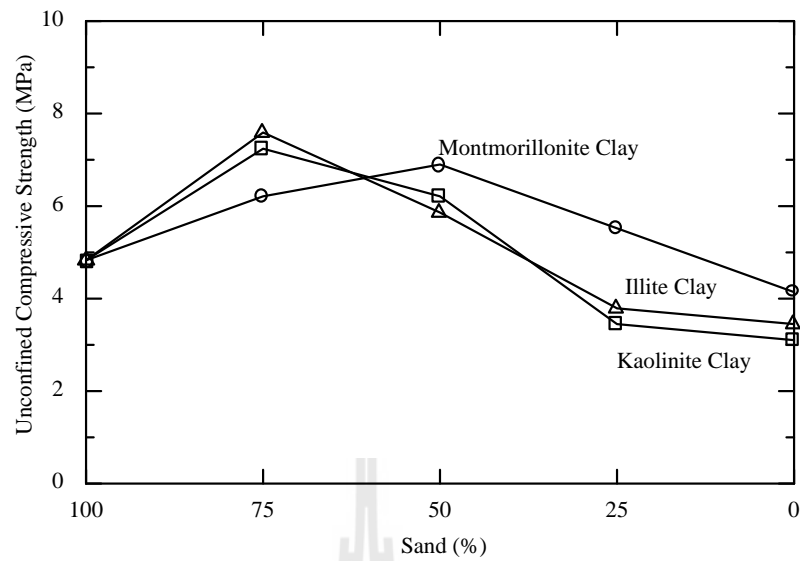
รูปที่ 2.3 ค่าพิคต์ออตตะเบอร์ก (Atterberg's Limit) ของดินไอโอวา (Iowa) หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมงข้อมูลจาก Spanler et al., 1949

Norling and Peckard (1958) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณมวลรวมหยาบที่ค้ำบน ตะแกรงเบอร์ 4 โดยใช้ดิน 3 ชนิดคือ ทรายหยาบ ทรายละเอียด และทรายปนดินเหนียวผสมซีเมนต์ ในปริมาณที่เท่ากัน แต่แปรผันมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 แล้วทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดที่ อายุการบ่ม 7 วัน และพบว่า Loamy Sand และ Fine Sand Loam จะมีกำลังสูงขึ้น เมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ลดลง สำหรับ Coarse Sand จะมีกำลังอัดลดลง เมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้ำ ตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้นเกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

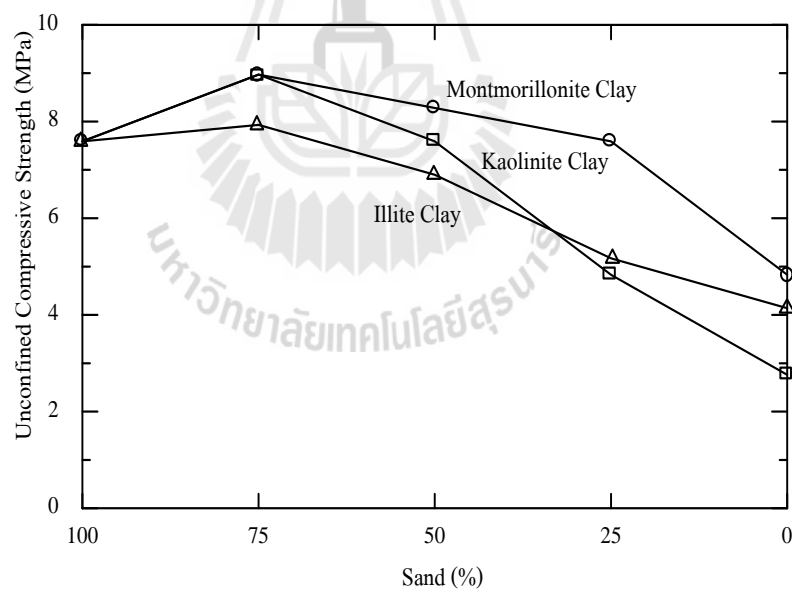
Davidson et al. (1962) ทำการทดลองโดยใช้ทรายผสมกับดินเหนียว ในอัตราส่วน ทรายต่อดินเหนียว 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ดินเหนียวที่ใช้เป็นดินเหนียวจำพวก คาโอลิไนท์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) และมอนโมริลโลไนท์ (Montmorillonite) ผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 2.4 รูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 สรุปว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวมากไป (เกินกว่า 25 เปอร์เซ็นต์) จะทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเด่นชัด โดยที่ดินเหนียวจำพวกมอนโมริลโลไนท์ มีแนวโน้มว่าจะมีกำลังสูงกว่าดินเหนียวจำพวกคาโอลิไนท์ และจำพวกอิลไลต์



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของเรณูดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์, ปริมาณซีเมนต์ 8 % ข้อมูลจาก Davidson et al., 1962



รูปที่ 2.5 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์,
ปริมาณซีเมนต์ 12 % ข้อมูลจาก Davidson et al, 1962



รูปที่ 2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์,
ปริมาณซีเมนต์ 16 % ข้อมูลจาก Davidson et al, 1962

Portland Cement Association (1959) ได้จำแนกความต้องการปริมาณซีเมนต์ของดิน
กลุ่มต่างๆตามระบบ AASHTO ไว้ในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุง ตามการจำแนกแบบ ASSHTO (ข้อมูลจาก PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 1959)

ASSHTO Soil Group	Usaul Range in Cement Requirement (%by vol.) (%by wt.)	Estimated Cement Content and that Used in the Moisture-Density Test (% by wt.)	Cement Content for Wet-Dry and Freeze-Thaw Test (% by wt.)
A-1-a	5-7 3-5	5	3-5-7
A-1-b	7-9 5-8	6	4-6-8
A-2	7-10 5-9	7	5-7-9
A-3	8-12 7-11	9	7-9-11
A-4	8-12 7-12	10	8-10-12
A-5	8-12 8-13	10	8-10-12
A-6	10-14 9-15	12	10-12-14
A-7	10-14 10-16	13	10-13-15

ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสม สำหรับวัสดุต่างๆ (ข้อมูลจาก Portland Cement Association, 1959)

Type of Miscellaneous Material	Estimated Cement Contented and that Used in Moisture-Density Test		Cement Contented For Wet-dry and Freeze-thaw Test %by wt.
	% by vol.	% by wt.	
Shell Soil	8	7	5-7-9
Limestone screening	7	5	3-5-7
Red-dog	9	8	6-8-10
Shale or disintegrated Shale	11	10	8-10-12
Callche	8	7	5-7-9
Cinders	8	8	6-8-10
Chert	9	8	6-8-10
Chat	8	7	5-7-9
Marl	11	11	9-11-13
Scoria (Retaining No.4 material)	12	11	9-11-13
Scoria (Passing No.4 material only)	8	7	5-7-9
Air-Cooled slag	9	7	5-7-9
Water-cooled slag	10	12	10-12-14

Moh et al. (1967) รายงานว่า ดินลูกรังในประเทศไทย ที่มีค่า PI ประมาณ 11 ถึง 19 เมื่อนำมาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 4 ถึง 7 จะให้ค่ากำลังอัดมากกว่า 852 กิโลปาสกาล ซึ่งเป็นข้อกำหนดของ British Road Research Laboratory ที่มีประสบการณ์ในการทดลองใช้ในแอฟริกา และยังเน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการบดอัดว่าถ้าค่าร้อยละของการบดอัดลดลงเพียงเล็กน้อย จะส่งผลทำให้กำลังอัดลดลงอย่างเห็นเด่นชัด

Bell (1976) พบว่าแร่ดินเหนียว Montmorillonite เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาว จะทำให้ Aqueous Phase ลดลง ทำให้สาร Cementitious ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะอยู่ในปูนขาวไม่เพียงพอต่อการแข็งตัว การแก้ไขคือ การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ลงไปเพื่อเพิ่ม Free Lime ให้มากขึ้นโดยปกติการเพิ่มซีเมนต์ มากกว่าร้อยละ 15 จะทำให้ดินจำพวก Montmorillonite มีคุณภาพดีสามารถนำมาใช้งานได้

2.6.3 ปริมาณความชื้นขณะทำการบดอัด

Felt (1955) และ Davidson et al. (1962) ศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อกำลังอัด และความชื้นกับน้ำหนักที่สูญเสียจากการทำ Wet-Dry และ Freeze-Thaw ได้ผลตรงกันว่า ปริมาณความชื้น และความหนาแน่นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรทำการบดอัดดินด้วยปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม ส่วนดินเหนียวควรบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จึงจะให้กำลังอัดสูงสุด

Ruenkairergsa (1982) ได้อธิบายว่าการนำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่บดอัดตามวิธีการของพร็อกเตอร์ (Proctor) มาใช้ในงานดินซีเมนต์นั้น พบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากจะให้ความหนาแน่นสูงสุดแล้ว ยังทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์อีกด้วย สำหรับดินซีเมนต์ ความหนาแน่นสูงสุดไม่จำเป็นว่าจะทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและความคงทนมากที่สุดเสมอไป จากการทดลองหาความคงทนด้วยวิธี Freeze-Thaw ของดินตะกอนและดินเหนียวผสมซีเมนต์พบว่า ความคงทนจะมีค่าสูงสุดเมื่อทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย ทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม จะทำให้ค่าความคงทนลดลง สำหรับดินทรายผสมซีเมนต์ ความแข็งแรงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมร้อยละ 3-6 ส่วนดินเหนียวเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จะให้ความแข็งแรงสูงสุด

Lightsey et al. (1970) ได้รายงานว่าบางครั้งการบดอัดดินซีเมนต์ให้มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry-Density, MDD) ก็ไม่ได้ทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงมากที่สุดเสมอไป เนื่องจากการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด จากการศึกษาดินตัวอย่าง 4 ชนิดได้แก่ Silty Loam,

Sandy Loam, Silt และ Silty Clay Loam บดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) ที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าและสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมร้อยละ เมื่อผสมเสร็จทิ้งไว้เป็นเวลา 0, 2, 4 และ 6 ชั่วโมงก่อนทำการบดอัด พบว่าปริมาณน้ำส่วนเกินที่ต้องการเพื่อให้ได้ความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์สูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดินและเวลาระหว่างการผสมควบคู่กับการบดอัด สำหรับดินเม็ดหยาบ ปริมาณน้ำที่เพิ่มในการบดอัดจะเพิ่มการหล่อลื่นระหว่างเม็ดดินทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความคงทน เมื่อมีการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด ส่วนดินเม็ดละเอียด การเพิ่มปริมาณน้ำในการบดอัดจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสมบูรณ์ขึ้น เป็นผลทำให้คุณสมบัติของดินซีเมนต์ดีขึ้น โดยที่ต้องไม่มีการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด

Chinkulkijniwat et al. (2010) การบดอัดดินเมื่อมีปริมาณกรวดเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดจะเพิ่มขึ้นและค่าความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดจะลดลงในการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดไม่เกินร้อยละ 20 สามารถบดอัดได้ดีโดยไม่มีผลกระทบจากปริมาณกรวด เมื่อปริมาณกรวดเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 20 กรวดจะขัดขวางการบดอัดซึ่งอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัดพลังงานบดอัดสามารถถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดได้ดีในการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 20 เมื่อปริมาณกรวดเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดจะมีค่าลดลงตามปริมาณกรวดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดผสมมากกว่าร้อยละ 20 เม็ดกรวดจะขัดกันทำให้ขัดขวางการเรียงตัวของเม็ดดินและกรวดยังดูดซับพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียด ทำให้ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าลดลงและความชื้นของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าเพิ่มขึ้น และ Chinkulkijniwat et al. (2010) ยังได้สร้างสมการที่สามารถประมาณค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของดินปนกรวด

วันชัย ศิริเลิศวัฒนา (2546) ได้เสนอว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์บดอัดมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำในช่วง 80 ถึง 120 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยมีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

2.6.4 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) สรุปลักษณะอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังของดินซีเมนต์ว่า ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วันจะสูงขึ้น 2-2.5 เปอร์เซ็นต์ต่ออุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส การก่อสร้างที่ใช้ดินซีเมนต์ในพื้นที่ที่มีอากาศอบอุ่นจะให้กำลังอัดที่อายุ 3 เดือนแรก หลังการก่อสร้างสูงกว่าการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีอากาศหนาวกว่าร้อยละ 50-100

Maner (1952) ได้ทดลองใช้วัสดุต่างๆ ได้แก่ 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 แล้วทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาค่ากำลังอัดที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 5 ปี พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะคล้ายกับกำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือ กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุของดินซีเมนต์ และยังสามารถทำการเจาะตัดดินซีเมนต์ในสนามจากโครงการก่อสร้างของรัฐต่างๆ 4 รัฐ ในประเทศสหรัฐอเมริกาโดยมีช่วงอายุตั้งแต่ 1 ปีถึง 20 ปี มาทดสอบหาค่ากำลังอัดพบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามจะสอดคล้องกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

Ng (1966) พบว่ากำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์จะแปรผันกับอุณหภูมิที่ใช้บ่ม กล่าวคืออุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 70 ° F เป็น 100 ° F กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 20

Wang and Huston (1972) รายงานว่าการลดอุณหภูมิในการบ่มจะทำกำลังอัดลดลง แต่จะเพิ่มความเครียดที่จุดวิบัติ ไม่ว่าจะทดสอบแรงดึง 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) ของดินซีเมนต์จากการจำลองแห้งตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Mercury Intrusion Porosimeter พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มจะทำให้กำลังอัด และกำลังดึงเพิ่มขึ้น การบ่มในอากาศจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าการบ่มแบบชื้น

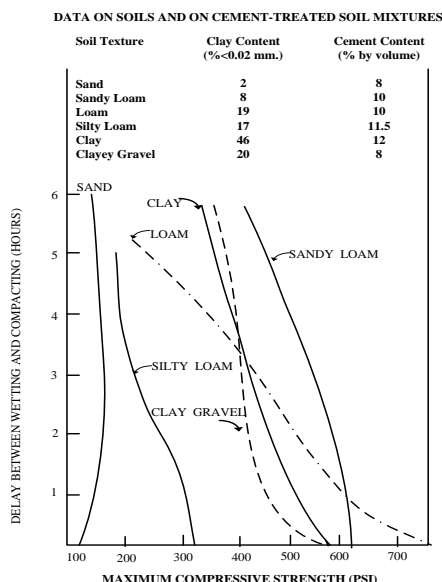
และยังเพิ่มขนาดโพรง (Pore size) และปริมาตร (Pore volume) เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นด้วย ส่วนการบ่มแบบชื้น เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดโพรงลดลง

2.6.5 ระยะเวลาในการผสม

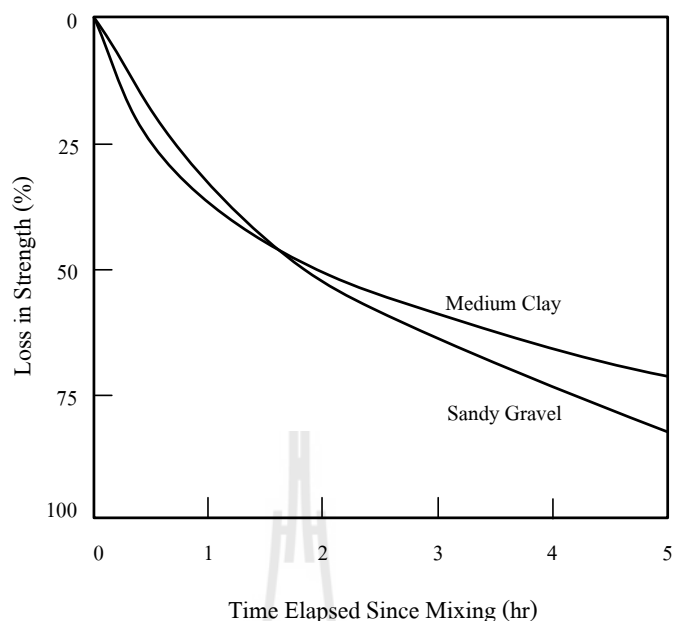
Marshall (1954) ศึกษาผลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างการผสมชื้น และการบดอัดที่มีผลต่อกำลังอัดของดินชนิดต่างๆ พบว่ากำลังอัดจะลดลงเมื่อเวลาการผสมนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7

Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของการหน่วงเวลาต่อกำลังอัด และความคงทนโดยผสมให้นานขึ้น 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 ดินทุกชนิดจะมีกำลังอัดลดลงเมื่อหน่วงเวลาการผสมให้นานขึ้น การหน่วงเวลาการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราว จะมีผลเสียน้อยกว่าแบบหยุดผสมเลย

Ingles and Metcalf (1972) ทำการทดสอบดิน 2 ชนิดคือ Medium Clay และ Sandy Gravel เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ในการผสมดินซีเมนต์ พบว่าเวลาการผสมที่นานขึ้น 1-2 ชั่วโมง กำลังอัดจะลดลงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเวลาการผสมนานเกินกว่า 2 ชั่วโมง กำลังอัดของ Sandy Gravel จะน้อยกว่า Medium Clay เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างการผสมชื้นและการบดอัด ที่มีต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ข้อมูลจาก Mashall, 1954



รูปที่ 2.8 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้เวลาในการบดอัด
นานขึ้น ข้อมูลจาก Ingles และ Metcalf, 1972

Horpibulsuk (2002) กล่าวว่า การที่ กำลังของดินซีเมนต์ในสนามมีค่าต่ำกว่ากำลังของดินซีเมนต์ที่หาได้จากห้องทดลอง มีสาเหตุจากความไม่สม่ำเสมอของการผสมดินซีเมนต์ในสนาม

2.6.6 สารผสมเพิ่ม

Clare and Pollard (1951) ทำการศึกษาเกี่ยวกับสารผสมเพิ่ม โดยทำการทดสอบดินทรายที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่ร้อยละ 0.3 พบว่าสารผสมเพิ่มจำพวกปูนขาว (Lime) มีส่วนช่วยให้ดินซีเมนต์แข็งตัวเร็วในระยะแรก ดินชนิดนี้เมื่อผสมด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์อย่างเดียวจะก่อตัวเมื่ออายุ 7 วัน แต่เมื่อเพิ่มปูนขาว ประมาณร้อยละ 2 จะช่วยให้ดินซีเมนต์ดังกล่าวแข็งตัวเร็วขึ้น 2 วัน

Fuller and Dabney (1952) ได้อธิบายว่าการใส่ปูนขาวกับดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง จะทำให้การผสม และการบดอัดง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

Maclean et al. (1952) ได้นำดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวระหว่าง 70-75 และมีค่าดัชนีพลาสติกประมาณ 45-53 มาทำการทดลอง โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 15-30 โดยที่เพิ่มปูนขาวลงไปร้อยละ 2 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้น และมีความต้านทานการเสียดน้ำได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าผสมปูนขาว (Lime) เกินกว่าร้อยละ 2 ผลการทดลองอาจไม่เป็นตามที่กล่าวมาข้างต้น

Lambe and Moh (1957) ได้รายงานผลการทดสอบการใช้สารผสมเพิ่มจำนวน 29 ชนิดในกลุ่ม Dispersants, Synthetic resins, Waterproofing agents, Alkalis และเกลือ ในดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 และปริมาณสารผสมเพิ่มร้อยละ 0.5-1.0 ดินที่ใช้ทำการทดสอบได้แก่ ดินตะกอนจากรัฐ New Hampshire ดินเหนียวปนดินตะกอนจากรัฐ Massachusetts และดินฝุ่นแข็งพูนจากเมือง Vicksburg พบว่ามีสารผสมเพิ่ม 4 ชนิด ที่เพิ่มความแข็งแรงถึงร้อยละ 100-150 ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต, โซเดียมไฮดรอกไซด์, โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมซัลเฟต

Davidson et al. (1958) ได้ศึกษาการใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับเถ้าลอยลิกไนต์ (Fly Ash) ในการปรับปรุงคุณภาพของดินพบว่า การผสมเถ้าลอยลิกไนต์ลงในดินจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของทรายผสมซีเมนต์เพิ่มขึ้น และยังพบว่าในดินเหนียวผสมซีเมนต์ ถ้าใส่เถ้าลอยลิกไนต์ลงไป จะทำให้รอยแตกเนื่องจากการหดตัวลดลง แต่ไม่ช่วยเพิ่มความคงทน

Pinto et al. (1962) ได้ทำการศึกษาดินที่มีแรมอนโมริลไอไนท์ผสมอยู่ 5 ชนิด โดยแปรผันปริมาณปูนขาว ซีเมนต์ที่ผสม และอายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน โดยทำการแช่น้ำ 1 วันก่อนทำการทดสอบอัดแกนเดี่ยว พบว่าการผสมปูนขาวจะช่วยให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในกรณีที่ดินตัวอย่างมีปริมาณดินเหนียวสูง และถ้าดินไม่มีหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่จะยิ่งทำให้ความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นอีก

Wilmot (1995) กล่าวว่า ตั้งแต่ปี 1950 ในประเทศออสเตรเลียวัสดุผสมเพิ่ม ที่ใช้ใน งาน Pavement Recycling มีเพียง Cement, Cement/Fly-ash, Bitumen และ Hydrate Lime เท่านั้น ต่อมาในปี 1980 มีการนำซีเมนต์ผสม มาใช้เพิ่มระยะเวลาการใช้งานให้นานขึ้น โดยที่ความแข็งแรงในระยะยาวยังคงเท่าเดิม ซีเมนต์ผสมดังกล่าวได้แก่ Cement+Slag, Cement+Fly-ash, Cement+Lime และได้ให้แนวทางการเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แนวทางการเลือกวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) กับวัสดุแต่ละชนิด (Wilmot, 1995)

	Crushed Rock	Well Graded Gravel	Silty- Clay Gravel	Sand*	Sandy Silty Clay	Heavy Clay
Cement	A	A	A	B	B	N
Blend Cementations	A	A	A	A	A	N
Hydrate Lime	B	B	A	N	B	A
Hydrate Lime + Cement	N	N	B	N	B	A
Polymeric	B	A	A	B	A	B
Bitumen	A	A	B	B	B	N

Usually very suitable A

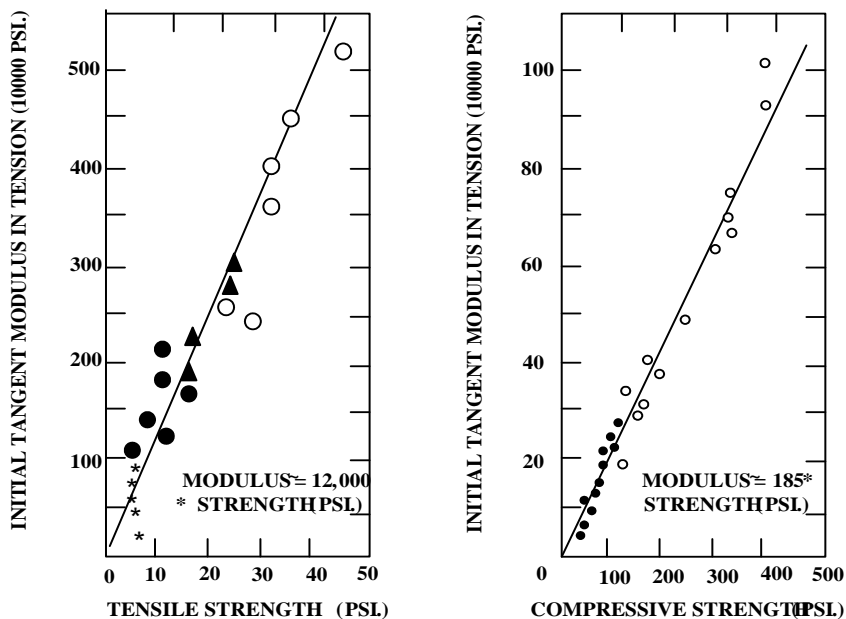
Usually satisfactory B

Usually not suitable N

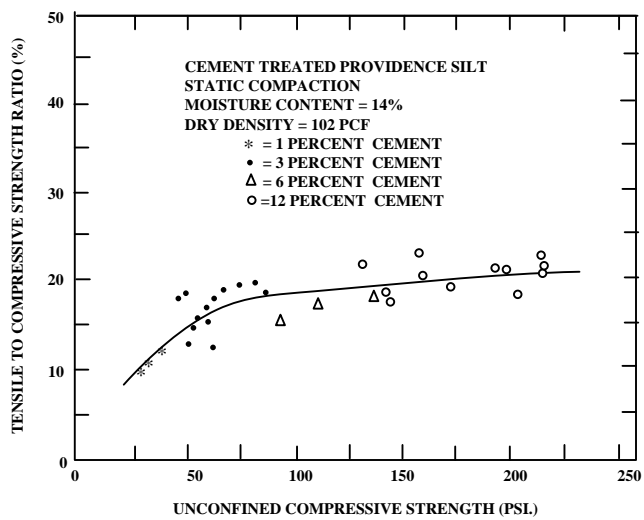
* Depend Upon Grading (Single size sand require higher additive content)

2.7 กำลังของดินซีเมนต์

Wang and Huston (1972) ทำการทดสอบหาค่ากำลังดึง และกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งกับดินตะกอนที่ได้จาก Glacial Deposit ใน Rhode Island พบว่าการเสียรูปที่จุดวิบัติจากการทดสอบทั้งแบบรับแรงอัดและรับแรงดึง จะมีค่าคงที่เสมอ ถ้าหากค่าความหนาแน่นแห้ง ปริมาณความชื้น และสภาพการบ่มเหมือนกัน ค่ากำลังและค่าการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบแบบรับแรงดึงจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดึง จะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 10-20 ของค่ากำลังรับแรงอัด ส่วนค่าการเสียรูปที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงดึง จะมีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 1.0-2.5 ของค่าการเสียรูปที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงอัด สำหรับทุกอายุการบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่ศึกษา และยังพบอีกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของแรงอัดกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงดึง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลัง ตามรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in Tension กับกำลังดึงและกำลังอัดของดินซีเมนต์ ข้อมูลจาก Wang and Huston, 1972



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct Tensile Strength กับ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ ข้อมูลจาก Wang and Huston, 1972

2.8 การนำวัสดุเก่ามาใช้ใหม่ (RECYCLING)

Gordon (1984) กล่าวถึงการใส่สารผสมเพิ่มเพื่อสร้าง Modified Materials และ Bound Materials Modified Materials คือวัสดุที่เกิดจากการเติมสารผสมเพิ่มพอประมาณ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้น วัสดุประเภทนี้จะมีความต้านทานแรงดึงต่ำ Bound Materials เป็นวัสดุที่เกิดจากการใส่สารผสมเพิ่ม ลงไปอย่างมาก เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าสูง และอาจต้านทานหน่วยแรงดึงได้

Kuhlman (1989) กล่าวไว้ว่า ได้มีการปรับปรุงถนนเก่าใน 12 รัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีผิวจราจรทำจากยางมะตอย โดยการนำผิวจราจรมาผสมกับซีเมนต์ แล้วใช้เป็นพื้นทางใหม่ ในช่วงปี 1942-1958 ต่อมาในปี 1970 การปรับปรุงวัสดุเก่านี้ถูกเรียกว่า Recycling ในเวลาต่อมา วิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้งาน ทั้งผิวจราจรยืดหยุ่นที่ชำรุดเสียหาย และผิวจราจรคอนกรีตเก่าซึ่งพบว่าได้ผลดี

Tabensky (1990) กล่าวว่า การนำวัสดุเก่ามาใช้งานอีกครั้ง (Recycling) ไม่ใช่เรื่องใหม่ แต่มีรายงานว่า Florida Department of Transportation ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเก่า ด้วยการผสมซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของถนน และ Orange County California ใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่นำกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้ง กับถนนจำนวน 20 สายระหว่างปี 1950-1960 โดยใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5-7 โดยน้ำหนัก และทำผิวทางแบบแอสฟัลต์หนา 75 มิลลิเมตร ในรัฐ Arizona ได้มีการใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในการปรับคุณภาพวัสดุที่ผสมกัน ระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากับวัสดุชั้นล่าง เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางวิ่งในสนามบิน 2 แห่งคือ Winslow Municipal Airport และ Mohave County Airport.

Wirtgen (1992) บันทึกว่า Cold Recycling ใช้ในการทำชั้นพื้นทางไว้รองรับ Surface Treatment หรือ Wearing Course โดยทั่วไปจะใช้ความหนาประมาณ 200-300 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของถนนที่ต้องการ ข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์ของ Cold In-Place Recycling เมื่อเปรียบเทียบกับ Conventional Method ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ของ Cold Recycling Process กับ Conventional Method (Wirtgen, 1992)

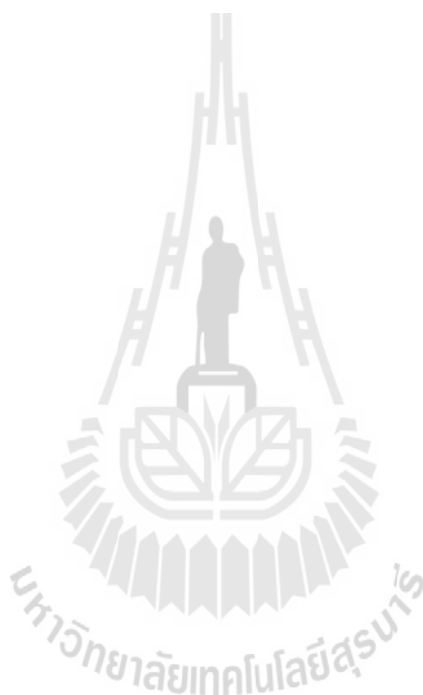
	Conventional Method	Cold Recycling Method
รถขุดและการขนส่ง	ต้องการ	ไม่ต้องการ
การขนย้ายรถขุด	ต้องการ	ไม่ต้องการ
การใช้รถขนย้ายวัสดุถนนเดิม	ต้องการ	ไม่ต้องการ
สถานที่ทิ้งวัสดุ	ต้องการ (ค่าใช้จ่ายสูง)	ไม่ต้องการ
การใช้รถขนย้ายวัสดุถนนใหม่	ต้องการ (เป็นปัญหามาก)	ต้องการ
การตัดแต่งรูปในแต่ละชั้นทาง	ต้องการ (ค่าใช้จ่ายสูง)	ต้องการ (ในบางกรณี)
เครื่องจักรในการบดอัด	ต้องการ (ค่าใช้จ่ายสูง)	ต้องการ (กรณีไม่มีเครื่องปู)
ระยะเวลาในการก่อสร้าง	ยาว	สั้น
ปัญหาการจราจร	มาก	น้อย

Atkinson (1995) กล่าวว่า ได้มีการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุ ใน Queensland มาตั้งแต่ปี 1980 กับถนนที่เป็นคันกรวดเมื่อปริมาณการจราจรสูงขึ้น หรือเกิดน้ำท่วม จะทำให้ถนนชำรุดเสียหาย และความแข็งแรงของถนนลดลง ได้แก้ปัญหาโดยปรับปรุงคุณภาพวัสดุ ซึ่งในช่วงแรกของการออกแบบต้องการความแข็งแรงที่ 2 เมกะปาสคาล สำหรับถนนที่มีคันทางอ่อนตัว (Flexible Subgrade)

Walton (1995) บันทึกไว้ว่าการนำวัสดุเก่ามาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold In-Place Recycling) เป็นที่ยอมรับกันว่าประหยัดมาก และได้เริ่มมีการใช้เป็นมาตรฐานในปี 1970 ในรัฐ Oregon, New Mexico, Kansas และ Florida ต่อมาวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในหลายประเทศ เช่น ออสเตรเลีย อิตาลี รัสเซีย แคนาดา เยอรมัน ฝรั่งเศส และอังกฤษ โดยใช้กับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำถึงปานกลางในปี 1980 ปรากฏว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ในช่วง ดังกล่าวใช้ซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และยังใช้ Emulsion เป็นสารผสมเพิ่ม (Additive)

A.A. Loundon & Partner Consulting Engineers (1995) กล่าวว่า การก่อสร้างด้วยวิธี Cold In-Place Recycling ต้องมีการสำรวจออกแบบตามเงื่อนไข และตามสภาพถนนที่จะทำการก่อสร้าง

รวมทั้งประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่จะใช้งาน เพื่อที่จะสามารถวางแผนงานให้ได้ผลที่ดีที่สุด การก่อสร้างจะไม่ทำในขณะที่เปียก และหลีกเลี่ยงการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นที่ใช้ควรหาจากการทดลอง ซึ่งถ้าใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพ ระหว่างการบดอัด ความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 75 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุที่ไม่ผสมเพิ่ม แต่ถ้าไม่ผสมซีเมนต์หรือไม่ผสมอะไรเลย ปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดต้องไม่เกินปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากการบดอัด และแต่งรูปเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการบ่มเพื่อรักษาความชื้นทันทีซึ่งอาจใช้ยางแอสฟัลท์หรือวัสดุอย่างอื่นที่เหมาะสมก็ได้



บทที่ 3

แนวทางและวิธีการวิจัย

3.1 บทนำ

การแก้ไขถนนที่ชำรุดโดยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling Technique) เป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทยขณะนี้ การปรับปรุงด้วยเทคนิคนี้จำเป็นต้องขุดไส (Mill) ผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตเดิม เพื่อเอาผิวทางที่ไม่ต้องการออกหรือรื้อทิ้ง เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดทางด้านวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม วัสดุแอสฟัลต์ติกคอนกรีตสามารถนำกลับมาผสมกับชั้นผิวทาง (หินคลุก) ร่วมกับปูนซีเมนต์ แต่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนากำล้างอัดและความคงทนของหินคลุกผสมแอสฟัลต์ติกคอนกรีตและปูนซีเมนต์ยังมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพัฒนากำล้างอัดและความคงทนของวัสดุดังกล่าว การทดสอบกำล้างอัดและความคงทนจะทำตามมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย บทนี้จะนำเสนอ แผนงานการวิจัย และข้อสมมุติฐาน

3.2 แผนงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำหินคลุกและผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล มาผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนระหว่างหินคลุกและผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล เท่ากับ 80:20, 60:40, 40:60 และ 20:80 และทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน บดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมนำมาทดสอบกำล้างอัดและความคงทนที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน ส่วนการทดสอบเป็ยกลกลับแห่งทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้น 0.80, 1.00 และ 1.20 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสมนำมาทดสอบกำล้างอัดและความคงทนที่อายุบ่ม 28 วัน

3.2.1 วัสดุทดสอบ

ผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล ที่ใช้ในการทดสอบนำมาจากถนนสาย 2285 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 207 (ประทาย) - บรรจบทางหลวงหมายเลข 2226 (ชุมพวง) หินคลุกนำมาจากกองเก็บของหมวดการทางชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา ตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดถูกนำมาผึ่งแห้งในอากาศอย่างน้อย 3 วัน จากนั้นนำมาผสมในอัตราส่วน (CR:RAP) 20:80, 40:60, 60:40, 80:20 และ 100:0 การแบ่งตัวอย่างให้ใช้เครื่องแบ่งตัวอย่างเพื่อให้ได้ตัวแทนตัวอย่างที่แท้จริงแสดงดังรูปที่ 3.1

3.2.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างหินคลุกและผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล ที่อัตราส่วนต่างๆ จะนำมาทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้น อันได้แก่

1) การกระจายขนาดของอนุภาคดิน ตามมาตรฐานวิธีทดลองที่ ทล.ม.205/2517 (เทียบเท่ากับ มาตรฐาน ASTM D422) แสดงดังรูปที่ 3.1

2) ค่าความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐานวิธีทดลองที่ ทล.ท.207/2517,ทล.ท.209/2518 (เทียบเท่ากับมาตรฐาน ASTM D854) แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 การแบ่งตัวอย่างด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่าง



รูปที่ 3.2 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ

3) การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ซึ่งพลังงานการบดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) ตามมาตรฐานวิธีทดลองที่ ทล.ท.108/2517 (เทียบเท่ากับมาตรฐาน ASTM D698) ดังแสดงรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)

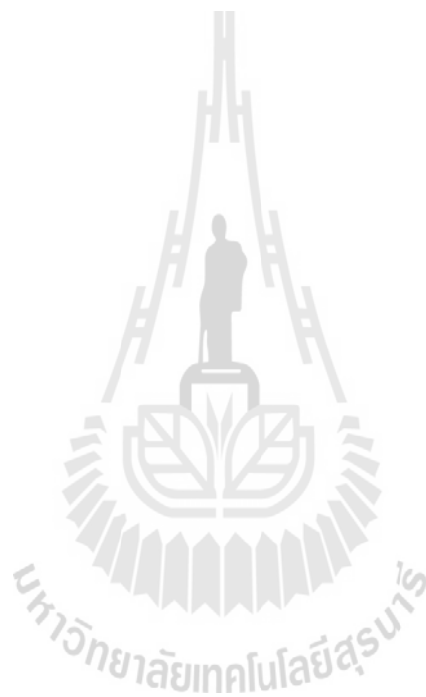
ตัวอย่างหินคลุกผสมผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล สำหรับการบดอัดจะถูก ร้อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 19 มิลลิเมตร เพื่อขจัดส่วนผสมที่มีขนาดใหญ่เกิน อันจะก่อให้เกิด ความไม่สม่ำเสมอทางด้านขนาดของวัสดุทดสอบ (Size Effect) ดินตัวอย่างที่ผ่านการร้อนจะเตรียม ทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้น 5 ถึง 6 ค่า โดยเติมน้ำใส่ตัวอย่างและห่อเก็บไว้ในถุงพลาสติก เป็น เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายอย่างทั่วถึง จากนั้นวัดปริมาณความชื้นก่อนทำการ บดอัด และทำการบดอัดตัวอย่างในแบบหล่อมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว

การทดสอบการบดอัดตัวอย่างผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ก็ทำเช่นเดียวกันกับหิน คลุกผสมผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ร้อยละ 3, 5 และ 7 โดย น้ำหนัก หลังจากบดอัดแล้วเสร็จ ทำการดันตัวอย่างออกจากแบบหล่อและห่อตัวอย่างด้วยฟิล์มห่อ อาหาร และเก็บไว้ในห้องควบคุมปริมาณความชื้นและอุณหภูมิดังที่แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ก้อนตัวอย่างหลังการบดอัด

ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัดจะแบ่งด้วยกันสองชุดเมื่อครบอายุบ่มต่างๆ ชุดที่ 1 จะนำมาทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียวทันที ส่วนชุดที่ 2 จะทำการแช่ดินตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียว ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.ท. 105/2515 (เทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T 208) การทดสอบกำลังอัดทำด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ด้วยอัตราเร็วการเคลื่อนตัวในแนวตั้งเท่ากับร้อยละ 1 ของความสูงก้อนตัวอย่าง) ส่วนการทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wet-Dry Test) หรือความคงทนต่อสภาพแวดล้อมกระทำตามมาตรฐาน ASTM D559 เมื่อถึงอายุบ่มที่ 28 วัน จะนำก้อนตัวอย่างไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเข้าตู้อบด้วยอุณหภูมิ 70 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำออกมาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นับเป็น 1 รอบการทดสอบ ก่อนทดสอบแรงกำลังอัด ตัวอย่างจะถูกนำมาแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบอิมตัวด้วยน้ำ ในงานวิจัยนี้การทดสอบกำลังอัดจะทำที่จำนวนรอบเท่ากับ 1, 3 และ 6 รอบของการทดสอบความคงทนต่อการเปียกสลับแห้ง



รูปที่ 3.5 แผนการวิจัยในห้องปฏิบัติการงาน

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษา คุณสมบัติพื้นฐาน คุณสมบัติด้านกำลังอัด และความคงทนของวัสดุรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ (Cement stabilized recycled material) วัสดุรีไซเคิลเป็นส่วนผสมระหว่างหินคลุก (CR) และผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ผลการศึกษาทั้งหมดนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวง และวิเคราะห์เพื่อนำเสนอวัสดุทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

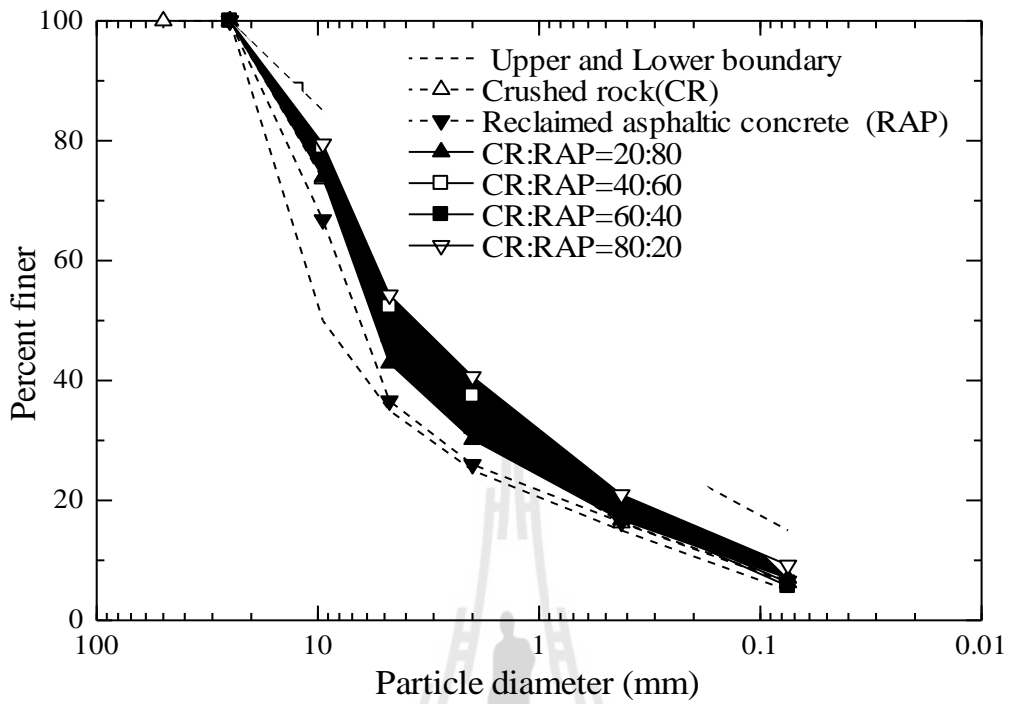
4.2 วัสดุทดสอบและการทดสอบ

4.2.1 วัสดุทดสอบ

ผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตรีไซเคิล (Reclaimed Asphaltic pavement, RAP) ได้จากโครงการซ่อมแซมถนนด้วยการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) ของถนนสาย 2285 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 207 (ประทาย) – บรรจบ ทางหลวงหมายเลข 2226 (ชุมพวง) มีสีเทาดำมีปริมาณดินเม็ดหยาบมากกว่าร้อยละ 90 และไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก แอสฟัลต์ติกคอนกรีตเป็นชนิด AC 60-70 หินคลุก (CR) มาจากหมวดการทางชุมพวง มีสีเทาน้ำตาล ปริมาณดินเม็ดหยาบเกินกว่าร้อยละ 90 และไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก คุณสมบัติพื้นฐานของผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตเดิมและหินคลุกแสดงดังตารางที่ 4.1 วัสดุทั้งสองเมื่อจำแนกดินตามระบบเอกภาพ (USCS) จัดเป็นกรวดที่มีขนาดคละกัณฑ์ (GW) การกระจายตัวของหินคลุก ผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตเดิม และวัสดุผสมแสดงดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าวัสดุ CR, RAP และวัสดุผสมระหว่าง CR และ RAP มีความคละตาม ทล.-ม.203/2556 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงและจัดเป็นเกรด B ทั้งหมด และสามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์สำหรับงานหมุนเวียนวัสดุชั้นพื้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement recycling technique)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของ CR และ RAP

ผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตไร้เซเมนต์ (RAP)	
Bulk specific gravity of Mixed Aggregate	2.665
Specific gravity of asphalt cement	1.02
Asphalt absorption by weight of aggregate, (%)	0.44 %
AC content by weight of aggregate	5.5% ($\pm 0.3\%$)
หินกลุ่ก (CR)	
Gradation	B
CBR, (%)	90.4%
Abrasion, (%)	20.8%
Water absorption, (%)	0.79%
RAP : CR =80:20	
Gradation	B
CBR, (%)	60.1
Abrasion, (%)	28.54
Water absorption, (%)	1.72
RAP : CR =60:40	
Gradation	B
CBR, (%)	64.7
Abrasion, (%)	26.87
Water absorption, (%)	1.54
RAP : CR =40:60	
Gradation	B
CBR, (%)	79.4
Abrasion, (%)	25.74
Water absorption, (%)	1.24
RAP : CR =20:80	
Gradation	B
CBR, (%)	85.1
Abrasion, (%)	25.52
Water absorption, (%)	1.18

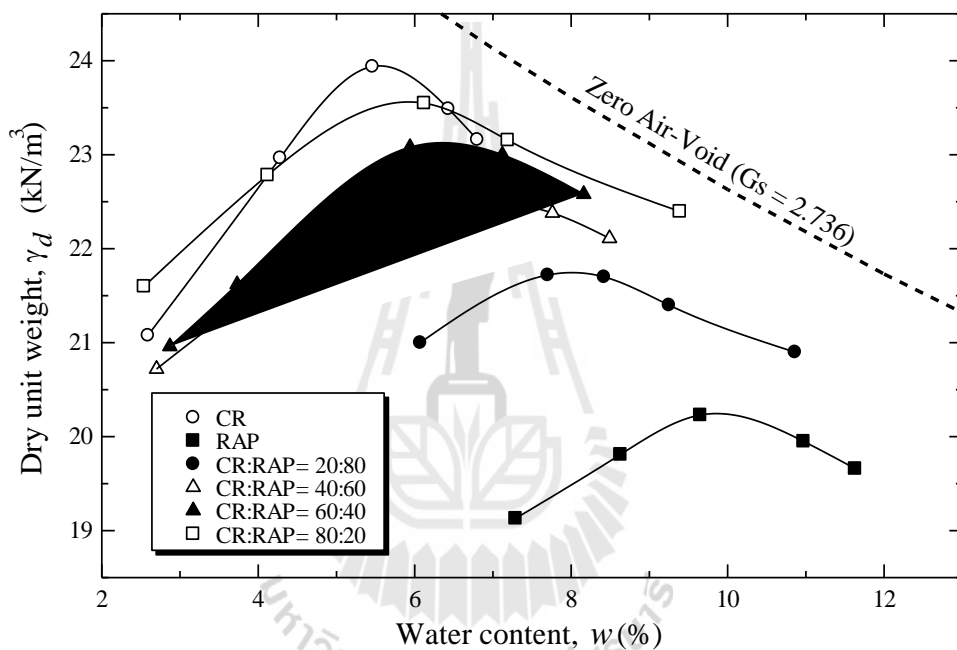


รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของวัสดุผสม (CR: RAP)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของวัสดุผสม (CR: RAP)

Materials	Classification		OWC (kN/m ³)	CBR (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	Specific gravity (G_s)	
	AASHTO	USCS				Coarse	Fine
RCR: Crushed rock	A-1-a	GW	23.90	90.4	23.90	2.736	2.785
RAP: Reclaimed Asphaltic pavement	A-1-a	GW	20.20	56.4	20.20	2.566	2.585
CR:RAP =20:80	A-1-a	GW	21.80	60.1	21.80	2.599	2.631
CR:RAP =40:60	A-1-a	SW	22.07	64.7	22.07	2.617	2.674
CR:RAP =60:40	A-1-a	SW	22.76	79.4	22.76	2.635	2.760
CR:RAP =80:20	A-1-a	SW	23.05	85.1	23.05	2.704	2.726

ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมระหว่าง CR และ RAP ซึ่งประกอบด้วย การจำแนกชนิดของดินโดยระบบ AASHTO และ USCS ปริมาณความชื้นเหมาะสม หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และ ความถ่วงจำเพาะ การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุผสมระหว่าง CR และ RAP เป็นรูปประฆังคว่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 วัสดุ CR มีหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ขณะที่วัสดุ RAP มีหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำที่สุด หน่วยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสมระหว่าง CR และ RAP จึงมีค่าอยู่ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งของ CR และ RAP และมีค่าลดลงตามปริมาณของ RAP



รูปที่ 4.2 กราฟการบดอัดวัสดุผสม CR และ RAP ในอัตราส่วนต่างๆ

4.2.2 วิธีการทดสอบ

วัสดุผสมเป็นส่วนผสมระหว่าง CR และ RAP ในอัตราส่วนการแทนที่ CR ด้วย RAP เท่ากับ 0, 20, 40, 60 และ 80 วัสดุผสมจะนำมาคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นอย่างดีกับน้ำและปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และบดอัดในแบบหล่อมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับร้อยละ 3, 5 และ 7 ผู้วิจัยเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม และบ่มตัวอย่างในห้องควบคุมอุณหภูมิจนได้อายุบ่ม 7 และ 28 วัน เมื่อครบอายุบ่ม ผู้วิจัยทดสอบกำลังอัดด้วยอัตรา การเคลื่อนตัว 1 มิลลิเมตรต่อนาที นอกจากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวแล้ว ผู้วิจัยตรวจสอบ

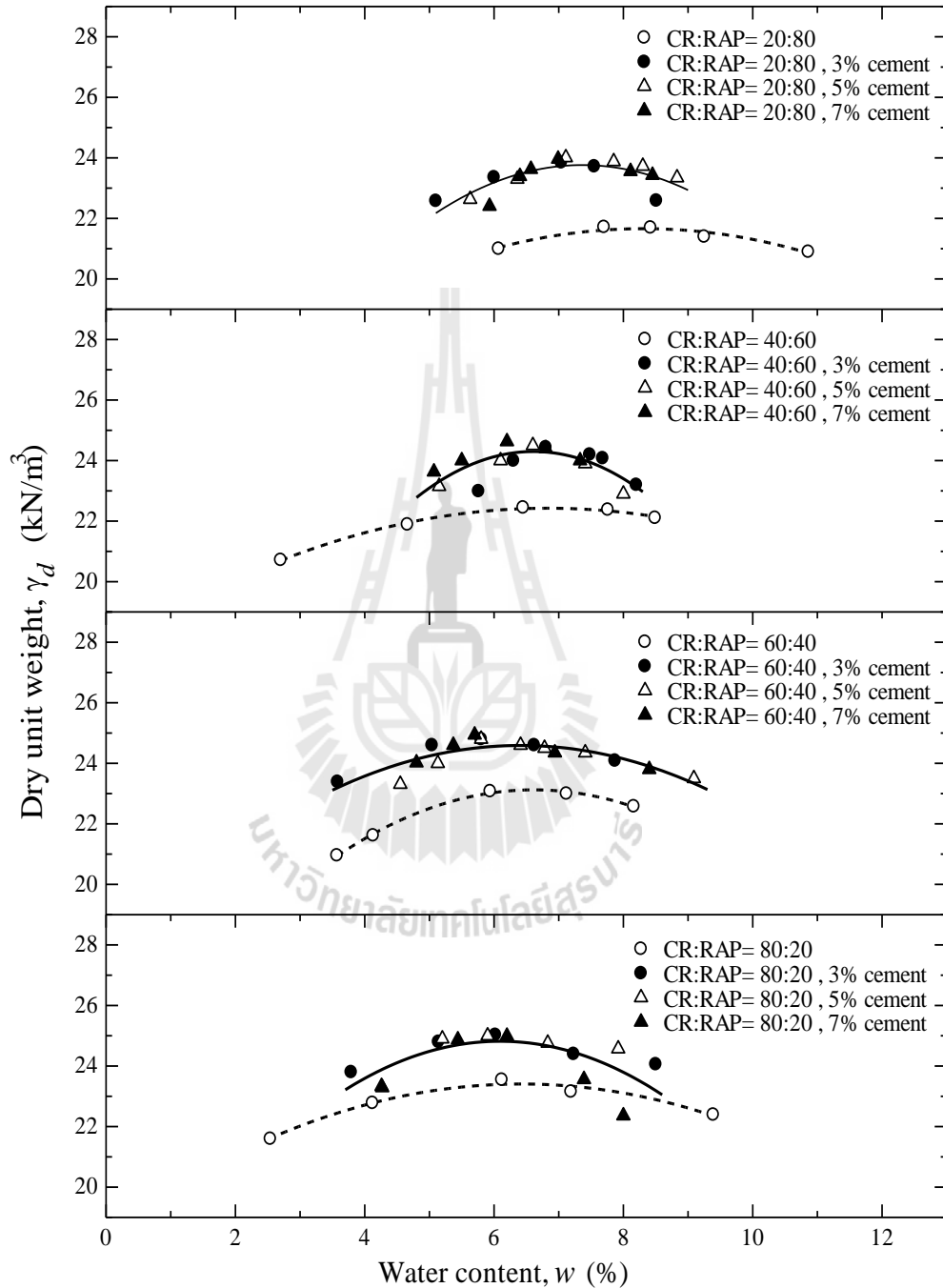
ความคงทนด้านเปื่อยสลายแห้งของตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม และที่ ปริมาณความชื้นด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม การเตรียมตัวอย่างกระทำ ตามมาตรฐาน ASTM D559 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. นำตัวอย่างแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้วทิ้งไว้ให้ผิวนอกแห้ง
2. นำตัวอย่างเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง 3 ชั่วโมง ถือว่าเป็นหนึ่งรอบ
3. ทำตามข้อ 1 ถึง 2 จนได้จำนวนรอบทดสอบที่ต้องการ จำนวนรอบทดสอบแบบเปื่อยสลายแห้ง คือ 1, 3 และ 6 รอบ
4. คำนวณหาน้ำหนักที่สูญเสียของตัวอย่างในทุกรอบของการเตรียมตัวอย่างเปื่อยสลายแห้ง
5. นำตัวอย่างไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างอิมตัวด้วยน้ำ ก่อนทดสอบสอบกำลังอัด

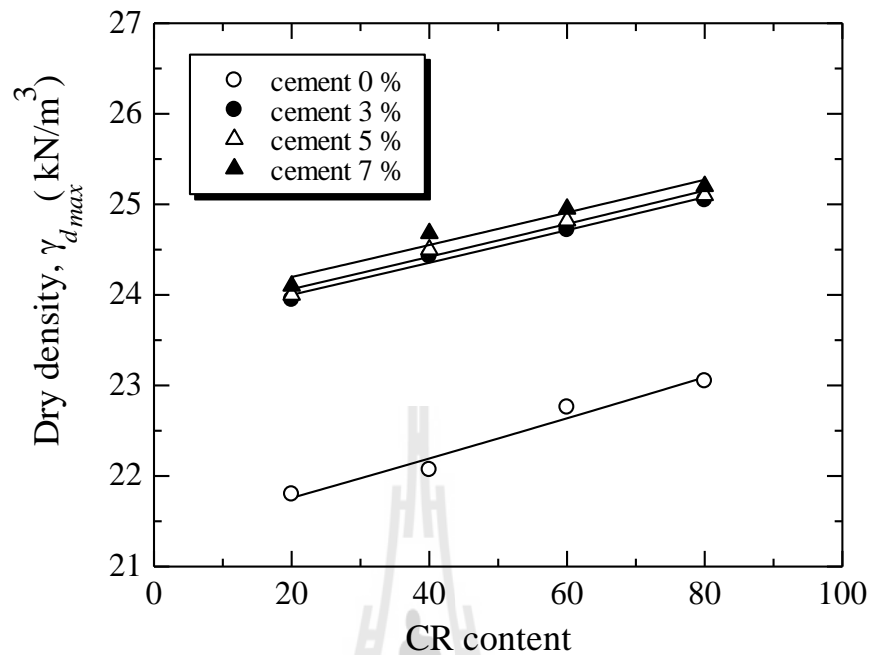
4.3 ผลทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 4.3 แสดงผลทดสอบการบดอัดของวัสดุผสม (CR:RAP) กับปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่า หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของวัสดุผสมระหว่าง CR และ RAP มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยวัสดุ RAP ภายใต้พลังงานการบดอัด (แบบสูงกว่ามาตรฐาน) ที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจาก RAP มีคุณสมบัติการดูดซับพลังงานการบดอัดสูงกว่า CR วัสดุผสมที่ปริมาณ RAP มาก จึงดูดซับพลังงานได้มากกว่าอีกทั้งผิวของ RAP เคลือบด้วยแอสฟัลต์จึงทำให้ปริมาณความชื้นสูงขึ้นในการบดอัด ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดลดลงและทำให้ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) ของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ด้วย RAP ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุผสมแปรผันตรงตามปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วน CR:RAP และสามารถประมาณได้ด้วย ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 3 เพิ่มหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัด โดยหน่วยน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 4 ของหน่วยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสมที่ไม่ผสมปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของปูนซีเมนต์ต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักแห้งมีไม่มากนัก เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์มีค่าเกินกว่าร้อยละ 3 ความชันของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและอัตราส่วนการแทนที่ (RAP) มีค่าประมาณคงที่ สำหรับวัสดุผสมระหว่าง CR และ

RAP ทั้งที่ผสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์ สิ่งนี้แสดงว่าอิทธิพลของปูนซีเมนต์ต่อการเพิ่มหน่วยน้ำหนักแห้งมีความใกล้เคียงกัน โดยไม่แปรผันตามอัตราส่วนการแทนที่

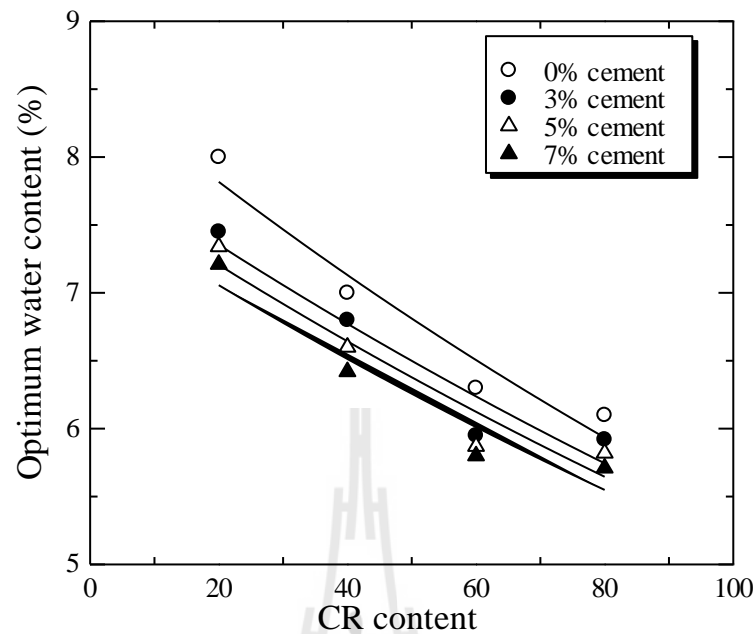


รูปที่ 4.3 กราฟการบดอัดวัสดุผสม CR กับ RAP ผสมปูนซีเมนต์



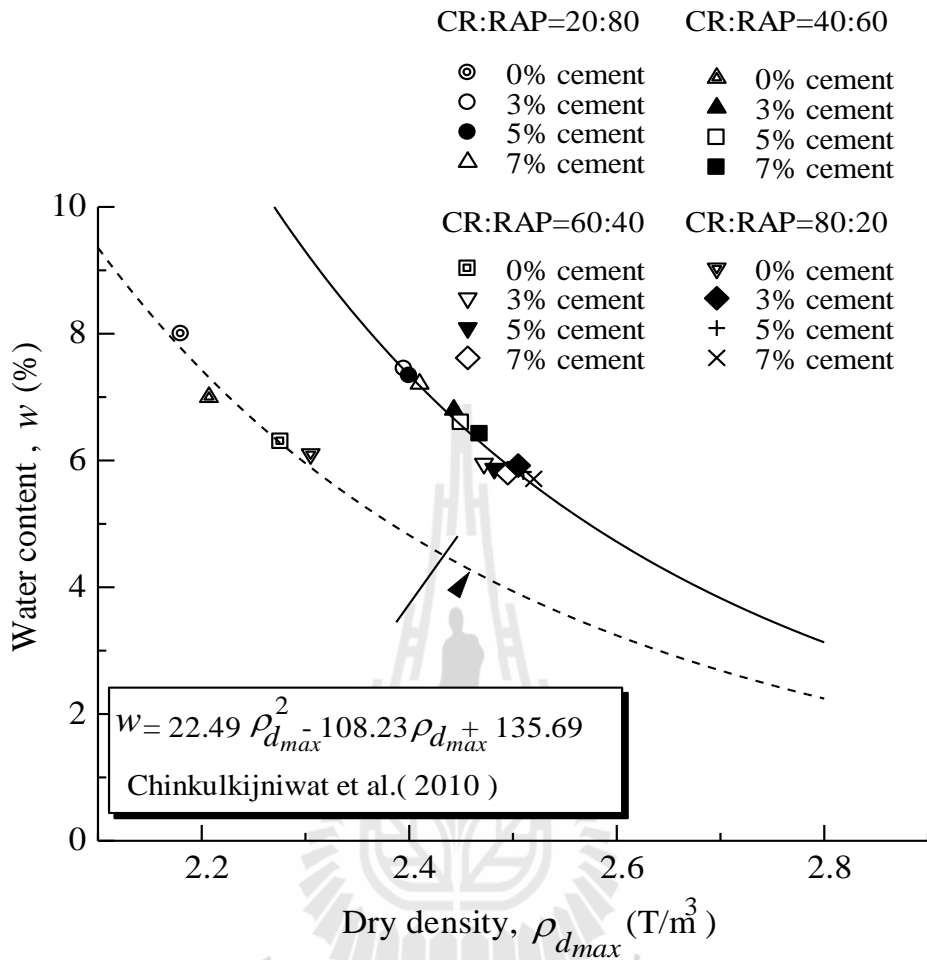
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับอัตราส่วนต่างๆ

การเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคดินจนมีขนาดใหญ่ขึ้น (Flocculation) เนื่องจากการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation exchange) และอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสม เนื่องจากปูนซีเมนต์มีความถ่วงจำเพาะที่สูงกว่า CR และ RAP การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเหมาะสมตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน CR : RAP และปริมาณปูนซีเมนต์แสดงในรูปที่ 4.5 ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน CR:RAP และปริมาณปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสมกับอัตราส่วนต่างๆ

การลดลงของปริมาณความชื้นเหมาะสมสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ซึ่งเป็นพฤติกรรมทั่วไปของวัสดุบดอัด จากความสอดคล้องดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นเหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ด้วยสมการโพลีโนเมียล สำหรับทุกอัตราส่วน CR:RAP ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Chinkulkijniwat et al. (2010) สำหรับดินบดอัด (ไม่ผสมปูนซีเมนต์) หลายชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เนื่องจากอิทธิพลของปูนซีเมนต์ความสัมพันธ์ของดินซีเมนต์บดอัดจึงอยู่เหนือความสัมพันธ์ของดินบดอัด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ดินซีเมนต์บดอัดมีหน่วยน้ำหนักแห้งสูงกว่าดินบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นเหมาะสมของวัสดุผสมระหว่าง CR และ RAP (ไม่ผสมปูนซีเมนต์) สามารถประมาณได้ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Chinkulkijniwat et al. (2010)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นเหมาะสม

4.4 กำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) กระทำกับตัวอย่างสองประเภท เพื่อหาค่ากำลังอัดในสภาวะแช่น้ำ (Soaked condition) และไม่แช่น้ำ (Unsoaked condition) ค่ากำลังอัดในสภาวะแช่น้ำหาได้จากตัวอย่างที่แช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามข้อแนะนำของกรมทางหลวงและ AASHTO ผลทดสอบกำลังอัดแสดงในตารางที่ 4.3 ถึง 4.7

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม Mix (CR:RAP = 20:80) ผสมซีเมนต์บดอัด

Optimum water content <i>OWC</i> (%)	Curing time <i>D</i> (days)	Cement content <i>C</i> (%)	Water content <i>w</i> (%)	Soil-water/ cement ratio <i>w/C</i>	Laboratory soaked strength (kPa)	Laboratory unsoaked strength (kPa)	$q_{\text{unsoaked}}/q_{\text{unsoaked}}$
7.45	7	3.0	7.31	2.4	2039.74	2055.98	0.99
7.34	7	5.0	7.16	1.4	3205.63	3323.00	0.96
7.21	7	7.0	7.40	1.1	3732.58	3990.54	0.94
7.45	28	3.0	7.28	2.4	3690.86	3752.17	0.98
7.34	28	5.0	6.98	1.3	5332.24	5454.62	0.98
7.21	28	7.0	6.74	1.1	6873.50	6953.60	0.99

ตารางที่ 4.4 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม Mix (CR:RAP = 40:60) ผสมซีเมนต์บดอัด

Optimum water content <i>OWC</i> (%)	Curing time <i>D</i> (days)	Cement content <i>C</i> (%)	Water content <i>w</i> (%)	Soil-water/ cement ratio <i>w/C</i>	Laboratory soaked strength (kPa)	Laboratory unsoaked strength (kPa)	$q_{\text{unsoaked}}/q_{\text{unsoaked}}$
6.80	7	3.0	6.92	2.3	3114.55	3188.36	0.98
6.60	7	5.0	6.75	1.4	4002.71	4107.77	0.97
6.40	7	7.0	6.65	1.0	6229.06	6352.10	0.98
6.80	28	3.0	6.61	2.3	4490.05	4838.84	0.93
6.60	28	5.0	6.70	1.3	6598.02	6919.73	0.95
6.40	28	7.0	6.62	1.0	8255.35	8471.66	0.97

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม Mix (CR:RAP = 60:40) ผสมซีเมนต์บดอัด

Optimum water content <i>OWC</i> (%)	Curing time <i>D</i> (days)	Cement content <i>C</i> (%)	Water content <i>w</i> (%)	Soil-water/ cement ratio <i>w/C</i>	Laboratory soaked strength (kPa)	Laboratory unsoaked strength (kPa)	$q_{\text{unsoaked}}/q_{\text{unsoaked}}$
6.10	7	3.0	6.42	2.1	4531.46	4627.56	0.98
6.00	7	5.0	6.53	1.3	5384.71	5531.56	0.97
5.90	7	7.0	6.30	0.90	7640.44	7700.54	0.99
6.10	28	3.0	6.34	2.1	5850.27	5912.46	0.99
6.00	28	5.0	6.23	1.2	8175.98	8377.12	0.98
5.90	28	7.0	6.08	0.90	10120.21	10589.20	0.96

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม Mix (CR:RAP = 80:20) ผสมซีเมนต์บดอัด

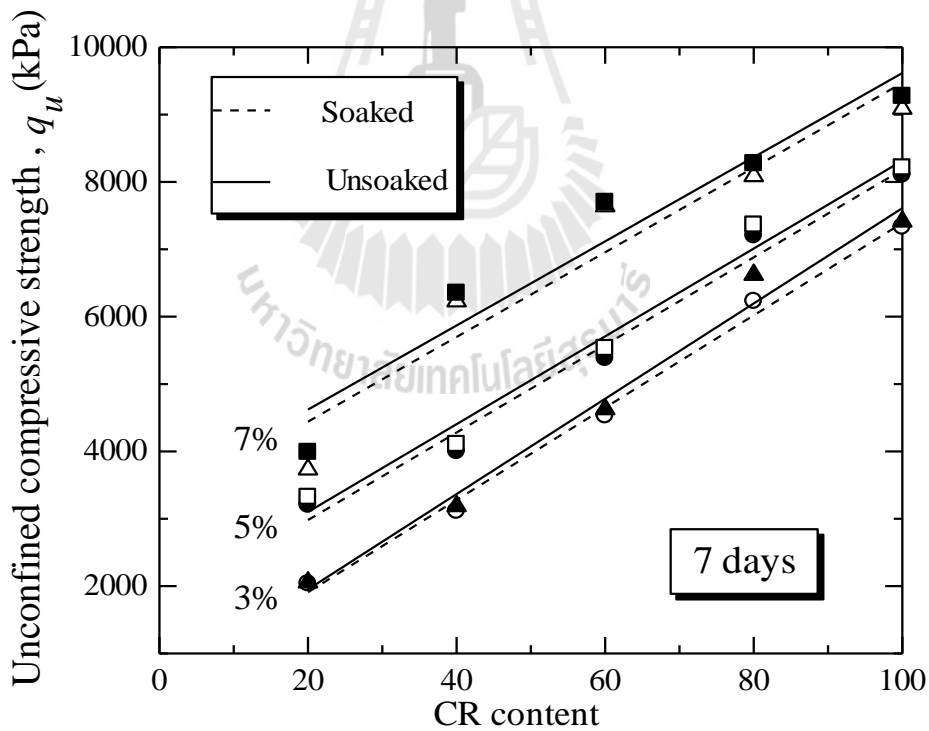
Optimum	Curing	Cement	Water	Soil-water/	Laboratory	Laboratory	
water content	time	content	content	cement ratio	soaked	unsoaked	$q_{u\text{soak}}/q_{u\text{unsoak}}$
OWC. (%)	D (days)	C (%)	w (%)	w/C	strength (kPa)	strength (kPa)	
5.92	7	3.0	5.82	2.1	6231.24	6622.44	0.94
5.87	7	5.0	5.75	1.2	7204.81	7363.75	0.98
5.80	7	7.0	5.64	0.8	8087.85	8274.97	0.98
5.92	28	3.0	5.71	2.1	7536.36	7621.89	0.99
5.87	28	5.0	5.54	1.2	9800.12	9913.47	0.99
5.80	28	7.0	5.43	0.8	12526.45	12877.88	0.97

ตารางที่ 4.7 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม Mix (CR:RAP = 100:0) ผสมซีเมนต์บดอัด

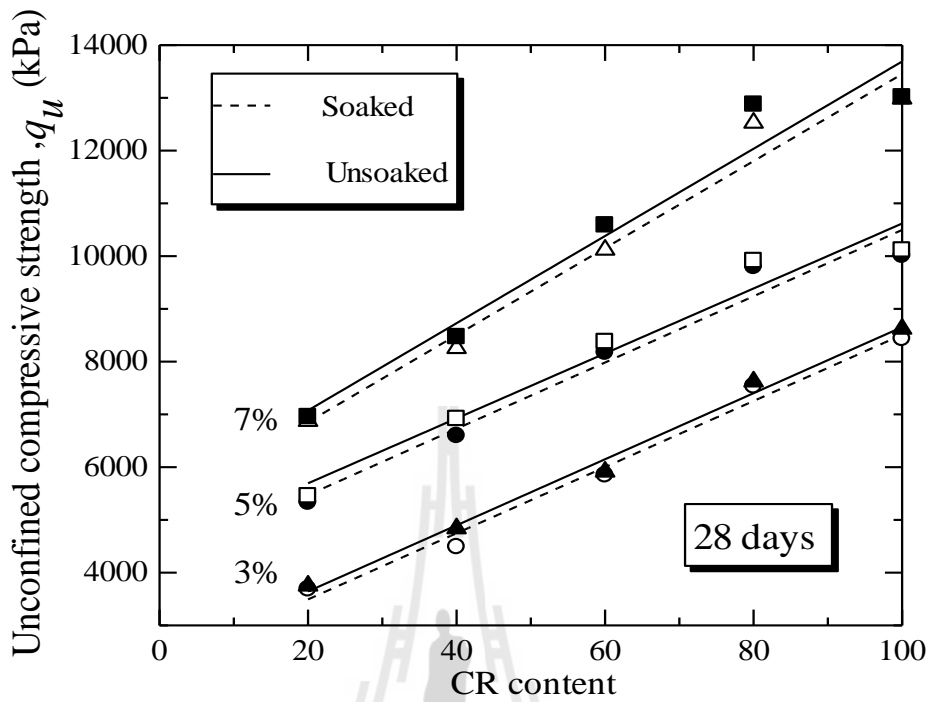
Optimum	Curing	Cement	Water	Soil-water/	Laboratory	Laboratory	
water content	time	content	content	cement ratio	soaked	unsoaked	$q_{u\text{soak}}/q_{u\text{unsoak}}$
OWC. (%)	D (days)	C (%)	w (%)	w/C	strength (kPa)	strength (kPa)	
5.33	7	3.0	5.43	1.8	7332.34	7421.21	0.98
5.21	7	5.0	5.22	1.1	8104.81	8313.18	0.97
5.17	7	7.0	5.16	0.8	9087.85	9274.97	0.98
5.22	28	3.0	5.19	1.7	8436.36	8621.89	0.98
5.18	28	5.0	5.15	1.0	10012.12	10113.47	0.98
5.09	28	7.0	5.11	0.8	12984.37	13017.21	0.99

รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนผสมระหว่าง CR:RAP ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน อัตราส่วน CR:RAP มีอิทธิพลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัด ดังจะเห็นได้ว่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าลดลงอย่างมาก ตามการเพิ่มขึ้นของ RAP (การลดลงของอัตราส่วน CR:RAP) การลดลงของกำลังอัดตามการเพิ่มขึ้นของ RAP แสดงได้ด้วยการเชิงเส้นตรง เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและอัตราส่วน CR:RAP การเพิ่มขึ้นของ RAP มีผลลบต่อการพัฒนากำลังอัด แม้ว่าจะมีการผสมเพิ่มในปริมาณน้อยก็ตาม การลดลงของกำลังอัดอาจเนื่องจากผิวของ RAP มีความลื่นสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับผิวของหินคลุก กำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคของ CR และ RAP จึงมีค่าต่ำ ส่งผลให้กำลังอัดของตัวอย่างที่ปริมาณปูนซีเมนต์ค่าหนึ่งมีค่าลดลงตามปริมาณ RAP ที่เพิ่มขึ้น (อัตราส่วน

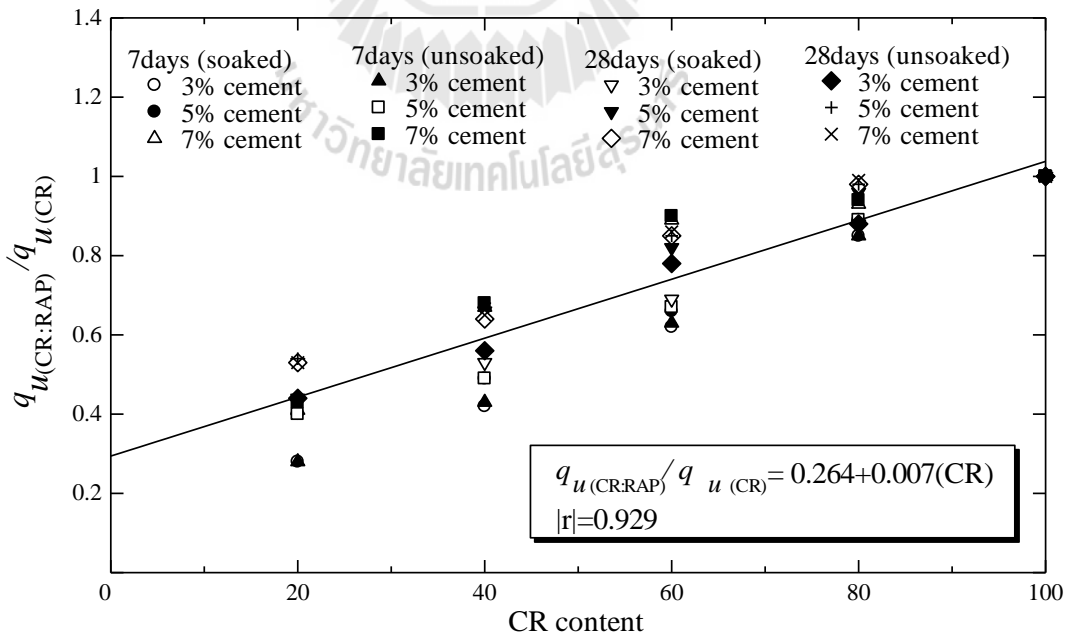
CR:RAP ที่ต่ำลง) ที่ปริมาณอัตราส่วน CR:RAP ค่าหนึ่ง กำลังอัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ เนื่องจากผลึกกัณฑ์ไฮเดรชันที่สูงกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วน CR:RAP มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันใกล้เคียงกัน สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งสามส่วนผสม ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า ปริมาณ RAP เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการลดลงของกำลังอัดสำหรับทุกอัตราส่วน CR:RAP เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.7 และ 4.8 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของตัวอย่างที่อัตราส่วน CR:RAP ต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม การพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับอายุบ่มทำให้แรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคของ CR และ RAP เพิ่มมากขึ้น เมื่อนำค่ากำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง CR และ RAP มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงที่กำหนดค่ากำลังอัดแกนเดียวของชั้นพื้นทางหินคลุกผสมปูนซีเมนต์ที่อายุบ่ม 7 วัน ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2413 กิโลปาสกาล วัสดุผสมที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 5 ขึ้นไป ทุกอัตราส่วน CR:RAP ผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนด แต่หากพิจารณาที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ (ร้อยละ 3) อัตราส่วน CR:RAP ที่มากกว่า 40:60 ผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนด



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวต่ออัตราส่วน CR:RAP ที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวต่ออัตราส่วน CR:RAP ที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $q_{u(CR:RAP)} / q_{u(CR)}$ ต่ออัตราส่วน CR:RAP ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน

เนื่องจากทั้งวัสดุ CR และ RAP ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่เป็นผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การลดลงของวัสดุปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์จึงแปรผันตามแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างมวลรวม (CR และ RAP) เป็นหลัก เพื่อเป็นการพิสูจน์สมมติฐานดังกล่าว ผู้วิจัยได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัด ($q_{u(CR:RAP)}/q_{u(CR)}$) และอัตราส่วนการแทนที่ CR ด้วย RAP ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อ $q_{u(CR:RAP)}$ คือกำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ $q_{u(CR)}$ คือกำลังอัด CR ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเส้นตรง สำหรับทุก ปริมาณปูนซีเมนต์ อายุบ่ม และสภาวะการทดสอบ (แช่น้ำ/ไม่แช่น้ำ) และแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$q_{u(CR:RAP)} = a + b(CR) \quad (4.1)$$

เมื่อ CR คืออัตราส่วนการแทนที่ของหินคลุกและสัมประสิทธิ์ประสิทธิผล (Coefficient of correlation) มีค่าสูงถึง 0.929 สมการที่ (4.1) มีประโยชน์อย่างมากในการประมาณกำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วน CR:RAP ต่างๆ เมื่อทราบเพียงกำลังอัดของวัสดุ CR ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ยกตัวอย่างเช่น กำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มีค่าประมาณร้อยละ 40 ของกำลังอัดของวัสดุ CR ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ เมื่อแทนที่ CR ด้วย RAP เท่ากับร้อยละ 20 สำหรับทุกอายุบ่ม ปริมาณปูนซีเมนต์ และสภาวะการแช่น้ำ

4.5 ความคงทนของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

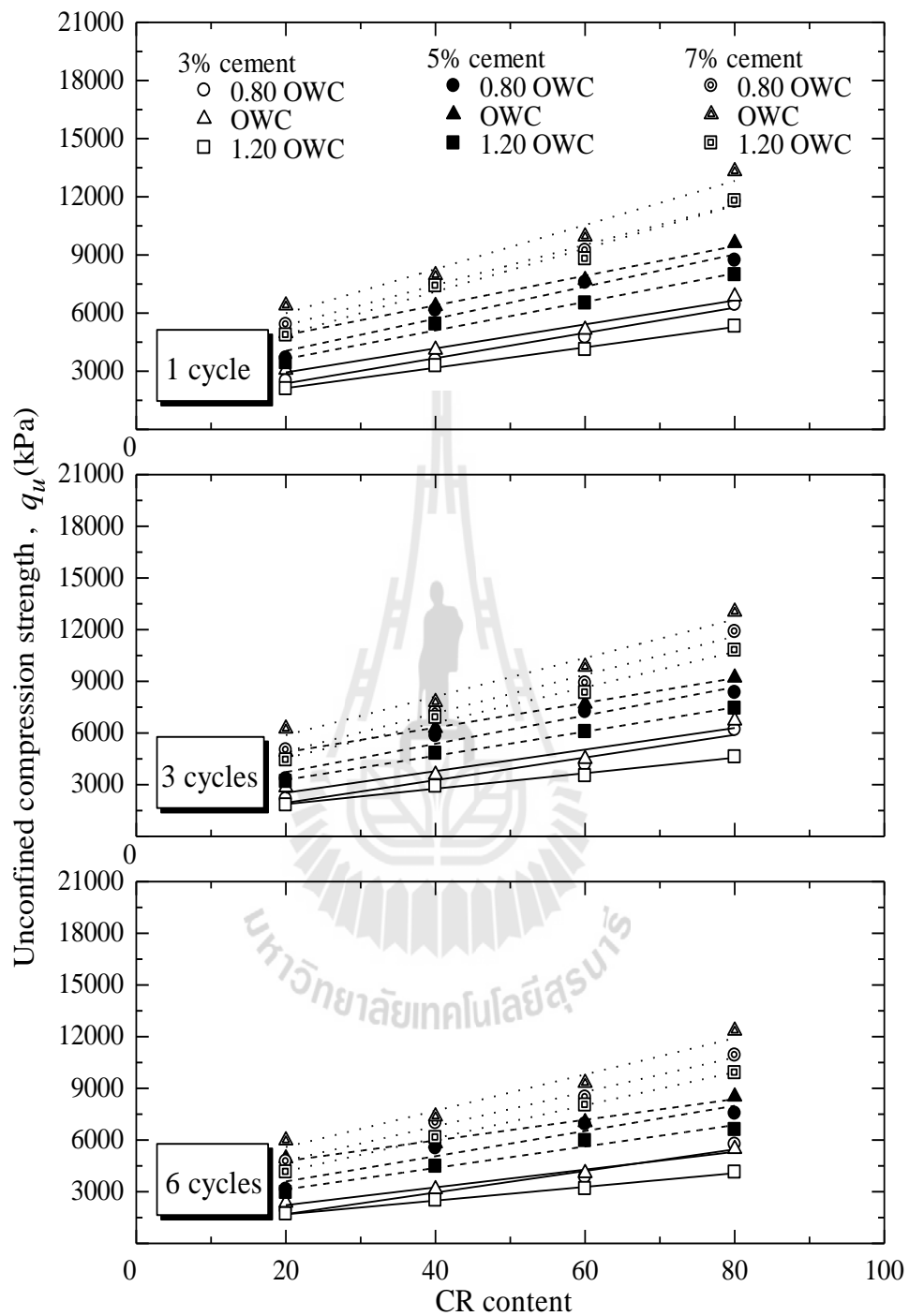
การทดสอบเปียกสลับแห้ง (Wet-Dry Test) หรือความคงทนต่อสภาพแวดล้อมเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเลือกและออกแบบวัสดุชั้นทางนอกเหนือจากกำลังอัดของดินซีเมนต์ การทดสอบความคงทนทำตามวิธีการทดลองของ ASTM D559 เมื่อสิ้นสุดการเตรียมตัวอย่างเปียกสลับแห้งในแต่ละรอบ ผู้วิจัยหาค่าสูญเสียน้ำหนักและกำลังอัดของตัวอย่าง ผลการทดสอบนำมาเปรียบเทียบกับ Portland Cement Association (PCA) ดังแสดงตารางที่ 4.7 เนื่องจากวัสดุทดสอบทั้งหมดจัดอยู่ในกลุ่ม A-1-a ค่าร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักที่ยอมให้จึงมีค่าเท่ากับร้อยละ 14

ตารางที่ 4.8 ข้อกำหนดด้านความคงทนของดินซีเมนต์ PCA (Portland Cement Association)

การจำแนกดินตามระบบ AASHTO	การจำแนกดินตามระบบ USCS	ร้อยละของการสูญเสีย ที่ยอมให้
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	14
A-1-b	GM, SW, SP	14
A-2	GW, GC, SM, SP	14
A-3	SP	14
A-4	CL, ML	10
A-5	ML, MH, CH	10
A-6	CL, CH	7
A-7	OH, MH, CH	7

4.5.1 อิทธิพลของจำนวนรอบเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของวัสดุผสม

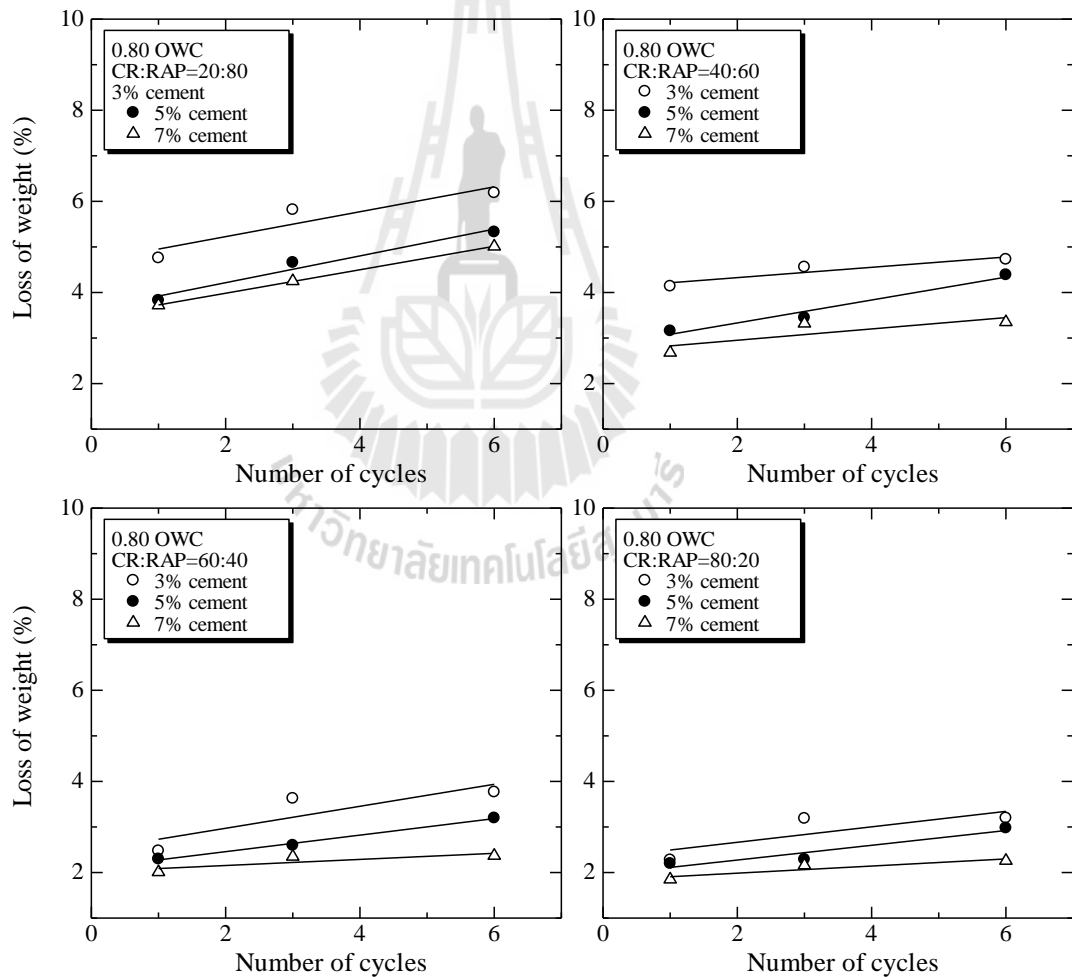
รูปที่ 4.10 แสดงอิทธิพลของจำนวนรอบเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วนการแทนที่ ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณความชื้นต่างๆ กำลังอัดของตัวอย่างที่ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณความชื้นต่างๆ มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง ตัวอย่างที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีกำลังอัดสูงสุดในทุกจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง ตัวอย่างที่เตรียมที่ปริมาณความชื้นทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม (0.8OWC) มีกำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่เตรียมที่ปริมาณความชื้นทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (1.2OWC) ภายใต้อุณหภูมิการบดอัดเดียวกัน ตัวอย่างที่เตรียมที่ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงจะมีกำลังอัดที่สูง



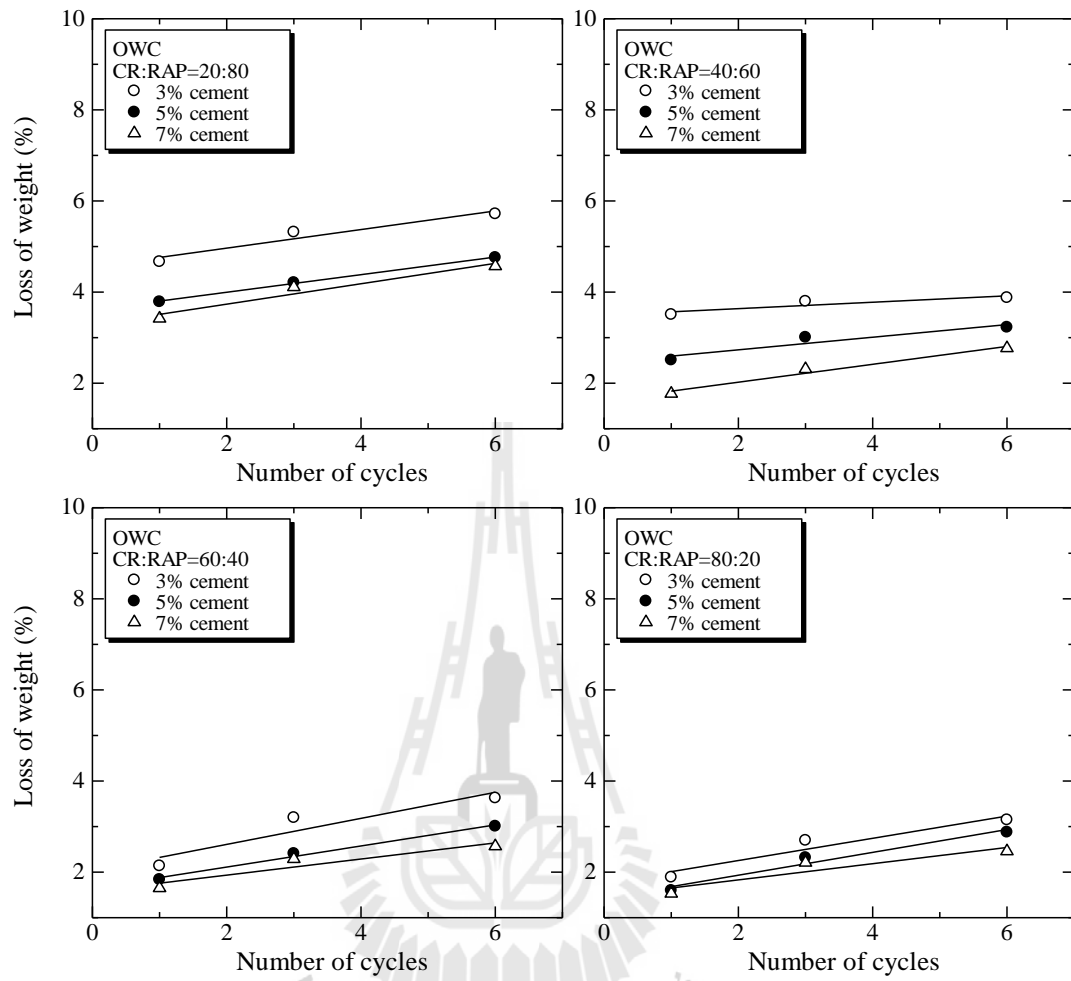
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์กำลังอัดกับอัตราส่วนการแทนที่ของตัวอย่าง
ที่ผ่านกระบวนการเปียกสลับแห้งรอบที่ 1, 3 และ 6

4.5.2 ความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียกับรอบการทดสอบ

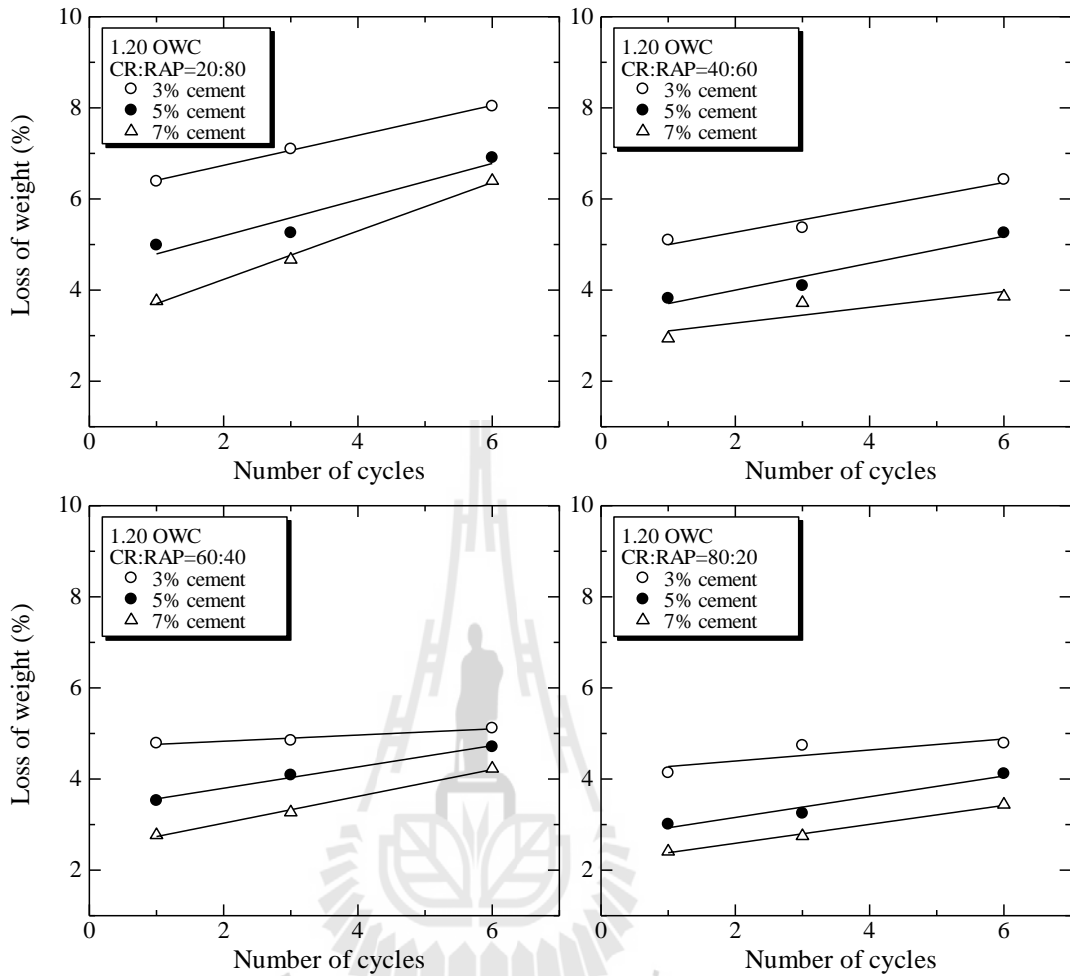
การลดลงของกำลังอัดเนื่องจากกระบวนการเปื่อยสลับแห้งเกิดจากความเสียหายของโครงสร้างพันธะเชื่อมประสาน (destructuring of cementation bond) ดังจะเห็นได้จากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง รูปที่ 4.11 ถึง 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักและจำนวนรอบเปื่อยสลับแห้ง ของตัวอย่างที่เตรียมที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3, 5 และ 7 และอัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ ที่ปริมาณความชื้น 0.80OWC, OWC และ 1.20OWC ตามลำดับ การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของกำลังอัด ตัวอย่างที่มีปริมาณปูนซีเมนต์สูงจะเกิดการสูญเสียน้ำหนักน้อย เนื่องจากพันธะเชื่อมประสานที่แข็งแรงช่วยยึดเกาะมวลรวม CR และ RAP



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียกับรอบการทดสอบ
ที่ปริมาณความชื้นที่ 0.80OWC



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียกับรอบการทดสอบ
ที่ปริมาณความชื้นที่ OWC

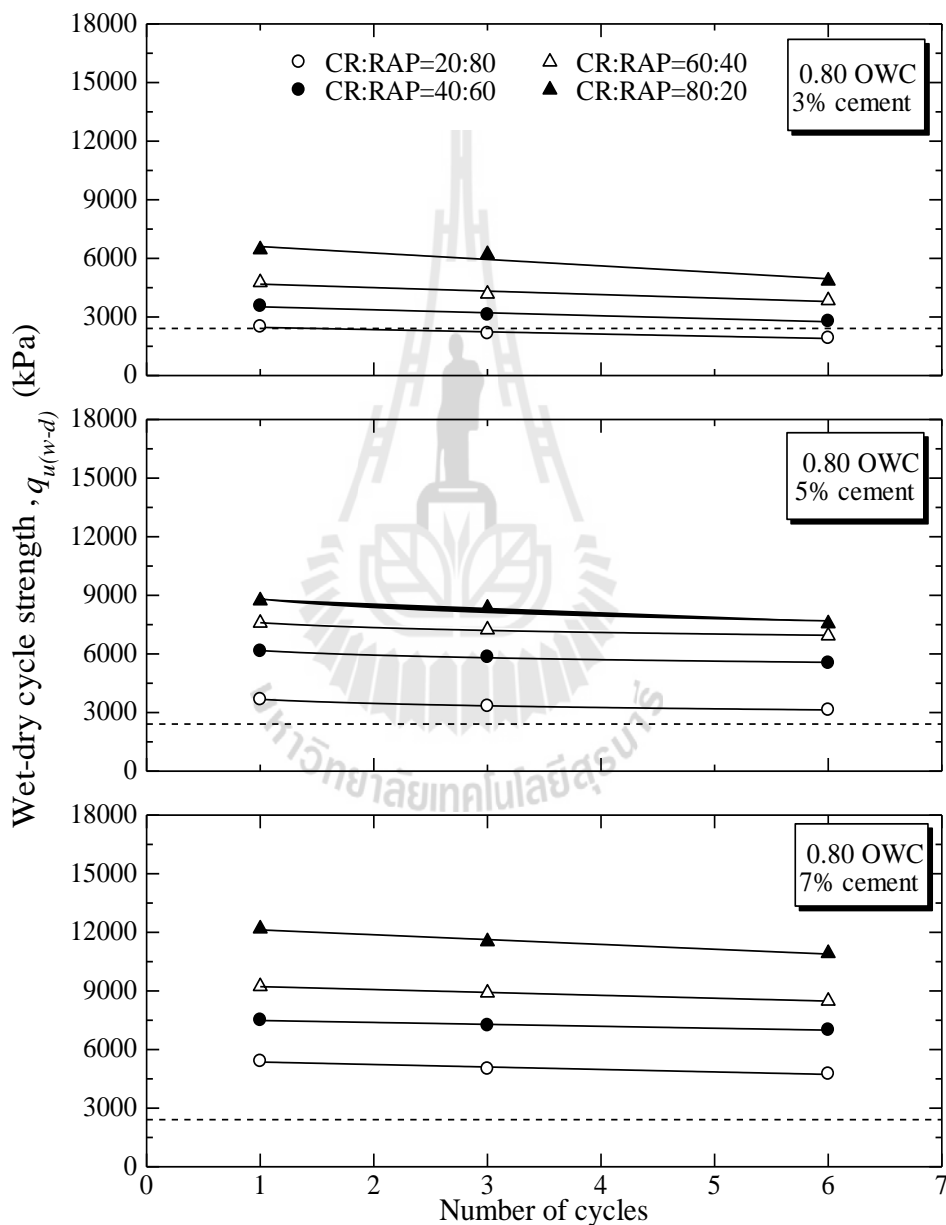


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียกับรอบการทดสอบ
ที่ปริมาณความชื้นที่ 1.20OWC

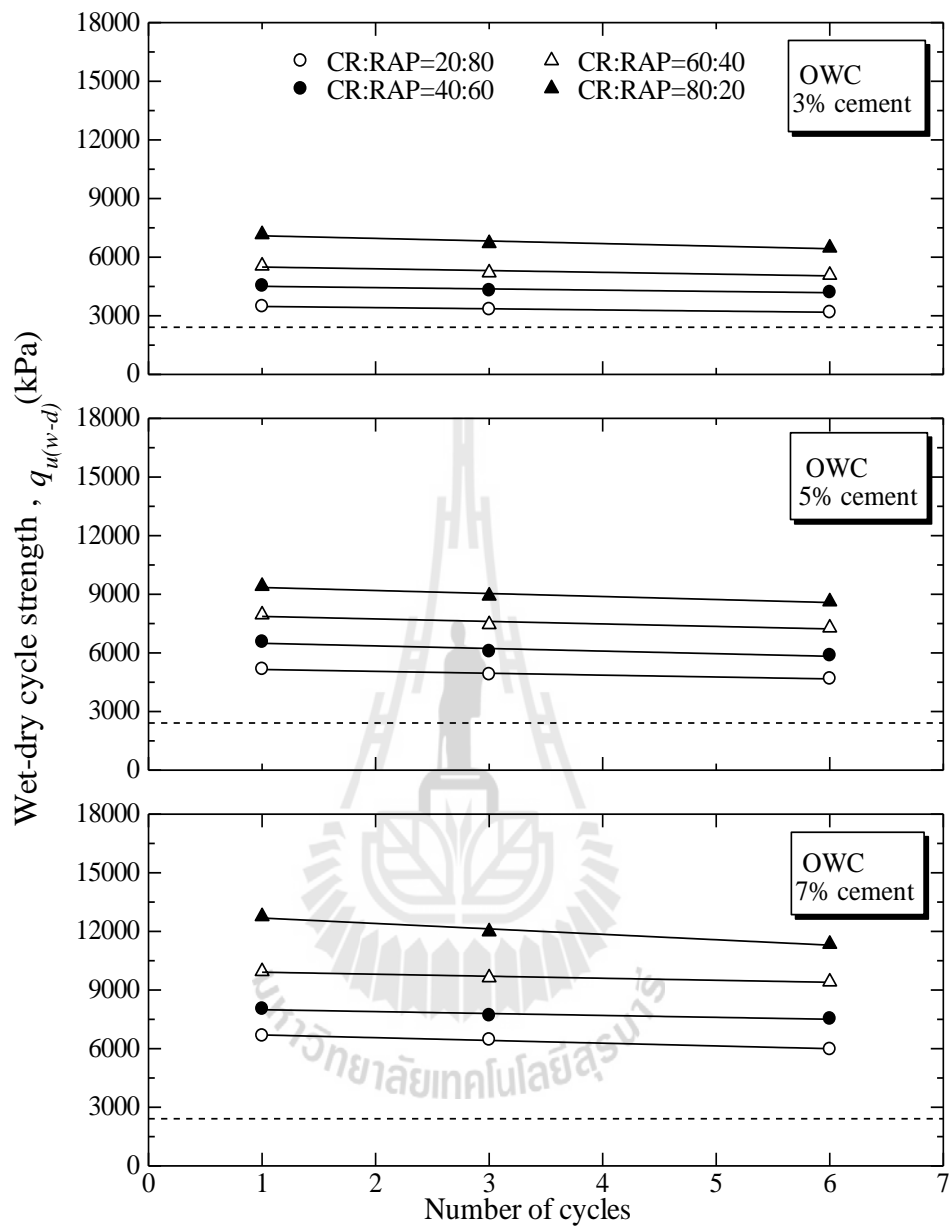
4.5.3 อิทธิพลของร้อยละการสูญเสียกับปริมาณปูนซีเมนต์

อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นแม้ว่าปริมาณปูนซีเมนต์จะสูงขึ้นก็ตาม เพราะรอบเปียกสลับแห้งจะมีผลให้ทั้งความชื้นและอุณหภูมิภายในตัวอย่างเปลี่ยนแปลง การดูดซึมน้ำของตัวอย่างในรอบของการทดสอบเปียก (Wet) จะทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค (repulsive force) และอาจส่งผลให้อนุภาคดินหลุดร่อนได้ ความร้อนจากรอบของการทดสอบแห้ง (Dry) ทำให้ตัวอย่างที่อืดด้วยน้ำเกิดการหดตัวแตกร้าว รูปที่ 4.14 ถึง 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับรอบการทดสอบ สำหรับอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่ปริมาณความชื้นทางด้านแห้ง ปริมาณความชื้นเหมาะสม และทางด้านเปียก ตามลำดับ

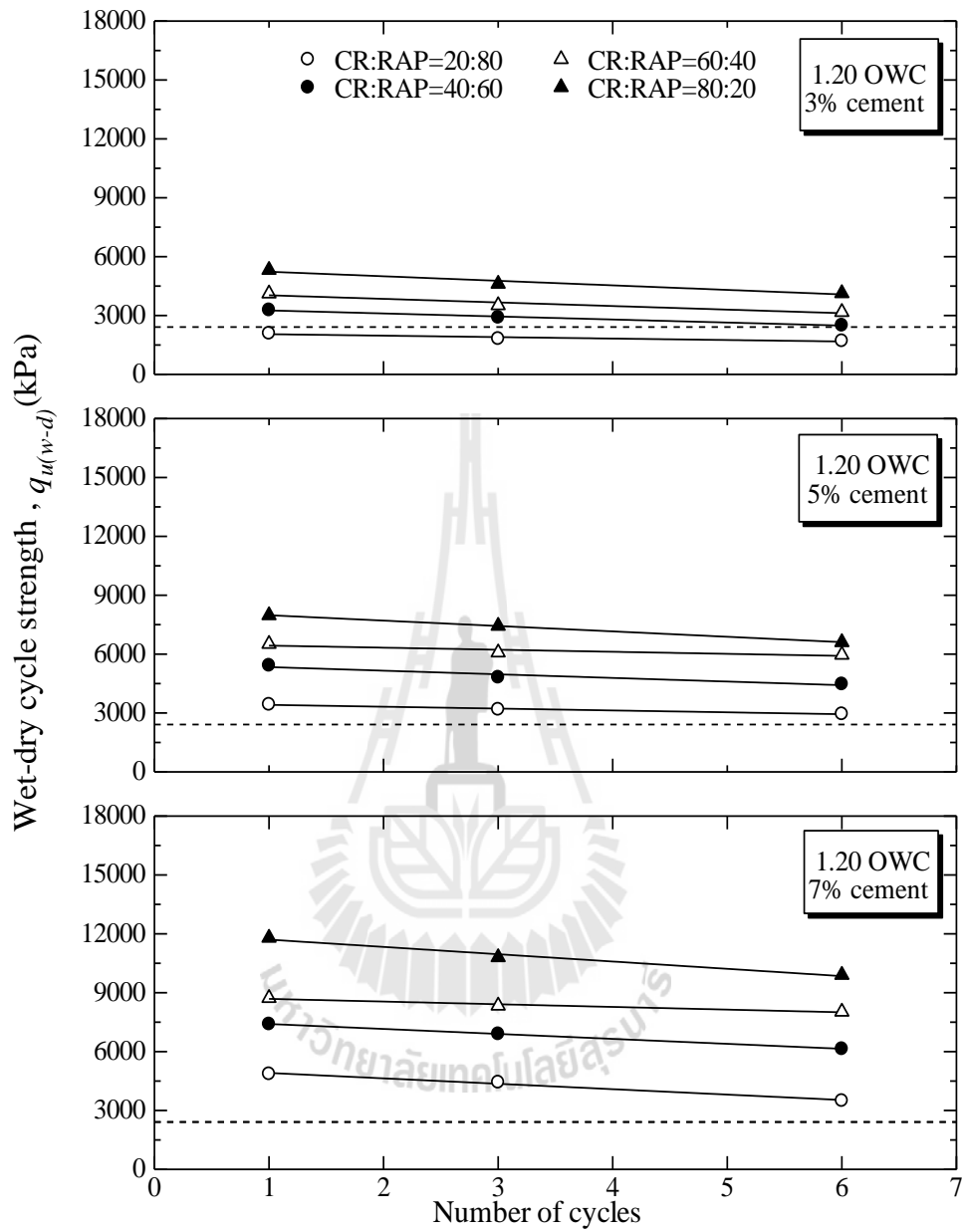
ผลทดสอบแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ที่ปริมาณปูนซีเมนต์และสภาวะการบดอัดหนึ่ง ความคงทนต่อการต้านทานเป็ยกลลับแห้งลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ RAP การเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์จะเพิ่มความทนทานต่อการเป็ยกลลับแห้ง เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้อุณหภูมิของก้อนตัวอย่างจับยึดกันและทนต่อการสึกหรอ ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ด้วยสมการเส้นตรงละมีลักษณะที่ลดลง



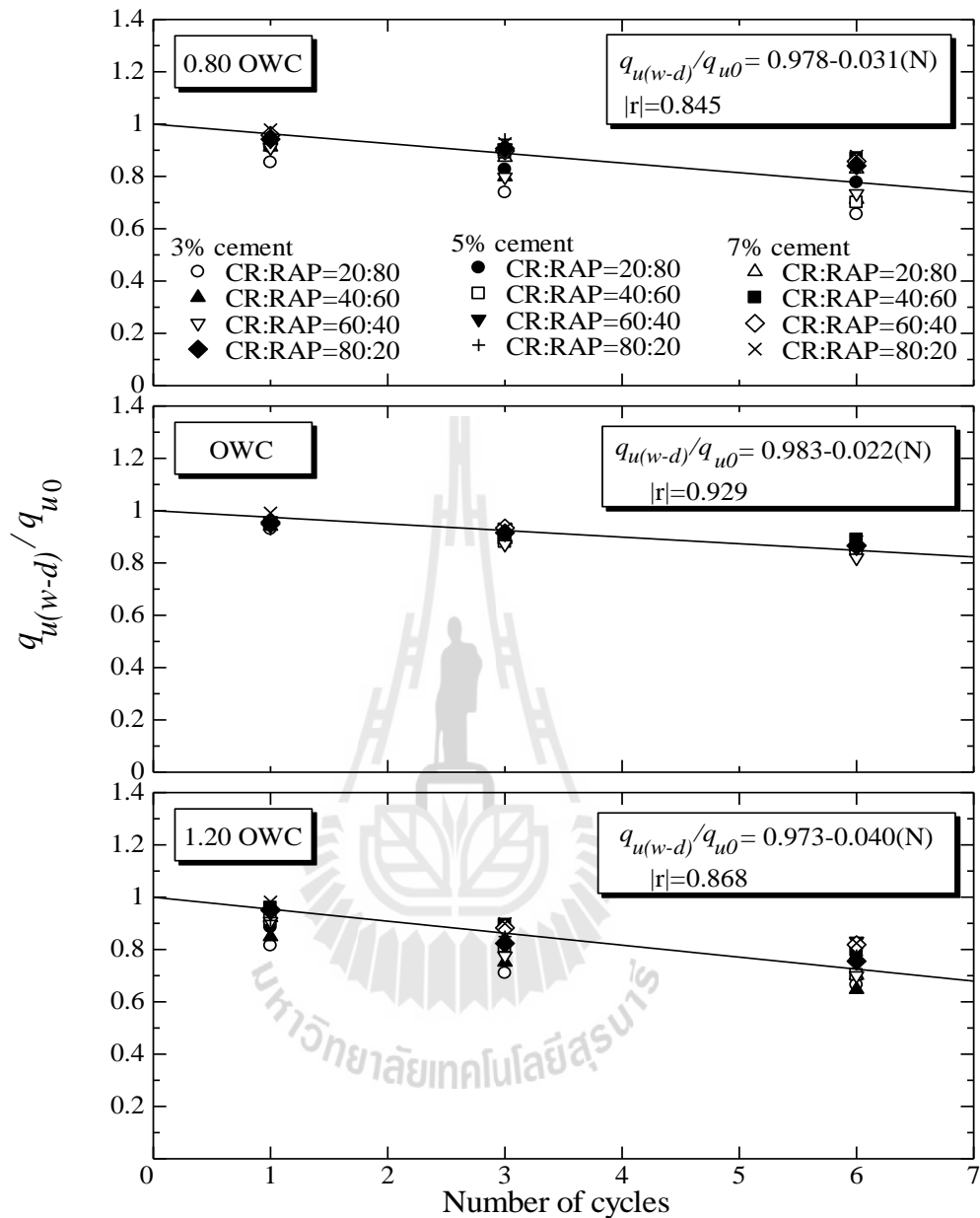
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับรอบการทดสอบของวัสดุผสมที่ 0.80 OWC ปูนซีเมนต์ร้อยละ 3, 5 และ 7



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับรอบการทดสอบของวัสดุผสม
ที่ OWC ปูนซีเมนต์ร้อยละ 3, 5 และ 7



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับรอบการทดสอบของวัสดุผสม
ที่ 1.20 OWC ปูนซีเมนต์ร้อยละ 3, 5 และ 7



รูปที่ 4.17 Normalized $q_{u(w-d)}/q_{u0}$ กับรอบการทดสอบที่สภาวะการบดอัดต่างๆ

ผลการวิเคราะห์ด้วย Linear regression พบว่าความคงทนต่อการเป็ยกสลับแห้งแปรผัน โดยตรงกับกำลังอัดในสภาวะเปียกเริ่มต้นและสภาวะการบดอัด ที่สภาวะการบดอัดค่าหนึ่ง อัตราส่วนกำลังอัด ($q_{u(w-d)}/q_{u0}$) สามารถรวมอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วนผสมเข้าด้วยกัน เมื่อ q_{u0} คือกำลังอัดในสภาวะเปียกเริ่มต้น รูปที่ 4.17 แสดงผล Normalized ตามสภาวะการ

บดอัด จะเห็นได้ว่าอัตราส่วน $q_{u(w-d)}/q_{u0}$ มีลักษณะที่คล้ายกันสำหรับทุกสถานะการบดอัด แต่ความชันของกราฟมีความแตกต่างกัน สถานะการบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมให้ความชันของกราฟที่ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่สถานะดังกล่าวมีความคงทนต่อการเปียกสลับแห้งที่สูงที่สุด ภายใต้ปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วนผสมที่เหมือนกัน ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและรอบการเปียกสลับแห้งสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q_{u(w-d)}: q_{u0} = 0.978 - 0.031(N) \quad \text{สำหรับปริมาณความชื้นที่ 0.80 OWC} \quad (4.2)$$

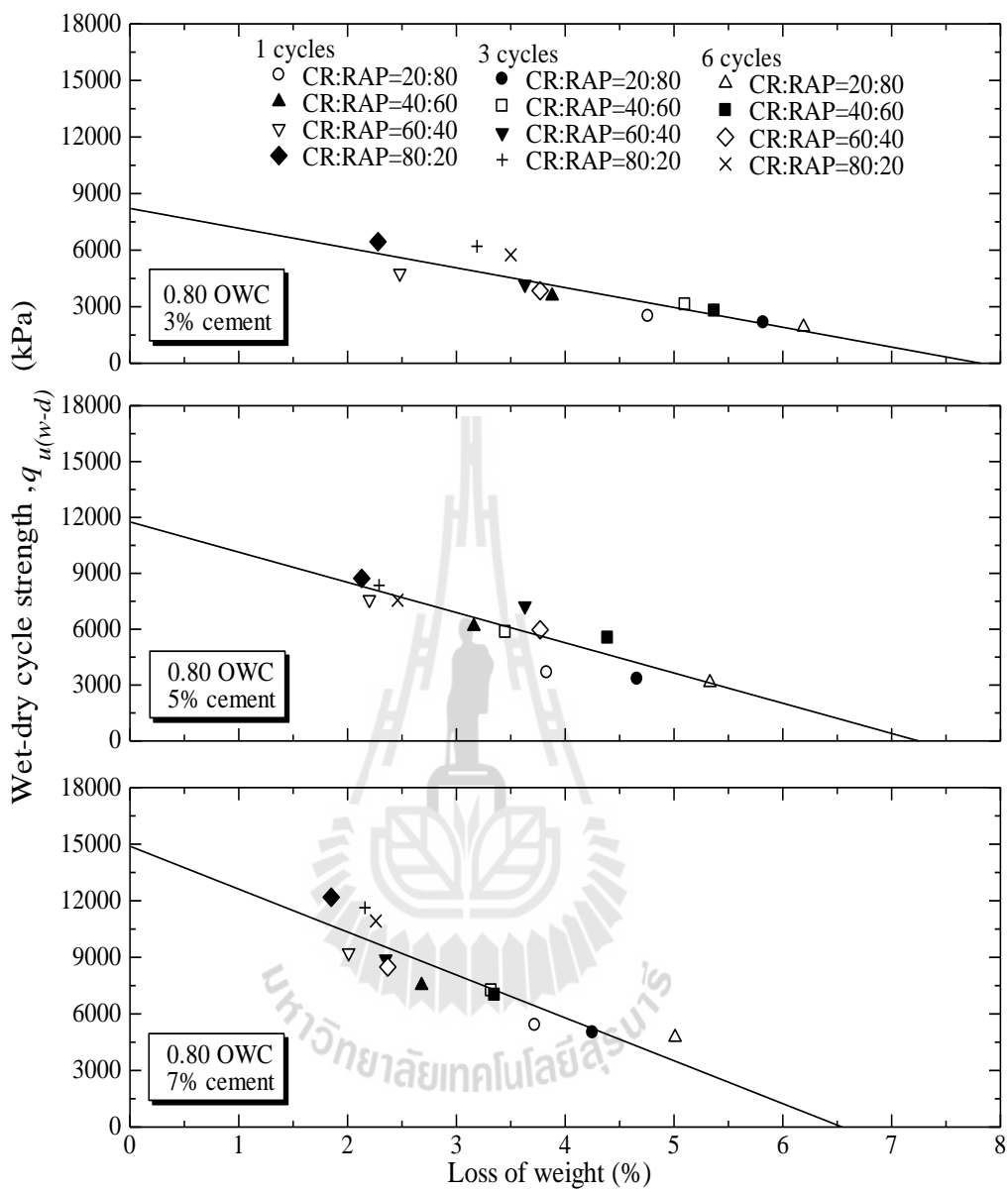
$$q_{u(w-d)}: q_{u0} = 0.983 - 0.022(N) \quad \text{สำหรับปริมาณความชื้นเหมาะสม} \quad (4.3)$$

$$q_{u(w-d)}: q_{u0} = 0.973 - 0.040(N) \quad \text{สำหรับปริมาณความชื้นที่ 1.20 OWC} \quad (4.4)$$

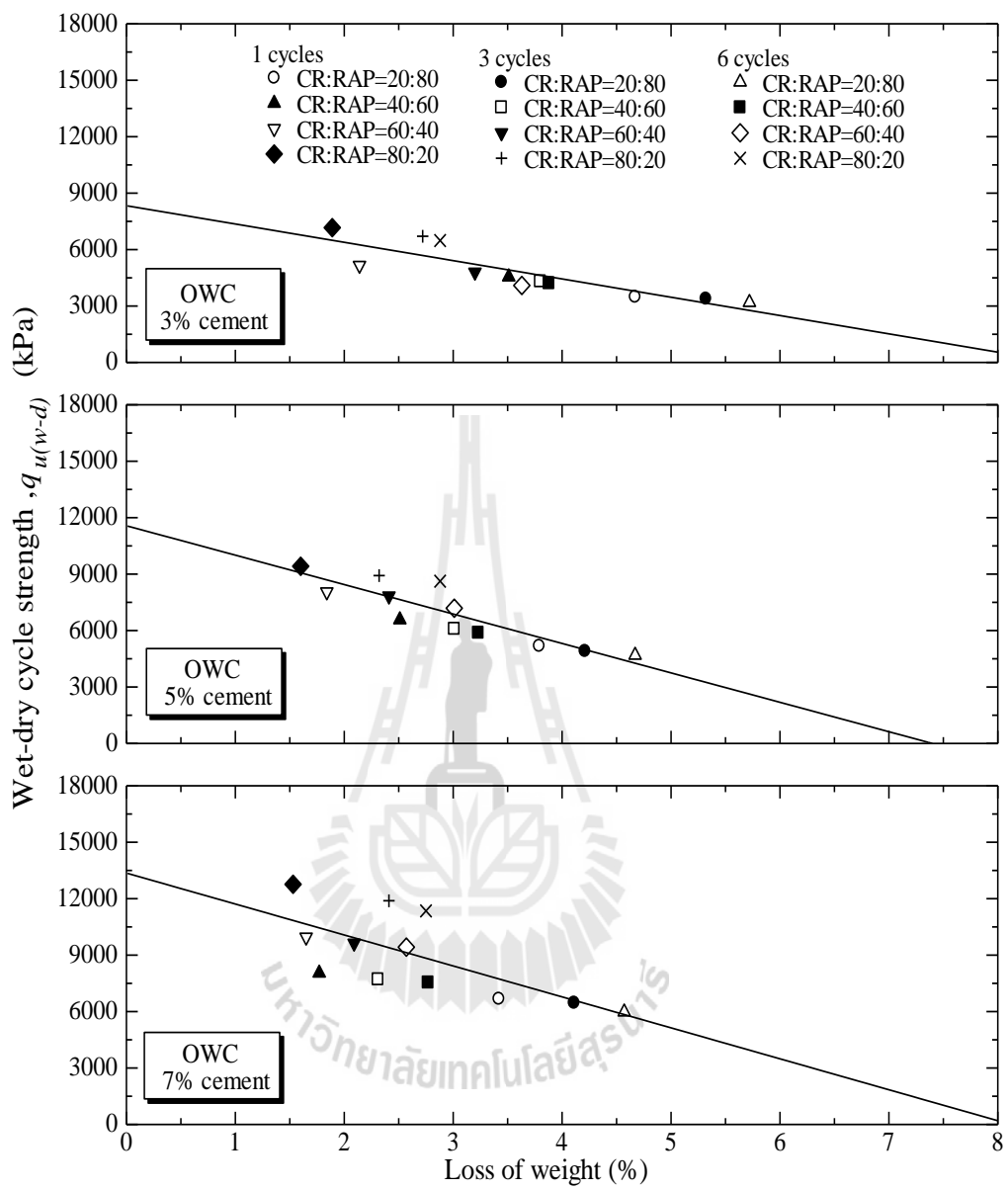
เมื่อ N คือ จำนวนรอบของการทดสอบความคงทนต่อการเปียกสลับแห้ง

4.5.4 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับร้อยละการสูญเสีย

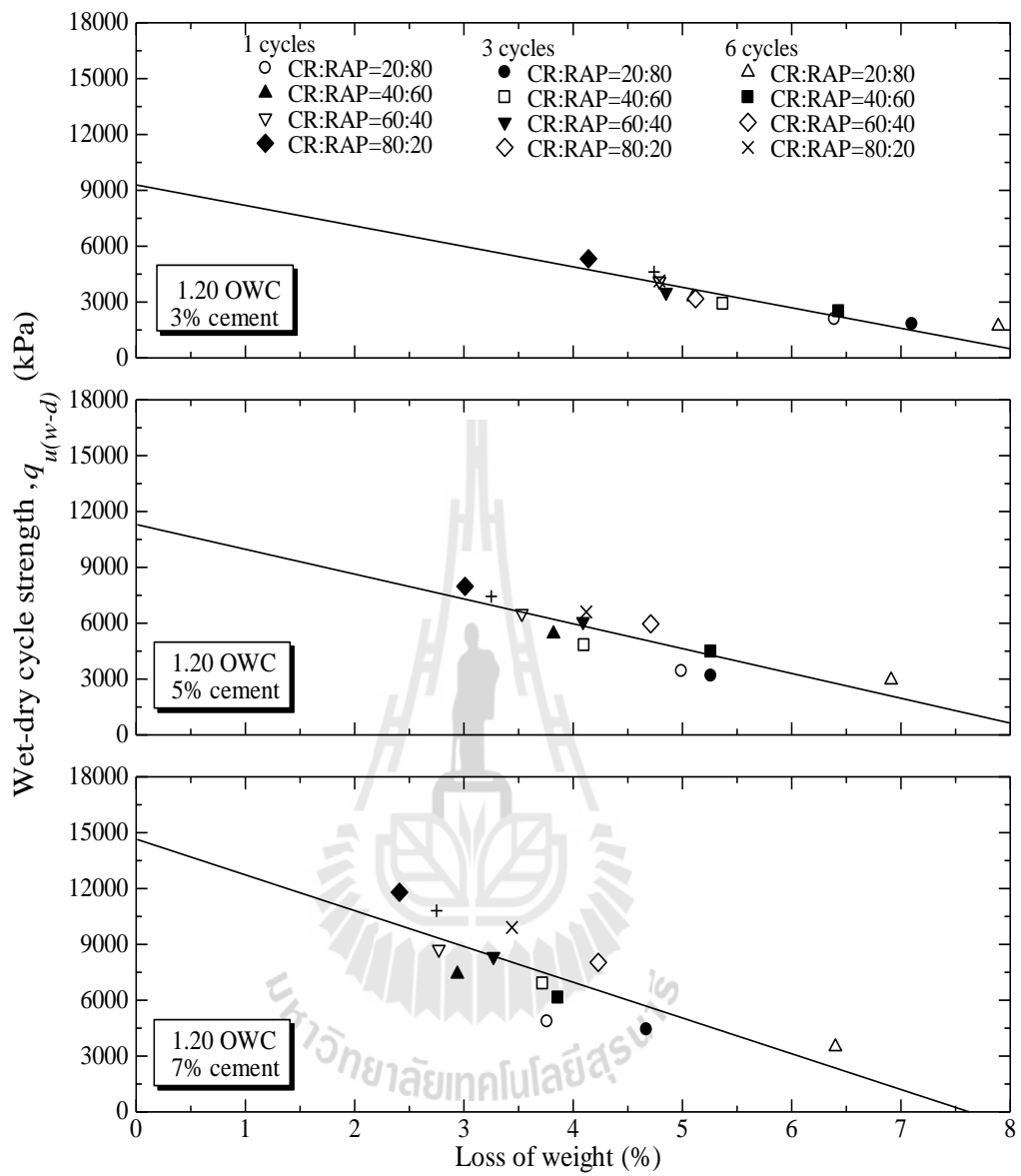
โดยทั่วไปแล้ว ความคงทนต่อการเปียกสลับแห้งควรจะแปรผันตามการสูญเสีย น้ำหนักของตัวอย่าง ความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำหนักแสดงถึงความแข็งแรงระหว่างอนุภาคของวัสดุผสม ซึ่งควบคุมโดยปริมาณปูนซีเมนต์ อัตราส่วนผสม CR:RAP และสถานะการบดอัด ตัวอย่างที่มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าเมื่อผ่านขบวนการเปียกสลับแห้งจึงควรมีกำลังอัดที่สูงกว่า รูปที่ 4.18 ถึง 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าที่สถานะการบดอัดและปริมาณปูนซีเมนต์ค่าหนึ่ง การสูญเสียน้ำหนักแปรผันโดยตรงกับกำลังอัด ในฟังก์ชันล็อกการิทึม สำหรับทุกอัตราส่วนผสม CR:RAP ในทำนองเดียวกับการลดลงของกำลังอัดตามจำนวนรอบการบดอัด ตัวอย่างที่การบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมเกิดสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่า สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วนผสม CR:RAP ที่เหมือนกัน



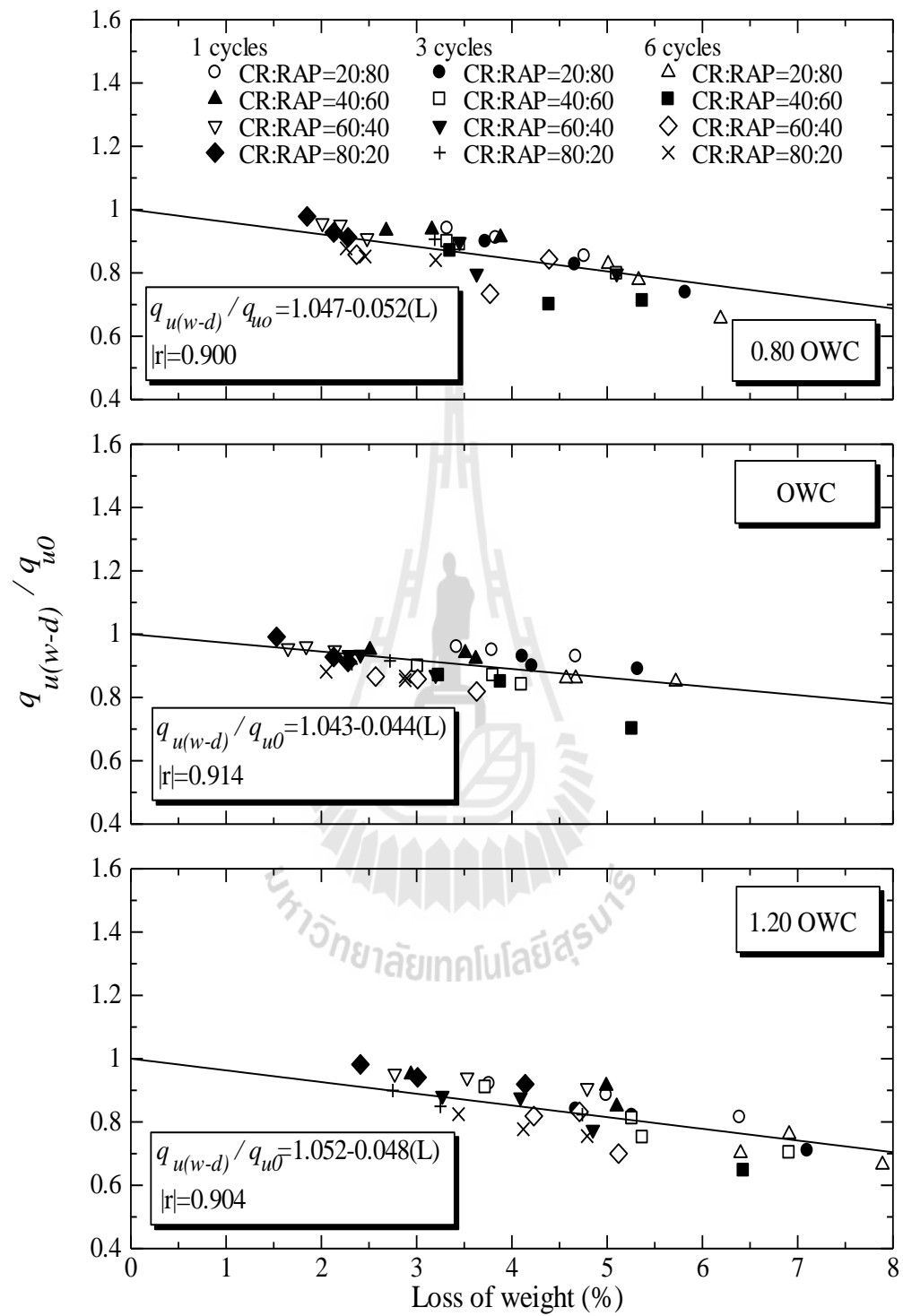
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุผสมที่ 0.80OWC



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุผสมที่ OWC



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับรอยละการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุผสมที่ 1.20OWC



รูปที่ 4.21 Normalized $q_{u(w-d)} / q_{u0}$ กับค่าร้อยละการสูญเสียที่สภาวะการบดอัดต่างๆ

ผู้วิจัยได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ($q_{u(w-d)}/q_{u0}$) และร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก Loss of weight (L) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เมื่อ $q_{u(w-d)}$ คือกำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้งต่างๆ และ q_{u0} คือกำลังอัดเริ่มต้นของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเส้นตรง สำหรับทุกปริมาณปูนซีเมนต์ และอัตราส่วน CR:RAP ผลการ Normalized สนับสนุนข้อสรุปที่ว่า การลดลงของกำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ที่รอบเปียกสลับแห้งเกิดจากการสูญเสียน้ำหนัก ซึ่งควบคุมโดยสภาวะการบดอัด ความสัมพันธ์ระหว่าง ($q_{u(w-d)}/q_{u0}$) และ L แปรผันตามสภาวะการบดอัด ดังแสดงในสมการข้างล่าง

$$q_{u(w-d)}: q_{u0} = 1.047 - 0.052(L) \quad \text{สำหรับปริมาณความชื้นที่ } 0.80\text{OWC} \quad (4.5)$$

$$q_{u(w-d)}: q_{u0} = 1.043 - 0.044(L) \quad \text{สำหรับปริมาณความชื้นเหมาะสม} \quad (4.6)$$

$$q_{u(w-d)}: q_{u0} = 1.052 - 0.048(L) \quad \text{สำหรับปริมาณความชื้นที่ } 1.20\text{OWC} \quad (4.7)$$

เมื่อ L คือ ค่าร้อยละของการสูญเสียและสัมประสิทธิ์ประสิทธิผล (Coefficient of correlation) มีค่ามากกว่า 0.900 ของทุกปริมาณสภาวะการบดอัด สมการที่ (4.5) ถึง (4.7) มีประโยชน์อย่างมากในการประมาณร้อยละการสูญเสียของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ เมื่อทราบเพียงกำลังอัดเริ่มต้นและกำลังอัดที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้งของวัสดุผสม ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

นำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกับความคงทนของวัสดุผสมตามข้อกำหนดด้านความคงทนของดินซีเมนต์บดอัดชนิดต่างๆ ของ PCA (Portland Cement Association) สำหรับดินซีเมนต์ พบว่าวัสดุผสมทั้งหมด ซึ่งจำแนกเป็นชนิด A-1-a ผ่านข้อกำหนด (ร้อยละการสูญเสียน้อยกว่า 14) และสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุทางเลือกในงานถนน

บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดและความคงทนของหินคลุก (CR) ผสมผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตเหลือทิ้ง (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการเลือกใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับชั้นทางและชั้นรองพื้นทาง ซึ่งเป็นประโยชน์ในทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 อิทธิพลของการบดอัด อัตราส่วน ปริมาณปูนซีเมนต์ ที่มีผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นเหมาะสม

หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของวัสดุผสม มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ RAP ภายใต้พลังงานการบดอัด (แบบสูงกว่ามาตรฐาน) ปริมาณความชื้นเหมาะสมของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ซึ่งเป็นพฤติกรรมเช่นเดียวกับดินบดอัด (ไม่ผสมซีเมนต์) หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของวัสดุผสมแปรผันตรงตามปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วน CR:RAP การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 3 เพิ่มหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัด โดยเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 4 ของหน่วยน้ำหนักของวัสดุผสม ที่ไม่ผสมปูนซีเมนต์

5.2 กำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

กำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ RAP หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า RAP มีผลลบต่อการพัฒนากำลังอัด กำลังอัดของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่ม เนื่องจากปัจจัยทั้งสองเป็นตัวควบคุมการเกิดผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ซึ่งทำให้แรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคของ CR และ RAP เพิ่มมากขึ้น สมการทำนายกำลังอัดของวัสดุผสมปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วน CR:RAP ต่างๆ สำหรับทุก ปริมาณปูนซีเมนต์ อายุบ่ม และสภาวะการทดสอบ (แช่น้ำ/ไม่แช่น้ำ) ในรูปแบบดังนี้

$$q_u(CR:RAP) = a + b(CR)$$

สมการมีประโยชน์อย่างมากในการประมาณกำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วน CR:RAP ต่างๆ เมื่อทราบเพียงกำลังอัดของวัสดุ CR ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

5.3 ความคงทนของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

นอกเหนือจากกำลังอัดของดินซีเมนต์ การทดสอบความคงทนต่อสภาพแวดล้อมเป็นสิ่งที่พิจารณาควบคู่กันในการการเลือกและออกแบบวัสดุชั้นทาง กำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ที่รอบเปียกสลับแห้งต่างๆ แปรผันตามอัตราส่วน CR:RAP ปริมาณปูนซีเมนต์ และสถานะการบดอัด การลดลงของกำลังอัดของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เกิดจากการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุผสม ส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคของ CR และ RAP ลดลง ดังแสดงให้เห็นจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ปริมาณปูนซีเมนต์ สถานะการบดอัด และปริมาณ CR ช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุผสม วัสดุผสมที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมให้ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักได้นำเสนอโดยอาศัยผลทดสอบความคงทน ดังในรูปแบบดังนี้

$$q_{u(w-d)}: q_{u0} = a-b(L)$$

สมการดังกล่าวมีประโยชน์อย่างมากในการประมาณร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วน CR:RAP ต่างๆ เมื่อทราบเพียงกำลังอัดของวัสดุ ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมที่อัตราส่วน CR:RAP = 40:60 และที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 ขึ้นไป ผ่านตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง (ชั้นพื้นทางหินคลุกผสมปูนซีเมนต์) ที่กำหนดให้กำลังอัดไม่น้อยกว่า 2413 กิโลปาสกาล ที่อายุบ่ม 7 วัน (ทล.ม.203/2556) และร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างผสมทุกอัตราส่วนของ CR:RAP และทุกปริมาณปูนซีเมนต์มีค่าผ่านข้อกำหนดของ Portland Cement Association (PCA) ที่กำหนดให้ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักไม่เกิน 14 วัสดุผสมที่ปริมาณความชื้นทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมสามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกในการก่อสร้างหรือปรับปรุงถนน ซึ่งเป็นประโยชน์ในแง่ของวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

รายการอ้างอิง

- กรมทางหลวง (2520). **วิธีการทดลองวัสดุก่อสร้าง เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กระทรวงคมนาคม.**
58 หน้า.
- กรมทางหลวง (2543). **มาตรฐานกรมทางหลวง. การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling).** กระทรวงคมนาคม.ทล.-ม.213/2543.
- ทรงพล บุญมาดี (2529). ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันพระจอมเกล้าธนบุรี.** 196 หน้า.
- ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแสน จรัสกร (2544) .กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน. **รายงานวิจัยฉบับที่ วพ.188 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวงกระทรวงคมนาคม.** หน้า 160-163.
- วันชัย ศิริเลิศวัฒนา (2546). ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของถนนที่ซ่อมแซมโดยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.** หน้า 59-60
- สุเชษฐ์ เอี่ยมเมขย(2531).ความคงทนของดินซีเมนต์. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.** หน้า 114-116
- A.A. Loundon & Partner Consulting Engineers. (1995). **Cold Deep In Place Recycling : Technical Recommendations and Application Specification.** South Africa. A.A. Loundon, 77 p.
- Atkinson, P.W. (1995). Advacrete/Cement Additive for Stabilization. **Pavement Rehabilitation Workshop.** 24 & 25 August 1995. Queensland. 1-38.
- Bell, F.G. (1976) .The influence of the mineral content of clay on their stabilization with cement. **Association of Engineering Geologists :** 267 – 278.
- Circeo, L.T., Davidson, D.T. and David, H.T. (1962). Strength Maturity Relation of Soil-Cement Mixtures. **Iowa State University for 41th Annual Meeting of the Highway Research Board.** 35-45.

- Chinkulkijniwat et al. (2010). Compaction Characteristics of Non-Gravel and Gravelly Soils Using a Small Compaction Apparatus. **Journal of ASTM International**, Vol. 7, No. 7 Paper IDJA1102945.15 p
- 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**. Vol. 3. No. 8. 57-64.
- Czernin, W. (1962). Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers. **New York Chemical Publishing**. 36-50
- Davidson, D.T., Katti, R.K. and Welch, D.E. (1958). Use of Fly Ash with Portland Cement for Stabilization of Soil. **Highway Research Board**. Bulletin 198. 1-11.
- 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.
- Davidson, D.T., Pitre, G.L., Matoes, M. and Kalankamary, P.G. (1962). Moisture-Density, Moisture-Strength and Compaction Characteristics of Cement Treated Soil Mixtures. **Highway Research Board**. Bulletin. 353. 42-63.
- Felt, E.J. (1955). Factor Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures. **Highway Research Board**. Bulletin 108. 138-163.
- Fuller, M.G. and Dabney, G.W. (1952). Stabilizing Weak and Defective Bases with Hydrated Lime. **Roads and Streets**. Vol. 95, 64-69.
- Gordon, R.G. (1984). Recent Experiences and Developments in Design and Construction of Cement Stabilized Pavement. **Australian Road Research Board Symposium**. 12 p.
- Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963). Reaction Accompanying the Stabilization of Clay with Cement. **Highway Research Record**. No.36. 146-171.
- Highway Research Board, (1949). Prevention of Moisture Loss in Soil-Cement with Bituminous Material. **Highway Research Board**. Research Report. 353. 34 p.
- Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization. (1959). Definition of Term Relating to Soil-Portland Cement Stabilization. **Highway Research Abstracts**, Vol. 29. No.6. 28-29.

- Hogentogler, C.A. (1938). Engineering Properties of the Soils. **New York**. McGraw-Hill. 9-18.
- 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**. Turkey. 3: 1759-1762.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S. (2003). Assessment of strength development in cement admixed clays. **Geotechnique**. Vol. 53. No. 4. 439-444.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. and Koga, H. (2002). Improvement of soft marine clays by deep mixing technique. **Proceedings of 12th International Conference Offshore and Polar Engineering**. Kitakyushu. Japan. 584-591.
- Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). Soil Stabilization. **Sydney**. Butterworths. 64-69.
- Lade, P.V. and Overton, D.D. (1989). Cementation Effects in Frictional Material. **Journal of Geotechnical Engineering**. Vol. 115, No.9, 1373-1387.
- Lambe, T.W. and Moh, Z.C. (1957). Improvements of Strength of Soil-Cement with Additive. **Highway Research Board**. Bulletin. 183. 38-47.
- Lambe, T.W., Michaels, A.S. and Moh, Z.C. (1959). Improvement of Soil Cement with Alkali Metal Compounds. **Highway Research Board**. Bulletin 241. 67-103.
- Leadabrand, J.A. (1956). Some Engineering Aspects of Soils-Cement Mixture. **Mid-South Section**. ASCE. April 27. 64-69.
- Lightsey, G.R., Arman, A. and Callihan, C.D. (1970). Change in Characteristics of Cement Stabilized Soils By Addition of Excess Compaction Moisture. **Highway Research Record**. No. 315. 36-45.
- Maclean, D.J., Robinson, P.J.M. and Webb, S.B. (1952). An Investigation of the Stabilization of Heavy Clay Soil with Cement for Road Base Construction. **Roads and Road Construction**. Vol. 3. No. 358. 287-292.
- Maner, A.W. (1952). Curing Soil Cement Base. **Proceedings of Highway Research Board**. Vol. 31. Washington. D.C., National Research Council, 540-558.
- Marshall, T.J. (1954). Some Properties of Soil Treated with Portland Cement. **Symposium on Soil Stabilization**. Australia. 28-34.
- Massachusetts Institute of Technology, (1954). Soil Stabilization for Highways. Massachusetts. Massachusetts Department of Public Works and Joint Highway Research Project. 81.

- Mills, W.H., Jr. (1935). Road Base Stabilization with Portland Cement. **Engineering News-Record**, Vol. 115, No. 22. 751-753.
- Mills, W.H., Jr. (1936). Stabilizing soils with Portland cement, Experiments by South Carolina Highway Department. **Highway Research Board Proceedings**. Vol. 16. 322-347.
- Miura., N., Horpibulsuk, S. and Nagaraj, T.S. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. **Soils and Foundations**. 41(5): 33-45.
- Moh, Z.C.(1965). Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals. **Highway Research Record**. No.86. 39-61.
- Moh, Z.C., Chin, Y.P., and Ng, S.C. (1967). cement stabilization of lateritic soil. **Proceeding 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. 42-46.
- Ng, S.C. (1966). Cement Stabilization of Lateritic Soils. **Master of Engineering Thesis**. Civil Engineering Program. No. 125. Seato Graduate School of Engineering. 55-65.
- Norling, L.T. and Packard, R.G. (1958). Expanded Short-Cut Test Method for Determining 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. **University of Texas at Austin Research Report**. Vol. 98. No.3. 93p.
- Pinto, C.D.S., Davidson, D.T. and Laguros, J.G. (1962). Effect of Lime on Cement Stabilization of Monmorillonitic Soils. **Highway Research Board** . Bulletin 353. 64-83.
- Portland Cement Association, (1959). Soil-Cement Laboratory Handbook. **Illinois, Skokie**. 60 p.
- 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**. Bangkok. Thailand. 17-26.
- Ruenkrairergsa, T. (1982). **Principle of Soil Stabilization**. Bangkok. Highways Department. 17-27.
- Shackel, B. and Lee, R.H.F. (1974). Some Aspect of Curing of Soil-Cement. **The 7th Conference of the Australian Road Research Board**. Vol. 7. Part. 7. 5-17.
- Tabensky, W. (1990). Road Recycling in US. **Shir of Buln Buln Memo**. No. 83. 66-73.

- 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. 120 p.
- 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**. Vol. 1. 191-194.
- The Siam Cement Company Ltd.(1965). **Demonstration Road Using Local Soil with Cement Stabilization**. Bangkok. Thailand. Siam Cement. 25-26.
- Walton, J.E. (1995). Cold In Place Recycling Result and Procedures Most Often Ask Question and Answers. **Pavement Rehabilitation Workshop**. 25 & 25 August 1995. Queensland. pp. 1-15.
- Wang, M.C. and Huston, M.T. (1972). Direct-Tensile Stress and Strain of Cement Stabilize Soil. **Highway Research Record**. No. 351. 19-24.
- Winterkorn, H.F. and Chandrasekharn, E.C. (1951), "Lateritic Soil and Their Stabilization", **Highway Research Board**. Bulletin. 44, 10-29.
- Wilmot, T.D. (1995). Selection of Additive for Stabilization and Recycling of Road Pavement. **Pavement Rehabilitation Workshop**. 24&25 August 1995. Queensland. 1-14.
- Wirtgen. (1992). Cold Recycling. **An Economic and Ecologically Construction Process**. West Germany.Wirtgen.58p



ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

อาทิตย์ อินทรา สุขสันต์ หอพิบูลสุข รัฐพล สมณา และเชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์. (2557) อิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตเดิมต่อกำลังอัดของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์. วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2557, 8 หน้า



อิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตเดิมต่อกำลังอัดของ วัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

อาทิตย์อินทรา¹ สุขสันต์ หอพิบูลสุข² รัชพล สมาน³ และเชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงค์⁴

บทคัดย่อ

วิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement recycling) เป็นวิธีการซ่อมแซมถนนที่ขรุขระที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยในปัจจุบันขั้นตอนการก่อสร้างเริ่มต้นด้วยการขุดใส่ (Mill) ผิวทางเดิมบางส่วนทิ้งซึ่งผิวทางเดิมนี้จัดเป็นวัสดุคัดทิ้งที่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และมีปริมาณมาก บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีต ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม ต่อกำลังอัดของวัสดุชั้นพื้นทางจากการศึกษาพบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของวัสดุผสมระหว่างหินคลุก (CR) และแอสฟัลต์ติกคอนกรีต (AC) มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ติกคอนกรีต ด้วยพลังงานการบดอัดที่ให้กับวัสดุผสม (พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน) ที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากภายในแอสฟัลต์ติกคอนกรีตมีคุณสมบัติการดูดซับพลังงานการบดอัดสูงกว่าหินคลุก กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าลดลงอย่างมาก ตามการเพิ่มขึ้นของ AC (การลดลงของอัตราส่วน CR:AC) การลดลงของกำลังอัดตามการเพิ่มขึ้นของ AC แสดงได้ด้วยการเชิงเส้นตรงการลดลงของกำลังอัดอาจเนื่องจากผิวของแอสฟัลต์ติกคอนกรีตมีความลื่นสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับผิวของหินคลุก กำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคของหินคลุกและ AC จึงมีค่าวัสดุผสมที่นำมาวิจัยสามารถที่จะนำมาเป็นวัสดุทางเลือกในการก่อสร้างหรือปรับปรุงถนนเพื่อเป็นประโยชน์ในแง่ของวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

คำสำคัญ : แอสฟัลต์ติกคอนกรีต, กำลังอัด, การขุดใส่

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁴ นักวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้พิมพ์ประจำสานงาน โทรศัพท์ 0-4422-4322, E-mail: suksun@g.sut.ac.th

**INFLUENCE OF WASTE ASPHALTIC CONCRETE PAVEMENT ON COMPRESSIVE
STRENGTH OF CEMENT-STABILIZED MATERIAL**

Artit Intra¹ Suksun Horpibulsuk^{2*} Rattapon Somna³ Cherdasak Suksiripattanapong⁴

Abstract

The pavement recycling which has been widely used in Thailand is generally used to restore damaged pavement. The process of construction begins the milling surface which is the damaged pavement. This original pavement cannot be utilized and there is large quantity. This article aims to illustrate the influence of asphaltic concrete volume, moisture content, cement content and curing time on compressive strength of base material. From study found that the maximum dry unit weight of the mixed material between crushed rock (CR) and asphalt concrete (AC) decreases with the increase in AC replacement which compaction energy (modified Proctor test) is the same. It is because the rubber in asphalt concrete has property to absorb compaction energy higher than CR. The compressive strength at 7 and 28 days of curing decreases significantly with the increase in AC replacement. The decrease in strength may be due to the surface of AC is more slippery than the surface of CR. Therefore, Shear strength at the point of contact between the particles of CR and AC is low. The compressive strength versus AC replacement relationship is approximately linear. This mixed material is beneficial from both engineering and economic viewpoints.

Keywords Asphalt concrete, Compressive strength, Mill

¹ M.Eng. Scholar, Civil Engineering, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

^{2*} Professor, Civil Engineering, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

³ Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

⁴ Post-graduate Researcher, Civil Engineering, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author Tel.0-4422-4322, E-mail:suksun@g.sut.ac.th

1. บทนำ

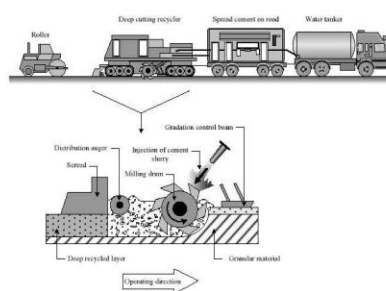
ความเสียหายของถนนมักเกิดเนื่องจากการรับน้ำหนักของขบวนการเชื่อมสภาพของวัสดุเองและการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ เช่นการหลวกร่อนการเกิดร่องล้อและรอยแตกแบบต่างๆดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความเสียหายของถนนที่需要进行ซ่อมแซม

เทคนิคการซ่อมบำรุงถนนที่ชำรุดของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยซึ่งเป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบในการก่อสร้างและบูรณะทาง คือการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) เทคนิคนี้เป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุอย่างคุ้มค่าและประหยัดงบประมาณในการซ่อมแซมถนนการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ทำได้สองวิธีได้แก่การนำวัสดุผิวทางเดิมไปผสมใหม่ที่โรงงานผลิต (In-Plant Recycling) และการหมุนเวียนวัสดุในที่ (In-Place Recycling) ซึ่งมีข้อได้เปรียบคือสามารถรีไซเคิลวัสดุชั้นทาง และทำการปรับปรุง/ผสมใหม่ในพื้นที่ก่อสร้างได้ทันทีที่ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุ นอกจากการใช้วัสดุโครงสร้างถนนเดิมแล้ว การซ่อมถนนด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ยังอาจผสมเพิ่มวัสดุเม็ดหยาบ หินคลุกและทรายแล้วเดิมวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) เช่นปูนซีเมนต์ปูนขาวและแอสฟัลต์ เป็นต้นเครื่องจักรที่ใช้ในการหมุนเวียนวัสดุแบบในนี้แสดงในรูปที่ 2 ผิวทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุง (เดิม Aggregate และปูนซีเมนต์) จะถูกเกลี่ยและบดอัดทันทีเพื่อให้ได้ความแน่นตามมาตรฐานกรมทางหลวง

ข้อดีของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่นอกจากประหยัดค่าใช้จ่ายแล้วยังสามารถลดการจราจรที่ติดขัดขณะซ่อมบำรุง(ถนนเปิดใช้ได้เร็วขึ้น)การซ่อมแซมด้วยวิธีนี้จะเริ่มต้นด้วยการออกแบบส่วนประกอบของคินซีเมนต์ (ขนาดผลของวัสดุ ปริมาณซีเมนต์ และระยะเวลาบ่ม) และทดสอบกำลังอัดในห้องปฏิบัติการรวมทั้งสุ่มตัดก่อนตัวอย่าง(Core sampling)ของถนนที่บดอัดแล้วไปหาค่ากำลังอัดรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถอ้างอิงได้จากมาตรฐานกรมทางหลวงที่ทล.-ม.213/2543



รูปที่ 2 ลักษณะทั่วไปของเครื่องจักรในงาน Pavement Recycling

ในทางปฏิบัติ การซ่อมแซมถนนด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่(Pavement recycling) ต้องมีการชดเชย (Mill) ผิวทางเดิมบางส่วนทิ้งเพื่อปรับระดับ ผิวทางใหม่ (หลังการซ่อมบำรุง) จึงเป็นวัสดุผสมระหว่างหินคลุก ผิวทางเดิม และปูนซีเมนต์ ในขณะที่ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนากำลังอัดของถนนที่ได้รับการซ่อมแซมด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่เป็นการศึกษาดูอย่างหินคลุกผสมปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2006)งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์คอลลอนกรีตเดิมต่อคุณสมบัติการบดอัด การพัฒนากำลังอัดของหินคลุกผสมปูนซีเมนต์บด ซึ่ง เป็นสภาพที่คล้ายกับถนนคินซีเมนต์ที่ซ่อมแซมโดย

วิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ นอกจากอิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ดีกคอนกรีตเดิมแล้ว ปริมาณความชื้นปริมาณปูนซีเมนต์และระยะบ่ม ก็เป็นตัวแปรหลักที่พิจารณาในบทความนี้ด้วย

2. ตัวอย่างและวิธีการดำเนินงาน

ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างหินคลุกมาผสมเข้ากับผิวทางเดิมในอัตราส่วนการแทนที่หินคลุก(CR) ด้วยผิวทางเดิม(AC) เท่ากับร้อยละ 20, 40, 60 และ 80 AC ได้จากโครงการซ่อมแซมถนนด้วยการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) ของถนนสาย 2285 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 207 (ประทาย) - บรรจบทางหลวงหมายเลข 2226 (ชุมพวง) AC มีสีเทา ค่า และมี ปริมาณ ดิน เม็ด หยาบ มากกว่า ร้อยละ 90 และไม่มีสภาพความเป็นพลาสติก ผิวทางแอสฟัลต์ดีกคอนกรีตเป็นชนิด AC60-70 ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังตารางที่ 1 หินคลุกมาจากหมวดการทางชุมพวง มีสีเทาน้ำตาลปริมาณดินเม็ดหยาบเกินกว่าร้อยละ 90 และไม่มีสภาพความเป็นพลาสติกคุณสมบัติของหินคลุกแสดงดังตารางที่ 2 วัสดุทั้งสองเมื่อจำแนกดินตามระบบเอกภาพ (USCS) จัดเป็นรวดที่มีขนาดละเอียด (GW) ดังแสดงดังรูปที่ 3

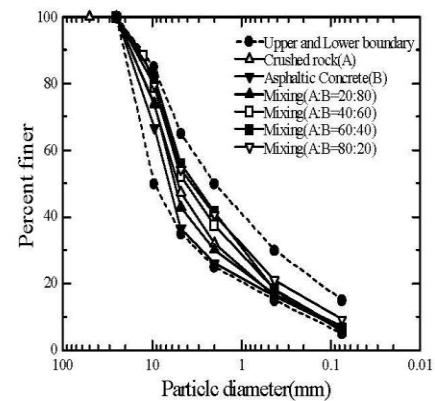
ตารางที่ 1 คุณสมบัติเบื้องต้นของผิวทางแอสฟัลต์ดีกคอนกรีต

Bulk Sp.Gr.of Mixed Aggregate	2.665
Sp.Gr.of Asphalt Cement	1.02
Asphalt Absorption By wt. of Aggregate	0.44 %
AC content by weight of Aggregate	5.5% (±0.3%)

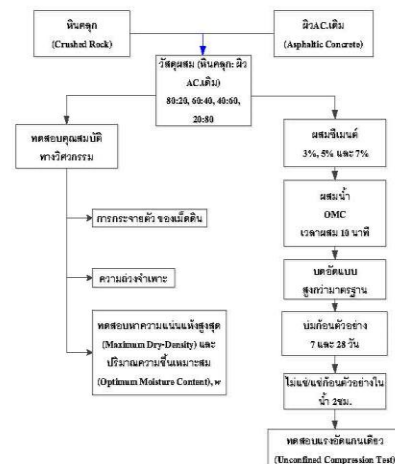
ตารางที่ 2 คุณสมบัติเบื้องต้นของหินคลุก

Gradedation	B
CBR	90.4%
Abrasion Test	20.8%
AC content by weight of Aggregate	5.5% (±0.3%)

วัสดุผสมระหว่าง CR และ AC ถูกนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ และบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างบดอัดจะนำมาทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มต่างๆ ภายใต้สภาวะแช่น้ำและไม่แช่น้ำ แผนการทำงานแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 การกระจายตัวของดินผสม (หินคลุก:ผิว AC เดิม)



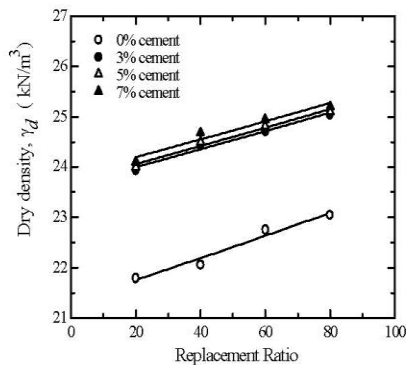
รูปที่ 4 แผนการวิจัยในห้องปฏิบัติการงาน

4.ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

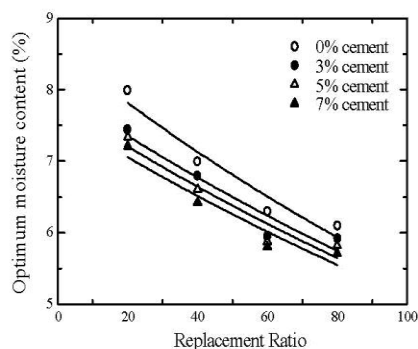
ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสม CR และ AC บดอัดจะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของวัสดุผสมระหว่าง CR และ AC มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ติกคอนกรีต (R) ด้วยพลังงานการบดอัดที่ให้กับวัสดุผสม (พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน) ที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากยางในแอสฟัลต์ติกคอนกรีตมีคุณสมบัติการดูดซับพลังงานการบดอัดสูงกว่าหินคลุก วัสดุผสมที่ปริมาณยาง (แอสฟัลต์ติกคอนกรีต) จึงดูดซับพลังงานมากกว่า และส่งผลให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดลดลง ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) ของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ติกคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและอัตราส่วนการแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ติกคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งสามารถประมาณได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ผลการศึกษานี้มีสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al., 2006

ตารางที่ 3 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของวัสดุผสม (หินคลุก: วัสดุ AC)

Materials	Classification		OMC %	γ_{max} kN/m ³
	AASHTO	USCS		
CR: Crushed rock	A-1-a	GW	5.4	23.90
AC: Asphaltic Concrete	A-1-a	GW	9.8	20.20
CR:AC-20:80	A-1-a	SW	8.0	21.80
CR:AC-40:60	A-1-a	SW	7.0	22.07
CR:AC-60:40	A-1-a	SW	6.3	22.76
CR:AC-80:20	A-1-a	SW	6.1	23.05



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับอัตราส่วนต่างๆ



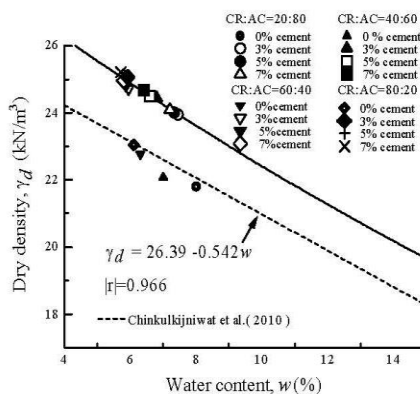
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสมกับอัตราส่วนต่างๆ

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุผสมแปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วน CR:AC การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 3 เพิ่มหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัดอย่างมาก โดยการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 4 ต่ออย่างไรก็ตาม อิทธิพลของปูนซีเมนต์ต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักแห้งมีไม่มากนัก เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์มีค่าเกินกว่าร้อยละ 3 ความชื้นของ

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและอัตราส่วนการแทนที่ (R) มีค่าประมาณคงที่ สำหรับวัสดุผสมระหว่าง CR และ AC ทั้งที่ผสมและไม่ผสมปูนซีเมนต์ ซึ่งแสดงว่าอิทธิพลของปูนซีเมนต์ต่อการเพิ่มหน่วยน้ำหนักแห้งมีความใกล้เคียงกัน ไม่แปรผันตามอัตราส่วนการแทนที่

การเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งอาจเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคดินจนมีขนาดใหญ่ขึ้น (Flocculation) เนื่องจากการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation exchange) และอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความว่างจำเพาะของวัสดุผสม เนื่องจากปูนซีเมนต์มีความว่างจำเพาะที่สูงกว่า CR และ AC การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเหมาะสมตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน CR:AC และปริมาณปูนซีเมนต์แสดงในรูปที่ 7 ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน CR:AC และปริมาณปูนซีเมนต์ การลดลงของปริมาณความชื้นเหมาะสมสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ซึ่งเป็นพฤติกรรมทั่วไปของวัสดุบดอัด จากความสอดคล้องดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นเหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 8 ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ด้วยการใช้สมการโพลีโนเมียล สำหรับทุกอัตราส่วน CR:AC และปริมาณปูนซีเมนต์ ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Chinkulkijniwat et al., 2010 สำหรับดินบดอัด (ไม่ผสมปูนซีเมนต์) หลายชนิด เนื่องจากอิทธิพลของปูนซีเมนต์ ความสัมพันธ์ของดินซีเมนต์บดอัดจึงอยู่เหนือความสัมพันธ์ของดินบดอัด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ดินซีเมนต์บดอัดมีหน่วยน้ำหนักแห้งสูงกว่าดินบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากัน และเมื่อนำปริมาณความชื้นของวัสดุผสมที่ไม่ผสมปูนซีเมนต์แทนเข้าไปในสมการ Chinkulkijniwat et al., 2010 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์และอายุบ่ม เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิด Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate

(CAH) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานยึดเกาะเม็ดดินปริมาณของ CSH และ CAH เพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่ม

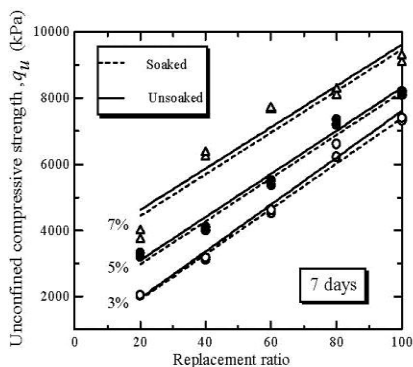


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นเหมาะสม

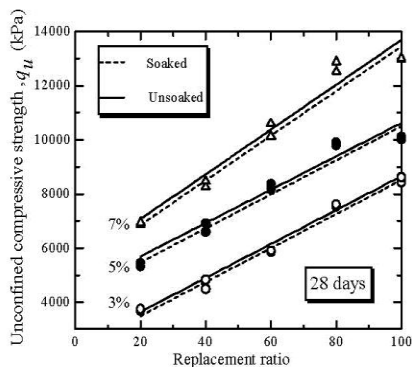
รูปที่ 9 และ 10 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน CR:AC มีอิทธิพลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัด ดังจะเห็นได้ว่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าลดลงอย่างมาก ตามการเพิ่มขึ้นของ AC (การลดลงของอัตราส่วน CR:AC) การลดลงของกำลังอัดตามการเพิ่มขึ้นของ AC แสดงได้ด้วยการเชิงเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของ AC มีผลลบต่อการพัฒนากำลังอัด แม้ว่าจะมีการผสมเพิ่มในปริมาณน้อยก็ตาม การลดลงของกำลังอัดอาจเนื่องจากผิวของแอสฟัลต์ติกคอนกรีตมีความลื่นสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผิวของหินคลุก กำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคของ CR และ AC จึงมีค่าต่ำ ส่งผลให้กำลังอัดของตัวอย่างที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำหนึ่งมีค่าลดลงตามปริมาณ AC ที่เพิ่มขึ้น (อัตราส่วน CR:AC ที่ต่ำลง) ที่ปริมาณอัตราส่วน CR:AC ค่าหนึ่ง กำลังอัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ เนื่องจากผลผลิตจากไฮเดรชันที่สูงกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วน CR:AC มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันใกล้เคียงกัน สำหรับปริมาณ

ปูนซีเมนต์ทั้งสามส่วนผสม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ปริมาณ AC เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการลดลงของ กำลังอัด สำหรับทุกอัตราส่วน CR:AC

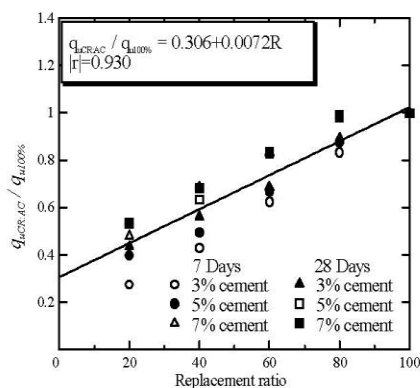
เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 9 และ 10 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของ ตัวอย่างที่อัตราส่วน CR:AC ต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม การพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับอายุบ่มทำให้แรงยึด เกาะระหว่างอนุภาคของ CR และ AC เพิ่มขึ้น เมื่อนำ กำลังอัดของวัสดุผสมมาเปรียบเทียบมาตรฐานของกรม ทางหลวงที่กำหนดค่ากำลังอัดแกนเดียวของชั้นพื้นทาง หินคลุกผสมปูนซีเมนต์ที่อายุบ่ม 7 วัน ต้องมีค่าไม่น้อย กว่า 2413 กิโลปาสกาลวัสดุผสมที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ตั้งแต่ร้อยละ 5 ขึ้นไป ทุกอัตราส่วน CR:AC ผ่านตาม เกณฑ์ข้อกำหนด แต่หากพิจารณาที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ (ร้อยละ 3) อัตราส่วน CR:AC ที่มากกว่า 40:60 ผ่านตาม เกณฑ์ข้อกำหนด



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวต่อ อัตราส่วน CR:AC ที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวต่อ อัตราส่วน CR:AC ที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $q_{u(CR:AC)} / q_{u(100\%)}$ ต่อ อัตราส่วน CR:AC ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน

4. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้นำเสนอความเป็นไปได้ของการนำวัสดุที่เหลือใช้มาใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมการทาง โดยนำ คิวทางแอสฟัลต์คิกคอนกรีตเดิมที่เสียหาย (AC) มาทำการผสมกับวัสดุชั้นทาง (CR) และปูนซีเมนต์ ด้วยเทคนิค

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ประเด็นสำคัญ
ของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเพิ่มขึ้น AC ใน CR ทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งของดิน
ซีเมนต์บดอัดลดลงเนื่องจาก AC มีความสามารถในการ
ดูดซึ่มพลังงานสูงกว่า CR ดังนั้น พลังงานการบดอัดที่
ส่งผ่านไปยังอนุภาคของ CR และ AR จึงลดลงตามการ
เพิ่มของ AC ปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินซีเมนต์
บดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้ง
สูงสุด ซึ่งเป็นพฤติกรรมเช่นเดียวกับดินบดอัด (ไม่ผสม
ซีเมนต์

2. เนื่องจากอิทธิพลของปูนซีเมนต์ หน่วยน้ำหนักแห้ง
ของดินซีเมนต์บดอัดมีค่าสูงกว่าหน่วยน้ำหนักแห้งของ
ดินบดอัดที่อัตราส่วน CR:AC และพลังงานการบดอัด
เดียวกัน ดังจะเห็นได้จากผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์
ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้น
เหมาะสมของดินซีเมนต์บดอัดและดินบดอัด

3. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วน CR:AC
แสดงได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง สำหรับทุก
ปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่ม ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มขึ้น
ของ AC มีผลต่อการพัฒนากำลังอัด แม้ว่าจะมีการ
ผสมเพิ่มในปริมาณน้อยก็ตาม การลดลงของกำลังอัด
อาจเนื่องจากผิวของแอสฟัลต์ติกคอนกรีตมีความลื่นสูง
มากเมื่อเปรียบเทียบกับผิวของหินคลุก กำลังต้านทาน
แรงเฉือนที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคของ CR และ AC จึง
มีค่าต่ำ

4. วัสดุผสมที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 5 ขึ้นไป
ทุกอัตราส่วน CR:AC ผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนดของกรม
ทางหลวง (กำลังอัดไม่น้อยกว่า 2413 กิโลปาสกาล ที่อายุ
บ่ม 7 วัน) แต่หากพิจารณาที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ (ร้อยละ 3)
อัตราส่วน CR:AC ที่มากกว่า 40:60 ผ่านตามเกณฑ์
ข้อกำหนด

5. วัสดุผสมเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทาง
หลวงสามารถที่จะนำมาเป็นวัสดุทางเลือกในการก่อสร้าง
หรือปรับปรุงถนนเพื่อเป็นประโยชน์ในแง่ของวิศวกรรม
และเศรษฐศาสตร์

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกรมทางหลวง และมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและ
วิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สำหรับความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และเครื่องทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวง(2520). วิธีการทดลองวัสดุก่อสร้าง
เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กระทรวงคมนาคม.58 หน้า.
- [2] ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแสด จรัสกร
(2544). กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความ
หนาแน่นแตกต่างกัน.รายงานวิจัยฉบับที่วพ.188
ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
กระทรวงคมนาคม.หน้า 160-163.
- [3] วันชัย ศิริเลิศวัฒนา(2546).ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลัง
อัดของถนนที่ซ่อมแซมโดยเทคนิคการหมุนเวียน
วัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่.วิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [4] เอกชัยมาน โคนสูง (2551). อิทธิพลของขนาดแบบ
บดอัดและปริมาณกรวดต่อผลการบดอัดดินใน
ห้องปฏิบัติการ.วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี
- [5] Davidson, D.T. (1961). Soil Stabilization with
PortlandCement. Highway Research Board.
Bulletin 292. 45-151.
- [6] Chinkulkijniwat et al., 2010, Compaction
Characteristics of Non-Gravel and Gravelly
Soils Using a Small Compaction Apparatus. Journal
of ASTM International, Vol. 7, No.7 Paper ID
JA1102945
- [7] Horpibulsuk, S. and Miura, N. (2006). Strength
development in cement stabilized low plasticity
and coarse grained soils: laboratory and field study.
Soil and foundations. Vol.46, No.3, Japanese
Geotechnical Society. 351-366

ประวัติผู้เขียน

นายอาทิตย์ อินทรา เกิดเมื่อวันที่ 11 กันยายน พ.ศ. 2526 จบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ช่างก่อสร้าง) จากวิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา จบการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ช่างโยธา) จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือนครราชสีมา และในปี พ.ศ.2547 เข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาตรี ในสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2550 หลังจากจบการศึกษาได้ปฏิบัติงานในบริษัทเอกชนเป็นเวลาประมาณ 2 ปีจากนั้นได้บรรจุเป็นข้าราชการในตำแหน่งนายช่างโยธาปฏิบัติงาน กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ระหว่างปฏิบัติงาน มีความสนใจในงานด้านวิศวกรรมธรณีอันได้แก่ งาน โครงการในพระราชดำริแก้ปัญหาด้านดิน การแก้สไลด์ในงานทางลาดเชิงเขา และ Pavement In-Place Recycling อย่างมาก ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้ตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในการปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2554 มีผลงานทางวิชาการ ดังปรากฏในรายละเอียดภาคผนวก ก