

# การพัฒนากำลังอัดของวัสดุผิวทางรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

นางสาวอรสา เที่ยง

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

# การพัฒนากำลังอัดของวัสดุผิวทางรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

---

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

ประธานกรรมการ

---

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

---

(ผศ. ดร.ปรีชาพร โภษา)

กรรมการ

---

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อรสา เคยยัง : การพัฒนากำลังอัดของวัสดุผิวทางรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์  
(STRENGTH DEVELOPMENT IN RECYCLED PAVEMENT STABILIZED WITH  
CEMENT) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้ผิวทางรีไซเคิลเป็นวัสดุมวลรวมหยาบในการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นผิวทางเชื่อมประสาน ผิวทางรีไซเคิลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยผิวทางเดิม (หินคลุก + ผิวทางแอสฟัลท์) และผิวทางปรับปรุงเดิม (หินคลุก + ผิวทางแอสฟัลท์) ที่เคยได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มาก่อน ตัวอย่างทั้งสองประเภทเก็บรวบรวมจากสายทาง สป.4047 แยกทางหลวงหมายเลข 3016 – บ้านท่าลาน อำเภอหนองโดน จังหวัดสระบุรี ตัวแปรอิทธิพลในการศึกษานี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ อายุบ่ม และวิธีการผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของตัวอย่างทั้งสองประเภทมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่ม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ตัวอย่างผิวทางปรับปรุงเดิมมีกำลังอัดที่สูงกว่าตัวอย่างผิวทางเดิม ในทุกปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่ม เนื่องจากเม็ดปูนซีเมนต์เดิมที่ยังทำปฏิกิริยากับน้ำไม่สมบูรณ์และแทรกอยู่ในผิวทางปรับปรุงเดิมสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้เมื่อถูกทุบย่อยและผสมเข้ากับปูนซีเมนต์และน้ำ ตัวอย่างทดสอบที่ได้จากการย่อยผิวทางเดิมด้วยเครื่องจักรในสนามและด้วยการทุบในห้องปฏิบัติการมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการย่อยผิวทางด้วยเครื่องจักรและค้อนทุบไม่ผลต่อกำลังอัดอย่างมีนัยยะ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ผิวทางที่ชำรุด (ซึ่งปกติจะนำไปเป็นวัสดุถม) ในงานวิศวกรรมการทาง ซึ่งเป็นประโยชน์ทั้งในด้านวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ORASA KOIEYUNG : STRENGTH DEVELOPMENT IN RECYCLED  
PAVEMENT STABILIZED WITH CEMENT. ADVISOR: PROF. SUKSUN  
HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

This research studies the viability of using damaged pavement materials as a coarse aggregate in bound pavement. Two recycled materials, unstabilized (crushed rock and asphalt) and stabilized unstabilized (crushed rock, asphalt and cement) pavement, from SB.4047 Highway Route Number 3016 - Thalan village, Nongdon district, Saraburi province are used in this study. The influential factors studied are cement content, curing time and remolding method. Compressive strengths of both materials increase as cement content and curing time increase due to the growth of cementitious products. The recycled stabilized-pavement material exhibits higher strength than the recycled pavement material for cement contents and curing times tested. The higher strength of recycled stabilized - pavement material is caused by an additional hydration from unreacted cement grains surrounded by crushed rock when remixed with cement and water. Both recycled unstabilized - and stabilized-pavement materials, prepared by the pavement recycling machine and laboratory hammer, exhibit essentially the same strength. In other words, remolding of the pavement materials by both pavement recycling machine and laboratory hammer is insignificantly affected strength development. The damaged pavements traditionally destined for landfill can be used for bound pavement as alternative aggregate, which is useful in terms of engineering, economical and environmental perspectives.

School of Civil Engineering  
Academic Year 2013

Student's Signature \_\_\_\_\_  
Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ คณาจารย์และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือสนับสนุนเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงานวิจัยและอนุเคราะห์ข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย อาทิ เช่น

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งเป็นบุคคลที่สำคัญอย่างมาก ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความรู้ ตลอดจนข้อมูลทางวิชาการด้านประวัติศาสตร์ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร ประธานกรรมการสอบโครงการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชาพร โภษา กรรมการสอบโครงการ ที่ช่วยให้คำแนะนำในการศึกษางานวิจัย

สำนักงานทางหลวงชนบทจังหวัดสระบุรี นายโยธา ศรีวิชัย นายช่างโยธาชำนาญงาน และเจ้าหน้าที่ประจำส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างวัสดุในสนามและทดลองในห้องปฏิบัติการ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่ออุดร คุณแม่สมพิศ เคยยัง ที่ได้ให้กำเนิด อบรมเลี้ยงดู สนับสนุนให้การศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา รวมถึงหลาย ๆ กำลังใจจากญาติพี่น้อง เพื่อน ๆ ทุกท่านที่เป็นกำลังใจ ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยครั้งนี้ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยครั้งนี้จะเสริมสร้างความรู้ ความเข้าใจ และเป็นประโยชน์อย่างมาก สำหรับโครงการที่จำเป็นต้องทำการปรับปรุงด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เป็นครั้งที่สอง

อรสา เคยยัง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรีทัศน์ วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (Crushed rock soil aggregate type base) (มทข.203-2545) .....	3
2.2.1 ขอบข่าย.....	3
2.2.2 คุณสมบัติ.....	3
2.3 มาตรฐานงานหมุนเวียนชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ (Pavement in – place recycling) (มทข.242-2555) .....	4
2.3.1 ขอบข่าย.....	4
2.3.2 วัสดุ.....	4
2.3.3 เครื่องจักร เครื่องมือที่ใช้ในการก่อสร้าง.....	6
2.3.4 การออกแบบปรับปรุงชั้นทางเดิม.....	8
2.3.5 การเตรียมการก่อสร้าง.....	8
2.3.6 การตรวจสอบความชื้นของวัสดุชั้นทางเดิม.....	9
2.3.7 การก่อสร้างแปลงทดสอบในสนาม.....	9

2.3.8	การก่อสร้าง.....	9
2.3.9	การตรวจสอบชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วเสร็จ.....	13
2.4	วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (sieve analysis) (มทช.(ท) 501.8-2545).....	15
2.4.1	ขอบข่าย.....	15
2.4.2	นิยาม.....	15
2.4.3	วิธีทำ.....	15
2.4.4	การเตรียมตัวอย่าง.....	16
2.4.5	การทดสอบ.....	16
2.4.6	การคำนวณ.....	17
2.4.7	การรายงาน.....	18
2.4.8	ข้อควรระวัง.....	18
2.5	วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (coarse aggregates) โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (los angeles abrasion) มทช.(ท) 501.9-2545.....	18
2.5.1	ขอบข่าย.....	18
2.5.2	วิธีทำ.....	18
2.5.3	การเตรียมตัวอย่าง.....	19
2.5.4	การทดสอบ.....	20
2.5.5	การคำนวณ.....	21
2.5.6	การรายงาน.....	21
2.5.7	ข้อควรระวัง.....	21
2.6	วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. (C.B.R.) (มทช.(ท) 501.3-2545).....	21
2.6.1	ขอบข่าย.....	21
2.6.2	วิธีทำ.....	21
2.6.3	วัสดุที่ใช้ประกอบการทดสอบ.....	23
2.6.4	การเตรียมตัวอย่าง.....	23
2.6.5	การทดสอบ.....	23
2.6.6	การคำนวณ.....	25
2.6.7	การรายงาน.....	27
2.7	วิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified compaction test) มทช.(ท) 501.2- 2545.....	28

2.7.1	ขอบข่าย.....	28
2.7.2	วิธีทำ.....	29
2.7.3	การเตรียมตัวอย่าง.....	30
2.7.4	การทดสอบ.....	31
2.7.5	การคำนวณ.....	32
2.7.6	การรายงาน.....	33
2.7.7	ข้อควรระวัง.....	33
2.8	วิธีการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ของดิน.....	34
2.8.1	ขอบข่าย.....	34
2.9	ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930).....	38
2.10	ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936).....	40
2.11	ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (1942).....	41
2.12	ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956).....	42
2.13	ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985).....	43
2.14	เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve).....	45
2.14.1	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน.....	47
2.14.2	ชนิดของดิน.....	47
2.15	พลังงานการบดอัด.....	49
2.16	การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม.....	51
2.17	การทำนายกราฟการบดอัด.....	52
2.18	การก่อสร้างและการบดอัด ชั้นโครงสร้างทาง.....	54
2.18.1	งานพื้นทาง.....	54
3	วิธีดำเนินการทำโครงการ.....	56
3.1	บทนำ.....	56
3.2	แผนงานดำเนินการ.....	56
3.3	ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	56
4	การศึกษาผลทดลองและวิจารณ์ผล.....	58
4.1	บทนำ.....	58



4.2	วัสดุและวิธีทดลองในห้องปฏิบัติการ.....	59
4.2.1	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	59
4.2.2	วิธีการทดลอง.....	62
4.3	ผลทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบ.....	63
5	สรุปผลการวิจัย.....	67
	เอกสารอ้างอิง.....	68
	ภาคผนวก ตารางผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ.....	69
	ภาคผนวก ตาราง UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH.....	72
	ประวัติผู้วิจัย.....	82

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก.....	4
2.2 ขนาดคละของวัสดุ.....	17
2.3 จำนวนลูกเหล็กทรงกลม ที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชั้น (grading).....	19
2.4 น้ำหนักชั้นของตัวอย่างต่อจำนวนรอบ.....	20
2.5 น้ำหนักมาตรฐานตากการกดท่อนเหล็กขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว ของวัสดุหินคลุก.....	26
4.1 คุณสมบัติพื้นฐาน.....	62
ภ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุผิวทางเดิม โครงการ สาย สป. 4047 แยกทางหลวง หมายเลข 3016 – บ้านท่าลาน อำเภอหนองโดน จังหวัดสระบุรี.....	70
ภ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุผิวทางปรับปรุงเดิม โครงการ สาย สป. 4047 แยก ทางหลวงหมายเลข 3016 – บ้านท่าลาน อำเภอหนองโดน จังหวัดสระบุรี.....	71
ภ 3 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 1 % อายุบ่ม 7 วัน CEMENT 1 % อายุบ่ม 7 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div.....	73
ภ 4 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 1 % อายุบ่ม 14 วัน CEMENT 1 % อายุบ่ม 14 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div.....	73
ภ 5 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 1 % อายุบ่ม 28 วัน CEMENT 1 % อายุบ่ม 28 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div.....	74
ภ 6 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3 % อายุบ่ม 7 วัน CEMENT 3 % อายุบ่ม 7 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div.....	74
ภ 7 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3 % อายุบ่ม 14 วัน CEMENT 3 % อายุบ่ม 14 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div.....	75
ภ 8 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3 % อายุบ่ม 28 วัน CEMENT 3 % อายุบ่ม 28 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div.....	75
ภ 9 UNCONF UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 7 วัน CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 7 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div.....	76
ภ 10 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 14 วัน CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 14 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div.....	76

ภ 11 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 28 วัน	
CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 28 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div.....	77
ภ 12 ผลทดลองกำลังอัดในแต่ละช่วงอายุการบ่ม.....	77

## สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve).....	39
2.2 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ.....	40
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Hogentogler.....	40
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Buchanan.....	42
2.5 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอโดย Hilf.....	43
2.6 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน.....	45
2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve).....	46
2.8 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ.....	47
2.9 กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Horpibulsuk et al., 2005).....	48
2.10 อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg, 1960).....	49
2.11 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (Horpibulsuk et al., 2004).....	50
2.12 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (Lambe, 1962).....	52
2.13 กราฟการบดอัด Ohio (ปรับปรุงจาก Joslin, 1959).....	53
2.14 แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด (Nagaraj et al., 2006).....	54
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	57
4.1 การเก็บตัวอย่างทดสอบ.....	60
4.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	61
4.3 ผลการทดสอบการวิเคราะห์การกระจายขนาดเม็ดดิน.....	61
4.4 ผลการทดสอบการบดอัด.....	63
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ.....	64
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มตัวอย่างในสนาม.....	64
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน กับปริมาณปูนซีเมนต์.....	65
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 14 วัน กับปริมาณปูนซีเมนต์.....	66
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน กับปริมาณปูนซีเมนต์.....	66

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความเสียหายของถนนมักเกิดเนื่องจากการรับน้ำหนักของยานพาหนะ การเสื่อมสภาพของวัสดุเองและการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ เช่น การหลุ่ดร้อน การเกิดร่องล้อและรอยแตกแบบต่างๆ การซ่อมบำรุงถนนที่ซำรุดเทคนิคหนึ่งของกรมทางหลวงชนบทคือการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาหมุนเวียนใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) เทคนิคนี้เป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุอย่างคุ้มค่าและประหยัดงบประมาณซ่อมบำรุง ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความนิยมในการปรับปรุงวัสดุที่นำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศ

แม้ว่าเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ด้วยสภาพการจราจรที่ความหนาแน่นมากขึ้น และการเสื่อมสภาพของวัสดุ ถนนที่ได้รับการซ่อมบำรุงโดยวิธีหมุนเวียนนำวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement In-Place Recycling) เกิดการแตกร้าวและการยุบตัวก่อนเวลาอันควร การซ่อมบำรุงถนนที่เคยได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ยังไม่มีความเป็นไปได้ แต่ยังไม่เคยมีการใช้จริงในประเทศไทย Kampala et al. (2013) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำวัสดุที่ปรับปรุงด้วยปูนขาวแล้วนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่อีกครั้ง งานวิจัยดังกล่าวสรุปว่าปูนขาวที่ยังทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์จะกลับมาทำปฏิกิริยาอีกครั้งหลังจากการบดย่อยวัสดุ ดังนั้น ปูนขาวที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุในครั้งหลังจึงลดลง

งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำวัสดุทางเดิมที่เคยได้รับการปรับปรุงแล้วด้วยปูนซีเมนต์มาทำการบดอัดและปรับปรุงใหม่อีกครั้งด้วยปูนซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นทางและชั้นรองพื้นทาง โดยวัสดุที่ปรับปรุงใหม่นี้ต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตัวแปรที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ การผสม ปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม

#### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้ผิวทางปรับปรุงเดิม (Recycled stabilized-pavement material) มาใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบในการทำผิวทางเชื่อมประสาน (Bound pavement)

- 1.2.2 เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังอัดของผิวทางปรับปรุงเดิมที่ผสมปูนซีเมนต์บดอัด ตามการเปลี่ยนแปลงของการผสมปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม และเปรียบเทียบกับการพัฒนากำลังอัดของผิวทางเดิม (Recycled Unstabilized-pavement material)

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในสนาม ขั้นตอนการดำเนินการประกอบด้วย การเก็บตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างทดสอบ และการทดสอบแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างทดสอบรวบรวมจากโครงการ สาย สป.4047 แยกทางหลวงหมายเลข 3016 – บ้านท่าลาน อำเภอหนองโดน จังหวัดสระบุรี ตัวอย่างทดสอบประกอบด้วย ผิวทางเดิม (Recycled unstabilized-pavement material) ผิวทางปรับปรุงเดิม (Recycled stabilized pavement material) ตัวอย่างทั้งสองประเภทที่นำมาทดสอบ จะถูกย่อยจนมีขนาดคละตามเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท และทำการผึ่งแห้ง และทำการผสมกับน้ำเพื่อหาค่าความแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสม ตัวอย่างทดสอบถูกนำมาเติมน้ำจนได้ปริมาณน้ำเหมาะสมและผสมกับปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 และ 3 และทำการบดอัด ผู้วิจัยจะทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ตัวอย่างบดอัดจะถูกนำมาห่อด้วยพลาสติกและบ่มจนได้อายุที่ 7, 14 และ 28 วัน เมื่อได้อายุบ่มที่กำหนด ตัวอย่างจะถูกนำมาทดสอบกำลังอัดแกนเดียวด้วยอัตราเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที ผลทดสอบจะเป็นค่าเฉลี่ยของ 3 ก้อนตัวอย่าง และผู้วิจัยยังได้นำตัวอย่างที่ได้จากการผสมในสนาม โดยเครื่องจักรมาทำการบดอัดในสนาม ตัวอย่างในสนามถูกผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 3.5 กำลังอัดของตัวอย่างที่ได้จากการผสมและบดอัดในสนาม จะถูกนำมาบ่มและทดสอบแรงอัดแกนเดียวด้วยอัตราเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที ในห้องปฏิบัติการ ผลทดสอบจะเป็นค่าเฉลี่ยของ 3 ก้อนตัวอย่าง ผลทดสอบค่ากำลังอัดที่ได้จากการผสมในสนามและการผสมในห้องปฏิบัติการจะนำมาเปรียบเทียบ เพื่อศึกษาอิทธิพลของการผสม ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่มต่อการพัฒนา กำลังอัดของวัสดุผิวทางรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้ผิวทางปรับปรุงเดิมเป็นวัสดุมวลรวม หยาบในการทำผิวทางเชื่อมประสาน ซึ่งเป็นประโยชน์ในทางวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม
- 1.4.2 ทราบการพัฒนากำลังอัดของผิวทางปรับปรุงเดิมผสมกับปูนซีเมนต์ ในพจน์ของ ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม

## บทที่ 2

### ปริทัศน์ วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

การศึกษาการพัฒนากำลังอัดของผิวทางปรับปรุงเดิมที่ผสมปูนซีเมนต์บดอัด ตามการเปลี่ยนแปลงของการผสม ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม ในงานบรูณะทางผิวทางแอสฟัลต์โดยวิธี Pavement Recycling เป็นสิ่งสำคัญในการปรับปรุงชั้นทางเดิมในที่มีคุณภาพสูงขึ้น เพื่อให้การบรูณะทางหลวงชนบทเกิดความคุ้มค่าสูงสุด และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน การหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะการบ่ม และทดสอบกำลังรับแรงอัด เป็นการพัฒนาการบรูณะทางผิวทางแอสฟัลต์อีกทางหนึ่งที่จะทำให้การดำเนินงานซ่อมผิวทางด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ ที่มีประสิทธิภาพ

#### 2.2 มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (Crushed rock soil aggregate type base) (มทข.203-2545)

##### 2.2.1 ขอบข่าย

วัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก หมายถึง วัสดุซึ่งมีขนาดคละกันสม่ำเสมอจากใหญ่ไปหาเล็ก นำมาเสริมบนชั้นรองพื้นทางหรือชั้นคันทาง

##### 2.2.2 คุณสมบัติ

- ปราศจากก้อนดินเหนียว (clay lump) วัสดุจำพวกเชล (shale) รากไม้ หรือวัชพืชอื่นๆ
- มีอัตราส่วนคละสม่ำเสมอประกอบด้วยส่วนหยาบและส่วนละเอียด
- ส่วนหยาบต้องเป็นหินโม
- ส่วนละเอียดเป็นวัสดุชนิดเดียวกับส่วนหยาบ หากมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพ จะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงชนบทก่อน
- ค่าขีดเหลว (liquid limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 25
- ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (plasticity index) ไม่มากกว่าร้อยละ 6
- ค่าจำนวนส่วนร้อยละของความสึกหรอ (percentage of wear) ไม่มากกว่าร้อยละ 40
- ค่า ซี.บี.อาร์ จากห้องทดลอง (Lab C.B.R.) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ที่ร้อยละ

95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor density) ตาม มทข.(ท) 501.3 : วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าซี.บี.อาร์ (C.B.R.) หรือไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง

- มีมวลคละผ่านตะแกรง ดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก

ขนาดของ ตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ		
	ชนิด ก.	ชนิด ข.	ชนิด ค.
2 นิ้ว	100	100	-
1 นิ้ว	-	79-95	100
3/8 นิ้ว	30-65	40-75	50-85
เบอร์ 4	25-55	30-60	35-65
เบอร์ 10	15-40	20-45	25-50
เบอร์ 40	8-20	15-30	15-30
เบอร์ 200	2-8	5-20	5-15

## 2.3 มาตรฐานงานหมุนเวียนชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ (pavement in - place recycling) (มทข.242-2555)

### 2.3.1 ขอบข่าย

งานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ (pavement in - place recycling ) หมายถึง การนำวัสดุชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับไปใช้งานใหม่ โดยการปรับปรุงคุณภาพทำในสายทางที่จะดำเนินการก่อสร้าง เพื่อให้มีคุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด

### 2.3.2 วัสดุ

- วัสดุชั้นทางเดิม หมายถึง วัสดุที่ได้จากการขุดหรือขูดไสจากชั้นทางเดิมแล้วให้ร่วนถึงความลึกตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งอาจจะประกอบด้วยผิวลาดยาง หินคลุก ลูกกรัง แล้วแต่สภาพของสายทางที่จะดำเนินการก่อสร้าง ในกรณีวัสดุชั้นทางเดิมมีขนาดคละที่ไม่เหมาะสม หรือคุณสมบัติอื่น ไม่ได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด ให้แก้ไขปรับปรุงหรือนำวัสดุผสมเพิ่มมาผสม เพื่อให้ได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด



- วัสดุผสมเพิ่ม จะต้องมีความสมบัติที่เหมาะสม และเข้ากันได้ดีกับวัสดุชั้นทางเดิมหรือวัสดุผสมเพิ่มชนิดอื่นที่นำมาใช้งาน เพื่อให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมมีความแข็งแรง เป็นไปตามรูปแบบและข้อกำหนด ซึ่งประกอบด้วยวัสดุต่างๆ ดังนี้
  - วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงขนาดคละและ/หรือเพิ่มปริมาณ หมายถึง วัสดุจากแหล่งอื่นที่นำมาผสมกับวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อปรับปรุงขนาดคละและ/หรือเพิ่มปริมาณ ให้ได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด เช่น หิน ทราย และ วัสดุมวลรวม (soil aggregate) เป็นต้น
  - วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ หมายถึง วัสดุที่นำมาผสมกับวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งต้องเป็นชนิดที่กรมทางหลวงชนบทกำหนดต่อไปนี้ หากเป็นชนิดอื่นต้องได้รับความเห็นชอบก่อนนำไปใช้งาน
    - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และต้องเป็นปูนซีเมนต์ใหม่บรรจุอยู่ในถุงหรืออยู่ในไซโล
    - ปูนขาว ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.241:ปูนขาวสำหรับงานก่อสร้าง
    - เถ้าลอย ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2135: เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต
    - แอสฟัลต์ ต้องเป็นชนิดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับวัสดุชั้นทางเดิมที่จะปรับปรุง และต้องเป็นชนิดเดียวกันตลอดงาน
    - วัสดุผสมเพิ่ม อาจนำมาออกแบบส่วนผสมรวมกันได้ แต่ต้องเหมาะสมกับวัสดุชั้นทางเดิมที่จะปรับปรุง และส่วนผสมต้องได้คุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด ทั้งนี้ต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงชนบท เป็นแต่ละกรณี
- สารผสมเพิ่ม (Admixture) ต้องเป็นชนิดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับวัสดุชั้นทางเดิมที่จะปรับปรุง และผู้รับจ้างต้องเสนอเอกสารคุณสมบัติของสารผสมเพิ่ม ให้กรมทางหลวงชนบทพิจารณาก่อนนำไปใช้งาน
- น้ำ ที่จะนำมาใช้ผสมหรือบ่มชั้นทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพ ต้องเป็นน้ำสะอาดปราศจากสารที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชั้นทางที่ปรับปรุง และต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงานก่อนนำมาใช้งาน

### 2.3.3 เครื่องจักร เครื่องมือที่ใช้ในการก่อสร้าง

ชุดเครื่องจักร เครื่องมือที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้าง ต้องผ่านการตรวจสอบและขึ้นทะเบียนกับกรมทางหลวงชนบท ผู้รับจ้างจะต้องจัดชุดเครื่องจักร เครื่องมือไว้ให้พร้อมที่สถานที่ก่อสร้าง เพื่อรับการตรวจสอบหรือสอบเทียบ (calibrate) จากผู้ควบคุมงาน ตามวิธีการที่กรมทางหลวงชนบทกำหนด หากเครื่องจักร เครื่องมือใดไม่ผ่านการตรวจสอบหรือสอบเทียบ ผู้รับจ้างจะต้องแก้ไขหรือจัดหาเครื่องจักร เครื่องมือที่ขึ้นทะเบียนกับกรมทางหลวงชนบท และผ่านการตรวจสอบหรือสอบเทียบมาเปลี่ยนหรือเพิ่ม ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของผู้ควบคุมงาน และชุดเครื่องจักร เครื่องมือต้องมีความเหมาะสมกับงานทั้งชนิด ขนาดและจำนวน มีขีดความสามารถพอที่จะดำเนินการก่อสร้างได้ถูกต้องตามรูปแบบและข้อกำหนดให้แล้วเสร็จในแต่ละวัน ในระหว่างการก่อสร้างผู้รับจ้างจะต้องบำรุงรักษาเครื่องจักร เครื่องมือให้อยู่ในสภาพใช้งานได้ดีมีประสิทธิภาพตลอดเวลา ซึ่งเครื่องจักรที่จะต้องนำมาใช้งานมีดังนี้

- ชุดเครื่องจักรผสมวัสดุ อาจเป็นชนิดที่แยกการทำงานเฉพาะอย่าง เช่น เครื่องจักรชุดตัดผสม (reclaimer / stabilizer) เครื่องจักรชุดไส (milling machine) และ/หรือเป็นชนิดทำงานเสร็จในตัว เช่น เครื่องจักรชุดผสมพร้อมป้อนวัสดุ (cold recycler) หรือเครื่องจักรอื่นใดที่มีลักษณะการทำงานพิเศษเหมาะสมกับงาน เครื่องจักรชุดผสมจะต้องมีระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ สามารถชุดตัดหรือชุดไสชั้นทางเดิมได้ความลึกตามที่กำหนด และสามารถผสมวัสดุชั้นทางเดิมกับวัสดุใหม่ให้เข้ากันได้อย่างสม่ำเสมอ
- เครื่องจักรป้อนวัสดุ ต้องเป็นแบบขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง มีกำลังมากพอและควบคุมความเร็วในการป้อนได้อย่างสม่ำเสมอ สามารถป้อนวัสดุให้มีผิวเรียบและป้อนวัสดุในระดับลาดเอียงได้ตามรูปแบบที่กำหนด โดยมีอุปกรณ์ควบคุมระดับความลาดเอียงอัตโนมัติ
- เครื่องจักรบดทับ จะต้องเป็นแบบขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง มีชนิดและขนาดดังนี้
  - เครื่องบดทับสันสะเทือนขนาดไม่น้อยกว่า 17.5 ตัน
  - รถบดล้อยางชนิดล้อเรียบขนาดไม่น้อยกว่า 8 ตัน

สามารถบดทับชั้นทางให้มีความแน่นตามรูปแบบและข้อกำหนด โดยมีจำนวนมากพอที่จะดำเนินการก่อสร้างไปอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ การกำหนดชนิดและน้ำหนักของเครื่องจักรบดทับ ให้พิจารณาจากการก่อสร้างแปลงทดสอบในสนามเป็นหลัก ซึ่งต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงาน

- ชุดเครื่องจักรประกอบการก่อสร้าง
  - เครื่องจักรเกี่ยปรับระดับ ต้องเป็นชนิดขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง มีขนาดและกำลังมากพอที่จะเกี่ยปรับระดับวัสดุให้ได้ตามรูปแบบที่กำหนด
  - รถบรรทุก ต้องเป็นชนิดและขนาดที่เหมาะสมกับงาน มีจำนวนมากพอกับปริมาณงาน เพื่อให้การก่อสร้างดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง
  - เครื่องจักรอุปกรณ์เกี่ยวกับวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพและ/หรือน้ำประกอบด้วยรถบรรทุกที่ติดตั้งถังหรือถังบรรจุวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพแต่ละชนิด และ/หรือน้ำ หรืออาจเป็นรถบรรทุกที่ติดตั้งถังหรือถังบรรจุแยกวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพแต่ละชนิดและน้ำรวมในรถบรรทุกคันเดียวกันก็ได้ โดยรถบรรทุกดังกล่าวจะต้องมีถังหรือถังขนาดบรรจุเหมาะสมกับงาน อีกทั้งมีอุปกรณ์ควบคุมปริมาณการจ่ายวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพแต่ละชนิด และ/หรือน้ำ ที่เที่ยงตรง สม่าเสมอ ตามที่กำหนด
  - ถังบรรจุแอสฟัลต์ ต้องเป็นถังชนิดที่ติดตั้งบนรถบรรทุก มีขนาดความจุมากพอที่จะป้อนแอสฟัลต์ได้อย่างต่อเนื่องขณะที่ก่อสร้าง ถังบรรจุต้องมีสภาพดี ไม่รั่วซึม และต้องมีอุปกรณ์ที่จำเป็นดังต่อไปนี้
    - มีฉนวนกันความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิของแอสฟัลต์
    - มีช่องสำหรับน้ำแอสฟัลต์เข้า - ออก และมีวาล์วควบคุม
    - มีอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณแอสฟัลต์ ที่วัดได้ละเอียดเหมาะสมกับงาน
    - มีระบบให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพ สามารถเพิ่มอุณหภูมิแอสฟัลต์ในอัตราที่เหมาะสมได้อย่างทั่วถึงตามที่กำหนด
    - มีอุปกรณ์และแสดงวัดอุณหภูมิแอสฟัลต์ติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม หรือ ที่ระยะความสูง 1 ใน 3 จากกันถังบรรจุ
  - เครื่องจักร เครื่องมือและอุปกรณ์อื่นใด นอกเหนือจากที่ได้กำหนดไว้ข้างต้นแล้ว ก่อนจะนำมาใช้งานต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงาน
- ผู้รับจ้างต้องจัดหา เครื่องมือ และอุปกรณ์การทดสอบที่ได้มาตรฐาน มีสภาพพร้อมใช้งานเพื่อใช้ในการทดสอบและตรวจสอบคุณภาพ ตามที่กรมทางหลวงชนบทกำหนดจนกว่างานก่อสร้างจะแล้วเสร็จ

### 2.3.4 การออกแบบปรับปรุงชั้นทางเดิม

- การออกแบบทั่วไป หมายถึง ข้อเสนอแนะที่ให้ไว้เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาในการออกแบบ โดยมีหัวข้อแนะนำต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
  - การปรับปรุงชั้นทางเดิมเป็นชั้นทางใหม่ สามารถนำวัสดุชั้นทางเดิมใด ๆ ที่เหมาะสมมารวมกันเพื่อปรับปรุงให้เป็นชั้นทางใหม่ก็ได้
  - การปรับปรุงชั้นทางเดิมแบบในที่ ถ้าผิวทางแอสฟัลต์เดิมมีความหนามากเกินไปจนขีดความสามารถของเครื่องจักรชุดผสมที่จะดำเนินการได้ดี ให้ขูดผิวทางส่วนที่มีความหนาเกินออก
- การออกแบบส่วนผสม ก่อนเริ่มงานไม่น้อยกว่า 2 สัปดาห์ ผู้ควบคุมงานและผู้รับจ้างต้องร่วมกันเจาะเก็บตัวอย่างวัสดุชั้นทางเดิมที่จะปรับปรุงทุกระยะ 1 กิโลเมตร หรือเมื่อคุณสมบัติของวัสดุชั้นโครงสร้างทางเปลี่ยนแปลงไป โดยแยกออกเป็นชั้นๆ เช่น ชั้นผิวทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง ส่งให้กรมทางหลวงชนบทออกแบบส่วนผสม หากในระหว่างก่อสร้างวัสดุชั้นทางเดิมเปลี่ยนแปลงไปจากที่นำมาออกแบบส่วนผสม ผู้รับจ้างจะต้องทำการปรับปรุงแก้ไขหรือเก็บตัวอย่างวัสดุ ส่งให้กรมทางหลวงชนบทออกแบบส่วนผสมใหม่ โดยผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น
- การออกแบบส่วนผสม สามารถจะกำหนดข้อกำหนดพิเศษเพื่อให้เหมาะสมกับงานแต่ละโครงการได้ โดยพิจารณาจากสภาพการใช้งาน ราคาค่าก่อสร้าง วัสดุท้องถิ่น และสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ต้องเป็นไปตามหลักวิชาการ

### 2.3.5 การเตรียมการก่อสร้าง

ก่อนการก่อสร้างต้องกำจัดวัชพืชและวัสดุที่ไม่พึงประสงค์ ออกจากแนวพื้นที่ที่จะก่อสร้าง พร้อมทั้งปรับระดับผิวถนนเดิมให้เรียบสม่ำเสมอ และกำหนดแนวจุดตัดตามยาวไว้บนผิวชั้นทางเดิม ในกรณีที่มีความเสียหายหรือมีจุดอ่อนตัวของชั้นดินเดิมใต้ชั้นทางที่จะปรับปรุง ให้ขุดหรือวัสดุแต่ละชั้นทางที่จะปรับปรุงออกไปกองแยกไว้ไม่ให้ปะปนกัน จากนั้นให้ขุดหรือวัสดุชั้นทางที่เป็นปัญหาออก แล้วแทนที่ด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่ต่ำกว่ามาตรฐานของชั้นนั้นๆ ตามที่กรมทางหลวงชนบทกำหนด บดทับให้ได้ความแน่นตามข้อกำหนด แล้วจึงนำวัสดุแต่ละชั้นทางที่กองแยกไว้กลับมาปูลงเป็นชั้นๆ พร้อมบดทับทีละชั้นให้ได้ความแน่นตามข้อกำหนด โดยความหนาของชั้นวัสดุที่บดทับแต่ละชั้นไม่มากกว่า 20 เซนติเมตร

### 2.3.6 การตรวจสอบความชื้นของวัสดุชั้นทางเดิม

ก่อนเริ่มการก่อสร้างไม่เกิน 1 สัปดาห์ ผู้รับจ้างร่วมกับผู้ควบคุมงานต้องเจาะเก็บตัวอย่างชั้นทางเดิมที่จะก่อสร้าง เพื่อตรวจสอบหาปริมาณความชื้นทุกระยะ 500 เมตร หรือทุกระยะที่ปริมาณความชื้นมีเปลี่ยนแปลง และหากวันที่ตรวจสอบหาปริมาณความชื้น มีระยะเวลาห่างจากวันที่เริ่มการก่อสร้างนานเกิน 1 สัปดาห์ หรือมีเหตุซึ่งอาจจะทำให้ปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงไป ให้ผู้รับจ้างเจาะเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบหาปริมาณความชื้นใหม่ ในกรณีที่วัสดุชั้นทางเดิมมีความชื้นสูงเกินไป ผู้รับจ้างจะต้องแก้ไขให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด และวิธีการแก้ไขต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงาน

### 2.3.7 การก่อสร้างแปลงทดสอบในสนาม

ผู้รับจ้างต้องก่อสร้างแปลงทดสอบในสนามโดยมีความยาวไม่น้อยกว่า 100 เมตร มีความกว้างไม่น้อยกว่า 1 ช่องจราจร เพื่อใช้เป็นแบบอย่างในการก่อสร้าง ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงวัสดุ เครื่องจักร เครื่องมือ หรือผู้รับจ้างไม่สามารถดำเนินการก่อสร้างให้ถูกต้องตามรูปแบบและข้อกำหนด ให้ผู้รับจ้างดำเนินการก่อสร้างแปลงทดสอบใหม่จนกว่าจะได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด ซึ่งต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงานก่อนใช้แปลงทดสอบนั้นเป็นแบบอย่างในการก่อสร้างต่อไป

### 2.3.8 การก่อสร้าง

การก่อสร้างจะต้องมีการวางแผนที่ดี และต้องคำนึงถึงสภาพอากาศที่เหมาะสม เช่น ไม่มีฝนตก อุณหภูมิของอากาศ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อกรรมวิธี การบดทับ และการบ่ม ในระหว่างก่อสร้างช่วงนั้นๆ ผู้รับจ้างต้องดำเนินการไปอย่างต่อเนื่องโดยไม่หยุดชะงัก และควบคุมการจราจรเพื่อไม่ให้ชั้นทางที่กำลังก่อสร้างเสียหาย โดยติดตั้งป้ายจราจรพร้อมอุปกรณ์ควบคุมการจราจรอื่นๆ รวมทั้งสัญญาณไฟกลางคืนตามที่กรมทางหลวงชนบทกำหนด พร้อมทั้งจัดการจราจรให้ผ่านพื้นที่ก่อสร้างได้ตลอดเวลา และปลอดภัย การก่อสร้างให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

- การดำเนินการก่อสร้างให้ใช้เครื่องจักร เครื่องมือในข้อ 3 ซึ่งได้ผ่านการตรวจสอบรับรองและตรวจปรับจากผู้ควบคุมงานแล้ว ขั้นตอนการก่อสร้างจะต้องสอดคล้องกับลักษณะวิธีการก่อสร้าง
- การเติมวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงขนาดคละและ/หรือเพิ่มปริมาณ ทำได้โดยการปูเกลี่ยลงบนถนนเดิมก่อนการขุดผสม ทั้งนี้เมื่อ ก่อสร้างแล้วเสร็จ ชั้นวัสดุที่ปรับปรุงแล้วต้องเรียบ มีความลาดเอียง มีความแน่น มีความหนา และมีความสม่ำเสมอ ได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด

- การเติมวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ เครื่องจักร เครื่องมือที่ใช้ต้อง สัมพันธ์กับชนิดของวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ และเหมาะสมตาม ลักษณะงาน ไม่ปฏิเสธวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพชนิดที่เป็นผงใน ขณะที่มีลมแรงทำให้วัสดุปลิวสูญหาย ซึ่งจะกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน ในกรณีที่วัสดุชั้นทางเดิมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากที่เคยนำไปออกแบบ ส่วนผสม หรือมีสาเหตุอื่นที่อาจทำให้อัตราส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไป ให้ผู้ ควบคุมงานนำวัสดุชั้นทางเดิมไปตรวจสอบคุณภาพและออกแบบส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น วิธีการเติมวัสดุผสมเพิ่มเพื่อ ปรับปรุงคุณภาพแต่ละชนิดทำได้ ดังนี้
- การเติมปูนซีเมนต์ผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ต้องเติมในอัตราส่วนที่กำหนดซึ่ง ปูนซีเมนต์ที่ใช้ควรเป็นเครื่องหมายการค้าเดียวกันตลอดงาน หากมีเหตุ จำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้ปูนซีเมนต์เครื่องหมายการค้าอื่น ผู้รับจ้างต้องส่งให้ กรมทางหลวงชนบทออกแบบส่วนผสมใหม่และเสนอให้ผู้ควบคุมงานพิจารณา ในกรณีที่ปูนซีเมนต์เก็บไว้นานหรือเก็บรักษาไว้ในที่ไม่เหมาะสม ซึ่งอาจทำ ให้ปูนซีเมนต์เสื่อมคุณภาพ ให้ผู้ควบคุมงานระงับการนำมาใช้งาน หากประสงค์ จะนำมาใช้งานใหม่ ให้นำปูนซีเมนต์ไปตรวจสอบคุณภาพและออกแบบ ส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น
- การเติมปูนขาวผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ในกรณีที่แบบกำหนดให้ใช้ปูนขาว ต้องเติมในอัตราส่วนที่กำหนด ซึ่งปูนขาวที่ใช้ควรเป็นเครื่องหมายการค้า เดียวกันตลอดงาน หากมีเหตุจำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้ปูนขาวเครื่องหมายการค้า อื่น ผู้รับจ้างต้องเก็บตัวอย่างส่งให้กรมทางหลวงชนบทออกแบบส่วนผสมใหม่ และเสนอผู้ควบคุมงานพิจารณา ในกรณีที่ปูนขาวเก็บไว้นานหรือเก็บรักษาไว้ ในที่ไม่เหมาะสม ซึ่งอาจทำให้ปูนขาวเสื่อมคุณภาพ ให้ผู้ควบคุมงานระงับการ นำมาใช้งาน หากประสงค์จะนำมาใช้งานใหม่ ให้นำปูนขาวไปตรวจสอบ คุณภาพและออกแบบส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ผู้รับจ้างเป็นผู้ออก ค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น
- การเติมเถ้าลอยผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ในกรณีที่แบบกำหนดให้ใช้เถ้าลอย ต้องเติมในอัตราส่วนที่กำหนด ซึ่งเถ้าลอยที่ใช้ควรเป็นแหล่งเดียวกันตลอดงาน หากมีเหตุจำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้เถ้าลอยจากแหล่งอื่น ผู้รับจ้างต้องออกแบบ ส่วนผสมใหม่และเสนอผู้ควบคุมงานเพื่อพิจารณา ในกรณีที่เถ้าลอยมีคุณสมบัติ

เปลี่ยนแปลงไป ให้ผู้ควบคุมงานระงับการนำมาใช้งาน หากประสงค์จะนำมาใช้งานใหม่ ให้นำเข้าลอยไปตรวจสอบคุณภาพและออกแบบส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น

- การเติมแอสฟัลต์ผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ต้องเติมในชั้นตอนขุดตัด หรือชั้นตอนผสม โดยการสุบจ่ายจากรถบรรทุกแอสฟัลต์ ซึ่งต้องคงอุณหภูมิของแอสฟัลต์ไว้ที่  $\pm 5$  องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิของแอสฟัลต์ที่กำหนด เครื่องมือและอุปกรณ์การจ่ายแอสฟัลต์จะต้องสามารถปรับปริมาณแอสฟัลต์ให้สัมพันธ์กับการทำงานของเครื่องจักร หรือปริมาณวัสดุผสมได้โดยอัตโนมัติ ในอัตราที่กำหนด แอสฟัลต์ที่ใช้ต้องเป็นชนิดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเฉพาะงาน และควรเป็นแหล่งผลิตและชนิดเดียวกันตลอดงาน ซึ่งผู้รับจ้างต้องระบุแหล่งผลิตและชนิดของแอสฟัลต์ที่นำมาใช้งาน หากมีเหตุจำเป็นต้องเปลี่ยนแหล่งผลิตหรือชนิดแอสฟัลต์ ให้ผู้ควบคุมงานเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปออกแบบส่วนผสมใหม่ก่อนอนุมัติให้นำมาใช้งาน
- การเติมแอสฟัลต์อิมัลชันผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ต้องตรวจสอบเวลาการแตกตัวของแอสฟัลต์อิมัลชันในวัสดุที่ปรับปรุงแล้ว โดยเก็บตัวอย่างส่วนผสมทันทีหลังขั้นตอนการขุดตัดและผสม เพื่อนำไปตรวจสอบ ในกรณีที่แอสฟัลต์อิมัลชันแตกตัวก่อนการบดทับเสร็จสิ้น ให้หยุดการก่อสร้างไว้ก่อนเพื่อดำเนินการปรับแก้โดยในแปลงถัดไปอาจน แอสฟัลต์อิมัลชันที่มีระยะเวลาการแตกตัวยาวนานกว่ามาใช้ในการก่อสร้างแทน หรือเร่งการบดทับให้แล้วเสร็จก่อนที่แอสฟัลต์อิมัลชันแตกตัว ส่วนแปลงที่เกิดความเสียหายแล้วให้ทำการปรับแก้ไขใหม่ให้ถูกต้อง ทั้งนี้ต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงาน
- การเติมโพลีเมอร์แอสฟัลต์ผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ต้องตรวจสอบลักษณะของโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่ได้จากหัวฉีดทดสอบ และตรวจสอบส่วนผสมวัสดุที่ปรับปรุงแล้วทันทีตลอดความกว้างของการปู หากปรากฏว่าวัสดุที่ปรับปรุงแล้วมีคุณภาพไม่เป็นไปตามข้อกำหนด จะต้องหยุดการก่อสร้างไว้ก่อน จนกว่าจะปรับแก้ได้ถูกต้องตามข้อกำหนด จึงอนุญาตให้ดำเนินการก่อสร้างต่อไปได้
- การเติมสารเคมี หากผู้ผลิตไม่กำหนดเป็นอย่างอื่น ให้ดำเนินการดังนี้
  - การเติมสารเคมีชนิดที่เป็นผง ทำได้โดยการใส่เครื่องจักรปูเกลี่ยลงบนชั้นทางเดิมก่อนการขุดผสม ถ้าเครื่องจักรเข้าปูเกลี่ยไม่ได้ให้ใช้แรงคนแทน การปูเกลี่ยต้องทำสม่ำเสมอเต็มความกว้างของการขุดผสมแต่ละเที่ยว

- การเติมสารเคมีชนิดที่เป็นของเหลว ทำได้โดยการใช้เครื่องจักรผสมสารเคมีเข้ากับน้ำให้สม่ำเสมอ แล้วฉีดพ่นเข้ากับวัสดุชั้นทางเดิมในขั้นตอนการผสม ระบบการสูบน้ำจะต้องเป็นแบบควบคุมโดยอัตโนมัติและต้องสัมพันธ์กับเครื่องจักรผสม
- ระหว่างการก่อสร้าง ต้องควบคุมความชื้นวัสดุให้ได้ตามที่กำหนด หากวัสดุส่วนใดมีความชื้นไม่ได้ตามที่กำหนด ผู้รับจ้างต้องแก้ไขให้ถูกต้อง ในกรณีที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชันร่วมด้วย ปริมาณน้ำรวมทั้งหมดในระหว่างการบดทับได้แก่ ปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันรวมกับปริมาณความชื้นของวัสดุก่อนการผสม และปริมาณน้ำที่เพิ่มภายหลัง
- การก่อสร้างรอยต่อ ในการก่อสร้างปรับปรุงชั้นทางเดิมมี 2 แบบ คือ รอยต่อตามยาว และรอยต่อตามขวาง ซึ่งมีความสำคัญต่อความแข็งแรงของโครงสร้างถนน รอยต่อที่ไม่ถูกต้องจะทำให้ชั้นทางไม่สม่ำเสมอเป็นจุดอ่อนทำให้ถนนเสียหายภายหลังได้ ในกรณีก่อสร้างชั้นทางมากกว่าหนึ่งชั้นทางควรก่อสร้างให้รอยต่อในแต่ละชั้นเหลื่อมกัน รอยต่อตามยาวแตกต่างกับรอยต่อตามขวาง จึงต้องพิจารณาแต่ละแบบดังนี้
- รอยต่อตามยาว ต้องจัดแนวรอยต่อไม่ให้อยู่ในแนวรอยล้อรถ ก่อนก่อสร้างต้องทำเครื่องหมายแนวจุดตัดแนวแรกให้ชัดเจน เพื่อให้อุปกรณ์จุดตัดเดินตรงตามแนวจุดตัดที่ทำเครื่องหมายไว้ ความกว้างและการเหลื่อมทับของแนวจุดตัดตามยาว ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นทางที่ปรับปรุงแล้ว ขนาดวัสดุ ชนิดและประสิทธิภาพของเครื่องจักร ความกว้างและการเหลื่อมทับแนวจุดตัดตามยาวปกติอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 เซนติเมตร ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของผู้ควบคุมงานรอยต่อตามขวาง เกิดขึ้นเมื่อเครื่องจักรจุดตัดเริ่มทำงานหรือหยุด หรือเมื่อชั้นทางที่ปรับปรุงแล้วนั้นเลยเกณฑ์ระยะเวลาดำเนินการก่อสร้างในสนามตามที่ระบุ ฉะนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดรอยต่อตามขวางมาก จึงควรทำการก่อสร้างอย่างต่อเนื่องไม่ควรหยุดการก่อสร้างโดยไม่จำเป็น เมื่อเครื่องจักรหยุดการจุดตัดในแต่ละครั้งให้ทำเครื่องหมายแนวที่เครื่องจักรหยุดบนชั้นทางตรงกับกึ่งกลางของอุปกรณ์จุดตัด ซึ่งเป็นจุดที่เครื่องจักรหยุดจ่ายวัสดุผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพ เมื่อเครื่องจักรจุดตัดจะทำงานต่อไป ให้จุดตัดเหลื่อมทับรอยต่อเข้าไปในชั้น



ทางที่ปรับปรุงแล้วไม่น้อยกว่าความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์จุดตัด ทั้งนี้ต้องไม่น้อยกว่า 150 เซนติเมตร

- การบดทับให้ดำเนินการทันทีเมื่อเครื่องจักรปูเกลี่ยชั้นทางที่ปรับปรุงแล้ว โดยดำเนินการควบคู่กัน ไปจนกว่าจะได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด ซึ่งการใช้ชุดเครื่องจักรบดทับ วิธีการและขั้นตอนการบดทับ ให้ดำเนินการตามที่กำหนดจากแปลงทดสอบเป็นหลัก การบดทับให้ดำเนินการให้เสร็จเรียบร้อยภายในเวลาที่กำหนด และต้องให้ได้ความแน่นตามที่กำหนดในคราวเดียว
- ระยะเวลาการดำเนินการผสมวัสดุผสมเพิ่มปรับปรุงคุณภาพกับวัสดุชั้นทางเดิม จนถึงการบดทับเสร็จสิ้น ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุผสมเพิ่มปรับปรุงคุณภาพที่นำมาใช้ผสม ในกรณีที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มปรับปรุงคุณภาพรวมตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ระยะเวลาดำเนินการให้กำหนดโดยระยะเวลาดำเนินการของวัสดุผสมเพิ่มปรับปรุงคุณภาพที่สันที่สุดเป็นเกณฑ์ ดังนี้
  - ปูนซีเมนต์ ไม่เกิน 2 ชั่วโมง
  - ปูนขาว, เถ้าลอย ไม่เกิน 24 ชั่วโมง
  - แอสฟัลต์อิมัลชัน ก่อนแอสฟัลต์อิมัลชันแตกตัว
  - โฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt) ไม่เกิน 7 วัน
  - สารเคมีอื่น ๆ ให้ใช้ตามข้อแนะนำของผู้ผลิต

ในกรณีจำเป็นต้องเพิ่มระยะเวลาดำเนินการก่อสร้างมากกว่าที่กำหนด ให้ผู้ควบคุมงานพิจารณาอนุญาตได้เป็นแต่ละกรณี เพราะชั้นทางที่ปรับปรุงด้วยวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพบางชนิด เช่น ปูนซีเมนต์ การบดทับเพิ่มในภายหลังจะทำให้ชั้นทางเสียหาย

- ในกรณีใช้ปูนซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพ และยังไม่ลาดยางชั้นไพรม์โค้ท (prime coat) ให้บ่มชั้นทางที่ปรับปรุงแล้วเพื่อควบคุมความชื้นไว้ โดยการพ่นน้ำให้ทั่วถึง เป็นระยะๆ สม่ำเสมอ เพื่อให้ผิวชั้นทางคงความเปียกชื้นไว้ได้ติดต่อกันอย่างน้อย 3 วัน นับจากวันที่บดทับแล้วเสร็จ ส่วนการใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพอื่น ให้บ่มตามกำหนดเวลาของผลการออกแบบส่วนผสมกำหนด

### 2.3.9 การตรวจสอบชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วเสร็จ

- การตรวจสอบด้านคุณภาพ
- การทดสอบหาค่าความแน่นการบดทับในสนาม ให้ดำเนินการตามวิธีการทดสอบที่ มทข. (ท) 501.4 : วิธีการทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทาง

ในสนาม โดยทำการทดสอบภายในเวลาที่เหมาะสมหลังจากการบดทับแล้วเสร็จ ซึ่งให้อยู่ในดุลยพินิจของผู้ควบคุมงาน โดยทำการทดสอบทุกระยะ 100 เมตร ต่อความกว้าง 1 ช่องของการขุดตัด ค่าความแน่นในสนามของชั้นทางที่ปรับปรุงแล้ว หากไม่ได้กำหนดไว้เป็นอย่างอื่น ให้ใช้ข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- กรณีปรับปรุงคุณภาพด้วย วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพประเภท ปูนซีเมนต์ ปูนขาว หรือเถ้าลอย ค่าความแน่นในสนามต้องไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ Modified Proctor Density ตามวิธีการทดสอบที่ มทข. (ท) 501.2 : วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน
- กรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพที่มีแอสฟัลต์ร่วมด้วย ค่าความแน่นในสนามต้องไม่น้อยกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ Modified Proctor Density ตามวิธีการทดสอบที่ มทข. (ท) 501.2 : วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน
- การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด ใช้ตรวจสอบชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพประเภทสารเคมี เช่น ปูนซีเมนต์ หรือวัสดุผสมเพิ่มรวมที่ไม่มีแอสฟัลต์ผสม โดยการนำวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว ในขณะที่ดำเนินการก่อสร้างมาทำการบดอัด ตาม มทข. (ท) 501.2: วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 ช่วงความยาวของการขุดตัด บ่มก้อนตัวอย่างโดยใช้พลาสติกห่อเป็นเวลา 7 วัน แล้วเอาถุงพลาสติกออกนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำขึ้นมาผึ่งให้แห้งด้วยอากาศจนให้มีสภาพอิมตัวผิวแห้ง นำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength) ซึ่งต้องได้ไม่น้อยกว่าแบบกำหนด
- การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม ใช้ตรวจสอบเฉพาะชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพประเภทแอสฟัลต์ และ/หรือวัสดุผสมเพิ่มรวมที่มีแอสฟัลต์ร่วมด้วย โดยนำวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว ในขณะที่ดำเนินการก่อสร้างมาทำการบดอัดตามวิธีการทดสอบ มทข.(ท) 607 : มาตรฐานการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 ช่วงความยาวของการขุดตัด แล้วนำไปทดสอบก กำลังรับแรงดึงตาม ASTM D : 4123 Standard Test Method for Indirect Tension Test ซึ่งต้องได้ไม่น้อยกว่าแบบกำหนด
- การตรวจสอบด้านกายภาพ

- ชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว จะต้องมีความกว้าง ความหนา ค่าระดับ และความลาดเอียงเป็นไปตามรูปแบบและข้อกำหนด
- ผิวของชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วต้องเรียบสม่ำเสมอ ไม่ปรากฏความเสียหายใดๆ เมื่อใช้ไม้บรรทัดขอบตรงยาว 3 เมตร วางทาบบนผิวทางในแนวตั้งฉากและขนานกับถนน ระดับผิวทางจะแตกต่างจากระดับของไม้บรรทัดได้ไม่เกิน 10 มิลลิเมตร

## 2.4 ทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (sieve analysis) (มทข.(ท) 501.8-2545)

### 2.4.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้ เป็นการหาการกระจายของขนาดเม็ดดิน (particle size distribution) ทั้งชนิดเม็ดละเอียดและหยาบ โดยให้ผ่านตะแกรงจากขนาดใหญ่ จนถึงขนาดเล็กที่มีขนาดช่องผ่าน 0.075 มม. (เบอร์ 200) แล้วเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ผ่านหรือค้างตะแกรงขนาดต่าง ๆ กับน้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่าง

### 2.4.2 นิยาม

การกระจายของขนาดเม็ดดิน หมายถึงการที่มวลดินประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาดต่าง ๆ กัน เช่น ตั้งแต่ 10 ซม. ลงมาจนกระทั่ง 0.0002 มม. ซึ่งคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของมวลดินจะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดิน

การกระจายของขนาดเม็ดดิน แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดดินในลอการิทึม (logarithm) อยู่บนแกนอน และร้อยละโดยน้ำหนักของเม็ดที่มีขนาดเล็กกว่าที่ระบุ (percent finer) อยู่บนแกนตั้ง ซึ่งเรียกว่า กราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (grainsize distribution curve)

### 2.4.3 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- ตะแกรงร่อนดิน (sieve) ช่องผ่านต้องเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดช่องผ่านต่าง ๆ ได้ขนาดตามต้องการ พร้อมเครื่องมือเขย่าตะแกรง
- เครื่องชั่ง แบบบาลานซ์ (balance) จะต้องสามารถชั่งได้ละเอียดถึงร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักตัวอย่าง
- ตู้อบ (oven) ต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส ( $230 \pm 9$  องศาฟาเรนไฮต์)
- เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง (sample splitter)

- แปร่งทำความสะอาดตะแกรงชนิดลวดทองเหลือง และแปร่งขน หรือแปร่งพลาสติก
- ภาชนะสำหรับใช้แช่ และล้างตัวอย่างดิน ด้วยมือหรือด้วยชนิดใช้เครื่องเขย่า

#### 2.4.4 การเตรียมตัวอย่าง

- การเตรียมตัวอย่างโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง นำตัวอย่างมาลวกให้เข้ากัน และแยกตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่างในขณะที่ตัวอย่างมีความชื้นเพื่อลดการแยกตัว ถ้าตัวอย่างไม่มีส่วนละเอียดอาจจะแบ่งขณะที่ตัวอย่างแห้งอยู่ก็ได้ ถ้ามีส่วนละเอียดจับเป็นก้อนใหญ่หรือมีส่วนละเอียดจับกันเองเป็นก้อนต้องทำให้ส่วนละเอียดหลุดออกจากก้อนใหญ่โดยให้ทุบแยกดินออกเป็นเม็ดอิสระด้วยค้อนยางแต่ต้องระวังอย่าให้แรงมากจนเม็ดดินแตก
- การเตรียมตัวอย่างโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง นำตัวอย่างที่มีส่วนละเอียดจับกันเป็นก้อนไปแยกออกจากกันโดยใช้ค้อนยางทุบแล้วนำตัวอย่างไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส ( $230 \pm 9$  องศาฟาเรนไฮต์) เพื่อหาน้ำหนักตัวอย่างแห้ง นำตัวอย่างใส่ภาชนะสำหรับใช้ล้างตัวอย่าง โดยใช้ น้ำยาล้างส่วนละเอียด ซึ่งเตรียมได้จากการละลายฟอสโฟเตียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต ซึ่งทำให้เป็นกลางด้วยโซเดียมคาร์บอเนต (sodium hexametaphosphate buffered with sodium carbonate) 45.7 กรัม ละลายในน้ำ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนผสมกันให้ทั่วตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชม. แล้วนำไปเขย่า ประมาณ 10 นาที ขณะเขย่าระวังอย่าให้น้ำกระฉอกออกจากภาชนะ เทตัวอย่างดินในภาชนะลงบนตะแกรงเบอร์ 200 ถ้าหากมีตัวอย่างขนาดใหญ่ป่นอยู่มากควรรีใช้ตะแกรงที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 200 ซ้อนไว้ข้างบน แล้วใช้น้ำล้างจนกว่าไม่มีวัสดุผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ตะแกรงที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 200 ซ้อนไว้ข้างบน แล้วใช้น้ำล้างจนกว่าไม่มีวัสดุผ่านตะแกรงเบอร์ 200 อีก เทตัวอย่างลงในภาชนะ แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส ( $230 \pm 9$  องศาฟาเรนไฮต์)

#### 2.4.5 การทดสอบ

- นำตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมตัวอย่าง แล้วแต่จะต้องการทดสอบแบบใดมา โดยประมาณให้ได้ตัวอย่างเมื่อแห้งแล้วตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดกะของวัสดุ

ขนาดตะแกรง	น้ำหนักตัวอย่างไม่น้อยกว่า (กก.)
4.75 มม. (เบอร์ 4)	0.5
9.5 มม. (3/8 นิ้ว)	1.0
12.5 มม. (1/2 นิ้ว)	2.0
19.0 มม. (3/4 นิ้ว)	5.0
25.0 มม. (1 นิ้ว)	10.0
37.5 มม. (1 1/2 นิ้ว)	15.0
50.8 มม. (2 นิ้ว)	20.0
63.0 มม. (2 1/2 นิ้ว)	25.0
75.0 มม. (3 นิ้ว)	30.0
90.0 มม. (3 1/2 นิ้ว)	35.0

- นำตัวอย่างไปเขย่าในตะแกรงขนาดต่าง ๆ ตามต้องการ การเขย่านี้ต้องให้ตะแกรงเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบและแนวตั้ง รวมทั้งมีแรงกระแทกขณะเขย่าด้วย เขย่านานจนกระทั่งตัวอย่างผ่านตะแกรงแต่ละชนิดใน 1 นาที ไม่เกินร้อยละ 1 ของตัวอย่างในตะแกรงนั้น หรือใช้เวลาเขย่านานทั้งหมดประมาณ 15 นาที เมื่อเขย่าเสร็จแล้วถ้ามีตัวอย่างก้อนใหญ่กว่าตะแกรง ขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ต้องไม่มีก้อนตัวอย่างซ้อนกันในตะแกรง และตัวอย่างที่มีเม็ดเล็กกว่าตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ต้องมีตัวอย่างค้างตะแกรงแต่ละขนาดไม่เกิน 6 กรัม ต่อ 1,000 ตร.มม. หรือไม่เกิน 200 กรัม สำหรับตะแกรงเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มม. (8 นิ้ว) นำตัวอย่างที่ค้างแต่ละขนาดของตะแกรงไปชั่ง

#### 2.4.6 การคำนวณ

- หาน้ำหนักที่ค้าง (weigh retained) บนตะแกรงแต่ละขนาดโดยชั่งน้ำหนักของตัวอย่างดินที่ค้างบนแต่ละตะแกรงและน้ำหนักที่หายไป เมื่อเอาน้ำหนักของตัวอย่างในทุกตะแกรงรวมกันแล้ว หักออกจากน้ำหนักตัวอย่างอบแห้งทั้งหมด ซึ่งใช้ทดสอบจะได้น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 รวมกับน้ำหนักที่ค้างบนถาดรอง (pan)
- หาน้ำหนักที่ผ่าน (weight passing) ตะแกรงแต่ละขนาด โดยคิดจากบรรทัดล่างของช่องน้ำหนักที่ค้างขึ้นไป (ดูแบบฟอร์ม) เอาน้ำหนักของน้ำหนักที่ค้างบนถาดรองเป็นช่องน้ำหนักที่ค้าง ของตะแกรง เบอร์ 200 รวมน้ำหนักของ

น้ำหนักที่ค้าง น้ำหนักช่องน้ำหนักที่ผ่าน ของตะแกรงเบอร์ 200 เป็นน้ำหนักของช่องน้ำหนักที่ผ่าน บรรทัดบนสุดจะเท่ากับน้ำหนักของตัวอย่างแห้งทั้งหมด ซึ่งใช้ทดสอบ

- จำนวนหาร้อยละผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (percentage passing) ได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างแห้งทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ}} \times 100$$

#### 2.4.7 การรายงาน

ให้รายงานค่าร้อยละ ผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ โดยน้ำหนักด้วยทศนิยม 1 ตำแหน่ง

#### 2.4.8 ข้อควรระวัง

- การแบ่งตัวอย่างด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่าง ต้องใช้เครื่องมือขนาดช่องกว้างประมาณ 1 1/2 เท่าของก้อนโตที่สุด
- ตรวจสอบตะแกรงบ่อย ๆ ถ้าชำรุดต้องซ่อมก่อนใช้ โดยเฉพาะเบอร์ 200
- ห้ามใส่ตัวอย่างลงในตะแกรงขณะที่ยังร้อนอยู่
- การทุบตัวอย่างดินต้องไม่แรงมากจนทำให้เม็ดดินแตก
- การเขย่าอย่างเขย่านานจนตัวอย่างกระแทกแตกเป็นผง

### 2.5 วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (coarse aggregates) โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (los angeles abrasion) มทช.(ท) 501.9-2545

#### 2.5.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้ เป็นการหาค่าความสึกหรอของหินย่อย กรวดย่อย กรวด วัสดุลูกรัง หรือมวลรวมดิน (soil aggregates) และวัสดุชนิดเม็ดหยาบ

#### 2.5.2 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- เครื่องมือทดสอบความสึกหรอมีลักษณะขนาด ประกอบด้วยทรงกระบอกเหล็กปิดหัวและท้ายมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $711 \pm 5$  มม. ( $28 \pm 0.2$  นิ้ว) ความยาวภายใน  $508 \pm 5$  มม. ( $20 \pm 0.2$  นิ้ว) ทรงกระบอกนี้ติดอยู่กับเพลาละหมุนรอบแกนได้ในแนวราบ มีช่องสำหรับใส่วัสดุพร้อมฝาเหล็กปิด ฝาเหล็กเมื่อปิดแล้วต้องมีลักษณะผิวเหมือนกับผิวด้านในของทรงกระบอกเหล็ก และ

เสมอกัน ซึ่งไม่ทำให้ลูกเหล็กทรงกลม (abrasive charge) สะดุดเวลากลิ้งผ่าน รอยต่อมีแผ่นเหล็กขวางสูง  $89 \pm 2$  มม. ( $3.5 \pm 0.1$  นิ้ว) ยาว  $508 \pm 2$  มม. ( $20 \pm 0.2$  นิ้ว) ติดแน่นตามยาวด้านในทรงกระบอกเหล็ก ระยะจากแผ่นเหล็ก ขวางถึงช่องสำหรับใส่วัสดุไม่น้อยกว่า 1,270 มม. (50 นิ้ว) วัดตามความยาว เส้นรอบวงภายนอกทรงกระบอกเหล็ก

หมายเหตุ แผ่นเหล็กขวางควรมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ติดอยู่กับผนังของ ทรงกระบอกเหล็ก หรืออาจใช้เหล็กฉากแทน โดยติดที่ริมฝาเหล็กช่องใส่วัสดุ ให้ด้านนอกของ เหล็กฉากหันไปตามทิศทางที่หมุน

- ตะแกรงสำหรับ หาขนาดของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ ใช้ตะแกรงมีช่องผ่านเป็น สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 75.0 มม. (3 นิ้ว), 63.0 มม. (2 1/2 นิ้ว), 50.8 มม. (2 นิ้ว), 37.5 มม. (1 1/2 นิ้ว) 25.0 มม. (1 นิ้ว), 19.0 มม. (3/4 นิ้ว), 12.5 มม. (1/2 นิ้ว), 9.5 มม. (3/8 นิ้ว), 6.4 มม. (1/4 นิ้ว), 4.75 มม. (เบอร์ 4) , 2.36 มม. (เบอร์ 8), 1.70 มม. (เบอร์ 12)
- ลูกเหล็กทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 46.8 มม. (1 27/32 นิ้ว แต่ละลูก หนักระหว่าง 390-445 กรัม จำนวนลูกเหล็กทรงกลมขึ้นอยู่กับชั้นของตัวอย่าง ซึ่งกำหนดไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 จำนวนลูกเหล็กทรงกลม ที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชั้น (grading)

ชั้น	ลูกเหล็กทรงกลม (ลูก)	น้ำหนักรวม (กรัม)
A	12	$5,000 \pm 25$
B	11	$4,584 \pm 25$
C	8	$3,330 \pm 20$
D	6	$2,500 \pm 15$
E	12	$5,000 \pm 25$
F	12	$5,000 \pm 25$
G	12	$5,000 \pm 25$

- เครื่องชั่งต้องสามารถชั่งได้ 15 กิโลกรัม ความละเอียดอ่านได้ถึง 1 กรัม

### 2.5.3 การเตรียมตัวอย่าง

- ถ้าตัวอย่างไม่มีดินเหนียวปน เช่น กรวดปนทราย หินโม้ ให้ตากตัวอย่างจนแห้ง หรืออบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส (221-230 องศาฟาเรนไฮต์)
- ถ้าตัวอย่างมีดินเหนียวปน หรือมีส่วนละเอียดติดแน่นกับก้อนตัวอย่างให้นำตัวอย่างไปล้างน้ำเอาส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ออกทิ้งแล้วนำส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 8 มาอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส (221-230 องศาฟาเรนไฮต์)
- นำตัวอย่างไปแยกขนาดตามชั้นในตารางที่ 2.4 ถ้าเข้าได้หลายชั้น ให้เลือกใช้ตัวที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการใช้งานมากที่สุด

#### 2.5.4 การทดสอบ

นำตัวอย่างที่เตรียมไว้และลูกเหล็กทรงกลม ตามจำนวนลูกในตารางที่ 2.3 ใส่เข้าไปในเครื่องทดสอบหาความสึกหรอหมุนเครื่องด้วยความเร็วที่ 30-33 รอบต่อนาที ให้ได้จำนวนตามตารางที่ 2.4 เมื่อหมุนได้ครบตามกำหนดแล้วให้เอาตัวอย่างออกจากเครื่องล้างส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 12 ออกทิ้ง นำส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 12 มาอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส (221-230 องศาฟาเรนไฮต์) จนได้น้ำหนักคงที่จึงชั่งหาน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือ

ตารางที่ 2.4 น้ำหนักชั้นของตัวอย่างต่อจำนวนรอบ

ขนาดตะแกรง (มม.)		น้ำหนัก (กรัม) และ ชั้นของตัวอย่าง						
ผ่าน	ค้าง	A	B	C	D	E	F	G
75.0	63.0					2,500±50		
63.0	50.8					2,500±50		
50.8	37.5					5,000±50	5,000±50	
37.5	25.0	1,250±25					5,000±50	5,000±25
25.0	19.0	1,250±25						5,000±25
19.0	12.5	1,250±10	2,500±10					
12.5	9.5	1,250±10	2,500±10					
9.5	6.3			2,500±10				
6.3	4.75 (#4)			2,500±10				
4.75 (#4)	2.36(#8)				5,000±10			
น้ำหนักตัวอย่างรวม		5,000±10	5,000±10	5,000±10	5,000±10	10,000±100	10,000±75	10,000±50
จำนวนรอบ		500				1,000		



### 2.5.5 การคำนวณ

$$\text{ความสึกหรอเป็นร้อยละ} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 =$$

$W_1$  = น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ

$W_2$  = น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12

### 2.5.6 การรายงาน

ให้รายงานค่าความสึกหรอเป็นร้อยละ ด้วยทศนิยม 1 ตำแหน่ง

### 2.5.7 ข้อควรระวัง

- ให้ทำการชั่งลูกเหล็กทรงกลม แต่ละลูกอย่างน้อย 1 ครั้ง ทุก ๆ 6 เดือน เพื่อตรวจสอบให้เป็นไปตามข้อกำหนด
- ในกรณีที่แผ่นเหล็กขวาง เป็นเหล็กจากตัดริมแผ่นเหล็กปิดช่องใส่วัสดุ การติดตั้งให้ด้านนอกของเหล็กจากหันไปในทิศทางที่เครื่องหมาย

## 2.6 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. (C.B.R.) (มทข.(ท) 501.3-2545)

### 2.6.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้เป็นการหาค่าเปรียบเทียบ ค่าความสามารถในการรับน้ำหนัก (bearing value) กับวัสดุหินมาตรฐานเพื่อทดสอบวัสดุมวลรวมดิน (soil aggregate) หินคลุกหรือวัสดุอื่นใด เมื่อทำการบดอัดวัสดุนั้นโดยใช้ดัมบดอัดในแบบ (mold) เมื่อมีความชื้นที่ความแน่นแห้งสูงสุด (optimummoisture content) หรือปริมาณอื่นใด เพื่อนำมาใช้ออกแบบโครงสร้างของถนน และเพื่อใช้ควบคุมงาน เมื่อบดอัดให้ได้ความแน่นและความชื้นตามต้องการ

การทดสอบ ซี.บี.อาร์. อาจทำได้ 2 วิธี คือ

วิธี ก. การทดสอบแบบแช่น้ำ (soaked)

วิธี ข. การทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (unsoaked)

ถ้าไม่ระบุวิธีใด ให้ใช้วิธี ก.

### 2.6.2 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- loading; device แบบ hydraulic jack หรือ screw jack มีอุปกรณ์วัดแรงได้ไม่น้อยกว่า 5,000 กิโลกรัม (ประมาณ 10,000 ปอนด์)
- แบบสำหรับเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน  $152.4 \pm 0.66$  มม. ( $6.0 \pm 0.026$  นิ้ว) สูง  $177.8 \pm 0.66$  มม. ( $7.0 \pm 0.016$  นิ้ว) พร้อมปลอก

(collar) สูงโดยประมาณ 50.8 มม. (2.0 นิ้ว) และฐานแบบ (BASE PLATE) สำหรับยึดแบบและบล็อก

- แท่งโลหะรอง (spacer disc) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 134.9 (5 5/16 นิ้ว) มีความสูงขนาดต่าง ๆ
- ตั้มน้ำหนัก 4,537 กรัม (10 ปอนด์) และ 2,495 กรัม (5.5 ปอนด์)
- เครื่องวัดการพองตัว ประกอบด้วย
  - แผ่นวัดการพองตัว (swell plate)
  - สามขา (tripod) สำหรับติดมาตรวัด (dial gauge) วัดได้ 25 มม. ซึ่งวัดได้ละเอียด 0.01 มม. เพื่อวัดอัตราการพองตัวของดินเมื่อแช่น้ำ
- โลหะถ่วงน้ำหนัก (surcharge weight) เป็นเหล็กทรงกระบอกแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง 149.2 มม. (5 7/8 นิ้ว) มีรูกลวง เพื่อให้ท่อนกด (piston) ลอดไปได้หนักแผ่นละ 2,268 กรัม (5 ปอนด์)
- ท่อนกด ทำด้วยโลหะทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 49.5 มม. (1.95 นิ้ว) มีเนื้อที่หน้าตัด 1,935.5 ตร.มม. (3 ตร.นิ้ว) ยาวไม่น้อยกว่า 102 มม. (4 นิ้ว)
- เครื่องดันตัวอย่างเป็นเครื่องดันดินออกจากแบบภายหลัง เมื่อทดสอบเสร็จแล้ว
- เครื่องชั่งแบบบาลานซ์ (balance) มีขีดความสามารถชั่งได้อย่างน้อย 20 กก. ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กิโลกรัม
- เครื่องชั่งแบบสเกล (scale) หรือแบบบาลานซ์ มีขีดความสามารถชั่งได้อย่างน้อย 1,000 กรัม ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม
- ตู้อบ (oven) ต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ได้ที่  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส
- เหล็กปาด มีความยาวไม่น้อยกว่า 300 มม. และไม่ยาวเกินไปหนาประมาณ 3.0 มม. (0.12 นิ้ว)
- เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง
- ตะแกรงร่อนดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มม. (8 นิ้ว) 50.8 มม. (2 นิ้ว) มีขนาด ดังนี้
  - ก. ขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว)
  - ข. ขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4)
- เครื่องผสม เป็นเครื่องมือจำเป็นต่าง ๆ ที่ใช้ผสมตัวอย่างกับน้ำ เช่น ถาด ช้อน พลั่ว เกรียง คอนยาง ถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำ

- ตลับบรรจุดินสำหรับใส่ตัวอย่างดิน เพื่ออบหาจำนวนน้ำในดิน
- นาฬิกาจับเวลา

### 2.6.3 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดสอบ

กระดาศกรงอย่างหยาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว)

### 2.6.4 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างได้แก่ ดิน หินคลุก หรือวัสดุผสมรวมดินหรือวัสดุอื่นใดที่ต้องการทดสอบ ให้เตรียมตัวอย่าง ดังนี้

- วัสดุตัวอย่าง ก่อนจะนำมาทดสอบจะต้องปล่อยให้แห้ง (air dry) ในห้องปฏิบัติการทำการแบ่งสี่ (quartering) แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ ¼ นิ้ว ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ ¼ นิ้วให้ทิ้งไปและชดเชยด้วยดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ ¼ นิ้ว แต่ค้างบนตะแกรง เบอร์ 4 ด้วยจำนวนน้ำหนักเท่ากัน
- หาปริมาณความชื้นที่ความแน่นสูงสุด โดยวิธีการทดสอบความแน่นตามมทช. (ท) 501.1-2545 หรือ มทช.(ท) 501.2-2545

### 2.6.5 การทดสอบ

สำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ต้องมีการแช่น้ำ (unsoaked c.b.r. test)

- ชั่งดินที่เตรียมไว้ประมาณ 6 กก. (12 ปอนด์) และนำดินตัวอย่างประมาณ 100 กรัม เพื่อนำไปหาความชื้นในดินตัวอย่าง (initial water content)
- เตรียมแบบไว้ 2 ชุด ชั่งน้ำหนักแบบ (ไม่รวมฐานแบบ)
- ประกอบแบบ เข้ากับฐานแบบและแท่งโลหะรอง ใช้กระดาศกรงปูทับบนแท่งโลหะรอง เพื่อป้องกันไม่ให้เกาะติดกับแผ่นเหล็ก
- กระทุ้งดินอัดแน่นในแบบ ตามวิธีการทดสอบความแน่นที่ปริมาณความชื้น ที่ความแน่นแห้งสูงสุด (เตรียมตัวอย่างดิน 3 ตัวอย่าง โดยทำการบดอัดแต่ละชั้นด้วยตุ้ม จำนวน 12 ครั้ง 25 ครั้ง และ 56 ครั้งต่อชั้น)
- หลังจากบดอัดจนครบจำนวนชั้น และจำนวนครั้งแล้วถอดปลอกออกใช้เหล็กปาดปาดดินส่วนที่สูงเกินขอบแบบ พร้อมกับซ่อมแต่งผิวบนของดินตัวอย่างให้เรียบเสมอกับปากแบบ
- ถอดฐานแบบ และแท่งโลหะรองออก นำแบบและดินไปชั่งน้ำหนัก เพื่อจะนำไปหาความแน่นชื้น (wet density)
- เอากระดาศกรงวางบนฐานแบบ เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะแบบติดแผ่นเหล็ก ประกอบแบบ ที่มีดินอัดแน่นนี้เข้ากับฐานแบบ โดยให้ปากแบบด้านที่มีดิน

เสมอปากวางบนฐานแบบ และส่วนที่มีช่องว่างอยู่ด้านบนสำหรับการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ

- วางแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนัก (surcharge) จำนวน 2 ชั้น สำหรับวัสดุพื้นทาง, วัสดุรองพื้นทาง, วัสดุคัดเลือกและจำนวน 3 ชั้น สำหรับวัสดุคันทางทับบนดินตัวอย่างในแบบ
- นำแบบเข้าเครื่องกดทดสอบ ซึ่งมีท่อนกดขนาดพื้นที่หน้าตัด 1,935.5 ตร.มม. (3 ตร.นิ้ว) ประกอบติดอยู่ จัดให้ผิวหน้าของดินในแบบแตะสัมผัสกับท่อนกดดังกล่าว จัดเข็มของมาตรวัด ที่จะใช้วัดค่าการจมตัว (penetration) ให้อยู่ที่จุดศูนย์
- กดท่อนกดในอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที พร้อมกับอ่านค่าน้ำหนักที่ตรงกับค่าการจมตัว 0, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.175, 0.200, 0.250, 0.300, 0.350, 0.400, 0.450 และ 0.500 นิ้ว
- เสร็จแล้วถอดแบบออกจากเครื่องกดทดสอบ เก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 4.75 มม. หรือประมาณ 300 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 19.0 มม. แล้วนำไปหาความชื้น สำหรับการทดสอบแบบแช่น้ำ
- วางแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนัก จำนวน 2 ชั้น สำหรับวัสดุพื้นทาง, วัสดุรองพื้นทาง, วัสดุคัดเลือก และจำนวน 3 ชั้น สำหรับวัสดุคันทางลงบนดินตัวอย่าง ใส่แผ่นวัดการพองตัว สำหรับวัดอัตราการบวมของดิน ซึ่งมีด้ามขัดเกลียวขึ้นลงได้ติดอยู่กลางแผ่น ก่อนวางแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักลงบนดินตัวอย่าง จะต้องเอากระดาษรองวางคั่นได้แผ่นนี้เสียก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้ดินติดแน่นกับแผ่นเหล็กหลังจากแช่น้ำแล้ว
- แช่แบบที่เตรียมไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ ให้น้ำท่วมแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักประมาณ 1 นิ้ว ใช้มาตรวัดอ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว ยึดติดกับสามขา แล้ววางบนปากแบบ จัดให้ปลายของมาตรวัดแตะสัมผัสกับก้านของแผ่น วัดการพองตัว เพื่อวัดค่าการพองตัวของดินต่อไป
- จดค่าการขยายตัวจากมาตรวัดทุกวัน จนครบ 4 วัน (ถ้าหากค่าการพองตัวคงที่อาจหยุดอ่านได้ หลังจากแช่น้ำแล้ว 48 ชั่วโมง)
- ยกแบบออกจากน้ำและตะแคงแบบ เพื่อรินน้ำทิ้งและปล่อยให้แห้งประมาณ 15 นาที เพื่อให้น้ำไหลออกจากแบบ

- นำแบบพร้อมดินไปชั่งหาน้ำหนัก
- เสร็จแล้วถอดแบบออกจากเครื่องกดทดสอบ เก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 4.75 มม. หรือประมาณ 300 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 19.0 มม. แล้วนำไปหาความชื้น
- เขียนกราฟระหว่างน้ำหนักกด และค่าการจมตัว (stress vs penetration) เพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. ต่อไปสำหรับในการเขียนกราฟระหว่างน้ำหนักกด และค่าการจมตัว เพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. จำเป็นจะต้องทำการแก้เส้นกราฟโดยเลื่อนจุดศูนย์กลางของค่าการจมตัว ในกรณีที่เส้นกราฟหงายเพื่อให้ได้ค่า ซี.บี.อาร์. ที่แท้จริง
- เมื่อได้ค่า ซี.บี.อาร์. ของแต่ละตัวอย่างแล้วเขียนเส้นกราฟ ระหว่างค่า ซี.บี.อาร์. และค่าความหนาแน่นแห้ง (dry density) เพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. เป็นร้อยละของการบดอัดที่ต้องการต่อไป

#### 2.6.6 การคำนวณ

- คำนวณหาค่าความชื้นในดินเป็นร้อยละ

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100$$

เมื่อ  $w$  = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

$W_1$  = น้ำหนักของดินชื้น หน่วยเป็นกรัม

$W_2$  = น้ำหนักของดินอบแห้ง หน่วยเป็นกรัม

- คำนวณหาค่าความแน่นชื้น (wet density)

$$\gamma_w = \frac{A}{V}$$

เมื่อ  $\gamma_w$  = ความแน่นชื้นของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$A$  = น้ำหนักดินชื้นที่บดอัดในแบบ หน่วยเป็นกรัม

$V$  = ปริมาตรของแบบ ซึ่งเท่ากับปริมาตรของดินชื้นที่บดอัดในแบบ  
หน่วย เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

- คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (dry density)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{1 + \frac{w}{100}}$$

เมื่อ  $\gamma_d$  = ความแน่นแห้งของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$\gamma_w$  = ความแน่นชื้นของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

W = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

- กำหนดค่าการพองตัว (swelling)

$$\text{ค่าการพองตัวร้อยละ} = \frac{\text{ค่าการพองตัว ม.ม.}}{\text{ความสูงของแท่งตัวอย่าง}}$$

ค่าการพองตัว (มม.) = ผลต่างระหว่างการอ่านค่าที่มาตรวัด ครั้งแรกและครั้งสุดท้าย

- กำหนดค่า ซี.บี.อาร์.

ในการกำหนดค่า ซี.บี.อาร์. ให้ใช้น้ำหนักมาตรฐาน (standard load) ดังนี้

ตารางที่ 2.5 น้ำหนักมาตรฐานตากการกดท่อนเหล็กขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้วของวัสดุหิน  
คลุก

ค่าการจมตัว (มม.)	น้ำหนักมาตรฐาน (standard load) กิโลกรัม	ค่าน้ำหนักมาตรฐาน (standard unit load) กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
2.54 (0.1")	1,360.8 (3,000 lb)	70.3 (1,000 lb/in)
5.08 (0.2")	2,041.2 (4,500 lb)	105.46 (1,500 lb/in)
7.62 (0.3")	2,585.5 (5,700 lb)	133.59 (1,900 lb/in)
10.16 (0.4")	3,129.8 (6,900 lb)	161.71 (2,300 lb/in)
12.70 (0.5")	3,538.0 (7,800 lb)	182.81 (2,600 lb/in)

จากสูตร

$$\text{ซี.บี.อาร์. ร้อยละ} = \frac{X}{Y} \cdot 100$$

เมื่อ X = ค่าน้ำหนักที่อ่านได้ต่อหน่วยพื้นที่ของท่อนกด (สำหรับค่าการจมตัวที่ 2.54 มม. หรือ 0.1 นิ้ว และที่เพิ่มขึ้นอีกทุก ๆ 2.54 มม.)

Y = ค่าน้ำหนักมาตรฐาน (standard unit load) กก./ตร.ซม. (จากตารางข้างต้น)

### 2.6.7 การรายงาน

ในการทำการทดสอบ ซี.บี.อาร์. ให้รายงาน ดังนี้

- ค่า ซี.บี.อาร์. ที่ความแน่นร้อยละ ของความแน่นแห้งสูงสุด (แบบสูงกว่ามาตรฐานหรือแบบมาตรฐาน) ใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง
- ค่าความแน่นแห้งที่ให้ค่า ซี.บี.อาร์. ใช้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง
- ค่าการพองตัว ใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง
- ค่าอื่น ๆ

เกณฑ์การตัดสินและความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

ค่า ซี.บี.อาร์. เป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการรับน้ำหนักกับวัสดุหินมาตรฐาน ดังนั้น จึงไม่มีการกำหนดเกณฑ์ตัดสินและความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

ข้อควรระวัง

- สำหรับดินจำพวกดินเหนียวมาก (heavy clay) หลังจากตากแห้งแล้วให้ทุบด้วยก้อนยาง จนได้ตัวอย่างผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้
- ในการใช้ค้อนทำการบดอัด ให้วางแบบบนพื้นที่ยึดแน่น แข็งแรง ราบเรียบ เช่น พื้นคอนกรีตไม่ให้แบบกระดก หรือกระดอนขึ้นขณะทำการบดอัด
- ในการทดสอบหาค่าการจมตัว โดยใช้เครื่องทดสอบแบบวงแหวน (proving ring) เป็นตัวอย่างอ่านน้ำหนักและใช้มาตรวัดค่าการจมตัวติดที่โครง (frame) ของเครื่องทดสอบต้องทำการแก้ค่าการจมตัว เนื่องจากการหดตัวของวงแหวน (proving ring) โดยหักค่าการหดตัวของวงแหวนออกจากค่าการจมตัว กรณีที่ติดมาตรวัดค่าการจมตัว (penetration dial) ที่ท่อนกไม่ต้องปฏิบัติตามความในข้อนี้
- ในการเขียนกราฟระหว่างค่าน้ำหนักมาตรฐาน และค่าการจมตัว จำเป็นจะต้องแก้จุดศูนย์สำหรับเส้นกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายขึ้น เนื่องจากความไม่ราบเรียบ หรือเกิดจากการอ่อนยุบที่ผิวหน้าของตัวอย่างเนื่องจากการแช่น้ำ ให้ทำการแก้โดยลากเส้นตรงให้สัมผัสกับเส้นที่ชันที่สุดของส่วนโค้งของเส้นกราฟไปตัดกับแกนตามแนวราบ คือเส้นที่ลากผ่านค่าน้ำหนักมาตรฐาน เท่ากับศูนย์ ต่อจากนั้นให้เลื่อนค่าศูนย์ของค่าการจมตัวไปที่จุดที่ตัด แล้วจึงหาค่า ซี.บี.อาร์. ที่ปรับค่า (corrected c.b.r. value) ต่อไป

- ค่า ซี.บี.อาร์. ที่ได้จากการปรับค่า หรือที่ได้จริงจากการอ่านค่าน้ำหนักมาตรฐาน (true load value) ซึ่งคำนวณจากค่าการจมตัวที่ 2.54 มม.(0.1 นิ้ว) และที่ค่าการจมตัว 5.08 มม. (0.2 นิ้ว) เป็นค่า ซี.บี.อาร์. ที่ใช้รายงาน โดยปกติค่า ซี.บี.อาร์. ที่มีค่าการจมตัว 2.54 มม. จะต้องมีค่าสูงกว่าค่า ซี.บี.อาร์. ที่มีค่าการจมตัว 5.08 มม. ถ้าหากไม่เป็นดังนั้น คือค่า ซี.บี.อาร์. ที่ 5.08 มม. สูงกว่าที่ 2.54 มม. ให้ทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบใหม่ทั้งหมด แต่ถ้าค่า ซี.บี.อาร์. ที่ได้ยังคงสูงกว่าอีก ให้ใช้ค่า ซี.บี.อาร์. 5.08 มม.
- ในการทำตัวอย่างเพื่อทดสอบ ในกรณีที่ต้องการบดอัดมากหรือน้อยกว่าที่ต้องการตามวิธีการทดสอบนี้ อาจจะมีการบดอัดเป็นชั้นละ 75 ครั้ง หรือลดการบดอัดเป็นชั้นละ 8 ครั้ง เพื่อให้ได้ตัวอย่างมากขึ้นในการนำมาเขียนเส้นกราฟ
- คู่มือที่ใช้ทำการลดอัดเพื่อเตรียมตัวอย่าง เพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. มี 2 ขนาด (ตามข้อ 2.1.4) ในการเตรียมตัวอย่าง ซี.บี.อาร์. โดยวิธีการทดสอบความแน่นแบบมาตรฐานให้ใช้คู่มือขนาดเล็ก ส่วนการเตรียมตัวอย่าง ซี.บี.อาร์. ตามวิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานให้ใช้คู่มือขนาดใหญ่

## 2.7 วิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified compaction test) มทข.(ท) 501.2-2545

### 2.7.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นของดิน กับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดในแบบที่กำหนดขนาดไว้ด้วยคู่มือเหล็กหนัก 4.54 กก.(10 ปอนด์) ระยะปล่อยคู่มือตกกระทบสูง 457 มม. (18 นิ้ว) วิธีการทดสอบ มี 4 วิธี ต่างๆ กันดังนี้

- วิธี ก. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ตามวิธีพรีออคเตอร์แบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor)
- วิธี ข. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ตามวิธีแอสโต ที่ 180 (AASHTO T 180)
- วิธี ค. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ตามวิธีพรีออคเตอร์แบบสูงกว่ามาตรฐาน



วิธี ง. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ตามวิธีแอสโต ที่ 180  
การใช้วิธีทดสอบวิธีใดให้เป็นไปตามรายการที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง ถ้าไม่ได้ระบุวิธีการทดสอบให้ใช้ วิธี ก.

## 2.7.2 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- แบบ (mold) ทำด้วยโลหะมีลักษณะทรงกระบอกกลาง ผนังแข็งแรงมี 2 ขนาด มีปลอกที่สามารถถอดได้สูง 60 มม.(2 3/8 นิ้ว) เพื่อให้สามารถถอดอัดดินให้สูง และมีปริมาตรตามต้องการ แบบและปลอกต้องยึดกันได้อย่างมั่นคงกับฐานแบบซึ่งสามารถถอดได้ ทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกับ
- แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม.(4 นิ้ว) สูง  $116.43 \pm 0.127$  มม. ( $4.584 \pm 0.005$  นิ้ว) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแบบ  $101.6 \pm 0.406$  มม. ( $4.000 \pm 0.016$  นิ้ว) โดยมีขนาดความจุ  $0.000943 \pm 0.000008$  ลบ.ม ( $0.0333 \pm 0.0003$  ลบ.ฟ.) และมีปลอกขนาดเดียวกันสูง 60 มม. (2 3/8 นิ้ว)
- แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) สูง  $116.43 \pm 0.127$  มม. ( $4.584 \pm 0.005$  นิ้ว) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแบบ  $152.4 \pm 0.6604$  มม. ( $6.000 \pm 0.026$  นิ้ว) โดยมีความจุ  $0.002124 \pm 0.000021$ ลบ.ม.( $0.07500 \pm 0.00075$  ลบ.ฟ.) และมีปลอกขนาดเดียวกันสูง 60 มม.(2 3/8 นิ้ว)
- ตูม (rammer) ทำด้วยโลหะทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $50.8 \pm 0.127$  มม. ( $2.000 \pm 0.005$  นิ้ว) น้ำหนักรวมทั้งด้ามถือ  $2.5359 \pm 0.0081$  กก. ( $10.00 \pm 0.05$  ปอนด์) มีปลอกบังคับให้ยกได้สูง  $457.2 \pm 1.524$  มม. ( $18.00 \pm 0.06$  นิ้ว) เนื้อระดับดินที่บดอัดโดยตุมตกลงกระทบได้อย่างอิสระ ปลอกบังคับต้องมีรูระบายอากาศอย่างน้อย 4 รู มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9.5 มม. (3/8 นิ้ว) ทำมุมกัน 90 องศา และห่างจากปลายปลอกทั้งสองข้างประมาณ 19 มม. (3/4 นิ้ว)
- เครื่องดันตัวอย่างออกจากแบบ (sample extruder) ประกอบด้วยแม่แรง (jack) ก้านโยกแม่แรง โครงเหล็กจับแบบขณะดันตัวอย่างออกจากแบบ ใช้ดันตัวอย่างที่บดอัดในแบบแล้วออกจากแบบ หรืออาจใช้เครื่องมืออื่นที่สามารถขูดและตัวอย่างดินออกจากแบบก็ได้

- เครื่องชั่ง (balance and scale) สามารถชั่งน้ำหนักได้อย่างน้อย 11.5 กก. และอ่านละเอียดได้ถึง 5 กรัม 1 เครื่อง และสามารถชั่งน้ำหนักได้อย่างน้อย 1,000 กรัม อ่านละเอียดได้ถึง 0.01 กรัม อีก 1 เครื่อง
- ตู้อบ (oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส ( $230 \pm 9$  องศาฟาเรนไฮต์) สำหรับอบดินขึ้นให้แห้ง
- เหล็กปาดดิน (straight edge) ทำด้วยเหล็กชุบแข็ง (hardened steel) มีขอบเรียบยาวไม่น้อยกว่า 254 มม. (10 นิ้ว) มีขอบที่ลบมุมด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งเรียบตรงตลอดความยาวของเหล็กปาดดิน โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 0.1 (0.01 นิ้วต่อความยาว 10 นิ้ว) ในช่วงที่ใช้ปาดแต่งผิวดินในแบบ
- ตะแกรงร่อนดิน (sieve) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 203 มม. (8 นิ้ว) สูง 50.8 มม. (2 นิ้ว) มี 2 ขนาด คือ 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) และ 4.75 มม. (เบอร์ 4)
- เครื่องผสมดิน (mixing tool) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการคลุกผสมดินให้เข้ากันได้แก่ ถาดใส่ดิน ช้อนตักดิน พลั่ว เกรียง ถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำ เป็นต้น หรืออาจเป็นเครื่องผสมดินที่ทำงานด้วยเครื่องจักร ซึ่งสามารถคลุกเคล้าผสมตัวอย่างดินให้เข้ากับน้ำที่ผสมเพิ่มลงไปในตัวอย่งดินที่ละน้อย ๆ ได้
- ตลับบรรจุดิน (container) ทำด้วยโลหะมีฝาปิดป้องกันความชื้นระเหยออกไปก่อนชั่งน้ำหนัก หรือระหว่างการชั่งน้ำหนักเพื่อหาความชื้นในดิน

### 2.7.3 การเตรียมตัวอย่าง

- ถ้าตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบขึ้นให้แข็งให้แห้งจนสามารถใช้เกรียงบดให้ร่วนได้ หรือใช้ตู้อบดินให้แห้งก็ได้แต่ต้องใช้อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส (140 องศาฟาเรนไฮต์) แล้วบดให้เม็ดดินหลุดออกจากกัน โดยไม่ทำให้เม็ดดินแตก
- ในกรณีที่มีขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุดโตกว่า 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ร่อนเอาดินที่ค้างบนตะแกรงนี้้ออกแล้วแทนด้วยดินที่ร่อนผ่านตะแกรงนี้แล้วค้างบนตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) จำนวนน้ำหนักเท่ากันใส่ลงแทนแล้วคลุกเคล้าให้ทั่วทำการแบ่งสี่ (quartering) หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง (sample splitter)
- ในกรณีที่มีขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุดไม่โตกว่า 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ให้แบ่งตัวอย่างตามวิธีการแบ่งสี่หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง

- ในกรณีที่จะทำการทดสอบตามวิธี ค. หรือ ง. ให้ใช้ตัวอย่างที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) เท่านั้น ส่วนที่ค้างบนตะแกรงนี้ให้ทิ้งไป
- ให้เตรียมตัวอย่างหนักประมาณ 6,000 กรัม (14 ปอนด์) สำหรับการทดสอบวิธี ข. และ ง. ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง และหนักประมาณ 3,000 กรัม (7 ปอนด์) สำหรับการทดสอบวิธี ก. และ ค. ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง การเตรียมตัวอย่างต้องเตรียมให้พอทดสอบได้ไม่น้อยกว่า 4 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง

#### 2.7.4 การทดสอบ

การทดสอบวิธี ก.

- นำตัวอย่างดินที่เตรียมมาพรมน้ำให้ทั่วเพื่อให้ดินชื้นโดยเมื่อคลุกผสมกันแล้วจะมีความชื้นต่ำปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (optimum moisture content) ร้อยละ 4 ใส่ดินที่ผสมน้ำแล้ว ลงในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) ซึ่งมีปลอก (collar) สวมอยู่เรียบร้อยแล้ว โดยประมาณว่าเมื่อบดอัดแล้วจะเหลือดินสูง 1/5 ของความสูงของแบบ แล้วบดอัดโดยค้อนสูง 457 มม. (18 นิ้ว) จำนวน 25 ครั้ง ให้ทั่วผิวของดินในแบบ
- ทำซ้ำอีก 4 ครั้ง จนดินที่ถูกบดอัดแน่นในแบบมีความสูงกว่าแบบประมาณ 10 มม.
- ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดดินปาดแต่งหน้าดินในแบบให้เรียบเท่ากับระดับขอบบนของแบบ ถ้าดินก้อนใหญ่หลุดออกให้เติมดินตัวอย่างลงไปแทนแล้วกดให้แน่นพอควรจนเรียบแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เมื่อหักน้ำหนักของแบบออก จะได้น้ำหนักของดินชื้น ต้องอ่านเครื่องชั่งละเอียดถึง 5 กรัม
- แกะดินออกจากแบบ แล้วผ่าตามแนวตั้งผ่านจุดศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างดิน เก็บดินจากที่ผ่าประมาณ 300 กรัม ใส่ตลับบรรจุดินชั่งน้ำหนักทันที อ่านละเอียดถึง 0.01 กรัม
- นำดินในตลับบรรจุดินไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส ( $230 \pm 9$  องศาฟาเรนไฮต์) อย่างน้อย 12 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักอ่านละเอียดถึง 0.01 กรัม
- บดดินตัวอย่างที่แกะออกจากแบบที่เหลือให้ร่วน แล้วคลุกผสมกับดินในตลับแรกให้เข้ากัน พรมน้ำให้ความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 ถึง 2

- ดำเนินการโดยเพิ่มน้ำทุกครั้งจนกว่าน้ำหนักดินที่บดอัดในแบบลดลง หรือไม่เปลี่ยนแปลง หรืออาจลดน้ำที่ผสมลงเมื่อพบว่าการเพิ่มน้ำแล้วน้ำหนักดินที่บดอัดในแบบกลับลดลง
- การทดสอบวิธี ข. ดำเนินวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับวิธี ก. แต่ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) บดอัด 3 ชั้น ๆ ละ 56 ครั้ง
- การทดสอบวิธี ค. ดำเนินวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับวิธี ก. แต่ใช้ตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) บดอัด 3 ชั้น ๆ ละ 25 ครั้ง
- การทดสอบวิธี ง. ดำเนินวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับวิธี ค. แต่ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) บดอัด 3 ชั้น ๆ ละ 56 ครั้ง

### 2.7.5 การคำนวณ

- กำหนดหาค่าความชื้นในดินเป็นร้อยละ

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100$$

(2.10)

เมื่อ  $W$  = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

$W_1$  = น้ำหนักของดินชื้น หน่วยเป็นกรัม

$W_2$  = น้ำหนักของดินอบแห้ง หน่วยเป็นกรัม

- กำหนดหาค่าความแน่นชื้น (WET DENSITY)

$$\gamma_w = \frac{A}{V}$$

(2.11)

เมื่อ  $\gamma_w$  = ความแน่นชื้นของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$A$  = น้ำหนักดินชื้นที่บดอัดในแบบ หน่วยเป็นกรัม

$V$  = ปริมาตรของแบบ ซึ่งเท่ากับปริมาตรของดินชื้นที่บดอัดในแบบ  
หน่วย เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

- กำหนดหาค่าความแน่นแห้ง (dry density)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{1 + \frac{w}{100}}$$

เมื่อ  $\gamma_d$  = ความแน่นแห้งของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$\gamma_w$  = ความแน่นชื้นของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

W = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

#### 2.7.6 การรายงาน

- นำค่าความชื้นในดิน (W) และค่าความแน่นแห้งของดิน ( $\gamma_d$ ) ในแต่ละครั้งของการทดสอบมากำหนดจุดลงในกระดาษกราฟ โดยให้ค่าความชื้นในดินอยู่ในแกนนอนและค่าความแน่นแห้งของดินอยู่ในแกนตั้ง
- เขียนเส้นกราฟให้ผ่านจุดที่กำหนดไว้ หรือใกล้เคียงให้มากที่สุด จะได้เส้นกราฟลักษณะเป็นเส้นโค้ง รูปประฆังคว่ำ (parabola curve) จุดสูงที่สุดของเส้นโค้งคือค่าความแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density) ของดินนั้น ตามกรรมวิธีบดอัดที่ใช้ทดสอบนี้
- ที่จุดค่าความแน่นแห้งสูงสุดของดิน เมื่อลากเส้นตรงขนานกับแกนตั้งลงมาตัดแกนนอน จะได้ค่าความชื้นที่ทำให้ดินบดอัดได้แน่นสูงสุด
- ให้รายงานค่าความแน่นแห้งสูงสุด หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความชื้นที่ทำให้ดินบดอัดได้แน่นสูงสุด (OMC) เป็นร้อยละ

#### 2.7.7 ข้อควรระวัง

- การประมาณปริมาตรน้ำที่ใช้ผสมดินที่เกาะติดกันเป็นก้อน (cohesive soil) ควรเพื่อให้ต่ำและสูงกว่าจำนวนน้ำ ที่ทำให้ได้ค่าความชื้นที่ทำให้ดินบดอัดได้แน่นสูงสุด (OMC) ดินพวกดินทราย (cohesionless soil) ควรผสมน้ำตั้งแต่ น้อยที่สุด คือ เริ่มจากดินผึ่งแห้งจนกระทั่งมากที่สุดเท่าที่จะทำได้
- ในการบดอัดดินให้วางแบบบนพื้นที่มั่นคงแข็งแรง ราบเรียบ ขณะทำการบดอัดแบบต้องไม่กระดอนไปมา
- ควรเตรียมตัวอย่างให้เพียงพอ โดยให้มีตัวอย่างทดสอบทางด้านแห้งกว่า (dry side) ความชื้นที่ทำให้ดินบดอัดได้แน่นสูงสุด (OMC) ไม่น้อยกว่า 2 ตัวอย่าง และให้มีตัวอย่างทดสอบพอทดสอบทางด้านชื้นกว่า (wet side) ความชื้นที่ทำให้ดินบดอัดได้แน่นสูงสุด (OMC) 1 ตัวอย่าง
- ดินชนิดที่มีปริมาณดินเหนียวมาก (heavy clay) หลังจากผึ่งให้แห้งแล้วให้บดด้วยก้อนยาง หรือใช้เครื่องบด จนได้ตัวอย่างที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) มากที่สุดเท่าที่จะทำได้
- ปริมาตรของแบบ ให้ทำการวัดและคำนวณ เพื่อให้ได้ปริมาตรที่แท้จริงของแต่ละแบบ

- แบบที่ใช้งานแล้ว ต้องคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 50 ของความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้

## 2.8 วิธีการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ของดิน

### 2.8.1 ขอบข่าย

Unconfined Compressive Strength คือ ค่าแรงอัด (Compressive Load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งแบ่งตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกหรือรูป Prismatic จะรับได้ ถ้าในกรณีที่ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ยังไม่ถึงค่าสูงสุดเมื่อ ความเครียด (Strain) ในแนวตั้งเกินร้อยละ 20 ให้ใช้ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ที่ความเครียดร้อยละ 20 นั้นเป็นค่า Unconfined Compressive Strength การทดลองนี้ได้ปรับปรุงจาก AASHTO T 208-70 อธิบายถึงการหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดินในสภาพ Undisturbed และ Remolded อัตราการเพิ่มแรงอัดในระหว่างการทดลอง จะควบคุมโดยความเครียด (Strain) หรือควบคุมโดยความเค้น (Stress) ก็ได้ เครื่องมือทดลองประกอบด้วย

เครื่องกด เป็นเครื่องใช้กดแท่งตัวอย่าง มีหลายแบบ เช่น Deadweight หรือ Hydraulic เป็นแรงกด หรืออาจใช้เครื่องมือกดชนิดอื่น ๆ ที่สามารถควบคุมอัตราเร็วของแรงกด และมีกำลังกดเพียงพอ สำหรับดินที่มีค่า Unconfined Compressive Strength น้อยกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) ต้องใช้เครื่องกดที่สามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.001 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) และสำหรับดินที่มีค่า Unconfined Compressive Strength มากกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) เครื่องกดจะต้องอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.05 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.005 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

เครื่องดันตัวอย่างดิน ใช้ดันแท่งตัวอย่างดินออกจากท่อบาง (Thin Wall Tube)

Dial Gauge ใช้วัดได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร หรือ 0.001 นิ้ว สามารถอ่านระยะทางเคลื่อนที่ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 ของความยาวแท่งตัวอย่าง ที่จะใช้ทดลอง

Vernier Caliper ใช้วัดขนาดของแท่งตัวอย่าง โดยวัดได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตรหรือ 0.01 นิ้ว

นาฬิกาจับเวลา

เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส

เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม ใช้สำหรับตัวอย่างดินที่มีมวลน้อยกว่า 100 กรัม ให้ใช้เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

เครื่องมือเปิดเตล็ด เครื่องมืออื่นๆที่ต้องใช้ คือ เครื่องมือตัดและตกแต่งตัวอย่างเครื่องทา  
ตัวอย่าง Remolded และกระป๋องอบดิน

- การเตรียมตัวอย่างขนาดแท่งตัวอย่าง แท่งตัวอย่างควรมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  
อย่างน้อย 33 มิลลิเมตร(1.3 นิ้ว) ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของเม็ดวัสดุในตัวอย่างต้อง  
ไม่เกิน 1 ใน 10 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่าง และสำหรับแท่ง  
ตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 71 มิลลิเมตร (2.8 นิ้ว) ขนาด  
ที่ใหญ่ที่สุดของเม็ดวัสดุต้องไม่เกิน 1 ใน 6 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง  
ตัวอย่าง ถ้าหากหลังจากเสร็จการทดลองแล้วพบว่า มีเม็ดวัสดุที่ใหญ่กว่าที่  
กำหนดไว้ก็ให้หมายเหตุไว้ในแบบฟอร์มอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าน  
ศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างจะมีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 3 วัดความสูงและเส้นผ่าน  
ศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างให้ได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร หรือ 0.01 นิ้ว โดยใช้  
Vernier Caliper หรือเครื่องมือชนิดอื่นที่เหมาะสม
- ตัวอย่าง Undisturbed เตรียมตัวอย่าง Undisturbed จากแท่งตัวอย่างUndisturbed  
ขนาดใหญ่หรือจากดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างโดยใช้ท่อบางแท่งตัวอย่างที่ได้  
จากท่อบางอาจจะทดลองได้เลยโดยไม่ต้องตกแต่ง แต่ต้องตัดปลายทั้งสองข้าง  
ของตัวอย่างให้เรียบและมีสัดส่วนดังที่ได้ระบุมาแล้ว ในการเตรียมตัวอย่าง  
จะต้องระมัดระวังอย่าให้มีการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดหน้าตัดเกิดขึ้นในระหว่าง  
การดันตัวอย่างดินออกจากท่อบาง ถ้าหากเห็นว่าจะเกิดการอัดตัวอย่างดินหรือ  
จะทำให้ตัวอย่างดินถูกรบกวนก็ให้ตัดแบ่งท่อบางตามความยาวออกเป็นส่วนๆ  
การเตรียมตัวอย่างทดลองถ้าหากเป็นไปได้ก็ควรเตรียมในห้องที่ควบคุม  
ความชื้น เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แท่งตัวอย่างทดลองจะต้องมีหน้าตัด  
ตั้งฉากกับแกนตามยาวของแท่งตัวอย่าง ในการตัดและแต่งปลายทั้งสองข้างของ  
แท่งตัวอย่าง ถ้าหากมีเม็ดวัสดุที่ทำให้ผิวหน้าไม่เรียบ ก็ให้ปิดผิวหน้าด้วยปูน  
ปลาสเตอร์ โดยให้ความหนาแน่นที่สุดหรือใช้ Hydrostone หรือวัสดุอื่นๆ ที่มี  
คุณสมบัติคล้ายกัน ให้ซึ่งหามวลของแท่ง ตัวอย่าง Remolded  
นำตัวอย่างดิน Undisturbed เดิม มาทำดังนี้ อย่างทั่วถึง ในการทำต้องระวังอย่า  
ให้มีฟองอากาศเข้าไปปนในดิน หลังจากนั้นก็อัดดินลงใน Mold ที่มีหน้าตัดเป็น  
รูปวงกลม และมีขนาดตามที่ได้ระบุไว้ เมื่อได้อัดดินใน Mold จนเต็มแล้วให้  
แต่งปลายแท่งตัวอย่างจนเรียบได้หน้าตัดตั้งฉากกับแกนตามยาวของแท่ง  
ตัวอย่าง แล้วดันแท่งตัวอย่างมี Void Ratio และปริมาณน้ำในดินใกล้เคียงกับ

ตัวอย่าง Undisturbed เดิมการทดลองโดยวิธีควบคุมความเครียด (Strain) วางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นกลมอันล่างของเครื่องกด แล้วเลื่อนจนแผ่นกลมอันบนของเครื่องกดแตะกับผิวบนของแท่งตัวอย่าง หมุนหน้าปัดของ Dial Gauge ที่ใช้อ่านระยะทางของการกดให้เข็มชี้ที่ศูนย์ กดแท่งตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคิดเป็นความเครียดในแนวตั้ง 0.5 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ ต่อนาที จนแรงกดและระยะยวบตัวของแท่งตัวอย่างทุก ๆ 30 วินาที ในการใช้อัตราเร็วของความเครียดค่าใดจะต้องประมาณว่าระยะเวลาตั้งแต่เริ่มให้แรงกดจนถึงแรงกดสูงสุด จะต้องไม่เกิน 10 นาที (\*1) เพิ่มแรงกดต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงกดลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่า 20 เปอร์เซ็นต์ หาปริมาณน้ำในดินโดยนำแท่งตัวอย่างเข้าเตาอบ นอกจากกรณีที่ต้องเตรียมแท่งตัวอย่าง Remolded ก็ให้ใช้ส่วนของดินที่เป็นตัวแทนของแท่งตัวอย่างได้เขียนรูปสภาพแท่งตัวอย่างที่ทดลองเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยแตกร้าววัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน แล้วตั้งศูนย์บนหน้าปัดที่ใช้อ่านระยะยวบตัวของแท่งตัวอย่าง ใช้แรงกดเริ่มแรกบนแท่งตัวอย่างเท่ากับ 1/15 ถึง 1/10 ของแรงกดสูงสุดที่ได้ประมาณไว้แล้วทิ้งไว้ครู่หนึ่ง แล้วอ่านระยะยวบตัวของแท่งตัวอย่างเพิ่มแรงกดต่อไปเท่ากับแรงกดแรก แล้วทิ้งไว้ครู่หนึ่งเหมือนครั้งแรก ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้แรงกดสูงสุด หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่าเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ในระหว่างการเพิ่มแรงกด ถ้าสังเกต ว่าจะต้องใส่แรงกดมากกว่า 15 ครั้ง หรือน้อยกว่า 10 ครั้ง เพื่อให้ได้แรงกดสูงสุดแล้ว จะต้องปรับเปลี่ยนแรงกดแต่ละครั้งให้มากขึ้น หรือน้อยลงทันที ในการหาปริมาณน้ำในดินอาจหาจากดินทั้งแท่งที่ทดลองเสร็จแล้ว หรือส่วนของดินที่เป็นตัวแทนแท่งตัวอย่างก็ได้เขียนรูปสภาพแท่งตัวอย่างที่ทดลองเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยแตกร้าวให้วัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน ดินที่อ่อนมากจะมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดมาก ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองโดยใช้อัตราเร็วของความเครียดสูง ในทางตรงกันข้าม ดินที่แข็งหรือแตกง่ายซึ่งมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดน้อย ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองด้วยอัตราเร็วของความเครียดที่ต่ำกว่า การประมาณค่านี้อาจต้องมีประสบการณ์พอเพียง มิฉะนั้นจะต้องใช้เครื่องกดอย่างเล็ก (Penetrometer) กดลงบนส่วนของตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้ดู เพื่อหาค่านี้โดยประมาณตัวอย่างมีรอยแตกร้าวให้วัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน ดินที่อ่อนมากจะมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดมาก ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองโดยใช้อัตราเร็ว



ของความเครียดสูง ในทางตรงกันข้าม ดินที่แข็งหรือแตกง่ายซึ่งมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดน้อย ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองด้วยอัตราเร็ว

- กำหนดหาความเครียดในแนวดิ่ง สำหรับแรงกดใด ๆ ( $\epsilon$ ) ได้โดยใช้สูตร

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

เมื่อ  $\Delta L$  = ระยะยวบตัวของแท่งตัวอย่างที่แรงกดใดๆ โดยอ่านจาก Dial Gauge

$L_0$  = ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง

- กำหนดหาพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยสำหรับแรงกดใด ๆ ( $A$ ) ได้โดยใช้สูตร

$$A = \frac{A_0}{1 - \epsilon}$$

เมื่อ  $A_0$  = พื้นที่หน้าตัดเดิมของแท่งตัวอย่าง

$\epsilon$  = ความเครียดตามแนวดิ่งที่แรงกดนั้นๆ

- กำหนดหาความเค้นสำหรับแรงกดใด ๆ ( $\sigma_c$ ) ได้โดยใช้สูตร

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

เมื่อ  $P$  = แรงกด

$A$  = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงกดนั้นๆ

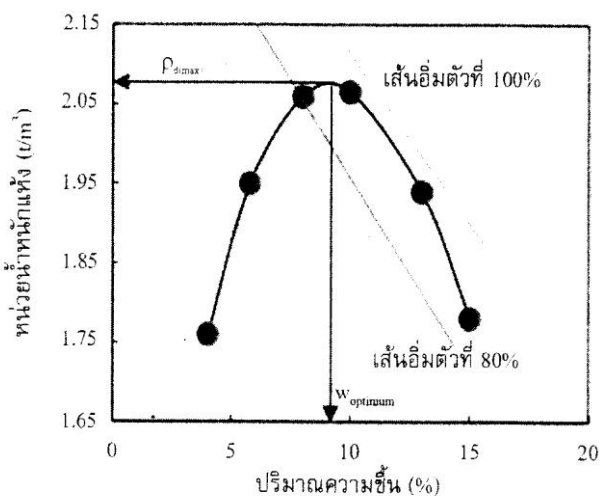
- เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sigma_c$  และ  $\epsilon$  โดยใช้  $\sigma_c$  เป็นแกนตั้ง และ  $\epsilon$  เป็นแกนนอน จากกราฟหาค่าสูงสุดของ  $\sigma_c$  หรือค่า  $\sigma_c$  ที่เท่ากับร้อยละ 20 ได้ในกรณีที่ต้องการจะใช้กราฟอธิบายคุณสมบัติของดิน ก็ให้แนบแผ่นกราฟนี้รวมไว้ในรายงานผลการทดลองด้วยการรายงาน ให้รายงานผลการทดลองดังต่อไปนี้ ค่า Unconfined Compressive Strength ชนิดและรูปร่างของแท่งตัวอย่าง เช่น Undisturbed, Compacted, Remolded, Cylindrical, Prismatic

- อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่าง
- ลักษณะดินโดยทั่วไป เช่น ชื่อของดิน, สัญลักษณ์ เป็นต้น
- Initial Density ปริมาณน้ำในดินและ Degree of Saturation (ถ้าตัวอย่างถูกทำให้ อิ่มตัวในห้องปฏิบัติการให้หมายเหตุ Degree of Saturation อีกค่าหนึ่งไว้ด้วย)
- ค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดเป็นร้อยละ (อ่านจากกราฟ)
- ค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของความเครียดเป็นร้อยละต่อนาที โดยคิดตั้งแต่เริ่มกดจนถึง แรงกดสูงสุด
- ให้เขียนหมายเหตุในกรณีที่เกิดมีลักษณะผิดปกติในการทดลอง หรือแบบ รายละเอียดอื่นๆ ที่คิดว่ามีความจำเป็นต้องใช้อธิบายผลทดลอง

ข้อควรระวัง ในการค้นตัวอย่างดินออกจากท่อเพื่อใช้ทดลอง จะต้องดันไปตามทิศทาง เดียวกันกับที่ตัวอย่างเคลื่อนที่เข้าไปในกระบอกในระหว่างเก็บตัวอย่าง เพื่อลดการรบกวนตัวอย่าง ดิน และในการทำตัวอย่าง Remolded ถ้าแท่งตั้งอย่างหลังจากทำ Remolded แล้วได้ความแน่น แตกต่างจากก่อนทำ Remolded ให้นำมาดำเนินการใหม่

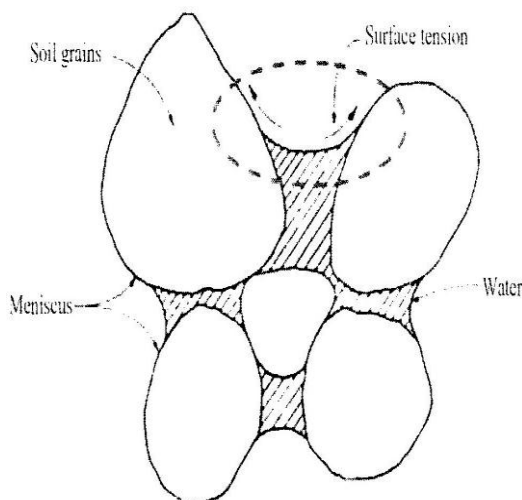
## 2.9 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)

ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความชื้นแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R.Proctor (1930) โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้ พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering New-Record (proctor, 1933) แล้วนำ วิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve)

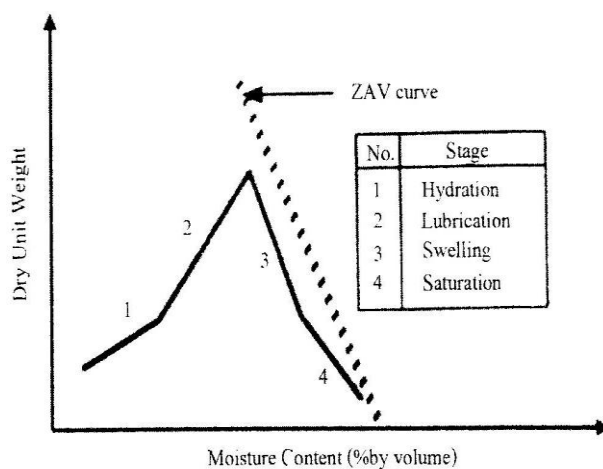
Proctor ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดเส้นการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 2.1 ไว้ว่า ประสิทธิภาพของการบดอัดดินถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน โดยแบ่งการบดอัดดินเป็น 2 ด้านคือ ด้านแห้งและด้านเปียก สำหรับการบดอัดดินที่แห้งมากๆ ดินจะมีแรงเสียดทานที่สูงมาก เนื่องจากแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี (Capillary Moisture) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมากๆ น้ำจะไปลดแรงคาพิลลารี และเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย ถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกเรื่อยๆ จนน้ำไปสลายแรงเสียดทานได้แล้ว น้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จนถึงปริมาณน้ำที่เต็มช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเรียกจุดที่ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดว่า maximum dry density และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้ว่า optimum moisture content หลังจากจุดนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินสูงมากๆ พบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป



รูปที่ 2.2 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ

### 2.10 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936)

Hogentogler นำเสนอเส้นกราฟการบดอัดที่แตกต่างกับ Proctor กล่าวคือ เขาได้นำเสนอเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (dry density) กับปริมาณความชื้นในรูปของปริมาณน้ำต่อปริมาตรรวม (molding moisture content:  $V_w/V$ ) โดยลักษณะของเส้นกราฟแสดงด้วยเส้นตรง 4 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสาเหตุที่เขาได้นำเสนอการพล็อตเส้นกราฟแบบนี้ เนื่องจากเขาพบว่าน้ำมีบทบาทอยู่ 4 ส่วน แบ่งได้เป็น 4 ช่วงที่มีผลทำให้ดินเกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด และทำให้โครงสร้างของดินบดอัดมีความแตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดแต่ละช่วง



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Hogentogler

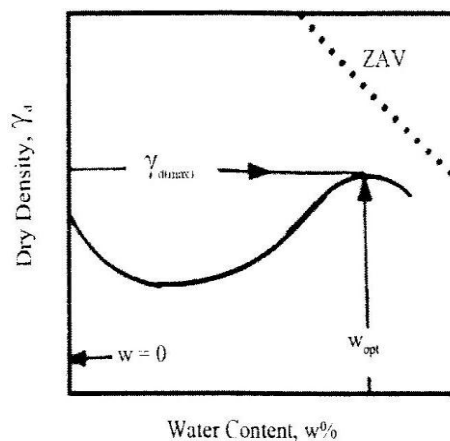
1. Hydration Stage เขากล่าวว่าในช่วงนี้น้ำจะถูกดูดซึมโดยอนุภาคของดินในลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ห่อหุ้มอนุภาคดิน ในลักษณะเดียวกับเมื่อพรมน้ำลงไปบนดินแห้ง ในช่วงแรกอนุภาคดินจะดูดซึมน้ำทันทีเพื่อไปห่อหุ้มอนุภาคดินก่อน โดยน้ำส่วนกลางที่จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นนั้นยังไม่มี
2. Lubrication Stage ในช่วงนี้น้ำจะมีบทบาทเป็นสารหล่อลื่น เป็นผลให้ดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะที่มวลดินมีความแน่นขึ้น โดยยังคงมีอากาศอยู่ในมวลดินบางส่วน นั่นหมายถึงความหนาแน่นแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อถึงจุดปริมาณน้ำที่เหมาะสม (optimum moisture content; OMC) จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าสูงสุด (maximum dry density)
3. Swelling Stage ในช่วงนี้เกิดจากการเติมน้ำที่เกินปริมาณน้ำที่เหมาะสม อากาศในส่วนที่มีอยู่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากปริมาตรของมวลดินมีค่าน้อยอยู่แล้ว และอยู่ในสภาพที่แน่น ซึ่งจะไม่ให้อากาศที่มีอยู่ออกไป ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก มวลดินจึงเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรอากาศคงที่ที่อากาศที่มีอยู่ออกไป ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก มวลดินจึงเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรอากาศคงที่
4. Saturation Stage ในช่วงนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก น้ำจะเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างที่เหลืออยู่ในมวลดิน เป็นผลให้ระดับความอิ่มตัว (degree of saturation) เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นอากาศเป็นศูนย์ (Zero Air Void; ZAV)

ดังที่ Hogentogler ได้อธิบายไว้ข้างต้น มักจะประยุกต์ใช้โดยตรงกับดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกับ Proctor

### 2.11 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (1942)

เขาได้อธิบายเส้นกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบ โดยเขาพบว่า นอกจากจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ปรากฏบนเส้นกราฟการบดอัดแล้ว ก่อนถึงด้านแห้งของการบดอัดจะมีจุดที่แสดงถึงค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเขาได้อธิบายถึงช่วงที่ดินมีความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดที่มีค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุดว่า ถ้าหากเริ่มบดอัดดินเม็ดหยาบที่แห้งมากๆ หรือดินที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์ เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงแรกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดความหนาแน่นแห้งต่ำสุด เมื่อเลยจุดนี้ไปก็จะเข้าสู่เส้นกราฟการบดอัดปกติ ซึ่งถ้าสังเกตจากเส้นกราฟพบว่า เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งที่จุดปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์กับจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด จะมีช่วงความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย และเขาได้

กล่าวในเชิงวิชาการไว้ว่า สำหรับกรณีของทรายที่มีความแห้งมากๆ เมื่อเติมน้ำในช่วงแรก อนุภาคดินจะจับตัวกันด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ของน้ำในลักษณะคล้ายกระจกของก้อนดินหรือทรายรอบตัวเอง ที่เรียกว่า Arching Effect ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินมากขึ้น โดย Arching Effect จะพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ดังนั้นปฏิกิริยาของน้ำที่เติมในช่วงแรกๆ จะแตกต่างจากกรณีของ Hogentrogler และ Proctor เนื่องจากดินทรายไม่มีประจุลบ ดังนั้นเมื่อเติมน้ำจะเกิดแรงดึงผิวทำให้เกิดแรงยึดแน่นปรากฏ (apparent cohesion) และเมื่อเติมน้ำมากขึ้นแผ่นฟิล์มจะมีความหนาขึ้น มีผลทำให้ Arching Effect ลดน้อยลงไป เป็นผลให้แรงดึงดูดของแรงดึงผิวลดลงตามลำดับ แล้วอนุภาคดินก็เริ่มจัดเรียงตัวกันใหม่ และหลังจากนั้นก็จะเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้วแต่เขาได้ให้ความหมายของ OMC ต่างจากคนอื่น กล่าวคือ OMC คือน้ำที่มีอยู่พอดีในมวลดินบดอัดที่ทำให้ดินอยู่ในสภาพที่ไปสลายแรงดึงผิวพอดี ที่เรียกว่า neutralizes surface tension และเมื่อมีพลังงานบดอัดมากกระทำ จึงทำให้ทรายจัดเรียงตัวกันใหม่ทำให้ทรายแน่นขึ้น จนสุดท้ายถึงจุดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด เมื่อน้ำสูงเกิน OMC ดินก็จะอ่อนตัวลง เป็นผลให้ความหนาแน่นแห้งลดลง โดยสรุปแล้ว ในการบดอัดดินทราย การที่จะให้ได้ความหนาแน่นแห้งค่อนข้างดี คือช่วงที่ทรายแห้งมากๆ และช่วงความชื้นที่ค่อนข้างน้อยไปทางด้านเปียกไปแล้ว

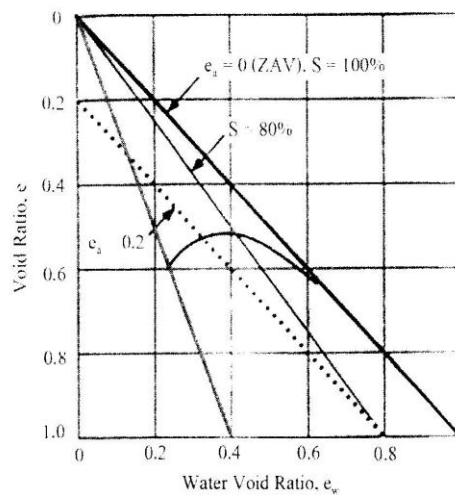


รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น  
นำเสนอโดย Buchanan

## 2.12 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956)

เขานำเสนอแนวความคิดใหม่ โดยวางอยู่บนพื้นฐานของแรงดันน้ำในช่องว่าง (pore water pressure) และแรงดันอากาศในช่องว่าง (pore air pressure) ที่มีอยู่ในมวลดินที่บดอัด เขากล่าวไว้ว่า ดินแห้งเป็นดินที่บดอัดได้ยาก เนื่องจากภายในมวลดินมีแรงเสียดทานมากซึ่งเกิดจากแรงคาพิลลารี อย่างไรก็ตาม ในช่วงที่ดินมีความแห้งมากๆ มวลดินจะมีช่องว่างอยู่มาก การบดอัด

จึงไปไล่อากาศให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเติมน้ำเพิ่มขึ้นแรงตึงผิวก็จะลดลง ทำให้แรงเสียดทานลดลงด้วย โดยความแน่นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปจนกระทั่งถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC) ก็จะได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density) เขากล่าวว่า ประสิทธิภาพที่น้อยลงไปจากการบดอัดเมื่อเติมน้ำเลยจุด OMC เนื่องจากอากาศถูกกักเอาไว้และเกิดการสะสมกันเป็นแรงดันอากาศในมวลดิน เขาได้เสนอเส้นกราฟการบดอัดโดยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio;  $e$ ) และอัตราส่วนน้ำในช่องว่าง (water void ratio;  $e_w$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินน้ำเสนอโดย Hilf

โดยพบว่า ที่จุด OMC ค่าอัตราส่วนช่องว่างจะมีค่าน้อยที่สุด โดยจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟเป็นจุดที่ค่าอัตราส่วนช่องว่างมาก และมีค่าระดับความอิ่มตัวน้อย เมื่อบดอัดไปก็จะได้ค่าอัตราส่วนช่องว่างที่น้อยที่สุด ซึ่งจุดนี้สามารถหาค่าสัดส่วนของอากาศได้ด้วย และพบว่าที่ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ค่าระดับความอิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 วิธีของ Hilf ทำให้ง่ายต่อการหาค่าระดับความอิ่มตัวที่จุดต่างๆ บนเส้นกราฟการบดอัด และสามารถหาปริมาณอากาศที่ความชื้นต่างๆ ได้ด้วย

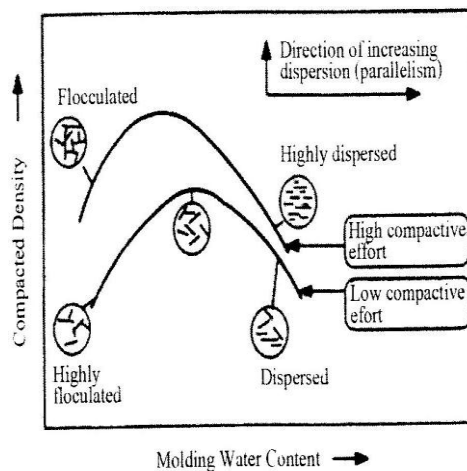
### 2.13 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985)

เขาได้เริ่มนำผลจากการดูโครงสร้างภายในดินเปรียบเทียบกับความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัด โดยเขาสนใจว่าคุณสมบัติของดินที่บดอัดทางด้านเปียกและทางด้านแห้งมีความแตกต่างกัน เกิดจากสาเหตุใด เขาสังเกตจากปัจจัยหลาย ๆ อย่างพบว่า ในความเป็นจริงแล้ว การบดอัดใน

สนามไม่สามารถบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห่งสูงสุด ดังนั้นในการเติมน้ำจะมีช่วงหนึ่งที่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงนี้แล้วคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเป็นไปตามที่ต้องการ แต่เมื่อเติมน้ำเกินช่วงนี้ไปเป็นช่วงที่เขาไม่แนะนำ ซึ่งเขาให้เหตุผลจากการพิจารณาโครงสร้างภายในของดินเหนียวพบว่า ในช่วงการบดอัดดินทางด้านข้าง ลักษณะโครงสร้างของดินจับตัวกันเป็นกระจุก โดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นเดียวกัน การใช้พลังงานบดอัดต่ำ ความเป็นกระจุกของดินมีมาก และจะน้อยลงเมื่อใช้พลังงานการบดอัดที่สูง เป็นผลให้โครงสร้างของดินชิดกันมากขึ้นด้วย เมื่อเติมน้ำเข้าไปโดยที่พลังงานคงที่ สังเกตเห็นว่าโครงสร้างของดินแน่นขึ้น อัตราส่วนช่องว่างลดลงจนกระทั่งเกินจุด OMC ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างดินจะเป็นแบบขนานกันมากขึ้น เมื่อความชื้นยิ่งมากขึ้น ความเป็นระเบียบของโครงสร้างดินก็ยิ่งมากขึ้นตาม การที่โครงสร้างดินจัดเรียงตัวกันในแนวนานถือว่าไม่ดี เพราะว่าเป็นระนาบที่อ่อนแอที่สุด โดยสรุปแล้วเขาพยายามตอบคำถามว่าทำไมจุดที่มีความหนาแน่นแห่งเท่ากันแต่ปริมาณน้ำไม่เท่ากัน เมื่อเขาใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูพบว่า การบดอัดดินในด้านข้างมีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบระเกะระกะ (flocculated structure) ในทางตรงกันข้าม เมื่อเติมน้ำเกินจุด OMC เป็นการบดอัดทางด้านเปียก มีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบขนาน (dispersed structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นแห่งเท่ากัน โดยเปรียบเทียบดินบดอัดทางด้านข้างกับดินบดอัดทางด้านเปียกพบว่า

- กำลังของดินสูงกว่า เนื่องจากความเครียด (strain) ของดินต่ำกว่า
- ค่าความซึมได้ของน้ำสูงกว่า เนื่องจากในมวลดินมีช่องว่างมากกว่า
- มีการหดตัวน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณน้ำในมวลดินมีน้อยกว่า
- มีค่าการบวมตัวมากกว่า เนื่องจากมีช่องว่างที่น้ำสามารถสัมผัสกับพื้นผิวได้มากกว่า





รูปที่ 2.6 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน

#### 2.14 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)

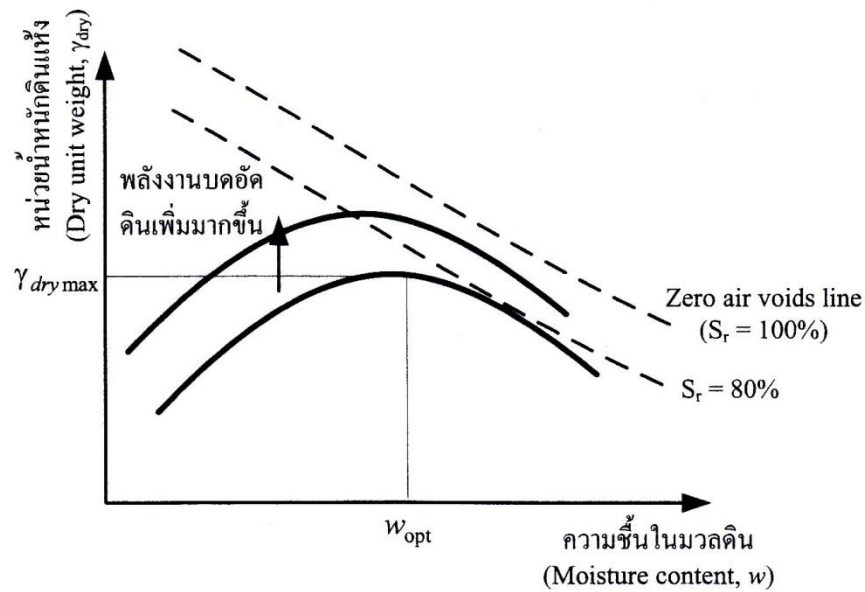
ทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ในงานบดอัดดิน คือ สมการความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับระดับชั้นความอืดตัวด้วยน้ำ

$$\gamma_{dry} = \left( \frac{G_s}{1+e} \right) \gamma_w = \left( \frac{G_s}{1+wG_s/S_r} \right) \gamma_w \quad (2.1)$$

การบดอัดดินให้แน่นที่สุดในทางทฤษฎีคือ การพยายามทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งมากที่สุด ( $\gamma_{dry \max}$ ) ถ้าพิจารณาจากสมการที่ 2.1 การที่ดินจะมีหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดนั้น ดินจะต้องมีอัตราส่วนช่องว่างต่ำที่สุด ( $e_{\min}$ ) และจากความสัมพันธ์ที่ว่า  $e = wG_s / S_r$  การจะควบคุมให้  $e_{\min}$  นั้นจะต้องให้ดินมีค่า  $S_r = 1$  และ  $w = w_{opt}$  (optimum water content) กล่าวคือ

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

ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในมวลดิน (แกนนอน) มาเขียนกับหน่วยน้ำหนักดินแห้ง (แกนตั้ง) ของการบดอัดดิน ซึ่งเรียกว่าเส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction curve) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)

จากเส้นโค้งการบดอัดดินในรูปที่ 2.7 พบว่าหน่วยน้ำหนักดินแห้งในตอนแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด (maximum dry unit weight,  $\gamma_{dry\ max}$ ) และเรียกปริมาณน้ำ ณ จุดนี้ว่า ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum water content,  $w_{opt}$ ) และเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าจุดนี้จะทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งลดลง

ในทางปฏิบัติแล้ว การที่จะบดอัดดินให้อยู่ในสภาพทางทฤษฎีนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าการบดอัดดินนอกจากจะขึ้นกับปริมาณน้ำแล้ว ยังขึ้นกับระดับพลังงานกล (Mechanical energy) ที่กระทำกับดินที่บดอัดอีกด้วย โดยพลังงานที่ให้กับดินขณะทำการบดอัดจะต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะขับไล่ฟองอากาศให้ออกจากมวลดิน จนทำให้ดินอยู่เข้าใกล้สภาวะไร้ช่องว่างอากาศ (Zero air voids) จากรูปที่ 2.7 เมื่อเพิ่มพลังงานการบดอัดดิน จะพบว่าเส้นโค้งการบดอัดดินจะเคลื่อนตัวมาทิศทางบนซ้าย โดยหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด จะมีค่ามากขึ้น แต่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม  $w_{opt}$  จะมีค่าลดลง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเส้นโค้งการบดอัดดินจะถูกควบคุมด้วยเส้นไร้ช่องว่างอากาศ (Zero air voids line) เส้นโค้งการบดอัดดินจะไม่ตัดเส้นไร้ช่องว่างอากาศ สมการเส้นไร้ช่องว่างอากาศจะหาได้จากสมการที่ 2.1 และแทนค่า  $S_r = 1$  นั่นคือ

$$\text{Zero air void line: } \gamma_{dry} = \left( \frac{G_s}{1 + wG_s} \right) \gamma_w \quad (2.2)$$

### 2.14.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน

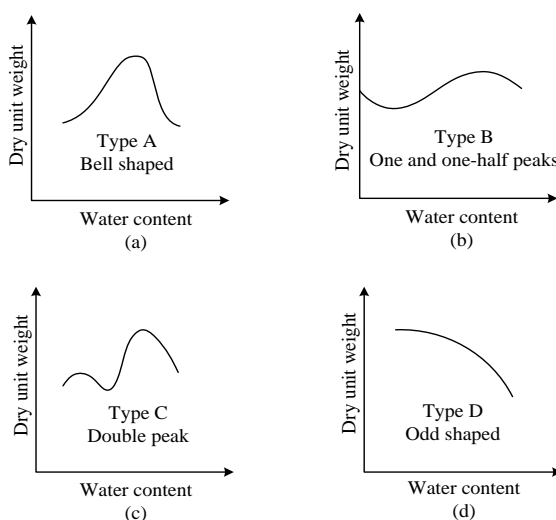
ดังได้อธิบายแล้วข้างต้นว่าปริมาณความชื้นในดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อความหนาแน่นของดินบดอัดนอกเหนือจากปริมาณความชื้นแล้ว ยังมีปัจจัยอีกสองปัจจัย ซึ่งก็คือชนิดของดิน และพลังงานในการบดอัด

### 2.14.2 ชนิดของดิน

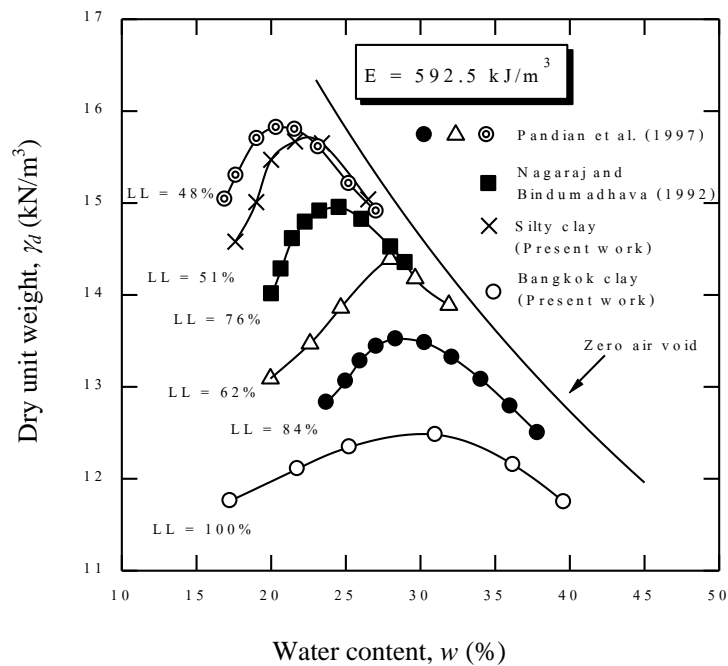
ชนิดของดินในที่นี้ครอบคลุมถึง การกระจายของเม็ดดินรูปร่างของเม็ดดินความถ่วงจำเพาะของดินและปริมาณและชนิดของแร่ดินเหนียว

Lee and Suedkamp (1972) ศึกษากราฟการบดอัดดินของดินที่แตกต่างกัน 35 ชนิด และพบว่ากราฟเหล่านั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ชนิด A เป็นกราฟที่มีจุดยอดเพียงจุดเดียว โดยทั่วไปมักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวประมาณร้อยละ 30-70 ชนิด B คือกราฟที่มี 1 จุดยอด และครึ่งจุดยอด ชนิด C คือกราฟที่มีสองจุดยอด กราฟชนิด B และ C มักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวน้อยกว่าร้อยละ 30 ชนิด D คือกราฟที่ไม่แสดงจุดยอดที่ชัดเจน ดินที่มีขีดจำกัดเหลวมากกว่าร้อยละ 70 อาจแสดงลักษณะกราฟเป็นแบบชนิด C หรือ D ซึ่งเป็นลักษณะกราฟที่ไม่ค่อยพบเห็น

สำหรับการบดอัดดินเหนียว Horpibulsuk (2005) แสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟการบดอัดแปรผันอย่างมากกับขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดเหลวยิ่งมาก หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดยังมีค่าน้อยลง ในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมยังมีค่ามากขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงผลทดสอบการบดอัดของดินชนิดต่าง ๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor test) การที่ขีดจำกัดเหลวมีอิทธิพลต่อเส้นกราฟการอัดตัวคายนี้นี้ เนื่องจากขีดจำกัดเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนผลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (pore fluid)



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.9 กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Horpibulsuk et al., 2005)

Gurtug and Sridharan (2002) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเม็ดละเอียด (fine-grained soil) ที่บดอัดแบบวิธีมาตรฐาน (standard Proctor test) มีความสัมพันธ์โดยตารางกับพิกัดพลาสติก ดังนี้

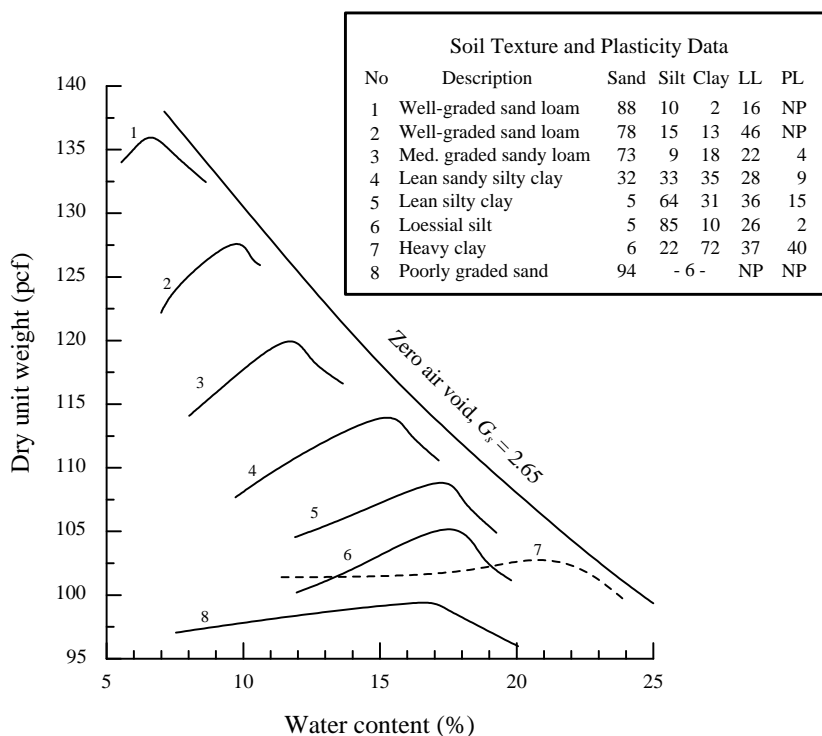
$$OMC = 0.92PL \tag{2.3}$$

$$\gamma_{d\max} = 0.98\gamma_{dPL} \tag{2.4}$$

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

รูปที่ 2.4 แสดงอิทธิพลของชนิดของดินต่อลักษณะการบดอัด กราฟการบดอัดมีลักษณะแบนสำหรับทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ (Uniformly graded sand) ในทางตรงกันข้าม ทรายที่มีขนาดละเอียด (Well-graded sand) จะแสดงผลทดสอบที่มีจุดยอดอย่างเห็นได้ชัดสำหรับดินเม็ดละเอียดดิน

ที่มีขีดจำกัดเหลวสูง จะมีหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำ และปริมาณความชื้นเหมาะสมสูง ดินตะกอนจะแสดงกราฟที่เห็นจุดยอดได้ชัดเจน ขณะที่กราฟการบดอัดดินเหนียวจะมีลักษณะแบน ดินตะกอนเป็นดินที่ไวต่อปริมาณความชื้น กล่าวคือสำหรับพลังงานบดอัดค่าหนึ่ง ปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะมีผลอย่างมากต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง ส่วนดินเหนียวเป็นดินที่ไวต่อพลังงาน การเปลี่ยนแปลงพลังงานการบดอัดเพียงเล็กน้อยมีผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักแห้งอย่างมาก



รูปที่ 2.10 อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg, 1960)

2.15 พลังงานการบดอัด

พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย (E) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E = \frac{NB \times NL \times W \times H}{V_{(m)}} \tag{2.5}$$

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

$NL$  = จำนวนชั้นของการบดอัด (number of layers)

$W$  = น้ำหนักของค้อน (weight of hammer)

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

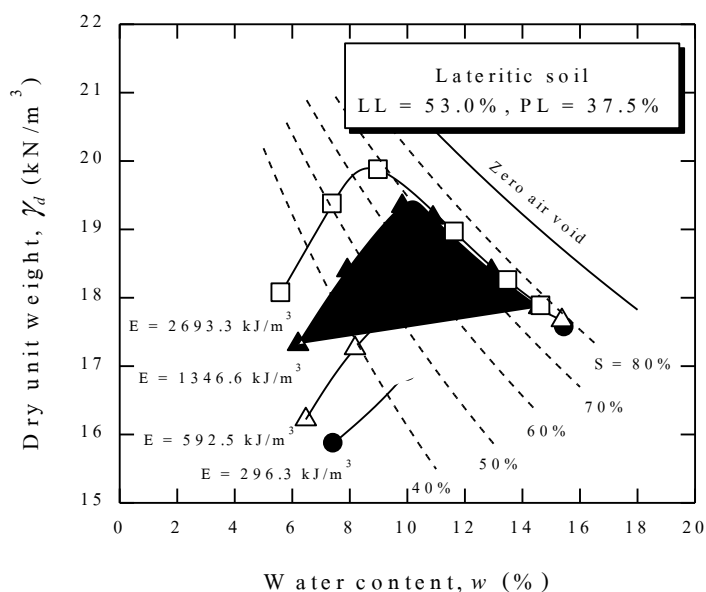
ดังนั้น พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย ในแบบหล่อขนาด 4 นิ้ว สำหรับการบดอัดแบบมาตรฐาน ( $E_{st}$ ) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน ( $E_{mod}$ ) คือ

$$E_{st} = \frac{(25)(3)(5.5)(1)}{1/30} = 12,375 \text{ ฟุต-ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต} = 592.5 \text{ กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$E_{mod} = \frac{(25)(5)(10)(1.5)}{(1/30)} = 56,250 \text{ ฟุต-ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต}$$

$$= 2693.3 \text{ กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร}$$

ถ้าพลังงานการบดอัดเปลี่ยนไป กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งจะเปลี่ยนแปลงด้วย รูปที่ 2.11 แสดงผลทดสอบการบดอัดของดินลูกรัง จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่พลังงานบดอัดต่างๆ ดินลูกรังประกอบด้วยกรวดเป็นมวลหลักในปริมาณร้อยละ 70 ส่วนที่เหลือเป็นทราย ดินตะกอน และดินเหนียว ดินนี้จัดอยู่ในกลุ่ม SC โดยการจำแนกตามระบบ Unified (USCS)



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (Horpibulsuk et al., 2004)

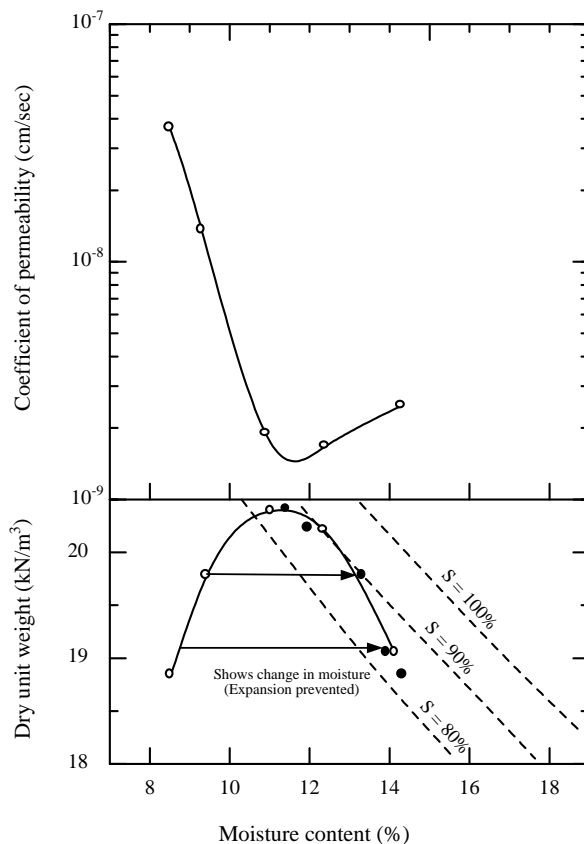
จากรูปที่ 2.11 เราสามารถสรุปได้ว่า

1. หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้น
2. ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มของพลังงานการบดอัด

## 2.16 การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม

ในกรณีของดินเหนียว การเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นส่งผลให้ความสามารถในการไหลซึมลดลงในด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสม (dry side of optimum moisture content) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีค่ามากขึ้นในด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 2.12 นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัดจะช่วยลดสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เพราะเป็นการช่วยเพิ่มความหนาแน่นแห้งสูงสุด

เพื่อความเข้าใจถึงลักษณะการอัดตัวของดินบดอัด ผู้เขียนได้ทำการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอน ที่เก็บจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และนำเสนอผลทดสอบดังรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงอิทธิพลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อการทรุดตัวของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัดสองตัวอย่างที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน (ร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) ตัวอย่างหนึ่งบดอัดที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม อีกตัวอย่างบดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จากผลทดสอบพบว่าดินที่บดอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมมีความสามารถด้านการทรุดตัวมากกว่า ดังจะเห็นได้จากความชันของกราฟมีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ ดินที่บดอัดที่ด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมยังมีค่าความเค้นคราก ( $\sigma_y$ ) สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ดินบดอัดที่ด้านแห้งจะได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (Expansive due to wetting) ในขณะที่ ดินบดอัดด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จะเกิดการอัดตัวเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น แต่อิทธิพลของการเพิ่มปริมาณความชื้นมีน้อยมาก เนื่องจากดินบดอัดด้านเปียกมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำใกล้เคียง ร้อยละ 100 ดังแสดงในรูปที่ 2.13b



รูปที่ 2.12 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (Lambe, 1962)

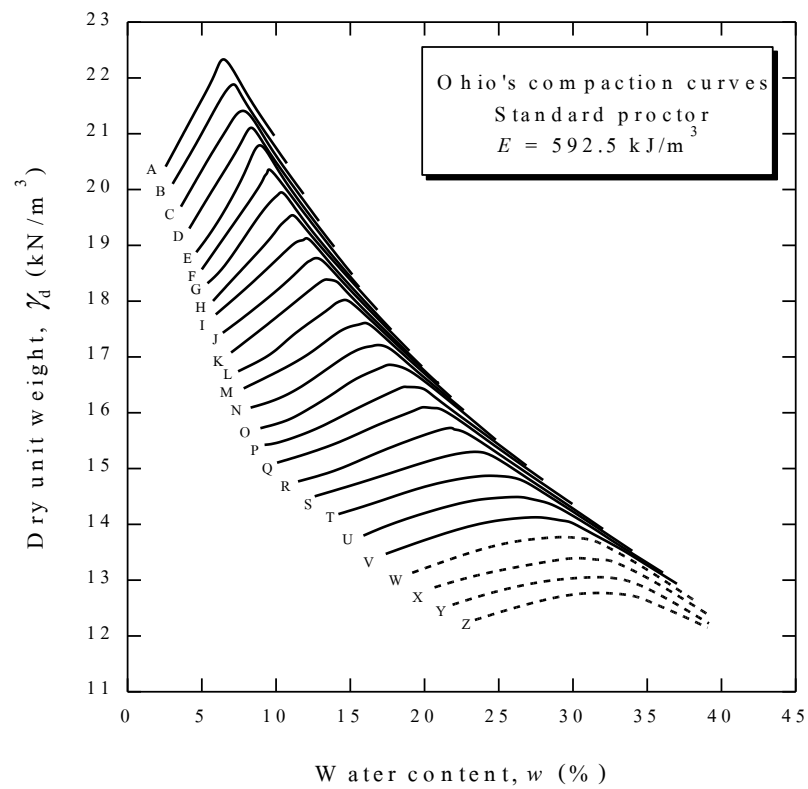
## 2.17 การทำนายกราฟการบดอัด

การทำนายกราฟการบดอัดเริ่มต้นครั้งแรกโดย Joslin (1959) ซึ่งเป็นผู้สร้างกราฟการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานจำนวน 26 กราฟ และให้ชื่อว่ากราฟ Ohio (Ohio curves) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 กราฟเหล่านี้สร้างขึ้นจากการรวบรวมผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของดินชนิดต่างๆ จำนวนมาก ในมลรัฐ Ohio กราฟ Ohio นี้มีประโยชน์ในการประมาณกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทราบผลทดสอบของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งค่าหนึ่ง แต่การประมาณนี้ทำได้เพียงแค่ว่าพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

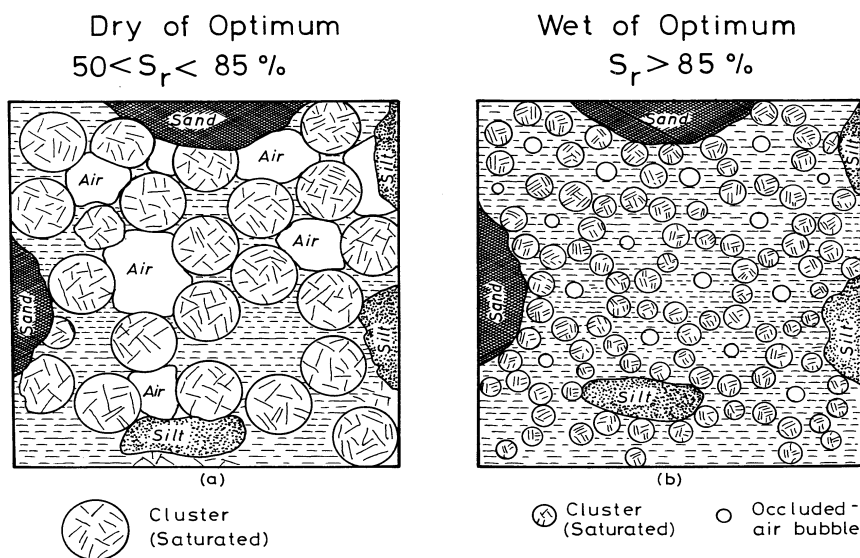
Nagaraj et al. (2006) ได้นำเสนอแบบจำลองโพรงระหว่างอนุภาคดินอุดมคติสำหรับการทำนายกราฟการบดอัดดินเม็ดละเอียดภายใต้พลังงานการบดอัดต่างๆ (รูปที่ 2.14) โดยกล่าวว่าทางด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสม สถานะของน้ำ (Water phase) และอากาศ (Air phase) ในมวลดินบดอัดจะมีความต่อเนื่อง จุดเชื่อมต่อระหว่างอากาศและน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากความโค้งผิวน้ำ (Meniscus) จะเชื่อมต่อโพรงระหว่างกลุ่มอนุภาคดินเหนียวเมื่อระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ



เพิ่มขึ้น ความต่อเนื่องของอากาศ (Air phase) จะลดลงจนในที่สุดอากาศจะก่อตัวเป็นฟองอากาศ (Air bubble) จากแบบจำลองดังกล่าว Nagaraj et al. (2006) ได้เสนอพารามิเตอร์สถานะสองตัว ( $w/S^{0.5}$  และ  $w/S^2$ ) สำหรับดินเม็ดละเอียดที่บดอัดทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม และกล่าวว่าที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง แม้ว่าปริมาณความชื้นจะเปลี่ยนแปลงตามระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่พารามิเตอร์สถานะจะมีค่าคงที่



รูปที่ 2.13 กราฟการบดอัด Ohio (ปรับปรุงจาก Joslin, 1959)



รูปที่ 2.14 แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด (Nagaraj et al., 2006)

## 2.18 การก่อสร้างและการบดอัด ชั้นโครงสร้างทาง

### 2.18.1 งานพื้นทาง (base)

งานชั้นพื้นทาง หมายถึง การก่อสร้างงานชั้นบนสุดของโครงสร้างทาง ทำหน้าที่รองรับ ผิวจราจรและแบกทานน้ำหนักที่ถ่ายมาจากผิวจราจร กระจายน้ำหนักลงสู่ฐานด้านล่าง วัสดุที่ใช้ก่อสร้างได้แก่หินคลุก หินโม่ กรวดโม่ ตะกรันเหล็ก (slag) ที่มีขนาดคละสม่ำเสมอจากใหญ่ไปหาเล็ก ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานวัสดุพื้นทาง นำมาคลุกเคล้าผสมน้ำ (mix process) ทำการปรับเกลี่ยแต่งและบดอัดแน่นให้ได้ตามรูปแบบ หนาชั้นละไม่เกิน 15 ซม. ความแน่นไม่น้อยกว่า ร้อยละ 95 modified proctor density

#### 2.18.1.1 วิธีการก่อสร้าง

การก่อสร้างต้องตรวจสอบระดับและความแน่นของชั้นรองพื้นทางให้ถูกต้อง ก่อนนำวัสดุพื้นทางมาถมบนชั้นรองพื้นทางทำการคลุกเคล้าวัสดุกับน้ำให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอและมีความชื้นพอเหมาะใกล้เคียงกับค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) จากห้องปฏิบัติการ จากนั้นจึงเกลี่ยแผ่แล้วบดอัดเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นหนาไม่เกิน 15 เซนติเมตร บดอัดแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density บริเวณใดหรือช่วงใดวัสดุพื้นทางที่เกลี่ยแผ่และทำการบดอัดแล้วมีมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดแยกตัวจากกัน (segregation) ให้แก้ไขโดยการขูดรื้อออกแล้วทำการผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หรือรื้อออกใส่วัสดุพื้นทางที่มีส่วนผสมสม่ำเสมอลงไปแทน แล้วสเปรย์น้ำให้ความชื้นที่เหมาะสม เกลี่ยให้ได้รูปตามแบบก่อสร้างแล้วทำการบด

อัดแน่น ในระหว่างการบดอัดให้มีการสเปรย์ น้ำบาง ๆ เพื่อให้วัสดุจับตัวกันจะช่วยให้ผิวหน้าเรียบปราศจากหลุมบ่อ และเพื่อให้ผิวหน้าเรียบแน่นสม่ำเสมอ ให้ทำการบดอัดชั้นสุดท้ายด้วยรถบดล้อเหล็กน้ำหนักไม่น้อยกว่า 12 ตัน ซึ่งในระหว่างก่อสร้างหากมีฝนตกน้ำขัง ทำให้ความชื้นในระหว่างการบดอัดมากเกินไปจนเป็นเหตุให้ชั้นพื้นทางเสียหายหรืออาจเสียหายลึกกลงไปถึงชั้นรองพื้นทางด้วย ดังนั้นเมื่อพบว่าพื้นที่บางส่วนที่ได้ก่อสร้างแล้วมีการบวมตัว (soft spot) จะต้องรื้อออกและอาจต้องตรวจสอบชั้นรองพื้นทางด้วยว่ามีความเสียหายหรือไม่ หากเสียหายจะต้องรีบดำเนินการแก้ไขปรับปรุงชั้นรองพื้นทางให้เรียบร้อยก่อนแล้วจึงทำการแก้ไขพื้นที่ทางต่อไปถ้าแบบก่อสร้างกำหนดความหนาพื้นทางมากกว่า 15 เซนติเมตร ให้แบ่งการทำงานเป็น 2 ชั้น หนาชั้นละเท่า ๆ กัน (โดยประมาณ) บดอัดให้แน่นและได้ระดับตามแบบก่อสร้าง

งานชั้นพื้นทางที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ และยังไม่ได้ก่อสร้างลาดยางรองพื้นแอสฟัลต์ (prime coat) ตามขั้นตอนปกติ ให้ฉีดพ่นน้ำหล่อเลี้ยงผิวหน้าป้องกันการสูญเสียน้ำ

2.18.1.2 ผลการทดสอบความแน่นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ หากผลทดสอบความแน่นในสนามน้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density ให้พิจารณาดำเนินการดังนี้

- หากปริมาณน้ำอยู่ในช่วง ใกล้เคียงค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่การทดสอบความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ให้ทำการบดทับซ้ำโดยเพิ่มพลังงานการบดอัดและเพิ่มจำนวนเที่ยว เพื่อให้ได้ความแน่นตามที่ต้องการ
- หากปริมาณน้ำไม่อยู่ในช่วงใกล้เคียงค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะต้องขุดคุ้ยวัสดุ (scarify) เพื่อตากให้แห้งกรณีที่มีปริมาณน้ำมากเกินไป หรือผสมน้ำเพิ่ม กรณีที่มีปริมาณน้ำน้อย แล้วจึงบดอัดใหม่ ให้ได้ความแน่นตามข้อกำหนด

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการทำโครงการ

#### 3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการบดอัดและกำลังอัดของผิวทางปรับปรุงเดิมที่ผสมกับปูนซีเมนต์ในพื้นที่จังหวัดสระบุรี สำนักงานทางหลวงชนบทจังหวัดสระบุรี กรมทางหลวงชนบท ผู้วิจัยเก็บตัวอย่างวัสดุผิวทางเดิม (หินคลุก + ผิวทางแอสฟัลต์) ผิวทางปรับปรุงเดิม (หินคลุก + ผิวทางแอสฟัลต์ที่เคยได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มาแล้ว) แล้วนำมาบดอัดและผสมด้วยปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นผิวทางเชื่อมประสาน (Bound pavement) โดยวัสดุที่ปรับปรุงใหม่นี้ต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลทดสอบทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการผสม ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม ต่อกำลังอัดของผิวทางปรับปรุงเดิมที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์

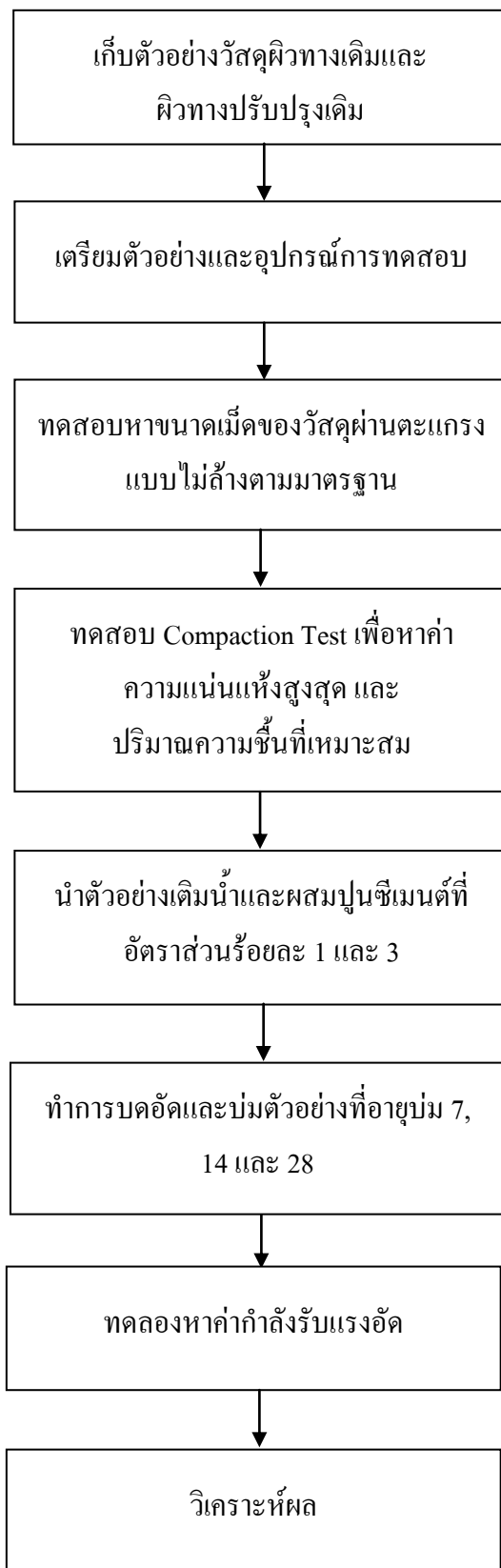
#### 3.2 แผนงานดำเนินการ

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและกำลังอัดของวัสดุผิวทางและผิวทางปรับปรุงเดิม การทดสอบดำเนินการที่ สำนักงานทางหลวงชนบทจังหวัดสระบุรี กรมทางหลวงชนบท รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3 ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

วัสดุผิวทางที่ซำรุดจากสายทางถูกนำทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและการบดอัด และถูกนำมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว มาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงชนบทแสดงดังนี้

- การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve Analysis) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบ มทข.(ท) 501.8 - 2545
- การทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบ มทข.(ท) 501.2 - 2545
- วิธีการทดสอบหาค่า (Unconfined Compressive Strength) ของดิน



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานวิจัย

## บทที่ 4

### การศึกษาผลทดลองและการวิจารณ์ผล

#### 4.1 บทนำ

กรมทางหลวงชนบทโดยสำนักงานทางหลวงชนบทจังหวัดสระบุรีได้รับการถ่ายโอนภารกิจในการบำรุงรักษาดูแลถนนเรียบคลองชลประทาน (ชัยนาท – ป่าสัก) ฝั่งขวา (ถนนสาย สบ.4047 แยกทางหลวงหมายเลข 3016 – บ้านท่าลาน อำเภอหนองโดน จังหวัดสระบุรี กม.ที่ 0+000 ถึงกม.ที่ 31+630) เมื่อปี พ.ศ. 2552 โครงสร้างทางเดิมประกอบด้วยชั้นดินเดิม ดินถม ชั้นรองพื้นทาง (ลูกรัง) ชั้นพื้นทาง (หินคลุก) และผิวทางแบบ CAPE SEAL ถนนบางส่วนมีสภาพทรุดโทรมเกินกว่าที่จะซ่อมบำรุงด้วยวิธีปกติ สำนักงานทางหลวงชนบทจังหวัดสระบุรีจึงร้องขอของบประมาณแบบซ่อมบำรุงพิเศษ และได้รับจัดสรรงบประมาณเพื่อบูรณะซ่อมแซมถนนสายดังกล่าวด้วยวงเงินงบประมาณ 7,500,000 บาท (เจ็ดล้านห้าแสนบาทถ้วน) สำนักงานทางหลวงชนบทจังหวัดสระบุรีได้ทำการสำรวจและออกแบบการบูรณะซ่อมสร้างผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement In – Place Recycling) โดยการกัดผิวทางเดิมที่ชำรุดลึก 0.20 เมตร พื้นที่ชำรุดเสียหายมีความกว้างของช่องจราจร 6.00 เมตร ไหล่ทางกว้างข้างละ 1.00 เมตร รวมผิวจราจรกว้าง 8.00 เมตร การซ่อมบำรุงดำเนินการในช่วง กม.ที่ 13+000 ถึง ช่วง กม.ที่ 15+000 รวมระยะทาง 2.000 กิโลเมตร เมื่อวันที่ 25 เมษายน พ.ศ.2554 แล้วเสร็จเมื่อวันที่ 23 มิถุนายน พ.ศ.2554

ในเดือนสิงหาคมถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2554 ประเทศไทยได้ประสบกับมหาอุทกภัยครั้งใหญ่ในรอบ 100 ปี รัฐบาลจึงมีนโยบายระบายมวลน้ำจากแม่น้ำปิง, วัง, ยม และน่าน ที่ไหลมารวมกันเป็นแม่น้ำเจ้าพระยาที่ปากน้ำโพ จังหวัดนครสวรรค์ แล้วไหลลงสู่เขื่อนเจ้าพระยาที่จังหวัดชัยนาท โดยผ่านคลองชัยนาท-ป่าสัก สู่เขื่อนพระรามหกในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา และระบายลงสู่คลองระพีพัฒน์ อัตรากาลไหลสูงสุดของน้ำตามนโยบายของรัฐบาลในขณะนั้นเท่ากับ 1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งเกินกว่าความสามารถในการระบายน้ำของคลองชัยนาท-ป่าสัก (สูงสุดไม่เกิน 400 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) เพื่อเป็นการรองรับมวลน้ำมหาศาล กรมชลประทานได้เสริมคันทางข้างคลองชลประทานชัยนาท-ป่าสัก ขึ้นสูงอีก 0.80-1.00 เมตร หลังสิ้นสุดมหาอุทกภัย ถนนสาย สบ.4047 แยกทางหลวงหมายเลข 3016 – บ้านท่าลาน อำเภอหนองโดน จังหวัดสระบุรี ซึ่งเป็นถนนฝั่งขวาเรียบคลองชลประทาน เกิดการทรุดตัวเป็นช่วงๆ พร้อมกับแตกตามยาว เมื่อปี พ.ศ.2556 สำนักงานทางหลวงชนบทจังหวัดสระบุรีจึงขอรับการสนับสนุนงบประมาณเพื่อบูรณะถนนสายนี้โดยออกแบบเป็นการซ่อมสร้างผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตด้วยวิธีการหมุนเวียน

วัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ ด้วยวงเงินค่าซ่อมสร้าง 9,800,000 บาท (เก้าล้านแปดแสนบาทถ้วน) การซ่อมบำรุงทำโดยการกัดหรือผิวทางเดิมจนถึงระดับความลึก 0.20 เมตร และผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ ความกว้างของช่องจราจร 6.00 เมตร ไหล่ทางกว้างข้างละ 1.00 เมตร (รวมผิวจราจรกว้าง 8.00 เมตร) การซ่อมสร้างดำเนินการในช่วง กม.ที่ 12+000 ถึง ช่วง กม.ที่ 15+000 รวมระยะทาง 3.000 กิโลเมตร พื้นที่ซ่อมสร้างจึงประกอบด้วยผิวทางที่เคยได้รับการซ่อมบำรุงด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (กม. ที่ 13+000 ถึง ช่วง กม.ที่ 15+000) และพื้นที่ที่ไม่เคยได้รับการซ่อมบำรุงมาก่อน กม.ที่ 12+000 ถึง ช่วง กม.ที่ 13+000) การซ่อมบำรุงดำเนินการในช่วงวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2557 วันที่ 26 พฤษภาคม 2557

การซ่อมบำรุงผิวทางด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่บนผิวทางเดิมที่เคยได้รับการซ่อมบำรุงมาก่อนแล้วเป็นงานใหม่ที่ยังไม่เคยดำเนินการมาก่อนในประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างผิวทางที่เคยได้รับการซ่อมบำรุงแล้วและได้รับการปรับปรุงอีกครั้งด้วยปูนซีเมนต์ และเปรียบเทียบกับการพัฒนากำลังอัดของผิวทางเดิมที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ บทนี้จะนำเสนอขั้นตอนการเก็บตัวอย่างจากสายทาง คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางเดิม และการพัฒนากำลังอัดของผิวทางเดิมและผิวทางปรับปรุงเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับโครงการที่จำเป็นต้องทำการปรับปรุงด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เป็นครั้งที่สอง

## 4.2 วัสดุและวิธีทดลองในห้องปฏิบัติการ

### 4.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่นำมาทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นตัวอย่างผิวทางเดิม (ที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่) ช่วงกม.ที่ 12+000 ถึง กม.ที่ 13+000 และตัวอย่างผิวทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงแล้วช่วง กม. ที่ 13+000 ถึง ช่วง กม.ที่ 15+000 ซึ่งเป็นส่วนผสมของหินคลุกพื้นทางและผิวทางแอสฟัลต์ ตัวอย่างทั้งสองถูกนำมาผสมกับหินคลุกใหม่ (หินคลุก + ผิวทางเดิม) ในอัตราส่วนหินคลุกใหม่:ตัวอย่างผิวทางเดิมเท่ากับ 30:70 เพื่อวัตถุประสงค์ในการเสริมความหนาของผิวทางใหม่หลังการซ่อมบำรุง การเก็บตัวอย่างทดสอบทั้งสองชนิด (ผิวทางเดิมและผิวทางปรับปรุงเดิม) ทำโดยการตัดและบดหรือผิวทางที่ชำรุด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ผิวทางที่นำมาทดสอบจะถูกทุบและย่อยจนมีขนาดละเอียดตามเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท



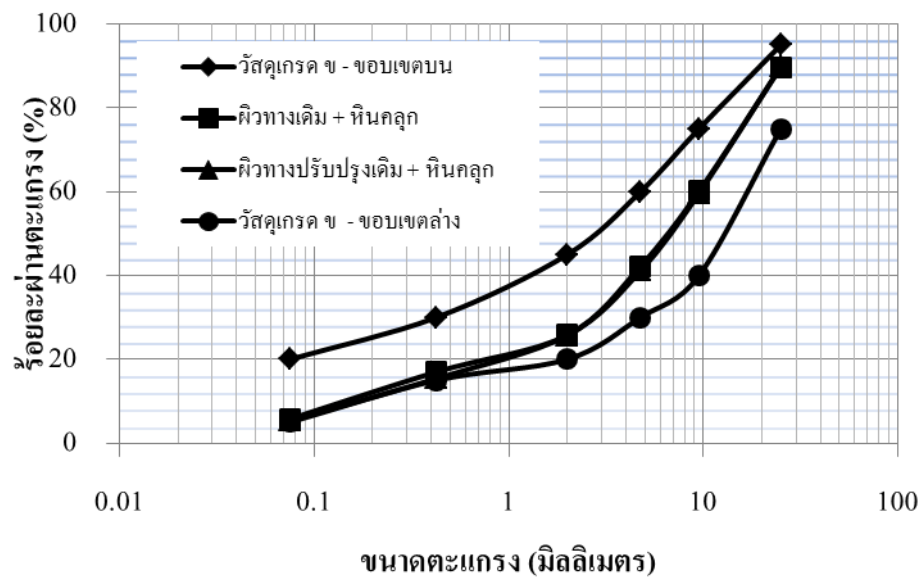
รูปที่ 4.1 การเก็บตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงการเตรียมตัวอย่างทดสอบ และกราฟแสดงการกระจายขนาดของเม็ดดินสำหรับวัสดุทดสอบทั้งสองชนิด (ผิวทางเดิม+ หินคลุกใหม่ และผิวทางปรับปรุงเดิม + หินคลุกใหม่) รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการกระจายขนาดของวัสดุทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันอย่างมาก ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ ( $C_u$ ) และสัมประสิทธิ์ความโค้ง ( $C_c$ ) ของวัสดุทั้งสองมีค่าประมาณเท่ากับ 55.23 และ 4.66 ตามลำดับ วัสดุทั้งสองสามารถจำแนกได้เป็นดินชนิดกรวดที่มีความคละตามวัสดุเกรด ข ตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุก มทข.203-2545 ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุทั้งสอง วัสดุทั้งสองมีค่า Los Angeles Abrasion อยู่ในระหว่าง 20.24 ถึง 21.50 ไม่มีขีดความชันเหลว และมีค่า CBR ระหว่างร้อยละ 89 ถึง 93 ซึ่งเกินกว่าค่ายอมให้สำหรับวัสดุชั้นพื้นทาง (ร้อยละ 80) ผลทดสอบการบวมตัวแสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสองไม่มีการบวมตัว แม้จะถูกแช่น้ำเป็นเวลานานถึง 4 วัน





รูปที่ 4.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการวิเคราะห์การกระจายขนาดเม็ดดิน

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐาน

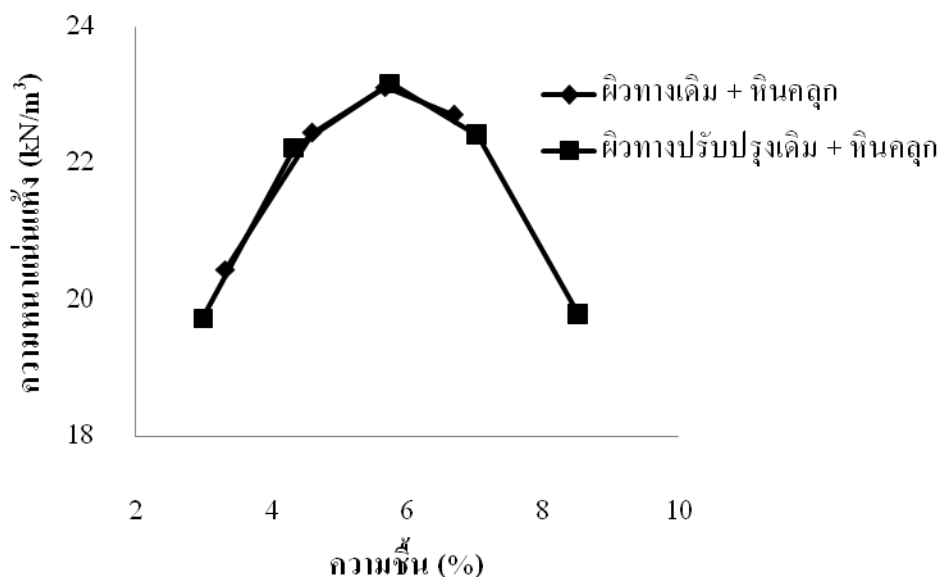
Basic Properties	ผิวทางเดิม + หินคลุก	ผิวทางปรับปรุง เดิม + หินคลุก
Gravel content	59.77	59.17
Sand content	41.90	40.77
Fine content	5.77	6.3
LL (%)	NP	NP
PI (%)	NP	NP
Optimum Moisture Content (%)	5.68	5.75
Maximum Dry Density (gm./cc.)	2.312	2.318
Soaked CBR. ที่ความแน่น 95%	90	89
Abrasion (%)	20.44	21.5
Swell	-	-

#### 4.2.2 วิธีการทดลอง

ตัวอย่างผิวทางเดิมและตัวอย่างผิวทางปรับปรุงเดิมถูกนำมาผสมกับน้ำและทำการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน รูปที่ 4.4 แสดงกราฟการบดอัดของตัวอย่างทั้งสอง ความแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 22.7 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และเท่ากับร้อยละ 5.6 ตามลำดับ หลังจากได้กราฟการบดอัด ตัวอย่างผิวทางเดิมและผิวทางปรับปรุงเดิมถูกเติมน้ำจนได้ปริมาณน้ำเหมาะสมและผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 1 และ 3 ต่อมาถูกบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เมื่อสิ้นสุดการบดอัด ตัวอย่างจะถูกนำมาออกจากแบบหล่อและห่อด้วยถุงพลาสติก และเก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิ เมื่อได้อายุบ่มที่กำหนด (7, 14 และ 28 วัน) ตัวอย่างบดอัดจะถูกนำไปทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ผลทดสอบที่นำเสนอจะเป็นค่าเฉลี่ยของ 3 ก้อนตัวอย่าง จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมดเท่ากับ 36 ตัวอย่าง การกดตัวอย่างดำเนินการด้วยอัตราเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที

นอกจากเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างที่ได้จากการผสมในสนาม โดยเครื่องจักรมาทำการบดอัดในสนาม ตัวอย่างในสนามถูกผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 3.5 ตามสัญญาจัดจ้างของกรมทางหลวงชนบท กำลังอัดของตัวอย่างที่ได้จากการผสมและบดอัดในสนาม จะถูกนำมาบ่มและทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ในห้องปฏิบัติการ กำลังอัดที่นำเสนอจะเป็นค่าเฉลี่ยของ 3 ก้อนตัวอย่าง ค่ากำลังอัดที่ได้จากการผสม

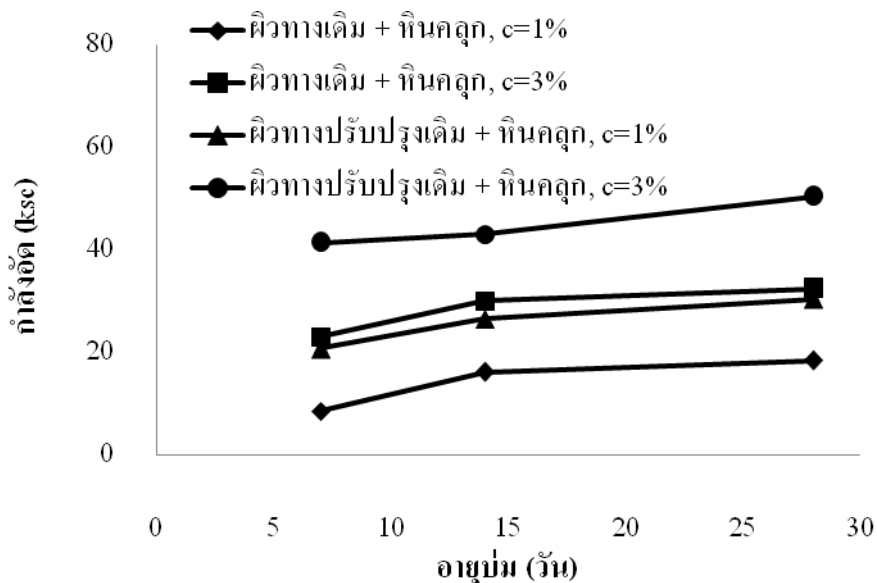
ในสนามและการผสมในห้องปฏิบัติการจะนำมาเปรียบเทียบ เพื่อศึกษาอิทธิพลของการผสมต่อการพัฒนากำลังอัด จำนวนตัวอย่างทดสอบที่ผสมในสนามมีทั้งสิ้น 18 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการบดอัด

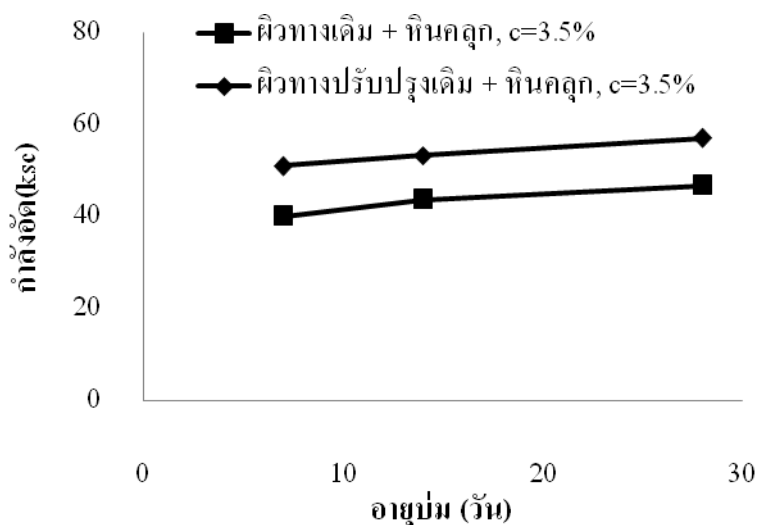
#### 4.3 ผลทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบ

รูปที่ 4.5 แสดงกำลังอัดของตัวอย่างบดอัดทั้งสองชนิดที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน กำลังอัดของตัวอย่างทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มและปริมาณปูนซีเมนต์เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมทำให้สัดส่วนของน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (w/c) ของตัวอย่างมีค่าลดลง และมีผลให้กำลังอัดของวัสดุมีค่าสูงขึ้น (Horpiulsuk et al., 2006) เมื่อเปรียบเทียบการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างทั้งสองชนิดที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน ตัวอย่างผิทางปรับปรุงเดิมจะมีกำลังอัดที่สูงกว่าตัวอย่างผิทางเดิม สำหรับทุกอายุบ่ม ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kampala et al. (2013) ด้านการพัฒนากำลังอัดของดินที่เคยได้รับการปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ตัวอย่างผิทางปรับปรุงเดิมมีกำลังอัดที่สูงกว่า เนื่องจากปูนซีเมนต์บางส่วนที่ถูกหุ้มด้วยหินคลุกและไม่ได้สัมผัสกับน้ำหรือยังทำปฏิกิริยากับน้ำไม่สมบูรณ์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำอีกครั้งหลังจากที่ถูกหุ้บและผสมน้ำ ด้วยเหตุนี้เอง การเติมปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากันในตัวอย่างทดสอบทั้งสองจึงให้กำลังอัดที่ต่างกัน ผลทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการความเป็นไปได้ของการนำวัสดุผิทางปรับปรุงเดิมกลับมาใช้ใหม่



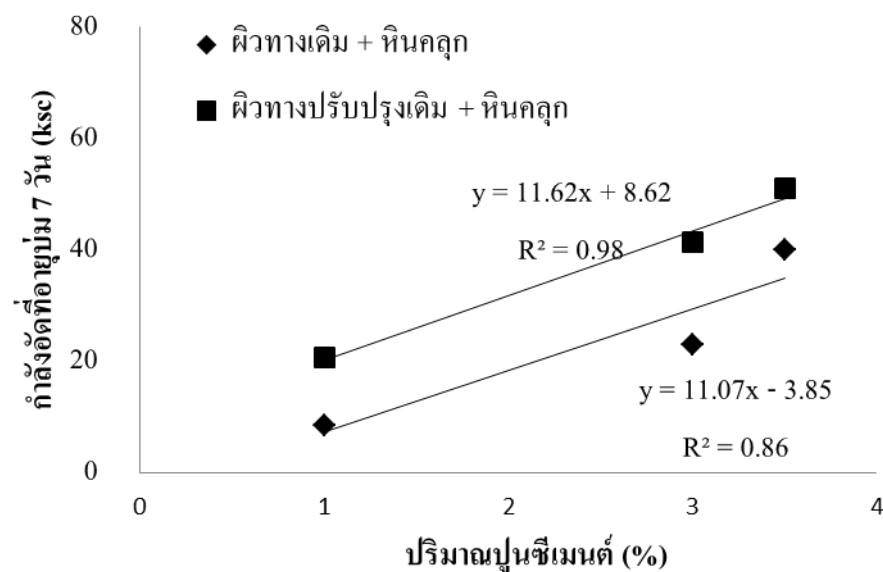
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 4.6 แสดงการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างซีเมนต์บดอัดที่ผสมด้วยเครื่องจักร ผลการพัฒนากำลังอัดมีลักษณะเช่นเดียวกับผลการทดสอบตัวอย่างซีเมนต์ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ กล่าวคือกำลังอัดของวัสดุทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม และผิวทางปรับปรุงเดิมมีค่ากำลังอัดสูงกว่าผิวทางเดิมในทุกอายุบ่ม ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มของตัวอย่างทั้งสองชนิดมีความขนานกัน แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของกำลังอัดมีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกอายุบ่ม

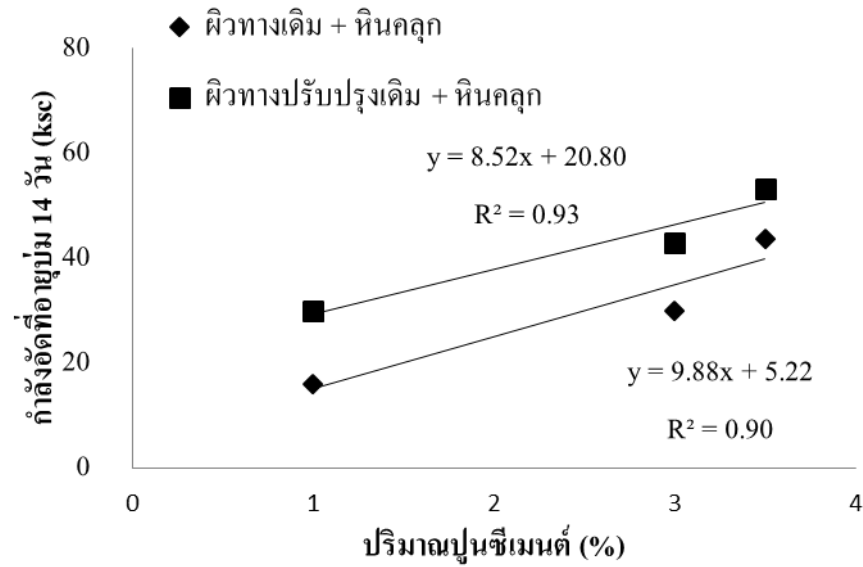


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มตัวอย่างในสนาม

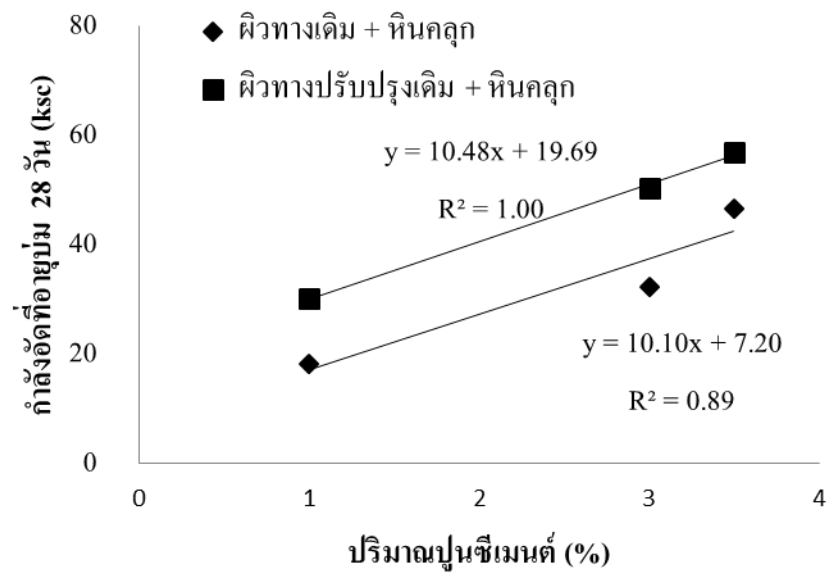
นอกจากอิทธิพลของปูนซีเมนต์และอายุบ่มแล้ว การย่อยตัวอย่างอาจจะมีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัด ซึ่งสามารถอธิบายได้จากความแตกต่างของการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างที่ผสมในห้องปฏิบัติการและตัวอย่างที่ผสมในสนาม รูปที่ 4.7 ถึง 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณปูนซีเมนต์ของตัวอย่างที่ผสมในห้องปฏิบัติการและตัวอย่างที่ผสมในสนาม ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงสำหรับจุดทดสอบทั้งสามจุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างที่ผสมในห้องปฏิบัติการและตัวอย่างที่ผสมในสนามมีลักษณะเช่นเดียวกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการย่อยผิวทางเดิมและผิวทางปรับปรุงเดิมในสนามและห้องปฏิบัติการให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกันที่ปริมาณปูนซีเมนต์เดียวกัน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน กับปริมาณปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 14 วัน กับปริมาณปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน กับปริมาณปูนซีเมนต์

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้ผิวทางปรับปรุงเดิมเป็นวัสดุมวลรวมหยาบในการทำผิวทางเชื่อมประสาน (Bound pavement) กำลังอัดของผิวทางปรับปรุงเดิมผสมปูนซีเมนต์ถูกนำมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดของผิวทางเดิมผสมปูนซีเมนต์ บทสรุปที่สำคัญของงานวิจัยแสดงได้ดังนี้

1. กำลังอัดของตัวอย่างผิวทางเดิมและผิวทางปรับปรุงเดิมผสมปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอายุการบ่มและปริมาณปูนซีเมนต์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน
2. ที่ปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่มเดียวกัน ตัวอย่างผิวทางปรับปรุงเดิมมีกำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างผิวทางเดิม เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้อีก เมื่อตัวอย่างผิวทางปรับปรุงเดิมถูกทุบย่อยและผสมเข้ากับปูนซีเมนต์และอีกครั้ง การปรับปรุงผิวทางปรับปรุงเดิมดังแสดงในงานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ทั้งในเชิงวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม
3. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณปูนซีเมนต์ของทั้งตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการและในสนาม ประมาณได้ด้วยฟังก์ชันเส้นตรงเดียวกัน ซึ่งนำมาสู่ข้อสันนิษฐานที่ว่า การย่อยตัวอย่างในห้องปฏิบัติการและในสนามมีผลต่อกำลังอัดไม่มากนัก และการเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการสามารถใช้เป็นตัวแทนของการทดสอบจริงในสนามได้

## เอกสารอ้างอิง

- Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R. (2006), “**Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils : Laboratory and field study**”, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.3, pp.351-366.
- Kampala, A. and Horpibulsuk, S. (2013), “**Engineering properties of calcium carbide residue stabilized silty clay**”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.25, No.5, pp.632-644.
- Kampala, A., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A. and Shen, S.L. (2013), “**Engineering properties of recycled calcium carbide residue stabilized clay as fill and pavement materials**”, *Construction and Building Materials*, Vol. 46, pp.203-210.
- ชูศักดิ์ คีรีรัตน์. (2554). **ทฤษฎีบดอัดดิน**. ปลูกพืชศาสตร์ (พิมพ์ครั้งที่ 1). หน้า 738 - 743
- รุ่งลาวัลย์ ราชัน และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข.(2548). **เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลการทดสอบ และการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน**. ปลูกพืชศาสตร์. หน้า 248
- สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา.(2545). **มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก**. มทช. 203-2545 กรมทางหลวงชนบท
- สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา.(2545). **มาตรฐานวิธีทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ**. มทช. (ท) 501.6-2545 กรมทางหลวงชนบท
- สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. (2549). **มาตรฐานวิธีทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุเม็ดหยาบ**. มทช. (ท) 501.9-2549 กรมทางหลวงชนบท
- สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา.(2545). **มาตรฐานวิธีทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน**. มทช. (ท) 501.2-2545 กรมทางหลวงชนบท
- สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา.(2545). **มาตรฐานวิธีทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์**. มทช. (ท) 501.3-2545 กรมทางหลวงชนบท
- สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา.(2545). **มาตรฐานงานหมุนเวียนชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ (Pavement In – Place Recycling)** มทช. 242-2555 กรมทางหลวงชนบท



**ภาคผนวก**  
**ตารางผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ**

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุผิวทางเดิม โครงการ สาย สป. 4047 แยกทางหลวง  
หมายเลข 3016 – บ้านท่าลาน อำเภอหนองโดน จังหวัดสระบุรี

การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ	ผลการทดสอบ
	เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก
ขนาดตะแกรง 2"	-
1"	89.37
3/8"	59.77
NO.4	41.90
NO.10	25.43
NO.40	17.00
NO.200	5.77
LL. (%)	NP
PI. (%)	NP
GRADATION	ข
Optimum Moisture Content (%)	5.68
Maximum Dry Density (gm./cc.)	2.312
Soak CBR. ที่ความแน่น 95%	90
Abrasion (%)	20.44
Swell	-

ตารางที่ ๒ ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุผิวทางปรับปรุงเดิม โครงการ สาย สป. 4047 แยกทาง  
หลวงหมายเลข 3016 – บ้านท่าลาน อำเภอนองโค่น จังหวัดสระบุรี

การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ	ผลการทดสอบ
	เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก
ขนาดตะแกรง 2"	-
1"	89.43
3/8"	59.17
NO.4	40.77
NO.10	25.33
NO.40	16.60
NO.200	6.30
LL. (%)	NP
PI. (%)	NP
GRADATION	ข
Optimum Moisture Content (%)	5.75
Maximum Dry Density (gm./cc.)	2.318
Soak CBR. ที่ความแน่น 95%	89
Abrasion (%)	21.50
Swell	-

**ภาคผนวก**

**ตาราง UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH**

ตารางที่ 3 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 1 % อายุบ่ม 7 วัน

CEMENT 1 % อายุบ่ม 7 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div

No	Sample	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (kg./Sq.cm.)
		Dial Reading	(kg.)		
1	ผิวทางเดิม	201.88	880	800.78	9.00
2		188.81	822.80	80.660	8.00
3		198.36	864.60	80.979	8.49
4	ผิวทางปรับปรุงเดิม	289.31	1262.8	80.397	17.50
5		296.35	1293.6	80.237	18.5
6		335.04	1463.00	80.768	26.00

ตารางที่ 4 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 1 % อายุบ่ม 14 วัน

CEMENT 1 % อายุบ่ม 14 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div

No	Sample	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (kg./Sq.cm.)
		Dial Reading	(kg.)		
7	ผิวทางเดิม	272.73	1190.20	80.289	16.20
8		270.22	1197.20	78.973	16.20
9		269.21	1174.80	80.767	15.80
10	ผิวทางปรับปรุงเดิม	333.03	1454.20	80.450	24.00
11		338.06	1476.20	79.656	25.35
12		366.70	1601.60	79.130	30.00

ตารางที่ ๕ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 1 % อายุบ่ม 28 วัน

CEMENT 1 % อายุบ่ม 28 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div

No	Sample	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (kg./Sq.cm.)
		Dial Reading	(kg.)		
13	ผิวทางเดิม	283.79	1238.60	78.920	17.80
14		290.80	1269.40	80.448	18.00
15		295.85	1291.40	79.130	19.20
16	ผิวทางปรับปรุงเดิม	392.83	1716.00	80.184	29.00
17		356.15	1555.40	79.025	27.00
18		398.86	1742.40	79.025	35.00

ตารางที่ ๖ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3 % อายุบ่ม 7 วัน

CEMENT 3 % อายุบ่ม 7 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div

No	Sample	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (kg./Sq.cm.)
		Dial Reading	(kg.)		
19	ผิวทางเดิม	320.97	1401.40	79.603	23.50
20		348.61	1522.40	79.920	27.00
21		288.31	1258.40	79.603	14.50
22	ผิวทางปรับปรุงเดิม	436.05	1905.20	88.139	42.00
23		432.03	1887.60	80.820	41.00
24		436.55	1907.40	80.821	41.00

ตารางที่ ๗ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3 % อายุบ่ม 14 วัน

CEMENT 3 % อายุบ่ม 14 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div

No	Sample	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (kg./Sq.cm.)
		Dial Reading	(kg.)		
25	ผิวทางเดิม	342.58	1496.00	78.410	27.00
26		342.08	1493.80	79.604	25.00
27		410.42	1793.00	79.288	38.00
28	ผิวทางปรับปรุงเดิม	439.06	1918.40	80.395	43.00
29		432.53	1889.80	80.980	41.00
30		452.63	1977.80	81.245	45.00

ตารางที่ ๘ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3 % อายุบ่ม 28 วัน

CEMENT 3 % อายุบ่ม 28 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div

No	Sample	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (kg./Sq.cm.)
		Dial Reading	(kg.)		
31	ผิวทางเดิม	387.81	1694.00	79.708	30.00
32		357.66	1562.00	80.237	28.00
33		423.48	1850.20	80.554	39.00
34	ผิวทางปรับปรุงเดิม	485.80	2123.00	80.661	50.00
35		480.77	2101.00	80.608	49.00
36		484.29	2116.40	79.603	52.00

ตารางที่ 9 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 7 วัน

CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 7 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div

No	Sample	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (kg./Sq.cm.)
		Dial Reading	(kg.)		
37	ผิวทางเดิม	417.96	1826.00	80.396	38.00
38		417.96	1826.00	80.555	38.00
39		455.65	1991.00	80.608	44.00
40	ผิวทางปรับปรุงเดิม	482.28	2107.60	80.396	52.00
41		477.76	2087.80	80.396	51.00
42		475.24	2076.80	80.396	50.00

ตารางที่ 10 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 14 วัน

CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 14 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div

No	Sample	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (kg./Sq.cm.)
		Dial Reading	(kg.)		
43	ผิวทางเดิม	429.51	1876.60	80.396	42.00
44		440.07	1922.30	80.396	43.00
45		459.16	2006.40	80.396	46.00
46	ผิวทางปรับปรุงเดิม	488.31	2134.00	80.396	54.00
47		483.28	2112.00	80.396	52.00
48		490.82	2145.00	80.396	54.00



ตารางที่ 11 UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 28 วัน  
CEMENT 3.5 % อายุบ่ม 28 วัน Factor of Proving Ring. 0.48 Kg/Div

No	Sample	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (kg./Sq.cm.)
		Dial Reading	(kg.)		
49	ผิวทางเดิม	439.06	1918.40	80.396	41.00
50		515.44	2252.80	80.396	58.00
51		456.15	1993.20	80.396	41.00
52	ผิวทางปรับปรุงเดิม	495.85	2167.00	80.396	56.00
53		505.90	2211.00	80.396	57.00
54		510.92	2233.00	80.396	58.00

ตารางที่ 12 ผลทดลองกำลังอัดในแต่ละช่วงอายุการบ่ม

ลำดับ ที่	ชนิด	อายุที่บ่ม	qu.	qu./2	qu.เฉลี่ย	$q_D/q_7$
1	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 1%	7	9.00	4.50	8.50	1.00
2	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 1%	7	8.00	4.00		
3	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 1%	7	8.49	4.25		
4	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 1%	14	16.20	8.10	16.07	1.89
5	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 1%	14	16.20	8.10		
6	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 1%	14	15.80	7.90		
7	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 1%	28	17.80	8.90	18.33	2.16
8	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 1%	28	18.00	9.00		
9	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 1%	28	19.20	9.60		
10	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 3%	7	23.50	11.75	23.00	1.00
11	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 3%	7	27.00	13.50		
12	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 3%	7	18.50	9.25		

ตารางที่ ก 12 (ต่อ)

ลำดับ ที่	ชนิด	อายุที่บ่ม	qu.	qu./2	qu.เฉลี่ย	$q_D/q_7$
13	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 3%	14	27.00	13.50	30.00	1.30
14	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 3%	14	25.00	12.50		
15	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 3%	14	38.00	19.00		
16	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 3%	28	30.00	15.00	32.33	1.41
17	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 3%	28	28.00	14.00		
18	ผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ 3%	28	39.00	19.50		
19	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 1%	7	17.50	8.75	20.67	1.00
20	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 1%	7	18.50	9.25		
21	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 1%	7	26.00	13.00		
22	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 1%	14	24.00	12.00	26.45	1.28
23	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 1%	14	25.35	12.68		
24	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 1%	14	30.00	15.00		
25	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 1%	28	29.00	14.50	30.33	1.47
26	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 1%	28	27.00	13.50		
27	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 1%	28	35.00	17.50		

ตารางที่ ก 12 (ต่อ)

ลำดับ ที่	ชนิด	อายุที่บ่ม	qu.	qu./2	qu.เฉลี่ย	q <sub>D</sub> /q <sub>7</sub>
28	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 3%	7	42.00	21.00	41.33	1.00
29	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 3%	7	41.00	20.50		
30	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 3%	7	41.00	20.50		
31	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 3%	14	43.00	21.50	43.00	1.04
32	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 3%	14	41.00	20.50		
33	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 3%	14	45.00	22.50		
34	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 3%	28	50.00	25.00	50.33	1.22
35	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 3%	28	49.00	24.50		
36	ผิวทางปรับปรุงเดิม ผสม ปูนซีเมนต์ 3%	28	52.00	26.00		
37	ผิวทางเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	7	38.00	19.00	40.00	1.00
38	ผิวทางเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	7	38.00	19.00		
39	ผิวทางเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	7	44.00	22.00		

ตารางที่ ก 12 (ต่อ)

ลำดับ ที่	ชนิด	อายุที่บ่ม	qu.	qu./2	qu.เฉลี่ย	$q_D/q_7$
40	ผิวทางเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	14	42.00	21.00	43.67	1.09
41	ผิวทางเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	14	43.00	21.50		
42	ผิวทางเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	14	46.00	23.00		
43	ผิวทางเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	28	41.00	20.50	46.67	1.17
44	ผิวทางเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	28	58.00	29.00		
45	ผิวทางเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	28	41.00	20.50		
46	ผิวทางปรับปรุงเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	7	52.00	26.00	51.00	1.00
47	ผิวทางปรับปรุงเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	7	51.00	25.50		
48	ผิวทางปรับปรุงเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	7	50.00	25.00		
49	ผิวทางปรับปรุงเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	14	54.00	27.00	53.33	1.05
50	ผิวทางปรับปรุงเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	14	52.00	26.00		
51	ผิวทางปรับปรุงเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	14	54.00	27.00		

ตารางที่ ก 12 (ต่อ)

ลำดับ ที่	ชนิด	อายุที่บ่ม	qu.	qu./2	qu.เฉลี่ย	$q_D/q_7$
52	ผิวทางปรับปรุงเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	28	56.00	28.00	57.00	1.12
53	ผิวทางปรับปรุงเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	28	57.00	28.50		
54	ผิวทางปรับปรุงเดิม (ในสนาม) ผสม ปูนซีเมนต์ 3.5 %	28	58.00	29.00		

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวอรสา เที่ยง เกิดวันที่ 12 มกราคม 2529 จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนสิงห์บุรี อำเภอเมือง จังหวัดสิงห์บุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ปี พ.ศ. 2551 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก ปัจจุบันปฏิบัติงานตำแหน่ง วิศวกรโยธา (พร.) กลุ่มวิชาการและถ่ายทอดเทคโนโลยี สังกัด สำนักทางหลวงชนบทที่ 2 (สระบุรี) กรมทางหลวงชนบท ระหว่างปฏิบัติงาน มีความสนใจในงานด้านวิศวกรรมงานทางและงานบูรณะทางด้วยวิธีการหมุนเวียนนำวัสดุมาใช้ใหม่ (Pavement In - Place Recycling) ทำให้เกิดแรงจูงใจ ที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท เพื่อพัฒนาความรู้ความสามารถ จึงได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี