

อิทธิพลของปริมาณหินฝุ่นต่อกำลังอัดของผิวทางเดิมที่ปรับปรุงด้วยวิธีการ  
หมุนเวียนผิวทางเดิมครั้งที่สอง



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2557

อิทธิพลของปริมาณหินปูนต่อกำลังอัดของผิวทางเดิมที่ปรับปรุงด้วยวิธีการ  
หมุนเวียนผิวทางเดิมครั้งที่สอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบโครงการ

(รศ. ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(อ. ดร. เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เจนวิทย์ จันทร์พัย : อิทธิพลของปริมาณหินฝุ่นต่อกำลังอัดของผิวทางเดิมที่ปรับปรุงด้วย  
วิธีการหมุนเวียนผิวทางเดิมครั้งที่สอง (INFLUENCE OF STONE DUST CONTENT ON  
COMPRESSIVE STRENGTH OF SECONDLY RECYCLED PAVEMENT  
MATERIAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้หินฝุ่นในการปรับปรุงขนาดคละและ  
กำลังอัดของผิวทางเดิมที่ปรับปรุงด้วยวิธีการหมุนเวียนผิวทางเดิมมาใช้ใหม่ครั้งที่สอง ตัวอย่างผิว  
ทางที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยหินคลุกใหม่, หินคลุกใหม่ + ผิวทางแอสฟัลต์เก่า, ผิวทางเดิม  
(หินคลุกเก่า + แอสฟัลต์เก่า) และผิวทางเดิมผสมหินฝุ่น ตัวอย่างหินคลุกใหม่และหินฝุ่นเก็บ  
ตัวอย่างจากโรงไม้ หจก. เขาพระงามคอนสตรัคชั่น ตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์เก่าและ ผิวทางเดิม  
เก็บตัวอย่างจากทางหลวงหมายเลข 3017 ตอน แยกทางหลวงหมายเลข 1 - บรรจบทางหลวง  
หมายเลข 21 อ.เมือง จังหวัดลพบุรี ตัวแปรอิทธิพลในการศึกษานี้ประกอบด้วยขนาดคละของวัสดุ  
และอายุบ่ม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ายาง bitumen ในแอสฟัลต์ยับยั้งการเชื่อมประสาน  
ระหว่างอนุภาคของหินคลุก ดังนั้น หินคลุกผสมปูนซีเมนต์บดอัดจึงมีกำลังอัดสูงกว่าหินคลุกผสม  
แอสฟัลต์ผสมปูนซีเมนต์บดอัด กำลังอัดและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของผิวทางเดิม ที่ปรับปรุง  
ขนาดคละด้วยหินฝุ่น (Lime Stone) มีค่าสูงกว่าผิวทางเดิม เนื่องจากส่วนละเอียดของหินฝุ่นช่วยลด  
ช่องว่างของวัสดุ อัตราส่วนการแทนที่หินฝุ่นที่เหมาะสมในการปรับปรุงความหนาแน่นแห้งและ  
กำลังอัดเท่ากับเท่ากับร้อยละ 15 สำหรับทั้งอายุบ่ม 7 และ 28 วัน กำลังอัดของผิวทางเดิมผสม  
ปูนซีเมนต์บดอัดที่อัตราส่วนการแทนที่หินฝุ่นร้อยละ 15 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง  
งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าผิวทางที่ผ่านการบูรณะด้วยวิธีการนำวัสดุหมุนเวียนมาใช้ใหม่ครั้งที่สอง  
สามารถใช้เป็นผิวทางในงานวิศวกรรมการทาง ซึ่งเป็นประโยชน์ทั้งในด้านวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์  
และสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

JENWIT JANPAYAP : INFLUENCE OF STONE DUST CONTENT ON  
COMPRESSIVE STRENGTH OF SECONDLY RECYCLED PAVEMENT  
MATERIAL. ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P. E.

This research investigates the visibility of using stone dust to improve gradation and compressive strength of secondly recycled pavement course. The test samples included stabilized crushed rock, stabilized crushed rock and recycled asphalt pavement blend, stabilized recycled pavement (recycled stabilized crushed rock and recycled asphalt pavement blend obtained from a damaged highway road), and stabilized recycled pavement and stone dust. The crushed rock and stone dust were obtained from Khoaprangam Construction Limited Partnership and the recycled asphalt pavement and recycled pavement were from Highway Route No. 3017, Muang, Lopburi. The influential factors studied are gradation and curing time. Test results show that the asphalt bitumen retards the chemical bonding between crushed rock particles, hence the strength of stabilized crushed rock is higher than that of stabilized crushed rock and recycled asphalt pavement blend. The strength and maximum dry density of recycled pavement are improved by blending with stone dust, which are attributed to the filling of voids by smaller particles of stone dust. The optimal stone dust content for improving dry unit weight and strength is found to be 15 percent for both 7 and 28 days of curing time ; i.e., the strength of the stabilized recycled pavement at this stone duct content meets the specification of Department of Highways, Thailand. This research enables the secondly recycled pavement to be used in a sustainable pavement manner, which is significant from engineering, economical and environmental perspectives.

School of Civil Engineering

Academic Year 2014

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

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

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ คณาจารย์และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือสนับสนุนเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงานวิจัยและอนุเคราะห์ข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย อาทิ เช่น

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

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ประธานกรรมการสอบโครงการ และ อ.ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ กรรมการสอบโครงการ ที่ช่วยให้คำแนะนำในการศึกษางานวิจัย

สำนักงานทางหลวงที่ 11 กรมทางหลวง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างวัสดุในสนาม และทดลองในห้องปฏิบัติการ

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมเจตน์ คุณแม่ยุพิน จันทร์พยัพ ที่ได้ให้กำเนิด อบรมเลี้ยงดู สนับสนุนให้การศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา อีกทั้งขอขอบคุณ คุณทนิตา จันทร์พยัพ ภรรยา และบุตร คือ ด.ช.ธรรมวิทย์ จันทร์พยัพ ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้จนกระทั่งโครงการฉบับนี้สำเร็จ

เจนวิทย์ จันทร์พยัพ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรีทัศน์ วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 มาตรฐานงานทาง.....	3
2.2.1 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก.....	3
2.2.2 มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete).....	5
2.2.3 การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling).....	8
2.2.4 การออกแบบปรับปรุงชั้นทางเดิม.....	11
2.3 มาตรฐานวิธีทดลอง.....	12
2.3.1 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	12
2.3.2 วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน.....	16
2.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930).....	20
2.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936).....	22
2.6 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (1942).....	24
2.7 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956).....	25
2.8 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985).....	26

2.9	เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)	28
2.9.1	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน	29
2.9.2	ชนิดของดิน	29
2.10	พลังงานการบดอัด	33
2.11	การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม	34
2.12	การทำนายกราฟการบดอัด	35
2.13	การก่อสร้างและการบดอัด ชั้นโครงสร้างทาง	38
2.13.1	งานพื้นทาง (base)	38
3	วิธีดำเนินการทำโครงการ	40
3.1	บทนำ	40
3.2	แผนงานดำเนินการ	40
3.3	ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	40
4	การศึกษาผลทดลองและการวิจารณ์ผล	43
4.1	บทนำ	43
4.2	วัสดุและวิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ	43
4.2.1	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	43
4.2.2	วิธีการทดลอง	45
4.3	ผลทดสอบและวิเคราะห์ผลทดสอบ	45
5	สรุปผลการวิจัย	51
	เอกสารอ้างอิง	52
	ภาคผนวก ก ตารางทดสอบคุณภาพวัสดุ	53
	ภาคผนวก ข ตาราง UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH	65
	ประวัติผู้เขียน	73

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดตะกั่วของวัสดุพื้นทางหินคลุก.....	4
2.2 ขนาดตะกั่วของมวลและปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้.....	6
2.3 ขนาดตะกั่ววัสดุแทรก.....	8
4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดินของวัสดุชนิดต่างๆ.....	46
4.2 ผลทดสอบการบดอัด และกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุชนิดต่างๆ ผสมปูนซีเมนต์ ร้อยละ 3.5.....	47
ก.1 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของหินคลุกใหม่.....	54
ก.2 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของหินคลุกใหม่+Asphalt 5 cm.....	54
ก.3 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.....	55
ก.4 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 5 %.....	56
ก.5 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 10 %.....	56
ก.6 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 15 %.....	57
ก.7 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 20 %.....	58
ก.8 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของหินฝุ่น.....	58
ก.9 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของ Asphalt.....	59
ก.10 ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกใหม่.....	60
ก.11 ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกใหม่+Asphalt 5 cm.....	60
ก.12 ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.....	61



ก.13	ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 5 %.....	62
ก.14	ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 10 %.....	62
ก.15	ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 15 %.....	63
ก.16	ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 20 %.....	64
ข.1	ผลการทดสอบ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกใหม่.....	66
ข.2	ผลการทดสอบ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกใหม่+Asphalt 5 cm.....	67
ข.3	ผลการทดสอบ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.....	68
ข.4	ผลการทดสอบ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 5 %.....	69
ข.5	ผลการทดสอบ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 10 %.....	70
ข.6	ผลการทดสอบ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 15 %.....	71
ข.7	ผลการทดสอบ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 20 %.....	72

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve).....	21
2.2 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ.....	22
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นนำเสนอโดย Hogentogler.....	23
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Buchanan.....	25
2.5 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอ โดย Hilf.....	26
2.6 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน.....	27
2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve).....	28
2.8 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ.....	30
2.9 กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Horpibulsuk et al., 2005).....	31
2.10 อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg, 1960) .....	32
2.11 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (Horpibulsuk et al., 2004).....	34
2.12 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburaa (Lambe, 1962).....	35
2.13 กราฟการบดอัด Ohio (ปรับปรุงจาก Joslin, 1959).....	37
2.14 แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด (Nagaraj et al., 2006).....	38
3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานวิจัย.....	42
4.1 การเก็บตัวอย่างทดสอบ.....	44
4.2 การเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ.....	45
4.3 กราฟการกระจายขนาดเม็ดดินของหินคลุกใหม่ หินคลุกใหม่ + แอสฟัลต์เก่า ผิวทาง เดิมและผิวทางเดิม + หินฝุ่น เปรียบเทียบกับการกระจายขนาดมาตรฐานของกรมทาง หลวง.....	48
4.4 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน ของวัสดุชนิดต่างๆที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์.....	49
4.5 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลอง Unconfined Compressive Strength ของวัสดุชนิดต่างๆ.....	50

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

กรมทางหลวงได้นำวิธีการก่อสร้างและบูรณะปรับปรุงชั้นทางเดิมด้วย วิธีการนำวัสดุหินปูนเวียนมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) มาใช้งานทางครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ.2537 (จนถึงปัจจุบันรวมระยะเวลาทั้งสิ้นกว่า 20 ปี) ช่วยลดการใช้วัสดุจากแหล่งธรรมชาติ อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม รักษาระดับของถนนเดิมไว้ได้ และเพิ่มอายุการใช้งาน และเสริมความแข็งแรงทนทานให้กับถนนที่ซ่อมบำรุง เสมือนเป็น โครงสร้างชั้นทางแบบกึ่งแกร่งตัว (Semi-Rigid Pavement) ดังนั้นการก่อสร้างและบูรณะผิวทางและพื้นทางด้วยวิธีการนำวัสดุหินปูนเวียนมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) จึงได้รับการอนุมัติเห็นชอบรวมทั้งมีการผลักดันจากทั้งส่วนราชการ และ ส่วนของกรมทางหลวง จัดสรรงบประมาณให้ดำเนินการ

ผิวทางและพื้นทางที่บูรณะด้วยวิธีการนำวัสดุหินปูนเวียนมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) และใช้งานเป็นระยะเวลานานหลายเส้นทาง เกิดการชำรุดเสียหายเพิ่มมากขึ้น และ จำเป็นจะต้องได้รับการบูรณะผิวทางและพื้นทางอีกครั้งเพื่อให้ผู้ใช้ทางเกิดความสะดวกสบาย ปลอดภัย เทคนิคการนำวัสดุหินปูนเวียนมาใช้ใหม่จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม โดยการนำวัสดุส่วนที่มีความละเอียด เช่น หินฝุ่น (Lime Stone) ทราย Soil Aggregate ฯลฯ มาปรับปรุงขนาดละเอียดให้ดีขึ้นและผสมเข้ากับปูนซีเมนต์

ในที่นี้ ผู้วิจัยได้เลือกหินฝุ่น (Lime Stone) เป็นวัสดุที่นำมาปรับปรุงขนาดละเอียดของวัสดุผิวทางเดิม และศึกษาอิทธิพลของปริมาณหินฝุ่นต่อการพัฒนากำลังอัดของผิวทางที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ ผลการศึกษาวินิจฉัยจะเป็นแนวทางให้กรมทางหลวงได้นำไปใช้หรือพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของหินฝุ่นต่อกำลังอัดของวัสดุเดิมที่ผ่านการบูรณะผิวทางและพื้นทางด้วยวิธีนำวัสดุหินปูนเวียนมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling)
- 1.2.2 เพื่อหาปริมาณหินฝุ่นเหมาะสมที่จะนำมาผสมกับวัสดุที่ผ่านการบูรณะผิวทางและพื้นทางด้วยวิธีนำวัสดุหินปูนเวียนมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) เพื่อให้ได้กำลังอัดสูงที่สุด

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ขอบเขตด้านพื้นที่ที่จะทำการศึกษา และตรวจสอบ ได้แก่ทางหลวงในความควบคุมของสำนักงานทางหลวงที่ 11 ที่ผ่านการบดและพื้นทางด้วยวิธีการนำวัสดุหมุนเวียนมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) มาแล้ว
- 1.3.2 ขอบเขตด้านเนื้อหา ทำการศึกษา วิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุเดิมที่ผ่านการบดและพื้นทางและพื้นทางด้วยวิธีการนำวัสดุหมุนเวียนมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) มาแล้ว กับวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงขนาดละเอียดโดยการเพิ่มหินฝุ่น (Lime Stone)

### 1.4 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลของปริมาณหินฝุ่นต่อการพัฒนาค่ากำลังอัดของวัสดุเดิมที่ผ่านการบดและพื้นทางด้วยวิธีการนำวัสดุหมุนเวียนมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) มาแล้ว
- 1.4.2 ทราบปริมาณของวัสดุส่วนละเอียดที่เหมาะสมที่นำมาผสมกับวัสดุที่ผ่านการบดและพื้นทางด้วยวิธีการนำวัสดุหมุนเวียนมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) เพื่อให้ได้คุณสมบัติด้านกำลังอัดที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะเป็นแนวทางให้สำนักงานทางหลวงที่ 11 หรือกรมทางหลวงนำไปใช้และพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

## บทที่ 2

### ปริทัศน์ วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

การศึกษากำลังรับแรงอัดในงานบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์โดยวิธี Pavement In-Place Recycling เป็นสิ่งสำคัญในการปรับปรุงชั้นทางเดิมในที่มีคุณภาพสูงขึ้น เพื่อให้การบูรณะทางหลวงเกิดความคุ้มค่าสูงสุด และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เนื่องจากกรมทางหลวงได้มีการบูรณะผิวทางและพื้นทางด้วยวิธีการนำวัสดุหมุนเวียนมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) และใช้งานเป็นระยะเวลาหลายเส้นทาง เกิดการชำรุดเสียหายเพิ่มมากขึ้น และจำเป็นจะต้องได้รับการบูรณะผิวทางและพื้นทางอีกครั้ง ผู้วิจัยได้เลือกหินปูน (Lime Stone) เป็นวัสดุที่นำมาปรับปรุงขนาดผลของวัสดุผิวทางเดิม และศึกษาอิทธิพลของปริมาณหินปูนต่อการพัฒนากำลังอัดของผิวทางที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ เพื่อยืดอายุการใช้งาน และช่วยให้ถนนสามารถรับกำลังได้ดียิ่งขึ้น

#### 2.2 มาตรฐานงานทาง

##### 2.2.1 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก

งานนี้ประกอบด้วย หินไม่มวลรวมซึ่งมีขนาดผลอย่างสม่ำเสมอ จากใหญ่ไปหาเล็ก โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียว หรือหลายชั้นไปบนชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้ และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้วโดยการเกลี่ยแต่งและบดอัดให้ถูกต้องตามแนวระดับ ความลาด ขนาดตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ วัสดุหินไม่มวลรวม (Crush rock soil aggregate type base) ต้องเป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็งเหนียว สะอาด ไม่ผุและปราศจากวัสดุอื่นเจือปน จากแหล่งที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงแล้ว วัสดุจำพวก Shale ห้ามนำมาใช้ ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุพื้นทางหินคลุกไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำหินคลุกจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- มีค่าความสึกหรอ เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 202/2515 “วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ไม่เกินร้อยละ 40
- มีค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.213/2531 “วิธีการทดลองหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวม” โดยใช้

โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ มีค่าไม่เกินร้อยละ 9 ให้มีการทดลองทุกครั้ง ที่นำมาใช้

- ส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกัน กับส่วนหยาบ (Coarse Aggregate) การใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปน เพื่อปรับปรุงคุณภาพจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน
- มีขนาดละเอียด และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.205/2517 “วิธีการ ทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง” ต้องมีขนาดใดขนาด หนึ่งตามตารางที่ 2.1
- ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่ มากกว่าสองในสาม (2/3) ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)
- มีค่า Liquid Limit เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 102/2515 “วิธีการ ทดลองหาค่า Liquid Limit (L.L.) ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 25
- มีค่า Plasticity Index เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.103/2515 “วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (P.L.) และ Plasticity Index (P.I.) ของ ดิน” ไม่เกินร้อยละ 6

ตารางที่ 2.1 ขนาดละเอียดของวัสดุพื้นทางหินคลุก

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล	
	A	B
50 (2 นิ้ว)	100	100
25.0 (1 นิ้ว)	-	75-95
9.5 (3/8 นิ้ว)	30-65	40-75
4.75 (เบอร์ 4)	25-55	30-60
2.00 (เบอร์ 10)	15-40	20-45
0.425 (เบอร์ 40)	8-20	15-30
0.075 (เบอร์ 200)	2-8	5-20

- มีค่า CBR เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 109/2517 “วิธีการทดลอง เพื่อหาค่า CBR ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีต และไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางแบบเซอร์เฟสทรีตเมนต์ที่ความแน่น

แห่งของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุด ที่ได้จากการทดลอง ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบ สูงกว่ามาตรฐานการควบคุมคุณภาพ”

ขณะก่อสร้างการก่อสร้างพื้นทางหินคลุกให้ก่อสร้างเป็นชั้นๆ โดยให้มีความหนา เท่า ๆ กัน และแต่ละชั้นไม่เกิน 150 มิลลิเมตร เมื่อได้ก่อสร้างพื้นทางหินคลุก ซึ่งแบบกำหนดไว้หนา ไม่เกิน 150 มิลลิเมตร จนได้ความยาวพอเหมาะในแต่ละวันแล้ว ดำเนินการตรวจสอบค่าระดับ และทดสอบความแน่นของการบดทับ หากผลที่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้าง ชั้นถัดไปได้ ในกรณีที่เป็นพื้นทางหินคลุกกำหนดไว้หนา 200 มิลลิเมตร ให้ผู้รับจ้างก่อสร้างพื้น ทางเป็น 2 ชั้น หนาชั้นละประมาณ 100 มิลลิเมตร โดยที่เมื่อได้ก่อสร้างพื้นทางชั้นแรกจนได้ พอเหมาะที่จะก่อสร้างพื้นทางในชั้นถัดไปแล้ว ให้ดำเนินการทดลองความแน่นของการบดทับ หากผลทดลองเป็นไปตามข้อกำหนด ก็ให้ดำเนินการก่อสร้างพื้นทางหินคลุกชั้นถัดไปได้ตาม ข้อกำหนดก่อนการปูพื้นทางหินคลุกชั้นถัดไป ให้ทำการพ่นน้ำให้ผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกที่ได้ ก่อสร้างไว้แล้วชุ่มชื้น ถ้าผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกเรียบเป็นมัน ให้ผู้รับจ้างทำการครูดผิวหน้า ของชั้นพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้เป็นริ้วรอยก่อน แล้วค่อยพ่นน้ำให้ชุ่มชื้น ผิวหน้า ของพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไปแล้วควรมีความชุ่มชื้นพอควร ในขณะที่ทำการปูพื้นทางหิน คลุกในชั้นถัดไป เพื่อช่วยให้ชั้นหินคลุกแต่ละชั้นยึดกันดี ผิวหน้าที่หยาบของพื้นทางหินคลุกที่ได้ ก่อสร้างไปแล้วที่มีความชื้นพอเหมาะจะช่วยให้เกิดการเกาะยึดที่ดีกับชั้นพื้นทางหินคลุกที่กำลังจะ ก่อสร้างทับลงไป การทดสอบความแน่นของการบดทับ งานพื้นทางหินคลุกจะต้องทำการบดทับ ให้ได้ความแน่นแห้งสม่ำเสมอตลอดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบของความ แน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตัวอย่างหินคลุกเก็บจากหน้างานในสนามหลังจากคลุกเคล้า ผสมและปลูงบนถนนแล้ว ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” การทดสอบความแน่นของการบดทับ ให้ดำเนินการทดลองตาม วิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 603/2517 “วิธีการทดลองหาค่าความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย” ทุกระยะประมาณ 100 เมตร ต่อ 1 ช่องจราจร หรือ ประมาณพื้นที่ 500 ตารางเมตร ต่อ 1 หลุม ตัวอย่างหรือตามที่กำหนดไว้ในแบบเป็นอย่างอื่น

### 2.2.2 มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)

แอสฟัลต์คอนกรีตคือวัสดุผสมที่ได้จากการผสมร้อนระหว่างมวลรวม (Aggregate) กับ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่โรงงานผสม (Asphalt Concrete Mixing Plant) โดยการควบคุมอัตราส่วนผสม และอุณหภูมิตามที่กำหนด มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการงานก่อสร้าง งานบูรณะ และงานบำรุงทาง

โดยการปูหรือเกลี่ยแต่งและบดทับบนชั้นทางที่ได้เตรียมไว้และผ่านการตรวจสอบแล้ว ให้ถูกต้องตามแนว ระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดที่ได้แสดงไว้ในแบบมวลรวมประกอบด้วยมวลหยาบ (Coarse Aggregate) และมวลละเอียด (Fine Aggregate) กรณีที่มวลรวมละเอียดไม่พอหรือต้องการปรับปรุงคุณภาพและความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีต อาจเพิ่มวัสดุแทรก (Mineral Filler) ด้วยก็ได้ในกรณีที่มิได้ระบุคุณสมบัติของมวลหยาบไว้เป็นอย่างอื่น มวลหยาบต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ขนาดคละของมวลและปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้

ขนาดที่ใช้เรียก	มิลลิเมตร (นิ้ว)	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19.0 (3/4)	25.0 (1)
สำหรับชั้นทาง		Wearing Course	Wearing Course	Binder Course	Base Course
ความหนา	มิลลิเมตร	25-35	40-70	40-80	70-100
ขนาดตระแกรง	มิลลิเมตร (นิ้ว)	ปริมาณผ่านตะแกรงร้อยละโดยมวล			
37.5	(1 ½)				100
25.0	(1)			100	90-100
19.0	(3/4)		100	90-100	-
12.5	(1/2)	100	80-100	-	56-80
9.5	(3/8)	90-100	-	56-80	-
4.75	(เบอร์ 4)	55-85	44-74	35-65	29-59
2.36	(เบอร์ 8)	32-67	28-58	23-49	19-45
1.18	(เบอร์ 16)	-	-	-	-
0.600	(เบอร์ 30)	-	-	-	-
0.300	(เบอร์ 50)	7-23	5-21	5-19	5-17
0.150	(เบอร์ 100)	-	-	-	-
0.075	(เบอร์ 200)	2-10	2-10	2-8	1-7
ปริมาณแอสฟัลต์ ร้อยละโดยมวลรวม		4.0-8.0	3.0-7.0	3.0-6.5	3.0-6.0



หมายเหตุ กรมทางหลวงอาจพิจารณาเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวม และปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้แตกต่างจาก ตารางที่ 2.2 ก็ได้ ทั้งนี้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้ต้องมีคุณสมบัติและความแข็งแรงถูกต้อง

- เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.ท.202/2515 วิธีการทดลองหาความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ความสึกหรอต้องไม่เกินร้อยละ 40
- เมื่อทดลองตามวิธีที่ ทล.-ท. 213/2531 วิธีการทดลองหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวมโดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ ส่วนที่ไม่คงทน (Loss) ต้องไม่เกินร้อยละ 9
  - เมื่อทดลองตามวิธีการทดลอง AASHTO T 182-84 Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures ผิวของมวลหยาบต้องมีแอสฟัลต์เคลือบไม่น้อยกว่าร้อยละ 95
- มวลละเอียด หมายถึงส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) เป็นหินฝุ่นหรือทรายที่สะอาด ปราศจากสิ่งสกปรกหรือวัสดุอันไม่พึงประสงค์ใดๆ ปะปนอยู่ ซึ่งอาจทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณภาพด้อยลงในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของมวลละเอียดไว้เป็นอย่างอื่นมวลละเอียดต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้
  - เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 203/2515 วิธีการทดลองหาค่า Sand Equivalent ต้องมีค่า Sand Equivalent ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50
  - เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 213/2531 วิธีการทดลองหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวม โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ ส่วนที่ไม่คงทน (Loss) ต้องไม่เกินร้อยละ 9 มวลละเอียดจากแหล่งเดิมที่มีหลักฐานแสดงผลทดลองหาความคงทนว่าใช้ได้อาจจะยกเว้นไม่ต้องทดลองอีกก็ได้ ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของกรมทางหลวง
  - วัสดุผสมแทรก ใช้ผสมเพิ่มในกรณีเมื่อผสมมวลหยาบกับมวลละเอียดเป็นมวลรวมแล้ว ส่วนละเอียดในมวลรวมยังมีไม่พอ หรือใช้ผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต วัสดุผสมแทรกอาจเป็น Stone Dust, Portland Cement, Silica Cement, Hydrated Lime หรือวัสดุอื่นที่กรมทางหลวงอนุมัติให้ใช้ได้ วัสดุผสมแทรกต้องแห้ง ไม่จับกันเป็นก้อน เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.205/2517 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ด

วัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ต้องมีขนาดคละตาม ตารางที่ 2.3 ในกรณีที่  
ไม่ได้ระบุชนิดของแอสฟัลต์ไว้เป็นอย่างอื่น ให้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-  
70 ตามข้อกำหนดที่ ทล.ก. 401/2531 “Specification for Asphalt Cement”  
การใช้แอสฟัลต์อื่น ๆ หรือแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารใดๆ  
นอกเหนือจากนี้ต้องมีคุณภาพเทียบเท่าหรือดีกว่า ทั้งนี้ต้องผ่านการทดสอบ  
และพิจารณาความเหมาะสม รวมทั้งต้องได้รับอนุญาตให้ใช้ได้จากกรมทาง  
หลวงเป็นกรณีไป

ตารางที่ 2.3 ขนาดคละวัสดุแทรก

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล
0.600 (เบอร์ 30)	100
0.300 (เบอร์ 50)	75 - 100
0.075 (เบอร์ 200)	55 - 100

ในกรณีที่กรมทางหลวงเห็นว่าวัสดุที่มีขนาดคละแตกต่างไปจากตารางที่ 2.2 แต่เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุผสมแทรกแล้ว จะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้น ก็จะอนุมัติให้ใช้วัสดุนั้นเป็นวัสดุแทรกได้

แอสฟัลต์ใช้ในงานซ่อมผิวทาง (Patching) เพื่อปะซ่อม (Skin Patching) ชุดซ่อม (Deep Patching) งานปรับระดับ (Leveling) เพื่อปรับผิวถนนเดิมให้ได้ระดับตามที่ต้องการ งานเสริม (Overlay) เพื่อเสริมความแข็งแรงของผิวทางเดิม หรือเพิ่มความฝืดให้กับผิวทางเดิม

งานก่อสร้างทางและงานบูรณะก่อสร้างทาง งานพื้นทาง (Base Course) โดยปูแอสฟัลต์คอนกรีตบนชั้นรองพื้นทาง (Subbase) หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้เรียบร้อยแล้ว งานชั้นรองผิวทาง (Binder Course) โดยปูแอสฟัลต์คอนกรีตบนชั้นพื้นทางที่ได้เตรียมไว้เรียบร้อยแล้ว หรือปูบนผิวทางเดิมที่จะบูรณะก่อสร้างใหม่ งานชั้นผิวทาง (Wearing Course) โดยปูแอสฟัลต์คอนกรีตบนชั้นรองผิวทางชั้นพื้นทาง หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้เรียบร้อยแล้ว งานไหล่ทาง (Shoulder) ที่มีผิวไหล่ทางเป็นแอสฟัลต์คอนกรีต โดยปูแอสฟัลต์คอนกรีตบนไหล่ทางหรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้เรียบร้อยแล้ว

### 2.2.3 การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling)

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ หมายถึง การนำวัสดุจากชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำไปใช้งานใหม่ โดยให้มีคุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด ในการนี้

อาจจะเพิ่มเติมวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงขนาดคละและเพิ่มปริมาณ เช่น หิน ทราช Soil Aggregate ฯลฯ และวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ (Stabilizing Agents) เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แอสฟัลต์ และสารผสมเพิ่ม (Admixture) อื่นใด ทั้งนี้ในการปรับปรุงอาจจะกระทำได้ที่ ในที่ (In-Place) หรือที่โรงงาน (Central Plant) หรือทั้งในที่และที่โรงงานด้วย ขึ้นอยู่กับ การกำหนดไว้ในรูปแบบ โดยจะต้องก่อสร้างให้ถูกต้องตามขั้นตอนและปิดทับด้วยผิวทางใหม่ การปรับปรุงชั้นทางอาจจะทำการปรับปรุงเพียงชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ การใช้งาน ใช้งาน ปรับปรุงหรือก่อสร้างชั้นทางใด ๆ โดยให้เป็นไปตามรูปแบบและข้อกำหนด วัสดุชั้นทางเดิมรวม กับวัสดุที่ผสมเพิ่มจะต้องมีคุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของ วัสดุไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้งานจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

วัสดุชั้นทางเดิม หมายถึง วัสดุที่ได้จากการขุดหรือ ขุดไถจากชั้นทางเดิมแล้วทำให้ร่วน ใน กรณีที่วัสดุชั้นทางเดิมหลังจากขุดหรือ ขุดไถและทำให้ร่วนแล้วมีขนาดคละ หรือคุณสมบัติอื่น ๆ ไม่เป็นไปตามรูปแบบและข้อกำหนด ให้แก้ไขปรับปรุงหรือนำวัสดุผสมเพิ่มมาผสมเพื่อให้ได้ตาม รูปแบบและข้อกำหนด วัสดุที่นำมาผสมเพิ่มจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม เข้ากันได้กับวัสดุชั้น ทางเดิมหรือวัสดุผสมเพิ่มชนิดอื่นที่นำมาใช้ เพื่อทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมมี ความแข็งแรงเป็นไปตาม ข้อกำหนดในรูปแบบที่ผู้ออกแบบระบุไว้ วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุง ขนาดคละและเพิ่มปริมาณ หมายถึง วัสดุจากที่อื่นที่นำมาผสมเพิ่มกับวัสดุชั้นทางเดิม เพื่อ ปรับปรุงขนาดคละและเพิ่มปริมาณตามที่กำหนดไว้ในรูปแบบและข้อกำหนด เช่น หิน ทราช Soil Aggregate วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ หมายถึง วัสดุจากที่อื่นที่นำมาผสมเพิ่มกับวัสดุ ชั้นทางเดิมเพื่อปรับปรุงคุณภาพต้องเป็นชนิดที่กรมทางหลวงกำหนดต่อไปนี้ หากเป็นชนิด นอกเหนือจากที่กำหนดไว้ จะต้องได้รับความเห็นชอบจากสำนักวิศวกรรมวิจัยและพัฒนาทาง ก่อนนำไปใช้งานเป็นแต่ละกรณี

ปูน ซีเมนต์ที่ใช้ต้องเป็น ปูน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐาน ผลិតภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องเป็นปูนใหม่ บรรจุอยู่ใน ไช โลหรือเป็นแบบบรรจุถุงก็ได้ ผู้รับจ้างจะต้องจัดทำสถานที่เก็บให้เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้ ปูนซีเมนต์ชื้นหรือเสื่อมคุณภาพ ผู้รับจ้างต้องระบุดราปูนซีเมนต์ที่ใช้ ซึ่งควรเป็นตราเดียวกัน ตลอดงาน หากในระหว่างการก่อสร้างผู้รับจ้างต้องการเปลี่ยน ไปใช้ปูนซีเมนต์ตราอื่น นอกเหนือจากที่แจ้งไว้เดิม ให้ผู้รับจ้างเสนอรายละเอียดการออกแบบส่วนผสมใหม่ต่อนายช่างผู้ ควบคุมงานเพื่อพิจารณาในกรณีที่ปูนซีเมนต์ที่ใช้นั้นเก็บไว้นานเป็นระยะเวลาเกินกว่า 3 เดือน หรือในกรณีนายช่างผู้ควบคุมงานพิจารณาแล้วเห็นว่า วิธีการเก็บรักษาไว้ไม่เหมาะสมอาจทำให้ ปูนซีเมนต์เสื่อมคุณภาพได้ ให้นายช่างผู้ควบคุมงานระงับการใช้งานทั้งหมดหรือบางส่วนไว้ หาก

ประสงค์จะนำมาใช้งาน ให้นำปูนซีเมนต์นั้นไปตรวจสอบคุณภาพใหม่หรือให้ออกแบบส่วนผสมใหม่ก็ได้ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในกรณีนี้เป็นความรับผิดชอบของผู้รับจ้าง

ปูนขาวที่ใช้ หมายถึง ไฮเดรตเต็ดโลม์ [Hydrated Lime : Ca(OH)] หรือ ควิกโลม์ [Quick Lime : CaO] ที่มีคุณสมบัติดังนี้ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ [Calcium Oxide : CaO] และ แมกนีเซียมออกไซด์ [Magnesium Oxide : MgO] รวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ขนาดของเม็ดปูนขาวต้องผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40) ร้อยละ 100 ปูนขาวที่ใช้ต้องเป็นปูนใหม่ และจะต้องจัดทำสถานที่เก็บรักษาให้เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้ปูนขาวชื้นหรือเสื่อมคุณภาพ ผู้รับจ้างต้องระบุแหล่งปูนขาวที่นำมาใช้ตลอดระยะเวลาการก่อสร้างด้วย หากในระหว่างเวลาการก่อสร้าง ผู้รับจ้างต้องการเปลี่ยนไปใช้ปูนขาวจากแหล่งอื่นนอกเหนือจากที่แจ้งไว้เดิม ให้ผู้รับจ้างเสนอนายช่างผู้ควบคุมงานพิจารณาว่าจะให้ใช้งานตามที่ออกแบบไว้เดิมต่อไป หรือต้องออกแบบส่วนผสมใหม่ในกรณีที่ปูนขาวที่ใช้งานนั้นเก็บไว้นานหรือนายช่างผู้ควบคุมงานพิจารณาแล้วเห็นว่าผู้รับจ้างเก็บรักษาไว้ไม่เหมาะสมอาจทำให้ปูนขาวเสื่อมคุณภาพได้ ค่าใช้จ่ายในการนี้เป็นความรับผิดชอบของผู้รับจ้าง

ถ้ำลอยที่นำมาใช้จะต้องมีคุณสมบัติสม่ำเสมอ ขนาดของเม็ดถ้ำลอยต้องผ่านตะแกรงขนาด 0.600 มิลลิเมตร (เบอร์ 30) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 และต้องผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 แหล่งถ้ำลอยต้องมีปริมาณมากพอที่จะสามารถนำมาใช้ได้อย่างต่อเนื่อง โดยได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวง หากในระหว่างการก่อสร้าง ถ้ำลอยที่ใช้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ผู้รับจ้างจะต้องเสนอต่อนายช่างผู้ควบคุมงานพิจารณาว่าจะให้ใช้งานตามที่ออกแบบไว้เดิมหรือต้องออกแบบส่วนผสมใหม่ในกรณีที่ผู้รับจ้างต้องการเปลี่ยนแหล่งถ้ำลอย จะต้องทำการออกแบบส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายในการนี้เป็นความรับผิดชอบของผู้รับจ้าง

แอสฟัลต์ที่นำมาใช้งาน อาจเป็นแอสฟัลต์ชนิดใด ๆ ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเฉพาะงาน ผู้รับจ้างต้องระบุแหล่งผลิตแอสฟัลต์และชนิดแอสฟัลต์ที่ใช้ตลอดระยะเวลาการก่อสร้างไว้ด้วย หากผู้รับจ้างต้องการเปลี่ยนแปลงแหล่งหรือชนิดแอสฟัลต์ จะต้องทำการออกแบบส่วนผสมใหม่ โดยได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงหรือหากในระหว่างการก่อสร้าง เกิดการเปลี่ยนแปลงของวัสดุชั้นทางเดิมหรือแอสฟัลต์ที่ใช้ หรือเหตุอื่นที่มีผลทำให้คุณภาพของส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไปนายช่างผู้ควบคุมงานอาจให้ออกแบบส่วนผสมใหม่ก็ได้ ค่าใช้จ่ายในการนี้เป็นความรับผิดชอบของผู้รับจ้าง

วัสดุผสมเพิ่มเติมรวม (Blended Stabilizing Agents) วัสดุผสมเพิ่ม อาจนำมาใช้ร่วมกันได้ โดยต้องเลือกใช้และทดสอบออกแบบส่วนผสมกับชนิดวัสดุชั้นทางเดิมที่ต้องปรับปรุงและให้มีคุณภาพตามแบบและข้อกำหนด ทั้งที่ที่ต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงเป็นแต่ละกรณี

สารผสมเพิ่ม สารผสมเพิ่มชนิดใดๆที่นำมาใช้งาน ผู้รับจ้างจะต้องเสนอชนิดของสารผสมเพิ่ม โดยต้องทดสอบและออกแบบส่วนผสมกับวัสดุชั้นทางเดิมที่ต้องปรับปรุง และส่วนผสมต้องมีคุณภาพตามข้อกำหนดในรูปแบบที่ผู้ออกแบบได้ระบุไว้ พร้อมเสนอเอกสาร ข้อมูล และรายละเอียดอื่นๆให้ครบถ้วนต่อกรมทางหลวง เพื่อพิจารณาเห็นชอบทั้งในด้านวิศวกรรมและด้านสิ่งแวดล้อมเป็นแต่ละกรณี น้ำที่นำมาใช้งานต้องสะอาดปราศจากสารไม่พึงประสงค์ต่าง ๆ เช่น เกลือ น้ำตาล น้ำมัน กรด ต่าง และอินทรีย์วัตถุหรือสารเคมีที่อาจกระทบต่อคุณภาพวัสดุที่ผสม โดยต้องได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานก่อนนำมาใช้งาน

#### 2.2.4 การออกแบบปรับปรุงชั้นทางเดิม

- การออกแบบทั่วไป หมายถึง ข้อเสนอแนะต่างๆที่ให้ไว้แก่ผู้ออกแบบเพื่อใช้ประกอบการพิจารณาออกแบบโดยมีหัวข้อแนะนำต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
- ในงานใดๆอาจออกแบบให้ปรับปรุงชั้นทางเดิม โดยวิธีการปรับปรุงในที่หรือปรับปรุงที่โรงงานหรือทั้งสองวิธีก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม
- การปรับปรุงชั้นทางเดิมเป็นชั้นทางใหม่ อาจนำวัสดุชั้นทางเดิมใด ๆ ที่เหมาะสมมารวมกันเพื่อปรับปรุงให้เป็นชั้นทางใหม่ก็ได้
- ชั้นผิวทางเดิมที่เป็นแอสฟัลต์คอนกรีต ที่มีค่าเพนเนตรชันของแอสฟัลต์ 30 ขึ้นไป ควรพิจารณานำมาหมุนเวียนใช้ในงานผิวทางหรืองานซ่อมบำรุงผิวทางให้เหมาะสม ทั้งนี้ไม่ควรนำมาพร้อมกับวัสดุชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง
- ชั้นผิวทางเดิมที่เป็นผิวทางแอสฟัลต์อื่นและที่ไม่ใช่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต อาจนำไปปรับปรุงร่วมกับชั้นทางอื่นก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม
- สำหรับการปรับปรุงชั้นทางเดิมในที่ ถ้าชั้นผิวทางแอสฟัลต์เดิมมีความหนาเกินกว่าขีดความสามารถของเครื่องจักรผสมที่จะดำเนินการได้ผลดี ให้ชุดผิวทางส่วนที่มีความหนานั้นออก หากไม่สามารถขุดผิวทางออกบางส่วนได้ ให้ชุดหรือผิวทางแอสฟัลต์นั้นออก แล้วทดแทนด้วยวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของชั้นทางที่จะปรับปรุงนั้น

การออกแบบส่วนผสมในรูปแบบจะต้องแสดงรูปตัดโครงสร้างชั้นทางเดิม รูปตัดโครงสร้างชั้นทางใหม่ รายละเอียดวิธีการปรับปรุงและการใช้วัสดุต่างๆพร้อมทั้งข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและส่วนผสม ถ้าผู้ออกแบบมิได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุและส่วนผสมเป็น

อย่างอื่น ให้คุณสมบัติของวัสดุและส่วนผสมเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สำหรับชั้นทางนั้น ๆ ก่อนการออกแบบส่วนผสม ให้ผู้รับจ้างต้องสำรวจตรวจสอบหาข้อมูลชั้นทางที่จะปรับปรุงโดยละเอียด เพื่อประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมได้อย่างถูกต้องเหมาะสมกับสภาพความเป็นจริงในสนาม และก่อนเริ่มงานเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 30 วัน ให้ผู้รับจ้างเสนอผลการออกแบบส่วนผสมพร้อมด้วยตัวอย่างวัสดุที่ใช้ พร้อมข้อมูลต่าง ๆ ต่อกรมทางหลวงหรือข้อมูลเพิ่มเติมอื่นตามกรมทางหลวงต้องการ เพื่อประกอบการพิจารณาให้ความเห็นชอบการออกแบบส่วนผสมนั้น ผู้รับจ้างอาจร้องขอให้กรมทางหลวงเป็นผู้ออกแบบส่วนผสมให้ก็ได้ ค่าใช้จ่ายในการนี้ผู้รับจ้างต้องเป็นผู้รับผิดชอบทั้งสิ้น กรณีผลการทดลองส่วนผสมในสนามหรือในห้องปฏิบัติการหรือจากแปลงทดสอบสนามในสนามหรือจากแปลงก่อสร้างใด ๆ ในสนาม ในแต่ละกรณีหรือหลายกรณีที่ไม่เป็นไปตามแบบหรือข้อกำหนดหรือแบบส่วนผสมตามที่ได้รับความคิดเห็นชอบจากกรมทางหลวงนายช่างผู้ควบคุมงานต้องพิจารณาให้แก้ไขปรับปรุงให้ถูกต้องตามแบบหรือข้อกำหนดหรือให้ออกแบบส่วนผสมใหม่ก็ได้ ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของนายช่างผู้ควบคุมงานค่าใช้จ่ายในการสำรวจ ตรวจสอบ การออกแบบส่วนผสม การแก้ไขปรับปรุงแบบส่วนผสม ค่าธรรมเนียมการตรวจสอบ รวมถึงผลความเสียหายใด ๆ ผู้รับจ้างต้องเป็นผู้รับผิดชอบทั้งสิ้น

## 2.3 มาตรฐานวิธีการทดลอง

### 2.3.1 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

การทดลอง Compaction Test วิธีนี้เป็นการทดลองโดยวิธี Dynamic Compaction เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นของดินกับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดทับ เมื่อทำการบดทับในแบบ (Mold) ตามขนาดข้างล่างนี้ด้วยก้อนหนัก 4.537 กิโลกรัม (10.0 ปอนด์) ระยะปล่อยก้อนตก 457.2 มิลลิเมตร (18 นิ้ว) วิธี ก. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) วิธี ข. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) วิธี ค. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) วิธี ง. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) วิธีการทดลองที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ อาศัยวิธีการและปรับปรุงจากการทดลองของ เครื่องมือทดลองประกอบด้วย

แบบ (Mold) ทำด้วยโลหะแข็งและเหนียว ลักษณะทรงกระบอกกลวงมี 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) และจะต้องมีปลอก (Collar) ขนาดเดียวกัน สูง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานทึบ , ขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางภายใน 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) สูง 177.8 มิลลิเมตร (7 นิ้ว) และจะต้องมีปลอกขนาดเดียวกันสูง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานทึบหรือเจาะรูพรุน ในการทดลองต้องใช้เหล็กโลหะรอง (Spacer Disc) ตามข้อ 2.1.2 รองด้านล่าง เพื่อให้ได้ตัวอย่างสูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) หรืออาจใช้แบบขนาดสูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) โดยไม่ต้องใช้แท่งโลหะรองแต่ต้องมีฐานทึบ หรือแบบขนาดสูงอื่นใด ซึ่งเมื่อใช้แท่งโลหะรองแล้วได้ความสูงของตัวอย่างในแบบเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว)

แท่งโลหะรอง เป็นโลหะรูปทรงกระบอก เพื่อใช้กับแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150.8 มิลลิเมตร (5 15/16 นิ้ว) และสูงขนาดต่างๆ ซึ่งเมื่อใช้กับแบบแล้วจะเหลือเป็นตัวอย่างสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว)

ค้อน (Hammer) ทำด้วยโลหะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีมวลรวมทั้งค้ำถือ 4.537 กิโลกรัม (10.0 ปอนด์) ต้องมีปลอกที่ทำไว้อย่างเหมาะสม เป็นตัวบังคับให้ระยะตกเท่ากับ 457.2 มิลลิเมตร (18 นิ้ว) เนื้อระดับดินที่ต้องการบดทับ จะต้องมีการระบายอากาศอย่างน้อย 4 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9.5 มิลลิเมตร เจาะห่างจากปลายของปลอกทั้ง 2 ข้าง ประมาณ 19.0 มิลลิเมตร

เครื่องดันตัวอย่าง (Sample Extruder) เป็นเครื่องดันดินออกจากแบบภายหลังเมื่อทดลองเสร็จแล้ว จะมีหรือไม่มีก็ได้ ประกอบด้วยตัว jack ทำหน้าที่เป็นตัวดัน และโครงเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวจับแบบ ในกรณีที่ไม่มีใช้ ให้ใช้ส่วหรือเครื่องมืออย่างอื่นแคะตัวอย่างออกจากแบบ

ตาชั่งแบบ Balance มีขีดความสามารถชั่งได้ไม่น้อยกว่า 16 กิโลกรัม ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กิโลกรัม สำหรับชั่งตัวอย่างทดลอง และตาชั่งแบบ Scale หรือแบบ Balance มีขีดความสามารถชั่งได้ 1,000 กรัม ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม สำหรับหาปริมาณน้ำในดิน

เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส สำหรับอบดินตัวอย่าง

เหล็กปาด (Straight Edge) เป็นเหล็กกล้าขี้ไม่บรรทัด หนา และแข็ง เพียงพอในการตัดแต่งตัวอย่างที่ส่วนบนของแบบ มีความยาวไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตร แต่ไม่ยาวเกินไปจนกะกะและหนาประมาณ 3.0 มิลลิเมตร

ตะแกรงร่อนดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 203 มิลลิเมตร (8 นิ้ว) สูงประมาณ 5 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มี ขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) และ ขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

เครื่องผสม เป็นเครื่องมือจำเป็นต่างๆ ที่ใช้ผสมตัวอย่างกับน้ำ ได้แก่ ถาด, ช้อน, พลั่ว, เครื่องค้อนยาง, ถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำ หรือจะใช้เครื่องผสมแบบ Mechanical Mixer ก็ได้

กระป๋องอบดิน สำหรับใส่ตัวอย่างดินเพื่ออบหาปริมาณน้ำในดิน

การเตรียมตัวอย่างได้แก่ ดินหรือหินคลุก หรือ Soil-Aggregate หรือวัสดุอื่นใดที่ต้องการ ทดลองให้ดำเนินการ ถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุด (Maximum size) มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้เตรียมตัวอย่างโดย นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง และทำ Quartering หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง เมื่อแห้งพอเหมาะแล้ว (มีน้ำประมาณร้อยละ 2-3) นำมา ร่อนผ่านตะแกรงเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ทำการชั่งหามวลของวัสดุแต่ละขนาดที่ เตรียมไว้ ก็จะทราบมวลของตัวอย่างแต่ละขนาดมีอยู่ขนาดละเท่าใด ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้ทิ้งไป แทนที่ของตัวอย่าง ด้วยตัวอย่างที่มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ด้วยมวลที่เท่ากับตัวอย่าง เช่น มีขนาด ใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร อยู่ 2,650 กรัม ก็ให้ใช้ตัวอย่างขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตรถึง ขนาด 4.75 มิลลิเมตร เพิ่มเข้าไปอีก 2,650 กรัม ที่เหลือจะเป็นขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร ตามที่มีจริง ดังนี้ ตัวอย่างทั้งหมดที่มีมวล 9,000 กรัม มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร 2,650 กรัม มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร 4,850 กรัม มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร 1,500 กรัม จากวิธีการเตรียมตัวอย่างที่กล่าวมาแล้ว จะได้มวลของตัวอย่างที่เตรียมไว้ คือ มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 2,650+4,850 เท่ากับ 7,500 กรัม และมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร เท่ากับ 1,500 กรัม คลุกตัวอย่างที่ได้ให้เข้ากัน ถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนที่ใหญ่ที่สุด มีขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้นำตัวอย่างมา ทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง (มีน้ำประมาณร้อยละ 2-3) และทำ Quartering หรือใช้เครื่องมือ แบ่งตัวอย่างแล้วคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน ถ้าต้องการทดลองตามวิธี ค. หรือ ง. ดังกล่าวในขอบข่าย ให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง แล้วใช้คอนยางทุบให้ก้อนหลุดจากกัน และร่อนผ่าน ตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) แล้วคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน

การทดลอง Compaction Test จะใช้แบบ (Mold) ขนาดใดก็ได้แล้วแต่ความต้องการตาม วิธีต่างๆดังกล่าวในขอบข่ายและดำเนินการทดลอง ดังนี้

- นำตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้แล้วมาคลุกเคล้าจนเข้ากันได้ดี
- เติมน้ำปริมาณหนึ่ง โดยปกติมักเริ่มต้นที่ประมาณร้อยละ 4 ต่ำกว่าปริมาณน้ำที่ ให้ความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content)
- คลุกเคล้าตัวอย่างที่เติมน้ำแล้วหรือนำเข้าเครื่องผสมจนเข้ากันดี
- แบ่งตัวอย่างใส่ลงในแบบซึ่งมีปลอกสวมเรียบร้อย โดยประมาณให้ดินแต่ละ ชั้น เมื่อบดทับแล้วมีความสูงประมาณ 1 ใน 4 ของ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว)



- ทำการบดทับโดยก้อน ดังนี้ ตามวิธี ก. และ ค. จำนวน 25 ครั้งและ ตามวิธี ข. และ ง. จำนวน 56 ครั้ง
- ดำเนินการบดทับจนได้ตัวอย่างที่ทำกรบดทับแล้วเป็นชั้นๆ จำนวน 5 ชั้น มีความสูงประมาณ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว) (สูงกว่าแบบประมาณ 10 มิลลิเมตร)
- ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดแต่งหน้าให้เรียบเท่าระดับของตอนบนของแบบ (เหลือความสูงเท่า 116.4 มิลลิเมตร) กรณีมีหลุมบนหน้า ให้เติมดินตัวอย่างแล้วใช้ก้อนยางทุบให้นำไปซึ่งจะได้มวลของดินตัวอย่างและมวลของแบบ หักมวลของแบบออกก็จะได้มวลของดินตัวอย่างเปียก (A)
- ในขณะที่เดียวกับที่ทำกรบดทับตัวอย่างในแบบ ให้นำดินใส่กระป๋องอบดิน เพื่อนำไปทดลองหาปริมาณน้ำในดินด้วย มวลของดินที่นำไปหาปริมาณน้ำในดินให้ใช้ดังนี้
- ขนาดก้อนใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 300 กรัม และ ขนาดก้อนใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตรใช้ประมาณ 100 กรัม
- กำหนดค่าความแน่นเปียก  $\rho_t$  (Wet Density) และความแน่นแห้ง  $\rho_d$  (Dry Density) เมื่อทราบปริมาณน้ำในดิน  $w$  (Moisture Content)
- ดำเนินการโดยเพิ่มน้ำขึ้นอีกครั้งละ 2% จนกว่าจะได้ความแน่นลดลงจึงหยุดการทดลอง หรืออาจลดน้ำที่ผสม ในกรณีที่เมื่อเพิ่มน้ำแล้วได้ความแน่นลดลงเพื่อให้เขียน Curve ได้
- เขียน Curve ระหว่างความแน่นแห้ง  $\rho_d$  และปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ  $p_w$  ก็จะทราบค่าความแน่นแห้งสูงสุด  $\text{Max. } \rho_d$  (Maximum Dry Density) และปริมาณน้ำในดินที่ทำให้ความแน่นสูงสุด OMC. (Optimum Moisture Content)

#### การคำนวณ

1. คำนวณหาปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

$$W = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100$$

เมื่อ  $W$  = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง

$M1$  = มวลของดินเปียก มีหน่วยเป็นกรัม

$M2$  = มวลของดินอบแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม

2. คำนวณหาค่าความแน่นเปียก (Wet Density)

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

เมื่อ  $\rho_t$  = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร  
 $A$  = มวลของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็นกรัม  
 $V$  = ปริมาตรของแบบ หรือปริมาตรของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

### 3. คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{W}{100}}$$

เมื่อ  $\rho_d$  = ความแน่นแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร  
 $\rho_t$  = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร  
 $w$  = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

ในการทำ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐานให้รายงาน ดังนี้

1. ค่าความแน่นแห้งสูงสุดมีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร (แบบสูงกว่ามาตรฐาน)
2. ค่าปริมาณน้ำในดินที่ทำให้ความแน่นแห้งสูงสุด เป็นร้อยละ

ตัวอย่าง ความแน่นแห้งสูงสุด (แบบสูงกว่ามาตรฐาน) เท่ากับ 2.231 กรัม ต่อมิลลิเมตร (ใช้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง) ปริมาณน้ำในดินที่ทำให้ความแน่นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 9.8 (ใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง)

#### 2.3.2 วิธีการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน

ขอบข่าย Unconfined Compressive Strength คือ ค่าแรงอัด (Compressive Load) สูงสุด ต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งแท่งตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกหรือรูป 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 หรืออาจใช้เครื่องมือกดชนิดอื่นๆ ที่สามารถควบคุมอัตราเร็วของแรงกด และมีกำลังกดเพียงพอ สำหรับดินที่มีค่า Unconfined Compressive Strength น้อยกว่า 1 กิโลกรัมต่อตาราง

เซนติเมตร (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

เครื่องมือเบ็ดเตล็ด เครื่องมืออื่นๆ ที่ต้องใช้ คือ เครื่องมือตัดและตกแต่งตัวอย่างเครื่องทำตัวอย่าง Remolded และกระป๋องอบดิน

- การเตรียมตัวอย่างขนาดแท่งตัวอย่าง แท่งตัวอย่างควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 33 มิลลิเมตร (1.3 นิ้ว) ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของเม็ดวัสดุในตัวอย่างต้องไม่เกิน 1 ใน 10 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่าง และสำหรับแท่งตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 71 มิลลิเมตร (2.8 นิ้ว) ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของเม็ดวัสดุต้องไม่เกิน 1 ใน 6 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่าง ถ้าหากหลังจากเสร็จการทดลองแล้วพบว่า มีเม็ดวัสดุที่ใหญ่กว่าที่กำหนดไว้ก็ให้หมายเหตุไว้ในแบบฟอร์มอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างจะมีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 3 วัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างให้ได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร หรือ 0.01 นิ้ว โดยใช้ Vernier Caliper หรือเครื่องมือชนิดอื่นที่เหมาะสม
- ตัวอย่าง Undisturbed เตรียมตัวอย่าง Undisturbed จากแท่งตัวอย่าง Undisturbed ขนาดใหญ่หรือจากดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างโดยใช้ท่อบางแท่งตัวอย่างที่ได้จากท่อบางอาจจะทดลองได้เลยโดยไม่ต้องตกแต่ง แต่ต้องตัดปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างให้เรียบและมีสัดส่วนดังที่ได้ระบุมาแล้ว ในการ

เตรียมตัวอย่างจะต้องระมัดระวังอย่าให้มีการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดหน้าตัดเกิดขึ้นในระหว่างการดันตัวอย่างดินออกจากท่อบาง ถ้าหากเห็นว่าจะเกิดการอัดตัวอย่างดินหรือจะทำให้ตัวอย่างดินถูกรบกวนก็ให้ตัดแบ่งท่อบางตามความยาวออกเป็นส่วนๆ การเตรียมตัวอย่างทดลองถ้าหากเป็นไปได้ก็ควรเตรียมในห้องที่ควบคุมความชื้น เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แห่งตัวอย่างทดลองจะต้องมีหน้าตัดตั้งฉากกับแกนตามยาวของแท่งตัวอย่าง ในการตัดและแต่งปลายทั้งสองข้างของแท่งตัวอย่าง ถ้าหากมีเม็ดวัสดุที่ทำให้ผิวหน้าไม่เรียบ ก็ให้ปิดผิวหน้าด้วยปูนปลาสเตอร์ โดยให้ความหนาแน่นที่สุดหรือใช้ Hydrostone หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติคล้ายกัน ให้ซึ่งหามวลของแท่งตัวอย่างก่อนและหลังการทดลองหาปริมาณน้ำในดินของแท่งตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่างทั้งแท่งหรือส่วนที่เป็นตัวแทนของแท่งตัวอย่าง

- ตัวอย่าง Remolded นำตัวอย่างดิน Undisturbed เดิม มาทำดังนี้ อย่างทั่วถึง ในการทำต้องระวังอย่าให้มีฟองอากาศเข้าไปปนในดิน หลังจากนั้นก็อัดดินลงใน Mold ที่มีหน้าตัดเป็นรูวงกลม และมีขนาดตามที่ได้ระบุไว้ เมื่อได้อัดดินใน Mold จนเต็มแล้วให้แต่งปลายแท่งตัวอย่างจนเรียบได้หน้าตัดตั้งฉากกับแกนตามยาวของแท่งตัวอย่าง แล้วคั่นแท่งตัวอย่างมี Void Ratio และปริมาณน้ำในดินใกล้เคียงกับตัวอย่าง Undisturbed เดิมการทดลองโดยวิธีควบคุมความเครียด (Strain) วางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นกลมอันล่างของเครื่องกด แล้วเลื่อนจานแผ่นกลมอันบนของเครื่องกดเข้ากับผิวบนของแท่งตัวอย่าง หมุนหน้าปัดของ Dial Gauge ที่ใช้อ่านระยะทางของการกดให้เข็มชี้ที่ศูนย์ กดแท่งตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคิดเป็นความเครียดในแนวดิ่ง 0.5 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ ต่อนาที จนแรงกดและระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างทุก ๆ 30 วินาที ในการใช้อัตราเร็วของความเครียดค่าใดจะต้องประมาณว่าระยะเวลาตั้งแต่เริ่มให้แรงกดจนถึงแรงกดสูงสุด จะต้องไม่เกิน 10 นาที (\*1) เพิ่มแรงกดต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงกดลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่า 20 เปอร์เซ็นต์ หาปริมาณน้ำในดินโดยนำแท่งตัวอย่างเข้าเตาอบ นอกจากกรณีที่ต้องเตรียมแท่งตัวอย่าง Remolded ก็ให้ใช้ส่วนของดินที่เป็นตัวแทนของแท่งตัวอย่างได้เขียนรูปสภาพแท่งตัวอย่างที่ทดลองเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยแตกร้าววัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน การทดลองโดยวิธีควบคุมความเค้น (Stress) ก่อนการทดลองให้ประมาณค่าแรงกดสูงของแท่ง

ตัวอย่าง (\*2) วางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นกลมแผ่นล่างของเครื่องกดเลื่อนจนแผ่นกลมอันบนแตะกับผิวบนของแท่งตัวอย่างแล้วตั้งศูนย์บนหน้าปัดที่ใช้อ่านระยะยวบตัวของแท่งตัวอย่าง ใช้แรงกดเริ่มแรกบนแท่งตัวอย่างเท่ากับ  $1/15$  ถึง  $1/10$  ของแรงกดสูงสุดที่ได้ประมาณไว้แล้วทิ้งไว้ครู่หนึ่ง แล้วอ่านระยะยวบตัวของแท่งตัวอย่างเพิ่มแรงกดต่อไป เท่ากับแรงกดแรก แล้วทิ้งไว้ครู่หนึ่งเหมือนครั้งแรก ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้แรงกดสูงสุด หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่าเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ในระหว่างการเพิ่มแรงกด ถ้าสังเกตว่าต้องใส่แรงกดมากกว่า 15 ครั้ง หรือน้อยกว่า 10 ครั้ง เพื่อให้ได้แรงกดสูงสุดแล้ว จะต้องปรับเปลี่ยนแรงกดแต่ละครั้งให้มากขึ้น หรือน้อยลงทันที ในการหาปริมาณน้ำในดินอาจหาจากดินทั้งแท่งที่ทดลองเสร็จแล้ว หรือส่วนของดินที่เป็นตัวแทนแท่งตัวอย่างก็ได้เขียนรูปสภาพแท่งตัวอย่างที่ทดลองเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยแตกร้าวให้วัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนอน ดินที่อ่อนมากจะมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดมาก ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองโดยใช้อัตราเร็วของความเครียดสูง ในทางตรงกันข้าม ดินที่แข็งหรือแตกง่ายซึ่งมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดน้อย ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองด้วยอัตราเร็วของความเครียดที่ต่ำกว่า การประมาณค่านี้จะต้องมีประสบการณ์พอเพียง มิฉะนั้นจะต้องใช้เครื่องกดอย่างเล็ก (Penetrometer) กดลงบนส่วนของตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้คู เพื่อหาค่านี้โดยประมาณ

- กำหนดหาความเครียดในแนวตั้ง สำหรับแรงกดใด ๆ ( $\epsilon$ ) ได้โดยใช้สูตร

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

เมื่อ  $\Delta L$  = ระยะยวบตัวของแท่งตัวอย่างที่แรงกดใด ๆ โดยอ่านจาก Dial Gauge

$L_0$  = ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง

- กำหนดหาพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยสำหรับแรงกดใด ๆ ( $A$ ) ได้โดยใช้สูตร

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

เมื่อ  $A_0$  = พื้นที่หน้าตัดเดิมของแท่งตัวอย่าง

$\epsilon$  = ความเครียดตามแนวตั้งที่แรงกดนั้น ๆ

- กำหนดหาความเค้นสำหรับแรงกดใด ๆ ( $\sigma_c$ ) ได้โดยใช้สูตร

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

เมื่อ  $P$  = แรงกด

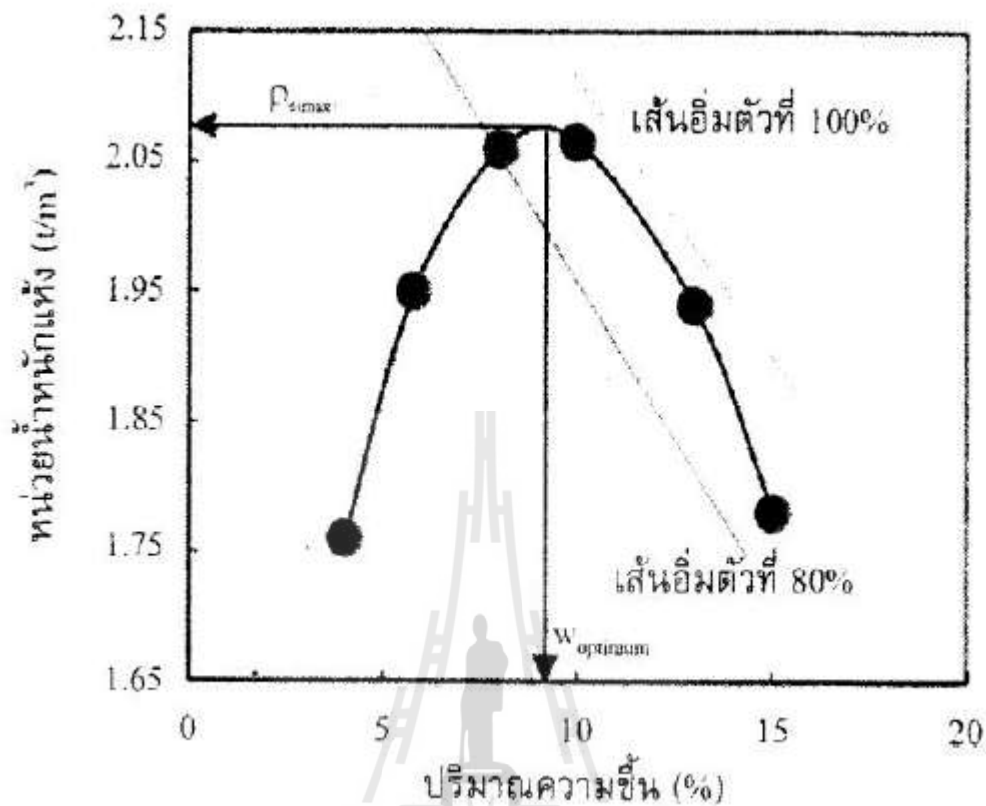
$A =$  พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงกดนั้นๆ

- เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sigma_c$  และ  $\varepsilon$  โดยใช้  $\sigma_c$  เป็นแกนตั้งและ  $\varepsilon$  เป็นแกนนอน จากกราฟหาค่าสูงสุดของ  $\sigma_c$  หรือค่า  $\sigma_c$  ที่  $\varepsilon$  เท่ากับร้อยละ 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 (ถ้าตัวอย่างถูกทำให้อิ่มตัวในห้องปฏิบัติการให้หมายเหตุ Degree of Saturation อีกค่าหนึ่งไว้ด้วย)
- ค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดเป็นร้อยละ (อ่านจากกราฟ)
- ค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของความเครียดเป็นร้อยละต่ออนาที โดยคิดตั้งแต่เริ่มกดจนถึงแรงกดสูงสุด
- ให้เขียนหมายเหตุในกรณีที่เกิดมีลักษณะผิดปกติในการทดลอง หรือแบบรายละเอียดอื่นๆ ที่คิดว่ามีความจำเป็นต้องใช้อธิบายผลทดลอง

ข้อควรระวัง ในการค้นตัวอย่างดินออกจากท่อเพื่อใช้ทดลอง จะต้องดันไปตามทิศทางเดียวกันกับที่ตัวอย่างเคลื่อนที่เข้าไปในกระบอกในระหว่างเก็บตัวอย่าง เพื่อลดการรบกวนตัวอย่างดิน และในการทำตัวอย่าง Remolded ถ้าแท่งตั้งอย่างหลังจากทำ Remolded แล้วได้ความแน่นแตกต่างจากก่อนทำ Remolded ให้นำมาดำเนินการใหม่

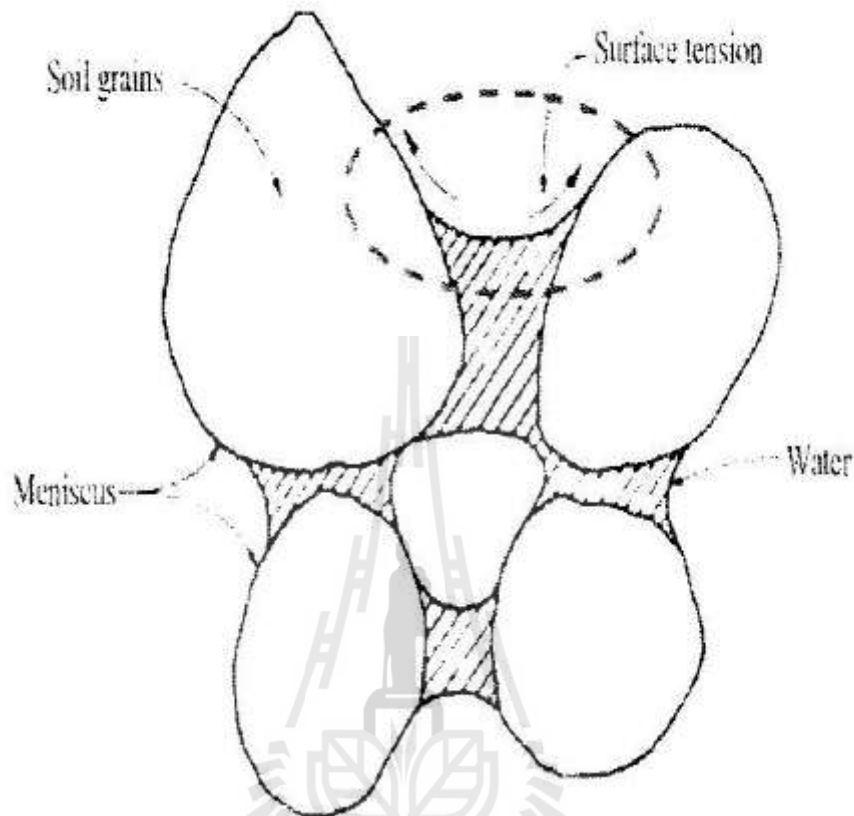
#### 2.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)

ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความชื้นแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R.Proctor (1930) โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering New-Record (proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการ 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 เนื่องจากแรงดึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี (Capillary Moisture) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมากๆ น้ำจะไปลดแรงคาพิลลารีและเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย ถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกเรื่อยๆ จนน้ำไปสลายแรงเสียดทานได้แล้ว น้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จนถึงปริมาณน้ำที่เติมช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเรียกจุดที่ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดว่า maximum dry density และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้ว่า optimum moisture content หลังจากจุดนี้เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้น้ำในดินที่มีในปริมาณที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความว่างจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินสูงมากๆ พบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัวซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป

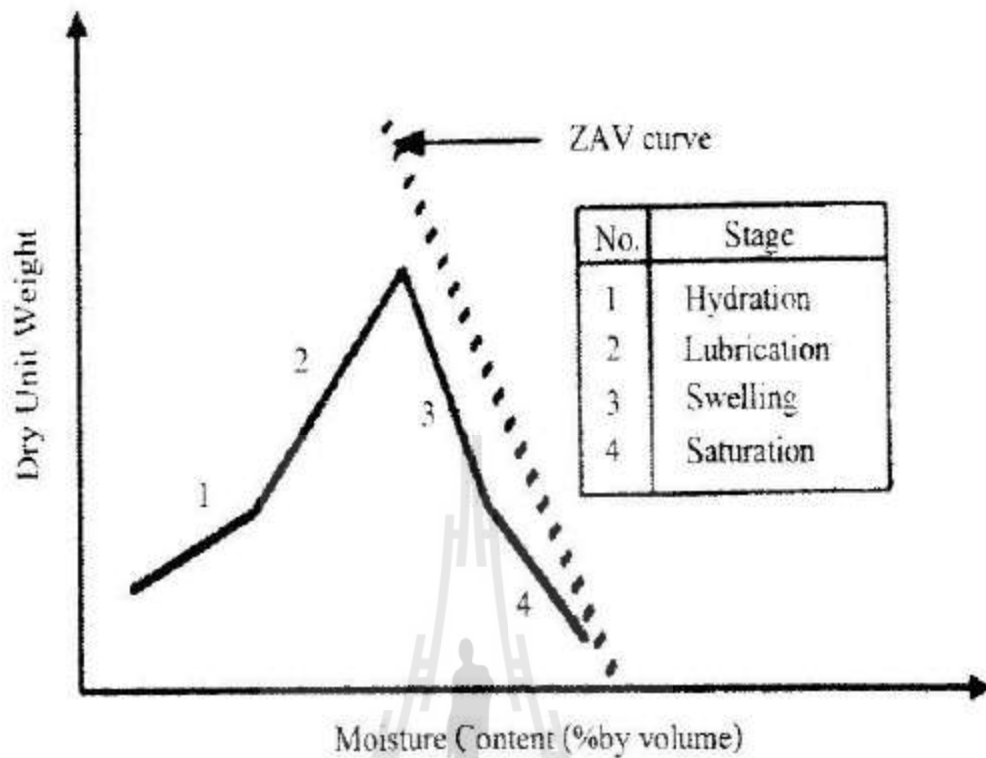


รูปที่ 2.2 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ

## 2.5 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  
นำเสนอ โดย Hogentogler

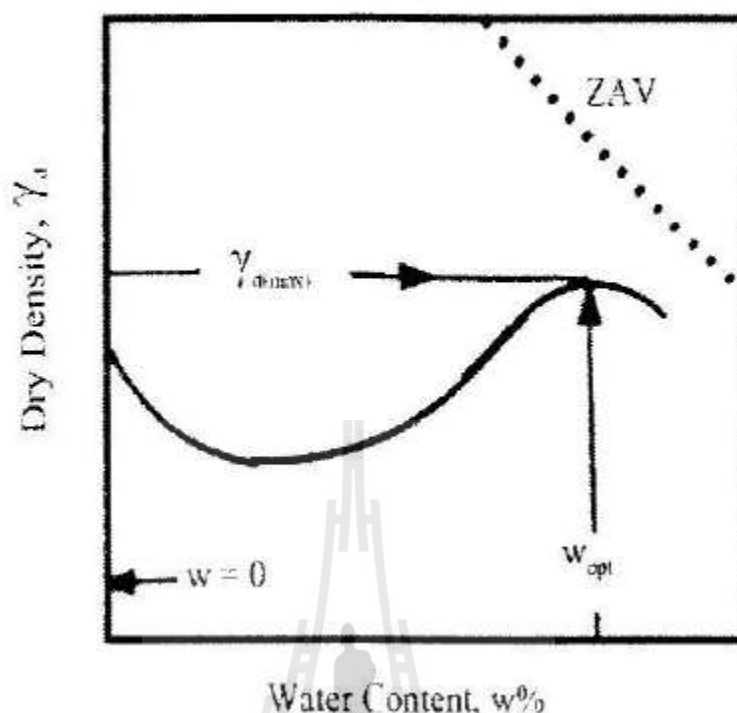
1. Hydration Stage เขากล่าวว่าในช่วงนี้ น้ำจะถูกดูดซึมโดยอนุภาคของดินในลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ห่อหุ้มอนุภาคดิน ในลักษณะเดียวกับเมื่อพรมน้ำลงไปบนดินแห้ง ในช่วงแรกอนุภาคดินจะดูดซึมน้ำทันทีเพื่อไปห่อหุ้มอนุภาคดินก่อน โดยน้ำส่วนกลางที่จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นนั้นยังไม่มี
2. Lubrication Stage ในช่วงนี้ น้ำจะมีบทบาทเป็นสารหล่อลื่น เป็นผลให้ดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะที่มวลดินมีความแน่นขึ้น โดยยังคงมีอากาศอยู่ในมวลดินบางส่วน นั้นหมายถึงความหนาแน่นแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อถึงจุดปริมาณน้ำที่เหมาะสม (optimum moisture content; OMC) จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าสูงสุด (maximum dry density)
3. Swelling Stage ในช่วงนี้เกิดจากการเติมน้ำที่เกินปริมาณน้ำที่เหมาะสม อากาศในส่วนที่มีอยู่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากปริมาตรของมวลดินมีค่าน้อยอยู่แล้ว และอยู่ในสภาพที่แน่น ซึ่งจะไม่ให้อากาศที่มีอยู่ออกไป ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก มวลดินจึงเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรอากาศคงที่อากาศที่มีอยู่ออกไป ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก มวลดินจึงเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรอากาศคงที่

4. Saturation Stage ในช่วงนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก น้ำจะเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างที่เหลืออยู่ในมวลดิน เป็นผลให้ระดับความอิ่มตัว (degree of saturation) เพิ่มมากขึ้น และมีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นอากาศเป็นศูนย์ (Zero Air Void; ZAV)

ดังที่ Hogentogler ได้อธิบายไว้ข้างต้น มักจะประยุกต์ใช้โดยตรงกับดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกับ Proctor

## 2.6 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (1942)

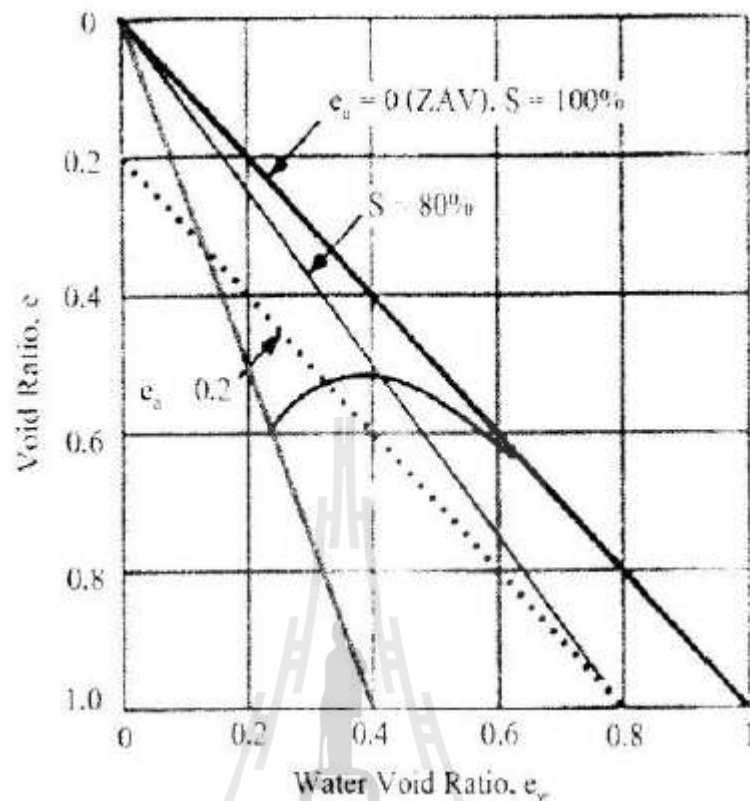
เขาได้อธิบายเส้นกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบ โดยเขาพบว่า นอกจากจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ปรากฏบนเส้นกราฟการบดอัดแล้ว ก่อนถึงด้านแห้งของการบดอัดจะมีจุดที่แสดงถึงค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเขาได้อธิบายถึงช่วงที่ดินมีความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดที่มีความหนาแน่นแห้งต่ำสุดว่า ถ้าหากเริ่มบดอัดดินเม็ดหยาบที่แห้งมากๆ หรือดินที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์ เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงแรกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดความหนาแน่นแห้งต่ำสุด เมื่อเลยจุดนี้ไปก็จะเข้าสู่เส้นกราฟการบดอัดปกติ ซึ่งถ้าสังเกตจากเส้นกราฟพบว่า เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งที่จุดปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์กับจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด จะมีช่วงความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย และเขาได้กล่าวในเชิงวิชาการไว้ว่า สำหรับกรณีของทรายที่มีความแห้งมากๆ เมื่อเติมน้ำในช่วงแรก อนุภาคดินจะจับตัวกันด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ของน้ำในลักษณะคล้ายกระจกของก้อนดินหรือทรายรอบตัวเอง ที่เรียกว่า Arching Effect ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินมากขึ้น โดย Arching Effect จะพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่มีความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ดังนั้นปฏิกิริยาของน้ำที่เติมในช่วงแรกๆ จะแตกต่างจากกรณีของ Hogentogler และ Proctor เนื่องจากดินทรายไม่มีประจุลบ ดังนั้นเมื่อเติมน้ำจะเกิดแรงดึงผิวทำให้เกิดแรงยึดแน่นปรากฏ (apparent cohesion) และเมื่อเติมน้ำมากขึ้น แผ่นฟิล์มจะมีความหนาขึ้น มีผลทำให้ Arching Effect ลดน้อยลงไป เป็นผลให้แรงดึงดูดของแรงดึงผิวลดลงตามลำดับแล้วอนุภาคดินก็เริ่มจัดเรียงตัวกันใหม่ และหลังจากนั้นก็จะเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้วแต่เขาได้ให้ความหมายของ OMC ต่างจากคนอื่น กล่าวคือ OMC คือน้ำที่มีอยู่พอดีในมวลดินบดอัดที่ทำให้ดินอยู่ในสภาพที่ไปสลายแรงดึงผิวพอดี ที่เรียกว่า neutralizes surface tension และเมื่อมีพลังงานบดอัดมากระทำ จึงทำให้ทรายจัดเรียงตัวกันใหม่ ทำให้ทรายแน่นขึ้น จนสุดท้ายถึงจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด เมื่อน้ำสูงเกิน OMC ดินก็จะอ่อนตัวลง เป็นผลให้ความหนาแน่นแห้งลดลง โดยสรุปแล้ว ในการบดอัดดินทราย การที่จะให้ได้ความหนาแน่นแห้งค่อนข้างดี คือช่วงที่ทรายแห้งมากๆ และช่วงความชื้นที่ค่อนข้างน้อยไปทางด้านเปียกไปแล้ว



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น  
นำเสนอโดย Buchanan

## 2.7 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956)

เขาได้นำเสนอแนวความคิดใหม่ โดยวางอยู่บนพื้นฐานของแรงดันน้ำในช่องว่าง (pore water pressure) และแรงดันอากาศในช่องว่าง (pore air pressure) ที่มีอยู่ในมวลดินที่บดอัด เขากล่าวไว้ว่า ดินแห้งเป็นดินที่บดอัดได้ยาก เนื่องจากภายในมวลดินมีแรงเสียดทานมากซึ่งเกิดจากแรงคาพิลลารี อย่างไรก็ตาม ในช่วงที่ดินมีความแห้งมากๆ มวลดินจะมีช่องว่างอยู่มาก การบดอัดจึงไปไล่อากาศให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเติมน้ำเพิ่มขึ้นแรงตึงผิวก็จะลดลง ทำให้แรงเสียดทานลดลงด้วย โดยความแน่นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปจนกระทั่งถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC) ก็จะได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density) เขากล่าวว่าประสิทธิภาพที่น้อยลงไปจากการบดอัดเมื่อเติมน้ำเลยจุด OMC เนื่องจากอากาศถูกกักเอาไว้และเกิดการสะสมกันเป็นแรงดันอากาศในมวลดิน เขาได้เสนอเส้นกราฟการบดอัดโดยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio;  $e$ ) และอัตราส่วนน้ำในช่องว่าง (water void ratio;  $e_w$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินน้ำเสนอ โดย Hilf

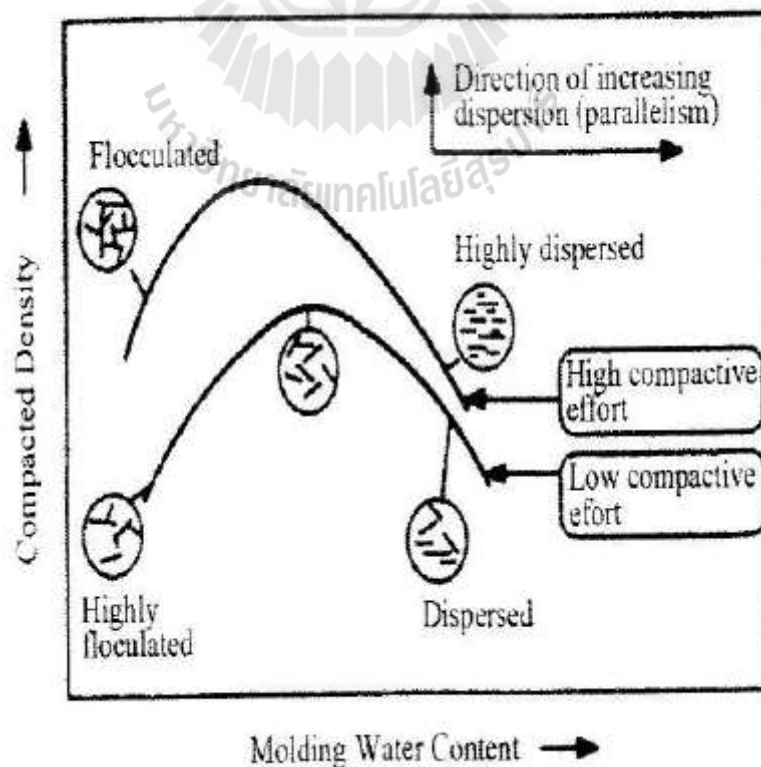
โดยพบว่า ที่จุด OMC ค่าอัตราส่วนช่องว่างจะมีค่าน้อยที่สุด โดยจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟเป็นจุดที่ค่าอัตราส่วนช่องว่างมาก และมีค่าระดับความอิ่มตัวน้อย เมื่อบดอัดไปก็จะได้ค่าอัตราส่วนช่องว่างที่น้อยที่สุด ซึ่งจุดนี้สามารถหาค่าสัดส่วนของอากาศได้ด้วย และพบว่าที่ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ค่าระดับความอิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ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

## 2.8 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985)

เขาได้เริ่มนำผลจากการดูโครงสร้างภายในดินเปรียบเทียบกับความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัด โดยเขาสนใจว่าคุณสมบัติของดินที่บดอัดทางด้านเปียกและทางด้านแห้งมีความแตกต่างกันเกิดจากสาเหตุใด เขาสังเกตจากปัจจัยหลาย ๆ อย่างพบว่า ในความเป็นจริงแล้ว การบดอัดในสนามไม่สามารถบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ดังนั้นในการเติมน้ำจะมีช่วงหนึ่งที่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงนี้แล้วคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเป็นไปตามที่ต้องการ แต่เมื่อเติมน้ำเกินช่วงนี้ไปเป็นช่วงที่เขาไม่แนะนำ ซึ่งเขาให้เหตุผลจากการพิจารณาโครงสร้างภายในของดินเหนียวพบว่า

ในช่วงการบดอัดดินทางด้านหนึ่ง ลักษณะโครงสร้างของดินจับตัวกันเป็นกระจุก โดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นเดียวกัน การใช้พลังงานบดอัดต่ำ ความเป็นกระจุกของดินมีมาก และจะน้อยลงเมื่อใช้พลังงานการบดอัดที่สูง เป็นผลให้โครงสร้างของดินชิดกันมากขึ้นด้วย เมื่อเติมน้ำเข้าไปโดยที่พลังงานคงที่ สังเกตเห็นว่าโครงสร้างของดินแน่นขึ้น อัตราส่วนช่องว่างลดลงจนกระทั่งเกินจุด OMC ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างดินจะเป็นแบบขนานกันมากขึ้น เมื่อความชื้นยิ่งมากขึ้น ความเป็นระเบียบของโครงสร้างดินก็ยิ่งมากขึ้นตาม การที่โครงสร้างดินจัดเรียงตัวกันในแนวขนานถือว่าไม่ดี เพราะว่าเป็นระนาบที่อ่อนแอที่สุด โดยสรุปแล้วเขาพยายามตอบคำถามว่าทำไมจุดที่มีความหนาแน่นแห้งเท่ากันแต่ปริมาณน้ำไม่เท่ากัน เมื่อเขาใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูพบว่าการบดอัดดินในด้านหนึ่งมีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบระเกะระกะ (flocculated structure) ในทางตรงกันข้าม เมื่อเติมน้ำเกินจุด OMC เป็นการบดอัดทางด้านเปียก มีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบขนาน (dispersed structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นแห้งเท่ากัน โดยเปรียบเทียบดินบดอัดทางด้านแห้งกับดินบดอัดทางด้านเปียก พบว่า

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



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน

## 2.9 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)

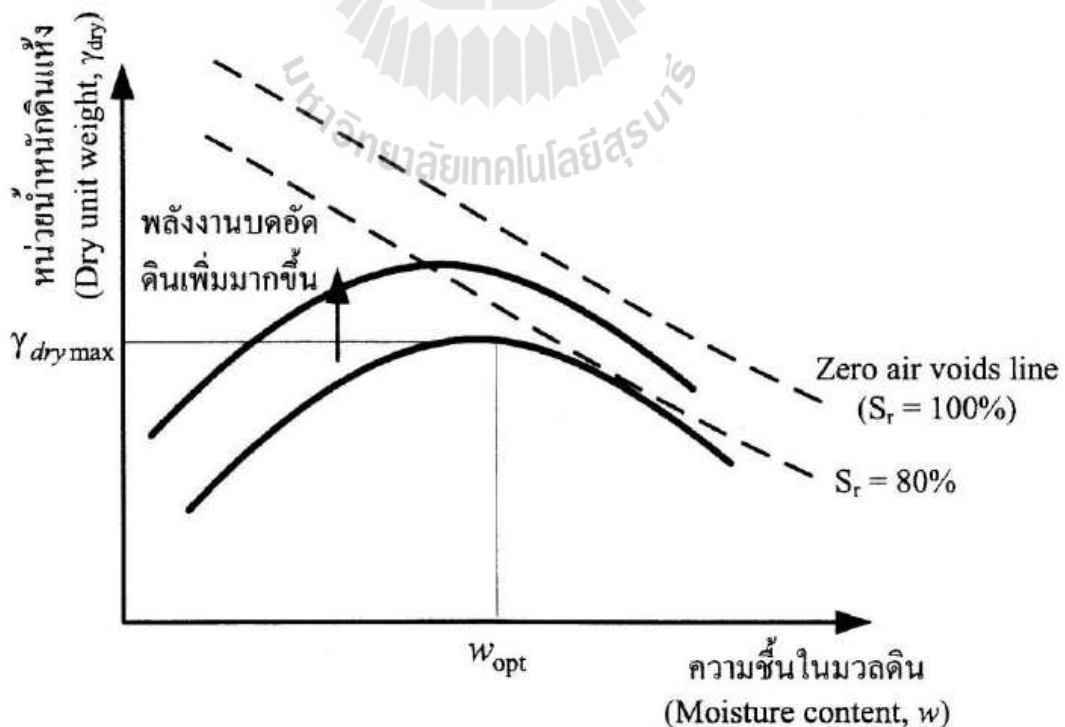
ทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ในงานบดอัดดิน คือ สมการความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับระดับชั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำ

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

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 ดินจะต้องอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ
2.  $w_{opt}$  หมายถึง ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ไม่แห้งจนเกินไป (เพราะถ้าแห้งไปดินจะไม่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ) 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

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

### 2.9.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน

ดังได้อธิบายแล้วข้างต้นว่าปริมาณความชื้นในดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อความหนาแน่นของดินบดอัดนอกเหนือจากปริมาณความชื้นแล้ว ยังมีปัจจัยอีกสองปัจจัย ซึ่งก็คือชนิดของดิน และพลังงานในการบดอัด

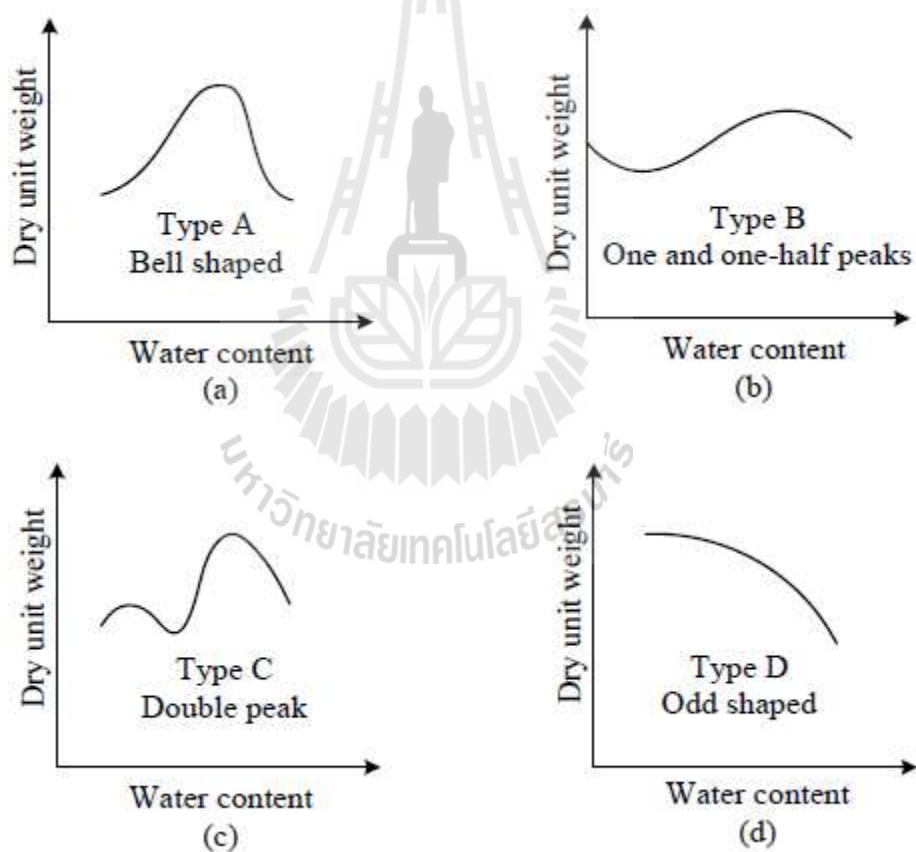
### 2.9.2 ชนิดของดิน

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 มักพบใน

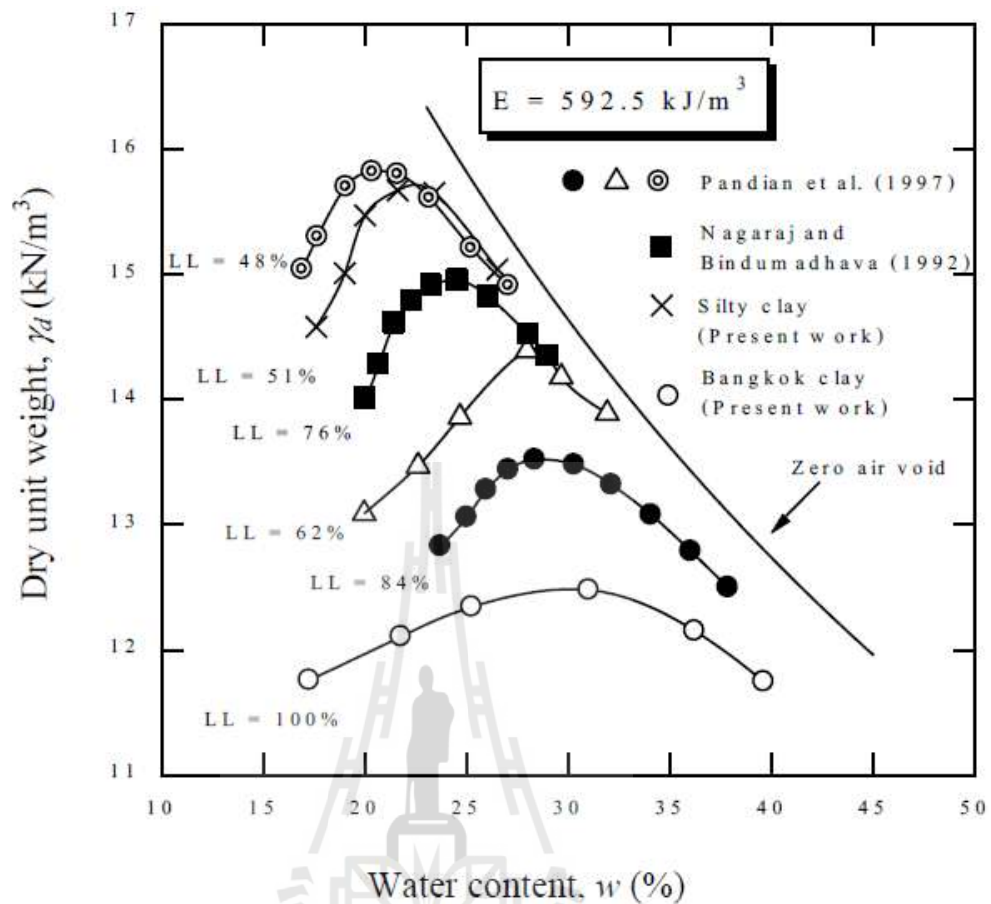
ดินที่มีขีดจำกัดเหลวน้อยกว่าร้อยละ 30 ชนิด D คือกราฟที่ไม่แสดงจุดยอดที่ชัดเจน ดินที่มีขีดจำกัดเหลวมากกว่าร้อยละ 70 อาจแสดงลักษณะกราฟเป็นแบบชนิด C หรือ D ซึ่งเป็นลักษณะกราฟที่ไม่ค่อยพบเห็น

สำหรับการบดอัดดินเหนียว Horpibulsuk (2005) แสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟการบดอัดแปรผันอย่างมากกับขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดเหลวยิ่งมาก หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดยิ่งมีค่าน้อยลงในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมยิ่งมีค่ามากขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงผลทดสอบการบดอัดของดินชนิดต่าง ๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor test) การที่ขีดจำกัดเหลวมีอิทธิพลต่อเส้นกราฟการอัดตัวคายน้ำ เนื่องจากขีดจำกัดเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนผลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (pore fluid)



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่าง ๆ





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

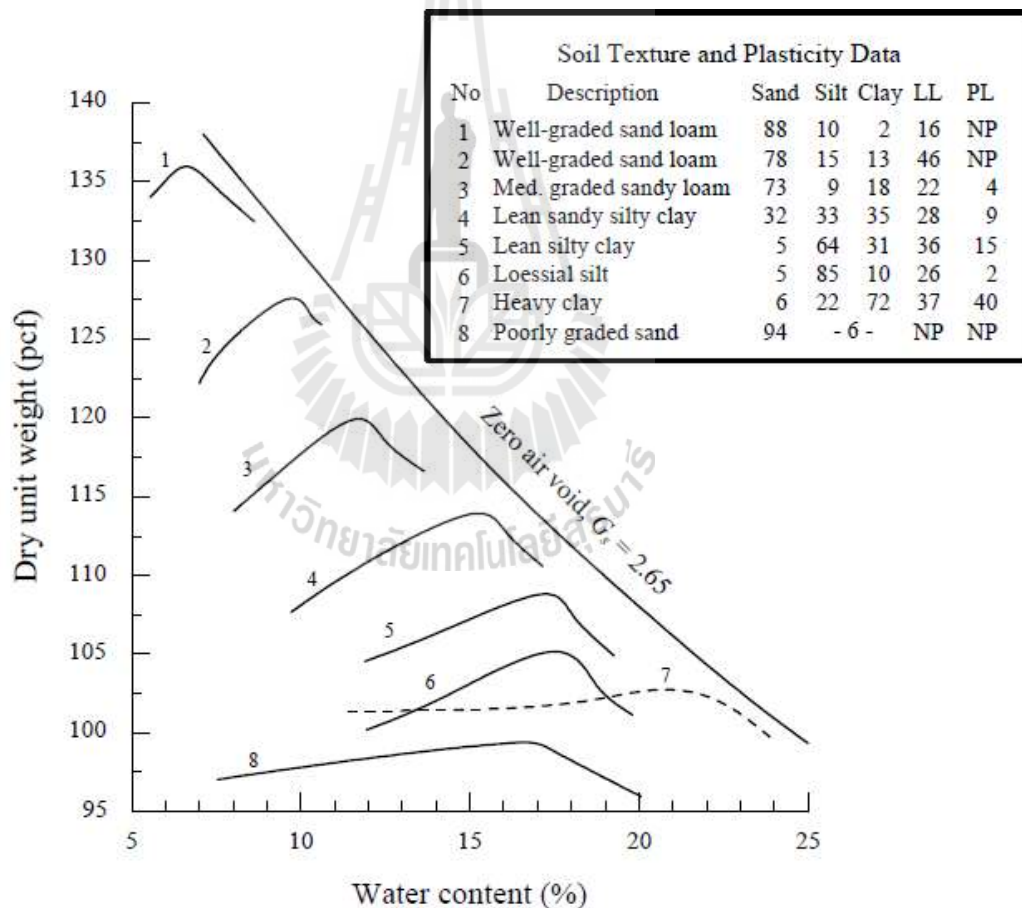
Gurtug and Sridharan (2002) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเม็ดละเอียด (fine-grained soil) ที่บดอัดแบบวิธีมาตรฐาน (standard Proctor test) มีความสัมพันธ์โดยตารางกับพิกัดพลาสติก ดังนี้

$$OMC = 0.92PL \quad (2.3)$$

$$\gamma_{dmax} = 0.98\gamma_{dPL} \quad (2.4)$$

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

รูปที่ 2.4 แสดงอิทธิพลของชนิดของดินต่อลักษณะการบดอัด กราฟการบดอัดมีลักษณะแบนสำหรับทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ (Uniformly graded sand) ในทางตรงกันข้าม ทรายที่มีขนาดคละดี (Well-graded sand) จะแสดงผลทดสอบที่มีจุดยอดอย่างเห็นได้ชัดสำหรับดินเม็ดละเอียดดินที่มีขีดจำกัดเหลวสูง จะมีหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำ และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสูง ดินตะกอนจะแสดงกราฟที่เห็นจุดยอดได้ชัดเจน ขณะที่กราฟการบดอัดดินเหนียวจะมีลักษณะแบน ดินตะกอนเป็นดินที่ไวต่อปริมาณความชื้น กล่าวคือสำหรับพลังการบดอัดค่าหนึ่ง ปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะมีผลอย่างมากต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง ส่วนดินเหนียวเป็นดินที่ไวต่อพลังงาน การเปลี่ยนแปลงพลังงานการบดอัดเพียงเล็กน้อยมีผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักแห้งอย่างมาก



รูปที่ 2.10 อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg, 1960)

## 2.10 พลังงานการบดอัด

พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย (E) สามารถคำนวณได้ดังนี้

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

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

$NL$  = จำนวนชั้นของการบดอัด (number of layers)

$W$  = น้ำหนักของค้อน (weight of hammer)

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

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

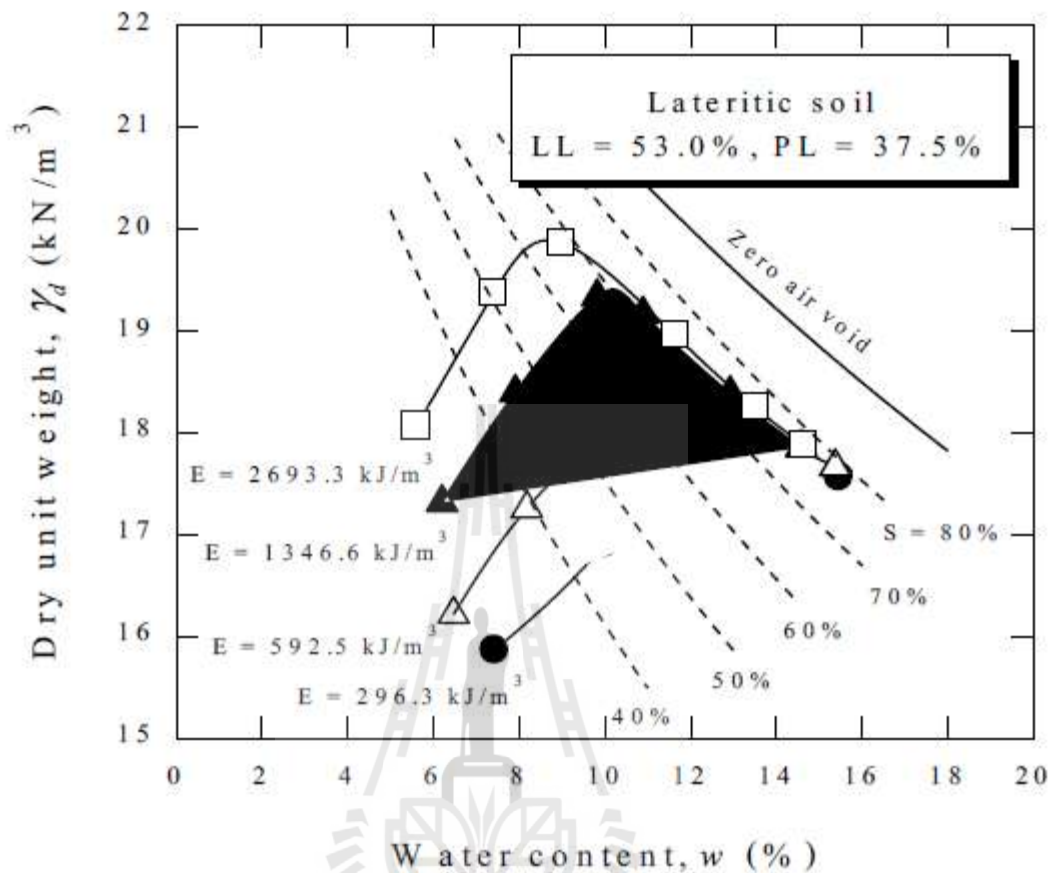
$$E_{st} = \frac{(25)(3)(5.5)(1)}{1/30} = 12,375 \text{ ฟุต-ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต} = 592 \text{ กิโลจูลต่อลูกบาศก์}$$

เมตร

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

$$= 2,693.3 \text{ กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร}$$

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



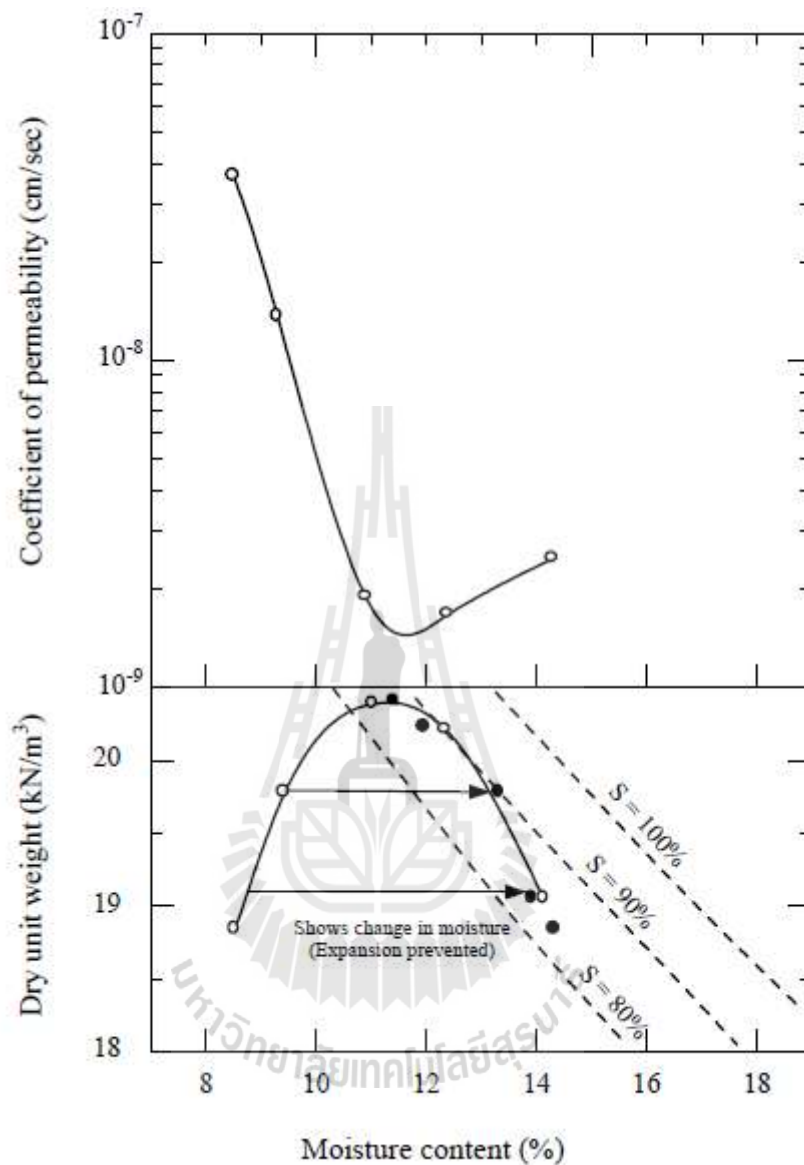
รูปที่ 2.11 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง  
(Horpibulsuk et al., 2004)

จากรูปที่ 2.11 เราสามารถสรุปได้ว่า

1. หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้น
2. ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มของพลังงานการบดอัด

## 2.11 การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม

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



รูปที่ 2.12 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (Lambe, 1962)

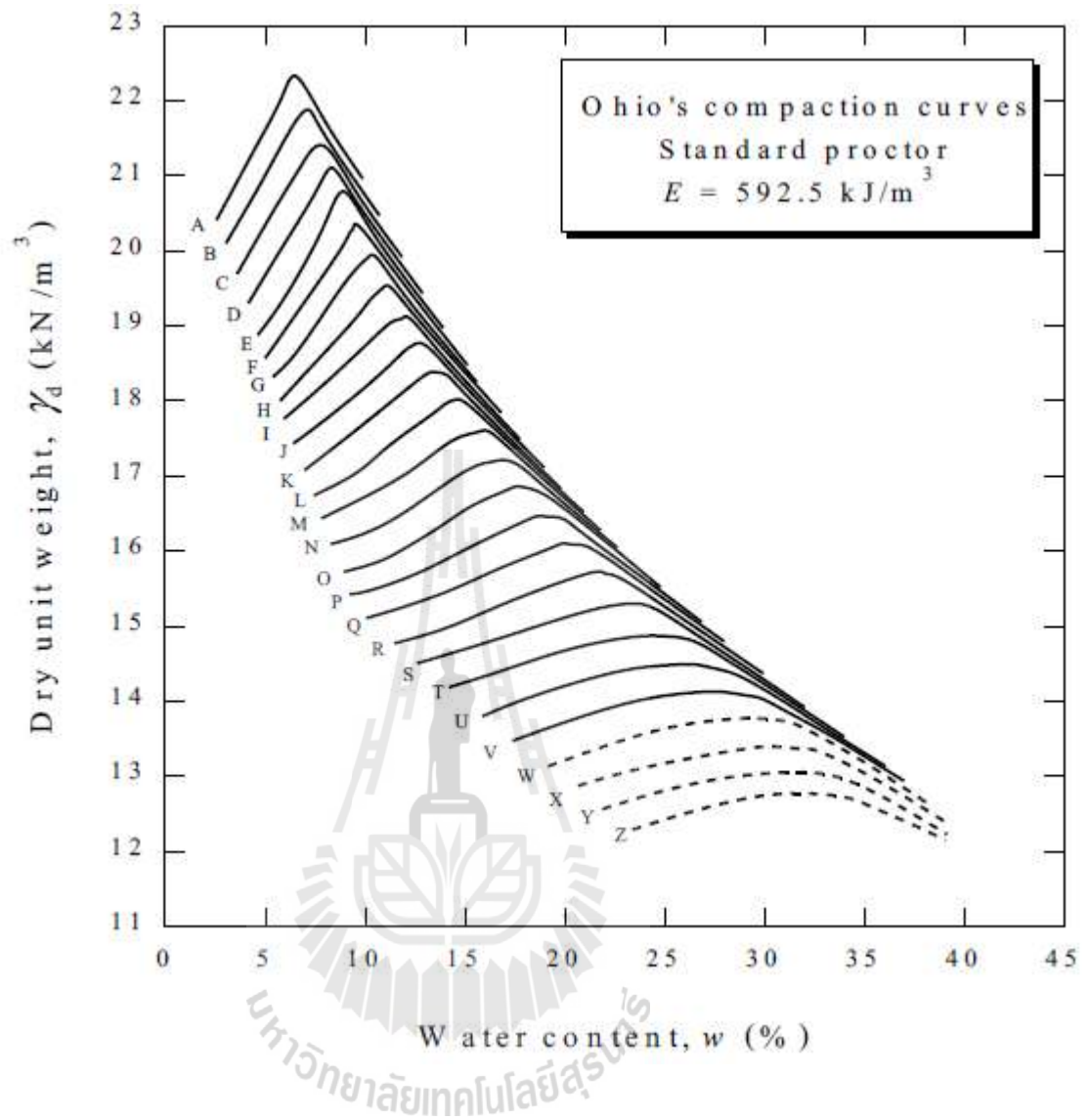
## 2.12 การทำนายกราฟการบดอัด

การทำนายกราฟการบดอัดเริ่มต้นครั้งแรกโดย Joslin (1959) ซึ่งเป็นผู้สร้างกราฟการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานจำนวน 26 กราฟ และให้ชื่อว่ากราฟ Ohio (Ohio curves) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 กราฟเหล่านี้สร้างขึ้นจากการรวบรวมผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของดินชนิดต่างๆ จำนวนมาก ในมลรัฐ Ohio กราฟ Ohio นี้มีประโยชน์ในการประมาณกราฟการบดอัด

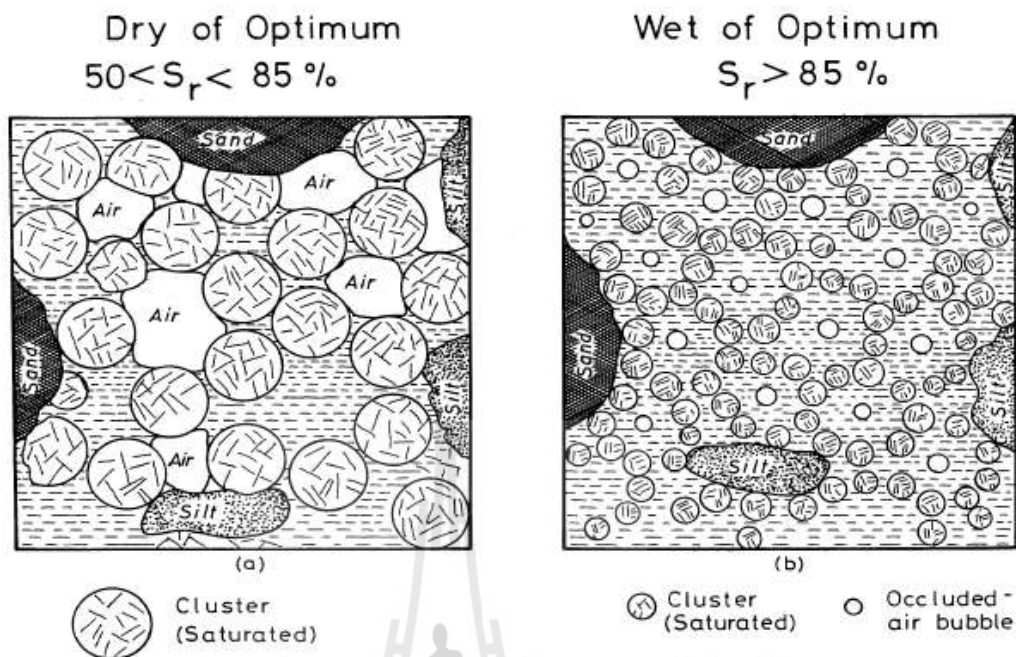
ของดินชนิดต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทราบผลทดสอบของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้ง  
ค่าหนึ่ง แต่การประมาณนี้ทำได้เพียงแค่ว่าที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

Nagaraj et al. (2006) ได้นำเสนอแบบจำลองโพรงระหว่างอนุภาคดินอุดมคติสำหรับการ  
ทำนายกราฟการบดอัดดินเม็ดละเอียดภายใต้พลังงานการบดอัดต่างๆ (รูปที่ 2.14) โดยกล่าวว่า  
ทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม สถานะของน้ำ (Water phase) และอากาศ (Air phase)  
ในมวลดินบดอัดจะมีความต่อเนื่อง จุดเชื่อมต่อระหว่างอากาศและน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากความโค้งผิว  
น้ำ (Meniscus) จะเชื่อมต่อโพรงระหว่างกลุ่มอนุภาคดินเหนียวเมื่อระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเพิ่มขึ้น  
ความต่อเนื่องของอากาศ (Air phase) จะลดลงจนในที่สุดอากาศจะก่อตัวเป็นฟองอากาศ (Air  
bubble) จากแบบจำลองดังกล่าว Nagaraj et al. (2006) ได้เสนอพารามิเตอร์สถานะสองตัว  
( $w/S^*$  และ  $w/S$ ) สำหรับดินเม็ดละเอียดที่บดอัดทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้น  
เหมาะสม และกล่าวว่าที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง แม้ว่าปริมาณความชื้นจะเปลี่ยนแปลงตามระดับ  
ความอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่พารามิเตอร์สถานะจะมีค่าคงที่





รูปที่ 2.13 กราฟการบดอัด Ohio (ปรับปรุงจาก Joslin, 1959)



รูปที่ 2.14 แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด (Nagaraj et al., 2006)

## 2.13 การก่อสร้างและการบดอัด ชั้นโครงสร้างทาง

### 2.13.1 งานพื้นทาง (base)

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

#### 2.13.1.1 วิธีการก่อสร้าง

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



การผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หรือรื้อออกใส่วัสดุพื้นทางที่มีส่วนผสมสม่ำเสมอลงไปแทน แล้วสเปรย์น้ำให้ได้ความชื้นที่เหมาะสม กลี่ยให้ได้รูปตามแบบก่อสร้างแล้วทำการบดอัดแน่น ในระหว่างการบดอัดให้มีการสเปรย์ น้ำบาง ๆ เพื่อให้วัสดุจับตัวกันจะช่วยให้ผิวหน้าเรียบปราศจากหลุมบ่อ และเพื่อให้ผิวหน้าเรียบแน่นสม่ำเสมอ ให้ทำการบดอัดชั้นสุดท้ายด้วยรถบดล้อเหล็ก น้ำหนักไม่น้อยกว่า 12 ตัน ซึ่งในระหว่างก่อสร้างหากมีฝนตกน้ำขัง ทำให้ความชื้นในระหว่างการบดอัดมากเกินไปจนเป็นเหตุให้ชั้นพื้นทางเสียหายหรืออาจเสียหายลึกลงไปถึงชั้นรองพื้นทางด้วย ดังนั้นเมื่อพบว่าพื้นทางส่วนที่ได้ก่อสร้างแล้วมีการบวมตัว (soft spot) จะต้องรื้อออกและอาจต้องตรวจสอบชั้นรองพื้นทางด้วยว่ามีความเสียหายหรือไม่ หากเสียหายจะต้องรีบดำเนินการแก้ไขปรับปรุงชั้นรองพื้นทางให้เรียบร้อยก่อนแล้วจึงทำการแก้ไขพื้นทางต่อไปถ้าแบบก่อสร้างกำหนดความหนาพื้นทางมากกว่า 15 เซนติเมตร ให้แบ่งการทำงานเป็น 2 ชั้น หนาชั้นละเท่า ๆ กัน (โดยประมาณ) บดอัดให้แน่นและได้ระดับตามแบบก่อสร้าง

งานชั้นพื้นทางที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ และยังไม่ได้ก่อสร้างลาดยางรองพื้นแอสฟัลต์ (prime coat) ตามชั้นตอนปกติ ให้ฉีดพ่นน้ำหล่อเลี้ยงผิวหน้าป้องกันการสูญเสียน้ำ

#### 2.13.1.2 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 แล้วจึงบดอัดใหม่ให้ได้ความแน่นตามข้อกำหนด

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการทำโครงการ

#### 3.1 บทนำ

การบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์ โดยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมในที่กลับมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) เป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายในกรมทางหลวงในปัจจุบัน ผิวทางและพื้นที่ทางที่บูรณะด้วยวิธีการนำวัสดุหมุนเวียนมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) และใช้งานเป็นระยะเวลาหลายเส้นทาง เกิดการชำรุดเสียหายเพิ่มมากขึ้น และจำเป็นต้องได้รับการบูรณะผิวทางและพื้นที่ทางอีกครั้งเพื่อให้ผู้ใช้ทางเกิดความสะดวกรบาย ปลอดภัย

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการบดอัดและกำลังอัดของผิวทางปรับปรุงเดิมที่ผสมกับปูนซีเมนต์ ในพื้นที่จังหวัดลพบุรี สำนักทางหลวงที่ 9 (ลพบุรี) กรมทางหลวง ผู้วิจัยเก็บตัวอย่างหินคลุก , ผิวทางเดิม (หินคลุก + ผิวทางแอสฟัลต์) และผิวทางปรับปรุงเดิม (หินคลุก + ผิวทางแอสฟัลต์ที่เคยได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มาแล้ว) โดยจะนำผิวทางปรับปรุงเดิม (หินคลุก + ผิวทางแอสฟัลต์ที่เคยได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มาแล้ว) มาปรับปรุงขนาดกะโดยผสมกับหินฝุ่น (Lime Stone) ในอัตราส่วนร้อยละ 5,10,15,20 ตามลำดับ แล้วนำมาบดอัดและผสมด้วยปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นผิวทางเชื่อมประสาน (Bound pavement) ในอัตราส่วนร้อยละ 3.5 ผลทดสอบทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาความแตกต่างของการรับกำลังอัดของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงขนาดกะในอัตราส่วนต่างๆ ต่อกำลังอัดของหินคลุก , ผิวทางเดิมที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 3.5% เช่นเดียวกัน

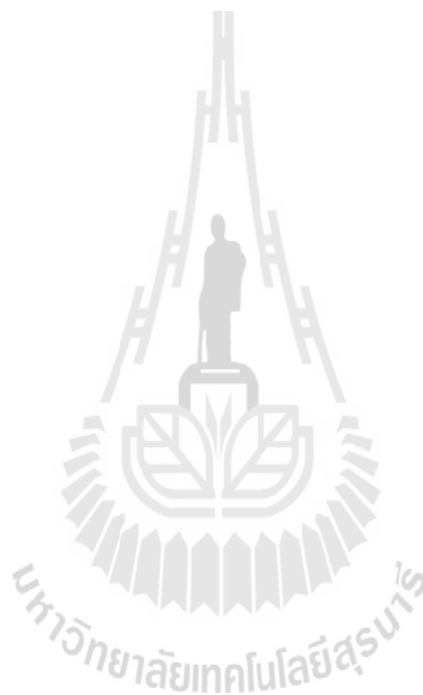
#### 3.2 แผนงานดำเนินการ

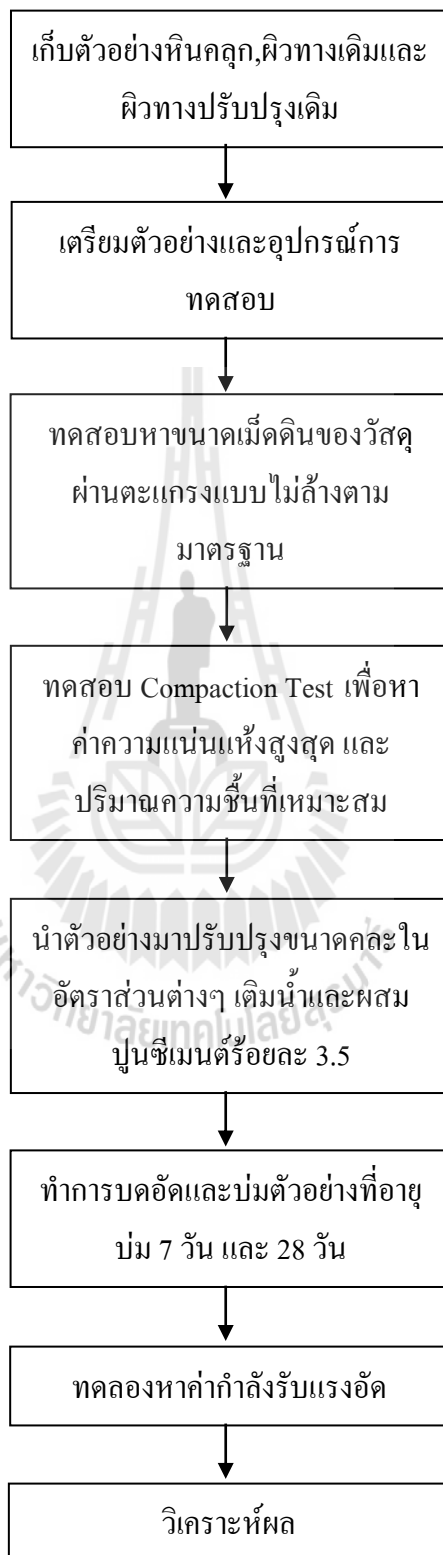
งานวิจัยนี้ประกอบด้วยทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและกำลังอัดของหินคลุก , ผิวทางเดิม และผิวทางปรับปรุงเดิม การทดสอบดำเนินการที่ สำนักงานทางหลวงที่ 9 (ลพบุรี) กรมทางหลวง รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3 ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

นำหินคลุก, ผิวทางเดิมและผิวทางปรับปรุงเดิมจากสายทางมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและการบดอัด และถูกนำมาปรับปรุงขนาดกะในอัตราส่วนที่กำหนดและผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว มาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงแสดงดังนี้

- การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้างตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.ท.204/2516
- การทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.ท.108/2517
- การทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.ท.105/2515





รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานวิจัย

## บทที่ 4

### การศึกษาผลทดลองและการวิจารณ์ผล

#### 4.1 บทนำ

การซ่อมบำรุงโครงสร้างทางด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่บนผิวทางที่ชำรุดได้รับการยอมรับและทำกันอย่างแพร่หลายในโครงการซ่อมบำรุงของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท หลังจากใช้งานมาระยะเวลาหนึ่ง ถนนที่ได้รับการซ่อมบำรุงด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เกิดการชำรุดเสียหายและจำเป็นต้องได้รับการซ่อมบำรุงอีกครั้ง วิธีการหนึ่งที่กรมทางหลวงนิยมใช้ในการซ่อมบำรุงผิวทางที่ชำรุดนี้คือวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ครั้งที่สอง ซึ่งขุดลอกผิวทางปรับปรุง (ซึ่งเป็นส่วนผสมของผิวแอสฟัลต์และผิวทางซีเมนต์) และผสมเข้ากับปูนซีเมนต์และบดอัด แม้ว่าจะมีการใช้งานจริงแล้ว แต่ยังไม่มีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนากำลังอัดของผิวทางที่ได้รับการปรับปรุงครั้งที่สอง งานวิจัยนี้จึงจะศึกษาการพัฒนากำลังอัดในห้องปฏิบัติการของผิวทางเดิม (เคยได้รับการปรับปรุงแล้ว) ด้วยวิธีการหมุนเวียนชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ครั้งที่สอง และเปรียบเทียบกับการพัฒนากำลังอัดของหินคลุกใหม่ผสมปูนซีเมนต์บดอัด หินคลุกใหม่ผสมผิวทางแอสฟัลต์และผสมปูนซีเมนต์บดอัด และผิวทางเดิม (ตัวอย่างในสนาม) ผสมหินฝุ่นและผสมปูนซีเมนต์บดอัด ผลการศึกษาตัวอย่างหินคลุกใหม่ผสมผิวทางแอสฟัลต์และผสมปูนซีเมนต์บดอัดจะใช้เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของผิวทางแอสฟัลต์ต่อการพัฒนากำลังอัด ตัวอย่างผิวทางเดิมผสมหินฝุ่นและผสมปูนซีเมนต์บดอัดจะใช้เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณหินฝุ่นต่อการพัฒนากำลังอัด ผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับโครงการที่จำเป็นต้องทำการปรับปรุงด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เป็นครั้งที่สอง บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาที่คุณสมบัติพื้นฐานและการพัฒนากำลังอัดของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ทั้งสี่ประเภท (หินคลุกใหม่, หินคลุกใหม่ + แอสฟัลต์เก่า, ผิวทางเดิม (หินคลุก + แอสฟัลต์เก่า), และผิวทางเดิม + หินฝุ่น)

#### 4.2 วัสดุและวิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ

##### 4.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่นำมาทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นตัวอย่างหินคลุกใหม่, หินคลุกใหม่ + ผิวทางแอสฟัลต์เก่า ผิวทางเดิม (ตัวอย่างที่เก็บในสนาม) และผิวทางเดิมผสมหินฝุ่น จะถูกทุบและย่อยจนมีขนาดละตามเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวงแล้วนำมาผสมกับหินฝุ่น (Lime Stone) ในอัตราส่วนการแทนที่ (Replacement) ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 และผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 3.5

แล้วนำมาบดอัด เพื่อใช้เป็นผิวทางเชื่อมประสาน (Bound pavement) รูปที่ 4.1 แสดงการเก็บตัวอย่างหินคลุกใหม่และหินฝุ่น จากโรงโม่ หจก. เขาพระงามคอนสตรัคชั่น และการเก็บตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์เก่าและผิวทางเดิม จากทางหลวงหมายเลข 3017 ตอน แยกทางหลวงหมายเลข 1 - บรรจบทางหลวงหมายเลข 21 อ.เมือง จังหวัดลพบุรี รูปที่ 4.2 แสดงการเตรียมตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ



ก) ตัวอย่างหินคลุกและหินฝุ่น



ข) ตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์เก่าและผิวทางเดิมที่ชำรุด

รูปที่ 4.1 การเก็บตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4.2 การเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ

#### 4.2.2 วิธีการทดลอง

ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดถูกนำมาทำการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้างตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท.204/2516 จากนั้น ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำมาบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108/2517 และจะถูกนำมาทดลองหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.105/2515

#### 4.3 ผลทดสอบและวิเคราะห์ผลทดสอบ

ตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด (หินคลุกใหม่, หินคลุกใหม่ + แอสฟัลต์, ผิวนางเดิม และผิวนางเดิม + หินฝุ่น) ผสมปูนซีเมนต์บดอัด ซึ่งประกอบด้วยการกระจายขนาดของเม็ดดิน ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

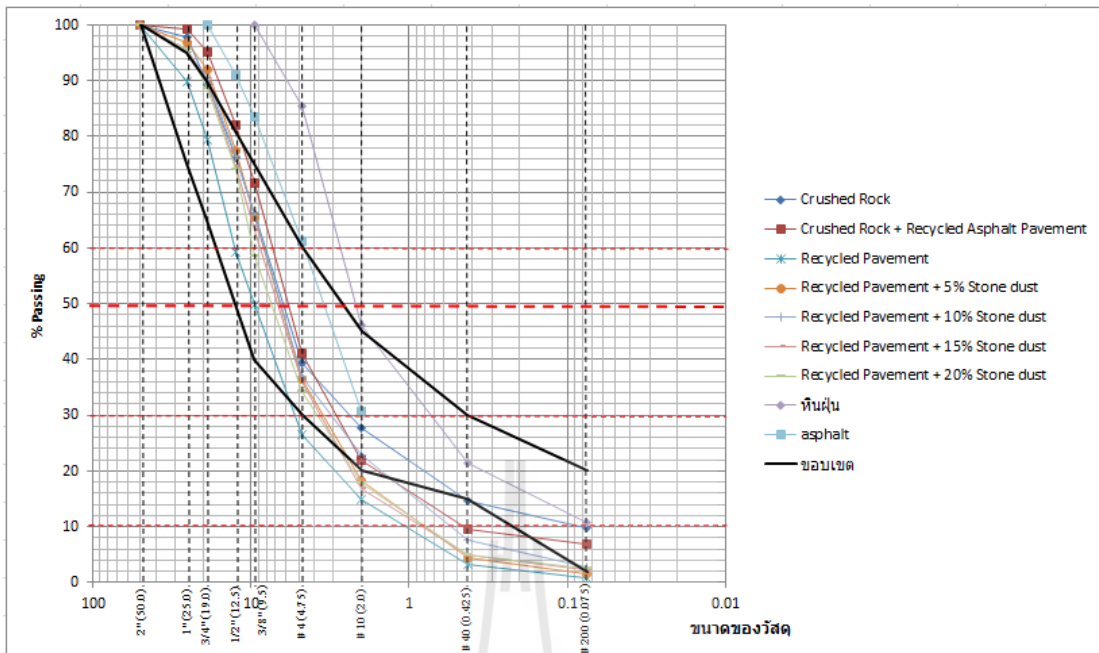




ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบการบดอัด และกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุชนิดต่างๆ ผสมปูนซีเมนต์

ร้อยละ 3.5

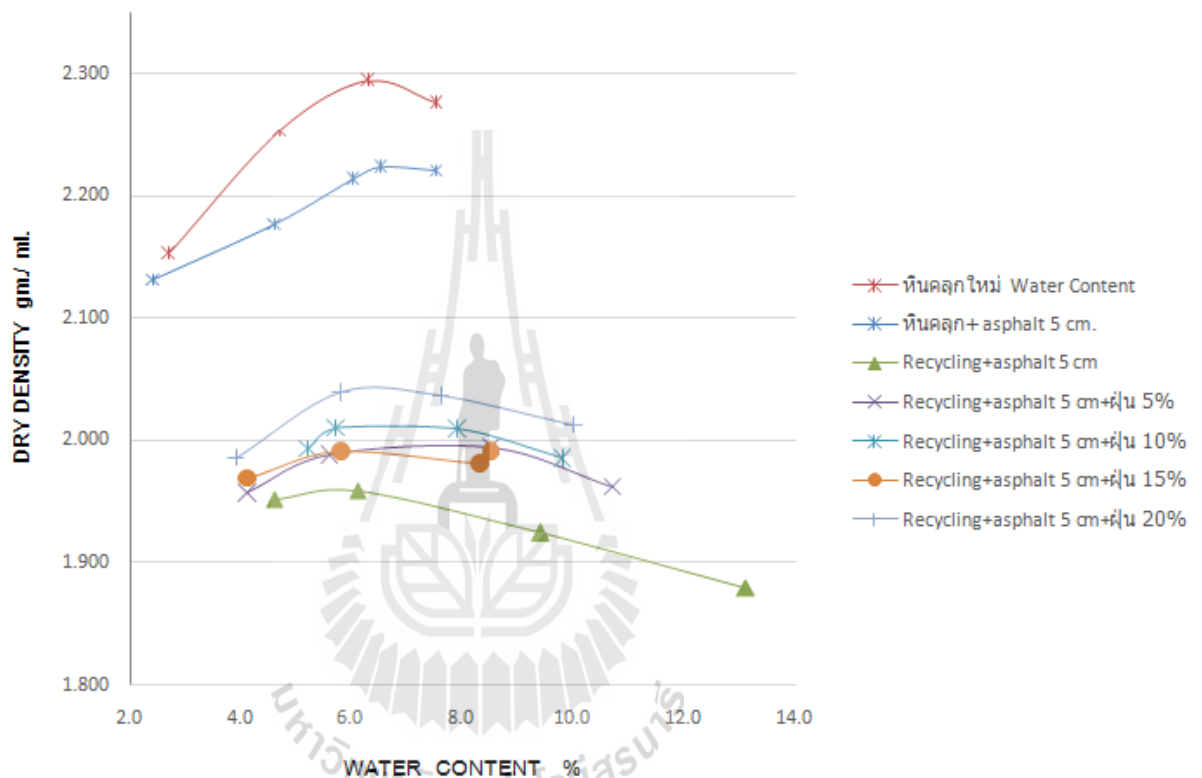
ITEM การทดลอง		หินคลุก ใหม่	หินคลุก ใหม่+ Asphalt 5 cm.	หินคลุก เดิม+ Asphalt 5 cm.	หินคลุก เดิม+ Asphalt 5 cm.+ หินฝุ่น 5 %	หินคลุก เดิม+ Asphalt 5 cm.+ หินฝุ่น 10 %	หินคลุก เดิม+ Asphalt 5 cm.+ หินฝุ่น 15 %	หินคลุก เดิม+ Asphalt 5 cm.+ หินฝุ่น 20 %
Proctor	Optimum Moisture Content (%)	6.5	7.0	6.3	7.2	6.6	6.7	7.3
	Maximum Dry Density (g./cc.)	2.295	2.225	1.960	1.999	2.022	1.994	2.042
UCS. (ksc.)	7 วัน	46.9	30.2	12.5	20.7	20.7	26.0	25.0
	28 วัน	50.1	32.4	14.0	22.2	23.7	26.3	26.8



รูปที่ 4.3 กราฟการกระจายขนาดเม็ดดินของหินคลุกใหม่ หินคลุกใหม่ + แอสฟัลต์เก่า ผิวทางเดิมและผิวทางเดิม + หินฝุ่น เปรียบเทียบกับการกระจายขนาดมาตรฐานของกรมทางหลวง

รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายขนาดเม็ดดินของหินคลุก หินคลุก + แอสฟัลต์ ผิวทางเดิมและผิวทางเดิม + หินฝุ่น เปรียบเทียบกับการกระจายขนาดมาตรฐานของกรมทางหลวง จะเห็นได้ว่าการผสมผิวทางแอสฟัลต์ลงในหินคลุกใหม่ทำให้เม็ดดินขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร (ตะแกรงเบอร์ 4) มีปริมาณลดลง ขณะที่ เม็ดดินขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของแอสฟัลต์มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของหินคลุก เมื่อเปรียบเทียบการกระจายขนาดของเม็ดดินระหว่างหินคลุก + แอสฟัลต์ กับผิวทางเดิม (ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างหินคลุกเก่า + แอสฟัลต์เก่า) จะเห็นได้ว่าผิวทางเดิมมีอนุภาคที่ใหญ่กว่าหินคลุกใหม่ + แอสฟัลต์ อย่างเห็นได้ชัด อนุภาคที่ใหญ่ของผิวทางเดิมเป็นผลจากมอร์ต้าที่ติดกับอนุภาคของวัสดุ การเติมหินฝุ่นในผิวทางเดิมทำให้อนุภาคของเม็ดดินมีขนาดเล็กลง ดังจะเห็นได้จากขนาดเฉลี่ยของผิวทางเดิมมีค่าเท่ากับ 9.6 มิลลิเมตร ขณะที่ ขนาดเฉลี่ยของผิวทางเดิม + หินฝุ่น มีค่าเท่ากับ 6.6, 6.5, 6.7 และ 7.5 มิลลิเมตร สำหรับปริมาณหินฝุ่นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ตามลำดับ การแทนที่หินฝุ่นในปริมาณที่เกินกว่าร้อยละ 5 มีส่วนช่วยลดขนาดของอนุภาคไม่มากนัก การแทนที่หินฝุ่นทำให้การกระจายขนาดของผิวทางเดิมเข้าใกล้ขอบเขตการกระจายขนาดของเม็ดดินตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

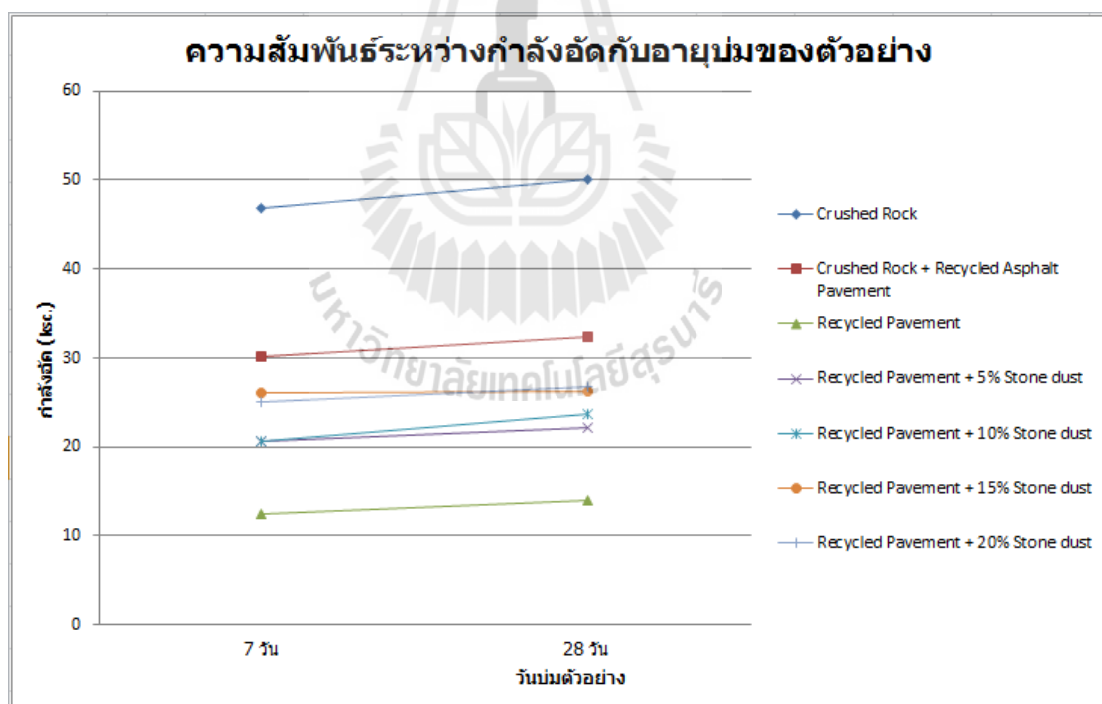
รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของหินคลุก หินคลุก + แอสฟัลต์เก่า ผิวทางเดิม หินคลุกเดิม + หินฝุ่น จะเห็นได้ว่าการเติมแอสฟัลต์ลงในหินคลุกมีผลให้หน่วยน้ำหนักแห้งลดลง แต่ปริมาณความชื้นเหมาะสมยังคงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง การเติมหินฝุ่นลงในผิวทางเดิมช่วยปรับปรุงขนาดกะ และส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนละเอียดของหินฝุ่นเข้าไปช่วยลดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์

รูปที่ 4.5 แสดงค่ากำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกผสมปูนซีเมนต์ หินคลุก + แอสฟัลต์ผสมปูนซีเมนต์ ผิวทางเดิมผสมปูนซีเมนต์ และผิวทางเดิม + หินฝุ่น ผสมปูนซีเมนต์ ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าในปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน (ร้อยละ 3.5) หินคลุกผสมปูนซีเมนต์มีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงที่สุด การเติมแอสฟัลต์ลงในหินคลุกมีผลให้กำลังอัดลดน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากแอสฟัลต์มีส่วนผสมของยาง Bitumen ซึ่งทำให้พันธะเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินและปูนซีเมนต์ลดลง หินคลุก + แอสฟัลต์ ผสมปูนซีเมนต์มีค่ากำลังอัดสูงกว่าผิวทางเดิมผสมปูนซีเมนต์อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเนื่องจากเศษมอร์ต้าที่ติดอยู่ที่ผิวของตัวอย่างผิวทางเดิมมีการแตกร้าวเนื่องจากการบดหรือ ส่งผลให้เป็นจุดอ่อนแอ (Weak point) ของวัสดุ การแทนที่หินฝุ่นในส่วนผสมหินคลุกเดิม +

แอสฟัลต์ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความแน่น ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.4 เท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มกำลังอัดด้วย การเติมหินฝุ่นในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 ช่วยเพิ่มกำลังอัดในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 12 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็น 21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเติมหินฝุ่นร้อยละ 5 และ 10 การเพิ่มปริมาณหินฝุ่นเป็นร้อยละ 15 ช่วยเพิ่มกำลังอัดที่ 7 วัน จาก 12 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็น 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ซึ่งกำลังอัดมีค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มหินฝุ่นเกินกว่าร้อยละ 15 แทนไม่ผลต่อการพัฒนากำลังอัด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ปริมาณหินฝุ่นที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 15 ผลการศึกษาการพัฒนากำลังอัดกับเวลาแสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสี่ชนิด (หินคลุก หินคลุก + แอสฟัลต์ ผิวทางเดิม และผิวทางเดิม + หินฝุ่น) มีพฤติกรรมการพัฒนา กำลังอัดที่คล้ายกัน โดยมีอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดที่ 28 ต่อกำลังอัดที่ 7 วัน ประมาณ 1.07 ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าหินฝุ่นช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล (ทำให้วัสดุมีความแน่นขึ้น) แต่แทนไม่ได้ช่วยปรับปรุงปฏิกิริยาทางไฮเดรชัน (ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ)



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลอง Unconfined Compressive Strength ของวัสดุชนิดต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้ผิวทางเดิมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธีการหมุนเวียนผิวทางเดิมมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 เป็นวัสดุมวลรวมหยาบในการทำผิวทางเชื่อมประสาน (Bound pavement) กำลังอัดของผิวทางเดิมผสมปูนซีเมนต์บดอัดถูกนำมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดของหินคลุกผสมปูนซีเมนต์บดอัด, หินคลุก + แอสฟัลต์ ผสมปูนซีเมนต์บดอัด และผิวทางเดิม + หินฝุ่น ผสมปูนซีเมนต์บดอัด เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของแอสฟัลต์และหินฝุ่นต่อการพัฒนา กำลังอัด บทสรุปที่สำคัญของงานวิจัยแสดงได้ดังนี้

1. ผิวแอสฟัลต์ที่อยู่ในผิวทางเดิมมีผลให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากน้ำยาง bitumen ลดพันธะเชื่อมประสานระหว่างปูนซีเมนต์และตัวอย่างผิวทางเดิม ดังนั้น ผิวทางที่มีส่วนผสมของแอสฟัลต์เดิมมากจะมีกำลังอัดต่ำ ดังจะเห็นได้ว่ากำลังอัดของหินคลุกผสมปูนซีเมนต์บดอัดมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของหินคลุกผสมแอสฟัลต์และปูนซีเมนต์บดอัด
2. ในปริมาณปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์ที่เท่ากัน ผิวทางเดิมผสมปูนซีเมนต์บดอัดมีขนาดอนุภาคใหญ่หินคลุกผสมแอสฟัลต์ ซึ่งเป็นผลมาจากมอร์ต้าที่ติดที่อนุภาคของตัวอย่าง แต่ด้วยกำลังอัดที่ต่ำของมอร์ต้า ผิวทางเดิมผสมปูนซีเมนต์บดอัดจึงมีกำลังอัดต่ำกว่ากำลังอัดของหินคลุกผสมแอสฟัลต์
3. หินฝุ่นช่วยปรับปรุงขนาดคละของตัวอย่างผิวทางเดิม ดังจะเห็นจะได้ว่าตัวอย่างผิวทางเดิมมีขนาดอนุภาคใหญ่ลดลงแต่มีขนาดอนุภาคเล็กเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ผิวทางเดิมมีการกระจายขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับมาตรฐานกรมทางหลวง ดังนั้น ที่ปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่มเดียวกัน ตัวอย่างผิวทางเดิมผสมหินฝุ่นมีหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดสูงกว่าผิวทางเดิม เนื่องจากส่วนละเอียดของหินฝุ่นช่วยลดช่องว่างของวัสดุ อัตราส่วนแทนที่หินฝุ่นที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 15 สำหรับทั้งอายุบ่ม 7 และ 28 วัน การปรับปรุงผิวทางเดิมด้วยหินฝุ่นดังแสดงในงานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ทั้งในเชิงวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม
4. การพัฒนา กำลังอัดกับเวลาของหินคลุกผสมปูนซีเมนต์บดอัด หินคลุกผสมแอสฟัลต์ และปูนซีเมนต์บดอัด ผิวทางเดิมผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์บดอัด มีความคล้ายคลึงกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าการแทนที่ด้วยหินฝุ่นแทนไม่ได้ช่วยปรับปรุงปฏิกิริยาทางเคมี

## 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.
- กรมทางหลวง. (2539). **มาตรฐานงานทาง Standard for highway construction.** เล่มที่ 1 พิมพ์ครั้งที่ 1 ที่ 1 กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. (2543). **มาตรฐานวิธีการทดลอง Standard test methods.** เล่มที่ 1 พิมพ์ครั้งที่ 1 กระทรวงคมนาคม
- ชูศักดิ์ กิรีรัตน์. (2554). **ทฤษฎีบดอัดดิน.** ปลูกพืชศาสตร์ (พิมพ์ครั้งที่ 1). หน้า 738 – 743.
- รุ่งลาวัลย์ ราชัน และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2548). **เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลการทดสอบ และการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน.** ปลูกพืชศาสตร์. หน้า 248.
- วรรณพงษ์ คล่องแคล่ว. (2553). **การศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับอายุวัสดุที่ใช้ในการบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์ โดยวิธี Pavement In – Place Recycling.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อรสา เคยยัง. (2556). **การพัฒนากำลังอัดของวัสดุผิวทางรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.



ภาคผนวก ก  
ตารางทดสอบคุณภาพวัสดุ

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของ  
หินคลุกใหม่

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing	% Passing	Total Passing
2"	-	11985	X	100
1"	259	11726		97.8
3/4"	1012	10714		89.4
1/2"	1581	9133		76.2
3/8"	1209	7924		66.1
#4	3201	4723		39.4
Pan	4723			
Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		% Passing
#4	-	526	100	39.4
#10	156	370	70.3	27.7
#40	175.7	194.3	36.9	14.6
#200	63.8	130.5	24.8	9.8
Pan	130.5			

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของ  
หินคลุกใหม่+Asphalt 5 cm.

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing	% Passing	Total Passing
2"	-	11992	X	100
1"	83	11909		99.3
3/4"	517	11392		95.0
1/2"	1562	9830		82.0
3/8"	1258	8572		71.5
#4	3660	4913		41.0
Pan	4912			
Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		% Passing
#4	-	531	100	41.0
#10	246.2	284.8	53.6	22.0



ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		% Passing
#40	162.4	122.4	23.1	9.4
#200	32.9	89.5	16.9	6.9
Pan	89.5			

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของ  
หินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing	% Passing	Total Passing
2"	-	11927	X	100
1"	1211	10716		89.8
3/4"	1252	9464		79.3
1/2"	2386	7078		59.3
3/8"	1155	5923		49.7
#4	2753	3170		26.6
Pan	3170			
Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		% Passing
#4	-	536	100	26.6
#10	238.1	297.9	55.6	14.8
#40	230.5	67.4	12.6	3.3
#200	52.8	14.6	2.7	0.7
Pan	14.6			

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของ  
หินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 5 %

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing	% Passing	Total Passing
2"	-	11895	X	100
1"	382	11513		96.8
3/4"	586	10927		91.9
1/2"	1723	9204		77.4
3/8"	1413	7791		65.5
#4	3455	4336		36.5
Pan	4336			
Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		% Passing
#4	-	515	100	36.5
#10	258.4	256.6	49.8	18.2
#40	193.6	63.0	12.2	4.5
#200	42.8	20.2	3.9	1.4
Pan	20.2			

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของ  
หินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 10 %

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing	% Passing	Total Passing
2"	-	11758	X	100
1"	573	11185		95.1
3/4"	529	10656		90.6
1/2"	1658	8998		76.5
3/8"	1274	7724		65.7
#4	3388	4336		36.9
Pan	4336			
Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		% Passing
#4	-	523	100	36.9
#10	197.9	325.1	62.2	22.9

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		% Passing
#40	218.8	106.3	20.3	7.5
#200	66.5	39.8	7.6	2.8
Pan	39.8			

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของ  
หินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 15 %

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing	% Passing	Total Passing
2"	-	12010	X	100
1"	519	11491		95.7
3/4"	742	10749		89.5
1/2"	1795	8954		74.6
3/8"	1388	7566		63.0
#4	3243	4323		36.0
Pan	4323			
Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		% Passing
#4	-	518	100	36.0
#10	274.7	243.3	47.0	16.9
#40	173.8	69.5	13.4	4.8
#200	38.2	31.3	6.0	2.2
Pan	31.3			

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของ  
หินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 20 %

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing	% Passing	Total Passing
2"	-	12696	X	100
1"	567	12129		95.5
3/4"	890	11239		88.5
1/2"	1833	9406		74.1
3/8"	1966	7440		58.6
#4	3099	4341		34.2
Pan	4341			
Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		
#4	-	517	100	34.2
#10	247.2	269.8	52.2	17.8
#40	195.7	74.1	14.3	4.9
#200	38.3	35.8	6.9	2.4
Pan	35.8			

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของ  
หินฝุ่น

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing	% Passing	Total Passing
2"	-	3253	X	100
1"	0	3253		100
3/4"	0	3253		100
1/2"	0	3253		100
3/8"	0	3253		100
#4	0	3012		85.5
Pan	3012			
Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		
#4	-	514	100	85.5
#10	237.0	277.0	53.9	46.1

ตารางที่ ก.8 (ต่อ)

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		% Passing
#40	148.0	129.0	25.1	21.5
#200	64.2	64.8	12.6	10.8
Pan	64.8			

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบ SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES ของ  
หิน Asphalt

Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing	% Passing	Total Passing
2"	-	4152	X	100
1"	0	4152		100
3/4"	0	4152		100
1/2"	370	3782		91.1
3/8"	315	3467		83.5
#4	926	2541		61.2
Pan	2541			
Sieve No.	Wt. Retained	Wt. Passing		% Passing
#4	-	524	100	61.2
#10	263.0	261.0	49.8	30.5
#40	261.0	0.0	0.0	0.0
#200	0.0	0.0	0.0	0.0
Pan	0.0			

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกใหม่

DENSITY

Trial (water added)	(%)	2	4	6	8
Wt. Mold+Soil	(Kg.)	3.940	4.084	4.159	4.174
Wt. Mold	(Kg.)	1.829	1.829	1.829	1.829
Wt. Soil	(Kg.)	2.111	2.255	2.330	2.345
Wet Density	(g./cc.)	2.209	2.360	2.438	2.454
Dry Density	(g./cc.)	2.152	2.253	2.294	2.276

WATER CONTENT

Can No.		1	22	18	8
Wt. Can + Wet Soil	(g.)	359.5	355.8	355.2	480.9
Can + Dry Soil	(g.)	350.6	340.5	335.1	447.3
Wt. Water	(g.)	8.9	15.3	20.1	33.6
Wt. Can	(g.)	17.6	17.3	15.7	17.1
Wt. Dry Soil	(g.)	333.0	323.2	319.4	430.2
Water Content	(%)	2.7	4.7	6.3	7.8

100 % Mod. Comp. = 2.295 g./cc.      95 % Mod.. Comp. = 2. 180 g./cc.      O.M.C = 6.5 %

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกใหม่+Asphalt 5 cm.

DENSITY

Trial (water added)	(%)	2	4	6	8
Wt. Mold+Soil	(Kg.)	3.916	4.004	4.070	4.092
Wt. Mold	(Kg.)	1.829	1.829	1.829	1.829
Wt. Soil	(Kg.)	2.087	2.175	2.241	2.263
Wet Density	(g./cc.)	2.184	2.276	2.345	2.368
Dry Density	(g./cc.)	2.132	2.177	2.213	2.223

ตารางที่ ก.11 (ต่อ)

WATER CONTENT

Can No.		1	22	18	8
Wt. Can + Wet Soil	(g.)	399.0	341.1	373.4	455.5
Can + Dry Soil	(g.)	389.9	327.0	353.3	428.7
Wt. Water	(g.)	9.1	14.1	20.1	26.8
Wt. Can	(g.)	17.5	18.0	16.8	17.6
Wt. Dry Soil	(g.)	372.4	309.0	336.5	411.1
Water Content	(%)	2.4	4.6	6.0	6.5

100 % Mod. Comp. = 2.225 g./cc.      95 % Mod.. Comp. = 2.114 g./cc.      O.M.C = 7.0 %

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.

DENSITY

Trial (water added)	(%)	2	4	6	8
Wt. Mold+Soil	(Kg.)	3.780	3.815	3.841	3.861
Wt. Mold	(Kg.)	1.829	1.829	1.829	1.829
Wt. Soil	(Kg.)	1.951	1.986	2.012	2.032
Wet Density	(g./cc.)	2.042	2.078	2.105	2.126
Dry Density	(g./cc.)	1.952	1.959	2.924	1.880

WATER CONTENT

Can No.		1	22	18	8
Wt. Can + Wet Soil	(g.)	391.9	345.5	365.0	392.8
Can + Dry Soil	(g.)	375.4	326.8	335.1	349.4
Wt. Water	(g.)	16.5	18.7	29.9	43.4
Wt. Can	(g.)	17.5	18.4	17.7	18.4
Wt. Dry Soil	(g.)	357.9	308.4	317.4	331.0
Water Content	(%)	4.6	6.1	9.4	13.1

100 % Mod. Comp. = 1.960 g./cc.      95 % Mod.. Comp. = 1.862 g./cc.      O.M.C = 6.3 %

ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 5%

DENSITY

Trial (water added)	(%)	2	4	6	8
Wt. Mold+Soil	(Kg.)	3.777	3.835	3.896	3.904
Wt. Mold	(Kg.)	1.829	1.829	1.829	1.829
Wt. Soil	(Kg.)	1.948	2.006	2.067	2.075
Wet Density	(g./cc.)	2.039	2.099	2.163	2.171
Dry Density	(g./cc.)	1.957	1.988	1.994	1.962

WATER CONTENT

Can No.		1	22	18	8
Wt. Can + Wet Soil	(g.)	374.6	364.4	390.6	392.9
Can + Dry Soil	(g.)	360.4	346.1	361.5	356.8
Wt. Water	(g.)	14.2	18.3	29.1	36.1
Wt. Can	(g.)	18.1	17.4	17.8	18.0
Wt. Dry Soil	(g.)	342.3	328.7	343.7	338.8
Water Content	(%)	4.1	5.6	8.5	10.7

100 % Mod. Comp. = 1.999 g./cc.      95 % Mod.. Comp. = 1.899 g./cc.      O.M.C = 7.2 %

ตารางที่ ก.14 ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น

10%

DENSITY

Trial (water added)	(%)	2	4	6	8
Wt. Mold+Soil	(Kg.)	3.832	3.859	3.900	3.913
Wt. Mold	(Kg.)	1.829	1.829	1.829	1.829
Wt. Soil	(Kg.)	2.003	2.030	2.071	2.084
Wet Density	(g./cc.)	2.096	2.124	2.167	2.181
Dry Density	(g./cc.)	1.993	2.010	2.009	1.985



ตารางที่ ก.14 (ต่อ)

WATER CONTENT

Can No.		1	22	18	8
Wt. Can + Wet Soil	(g.)	378.8	362.6	399.1	410.5
Can + Dry Soil	(g.)	361.0	344.1	371.3	375.3
Wt. Water	(g.)	17.8	18.5	27.8	35.2
Wt. Can	(g.)	17.4	17.6	17.5	17.5
Wt. Dry Soil	(g.)	343.6	326.5	353.8	357.8
Water Content	(%)	5.2	5.7	7.9	9.8

100 % Mod. Comp. = 2.022 gm./ml.    95 % Mod.. Comp. = 1.921 gm./ml.    O.M.C = 6.6 %

ตารางที่ ก.15 ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น

15%

DENSITY

Trial (water added)	(%)	2	4	6	8
Wt. Mold+Soil	(Kg.)	3.788	3.842	3.880	3.893
Wt. Mold	(Kg.)	1.829	1.829	1.829	1.829
Wt. Soil	(Kg.)	1.959	2.013	2.051	2.064
Wet Density	(g./cc.)	2.050	2.107	2.146	2.160
Dry Density	(g./cc.)	1.969	1.991	1.981	1.991

WATER CONTENT

Can No.		1	22	18	8
Wt. Can + Wet Soil	(g.)	389.3	384.2	387.0	418.7
Can + Dry Soil	(g.)	374.7	364.2	358.6	387.4
Wt. Water	(g.)	14.6	20.0	28.4	31.3
Wt. Can	(g.)	17.8	18.5	17.6	18.4
Wt. Dry Soil	(g.)	356.9	345.7	341.0	369.0
Water Content	(%)	4.1	5.8	8.3	8.5

100 % Mod. Comp. = 1.994 g./cc.    95 % Mod.. Comp. = 1.894 g./cc.    O.M.C = 6.7 %

ตารางที่ ก.16 ผลการทดสอบ COMPACTION TEST ของหินคลุกเดิม+Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น  
20%

DENSITY

Trial (water added)	(%)	2	4	6	8
Wt. Mold+Soil	(Kg.)	3.801	3.890	3.922	3.945
Wt. Mold	(Kg.)	1.829	1.829	1.829	1.829
Wt. Soil	(Kg.)	1.972	2.061	2.093	2.116
Wet Density	(g./cc.)	2.064	2.157	2.190	2.214
Dry Density	(g./cc.)	1.986	2.039	2.036	2.013

WATER CONTENT

Can No.		1	22	18	8
Wt. Can + Wet Soil	(g.)	380.2	372.5	426.3	428.8
Can + Dry Soil	(g.)	366.5	353.1	397.5	391.3
Wt. Water	(g.)	13.7	19.4	28.8	37.5
Wt. Can	(g.)	17.2	17.9	17.4	17.2
Wt. Dry Soil	(g.)	349.3	335.2	380.1	374.1
Water Content	(%)	3.9	5.8	7.6	10.0

100 % Mod. Comp. = 2.042 g./cc.      95 % Mod.. Comp. = 1.940 g./cc.      O.M.C = 7.3 %

ภาคผนวก ข

ตาราง UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH



ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบ UNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกใหม่

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6
Wt. of Sample (Kg.)	2.297	2.304	2.299	2.307	2.305	2.304
Wet Density (g./cc.)	2.404	2.411	2.406	2.414	2.412	2.411
Dry Density (g./cc.)	2.272	2.278	2.266	2.278	2.281	2.280
	<b>Avg. 7 d. = 2.272</b>			<b>Avg. 28 d. = 2.280</b>		

WATER CONTENT

Can No.	30	A7	18	A9	A10	A6
Wt. Can + Wet Soil (g.)	341.0	339.6	324.7	344.9	360.5	365.1
Can + Dry Soil (g.)	323.3	321.9	306.8	326.4	342.0	346.2
Wt. Water (g.)	17.7	17.7	17.9	18.5	18.5	18.9
Wt. Can (g.)	16.8	18.0	15.7	17.0	19.0	17.2
Wt. Dry Soil (g.)	306.5	303.9	291.1	309.4	323.0	329.0
Water Content (%)	5.8	5.8	6.1	6.0	5.7	5.7
	<b>Avg. 7 d. = 5.9</b>			<b>Avg. 28 d. = 5.8</b>		

UNCONFINED COMPRESSION

$$\text{Load} = \text{Dial Reading} \times 19.5062 + (15) \text{ Lbs.}$$

Sample No.	Dial Reading	Ultimate Load		U.C.S. (Ksc.)
		Lbs.	Kg.	
1	480	9378	4255	53.1
2	365	7135	3237	40.4
3	427	8344	3786	47.3
		<b>Average U.C.S. 7 d. =</b>		<b>46.9</b>
4	407	7954	3609	45.1
5	505	9866	4476	55.9
6	445	8695	3945	49.3
		<b>Average U.C.S. 28 d. =</b>		<b>50.1</b>

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบ UNCONIFIED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกใหม่+  
Asphalt 5 cm.

## DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6
Wt. of Sample (Kg.)	2.163	2.190	2.256	2.242	2.249	2.242
Wet Density (g./cc.)	2.263	2.292	2.361	2.346	2.353	2.346
Dry Density (g./cc.)	2.127	2.166	2.222	2.209	2.213	2.209
	<b>Avg. 7 d. = 2.172</b>			<b>Avg. 28 d. = 2.210</b>		

## WATER CONTENT

Can No.	5	22	6	12	4	9
Wt. Can + Wet Soil (g.)	366.4	369.7	346.3	365.2	387.8	340.2
Can + Dry Soil (g.)	345.4	350.3	327.0	344.8	365.7	321.4
Wt. Water (g.)	21.0	19.4	19.3	20.4	22.1	18.8
Wt. Can (g.)	17.9	17.2	17.9	17.2	17.5	17.5
Wt. Dry Soil (g.)	327.5	333.1	309.1	327.6	348.2	303.9
Water Content (%)	6.4	5.8	6.2	6.2	6.3	6.2
	<b>Avg. 7 d. = 6.2</b>			<b>Avg. 28 d. = 6.3</b>		

UNCONFINED COMPRESSION Load = Dial Reading X 19.5062 + (15) Lbs.

Sample No.	Dial Reading	Ultimate Load		U.C.S. (Ksc.)
		Lbs.	Kg.	
1	253	4950	2246	28.0
2	277	5418	2458	30.7
3	288	5633	2556	31.9
		<b>Average U.C.S. 7 d. =</b>		<b>30.2</b>
4	315	6159	2795	34.9
5	295	5769	2618	32.7
6	268	5243	2379	29.7
		<b>Average U.C.S. 28 d. =</b>		<b>32.4</b>

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบ UNCONIFIED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกเดิม+ Asphalt 5 cm.

## DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6
Wt. of Sample (Kg.)	1.998	1.927	1.946	1.924	1.964	1.932
Wet Density (g./cc.)	2.091	2.017	2.036	2.013	2.055	2.022
Dry Density (g./cc.)	1.991	1.917	1.932	1.908	1.961	1.919
	<b>Avg. 7 d. = 1.947</b>			<b>Avg. 28 d. = 1.929</b>		

## WATER CONTENT

Can No.	11	A7	A10	18	A6	A9
Wt. Can + Wet Soil (g.)	355.5	316.9	343.0	346.5	345.9	343.0
Can + Dry Soil (g.)	339.4	302.1	326.4	329.2	330.9	326.4
Wt. Water (g.)	16.1	14.8	16.6	17.3	15.0	16.6
Wt. Can (g.)	17.9	18.0	19.0	15.7	17.2	17.0
Wt. Dry Soil (g.)	321.5	284.1	307.4	313.5	313.7	309.4
Water Content (%)	5.0	5.2	5.4	5.5	4.8	5.4
	<b>Avg. 7 d. = 5.2</b>			<b>Avg. 28 d. = 5.2</b>		

UNCONFINED COMPRESSION Load = Dial Reading X 19.5062 + (15) Lbs.

Sample No.	Dial Reading	Ultimate Load		U.C.S. (Ksc.)
		Lbs.	Kg.	
1	75	1478	671	8.4
2	122	2395	1087	13.6
3	141	2765	1255	15.7
		<b>Average U.C.S. 7 d. =</b>		<b>12.5</b>
4	115	2258	1025	12.8
5	140	2746	1246	15.6
6	124	2434	1104	13.8
		<b>Average U.C.S. 28 d. =</b>		<b>14.0</b>

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบ UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกเดิม+ Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 5 %

## DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6
Wt. of Sample (Kg.)	2.003	2.015	2.017	2.012	2.021	1.996
Wet Density (g./cc.)	2.096	2.109	2.111	2.105	2.115	2.089
Dry Density (g./cc.)	1.964	1.981	1.986	1.982	1.976	1.956
	<b>Avg. 7 d. = 1.977</b>			<b>Avg. 28 d. = 1.971</b>		

## WATER CONTENT

Can No.	1	30	10	7	3	2
Wt. Can + Wet Soil (g.)	350.6	301.8	406.1	340.3	347.0	347.7
Can + Dry Soil (g.)	329.7	284.6	383.3	321.2	325.3	326.7
Wt. Water (g.)	20.9	17.2	22.8	19.1	21.7	21.0
Wt. Can (g.)	17.9	18.0	19.0	15.7	17.2	17.0
Wt. Dry Soil (g.)	311.8	266.6	364.3	305.5	308.1	309.7
Water Content (%)	6.7	6.5	6.3	6.3	7.0	6.8
	<b>Avg. 7 d. = 6.5</b>			<b>Avg. 28 d. = 6.7</b>		

UNCONFINED COMPRESSION Load = Dial Reading X 19.5062 + (15) Lbs.

Sample No.	Dial Reading	Ultimate Load		U.C.S. (Ksc.)
		Lbs.	Kg.	
1	176	3448	1564	19.5
2	200	3916	1777	22.2
3	185	3624	1644	20.5
		<b>Average U.C.S. 7 d. =</b>		<b>20.7</b>
4	200	3916	1777	22.2
5	195	3819	1733	21.6
6	205	4014	1821	22.7
		<b>Average U.C.S. 28 d. =</b>		<b>22.2</b>

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบ UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกเดิม+ Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 10 %

## DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6
Wt. of Sample (Kg.)	1.991	1.993	1.994	2.049	1.973	1.995
Wet Density (g./cc.)	2.084	2.086	2.087	2.144	2.065	2.088
Dry Density (g./cc.)	1.981	1.977	1.977	2.038	1.957	1.979
	<b>Avg. 7 d. = 1.978</b>			<b>Avg. 28 d. = 1.991</b>		

## WATER CONTENT

Can No.	11	2	7	3	10	1
Wt. Can + Wet Soil (g.)	392.7	418.4	364.3	388.4	376.9	370.3
Can + Dry Soil (g.)	374.2	397.6	346.0	370.0	358.2	352.0
Wt. Water (g.)	18.5	20.8	18.3	18.4	18.7	18.3
Wt. Can (g.)	17.6	18.4	17.5	18.4	17.4	17.6
Wt. Dry Soil (g.)	356.6	379.2	328.5	351.6	340.8	334.4
Water Content (%)	5.2	5.5	5.6	5.2	5.5	5.5
	<b>Avg. 7 d. = 5.4</b>			<b>Avg. 28 d. = 5.4</b>		

UNCONFINED COMPRESSION Load = Dial Reading X 19.5062 + (15) Lbs.

Sample No.	Dial Reading	Ultimate Load		U.C.S. (Ksc.)
		Lbs.	Kg.	
1	168	3292	1494	18.7
2	204	3994	1812	22.6
3	188	3682	1671	20.9
		<b>Average U.C.S. 7 d. =</b>		<b>20.7</b>
4	192	3760	1706	21.3
5	205	4014	1821	22.7
6	243	4755	2157	26.9
		<b>Average U.C.S. 28 d. =</b>		<b>23.7</b>



ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบ UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกเดิม+ Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 15 %

## DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6
Wt. of Sample (Kg.)	1.997	2.016	2.020	1.997	2.039	2.019
Wet Density (g./cc.)	2.090	2.110	2.114	2.090	2.134	2.113
Dry Density (g./cc.)	1.978	2.001	1.996	1.981	2.018	2.002
	<b>Avg. 7 d. = 1.992</b>			<b>Avg. 28 d. = 2.000</b>		

## WATER CONTENT

Can No.	9	5	22	6	12	4
Wt. Can + Wet Soil (g.)	385.8	383.6	376.2	376.9	396.1	393.9
Can + Dry Soil (g.)	366.1	364.7	356.2	358.2	375.6	374.1
Wt. Water (g.)	19.7	18.9	20.0	18.7	20.5	19.8
Wt. Can (g.)	17.6	18.0	17.4	18.0	17.5	17.5
Wt. Dry Soil (g.)	348.5	346.7	338.8	340.2	358.1	356.6
Water Content (%)	5.7	5.5	5.9	5.5	5.7	5.6
	<b>Avg. 7 d. = 5.7</b>			<b>Avg. 28 d. = 5.6</b>		

UNCONFINED COMPRESSION Load = Dial Reading X 19.5062 + (15) Lbs.

Sample No.	Dial Reading	Ultimate Load		U.C.S. (Ksc.)
		Lbs.	Kg.	
1	235	4599	2087	26.1
2	263	5145	2334	29.1
3	206	4033	1830	22.8
		<b>Average U.C.S. 7 d. =</b>		<b>26.0</b>
4	231	4521	2051	25.6
5	227	4443	2016	25.2
6	254	4970	2255	28.2
		<b>Average U.C.S. 28 d. =</b>		<b>26.3</b>

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบ UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH ของหินคลุกเดิม+  
Asphalt 5 cm.+หินฝุ่น 20 %

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6
Wt. of Sample (Kg.)	1.998	2.025	1.999	2.032	2.014	2.018
Wet Density (g./cc.)	2.091	2.119	2.092	2.126	2.108	2.112
Dry Density (g./cc.)	1.988	2.012	1.981	2.015	2.007	2.003
	<b>Avg. 7 d. = 1.994</b>			<b>Avg. 28 d. = 2.008</b>		

WATER CONTENT

Can No.	30	A9	A6	18	A10	A7
Wt. Can + Wet Soil (g.)	352.4	350.0	347.0	341.9	356.4	357.0
Can + Dry Soil (g.)	335.9	333.2	329.5	324.8	340.2	339.6
Wt. Water (g.)	16.5	16.8	17.5	17.1	16.2	17.4
Wt. Can (g.)	16.9	17.1	17.3	15.7	17.0	18.0
Wt. Dry Soil (g.)	319.0	316.1	312.2	309.1	323.2	321.6
Water Content (%)	5.2	5.3	5.6	5.5	5.0	5.4
	<b>Avg. 7 d. = 5.4</b>			<b>Avg. 28 d. = 5.3</b>		

UNCONFINED COMPRESSION Load = Dial Reading X 19.5062 + (15) Lbs.

Sample No.	Dial Reading	Ultimate Load		U.C.S. (Ksc.)
		Lbs.	Kg.	
1	207	4053	1839	23.0
2	239	4677	2122	26.5
3	231	4521	2051	25.6
		<b>Average U.C.S. 7 d. =</b>		<b>25.0</b>
4	282	5516	2503	31.2
5	201	3936	1786	22.3
6	242	4736	2149	26.8
		<b>Average U.C.S. 28 d. =</b>		<b>26.8</b>

## ประวัติผู้เขียน

นายเจนวิทย์ จันทร์พยัพ เกิดวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2522 จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนบุญวัฒนา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ระดับประกาศนียบัตรชั้นสูง และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ปี 2545 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา ปัจจุบันปฏิบัติงานตำแหน่ง วิศวกรโยธา ปฏิบัติการ ส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำนักงานทางหลวงที่ 11 กรมทางหลวงระหว่างปฏิบัติงาน มีความสนใจในงานด้านวิศวกรรมงานทางและงานบูรณะทางหลวงโดยวิธี Pavement In - Place Recycling เป็นอย่างมาก ทำให้เกิดแรงจูงใจ ที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท เพื่อพัฒนาความรู้ความสามารถ จึงได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2556

