

เส้นชั้นความสูงของค่าซีบีอาร์ใต้กราฟการบดอัดดิน
CONTOUR OF UNDER COMPACTION CURVE

นายบดินทร์	ไมตรีจิตต์
นายวิสิทธิ์	โยมา

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
ปีการศึกษา 2560

เส้นชั้นความสูงของค่าซีบีอาร์ใต้กราฟการบดอัดดิน
CONTOUR OF UNDER COMPACTION CURVE

นายบดินทร์	ไมตรีจิตต์
นายวิสิทธิ์	โยมา

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
ปีการศึกษา 2560

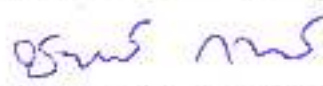
CONTOUR OF UNDER COMPACTION CURVE

BODEESORN MAITHEEJIT
VISID YOMA

AN ENGINEERING PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
BURAPHA UNIVERSITY 2560

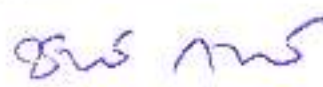
ปริญญาโท	ด้านวิทยาศาสตร์ของสาขาวิชาได้ร่วมนัด
โดย	นายวิเชษฐ์ โยนา
	นายณัฏฐ์ โมศรีจิตต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชาญยุทธ กาฬกาณณ์
ปีการศึกษา	2563

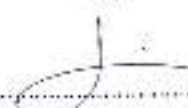
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ฉบับนี้ปริญญาโทนี้มีเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
(ดร.ชาญยุทธ กาฬกาณณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ชาญยุทธ กาฬกาณณ์)

คณะกรรมการสถาบันโครงการวิศวกรรม

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ชาญยุทธ กาฬกาณณ์)

.....กรรมการ
(อ.ดร. สยาม กิมศรี)

.....กรรมการ
(ดร.วรรณวงศ์ รัตนปัทม)

บทคัดย่อ

ตามข้อกำหนดมาตรฐานการก่อสร้างถนนการบดอัดดินแต่ละชั้นในสนามจะต้องมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมากกว่าร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้น $OWC \pm 3\%$ ซึ่งตามข้อกำหนดสามารถทำได้ แต่ในทางปฏิบัติค่าซีพีอาร์ที่ได้ อาจจะมีการแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยอื่นๆ ซึ่งส่งผลให้การรับน้ำหนักของดินลดลง โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าซีพีอาร์ได้กราฟบดอัดและสร้างเส้นชั้นความสูงของค่าซีพีอาร์ได้กราฟบดอัด

จากการทดสอบ พบว่า ตัวอย่างดินที่นำมาทำการศึกษาเป็นดินประเภทดินทรายมีตะกอนทรายปน และปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ คือ 6.6% การทดสอบซีพีอาร์แบบแช่น้ำ มีค่าซีพีอาร์ที่ด้านแห้งมากที่สุดคือ 23.33% ค่าซีพีอาร์ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่ามากที่สุด 31.77% และค่าซีพีอาร์ที่ด้านเปียกมากที่สุด 5.88% ส่วนการทดสอบแบบไม่แช่น้ำมีค่าซีพีอาร์ที่ด้านแห้งมากที่สุดคือ 123.9% ค่าซีพีอาร์ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมากที่สุดคือ 110.94% ค่าซีพีอาร์ในด้านเปียกมากที่สุดคือ 23.17% ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากสำหรับการก่อสร้างถนนเพราะปริมาณความชื้นมีผลต่อการรับน้ำหนักของดินและค่าซีพีอาร์ยังแปรผันตามหน่วยน้ำหนักแห้งถ้าหน่วยน้ำหนักแห้งมากก็จะทำให้การรับน้ำหนักของดินมากขึ้นตามไปด้วย

Abstract

According to the standard specifications for road construction, soil compaction layers in the field has to be dry unit weight more than 95 percent of maximum dry unit weight in the laboratory and water content is in the range of optimum water content $\pm 3\%$. This requirement can be achieved but in practice the CBR may be a variance due to other factors. It results in decreased soil bearing capacity. This project aims to study the relationship of CBR values under compaction curve and create the contour of CBR under compaction curve.

The results showed that soil samples are silty sand and the optimum water content tested from modified compaction test in the laboratory is 6.6%. In cases of soaked CBR tests, the maximum value of CBR are 23.33%, 31.77% and 5.88% at dry side, optimum water content and wet side, respectively. In cases of unsoaked CBR tests, the maximum value of CBR are 123.9%, 110.94% and 23.17% at dry side, optimum water content and wet side, respectively. These results also showed that the water content is very important for road construction

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์ และ อาจารย์ ดร. วรรณวรงค์ รัตนานิคม อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำโครงงานมาโดยตลอด ขอขอบคุณ คุณปฏิพล วงษ์พระจันทร์ นิสิตปริญญาโท ที่ได้ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลืออย่างดีโดยตลอดมา ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำโครงงานขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ อีกทั้งขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบข่ายโครงการทางวิศวกรรม	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การบดอัดดิน	3
2.1.1 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)	4
2.1.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler	5
2.1.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan	6
2.1.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf	7
2.1.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe	8
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการบดอัดดิน	9
2.2.1 ชนิดของดิน	9
2.2.2 พลังงานในการบดอัด	11
2.2.3 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด	11
2.3 ผลของการบดอัดที่ดินได้รับ	11
2.4 การทดสอบเพื่อหาค่า เคลิฟอร์เนีย แบริง เรีโซ (CBR) ทล.-ท. 109/2517	12
2.4.1 การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อนำไปหาค่า CBR	13
2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและ CBR ของดิน	15
2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งของดินและค่าความชื้น	15
2.5 การก่อสร้างและการบดอัดชั้นโครงสร้างทาง	16
2.5.1 การออกแบบการปูพื้นถนนแบบยึดหยุ่น	16
2.5.2 การออกแบบการปูพื้นถนนแบบแข็ง	17
2.6 มาตรฐานชั้นทางกรมทางหลวง	18
2.6.1 มาตรฐานดินถมคันทาง (ทล.-ม. 102/2532)	18
2.6.2 มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ข.	20
2.6.3 มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ก.	22
2.6.4 มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม	24
2.6.5 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31

สารบัญ (ต่อ)

2.7.1 ค่า ซี.บี.อาร์. ของดินบดอัดในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (กิ่งกาญจน์และภัทรสถิต, 2555)	31
2.7.2 การประมาณพฤติกรรมการบดอัดและความแข็งแรงของดินที่ได้จากการบดอัดที่พลังงานในการบดอัดต่างๆ (สยาม, 2553)	31
2.7.3 คุณสมบัติการบดอัดและค่าซีบีอาร์ของดินถมคันทาง (COMPACTION CHARACTERISTICS AND CBR OF SUBGRADE SOILS) (สถิตย์, 2556)	32
2.7.4 คุณสมบัติการบดอัดและค่าซีบีอาร์ของดินเม็ดละเอียด ลูกกรัง และหินคลุก (COMPACTION CHARACTERISTICS AND CBR OF FINE-GRAINED SOILS, LATERITIC SOILS AND CRUSHED ROCKS) (โกลินทร์, 2554)	32
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	34
3.1 วิธีการดำเนินโครงการ	34
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	36
3.3 วิธีการทดสอบ	36
3.3.1 วิธีการทดสอบหาขนาดผละของดิน (Grain Size Analysis), (ทล.-ท. 204/2516, ASTM D422)	36
3.3.1.1 การร่อนผ่านตะแกรง	36
3.3.1.2 วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง (ทล. – ท. 205/2517), ASTM D1140	37
3.3.2 การทดสอบ Atterberg's Limits (ทล.-ท. 102/2515 และ 103/2515, ASTM D4318 และ D4318)	39
3.3.2.1 ขอบข่ายการทดสอบ	39
3.3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	39
3.3.2.3 วิธีการทดสอบ	40
3.3.2.4 การคำนวณ	41
3.3.3 วิธีการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ (ทล.-ท. 108/2517, ASTM D1557)	41
3.3.3.1 ขอบข่ายการทดสอบและมาตรฐานการบดอัด	41
3.3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	41
3.3.3.3 วิธีการทดสอบ	42
3.3.4 การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบร์ริง เรโซ (California Bearing Ratio), (ทล.-ท. 109/2515, ASTM D 1883-67)	43

สารบัญ (ต่อ)

3.3.4.1 ขอบข่าย	43
3.3.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	44
3.3.4.3 วิธีการทดสอบ	45
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	49
4.1 การทดสอบการหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis)	49
4.2 การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ	50
4.3 การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทำการทดสอบซีบีอาร์	52
4.4 การทดสอบซีบีอาร์ (California Bearing Ratio) แบบไม่แช่น้ำ	58
4.5 เส้นชั้นความสูงของค่าซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำได้กราฟการบดอัด	60
4.5.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับหน่วยน้ำหนักแห้งที่ ปริมาณความชื้นคงที่	61
4.5.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วย น้ำหนักแห้งคงที่	63
4.6 การทดสอบซีบีอาร์ (California Bearing Ratio) แบบแช่น้ำ	65
4.7 เส้นชั้นความสูงของค่าซีบีอาร์แบบแช่น้ำได้กราฟการบดอัด	67
4.7.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับหน่วยน้ำหนักแห้งที่ ปริมาณความชื้นคงที่	68
4.7.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วย น้ำหนักแห้งคงที่	70
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลการศึกษา	72
5.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน	72
5.1.2 การทดสอบหาค่าซีบีอาร์ภายใต้กราฟการบดอัดดินแบบไม่แช่น้ำ	72
5.1.3 การทดสอบหาค่าซีบีอาร์ภายใต้กราฟการบดอัดดินแบบแช่น้ำ	72
5.1.4 การทดสอบหาค่าซีบีอาร์ภายใต้กราฟการบดอัดดิน	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	74
ประวัติผู้จัดทำ	75

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบการจำลองการบดอัดดิน (วิศิษฐ์, 2554)	3
2.2 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve)	4
2.3 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ	5
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นนำเสนอโดย Hogentogler (1936)	5
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นนำเสนอโดย Buchanan	7
2.6 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอโดย Hilf (1956)	8
2.7 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน โดย Lambe (1958)	9
2.8 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ	10
2.9 กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Horpibulsuk et al., 2005)	10
2.10 พลังงานในการบดอัดดิน	11
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยหนักแห้งของดินบดอัดกับ ปริมาณความชื้น (ดิงศักดิ์, 2558)	14
2.12 Compaction curve (มณเฑียร, 2541)	15
2.13 รูปตัดโดยทั่วไปของถนนลาดยาง	16
2.14 ชั้นดินถมคันทาง (Bill Palmer, 2556)	17
2.15 วิธีการก่อสร้างงานดินถมคันทาง	19
3.1 ขนาดของเม็ดดินแต่ละชนิด	36
3.2 อุปกรณ์ในการทดสอบหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis)	37
3.3 ตะแกรงขนาดต่างๆ	37
3.4 แสดงเส้นกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน	39
3.5 อุปกรณ์การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ	42
3.6 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้น และ ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัด(มานิต, 2552)	43
3.7 โมลการบดอัดดิน, ปลอกสวม และแผ่นฐานยึด	44
3.8 แบ่งดินเท่าๆกันออก 5 ส่วนใส่ภาดเพื่อเตรียมการบดอัด	46
3.10 เครื่องทดสอบ CBR Test	47
4.1 การกระจายตัวของเม็ดดิน	49
4.2 กราฟการบดอัดดิน	50

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟเส้นแนวโน้ม Compaction Curve	51
4.4 ค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่กำหนดของแต่ละตัวอย่าง	52
4.5 ค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างจริงของตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำ	53
4.6 ความคลาดเคลื่อนของปริมาณความชื้นของตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำ	57
4.7 ความคลาดเคลื่อนของหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำ	57
4.8 ผลการทดสอบซีพีอาร์แบบไม่แช่น้ำ	58
4.9 เส้นชั้นความสูงของค่าซีพีอาร์แบบไม่แช่น้ำได้กราฟการบดอัด	60
4.10 ตัด section ค่าซีพีอาร์ ที่ $w = 3.6\%$, 4.6% และ 5.6% ภายใต้กราฟบดอัด	61
4.11 ค่าซีพีอาร์กับความหน่วยน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน	62
4.12 ตัด section ค่าซีพีอาร์ ที่ $\gamma_{dry} = 1.85 \text{ g/cm}^3$, 1.95 g/cm^3 และ 2.05 g/cm^3 ภายใต้กราฟบดอัด	63
4.13 ค่าซีพีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน	64
4.14 กราฟการทดสอบซีพีอาร์แบบแช่น้ำ	65
4.15 เส้นชั้นความสูงของค่าซีพีอาร์แบบไม่แช่น้ำได้กราฟการบดอัด	67
4.16 ตัด section ค่าซีพีอาร์ ที่ $w = 4.6\%$, 6.6% และ 8.6% ภายใต้กราฟบดอัด	68
4.17 ค่าซีพีอาร์กับความหน่วยน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน	69
4.18 ตัด section ค่าซีพีอาร์ ที่ $\gamma_{dry} = 1.95 \text{ g/cm}^3$, 2.05 g/cm^3 และ 2.15 g/cm^3 ภายใต้กราฟบดอัด	70
4.19 ค่าซีพีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน	71

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	น้ำหนักมาตรฐานจากการทดแทนหลักขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว
2.2	มาตรฐานการบดอัดตาม AASHTO และ ASTM
2.3	ขนาดคละของชั้นรองพื้นทางวัสดุมวลรวม
2.4	ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก
2.5	คุณสมบัติของชั้นทาง
3.1	ปริมาณตัวอย่างสำหรับ Soil Aggregate
4.1	ผลการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ
4.2	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำ
4.3	ผลสรุปการทดลองที่ได้จากการทดสอบซีพีอาร์แบบไม่แช่น้ำ
4.4	ค่าซีพีอาร์กับความหน่วงน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน
4.5	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีพีอาร์กับปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นแห้งเท่ากัน
4.6	ผลสรุปการทดลองที่ได้จากการทดสอบซีพีอาร์แบบแช่น้ำ
4.7	ค่าซีพีอาร์กับความหน่วงน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน
4.8	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีพีอาร์กับปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นแห้งเท่ากัน
5.1	แสดงตารางการคำนวณข้อมูลดิน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นสูงตามความต้องการต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น ถ้าน้ำมีอยู่มากเกินไปน้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบๆ มวลดิน ทำให้อณูของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกันและถ้าน้ำอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเปียดชิดกันเท่าที่ควร Proctor (1930) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้าง เช่น เพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน เขื่อนดิน พื้นโรงงาน เป็นต้น การทดลองหาค่า ซีบีอาร์ จะเป็นการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดแต่ละชนิด โดยทั่วไปพบว่าถ้าความหนาแน่นแห้งสูง ก็จะได้ค่า ซีบีอาร์ สูงตามไปด้วย ซึ่งสมบัติของดินที่เหมาะสมในการใช้งาน ด้านงานวิศวกรรมทางจราจรพิจารณาจากค่าของ ซีบีอาร์ ของดิน

ในทางปฏิบัติการบดอัดในสนามจะทำได้ก็ต่อเมื่อทราบผลทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ (ปริมาณน้ำเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด) การบดอัดในสนามทำโดยอาศัยรถบดอัดจนได้ความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ หน่วยงานหลัก เช่น กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรมโยธาธิการและผังเมือง และกรมทางหลวงชนบท มีข้อกำหนดในการบดอัดดังนี้ ความหนาแน่นแห้งในสนามต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งในสนามสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ และปริมาณความชื้นในดินต้องมีค่าอยู่ระหว่าง $OWC \pm 3\%$ การบดอัดในสนามจะเป็นแบบนวดด้วยรถบดอัดและให้พลังงานการบดอัดดินแก่ดินผ่านจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ยิ่งยิ่งมากพลังงานการบดอัดที่ให้แก่ดินก็ยิ่งมากตาม การทำงานบดอัดและควบคุมงานบดอัดดินให้แน่นในสนามไม่มีมาตรฐานควบคุมจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด จึงทำให้การบดอัดดินในสนามมีความแปรปรวนของคุณภาพการบดอัดซึ่งจะส่งผลต่อกำลังการรับกำลังของคันดินถมโครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าซีบีอาร์และค่าการบวมตัวของดินภายใต้กราฟบดอัดและสร้างเส้นชั้นความสูงของค่าซีบีอาร์และค่าการบวมตัวของดินภายใต้กราฟบดอัดด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าซีบีอาร์และค่าการบวมตัวใต้กราฟบดอัด
2. เพื่อสร้างเส้นชั้นความสูงของค่าซีบีอาร์และค่าการบวมตัวของดินใต้กราฟบดอัด

1.3 ขอบข่ายโครงการทางวิศวกรรม

1. ตัวอย่างดินจากจังหวัดชลบุรี
2. การบดอัดถูกทดสอบโดยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test ASTM D1557)

3. ค่าซีพีอาร์และค่าการบวมตัวถูกทดสอบโดยวิธีการทดสอบหาค่าซีพีอาร์แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำ (ASTM D 1883-67)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้

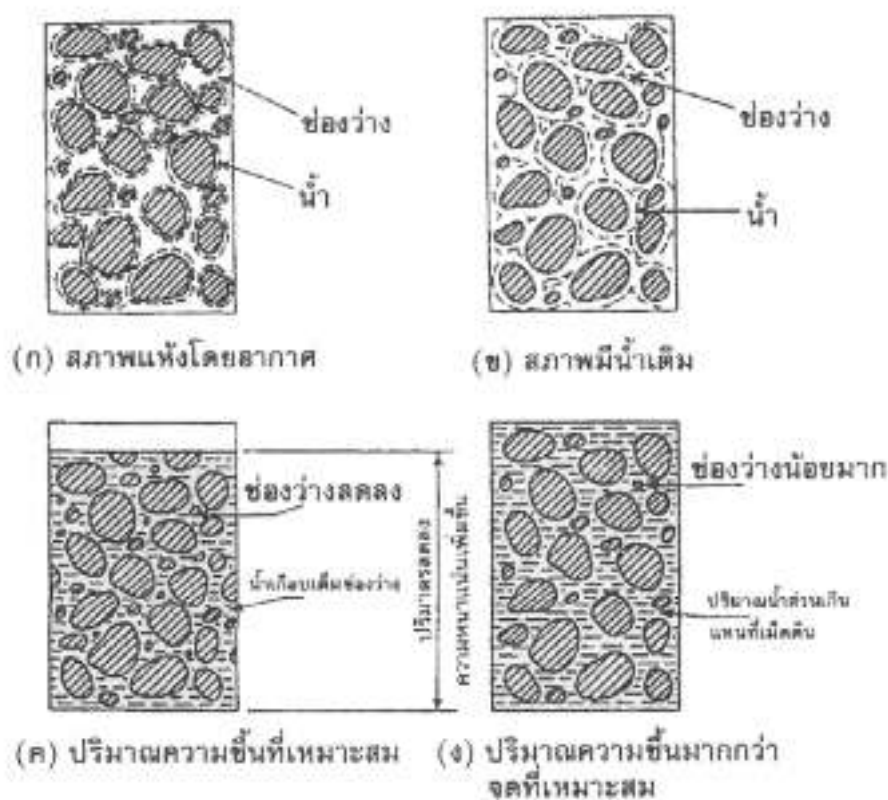
1. ทราบถึงความสัมพันธ์ของค่าซีพีอาร์และค่าการบวมตัวได้กราฟบดอัด
2. สามารถสร้างเส้นชั้นความสูงของค่าซีพีอาร์และค่าการบวมตัวของดินได้กราฟบดอัด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การบดอัดดิน

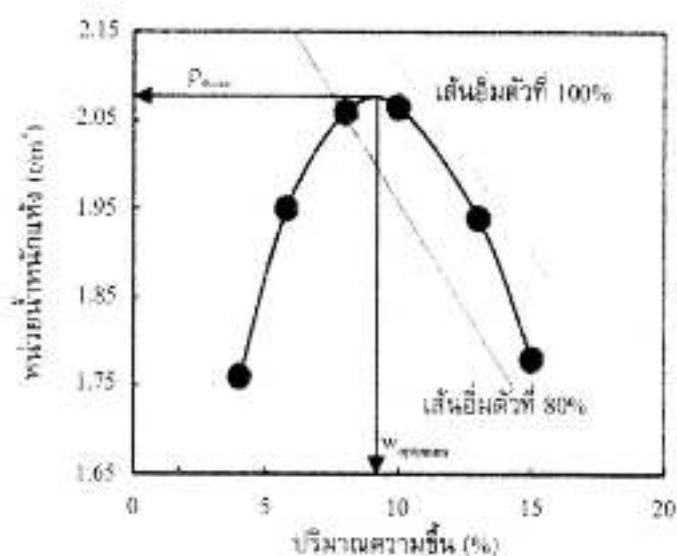
การบดอัดดินเพื่อให้ดินมีคุณสมบัติด้านวิศวกรรมดีขึ้น จะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน ดินที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งที่สูงขึ้นก็จะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น โดยปรกติการบดอัดดินจะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในดิน พลังงานในการบดอัดและลักษณะของดิน การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินหรือพลังงานในการบดอัดจะมีผลเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัด การบดอัดดินทำให้ดินมีความแน่นขึ้นเนื่องจากอากาศที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ถูกไล่ออกไป ทำให้เม็ดดินอัดตัวกันแน่นขึ้นหรือมีปริมาตรลดลง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบการจำลองการบดอัดดิน (วิศิษฐ์, 2554)

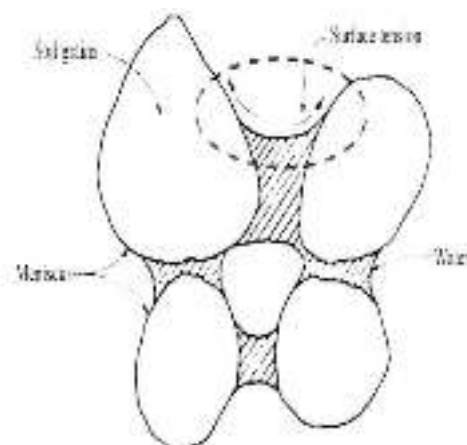
2.1.1 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)

ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความชื้นแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย Proctor (1930) โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering New-Record (Proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test



รูปที่ 2.2 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve)

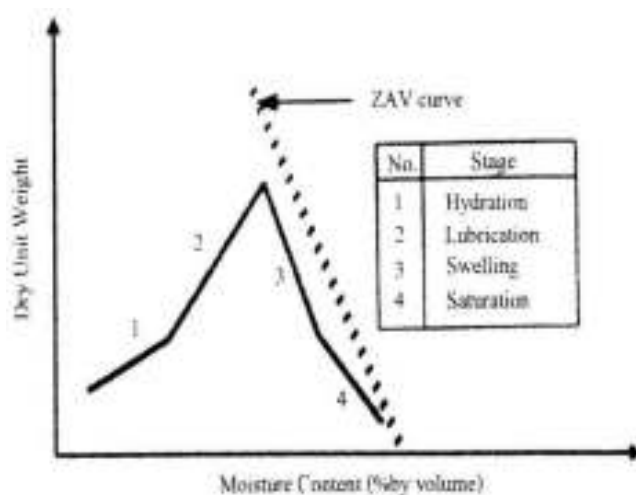
Proctor ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดเส้นการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 2.2 ไว้ว่า ประสิทธิภาพของการบดอัดดินถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน โดยแบ่งการบดอัดดินเป็น 2 ด้านคือ ด้านแห้งและด้านเปียก สำหรับการบดอัดดินที่แห้งมากๆ ดินจะมีแรงเสียดทานที่สูงมาก เนื่องจากแรงดึงดูดที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี (Capillary Moisture) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมากๆ น้ำจะไปลดแรงคาพิลลารีและเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย ถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกเรื่อยๆ จนน้ำไปสลายแรงเสียดทานได้แล้ว น้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จนถึงปริมาณน้ำที่เต็มช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด โดยเรียกจุดที่ดินมีหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดว่า maximum dry density และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้ว่า optimum moisture content หลังจากจุดนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินสูงมากๆ พบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป



รูปที่ 2.3 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ

2.1.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936)

Hogentogler นำเสนอเส้นกราฟการบดอัดที่แตกต่างกับ Proctor กล่าวคือ เขาได้นำเสนอเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง (dry density หรือ dry unit weight) กับปริมาณความชื้นในรูปของปริมาณน้ำต่อปริมาตรรวม (molding moisture content: VW/V) โดยลักษณะของเส้นกราฟแสดงด้วยเส้นตรง 4 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งสาเหตุที่เขาได้นำเสนอการพล็อตเส้นกราฟแบบนี้เนื่องจากเขาพบว่าน้ำมีบทบาทอยู่ 4 ส่วน แบ่งได้เป็น 4 ช่วงที่มีผลทำให้ดินเกิดหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และทำให้โครงสร้างของดินบดอัดมีความแตกต่างกันโดยมีรายละเอียดแต่ละช่วงดังนี้



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Hogentogler (1936)

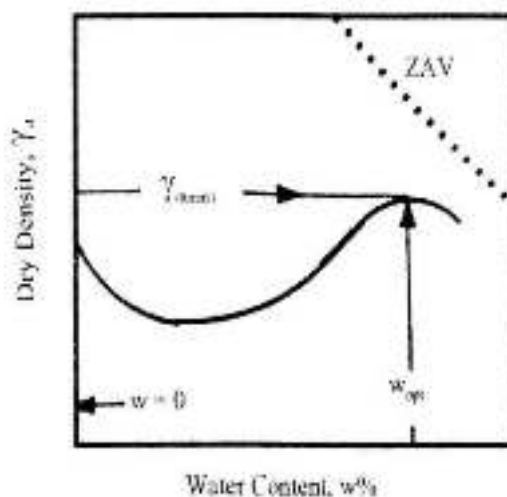
1. Hydration Stage ในช่วงนี้น้ำจะถูกดูดซึมโดยอนุภาคของดินในลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ห่อหุ้มอนุภาคดิน ในลักษณะเดียวกับเมื่อพรมน้ำลงไปบนดินแห้ง ในช่วงแรกอนุภาคดินจะดูดซึมน้ำทันทีเพื่อไปห่อหุ้มอนุภาคดินก่อน โดยน้ำส่วนกลางที่จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นนั้นยังไม่มี
2. Lubrication Stage ในช่วงนี้น้ำจะมีบทบาทเป็นสารหล่อลื่น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

จากทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler ที่อธิบายไว้ข้างต้น มักจะประยุกต์ใช้โดยตรงกับดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกับทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor

2.1.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (1942)

Buchanan (1942) ได้อธิบายเส้นกราฟการบดอัดของดินเหนียว นอกจากจุดที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ปรากฏบนเส้นกราฟการบดอัดแล้ว ก่อนถึงด้านข้างของการบดอัดจะมีจุดที่แสดงถึงค่าหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเขาได้อธิบายถึงช่วงที่ดินมีหน่วยน้ำหนักแห้งลดลงจนถึงจุดที่มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุดว่า ถ้าหากเริ่มบดอัดดินเหนียวที่แห้งมากๆ หรือดินที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์ เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงแรกจะทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งลดลงจนถึงจุดหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุด เมื่อเลยจุดนี้ไปก็จะเข้าสู่เส้นกราฟการบดอัดปกติ ซึ่งถ้าสังเกตจากเส้นกราฟพบว่า เมื่อเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักแห้งที่จุดปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์กับจุดที่หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด จะมีช่วงความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย ทั้งนี้เพราะสำหรับกรณีของทรายที่มีความแห้งมากๆ เมื่อเติมน้ำในช่วงแรก อนุภาคดินจะจับตัวกันด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ของน้ำในลักษณะคล้ายกระจุของก้อนดินหรือทรายรอบตัวเอง ที่เรียกว่า Arching Effect ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินมากขึ้น โดย Arching Effect จะพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่หน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุด ดังนั้นปฏิกิริยาของน้ำที่เติมในช่วงแรกๆ จะแตกต่างจากกรณีของ Hogentogler และ Proctor เนื่องจากดินทรายไม่มีประจุลบ ดังนั้นเมื่อเติมน้ำจะเกิดแรงดึงดูดทำให้เกิดแรงยึดแน่นปรากฏ (apparent cohesion) และเมื่อเติมน้ำมากขึ้น แผ่นฟิล์มจะมีความหนาขึ้น มีผลทำให้ Arching Effect ลดน้อยลงไป เป็นผลให้แรงดึงดูดของแรงดึงดูดลดลงตามลำดับ แล้วอนุภาคดินก็เริ่มจัดเรียงตัวกันใหม่ และหลังจากนั้นก็จะเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้วแต่เขาได้ให้ความหมายของ OMC แตกต่างจากคนอื่น กล่าวคือ OMC คือน้ำที่มีอยู่พอดีในมวลดินบดอัดที่ทำให้ดินอยู่ในสภาพที่ไปสลายแรงดึงดูดพอดี ที่เรียกว่า neutralizes surface tension และเมื่อมีพลังงานบดอัดมากกระทำ จึงทำให้ทรายจัดเรียงตัวกันใหม่

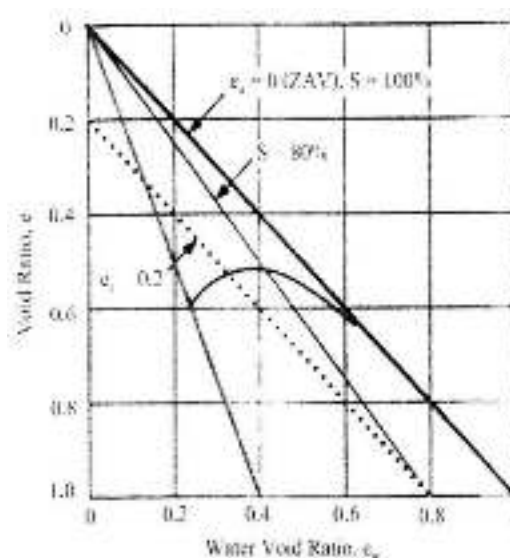
ทำให้ทรายแน่นขึ้น จนสุดท้ายถึงจุดที่หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด เมื่อน้ำสูงขึ้นเกิน OMC ดินก็จะอ่อนตัวลง เป็นผลให้หน่วยน้ำหนักแห้งลดลง โดยสรุปแล้ว ในการบดอัดดินทราย การที่จะให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งค่อนข้างดี คือช่วงที่ทรายแห้งมากๆ และช่วงความชื้นที่ค่อนข้างน้อยเกินไปทางด้านเปียกไปแล้ว



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Buchanan

2.1.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956)

เขาได้นำเสนอแนวความคิดใหม่ โดยอยู่บนพื้นฐานของแรงดันน้ำในช่องว่าง (pore water pressure) และแรงดันอากาศในช่องว่าง (pore air pressure) ที่มีอยู่ในมวลดินที่บดอัด กล่าวคือ ดินแห้งเป็นดินที่บดอัดได้ยาก เนื่องจากภายในมวลดินมีแรงเสียดทานมากซึ่งเกิดจากแรงคาพิลลารี อย่างไรก็ตามในช่วงที่ดินมีความแห้งมากๆ มวลดินจะมีช่องว่างอยู่มาก การบดอัดจึงไปไล่อากาศให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเติมน้ำเพิ่มขึ้นแรงตึงผิวก็จะลดลง ทำให้แรงเสียดทานลดลงด้วย โดยความแน่นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปจนกระทั่งถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC) ก็จะได้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (maximum dry density) เขากล่าวว่า ประสิทธิภาพที่น้อยลงไปจากการบดอัดเมื่อเติมน้ำเลยจุด OMC เนื่องจากอากาศถูกกักเอาไว้และเกิดการสะสมกันเป็นแรงดันอากาศในมวลดิน เส้นกราฟการบดอัดโดยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio; e) และอัตราส่วนน้ำในช่องว่าง (water void ratio; e_w) ของ Hilf แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนาเสนอโดย Hilf (1956)

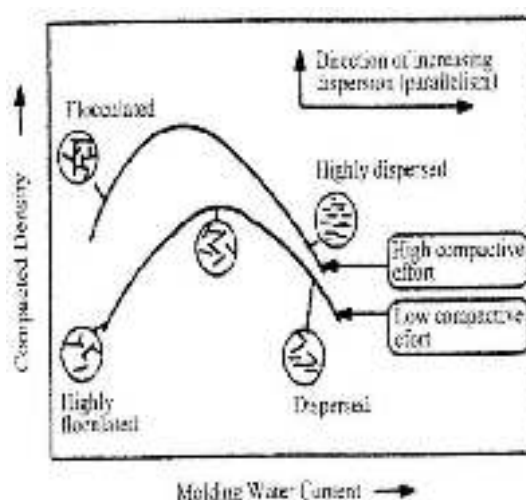
โดยพบว่า ที่จุด OMC ค่าอัตราส่วนช่องว่างจะมีค่าน้อยที่สุด โดยจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟเป็นจุดที่ค่าอัตราส่วนช่องว่างมาก และมีค่าระดับความอิ่มตัวน้อย เมื่อบดอัดไปก็จะได้ค่าอัตราส่วนช่องว่างที่น้อยที่สุด ซึ่งจุดนี้สามารถจะหาค่าสัดส่วนของอากาศได้ด้วย และพบว่าที่ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ค่าระดับความอิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 วิธีของ Hilf ทำให้ง่ายต่อการหาค่าระดับความอิ่มตัวที่จุดต่างๆ บนเส้นกราฟการบดอัด และสามารถหาปริมาณอากาศที่ความชื้นต่างๆ ได้ด้วย

2.1.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1958)

เขาได้เริ่มนำผลจากการดูโครงสร้างภายในดินเปรียบเทียบกับหน่วยน้ำหนักแห้งของดินที่ บดอัด โดยสนใจว่าคุณสมบัติของดินที่บดอัดทางด้านเปื่อยและทางด้านแห้งมีความแตกต่างกันเกิดจากสาเหตุใด เขาสังเกตจากปัจจัยหลายๆ อย่างพบว่า ในความเป็นจริงแล้ว การบดอัดในสนามไม่สามารถบดอัดดินให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ดังนั้นในการเติมน้ำจะมีช่วงหนึ่งที่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงนี้แล้วคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเป็นไปตามที่ต้องการ แต่เมื่อเติมน้ำเกินช่วงนี้ไปเป็นช่วงที่เขาไม่แนะนำ ซึ่งเขาให้เหตุผลจากการพิจารณาโครงสร้างภายในของดินเหนียวพบว่า ในช่วงการบดอัดดินทางด้านแห้ง ลักษณะโครงสร้างของดินจับตัวกันเป็นกระจุก โดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นเดียวกัน การใช้พลังงานบดอัดต่ำ ความเป็นกระจุกของดินมีมาก และจะน้อยลงเมื่อใช้พลังงานการบดอัดที่สูงเป็นผลให้โครงสร้างของดินชิดกันมากขึ้นด้วย เมื่อเติมน้ำเข้าไปโดยที่พลังงานคงที่ สังเกตเห็นว่าโครงสร้างของดินแน่นขึ้น อัตราส่วนช่องว่างลดลงจนกระทั่งเกินจุด OMC ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างดินจะเป็นแบบขนานกันมากขึ้น เมื่อความชื้นยิ่งมากขึ้น ความเป็นระเบียบของโครงสร้างดินก็ยิ่งมากขึ้นตาม การที่โครงสร้างดินจัดเรียงตัวกันในแนวขนานถือว่าไม่ดี เพราะว่าเป็นระนาบที่อ่อนแอที่สุด โดยสรุปแล้วเขาพยายามตอบคำถามว่าทำไมจุดที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากันแต่ปริมาณน้ำไม่เท่ากัน เมื่อเขาใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูพบว่าการบดอัดดินในด้านแห้งมีผลทำให้โครงสร้างดิน

เป็นแบบประเกสรกะ (flocculated structure) ในทางตรงกันข้าม เมื่อเติมน้ำเกินจุด OMC เป็นการบดอัดทางด้านเปียก มีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบขนาน (dispersed structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อพิจารณาที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน โดยเปรียบเทียบดินบดอัดทางด้านแห้งกับดินบดอัดทางด้านเปียก พบว่า

- ก. กำลังของดินสูงกว่า เนื่องจากความเครียด (strain) ของดินต่ำกว่า
- ข. ค่าความชื้นได้ของน้ำสูงกว่า เนื่องจากในมวลดินมีช่องว่างมากกว่า
- ค. มีการหดตัวน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณน้ำในมวลดินมีน้อยกว่า
- ง. มีค่าการบวมตัวมากกว่า เนื่องจากมีช่องว่างที่น้ำสามารถสัมผัสกับพื้นผิวได้มากกว่า



รูปที่ 2.7 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน โดย Lambe (1958)

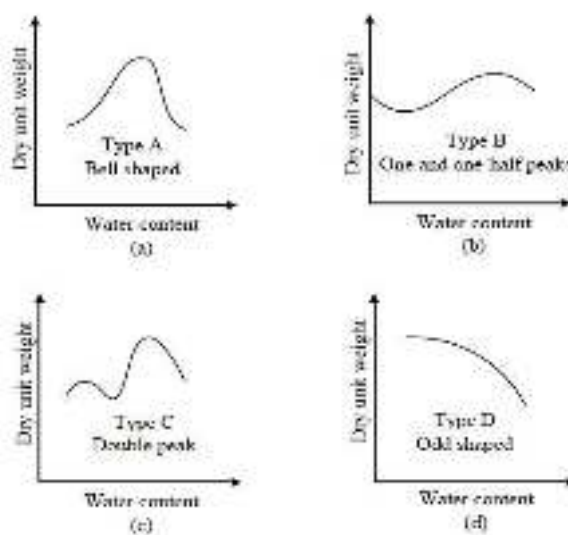
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการบดอัดดิน

2.2.1 ชนิดของดิน

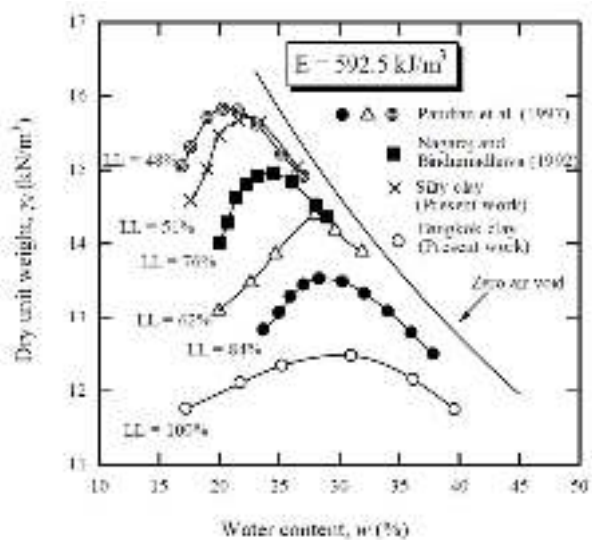
ลักษณะของเม็ดดิน ขนาดการกระจายของเม็ดดิน รูปร่างของเม็ดดิน ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน และจำนวนแร่ดินเหนียวในดิน ล้วนแต่มีผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสม Lee and Suedkamp (1972) ศึกษากราฟการบดอัดดินของดินที่ต่างกัน 35 ชนิด และพบว่ากราฟเหล่านั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คือ ชนิด A เป็นกราฟที่มีจุดยอดเพียงจุดเดียว โดยทั่วไปมักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวประมาณร้อยละ 30-70 ชนิด B คือกราฟที่มี 1 จุดยอด และครึ่งจุดยอด ชนิด C คือกราฟที่มีสองจุดยอด กราฟชนิด B และ C มักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวน้อยกว่าร้อยละ 30 ชนิด D คือกราฟที่ไม่แสดงจุดยอดที่ชัดเจน ดินที่มีขีดจำกัดเหลวมากกว่าร้อยละ 70 อาจแสดงลักษณะกราฟเป็นแบบชนิด C หรือ D ซึ่งเป็นลักษณะกราฟที่ไม่ค่อยพบเห็น

สำหรับการบดอัดดินเหนียว Horpibulsuk (2005) แสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟการบดอัดแปรผันอย่างมากกับขีดจำกัดเหลว โดยเมื่อขีดจำกัดเหลวยิ่งมาก หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดยิ่งมีค่าน้อยลงในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมยิ่งมีค่ามากขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงผล

ทดสอบการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor test) การที่ขีดจำกัดเหลวมีอิทธิพลต่อเส้นกราฟการอัดตัวคายน้ำ เนื่องจากขีดจำกัดเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนผลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (pore fluid)



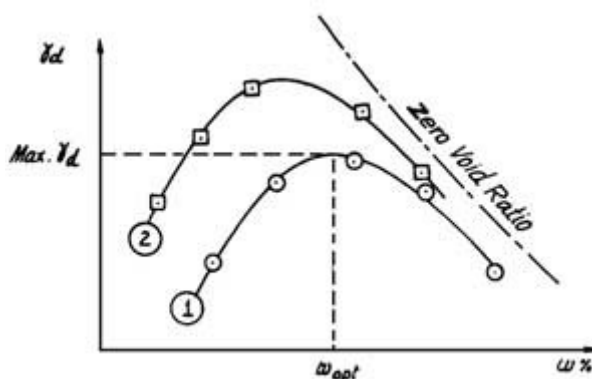
รูปที่ 2.8 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ



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

2.2.2 พลังงานในการบดอัด

พลังงานในการบดอัดดินจะมีผลทำให้ดิน มีความหนาแน่นสูงขึ้นและปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 พลังงานในการบดอัดดิน

โดยพลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย (E) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Energy = \frac{\text{น้ำหนักก้อน} \times \text{ระยะตก} \times \text{จำนวนชั้น} \times \text{จำนวนครั้งบดอัดแต่ละชั้น}}{\text{ปริมาตรแบบหล่อดิน}} \quad (2.1)$$

2.2.3 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด

ปริมาณน้ำที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้การบดอัดได้ความหนาแน่นสูงสุด

2.3 ผลของการบดอัดที่ดินได้รับ

การบดอัดเป็นวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้ดีขึ้นวิธีหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินได้ดังต่อไปนี้

ก. การอัดตัวได้ (Compressibility)

- ดินเม็ดหยาบ การบดอัดดินจะทำให้การอัดตัวได้ของดินชนิดนี้ลดลง
- ดินเม็ดละเอียด ถ้าบดอัดดินชนิดนี้ในด้านแห้งจะทำให้การหดตัว (Shrink) น้อยลงเมื่อตากให้แห้ง และจะบวมตัว (Swell) มากเมื่อแช่ในน้ำ กว่า การบดอัดดินให้เปียก

ข. ค่าความซึมได้ (Permeability)

- ดินเม็ดหยาบ การบดอัดดินชนิดนี้จะช่วยลดค่าความซึมได้ของดินให้น้อยลง

- ดินเม็ดละเอียด การบดอัดดินในด้านเปียก (Wet of Optimum) หรือบดอัดให้ความชื้น มากกว่าจุดที่ความชื้นเหมาะสมที่สุดจะทำให้ค่าความซึมได้ของดินน้อยกว่าการบดอัดในดินแห้ง (Dry of Optimum) ที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน
- ค. ความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength)
 - ดินเม็ดหยาบ (Granular Soil) การบดอัดจะทำให้การต้านทานแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้น
 - ดินเม็ดละเอียด (Fine Grained) เช่น ตะกอน และดินเหนียว

2.4 การทดสอบเพื่อหาค่า เคลิฟอร์เนีย แบริง เรโซ (CBR) ASTM D 1883-67

การทดสอบ CBR (ทล.-ท 109/2517) เป็นวิธีหาลำดั้รับน้ำหนักของดินบดอัดแน่นด้วยการใช้แท่งเหล็กกด ขนาดพื้นที่ 3 ตารางนิ้ว กดลงบนตัวอย่างดินด้วยความเร็ว 0.05 นิ้วต่อนาที แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณหาค่า CBR ดังตารางที่ 2.1 โดยในการก่อสร้างทั่วไปจะกำหนดความหนาแน่นของชั้นดินที่จะบดอัดในแต่ละชั้นเป็น %CBR โดยถ้า %CBR ที่ถูกกำหนดมีค่ามากเท่าใดก็แสดงว่าชั้นดินนั้นต้องบดอัดให้แน่นมากขึ้นตามไปด้วย การทดสอบ CBR เป็นการหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินหรือหินคลุกที่บดอัดแล้ว โดยค่าที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ในรูปของหน่วยแรงต้านทานของตัวอย่างดินทดสอบที่บดอัดต่อหน่วยแรงมาตรฐานของหินคลุกบดอัดในระดับความลึกหรือระยะจมของแท่งกด (Penetration Piston) ที่เท่ากัน แล้วเปรียบเทียบกับออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 น้ำหนักมาตรฐานจากการกดแท่งเหล็กขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว

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

$$\%CBR = \frac{\text{ค่าน้ำหนักที่อ่านได้ต่อหน่วยพื้นที่ของท่อนกด}}{\text{ค่าน้ำหนักมาตรฐาน}} \times 100 \quad (2.2)$$

การทดสอบ CBR กับตัวอย่างดินทันทีที่ทำการบดอัดเสร็จนั้น ถ้ามวลดินมีปริมาณน้ำในดินต่ำกว่าค่าปริมาณน้ำในดินที่ทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (OMC) ผลที่ได้จะมีค่า CBR สูงกว่ามวลดินที่บดอัดโดยมีปริมาณน้ำในดินสูงกว่าค่า OMC การทดลองหาค่า CBR ของดินบดอัดแน่น สามารถทำได้ด้วยวิธีการบดอัดดินแบบ Standard Compaction และ Modified Compaction การเตรียมตัวอย่างดินทั้ง 2 แบบ ต้องนำไปหาค่า CBR ทันที และอีกตัวอย่างนำไปแช่น้ำ (Soaked) ไว้ 4 วัน (96 ชม.) เพื่อให้ดินมีสภาพอิ่มตัว เพื่อศึกษาการบวมตัวของดิน

2.4.1 การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อนำไปหาค่า CBR

ก. การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) ในการทดสอบแบบมาตรฐาน ดินอาจถูกบดอัดในแบบหล่อ (Mold) ที่มีปริมาตร 1/30 ลูกบาศก์ฟุต ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หรือปริมาตร 1/13.33 ลูกบาศก์ฟุต ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว แบบหล่อ จะประกอบเข้ากับแผ่นฐาน (Base plate) ที่ด้านล่าง และตัวต่อ (Extension) ที่ด้านบน ดินจะถูกผสมกับน้ำให้มีปริมาณความชื้นต่างๆ แล้วจึงทำการบดอัดจำนวนสามชั้นด้วยค้อน ซึ่งหนัก 5.5 ปอนด์ ด้วยระยะตกกระทบ 12 นิ้ว จำนวน 25 ครั้งต่อชั้น สำหรับแบบหล่อขนาด 4 นิ้ว และจำนวน 56 ครั้งต่อชั้น สำหรับแบบหล่อขนาด 6 นิ้ว ในแต่ละการทดสอบ หน่วยน้ำหนักรวมของดินบดอัด (γ) และหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_d) ของดินบดอัด สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.3)$$

เมื่อ W คือน้ำหนักของดินในแบบหล่อ และ V คือปริมาตรของแบบหล่อ

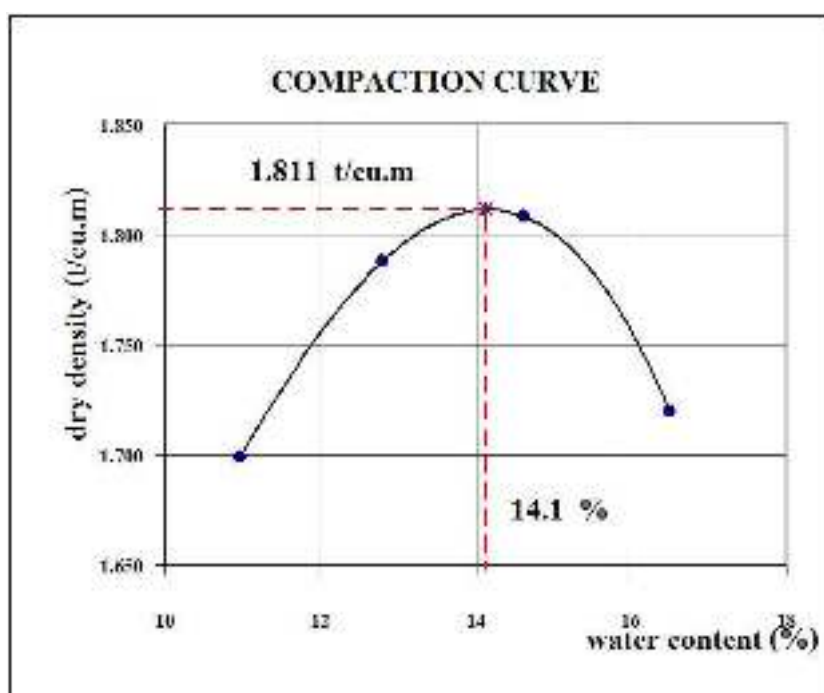
$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \quad (2.4)$$

เมื่อ w คือ ปริมาณความชื้น

ค่าของหน่วยน้ำหนักแห้งที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.4 จะถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้น เพื่อหาจุดเหมาะสม (Optimum point) ซึ่งเป็นจุดที่แสดงหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, γ_{dmax}) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ดังรูปที่ 2.11

ข. การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) เพื่อให้การทดสอบในห้องปฏิบัติการสอดคล้องกับงานในสนามมากยิ่งขึ้น การบดอัดแบบมาตรฐาน ได้ถูกปรับปรุงโดยการเพิ่มพลังงานการบดอัดให้มากขึ้น การทดสอบนี้จะใช้การงานก่อสร้างใหญ่ๆ ที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกสูง ในการทดสอบนี้แบบหล่อที่ใช้ในการบดอัดจะเป็นขนาดเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบ

การบดอัดแบบมาตรฐาน แต่ดินจะถูกบดอัดด้วยค้อนที่มีน้ำหนัก 10 ปอนด์ จำนวน 5 ชั้น ด้วยระยะตกกระทบ 18 นิ้ว โดยมีจำนวนการตกกระทบในแต่ละชั้นเท่ากับ 25 ครั้ง สำหรับแบบหล่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และ 56 ครั้ง สำหรับแบบหล่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test) คือ การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จะมีการใช้พลังงานในการบดอัดเป็น 4.5 เท่าของแบบมาตรฐาน



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยหนักแห้งของดินบดอัดกับ ปริมาณความชื้น (ดิงศักดิ์, 2558)

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานการบดอัดตาม AASHTO และ ASTM

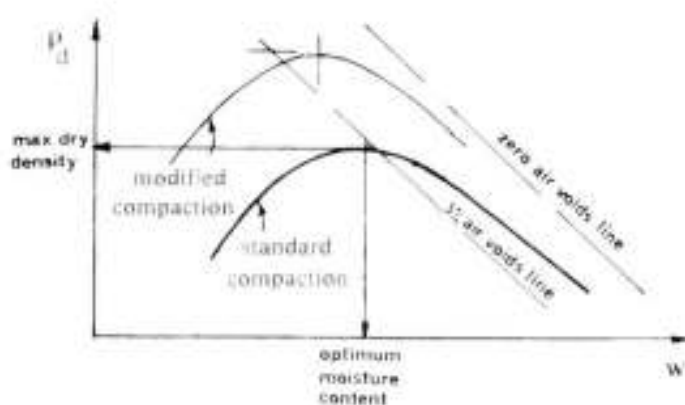
	แบบมาตรฐาน(AASHTO T-99 และ ASTM D-698)		แบบสูงกว่ามาตรฐาน (AASHTO T-180 และ ASTM D-1557)	
	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2
แบบ:				
ปริมาตร (ft^3)	1/30	1/13.33	1/30	1/13.33
ความสูง(in)	4.58	4.58	4.58	4.58
เส้นผ่านศูนย์กลาง (in)	4	6	4	6
น้ำหนักก้อน (lb)	5.5	5.5	10	10
ระยะตกของก้อน (in)	12	12	18	18
จำนวนชั้นบดอัด	3	3	5	5
จำนวนครั้งที่บดอัดต่อชั้น	25	56	25	56

2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและ CBR ของดิน

กำลังของดินบดอัดในการก่อสร้างถนนและสนามบินจะทำการทดสอบด้วย CBR ซึ่งสามารถนำค่า CBR ไปทำการออกแบบหาค่าความหนาแน่นของถนนได้ความสัมพันธ์ของความชื้นบดอัดของดินต่อความหนาแน่น และค่า CBR

2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งของดินและค่าความชื้น

การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะทำให้ดินมีความแน่นกว่าการบดอัดแบบมาตรฐานและส่งผลให้มีค่าความชื้นเหมาะสมน้อยลง การบดอัดให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะต้องบดอัดในสถานะที่ดินมีค่าความชื้นเหมาะสม เมื่อดินอยู่ในสถานะที่มีค่าความชื้นต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าความชื้นเหมาะสมจะส่งผลทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งของดินน้อยลงและการบดอัดดินจะไม่สามารถบดอัดดินให้แน่นจนเหลือช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเป็นศูนย์ (Zero air voids) ได้ดังรูปที่ 2.12



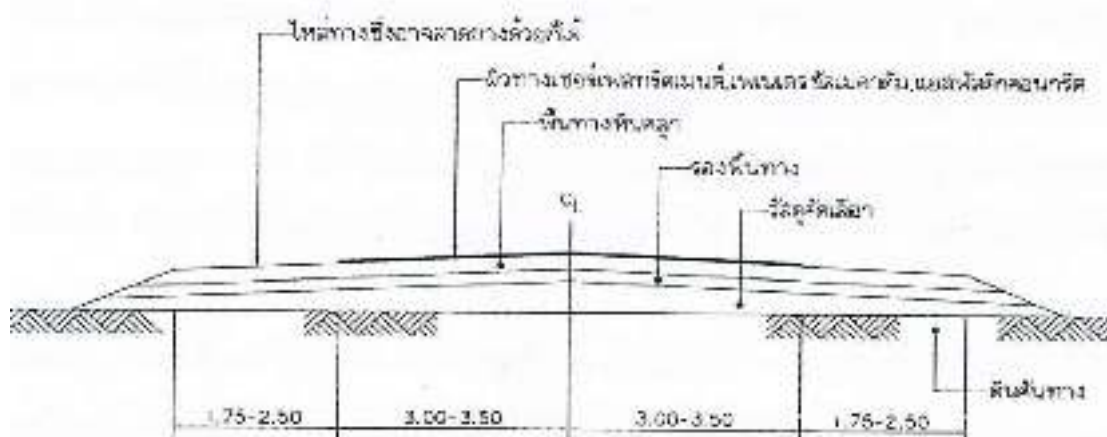
รูปที่ 2.12 Compaction curve (มณเฑียร, 2541)

2.5 การก่อสร้างและการบดอัดชั้นโครงสร้างทาง

ชนิดของถนนมี 2 ประเภท ดังนี้

2.5.1 การออกแบบการปูพื้นถนนแบบยืดหยุ่น

การปูพื้นถนนแบบยืดหยุ่นคือการทำด้วยยางมะตอย หรือด้วย Tarmac โดยทั่วไปประกอบด้วยชั้นต่างๆ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปตัดโดยทั่วไปของถนนลาดยาง

สำหรับถนนแบบสี่ชั้น จะมีชั้นผิวหน้า, ชั้น base, ชั้น subbase ที่สร้างขึ้นบนชั้น subgrade ที่เป็นดินธรรมชาติอัดแน่น เมื่อมีการสร้างถนนแบบสามชั้น ชั้น subbase จะไม่มี โดยชั้น base จะถูกสร้างอยู่บนชั้น subgrade โดยตรง ชั้นบนสุดของการปูพื้นถนนแบบยืดหยุ่นจะถูกสร้างขึ้นจากยางมะตอยผสมร้อน (HMA) หินคลุกที่ไม่เสถียรมักจะถูกใช้สำหรับชั้น base อย่างไรก็ตาม ชั้น base อาจถูกทำให้เสถียรด้วยยางมะตอยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือสารตัวทำเสถียรอื่นๆ subbase โดยทั่วไปจะถูกสร้างจากวัสดุผสมในท้องถิ่น ในขณะที่ด้านบนของ subgrade มักจะถูกทำให้เสถียรด้วยซีเมนต์หรือหินปูนด้วยการปูพื้นถนนแบบยืดหยุ่น ความเครียดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าและความเครียดจะลดลงตามความลึกของพื้นถนน ดังนั้นวัสดุที่มีคุณภาพสูงสุดจะต้องถูกนำมาสร้างผิวหน้า ในขณะที่วัสดุที่มีคุณภาพต่ำสามารถถูกใช้ในส่วนลึกของพื้นถนน คำว่า "ยืดหยุ่น" ถูกนำมาใช้เพราะความสามารถของ asphalt ในการโค้งงอและบิดเบี้ยวเล็กน้อย จากนั้นมันจะกลับไปตำแหน่งเดิมเมื่อปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้นและลดลง มันเป็นไปได้ที่การบิดเบี้ยวขนาดเล็กเหล่านี้จะกลายเป็นถาวร ซึ่งสามารถนำไปสู่การเป็นร่องในเส้นทางตลอดการใช้งาน ชีวิตการใช้งานของการปูพื้นแบบยืดหยุ่นโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 15-20 ปี ความหนาที่จำเป็นของแต่ละชั้นของการปูพื้นถนนแบบยืดหยุ่นจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ ขนาดจำนวนการใช้ซ้ำๆ กันของโหลดจราจร สภาพแวดล้อม และอายุการใช้งานที่ต้องการของถนน ปัจจัยเช่นนี้จะถูกนำมาพิจารณาในระหว่างขั้นตอนการออกแบบเพื่อให้พื้นถนนมีอายุตามที่ได้ออกแบบมาโดยไม่ต้องมีความเครียดมากเกินไป

2.5.2 การออกแบบการปูพื้นถนนแบบแข็ง

การปูพื้นถนนแบบแข็งโดยทั่วไปจะใช้ในการสร้างสนามบินและทางหลวงสายหลัก นอกจากนี้ถนนแบบแข็งโดยปกติจะทำหน้าที่เป็นแผ่นพื้นในงานอุตสาหกรรมหนัก ลานท่าเรือและท่าเรือจอดเรือ และลานจอดรถหรือสถานีรถบรรทุก ชั้นต่างๆของถนนแบบแข็งจะเหมือนถนนแบบยืดหยุ่น ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ชั้นดินถมคันทาง (Bill Palmer, 2556)

การปูพื้นทางหลวงแบบแข็งได้รับการออกแบบให้เป็นโครงสร้างที่ใช้งานได้ทุกสภาพอากาศ และใช้ได้ยาวนานเพื่อให้บริการการจราจรความเร็วสูง ถนนแบบแข็งทำหน้าที่เป็นชั้นโครงสร้างเพื่อการกระจายโหลดที่ล้อในลักษณะที่ความเครียดที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังดินฐานราก (subgrade) ในขนาดที่ยอมรับได้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คอนกรีต (PCC) เป็นวัสดุที่ใช้กันมากที่สุดในการก่อสร้างของแผ่นถนนแบบแข็ง เหตุผลสำหรับความนิยมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คอนกรีต เป็นผลมาจากความพร้อมและความประหยัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คอนกรีต การปูพื้นแข็งจะต้องได้รับการออกแบบให้ทนแรงการจราจรซ้ำๆบ่อยๆ อายุการใช้งานโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 30 และ 40 ปี หรือสองเท่าของการปูแบบยืดหยุ่น

การพิจารณาที่สำคัญของการปูพื้นแบบแข็งก็คือการลดการวิบัติจากการล้าเนื่องจากความเครียดซ้ำๆของ การรับน้ำหนักจราจร ความเครียดจากแรงดึงเนื่องจากพลังงานความร้อน ทั้งนี้เพราะความเครียดที่เกิดจากความร้อนในการปูพื้นแบบแข็งสามารถให้ความรุนแรงเช่นเดียวกับที่ถูกกระทำโดยแรงล้า เนื่องจากแรงดึงที่ค่อนข้างต่ำของคอนกรีต ความเครียดที่เกิดจากความร้อนจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการพิจารณาการออกแบบของการปูพื้นแบบแข็ง

การปูพื้นแบบแข็งถูกสร้างขึ้นโดยทั่วไปเป็นสามชั้น ได้แก่ ชั้นเตรียมฐานราก ชั้นฐานหรือ subbase และชั้นแผ่นคอนกรีต (concrete slab) แผ่นคอนกรีตจะถูกสร้างขึ้นตามการเลือกของขนาดที่ถูกออกแบบไว้สำหรับแผงของแผ่น (slab panel) ซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อความเข้มของ

ความเครียดจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในพื้นถนน นอกเหนือจากการติดตั้งแฉงของแผ่น การเสริมกำลังอุณหภูมิ (temperature reinforcement) ต้องได้รับการออกแบบมาเพื่อควบคุมพฤติกรรมของการแตกร้าวในแผ่น ระยะห่างระหว่างรอยต่อถูกกำหนดโดยขนาดแฉงแผ่น

สามประเภทหลักของการปูพื้นถนนด้วยคอนกรีตที่ใช้กันทั่วไปคือ (1) การปูพื้นคอนกรีตธรรมดาที่มีรอยต่อ (Jointed plain concrete pavement, JPCP) (2) การปูพื้นคอนกรีตเสริมแรงที่มีรอยต่อ (jointed reinforced concrete pavement, JRCP) และ (3) การปูพื้นคอนกรีตเสริมแรงต่อเนื่อง (continuously reinforced concrete pavements, CRCP) JPCP จะถูกสร้างด้วยรอยต่อแบบหดตัวซึ่งจะช่วยลดการแตกร้าวตามธรรมชาติของแผ่นปูน แผ่นปูนเหล่านี้ไม่ได้ใช้เหล็กเสริมแรงแต่อย่างใด JRCP จะถูกสร้างขึ้นที่มีทั้งรอยต่อแบบหดตัวและเหล็กเสริมแรงเพื่อควบคุมการแตกร้าวของแผ่นปูน อุณหภูมิและความเครียดจากความชื้นที่สูงภายในแผ่นปูนเป็นตัวสร้างการแตกร้าว ซึ่งเหล็กเสริมแรงจะช่วยยึดเข้าด้วยกันให้แน่น ที่รอยต่อตามขวาง แท่งเดือย (dowel bar) มักจะถูกติดตั้งไว้เพื่อช่วยถ่ายโอนน้ำหนักของยานพาหนะข้ามรอยต่อ CRCP พึ่งพาเหล็กเสริมแรงต่อเนื่องแต่เพียงอย่างเดียวเพื่อยึดรอยต่อตามขวางตามธรรมชาติของพื้นถนนเข้าด้วยกัน การปูพื้นด้วยคอนกรีตอัดแรง (Prestressed concrete) ยังถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างทางหลวงเช่นกัน การปูพื้นแบบอัดแรงทำให้ความหนาของแผ่น slab บางลงเนื่องจากสามารถต้านทานความเครียดที่เกิดจากความร้อนหรือแรงกดทับได้บางส่วนหรือทั้งหมด

2.6 มาตรฐานชั้นทางกรมทางหลวง

2.6.1 มาตรฐานดินถมคันทาง (ทล.-ม. 102/2532)

งานนี้ประกอบด้วย การก่อสร้างงานถมคันทางด้วยดิน หรือวัสดุอื่นใดที่นายช่างผู้ควบคุมงานยอมให้ใช้ได้ โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นไปบนดินเดิมหรือคันทางเดิมที่ได้เตรียมไว้แล้ว โดยการเกลี่ยแต่งและบดทับให้ถูกต้องตามแนวระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ

ก. มาตรฐานวัสดุ

ดินหรือวัสดุอื่นใดที่ใช้ก่อสร้างดินถมคันทาง ต้องเป็นวัสดุที่ปราศจากหน้าดินและวัชพืช มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งไม่น้อยกว่า 1,440 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนที่จับตัวกันเป็นก้อนหรือมีการยึดเกาะตัวกันมีขนาดโตกว่า 50 มิลลิเมตร จะต้องถูกกำจัดออกไป หรือทำให้แตกและผสมเข้าด้วยกันให้มีลักษณะสม่ำเสมอ มีค่า CBR เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 109/2517 “วิธีการทดสอบหาค่า CBR” ไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบที่หน่วยน้ำหนักแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 107/2515 “วิธีการทดสอบ Compaction Test แบบมาตรฐาน” ค่าการขยายตัว เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.

109/2517 “วิธีการทดสอบหาค่า CBR” ไม่เกินกว่าร้อยละ 4 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุดที่ได้จากการทดลอง ทล.-ท. 107/2515 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบมาตรฐาน”

ข. มาตรฐานการก่อสร้าง

ให้ราดน้ำชั้นดินเดิมหรือคันทางเดิมที่ได้เตรียมไว้แล้วให้เปียกชื้นสม่ำเสมอโดยทั่วตลอด ใช้เครื่องจักรที่เหมาะสมขนดินไปปูบนชั้นที่ได้เตรียมไว้ แล้วตีแผ่ เกลี่ยวัสดุ คลุกเคล้า ผสมน้ำให้มีปริมาณความชื้นที่ Optimum Moisture Content $\pm 3\%$ หลังจากเกลี่ยแต่งดินจนได้ที่แล้วให้ทำการบดอัดทับพื้นที่ด้วยเครื่องมือบดทับที่เหมาะสม บดทับทั่วผิวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.15 จนได้ความแน่นตลอดความหนาตามข้อกำหนด การบดทับให้กระทำในทิศทางเดียวกับแนวศูนย์กลาง โดยเริ่มจากขอบทางเข้าแนวศูนย์กลางทาง ด้วยเครื่องมือบดทับที่เหมาะสมกับสภาพของงานก่อสร้าง โดยความเห็นของนายช่างที่ควบคุมงาน



รูปที่ 2.15 วิธีการก่อสร้างงานดินถมคันทาง

ค. มาตรฐานการควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง

การก่อสร้างชั้นดินถมคันทางให้ก่อสร้างเป็นชั้นๆ โดยให้มีความหนาหลังบดทับชั้นละไม่เกิน 150 มิลลิเมตร เมื่อได้ก่อสร้างชั้นดินถมคันทาง จนได้ความยาวพอเหมาะในแต่ละวันแล้ว ให้ดำเนินการตรวจสอบค่าระดับและทดสอบความหนาแน่นของการบดทับ หากผลที่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างชั้นทางชั้นถัดไปได้

ก่อนการปูชั้นดินถมคันทางชั้นถัดไป ให้ทำการพ่นน้ำให้ผิวหน้าของชั้นดินถมคันทางที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้ชุ่มชื้น ถ้าผิวหน้าของชั้นดินถมคันทางเรียบเป็นมัน ให้ผู้รับจ้างทำการครูดผิวหน้าของชั้นดินถมคันทางที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้เป็นริ้วรอยก่อน แล้วค่อยพ่นน้ำให้ชุ่มชื้น เพื่อช่วยให้วัสดุแต่ละชั้นยึดกันดี

ง. มาตรฐานการทดสอบความหนาแน่นของการบดทับ

งานดินถมคันทางจะต้องทำการบดทับให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งสม่ำเสมอตลอดไม่น้อยกว่า 1,440 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตัวอย่างดินเก็บจากหน้างานในสนาม หลังจากคลุกเคล้าผสมและปูลงบนถนนแล้วตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 107/2515 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบมาตรฐาน” การตรวจสอบความหนาแน่นของการบดอัดในสนาม ให้ดำเนินการทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 603/2517 “วิธีการทดลองหาความหนาแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย” ทุกระยะประมาณ 100 เมตร ต่อ 1 ช่องจราจร หรือประมาณพื้นที่ 700 ตารางเมตร ต่อ 1 หลุมตัวอย่าง

2.6.2 มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ข.

งานนี้ประกอบด้วยวัสดุมวลรวม หรือทราย หรือวัสดุอื่นใดที่นายช่างผู้ควบคุมงานยอมให้ใช้ได้ โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นไปบนชั้นดินคันทางหรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้ และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้ว โดยการเกลี่ยแต่งและบดทับให้ถูกต้องตามแนวระดับ ความลาดขนาด ตลอดจนรูปตัดที่ได้แสดงไว้ในแบบ

ก. มาตรฐานวัสดุ

วัสดุมวลรวม (Soil Aggregate) หรือทราย ต้องเป็นวัสดุที่มีความคงทน ปราศจากก้อนดินเหนียว และวัชพืชอื่น ๆ ส่วนที่จับตัวกันเป็นก้อนหรือยึดเกาะกันมีขนาดโตกว่า 50 มิลลิเมตร จะต้องถูกกำจัดออกไปหรือทำให้แตกและผสมเข้าด้วยกันให้มีลักษณะสม่ำเสมอ

วัสดุที่ใช้ทำชั้นวัสดุคัดเลือก ข. จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 205/2517 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง” มีขนาดเม็ดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร และส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 35
2. มีค่า CBR เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 109/2517 “วิธีการทดลองหาค่า CBR” ไม่เกินร้อยละ 6 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนัก

แห่งสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ ทล. – ท. 108/2515 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”

3. มีค่าการขยายตัว CBR เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 109/2517 “วิธีการทดลองหาค่า CBR” ไม่เกินร้อยละ 3 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ ทล. – ท. 108/2515 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”

ข. มาตรฐานการก่อสร้าง

ชั้นดินคันทางหรือชั้นอื่นใดที่จะต้องรองรับวัสดุคัดเลือก ข. จะต้องเกลี่ยแต่งและบดทับให้ได้แนวระดับ ความลาด ขนาด รูปร่าง และความแน่นตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ ภายหลังจากที่ได้ดำเนินการแล้วให้รดน้ำชั้นดินคันทางที่รองรับวัสดุคัดเลือก ข. ให้เปียกชื้นสม่ำเสมอโดยทั่วตลอด ใช้เครื่องจักรที่เหมาะสม เช่น รถบรรทุกกระเบยยกขนวัสดุไปปูลงบนชั้นดินคันทาง หรือชั้นอื่นใดที่เตรียมไว้แล้วตีแผ่เกลี่ยวัสดุ คลุกเคล้า ผสมน้ำ ให้มีปริมาณความชื้นที่ Optimum Moisture Content ± 3

หลังจากเกลี่ยแต่งวัสดุจนได้ที่แล้วให้ทำการบดทับพื้นที่ด้วยเครื่องมือบดทับที่เหมาะสม บดทับทั่วผิวหน้าอย่างสม่ำเสมอจนได้ความแน่นตลอดความหนาตามข้อกำหนดเกลี่ยแต่งวัสดุให้ได้ แนวระดับ ความลาด ขนาด และรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบไม่มีหลุมบ่อหรือวัสดุที่หลุดหลวมไม่แน่นอยู่บริเวณผิว การบดทับให้กระทำในทิศทางเดียวกับแนวศูนย์กลางคันทางโดยเริ่มจากขอบทางเข้าแนวศูนย์กลางทาง กรณีใช้ทรายเป็นวัสดุคัดเลือก ข. ให้ทำการป้องกันลาดคันทางทั้งสองข้างด้วยวัสดุที่นายช่างผู้ควบคุมงานพิจารณาแล้วยอมให้ใช้ได้ พร้อมทั้งทำการปลูกหญ้าทันทีเพื่อป้องกันทรายไหลออกข้าง

ค. มาตรฐานการควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง

การก่อสร้างชั้นวัสดุคัดเลือก ข. ให้ก่อสร้างเป็นชั้นๆ โดยมีความหนาหลังบดทับชั้นละไม่เกิน 150 มิลลิเมตร เมื่อได้ก่อสร้างชั้นวัสดุคัดเลือก ข. จนได้ความยาวพอเหมาะแล้ว ให้ดำเนินการตรวจสอบค่าระดับและทดสอบความหนาแน่นของการบดทับ หากผลที่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างชั้นทางในชั้นทางถัดไป

ก่อนการปูชั้นวัสดุคัดเลือก ข. ชั้นถัดไป ให้ทำการพ่นน้ำให้ผิวหน้าของชั้นวัสดุคัดเลือก ข. ที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้ชุ่มชื้น ถ้าผิวหน้าของชั้นวัสดุคัดเลือก ข. เรียบเป็นมัน ให้ผู้รับจ้างทำการครูดผิวหน้าของชั้นวัสดุคัดเลือก ข. ที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้เป็นริ้วรอยก่อน แล้วค่อยพ่นน้ำให้ชุ่มชื้น เพื่อช่วยให้วัสดุแต่ละชั้นยึดกันดี

ง. มาตรฐานการทดสอบความหนาแน่นของการบดทับ

งานชั้นวัสดุคัดเลือก ข. จะต้องทำการบดทับให้ได้ความแน่นแห้งสม่ำเสมอตลอดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตัวอย่างของวัสดุที่เก็บจากตัวอย่างงานในสนามหลังจากคลุกเคล้าผสม และปูลงบนถนนแล้ว ตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 108/2515 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” การตรวจสอบความหนาแน่นของการบดทับ ให้ดำเนินการทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 607/2517 “วิธีหาค่าความหนาแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย” ทุกระยะประมาณ 100 เมตร ต่อ 1 ช่องจราจร หรือประมาณพื้นที่ 500 ตารางเมตร ต่อ 1 หลุมตัวอย่าง หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ

2.6.3 มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ก.

งานนี้ประกอบด้วยวัสดุมวลรวมซึ่งมีขนาดคละกันจากใหญ่ไปเล็ก โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นไปบนชั้นวัสดุคัดเลือก ข. หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้ว โดยการเกลี่ยแต่งและบดทับให้ถูกต้องตามแนวระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ

ก. วัสดุ

วัสดุมวลรวม (soil aggregate) ต้องเป็นวัสดุที่มีความคงทน มีส่วนหยาบผสมกับส่วนละเอียดที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ดี ปราศจากก้อนดินเหนียว และวัชพืชอื่นๆ ส่วนที่ยึดเกาะกันมีขนาดใหญ่กว่า 50 มิลลิเมตร จะต้องกำจัดออกไปหรือทำให้แตก และผสมเข้าด้วยกันให้มีลักษณะสม่ำเสมอ ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุคัดเลือก ก. ไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุมวลรวมที่ใช้ทำชั้นวัสดุคัดเลือก ก. จะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 205/2517 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง” มีขนาดเม็ดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร และส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 30

ห้ามใช้ทรายที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ ทำวัสดุคัดเลือก ก.

- (1) เป็นทรายแม่น้ำ

- (2) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 205/2517 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง” มีส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40) เกินกว่าร้อยละ 80

- (3) เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 205/2517 “วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง”และส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) น้อยกว่าร้อยละ 8 หรือเกินกว่าร้อยละ 30
2. มีค่า Liquid limit เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.102/2515 “วิธีการทดสอบหาค่า Liquid limit (L.L.) ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 40
3. มีค่า Plasticity Index เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 103/2515 “วิธีการทดสอบหาค่า Plasticity limit และ Plasticity Index” ไม่เกินร้อยละ 20
4. มีค่า CBR เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 109/2515 “วิธีการทดสอบหาค่า CBR” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดสอบ compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”
5. มีค่าการขยายตัว เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 109/2515 “วิธีการทดสอบหาค่า CBR” ไม่เกินกว่าร้อยละ 3 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดสอบ compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”
6. กรณีใช้วัสดุจำพวก shale ต้องมีค่าเฉลี่ย Durability Index ของวัสดุ ทั้งชนิดเม็ดละเอียด และชนิดเม็ดหยาบ เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 206/2517 “วิธีการทดสอบหาค่า Durability ของวัสดุ” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30
7. กรณีวัสดุจำพวก Non Plastic ที่เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 205/2517 “วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง” มีส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) เกินกว่าร้อยละ 90 และได้คุณภาพตามข้อ 1 ถึง 6 แล้วหากนำมาใช้ทำวัสดุคัดเลือก ก. จะต้องทำการบดอัดให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งสม่ำเสมอตลอดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 100 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดสอบ compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”

ข. วิธีการก่อสร้าง

ราดน้ำชั้นวัสดุคัดเลือก ข. ที่รองรับวัสดุคัดเลือก ก. ให้เปียกชื้นสม่ำเสมอโดยทั่วตลอด ใช้เครื่องจักรที่เหมาะสม เช่น รถบรรทุกกระเบยยกขนวัสดุไปปลงบนชั้นวัสดุคัดเลือก ข. หรือชั้นอื่นใดที่เตรียมไว้แล้วตีแผ่เกลี่ยวัสดุรวมคลุกเคล้า ผสมน้ำ ให้มีปริมาณความชื้นที่ Optimum Moisture Content ± 3 หลังจากเกลี่ยแต่งวัสดุจนได้ที่แล้ว ให้ทำการบดทับพื้นที่ด้วยเครื่องมือบดทับที่เหมาะสม บดทับทั่วผิวหน้าอย่างสม่ำเสมอจนได้ความแน่นตลอดความหนาตามข้อกำหนดเกลี่ยแต่งวัสดุให้ได้ แนว ระดับ ความลาด ขนาด และรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบไม่มีหลุมบ่อหรือวัสดุที่หลุด

หลวมไม่แน่นอยู่บริเวณผิว การบดทับให้กระทำในทิศทางเดียวกับแนวศูนย์กลางคันทางโดยเริ่มจากขอบทางเข้าแนวศูนย์กลางทาง บริเวณใต้ที่วัสดุส่วนหยาบและส่วนละเอียดแยกตัวออกจากกัน ผู้รับจ้างจะต้องทำการแก้ไข โดยการขุดคุ้ย (Scarify) ตลอดความหนาของแต่ละชั้น

ค. มาตรฐานการควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง

การก่อสร้างชั้นวัสดุคัดเลือก ก. ให้ก่อสร้างเป็นชั้นๆ โดยให้ความหนาหลังบดอัดชั้นละไม่เกิน 150 มิลลิเมตร เมื่อได้ก่อสร้างชั้นวัสดุคัดเลือก ก. จนได้ความยาวพอเหมาะในแต่ละวันแล้ว ให้ดำเนินการตรวจสอบค่าระดับและ ทดสอบความหนาแน่นของการบดอัด หากผลที่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างชั้นทางในชั้นถัดไปได้ ก่อนการปูชั้นวัสดุคัดเลือก ข. ชั้นถัดไป ให้ทำการพ่นน้ำให้ผิวหน้าของชั้นวัสดุคัดเลือก ข. ที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้ชุ่มชื้น ถ้าผิวหน้าของชั้นวัสดุคัดเลือก ก. เรียบเป็นมัน ให้ผู้รับจ้างทำการครูดผิวหน้าของชั้นวัสดุคัดเลือก ก. ที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้เป็นริ้วรอยก่อน แล้วค่อยพ่นน้ำให้ชุ่มชื้นเพื่อช่วยให้วัสดุแต่ละชั้นยึดกันดี

จ. มาตรฐานการทดสอบความหนาแน่นของการบดอัด

งานชั้นวัสดุคัดเลือก ข. จะต้องทำการบดทับให้ได้ความแน่นแห้งสม่ำเสมอตลอดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 สำหรับวัสดุมวลรวมและไม่ต่ำกว่าร้อยละ 100 สำหรับวัสดุตาม ข้อ 1.7 หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดลอง compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” การตรวจสอบความหนาแน่นของการบดอัด ให้ดำเนินการทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 603/2517 “วิธีการทดลองหาค่าความหนาแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย” ทุกระยะประมาณ 100 เมตร ต่อ 1 ช่องจราจร

2.6.4 มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม

งานนี้ประกอบไปด้วยวัสดุมวลรวมซึ่งมีขนาดสม่ำเสมอจากใหญ่ไปเล็ก โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียว หรือหลายชั้นไปบนวัสดุคัดเลือก หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้ และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้ว โดยการเกลี่ยแต่ง และบดทับให้ถูกต้องตามแนว ระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดที่ได้แสดงไว้ในแบบ

ก. มาตรฐานวัสดุ

วัสดุมวลรวม ต้องเป็นวัสดุที่มีเม็ดแข็งทนทานมีส่วนหยาบผสมกับส่วนละเอียดที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ดี ปราศจากก้อนดินเหนียวและวัชพืชอื่นๆ หากมีส่วนที่จับตัวกันเป็นก้อนแข็งหรือยึดเกาะกันมีขนาดโตกว่า 50 มิลลิเมตร จะต้องกำจัดออกไปหรือทำให้แตกและผสมเข้าด้วยกันให้มีลักษณะสม่ำเสมอ วัสดุที่ใช้ทำชั้นรองพื้นทางมวลรวมจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีค่าความสึกหรอ เมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 202/2515 “วิธีการทดสอบหา ค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion” ไม่เกิน ร้อยละ 60
2. มีขนาดที่ตี และเมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 205/2517 “ วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่ง ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ขนาดตะแกรงของชั้นรองพื้นทางวัสดุมวลรวม

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล				
	A	B	C	D	E
50 (2")	100	100	-	-	-
25.0 (1")	-	-	100	100	100
9.5 (3/8")	30-36	40-75	50-85	60-100	-
2.00 (เบอร์ 10)	15-14	20-45	25-50	40-70	40-100
0.425 (เบอร์ 40)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
0.075 (เบอร์ 200)	2-8	5-15	5-15	5-20	6-20

3. มีค่า Liquid Limit เมื่อทดสอบตามวิธีที่ ทล. – ท. 102/2515 “วิธีการทดสอบหาค่า Liquid Limit (L.L) ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 35
4. มีค่า Plasticity Index เมื่อทดสอบตามวิธี ทล. – ท. 103/2515 “วิธีการทดสอบ Plasticity Limit และ Plasticity Index” ไม่เกินร้อยละ 11
5. มีค่า CBR เมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 109/2517 “วิธีการทดสอบหาค่า CBR” ไม่เกินร้อยละ 25 ที่หน่วยน้ำหนักแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ ทล. – ท. 108/2515 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูง กว่ามาตรฐาน”
6. กรณีใช้วัสดุมากกว่า 1 ชนิดผสมกันเพื่อให้ได้คุณภาพถูกต้อง วัสดุแต่ละชนิดจะต้องมีขนาด คละสม่ำเสมอและเมื่อผสมกันแล้วจะต้องมีลักษณะสม่ำเสมอและได้คุณภาพตาม ข้อกำหนด

7. กรณีใช้วัสดุจำพวก Shale ต้องมีค่า Durability Index ของวัสดุทั้งชนิดเม็ดละเอียดและชนิดเม็ดหยาบแต่ละชนิด เมื่อทดลองตามวิธี ทล. – ท. 206/2517 “วิธีการทดลองหาค่า Durability Index ของวัสดุ” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 35

ข. มาตรฐานการก่อสร้าง

ให้ราดน้ำชั้นวัสดุคัดเลือกที่รองรับชั้นรองพื้นทางให้เปียกชื้นสม่ำเสมอโดยทั่วตลอด ใช้เครื่องจักรที่เหมาะสม เช่น รถบรรทุกกระบะยกขนวัสดุไปปูลงบนชั้นวัสดุคัดเลือก หรือชั้นอื่นใดที่เตรียมไว้แล้วตีแผ่เกลี่ยวัสดุ คลุกเคล้า ผสมน้ำ ให้มีปริมาณความชื้นที่ Optimum Moisture Content ± 3 หลังจากเกลี่ยแต่งวัสดุจนได้ที่แล้ว ให้ทำการบดทับทันทีด้วยเครื่องมือบดทับที่เหมาะสม บดทับทั่วผิวหน้าอย่างสม่ำเสมอจนได้ความแน่นตลอดความหนาตามข้อกำหนดเกลี่ยแต่งวัสดุรวมรวมให้ได้ แนว ระดับ ความลาด ขนาด และรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบไม่มีหลุมบ่อหรือวัสดุที่หลุดหลวมไม่แน่นอนอยู่บริเวณผิว การบดทับให้กระทำในทิศทางเดียวกับแนวศูนย์กลางคันทาง โดยเริ่มจากขอบทางเข้าแนวศูนย์กลางทาง บริเวณใดที่วัสดุส่วนหยาบและส่วนละเอียดแยกตัวออกจากกัน ผู้รับจ้างจะต้องทำการแก้ไข โดยการขุดคุ้ย (Scarify) ตลอดความหนาของแต่ละชั้น แล้วทำการก่อสร้างใหม่ตามวิธีการก่อสร้างข้างต้น

ค. มาตรฐานการควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง

การก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง ให้ก่อสร้างเป็นชั้นๆ โดยมีความหนาหลังบดทับชั้นละไม่เกิน 150 มิลลิเมตร เมื่อได้ก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง จนได้ความยาวพอเหมาะแล้ว ให้ดำเนินการตรวจสอบค่าระดับและทดสอบความหนาแน่นของสารบดทับ หากผลที่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างชั้นทางในชั้นทางถัดไปได้ ก่อนการปูชั้นรองพื้นทางชั้นถัดไป ให้ทำการพ่นน้ำให้ผิวหน้าของชั้นรองพื้นทางวัสดุรวมรวมที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้ชุ่มชื้น ถ้าผิวหน้าของชั้นรองพื้นทาง เรียบเป็นมัน ให้ผู้รับจ้างทำการครูดผิวหน้าของชั้นรองพื้นทางที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้เป็นริ้วรอยก่อน แล้วค่อยพ่นน้ำให้ชุ่มชื้น เพื่อช่วยให้วัสดุแต่ละชั้นยึดกันดี

ง. มาตรฐานการทดสอบความหนาแน่นของการบดทับ

งานชั้นรองพื้นทางวัสดุรวมรวมจะต้องทำการบดทับให้ได้ความแน่นแห้งสม่ำเสมอตลอดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตัวอย่างของวัสดุที่เก็บจากตัวอย่างงานในสนามหลังจากคลุกเคล้าผสมและปูลงบนถนนแล้ว ตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 108/2515 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”

การตรวจสอบความหนาแน่นของการบดทับ ให้ดำเนินการทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 603/2517 “วิธีหาค่าความหนาแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย” ทุกกระยะประมาณ 100

เมตร ต่อ 1 ช่องจราจร หรือประมาณพื้นที่ 500 ตารางเมตร ต่อ 1 หลุมตัวอย่าง หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ

2.6.5 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก

งานพื้นทางหินคลุกประกอบด้วยหินโม่มวลรวมซึ่งมีขนาดคละกัณอย่างสม่ำเสมอจากใหญ่ไปหาเล็ก โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นบนชั้นรองพื้นทางและได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้วโดยการเกลี่ยแต่งและบดอัดให้ถูกต้องตามแนวระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ

ก. มาตรฐานวัสดุ

วัสดุหินโม่มวลรวม (Crushed Rock Soil Aggregate Type) ต้องเป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็งเหนียว สะอาดไม่ฝุ่นและปราศจากวัสดุอื่นเจือปน วัสดุจำพวก Shale ห้ามนำมาใช้

วัสดุที่ใช้ทำพื้นทางหินคลุกจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีค่าการสึกหรอ เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.202 “วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอ ของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion” ไม่เกินร้อยละ 40
2. มีค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.213 “วิธีการทดลองหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวม” โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ แล้วไม่เกินร้อยละ 9 ให้มีการทดลองทุกครั้งที่จะนำมาใช้
3. ส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับส่วนหยาบ (Coarse Aggregate)
4. มีขนาดคละที่ดี และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลอง ทล.-ท. 205 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามที่ 2.4
5. ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสามของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)
6. มีค่า Liquid Limit เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 102 “วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 25
7. มีค่า Plasticity index เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 103 “วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit และ Plasticity index ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 6

ตารางที่ 2.4 ขนาดละเอียดของวัสดุพื้นทางหินคลุก

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล	
	A	B
50 (2")	100	100
25.0 (1")	-	75-95
9.5 (3/8")	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

8. มีค่า CBR เมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 109/2515 “วิธีการทดลองหาค่า CBR” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีต และไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางแบบเซอร์เฟสทรีตเมนต์ที่หน่วยน้ำหนักแห้งของการบดอัด ร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดลอง compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”

ข. มาตรฐานการก่อสร้าง

ชั้นรองพื้นทางหรือชั้นอื่นใดที่จะรองรับชั้นพื้นทางหินคลุก จะต้องเกลี่ยแต่งและบดอัดให้ได้แนวระดับ ความลาด ขนาด รูปร่าง และความแน่นตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ ก่อนลงหินคลุกควรพ่นน้ำเข้าไปที่กองวัสดุหินคลุกและคลุกเคล้าให้เข้ากัน โดยให้มีปริมาณน้ำใกล้เคียง Optimum Moisture Content และจะต้องระวังไม่เกิดการแยกตัวของส่วนหยาบและส่วนละเอียด และต้องระวังไม่ให้ความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุระเหยไปมาก จากนั้นให้รดน้ำที่ชั้นรองพื้นทางหรือชั้นอื่นใดที่รองรับชั้นพื้นทางให้เปียกชื้นสม่ำเสมอโดยทั่วตลอด แล้วนำวัสดุหินคลุกไปปูลงบนชั้นรองพื้นทางหรือชั้นอื่นใดที่เตรียมไว้ แล้วเกลี่ยหินคลุกและผสมน้ำเพิ่มให้มีปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content ± 2 โดยประมาณ หลังจากเกลี่ยแต่งหินคลุกจนได้ที่แล้ว ให้ทำการบดทับพื้นที่ด้วยเครื่องมือบดทับที่เหมาะสม บดทับทั่วผิวหน้าอย่างสม่ำเสมอจนได้ความแน่นตลอดความหนาตามข้อกำหนด เกลี่ยแต่งหินคลุกให้ได้ แนว ระดับ ความลาด ขนาด และรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ ไม่มีหลุมบ่อหรือวัสดุที่หลุดหลวมไม่แน่นอยู่บริเวณผิว การบดทับให้กระทำในทิศทางเดียวกับแนวศูนย์กลางคันทางโดยเริ่มจากขอบทางเข้าแนวศูนย์กลางทาง บริเวณใดที่วัสดุส่วนหยาบและส่วนละเอียดแยกตัวออกจากกัน ผู้รับจ้างจะต้องทำการแก้ไข โดยการขุดคุ้ย (Scarify) ตลอดความหนาของแต่ละชั้น

ค. มาตรฐานการควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง

การก่อสร้างพื้นทางหินคลุก ให้ก่อสร้างเป็นชั้นๆ โดยให้ความหนาหลังบดอัดชั้นละไม่เกิน 150 มิลลิเมตร เมื่อได้ก่อสร้างพื้นทางหินคลุก จนได้ความยาวพอเหมาะในแต่ละวันแล้ว ให้ดำเนินการตรวจสอบค่าระดับและทดสอบความหนาแน่นของการบดอัด หากผลที่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างชั้นทางในชั้นถัดไป ก่อนการปูพื้นทางหินคลุกชั้นถัดไปให้ทำการพ่นน้ำให้ผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้ชุ่มชื้น ถ้าผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกเรียบเป็นมันให้ผู้รับจ้างทำการครูดผิวหน้าของชั้นพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้เป็นริ้วรอยก่อนแล้วค่อยพ่นน้ำให้ชุ่มชื้นเพื่อช่วยให้วัสดุแต่ละชั้นยึดกันดี

ง. มาตรฐานการทดสอบความแน่นของการบดอัด

งานพื้นทางหินคลุก จะต้องทำการบดทับให้ได้ความแน่นแห้งสม่ำเสมอตลอดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยยางหินคลุกจากหน่วยงานในสนามหลังจากคลุกเคล้าผสมและปูลงบนถนนแล้ว ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “วิธีการทดลอง compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” การตรวจสอบ

ความหนาแน่นของการบดอัด ให้ดำเนินการทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 603/2517 “วิธีการทดลองหาค่าความหนาแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย” ทุกระยะประมาณ 100 เมตร ต่อ 1 ช่องจราจร

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของชั้นทาง

ชั้นทาง	CBR	LA	Soundness	ขนาดคละ	ส่วนละเอียด	LL	PI
พื้นทางหินคลุก	≥ 80 ที่ 95% Mod. Proctor	$\leq 40\%$	$\leq 9\%$	ตามที่กำหนด	Minus #200 $\leq$ (2/3) Minus #40	≤ 25	≤ 6
รองพื้นทาง วัสดุมวลรวม	≥ 25 ที่ 95% Mod. Proctor	$\leq 60\%$	NA	ตามที่กำหนด	NA	≤ 35	≤ 11
ชั้นวัสดุคัดเลือก ก	≥ 10 และ Swell $\leq 3\%$ ที่ 95% Mod. Proctor	NA	NA	ขนาดใหญ่สุด ≤ 50 มม.	Minus #200 $\leq$ 30%	≤ 40	≤ 20
ชั้นวัสดุคัดเลือก ข	≥ 6 และ Swell $\leq 3\%$ ที่ 95% Mod. Proctor	NA	NA	ขนาดใหญ่สุด ≤ 50 มม.	35%	NA	NA
ดินคันทาง	-	-	-	-	-	-	-

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 ค่า ซี.บี.อาร์. ของดินบดอัดในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (กึ่งกาญจน์และภัทรสถิต, 2555)

ดินในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ส่วนมากเป็นดินประเภทดินเหนียว จึงทำให้วัสดุชนิดนี้มีอยู่มาก และสามารถหาได้ง่ายกว่าวัสดุประเภทอื่น หากสามารถนำวัสดุชนิดนี้มาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างถนน จะทำให้การจัดหาวัสดุในการก่อสร้างทำได้ง่ายขึ้น แต่ในการก่อสร้างถนนมีการกำหนดมาตรฐานของวัสดุของแต่ละชั้นทางไว้ เพื่อให้ชั้นทางที่สร้างมีความแข็งแรง มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

โครงการนี้ได้ศึกษาค่า CBR ของดินในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่โดยได้ศึกษาจากดิน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ดินตัวอย่างที่ 1 เป็นดินบริเวณตรงข้ามลานจอดรถภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ความลึก 1 เมตร ดินตัวอย่างที่ 2 และ 3 เป็นดินบริเวณข้างลานจอดรถห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ความลึก 1 เมตร และ 1.6 เมตร ตามลำดับ โดยศึกษาจากการทดสอบหาค่า C.B.R. ทั้งแบบ Unsoaked และ Soaked ในห้องปฏิบัติการ ที่เปอร์เซ็นต์การบดอัดเท่า 95 เปอร์เซ็นต์ของการบดอัดแบบ Modified Proctor ทางด้าน Dry Side และ Wet Side และที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของการบดอัด นอกจากนี้ยังได้นำดินตัวอย่างที่ 3 มาปรับปรุงคุณภาพ เริ่มจากการปรับขนาดคละให้เป็นไปตามมาตรฐานของวัสดุชั้นรองพื้นทาง โดยเติมทรายที่มีขนาดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 20 เข้าไป 50 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงนำมาทดสอบหาค่า C.B.R.

ผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการการปรับปรุงคุณภาพดิน ดินที่ปรับปรุงมีค่า C.B.R. ของการทดสอบแบบ Unsoaked และ Soaked เพิ่มขึ้น ทั้งทางด้าน Dry Side Wet Side และที่ Optimum การทดสอบแบบ Soaked ทางด้าน Dry Side และที่ความชื้น Optimum water content ค่า C.B.R. มากกว่าค่ามาตรฐานของวัสดุชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงชนบทที่กำหนดไว้

2.7.2 การประมาณพฤติกรรมการบดอัดและความแข็งแรงของดินที่ได้จากการบดอัดที่พลังงานในการบดอัดต่างๆ (สยาม, 2553)

งานวิจัยนี้คือการศึกษาประมาณพฤติกรรมการบดอัดของดินและความแข็งแรงของดินที่ได้จากการบดอัดที่พลังงานในการบดอัดต่างๆ เพื่อให้ได้ Model สำหรับคาดการณ์ Compaction curve ที่พลังงานต่างๆ และ CBR ที่พลังงานและความชื้นต่างๆ โครงการนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือ 1.การทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมการบดอัดของดินและความแข็งแรงของดินที่ได้จากการบดอัดที่พลังงานในการบดอัดต่างๆ และ 2. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการคาดการณ์พฤติกรรมที่ได้ศึกษา การทดลองในห้องปฏิบัติการจะเป็นการทดสอบ Compaction CBR ส่วนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำให้สามารถมี Model ที่สามารถคาดการณ์ Compaction curve และ CBR ของดินที่ถูกบดอัดที่พลังงานต่างๆได้ วิธีการนี้ได้ทดลองกับดินจาก

ภาคตะวันออกของประเทศไทย ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้ใช้ในการประมาณค่าของดินที่สนใจและปรากฏว่าความแม่นยำที่ได้มีค่าปานกลาง จากผลการทดลองแสดงวิธีที่เสนอนี้สามารถประมาณค่า W_{omc} ที่พลังงานต่างๆได้ดีพอสมควรแต่ประมาณค่า γ_d ได้มากเกินไปประมาณ 10% ที่ทุกพลังงานการบดอัด วิธีการเสนอนี้ประมาณค่า CBR ทางด้านเปียกของ Optimum ได้ดีพอสมควรแต่ประมาณค่า CBR ด้านแห้งของ Optimum ได้น้อยไป

2.7.3 คุณสมบัติการบดอัดและค่าซีบีอาร์ของดินถมคันทาง (COMPACTION CHARACTERISTICS AND CBR OF SUBGRADE SOILS) (สถิตย์, 2556)

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติการบดอัดและค่าซีบีอาร์ของดินถมคันทางในห้องปฏิบัติการและในสนาม ดินตัวอย่างทดสอบมีกระจายขนาดคละตามมาตรฐานกรมทางหลวง การศึกษาคุณสมบัติการบดอัดและค่าซีบีอาร์ในห้องปฏิบัติการดำเนินการโดยการรวบรวมผลทดสอบจากศูนย์สร้างทางขอนแก่น กรมทางหลวง การทดสอบในสนามดำเนินการที่โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 2038 บ้านเมืองใหม่ อำเภอกุเวียง จังหวัดขอนแก่น ผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งและซีบีอาร์สามารถประมาณได้จากคุณสมบัติพื้นฐาน อันได้แก่ ร้อยละของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และขีดจำกัดเหลว ผลการบดอัดดินเม็ดละเอียดด้วยรถบดอัดในสนามที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งและซีบีอาร์ในสนามมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและซีบีอาร์กับจำนวนเที่ยววิ่งสามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชันล็อกการิทึมจนถึงหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ผลการศึกษาทั้งหมดนำมาซึ่งวิธีการบดอัดและควบคุมการบดอัดในสนามที่มีประสิทธิภาพ

2.7.4 คุณสมบัติการบดอัดและค่าซีบีอาร์ของดินเม็ดละเอียด ลูกกรัง และหินคลุก (COMPACTION CHARACTERISTICS AND CBR OF FINE-GRAINED SOILS, LATERITIC SOILS AND CRUSHED ROCKS) (โกคินทร์, 2554)

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติการบดอัดและค่าซีบีอาร์ของดินเม็ดละเอียด ลูกกรัง และหินคลุก ที่มีกระจายขนาดคละตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท ผลทดสอบดินตัวอย่างทั้งหมดรวบรวมจากโครงการก่อสร้างและปรับปรุงถนนทั้งสิ้น 112 โครงการ ของสำนักงานทางหลวงชนบทที่ 2 (สระบุรี) กรมทางหลวงชนบท ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากราฟการบดอัดของ Ohio สามารถใช้ในการประมาณกราฟการบดอัดของดินทั้งสามประเภทได้ ค่าซีบีอาร์ของดินประเภทเดียวกันมีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด แม้ว่าค่าซีบีอาร์ของดินแต่ละประเภทจะมีความแตกต่างกัน แต่ค่าซีบีอาร์ของดินเดียวกันจะแปรผันตามหน่วยน้ำหนักแห้ง ดังนั้น อัตราส่วนซีบีอาร์และอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งของดินประเภทต่างๆ จึงสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เดียวกันได้ ผลการบดอัดดินเม็ดละเอียดด้วยรถบดอัดในสนามที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดในช่วงแรก และมีค่าประมาณคงที่ที่ใกล้เคียงกับ

หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ ที่จำนวนเที่ยววิ่งเท่ากับ 10 เที่ยว ผลการศึกษาทั้งหมดนำมาซึ่งวิธีการบดอัดและควบคุมการบดอัดที่มีประสิทธิภาพ

บทที่ 3

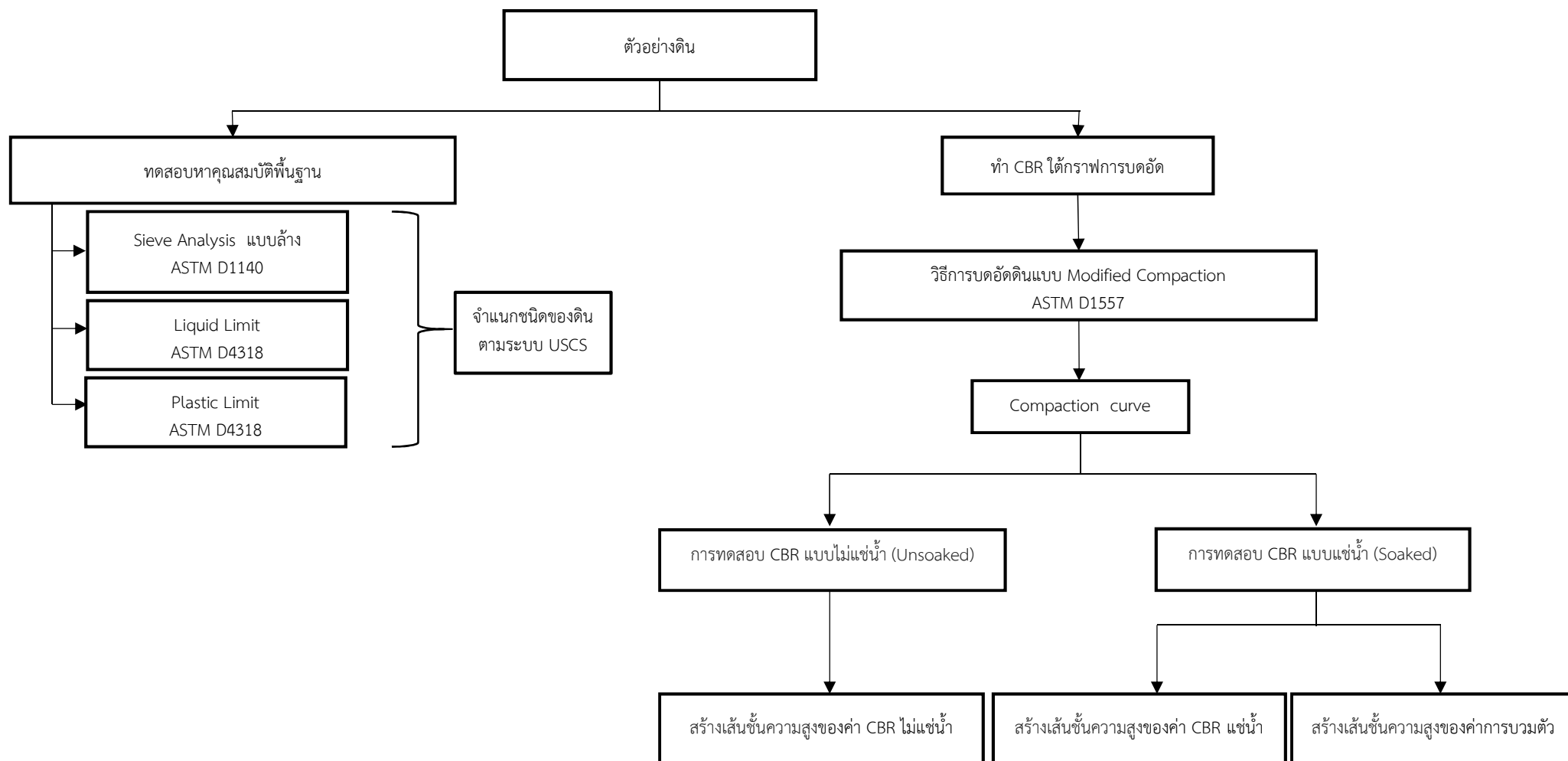
วิธีการศึกษา

3.1 วิธีการดำเนินโครงการ

โครงการนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลัก โดยส่วนแรกคือการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ดังนี้

- การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามมาตรฐานวิธีการทดลอง (ทล. – ท. 205/2517, ASTM D1140)
- การทดสอบเพื่อหาค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit :LL) ตามมาตรฐานวิธีทดลอง (ทล.-ท. 102/2515, ASTM D4318)
- การทดสอบเพื่อหาค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit: PL) ตามวิธีทดลอง ทล.-ท 103/2515, ASTM D4318)

ส่วนที่สองคือการนำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบเพื่อหาค่า CBR ได้กราฟการบดอัด เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่า CBR ได้กราฟการบดอัด โดยจะทำการสร้างกราฟการบดอัดจากมาตรฐานวิธีการบดอัดดินแบบ Modified Compaction ทล.-ท. 108/2517 นำกราฟการบดอัดที่ได้มาแบ่งเป็นช่องๆ ได้กราฟการบดอัด เพื่อที่จะเลือกจุดความหนาแน่นที่ต้องการทดสอบค่า CBR ได้กราฟการบดอัด นำความหนาแน่นที่เลือกมาคำนวณหาน้ำหนักดินที่ต้องการ เพื่อจะนำไปทดสอบหาค่า CBR ทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ โดยจะทำการบดอัดดินแบบ static method เพื่อให้ได้ความหนาแน่นตามต้องการจากนั้นจะทำการสร้างเส้นชั้นความสูงของค่า CBR เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ของค่า CBR ได้กราฟการบดอัด



3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

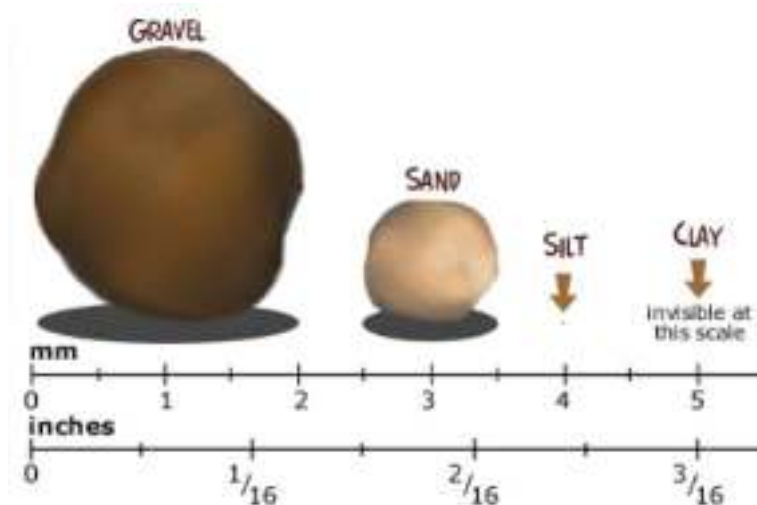
1. ดินจากจังหวัดชลบุรี

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 วิธีการทดสอบหาขนาดคละของดิน (Grain Size Analysis) (ทล.-ท. 204/2516, ASTM D422)

3.3.1.1 การร่อนผ่านตะแกรง

มวลดินหนึ่งลูกบาศก์เมตร อาจประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาด เช่น 10 ซม. ลงมาจนกระทั่ง 0.0002 มม. ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สมบัติทางฟิสิกส์ของมวลดินจะขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดดินอย่างมาก เช่น มวลดินที่มีเม็ดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 ส่วนมากจะไม่มีควมเหนียวหรือแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน ซึ่งเรียกว่าดินทรายส่วนดินที่มีส่วนประกอบเป็นเม็ดเล็กมาก ก็จะเรียกว่าดินเหนียว นอกจากนั้นขนาดเม็ดดินยังมีอิทธิพลกับความชื้นน้ำ การรับแรง อัตราการทรุดตัวและอื่นๆ อีกมากในการก่อสร้างทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นการสร้างเขื่อนสนามบิน ถนน แม้แต่ฐานรากอาคารขนาดใหญ่ แต่ดินที่ใช้ในงานก่อสร้างได้นั้นจะต้องมีขนาดคละที่เหมาะสม ซึ่งในการหาว่าดินมีขนาดความคละกันอย่างไรนั้นจะต้องทำการหาขนาดของเม็ดดิน โดยดินเม็ดหยาบใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน และนำขนาดคละของดินมาใช้ในการจำแนกประเภทของดินต่อไป



รูปที่ 3.1 ขนาดของเม็ดดินแต่ละชนิด

(1) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. ตะแกรงโลหะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. เบอร์ 3/8", 4, 10, 20, 40, 100, 200 และ มาตรฐานตะแกรง
2. เครื่องชั่งอ่านละเอียด 0.01 กรัม
3. ภาชนะใส่ตัวอย่าง (Mixing Pan)
4. เครื่องเขย่าตะแกรง (Sieve Shaker)
5. แปรงทำความสะอาดตะแกรง



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ในการทดสอบหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis)

(2) วิธีการทดลอง

1. ทำความสะอาดตะแกรงทั้งหมดด้วยแปรงทำความสะอาด แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์บันทึกค่า (ชั่งน้ำหนักของภาตลองตะแกรงด้วย)

2. นำตะแกรงมาเรียงซ้อนกันโดยให้ตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่อยู่บน แล้วเรียงขนาดช่องเปิดเล็กตามลำดับดังนี้ เบอร์ 3/8", 4, 10, 20, 40, 100, 200 และ ภาตลองตะแกรง

3. นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้เทใส่ลงบนตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องเขย่า ใช้เวลาในการเขย่าอย่างน้อย 10 นาที แล้วนำตะแกรงแต่ละอันไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตะแกรงรวมกับดินที่ค้างบนตะแกรง นำดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงออกทิ้งแล้วทำความสะอาดตะแกรงให้เรียบร้อย

3.3.1.2 วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง (ทล. – ท. 205/2517) ASTM D1140

(1) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ตะแกรงช่องผ่านเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดช่องผ่านต่างๆ ตามต้องการ



รูปที่ 3.3 ตะแกรงขนาดต่างๆ

2. เครื่องเขย่าตะแกรง
3. เครื่องชั่ง
4. แปรงลวดทองเหลือง แปรงพลาสติก และแปรงขนสำหรับทำความสะอาดตะแกรง
5. เตาอบ
6. ภาชนะ สำหรับใช้แช่และล้างตัวอย่าง

(2) การเตรียมตัวอย่างโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง

นำตัวอย่างที่มีส่วนละเอียดจับกันเป็นก้อนไปแยกออกจากกันโดยใช้ค้อนยางทุบ แล้วนำตัวอย่างไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เพื่อหาน้ำหนักตัวอย่างแห้ง นำตัวอย่างใส่ภาชนะสำหรับใช้ล้างตัวอย่าง เทน้ำลงไปในภาชนะจนท่วมดินตัวอย่าง แช่ทิ้งไว้ประมาณ 3 - 4 ชั่วโมง แล้วนำไปเขย่าประมาณ 10 นาที ขณะเขย่าระวังอย่าให้น้ำกระฉอกออกจากภาชนะ เทตัวอย่างดินในภาชนะลงบนตะแกรงเบอร์ 200 ถ้าหากมีตัวอย่างขนาดใหญ่ปนอยู่มากควรใช้ตะแกรงที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 200 ซ้อนไว้ข้างบน แล้วใช้น้ำล้างจนกว่าไม่มีวัสดุผ่านตะแกรงเบอร์ 200 อีก เทตัวอย่างลงในภาชนะ แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$

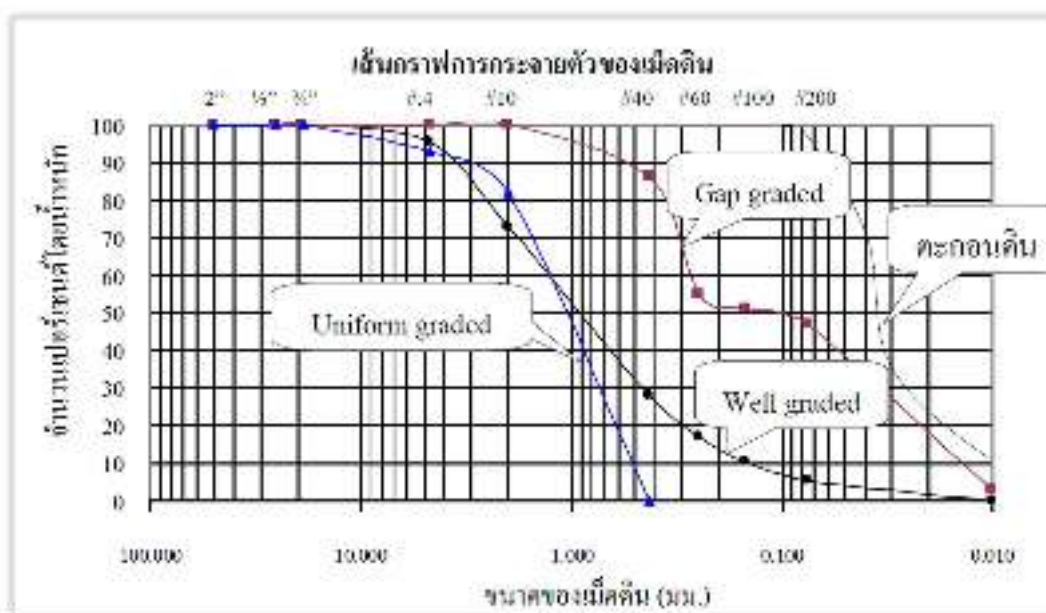
(3) วิธีการทดสอบ

1. นำตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมตัวอย่าง ปริมาณตามตารางที่ 3.1 มาทดสอบ

ตารางที่ 3.1 ปริมาณตัวอย่างสำหรับ Soil Aggregate

ขนาดตะแกรง	ปริมาณตัวอย่างไม่น้อยกว่า (kg)
4.75 มม. (เบอร์ 4)	0.5
9.5 มม. (3/8")	1.0
12.5 มม. (1/2")	2.0
19.0 มม. (3/4")	5.0
ใหญ่กว่า 25.0 มม. (1")	10.0

2. นำตัวอย่างไปเขย่าในตะแกรงขนาดต่างๆ ตามต้องการ การเขย่านี้ต้องให้ตะแกรงเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบและแนวตั้งรวมทั้งมีแรงกระแทกขณะเขย่าด้วยเขย่านานจนกระทั่งตัวอย่างผ่านตะแกรงแต่ละชนิดใน 1 นาที ไม่เกิน 1% ของตัวอย่างในตะแกรงนั้น หรือใช้เวลาเขย่านานทั้งหมดประมาณ 15 นาที เมื่อเขย่าเสร็จแล้ว ต้องไม่มีก้อนตัวอย่างซ้อนกันในตะแกรง นำตัวอย่างที่ค้างแต่ละขนาดไปชั่ง



รูปที่ 3.4 แสดงเส้นกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน

(4) คำนวณ

คำนวณหาปริมาณดินส่วนที่ค้างหรือผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ เป็นเปอร์เซ็นต์กับน้ำ หนักดินทั้งหมด ดังสมการที่ 3.1

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{ตะแกรง ดินในแต่ละน้ำ หนักของ}}{\text{ดินทั้งหมด น้ำ หนักของ}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.3.2 การทดสอบ Atterberg's Limits (ทล.-ท. 102/2515 และ 103/2515, ASTM D4318 และ D4318)

3.3.2.1 ขอบข่ายการทดสอบ

เพื่อหาปริมาณน้ำหรือความชื้นในมวลดิน (Water content, w) ณ จุดเปลี่ยนสถานะภาพของมวลดินที่สถานะต่างๆ คือสถานะของเหลว (Liquid state) พลาสติก (Plastic state) กึ่งของแข็ง (Semi-solid state) หรือของแข็ง (Solid state)

3.3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. อุปกรณ์ทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลว ประกอบด้วย
 - 1.1 เครื่องมือหาค่าขีดจำกัดเหลว
 - 1.2 อุปกรณ์ตัดร่องแบบ Casagrande
 - 1.3 ถ้วยกระเบื้อง
 - 1.4 กระป๋องเก็บตัวอย่างเพื่อหาความชื้น
 - 1.5 เครื่องชั่งอ่านได้ละเอียด 0.01 กรัม

- 1.6 เตาอบ
- 1.7 น้ำ
2. อุปกรณ์ทดสอบหาค่าขีดจำกัดพลาสติก ประกอบด้วย
 - 2.1 แผ่นกระจก
 - 2.2 กระจกป้องกันความชื้น
 - 2.3 เครื่องชั่งอ่านได้ละเอียด 0.01 กรัม
 - 2.4 ถ้วยกระเบื้อง
 - 2.5 ภาชนะผสมดิน
 - 2.6 เตาอบ
 - 2.7 น้ำ

3.3.2.3 วิธีการทดสอบ

1. ขีดจำกัดเหลว (ทล.-ท.102/2515, ASTM D4318 และ D4318)
 - 1.1 ปรับเครื่องมือหาขีดจำกัดเหลว ให้ระยะตกกระทบสูงสุด 1 เซนติเมตร โดยใช้ส่วนปลายของอุปกรณ์ตัดดินแบบ Casagrande อ้างอิงระยะตกกระทบได้
 - 1.2 ใช้ดินแห้งซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 150 – 200 กรัม หากดินมีความชื้นสูงมากกว่าร้อยละ 70 ควรผึ่งก่อนใช้ทดสอบ (แต่ห้ามใช้วิธีอบแห้ง) เติมน้ำเล็กน้อยแล้วผสมให้เข้ากัน
 - 1.3 ตัดดินที่ผสมแล้วประมาณ 150 กรัม ใส่ลงในถ้วยทองเหลืองของเครื่องมือหาขีดจำกัดเหลว ปาดหน้าให้เรียบและตัดให้เป็นร่องด้วย Casagrande grooving tool
 - 1.4 หมุนเครื่องมือด้วยความเร็วประมาณ 2 รอบต่อนาที นับจำนวนครั้งที่ตกกระทบของถ้วยทองเหลืองกับแป้น (Blow) กระทั่งร่องดินเลื่อนเข้ามาชิดกันเป็นระยะประมาณ 10 – 13 มิลลิเมตร
 - 1.5 ตัดดินส่วนที่เลื่อนมาชิดกันใส่กระป๋อง (ซึ่งน้ำหนักกระป๋องก่อนใส่ดิน) แล้วอบตัวอย่าง 24 ชั่วโมง
 - 1.6 ทำซ้ำจากข้อ (1.3) ถึงข้อ (1.5) โดยเพิ่มน้ำขึ้นเรื่อยๆ จะได้จำนวนครั้งของการหมุนกับความชื้นประมาณ 4 – 5 ค่า โดยจำนวนตกควรอยู่ระหว่าง 20 – 35 ครั้ง
 - 1.7 จากข้อ (1.5) คำนวณหาปริมาณความชื้น เมื่อนำออกจากเตาอบใหม่ ๆ ควรตั้งไว้ให้เย็นแล้วจึงชั่งน้ำหนัก
 - 1.8 สร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับจำนวนครั้งที่เคาะบนกระดาด semi-log โดยให้แกนนอนเป็นค่า $\log(N)$ และแกนตั้งเป็นค่าร้อยละความชื้น (หรือปริมาณน้ำ, w) ค่าความชื้น (ร้อยละ) ที่จำนวนเคาะ 25 ครั้ง คือค่าพิกัดเหลว
2. ขีดจำกัดพลาสติก (ทล.-ท. 103/2515, ASTM D4318)
 - 2.1 ใช้ดินตัวอย่างเดียวกับที่ใช้ทดสอบขีดจำกัดเหลว โดยปล่อยให้ดินแห้งไม่ติดมือและสามารถคลึงได้ง่าย
 - 2.2 ใช้ดินนี้ประมาณ 15 กรัม คลึงด้วยนิ้วมือที่เหยียดตรงให้เป็นแท่งยาวบนแผ่นกระจก จนกระทั่งดินมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 – 4 มิลลิเมตร และมีรอยแตกเล็กๆ เกิดขึ้นโดยรอบเส้นพอดี

2.3 นำดินที่มีรอยแตกนี้ใส่กระป๋องซึ่งน้ำหนักและอบแห้ง เพื่อหาความชื้น หากคลึงตัวอย่างดินได้ขนาดตามระบุแล้วไม่ปรากฏรอยแตกให้ผสมดินและทดสอบใหม่

2.4 ทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย

3.3.2.4 การคำนวณ

1. Liquid Limit (LL) อ่านได้จากกราฟ ที่การเคาะ 25 ครั้ง
2. Plastic Limit (PL) คำนวณจากค่าเฉลี่ยของความชื้นที่หาได้
3. Plasticity Index $PI = LL - PL$

3.3.3 วิธีการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ (ทล.-ท. 108/2517, ASTM D1557)

3.3.3.1 ขอบข่ายการทดสอบและมาตรฐานการบดอัด

การบดอัดดินแต่ละชนิดจะให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณที่เหมาะสมไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการบดอัด การบดอัดในห้องปฏิบัติการจะใช้เป็นมาตรฐานในการบดอัดในภาคสนาม โดยมี 2 แบบที่นิยมใช้เป็นมาตรฐานคือ การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) และการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) หลักการในการบดอัดทั้งสองแบบเหมือนกัน แตกต่างที่ใช้พลังงานในการบดอัดที่ไม่เท่ากันโดยการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะใช้พลังงานในการบดอัดที่มากกว่าการบดอัดแบบมาตรฐานประมาณ 4.5 เท่า โดยในโครงการนี้จะใช้วิธีการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และใช้แบบ (Mold) ขนาด 6 นิ้ว ในการทดสอบ

3.3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แบบ (Mold) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว
2. ค้อนบดอัดแบบมาตรฐานหนัก 10 ปอนด์ ระยะยก 18 นิ้ว
3. แม่แรงสำหรับดันดินตัวอย่างออกจากแบบ
4. เหล็กปาดดิน
5. ตะแกรงร่อนดินขนาดเบอร์ 4
6. เครื่องชั่งอ่านได้ละเอียด 0.1 กรัม ถึง 10 กิโลกรัม
7. ถาดผสมดิน
8. เตาอบ
9. กระบอกตวงน้ำ มีขีดแบ่งปริมาตร
10. ช้อนตักดิน
11. ค้อนยาง
12. กระป๋องใส่ตัวอย่างดิน



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

3.3.3.3 วิธีการทดสอบ

1. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงของ Mold เพื่อหาปริมาตรของดินใน Mold จากนั้น ประกอบ Mold เข้ากับแผ่นฐาน นำไปชั่งน้ำหนักโดยไม่ต้องชั่งส่วนของปลอกสวม

2. ตักดินใส่ Mold ที่ประกอบไว้แล้ว โดยประมาณให้ความสูงในแต่ละชั้นเท่าๆ กัน 5 ชั้น และใช้ค้อนหนัก 10 ปอนด์ สำหรับการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน บดอัดแต่ละชั้นให้ทั่วทั้ง Mold จำนวนชั้นละ 56 ครั้ง เมื่อถึงชั้นที่ทำให้ดินพื้นขอบ Mold ขึ้นไปประมาณ 1-2 เซนติเมตร นำเหล็ก ปาดดินมาปาดหน้าให้เรียบ ถ้าเกิดมีหลุมเล็กๆ ซึ่งเกิดจากการหลุดของเม็ดดินระหว่างการปาดหน้า ดิน ให้นำดินที่ถูกปาดออกมาอุดแต่งช่องว่างให้เต็ม ใช้แปรงปัดทำความสะอาดดินที่ค้างอยู่นอก Mold ออก นำไปชั่งน้ำหนักหาน้ำหนักดินใน Mold ให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นเปียก (Wet density) หาได้จากสมการที่ 3.2

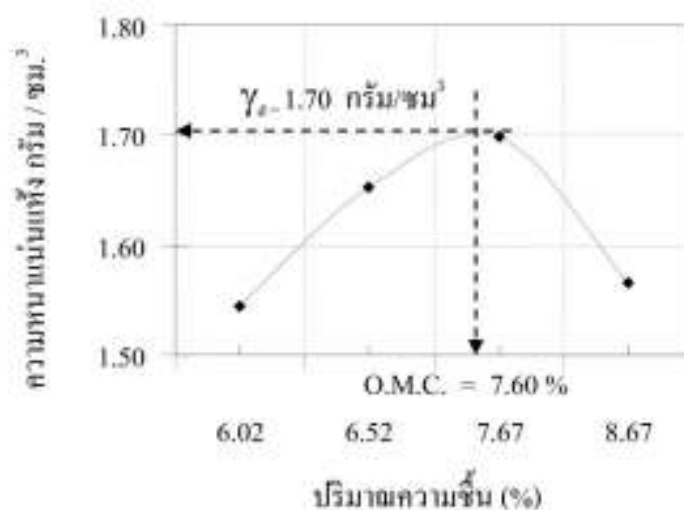
$$\rho_{wet} = \frac{M}{V} \quad (3.2)$$

โดย ρ_{wet} คือ ค่าความหนาแน่นเปียก
 M คือ น้ำหนักของดินใน Mold ที่ถูกบดอัด
 V คือ ปริมาตรของดินใน Mold ที่ถูกบดอัด

3. ดันดินตัวอย่างออกจาก Mold แล้วผ่ากลางตามแนวตั้ง เก็บตัวอย่างดินตามแนวผ่าอย่างน้อย 100 กรัม แล้วนำไปชั่งหาน้ำหนัก นำเข้าเตาอบเพื่อหาปริมาณความชื้น (w) เพื่อนำไปหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งต่อไป

4. ทูบตัวอย่างดินที่เหลือให้แตกออกจากกันจนร่วน แล้วผสมน้ำเพิ่มอีก 2-3 % คลุกเคล้ากันให้ทั่วสม่ำเสมอ แล้วทำการทดสอบซ้ำตามข้อที่ 4 จนกระทั่ง น้ำหนักดินใน Mold ที่ชั่งได้ครั้งสุดท้ายลดลง ควรเพิ่มปริมาณน้ำอย่างน้อย 5 ครั้ง

5. หาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum Dry density) และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ให้ดินแน่นที่สุด (OWC) จากการเขียนเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณความชื้น และหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้น และ หน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัด (มานิต, 2552)

หน่วยน้ำหนักแห้งหาได้จากสมการที่ 3.3

$$\rho_d = \frac{\rho_{wet}}{1 + w} \quad (3.3)$$

โดย ρ_d คือ ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง
 ρ_{wet} คือ ค่าความหนาแน่นเปียก
 w คือ ความชื้นในมวลดิน

7. ทำซ้ำตามข้อ 2-6 โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของน้ำตามลำดับ

3.3.4 การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบร์ริง เรโซ (California Bearing Ratio), (ทล.-ท. 109/2515, ASTM D 1883-67)

3.3.4.1 ขอบข่าย

การทดสอบ California Bearing Ratio หรือเรียกสั้น ๆ ว่า การทดสอบ CBR เป็นการทดสอบที่กำหนดขึ้น เพื่อหาค่าเปรียบเทียบกับ Bearing Value ของวัสดุตัวอย่างกับวัสดุดินมาตรฐาน เมื่อทำการบดทับตัวอย่างนั้น โดยใช้ Piston ในการบดทับในแบบโมลที่ Optimum Moisture Content หรือปริมาณน้ำในดินใดๆ เพื่อนำมาใช้ศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ในการบดทับให้ได้ความแน่นและความชื้นตามต้องการ การทดสอบ CBR ทำได้ 2 วิธีคือ

- ก. การทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)
- ข. การทดสอบแบบแช่น้ำ (Soaked)

3.3.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แบบหล่อทดสอบการบดอัดประกอบด้วยโมลสำหรับเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว พร้อมปลอกสวมสูง 2.5 นิ้ว และแผ่นฐานรองสำหรับยึดโมลและปลอกสวม



รูปที่ 3.7 โมลการบดอัดดิน, ปลอกสวม และแผ่นฐานยึด

2. แผ่นวัดการบวมตัว (Swell Plate) แผ่นทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม.หนา 0.635 ซม. เจาะรูพูน พร้อมขาตั้งรับขามาตรวัดปรับระดับได้

3. แผ่นถ่วงน้ำหนักแบบวงแหวนเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 14.9 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6.35 ซม.หนักแผ่นละ 2.27 กก. (5 ปอนด์)

4. Piston ทำด้วยโลหะหน้าตัดวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.7 นิ้ว ยาว 10.4 นิ้ว มีพื้นที่หน้าตัด 25.5 ตารางนิ้ว

5. ท่อนกด (Penetration Piston) ทำด้วยโลหะทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.95 นิ้ว ยาว 4 นิ้ว มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว

6. เครื่องชั่งน้ำหนัก ที่มีขีดความสามารถชั่งได้ไม่น้อยกว่า 16 กิโลกรัม ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กิโลกรัม

7. เครื่องชั่งน้ำหนัก ที่มีขีดความสามารถชั่งได้ไม่น้อยกว่า 2 กิโลกรัม ชั่งได้ละเอียดถึง 0.001 กิโลกรัม

8. เครื่องกด (Loading Machine) เป็นเครื่องทดสอบเพื่อหาค่า CBR ต้องมีขีดความสามารถรับแรงกดไม่น้อยกว่า 5,000 กิโลกรัม กดด้วยอัตราเร็ว 1.27 มิลลิเมตร (0.05 นิ้ว) ต่อนาที

9. Dial Gauge

10. เตาอบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110 ± 5 °c

11. นาฬิกาจับเวลา

12. กระป๋องสำหรับใส่ตัวอย่างดินเพื่อไปอบ

3.3.4.3 วิธีการทดสอบ

ก. การทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)

1. คลุกเคล้าตัวอย่างดินกับปริมาณน้ำที่คำนวณได้จากการทดสอบ Compaction Test, ASTM D1557
2. ทำการบดอัดตามมาตรฐาน ASTM D1557 ใช้ค้อนบดอัดขนาด 4.54 กก. ระยะตก 18 นิ้ว ทำการบดอัดจำนวน 5 ชั้นๆ ละ 56 ครั้ง
3. นำตัวอย่างขึ้นติดตั้งบนเครื่องกด ตั้งให้ท่อนกดอยู่ตรงพอดีกับกึ่งกลางรูของแผ่นถ่วงน้ำหนัก
4. เปิดเครื่องจนท่อนกดสัมผัสกับผิวหน้าดินพอดี ตั้งหน้าปัดของ Proving Ring และ Dial Gauge ให้เป็นศูนย์
5. เพิ่มแรงลงบนท่อนกด ด้วยอัตราเร็วที่สม่ำเสมอ 0.05 นิ้วต่อนาที โดยอ่านค่า Penetration Dial Gauge เทียบกับนาฬิกาจับเวลา
6. ทำการบันทึกแรงกด เมื่อ Penetration เพิ่มขึ้นทุกๆ 0.025 นิ้ว ถึง 0.5 นิ้ว
7. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะที่ท่อนกดจมลงในตัวอย่างเพื่อหาค่า CBR ต่อไป

ข. การทดสอบแบบแช่น้ำ (Soaked)

1. เตรียมตัวอย่างทดสอบตามขั้นตอนที่ 1 – 2 เช่นเดียวกับวิธีการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ และต่อจากนั้นให้วางกระดาษกรองลงบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบในโมล
2. วางแผ่นวัดการบวมตัวและวางแผ่นน้ำหนักลงตามลำดับ
3. นำเอาโมลที่เตรียมไว้ไปแช่น้ำในภาชนะที่เตรียมไว้ ให้น้ำท่วมแผ่นน้ำหนักประมาณ 1 นิ้ว ใช้มาตรวัดที่อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว ยึดติดกับสามขาแล้ววางบนปากโมล จัดให้ปลายของมาตรวัดแตะสัมผัสกับก้านแผ่นวัดการบวมตัวเพื่อวัดหาค่าการบวมตัวของดิน
4. อ่านค่าการบวมตัวของตัวอย่างทดสอบทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งครบ 96 ชั่วโมง หรือเมื่อตัวอย่างทดสอบหยุดการบวมตัว เสร็จแล้วนำขึ้นมาจากน้ำ และนำอุปกรณ์ที่ประกอบการหาค่าการบวมตัวออกให้หมดแล้วคว่ำโมล ปล่อยทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้ น้ำระบายออกจากตัวอย่างทดสอบ จนไม่มีน้ำขังบนผิวหน้าและระวังอย่าให้ผิวหน้าของตัวอย่างเสียหาย
5. ถอดแบบเหล็กออกจากฐานให้หมด นำมวลพร้อมดินไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าน้ำหนักของดินตัวอย่างทดสอบในโมล
6. นำน้ำหนักกดทับเดิมวางลงบนตัวอย่างให้กดทับลงบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบ แล้วให้นำไปวางในเครื่องทดสอบแรงกด
7. ปรับแท่งกดโดยให้ผ่านรูตรงกลางของแผ่นน้ำหนักและให้แท่งกดสัมผัสกับผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบพอดี โดยค่อยๆ ปรับและคอยสังเกตเข็มของมาตรวัด เริ่มจะหมุนเคลื่อนที่จึงหยุดปรับ จากนั้นทำการติดตั้งวงแหวนวัดแรงเพื่ออ่านค่าระยะจมของแท่งกดแล้วทำการปรับมาตรวัดทั้งสองให้เข็มอยู่ในตำแหน่งเลขศูนย์

8. เริ่มกดแท่งกดลงบนตัวอย่างทดสอบด้วยอัตราการกด 0.05 นิ้วต่อนาที ต่อเนื่องกันอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอให้อ่านค่าน้ำหนักกดจากมาตรวัดที่ระยะจมนับ ดังนี้ 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.175, 0.200, 0.250, 0.300, 0.350, 0.400, 0.450 และ 0.500 นิ้ว ตามลำดับ

9. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด และระยะที่ท่อนกดจมลงในตัวอย่าง เพื่อหาค่า CBR ต่อไป

3.3.5 การเตรียมตัวอย่างดินแบบ Static method

ก. การทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)

1. คำนวณหาน้ำหนักของตัวอย่างดิน ที่ความหนาแน่นใดๆ ที่ได้จากการทดสอบ Compaction Test (ทล.-ท. 108/2515, ASTM D1557)

2. จากการทดสอบ Compaction Test ตามการทดสอบที่ (ทล.-ท. 108/2517, ASTM D1557) จะทราบปริมาณน้ำในดินที่ความหนาแน่นใด

3. เติมน้ำตามที่คำนวณได้

4. คลุกเคล้าตัวอย่างดินที่เติมน้ำแล้ว

5. แบ่งตัวอย่างดินใส่ลงในโมล โดยประมาณให้ตัวอย่างแต่ละชั้นเมื่อบดทับแล้วมีความสูงประมาณ 1 ใน 5



รูปที่ 3.8 แบ่งดินเท่าๆกันออก 5 ส่วนใส่ถาดเพื่อเตรียมการบดอัด

6. ทำการบดทับด้วย Piston ที่ออกแบบไว้ โดยใช้แม่แรงยกโมลขึ้นไปหา Piston



รูปที่ 3.9 การบดอัดด้วยแม่แรงโดยให้ความหนาของชั้นดินเท่ากันทั้ง 5 ชั้น

7. นำตัวอย่างขึ้นติดตั้งบนเครื่องกด ตั้งให้ท่อนกดอยู่ตรงพอดีกับกึ่งกลางรูของแผ่นถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 3.10 เครื่องกดทดสอบ CBR Test

8. เปิดเครื่องจนท่อนกดสัมผัสกับผิวหน้าดินพอดี ตั้งหน้าปัดของ Proving Ring และ Dial Gauge ให้เป็นศูนย์

9. เพิ่มแรงลงบนท่อนกด ด้วยอัตราเร็วที่สม่ำเสมอ 0.05 นิ้วต่อนาที โดยอ่านค่า Penetration Dial Gauge เทียบกับนาฬิกาจับเวลา

10. ทำการบันทึกแรงกด เมื่อ Penetration เพิ่มขึ้นทุกๆ 0.025 นิ้ว ถึง 0.5 นิ้ว

11. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะที่ท่อนกดจมลงในตัวอย่างเพื่อหาค่า CBR ต่อไป

ข. การทดสอบแบบแช่น้ำ (Soaked)

1. เตรียมตัวอย่างทดสอบตามขั้นตอนที่ 1 – 6 เช่นเดียวกับวิธีการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ และต่อจากนั้นให้วางกระดาษกรองลงบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบในโมล

2. วางแผ่นวัดการบวมตัวและวางแผ่นน้ำหนักลงตามลำดับ

3. นำเอาโมลที่เตรียมไว้ไปแช่น้ำในภาชนะที่เตรียมไว้ ให้น้ำท่วมแผ่นน้ำหนักประมาณ 1 นิ้ว ใช้มาตรวัดที่อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว ยึดติดกับสามขาแล้ววางบนปากโมล จัดให้ปลายของมาตรวัดแตะสัมผัสกับก้านแผ่นวัดการบวมตัวเพื่อวัดค่าการบวมตัวของดิน

4. อ่านค่าการบวมตัวของตัวอย่างทดสอบทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งครบ 96 ชั่วโมง หรือเมื่อตัวอย่างทดสอบหยุดการบวมตัว เสร็จแล้วนำขึ้นมาจากน้ำ และนำอุปกรณ์ที่ประกอบการหาค่าการบวมตัวออกให้หมดแล้วคว่ำโมล ปล่อยทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้ น้ำระบายออกจากตัวอย่างทดสอบ จนไม่มีน้ำขังบนผิวหน้าและระวังอย่าให้ผิวหน้าของตัวอย่างเสียหาย

5. ถอดแบบเหล็กออกจากฐานให้หมด นำมวลพร้อมดินไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าน้ำหนักของดินตัวอย่างทดสอบในโมล

6. นำน้ำหนักรีดทับเดิมวางลงบนตัวอย่างให้กดทับลงบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบ แล้วให้นำไปวางในเครื่องทดสอบแรงกด

7. ปรับแท่งกดโดยให้ผ่านรูตรงกลางของแผ่นน้ำหนักรีดและให้แท่งกดสัมผัสกับผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบพอดี โดยค่อยๆ ปรับและคอยสังเกตเข็มของมาตรวัด เริ่มจะหมุนเคลื่อนที่จึงหยุดปรับ จากนั้นทำการติดตั้งวงแหวนวัดแรงเพื่ออ่านค่าระยะจมของแท่งกดแล้วทำการปรับมาตรวัดทั้งสองให้เข็มอยู่ในตำแหน่งเลขศูนย์

8. เริ่มกดแท่งกดลงบนตัวอย่างทดสอบด้วยอัตราการกด 0.05 นิ้วต่อนาที ต่อเนื่องกันอย่างสม่ำเสมอ ให้อ่านค่าน้ำหนักกดจากมาตรวัดที่ระยะจม ดังนี้ 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.175, 0.200, 0.250, 0.300, 0.350, 0.400, 0.450 และ 0.500 นิ้ว ตามลำดับ

9. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด และระยะที่ท่อนกดจมลงในตัวอย่าง เพื่อหาค่า CBR ต่อไป

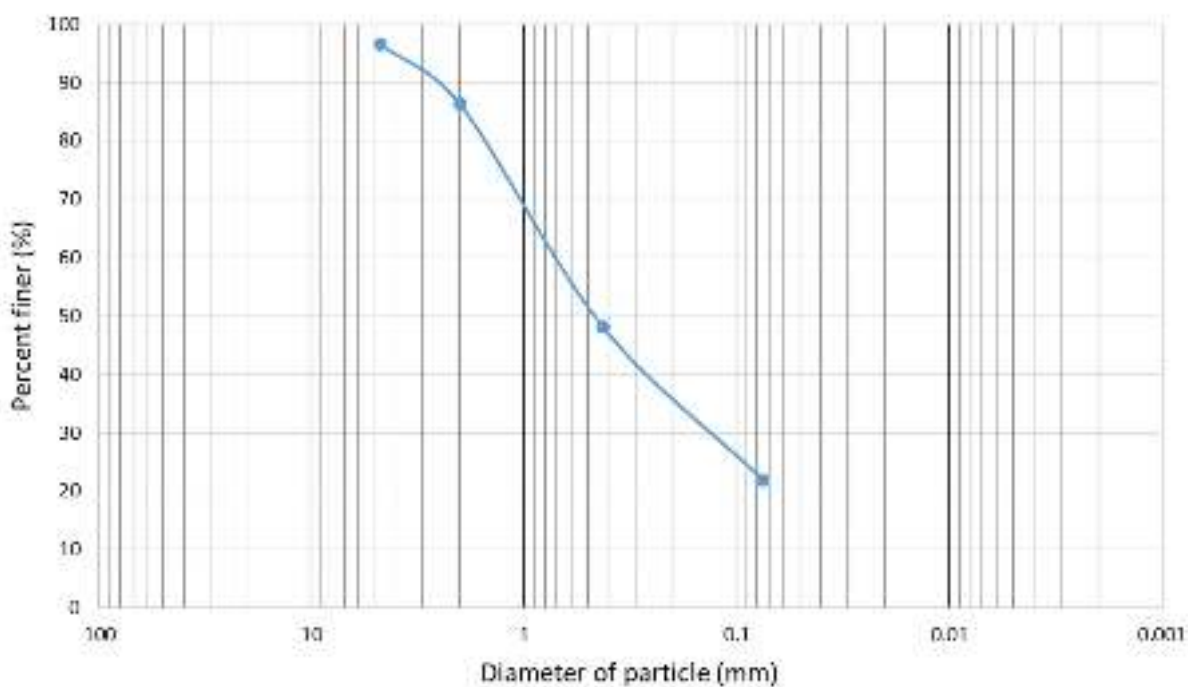
บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าซีพียาร์ของตัวอย่างดินจากจังหวัดชลบุรี เพื่อสร้างเส้นชั้นความสูงของค่าซีพียาร์ของดินใต้กราฟการบดอัดดิน โดยมีผลทดสอบดังนี้

4.1 การทดสอบการหาขนาดเม็ดดิน (Grain Size Analysis)

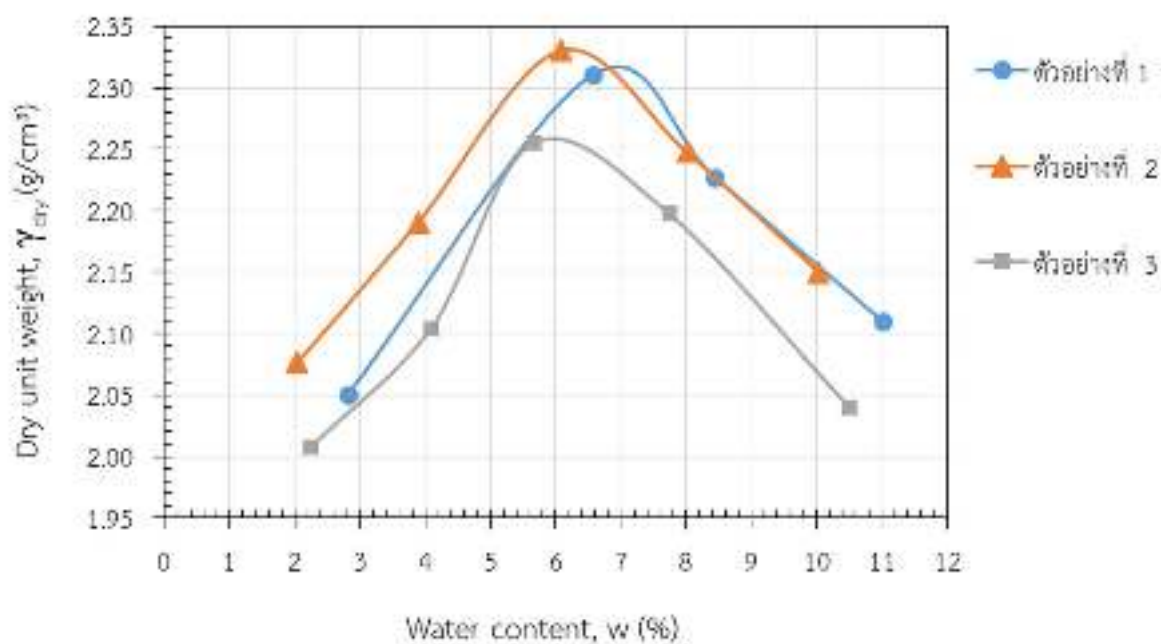
ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบ Grain Size Analysis ในดิน ด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงแบบเปียกตามมาตรฐาน ASTM D1140 เพื่อศึกษาการกระจายตัวของเม็ดดินตัวอย่างที่จะนำไปใช้ในการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานและการทดสอบซีพียาร์ ผลการกระจายตัวของดินแสดงดังรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดินมีการกระจายของขนาดละเอียด และเมื่อจำแนกประเภทของดินตามระบบ Unified Soil Classification System ตามมาตรฐาน ASTM D2487 พบว่าดินที่นำมาทดสอบเป็นดินทรายมีตะกอนทรายปน (silty sand, SM)



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของเม็ดดิน

4.2 การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

ทำการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการเพื่อหาความชื้นที่เหมาะสมที่ทำให้ดินมีความหนาแน่นมากที่สุดและเพื่อสร้างกราฟการบดอัดดิน (compaction curve) โดยทำการทดสอบการบดอัดกับดินทั้งหมด 3 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1 รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3

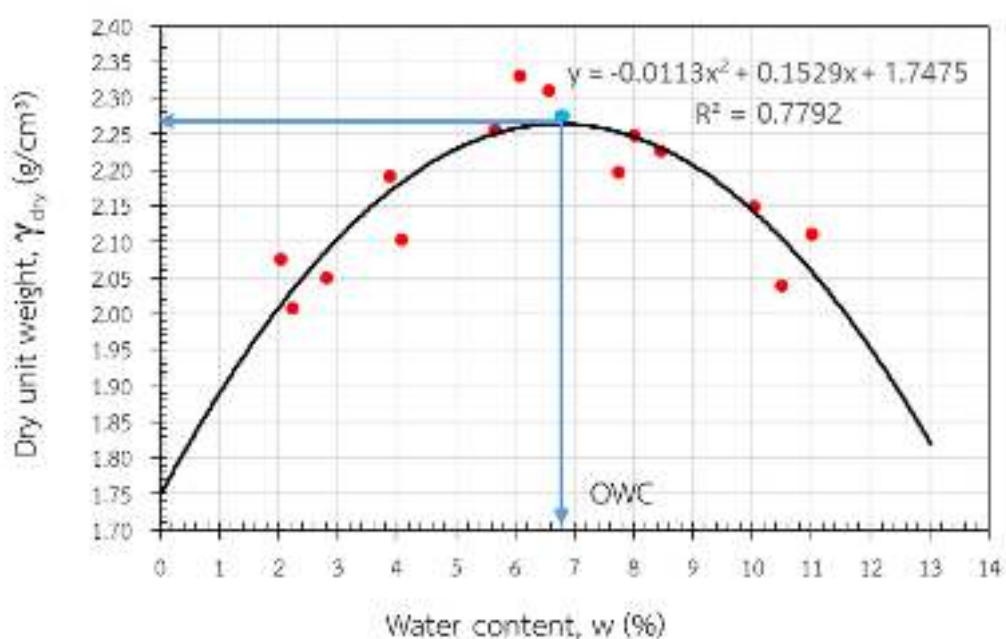


รูปที่ 4.2 กราฟการบดอัดดิน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

Sample	Water content, w (%)	Dry unit weight, γ_{dry} (g/cm³)
1	2.81	2.05
	6.57	2.31
	8.44	2.23
	11.01	2.11
2	2.04	2.08
	3.89	2.19
	6.08	2.33
	8.02	2.25
	10.03	2.15

3	2.24	2.01
	4.08	2.10
	5.67	2.25
	7.74	2.20
	10.50	2.04

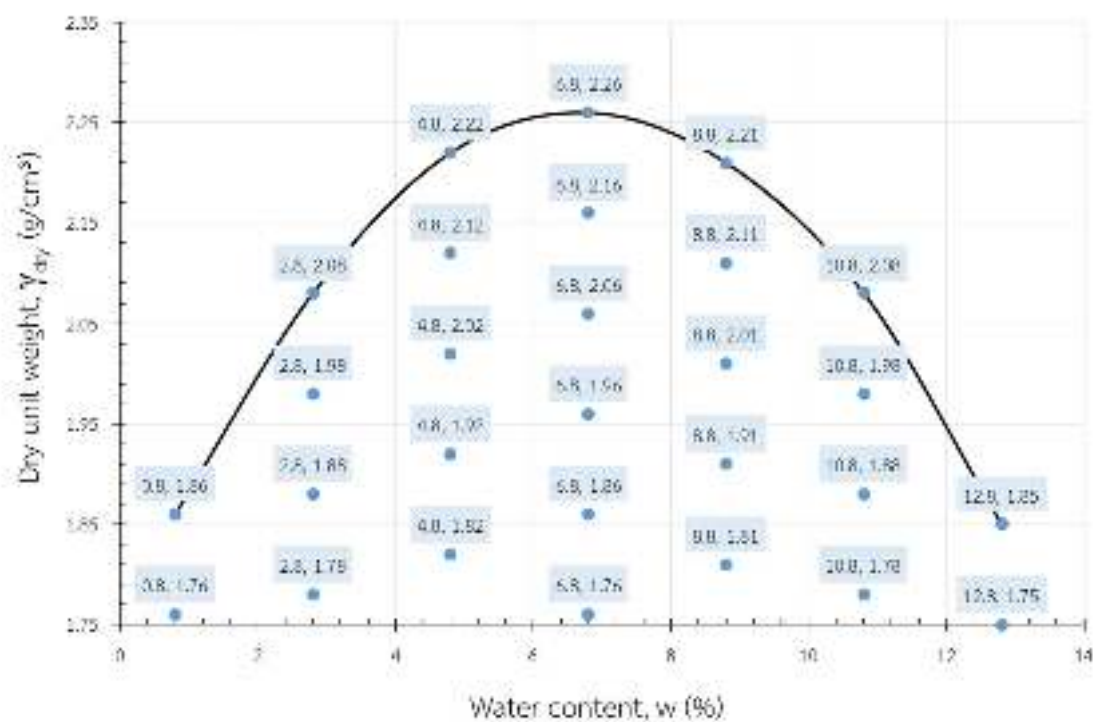


รูปที่ 4.3 กราฟเส้นแนวโน้ม Compaction Curve

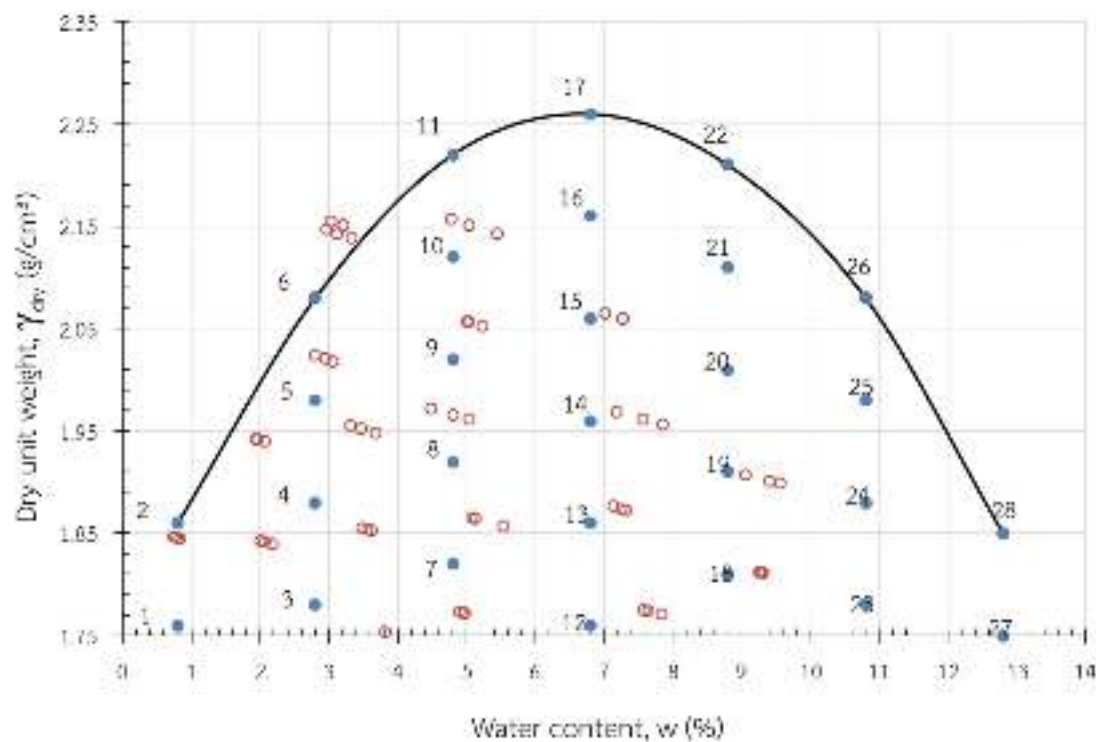
จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่ากราฟการบดอัดดินทั้งสามตัวอย่างมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ ค่าหน่วยน้ำหนักของดินมาค่าแปรผันตามปริมาณความชื้นในดิน โดยในด้านแห้ง (dry side) เมื่อปริมาณความชื้นในดินเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งจะมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด และค่าหน่วยน้ำหนักแห้งจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นในดินเพิ่มขึ้นในด้านเปียก (wet side) และพบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum water content, OWC) มีค่าเท่ากับ 6.8% และค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{dry,max}$) มีค่าเท่ากับ 2.27 g/cm^3

4.3 การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทำการทดสอบซีบีอาร์

ตัวอย่างดินจะถูกทำการทดสอบซีบีอาร์ (California Bearing Ratio) ทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำตามมาตรฐาน ASTM D1883 โดยการเตรียมตัวอย่างจะใช้วิธีการบดอัดแบบสถิตยศาสตร์ (static method) โดยกำหนดค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของแต่ละตัวอย่างคงที่ภายใต้กราฟการบดอัด 28 จุด ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่กำหนดของแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 4.5 ค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างจริงของตัวอย่างแบบไม่แน่น้ำ

จากการเตรียมตัวอย่างดินตามค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่กำหนดพบว่า ตัวอย่างดินแบบไม่แน่น้ำที่เตรียมได้มีค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งคลาดเคลื่อนไปจากที่กำหนดดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5

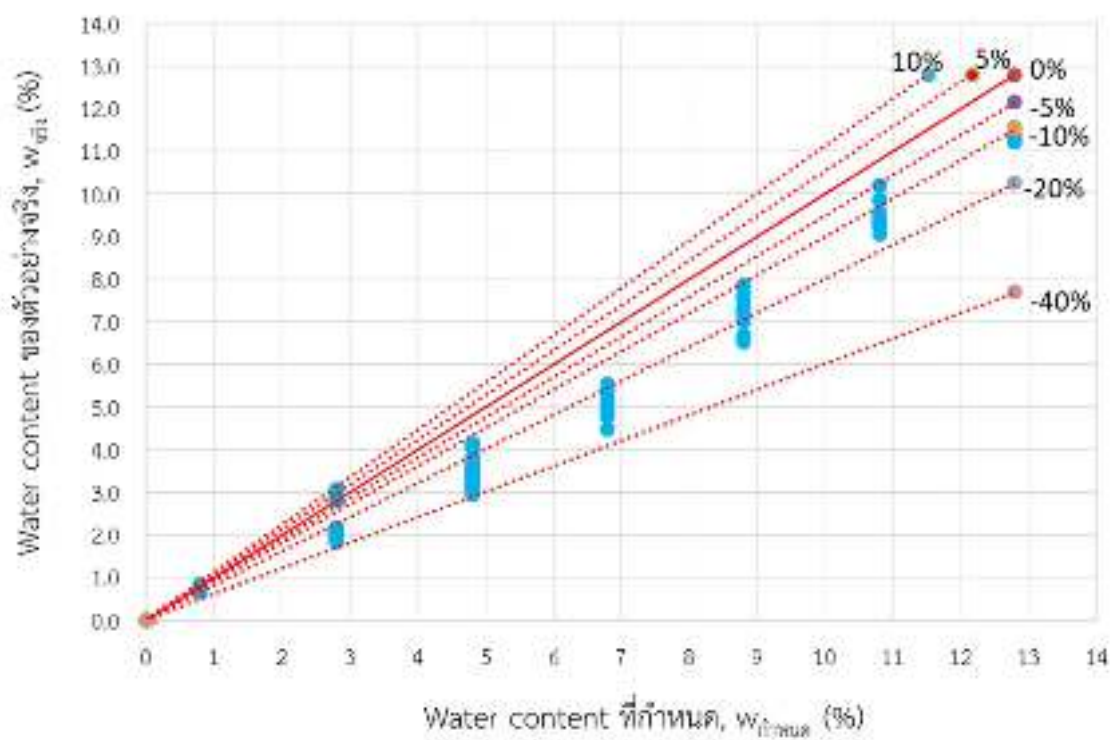
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นความคลาดเคลื่อนของปริมาณความชื้นกับหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างแบบไม่แน่น้ำ

point	Water content, w ที่คาดหวัง	Water content, w ตามจริง	%ความคลาดเคลื่อน water content	Dry unit weight ที่คาดหวัง	Dry unit weight ตามจริง	%ความคลาดเคลื่อน dry unit wt.
	%	%	%	(g/m³)	(g/m³)	%
1	0.8	0.65	-18.21	1.76	1.75	-0.65
	0.8	0.73	-9.16	1.76	1.75	-0.72
	0.8	0.75	-5.91	1.76	1.75	-0.75
2	0.8	0.79	-1.83	1.86	1.85	-0.78
	0.8	0.83	4.08	1.86	1.84	-0.83

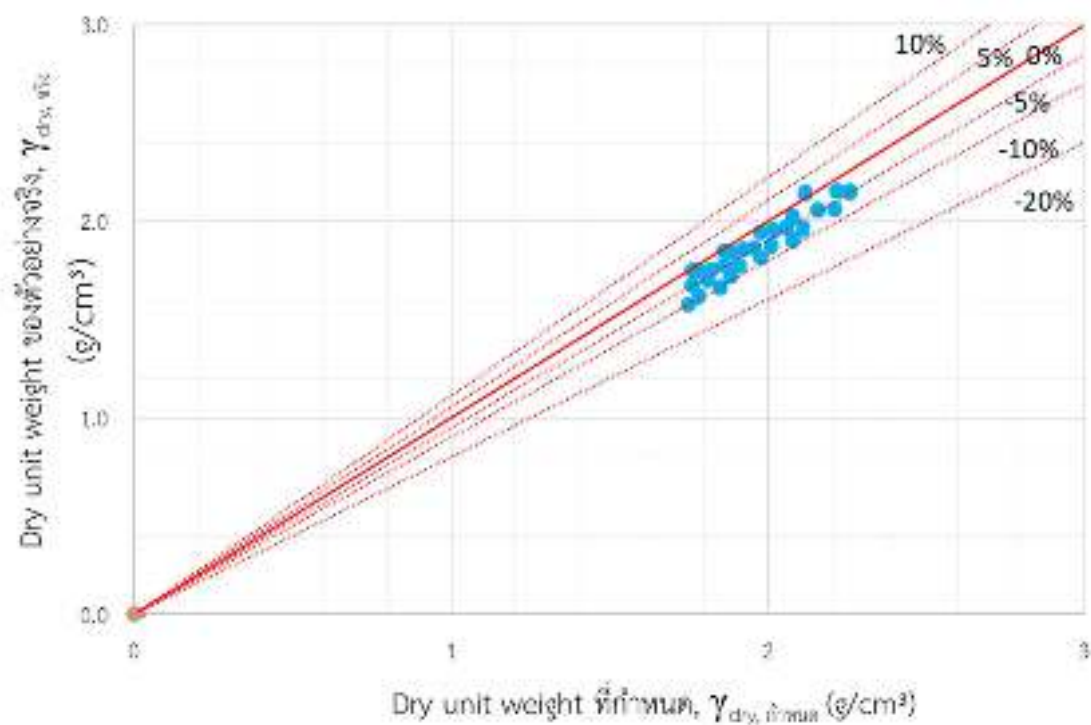
	0.8	0.74	-7.73	1.86	1.85	-0.73
3	2.8	2.17	-22.61	1.78	1.74	-2.12
	2.8	1.84	-34.15	1.78	1.75	-1.81
	2.8	2.01	-28.34	1.78	1.74	-1.97
4	2.8	2.00	-28.55	1.88	1.84	-1.96
	2.8	2.06	-26.44	1.88	1.84	-2.02
	2.8	2.17	-22.42	1.88	1.84	-2.13
5	2.8	1.95	-30.27	1.98	1.94	-1.92
	2.8	2.07	-26.19	1.98	1.94	-2.02
	2.8	1.93	-31.19	1.98	1.94	-1.89
6	2.8	2.94	5.00	2.08	2.02	-2.86
	2.8	2.79	-0.36	2.08	2.02	-2.71
	2.8	3.06	9.29	2.08	2.02	-2.97
7	4.8	3.81	-20.63	1.82	1.75	-3.67
	4.8	4.03	-16.04	1.82	1.75	-3.87
	4.8	4.17	-13.13	1.82	1.75	-4.00
8	4.8	3.62	-24.58	1.92	1.85	-3.49
	4.8	3.48	-27.50	1.92	1.86	-3.36
	4.8	3.55	-26.04	1.92	1.85	-3.43
9	4.8	3.31	-31.04	2.02	1.96	-3.20
	4.8	3.47	-27.71	2.02	1.95	-3.35
	4.8	3.68	-23.33	2.02	1.95	-3.55
10	4.8	3.33	-30.63	2.12	2.14	0.89
	4.8	2.96	-38.33	2.12	2.15	1.25
	4.8	3.12	-35.00	2.12	2.14	1.09
11	4.8	3.21	-33.13	2.22	2.15	-3.11
	4.8	3.20	-33.33	2.22	2.15	-3.10
	4.8	3.02	-37.08	2.22	2.15	-2.93
12	6.8	5.34	-21.47	1.76	1.67	-5.07

	6.8	5.10	-25.00	1.76	1.67	-4.85
	6.8	5.21	-23.38	1.76	1.67	-4.95
13	6.8	4.95	-27.21	1.86	1.77	-4.72
	6.8	4.89	-28.09	1.86	1.77	-4.66
	6.8	4.97	-26.91	1.86	1.77	-4.73
14	6.8	5.53	-18.68	1.96	1.86	-5.24
	6.8	5.08	-25.29	1.96	1.87	-4.83
	6.8	5.13	-24.56	1.96	1.86	-4.88
15	6.8	4.80	-29.41	2.06	1.97	-4.58
	6.8	4.49	-33.97	2.06	1.97	-4.30
	6.8	5.03	-26.03	2.06	1.96	-4.79
16	6.8	5.04	-25.88	2.16	2.06	-4.80
	6.8	5.00	-26.47	2.16	2.06	-4.76
	6.8	5.23	-23.09	2.16	2.05	-4.97
17	6.8	5.45	-19.85	2.26	2.14	-5.17
	6.8	5.04	-25.88	2.26	2.15	-4.80
	6.8	4.78	-29.71	2.26	2.16	-4.56
18	8.8	6.70	-23.86	1.81	1.70	-6.28
	8.8	6.53	-25.80	1.81	1.70	-6.13
	8.8	6.63	-24.66	1.81	1.70	-6.22
19	8.8	7.83	-11.02	1.91	1.77	-7.26
	8.8	7.57	-13.98	1.91	1.78	-7.04
	8.8	7.64	-13.18	1.91	1.77	-7.10
20	8.8	7.32	-16.82	2.01	1.87	-6.82
	8.8	7.26	-17.50	2.01	1.87	-6.77
	8.8	7.13	-18.98	2.01	1.88	-6.66
21	8.8	7.56	-14.09	2.11	1.96	-7.03
	8.8	7.85	-10.80	2.11	1.96	-7.28
	8.8	7.18	-18.41	2.11	1.97	-6.70

22	8.8	7.01	-20.34	2.21	2.07	-6.55
	8.8	7.27	-17.39	2.21	2.06	-6.78
	8.8	7.28	-17.27	2.21	2.06	-6.79
23	10.8	10.22	-5.37	1.78	1.61	-9.27
	10.8	9.88	-8.52	1.78	1.62	-8.99
	10.8	9.84	-8.89	1.78	1.62	-8.96
24	10.8	9.29	-13.98	1.88	1.72	-8.50
	10.8	9.53	-11.76	1.88	1.72	-8.70
	10.8	9.40	-12.96	1.88	1.72	-8.59
25	10.8	9.26	-14.26	1.98	1.81	-8.48
	10.8	9.31	-13.80	1.98	1.81	-8.52
	10.8	9.29	-13.98	1.98	1.81	-8.50
26	10.8	9.41	-12.87	2.08	1.90	-8.60
	10.8	9.06	-16.11	2.08	1.91	-8.31
	10.8	9.55	-11.57	2.08	1.90	-8.72
27	12.8	11.22	-12.34	1.75	1.57	-10.09
	12.8	11.25	-12.11	1.75	1.57	-10.11
	12.8	11.22	-12.34	1.75	1.57	-10.09
28	12.8	11.31	-11.64	1.85	1.66	-10.16
	12.8	11.55	-9.77	1.85	1.66	-10.35
	12.8	11.48	-10.31	1.85	1.66	-10.30



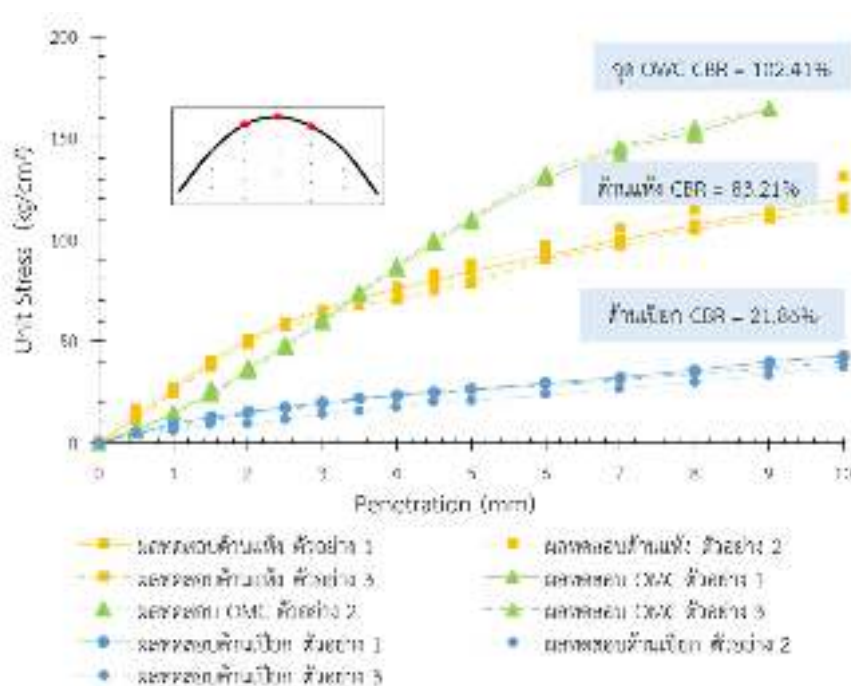
รูปที่ 4.6 ความคลาดเคลื่อนของปริมาณความชื้นของตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำ



รูปที่ 4.7 ความคลาดเคลื่อนของหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำ

รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของจุดที่กำหนดกับตัวอย่างจริงแบบไม่แช่น้ำที่ถูกเตรียมขึ้นโดยวิธีบดอัดแบบสถิตศาสตร์ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง +10% ถึง -40% และ +3% ถึง -10% สำหรับค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งตามลำดับ

4.4 การทดสอบซีบีอาร์ (California Bearing Ratio) แบบไม่แช่น้ำ



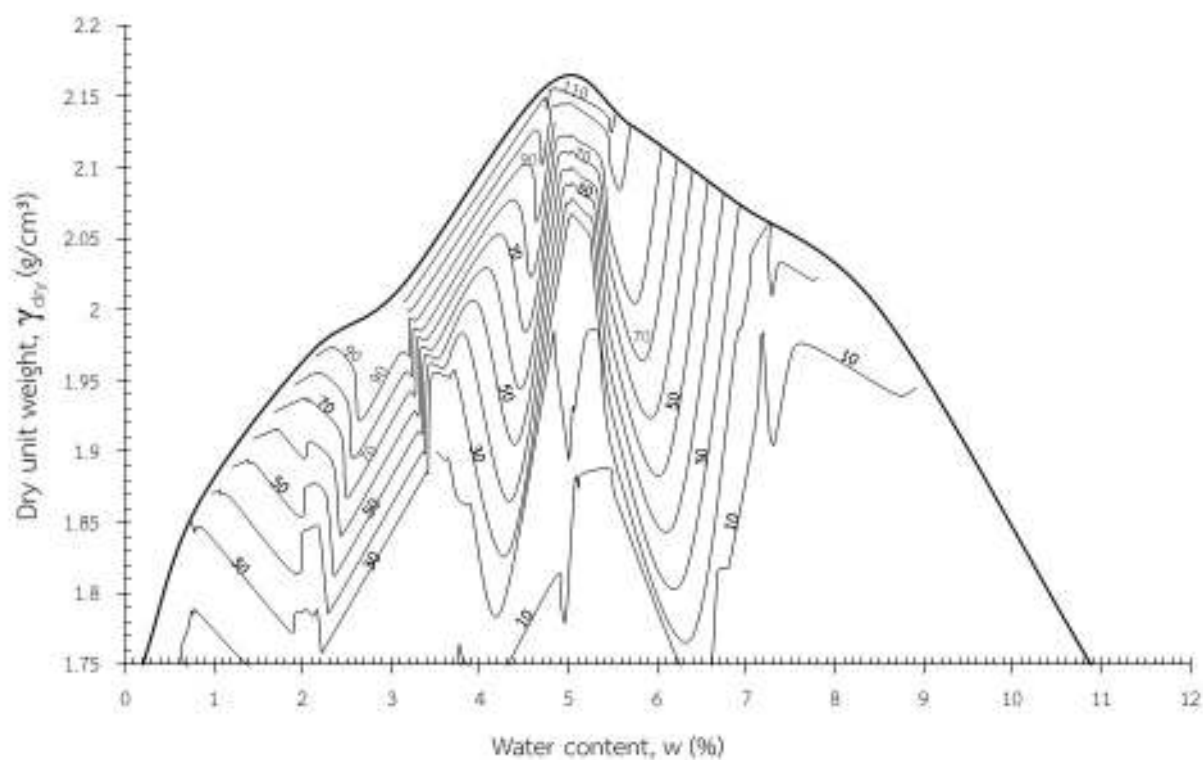
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบซีบีอาร์ และรูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างดินด้านแห้ง ตัวอย่างดินที่จุด OWC และตัวอย่างดินด้านเปียก จะเห็นว่าค่าซีบีอาร์มีค่าแปรผันตามหน่วยน้ำหนักและปริมาณความชื้น จากการทดสอบได้คำนวณหาค่าซีบีอาร์ที่ระยะการจมตัวที่ 2.5 และ 5.0 มิลลิเมตร พบว่าในระยะการจมตัวที่ 2.5 มิลลิเมตร ค่าซีบีอาร์จะมีค่ามากสุดในด้านแห้ง ดินที่มีปริมาณความชื้นที่ OWC ค่าซีบีอาร์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และในด้านเปียกค่าซีบีอาร์จะได้ค่าน้อยสุด ส่วนค่าซีบีอาร์ที่ระยะการจมตัวที่ 5 มิลลิเมตร ค่าซีบีอาร์ในด้านแห้งจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากหน้าดินเกิดการวิบัติได้ง่ายเพราะปริมาณความชื้นไม่เพียงพอที่เชื่อมประสานเม็ดดินเข้าด้วยกัน ดินที่มีปริมาณความชื้นที่ OWC ค่าซีบีอาร์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และในดินด้านเปียกค่าซีบีอาร์จะน้อยสุดเพราะน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดินทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาณที่เท่ากันลดลงส่งผลให้การรับน้ำหนักของดินลดลงไปด้วย

ตารางที่ 4.3 ผลสรุปการทดลองที่ได้จากการทดสอบซีปีอาร์แบบไม่แช่น้ำ

NO.	CBR (%)			
	Simple 1	Simple 2	Simple 3	Average
1	22.76	15.93	14.08	17.59
2	31.15	27.74	29.59	29.49
3	23.47	24.32	22.05	23.28
4	39.12	38.41	37.13	38.22
5	72.07	71.12	76.81	73.33
6	125.17	117.58	128.96	123.90
7	9.67	11.1	10.81	10.53
8	14.32	12.23	14.41	13.65
9	25.89	25.6	27.03	26.17
10	63.53	58.79	71.12	64.48
11	83.93	83.93	81.79	83.22
12	2.56	2.93	3.34	2.94
13	9.25	7.68	8.25	8.39
14	7.25	7.54	7.54	7.44
15	18.49	26.55	25.7	23.58
16	24.4	27.31	26.74	26.15
17	104.3	104.3	114.74	107.78
18	2.94	3.13	2.99	3.02
19	2.56	4.27	3.56	3.46
20	6.69	5.86	5.86	6.14
21	8.06	7.82	8.25	8.04
22	25.03	19.72	24.75	23.17
23	0.56	0.67	0.92	0.72
24	3.34	2.53	3.34	3.07
25	3.29	2.16	3.03	2.83
26	4.27	6.26	4.27	4.93
27	0.84	0.84	0.84	0.84
28	0.39	0.67	0.81	0.62

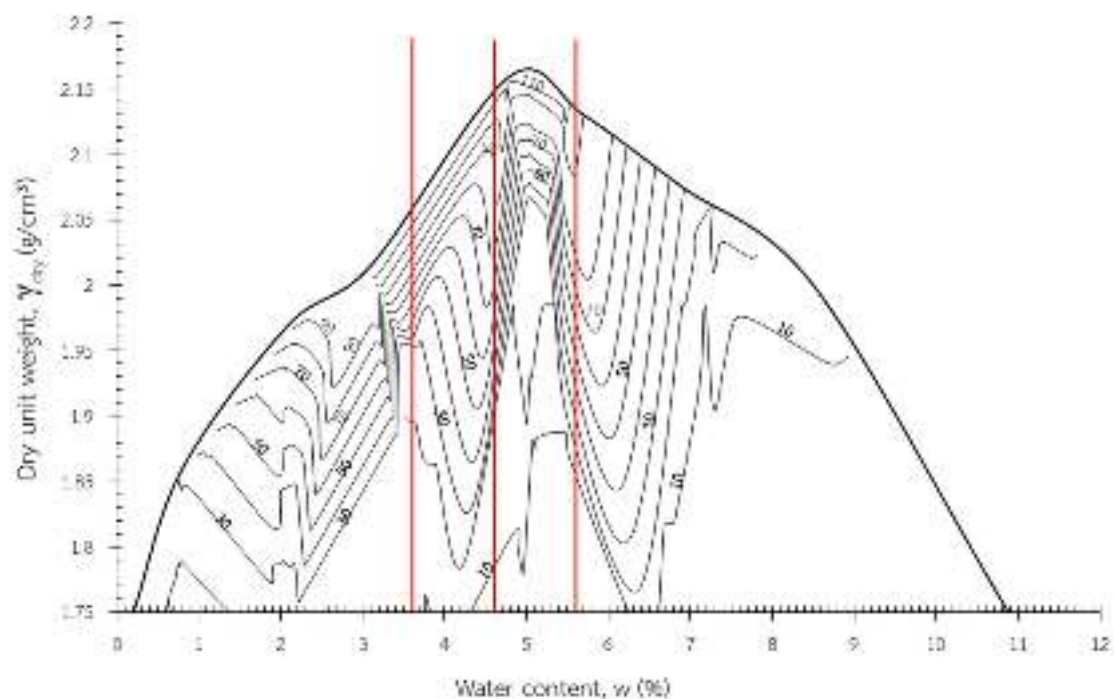
4.5 เส้นชั้นความสูงของค่าซีพียาร์แบบไม่แช่น้ำใต้กราฟการบดอัด



รูปที่ 4.9 เส้นชั้นความสูงของค่าซีพียาร์แบบไม่แช่น้ำใต้กราฟการบดอัด

เมื่อนำค่าซีพียาร์ของตัวอย่างดินที่ปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งต่างๆ มาสร้างกราฟเส้นชั้นความสูงภายใต้กราฟการบดอัดโดยโปรแกรม Civil 3D 2017 Metric จะได้ดังรูปที่ 4.9 โดยเส้นชั้นความสูงของค่าซีพียาร์แบบไม่แช่น้ำแต่ละเส้นห่างกัน 10%

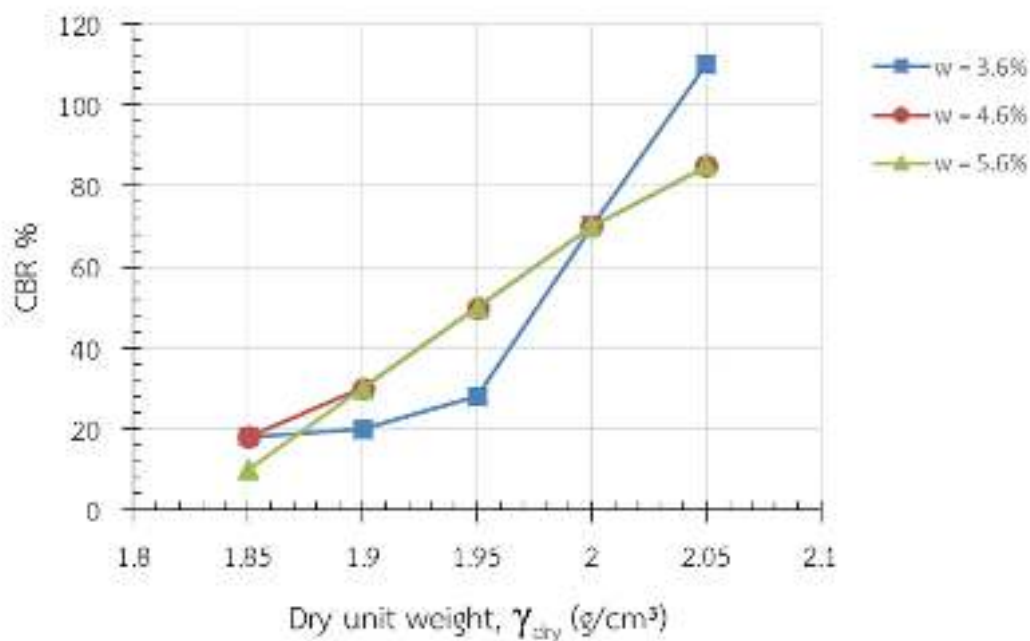
4.5.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับหน่วยน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นคงที่



รูปที่ 4.10 ตัด section ค่าซีบีอาร์ ที่ $w = 3.6\%$, 4.6% และ 5.6% ภายใต้กราฟบดอัด

ตารางที่ 4.4 ค่าซีบีอาร์กับความหน่วยน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน

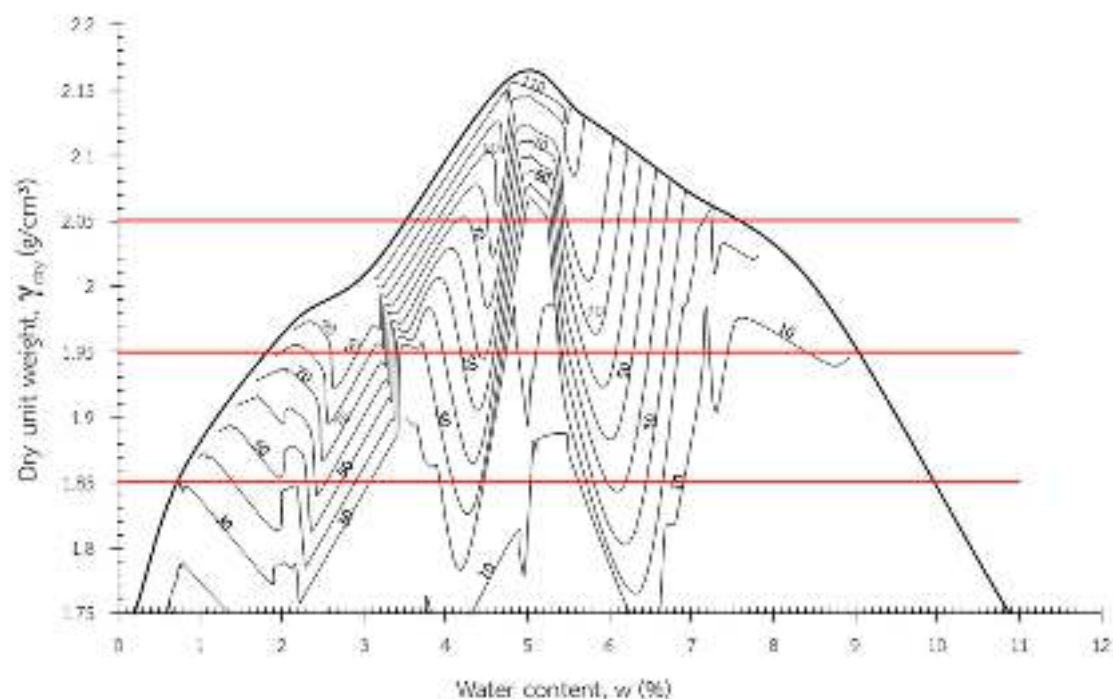
w%	CBR	γ_{dry}	w%	CBR	γ_{dry}	w%	CBR	γ_{dry}
3.6	18	1.85	4.6	18	1.85	5.6	10	1.85
3.6	20	1.90	4.6	30	1.90	5.6	30	1.90
3.6	28	1.95	4.6	50	1.95	5.6	50	1.95
3.6	70	2.00	4.6	70	2.00	5.6	70	2.00
3.6	110	2.05	4.6	85	2.05	5.6	85	2.05



รูปที่ 4.11 ค่าซีบีอาร์กับความหน่วยน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน

รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งการตัด section ค่าซีบีอาร์ภายใต้กราฟบดอัดที่ $w = 3.6\%$, 4.6% และ 5.6% ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.11 แสดงค่าซีบีอาร์กับความหน่วยน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน พบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการรับกำลังของดิน คือที่ปริมาณความชื้นคงที่ เมื่อหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างดินบดอัดเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าซีบีอาร์สูงตามไปด้วย นั่นคือ ค่าซีบีอาร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยน้ำหนักแห้ง

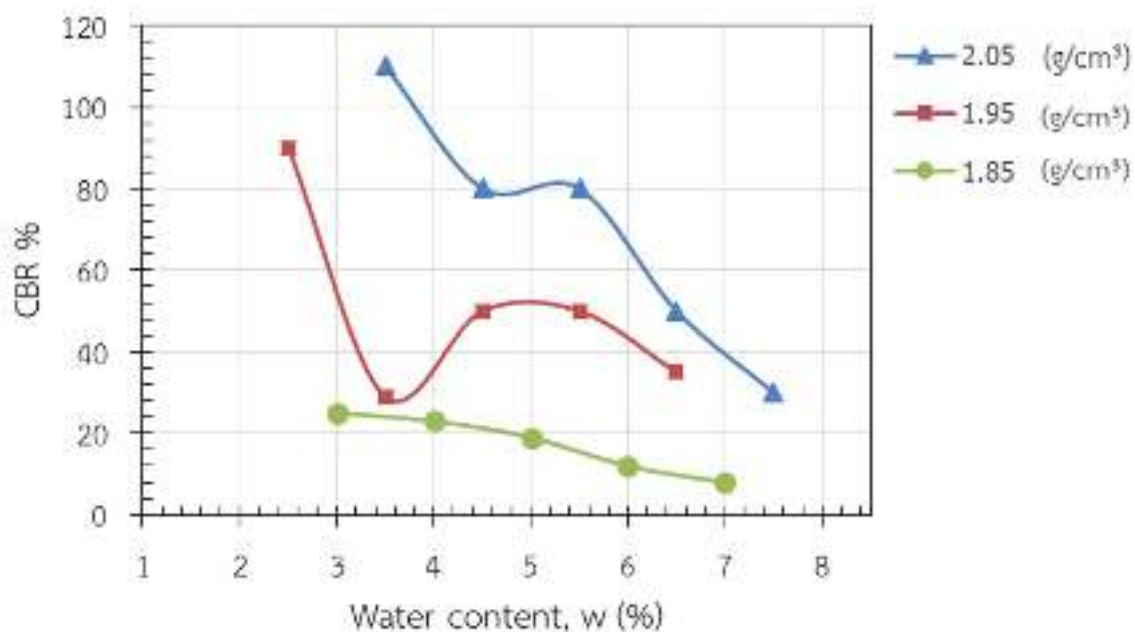
4.5.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งคงที่



รูปที่ 4.12 ตัด section ค่าซีบีอาร์ ที่ $\gamma_{\text{dry}} = 1.85 \text{ g/cm}^3$, 1.95 g/cm^3 และ 2.05 g/cm^3 ภายใต้งราฟบดอัด

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน

$\gamma_{\text{dry}} = 1.85 \text{ (g/cm}^3\text{)}$		$\gamma_{\text{dry}} = 1.95 \text{ (g/cm}^3\text{)}$		$\gamma_{\text{dry}} = 2.05 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	
w%	CBR	w%	CBR	w%	CBR
3	25	2.5	90	3.5	110
4	23	3.5	29	4.5	80
5	19	4.5	50	5.5	80
6	12	5.5	50	6.5	50
7	8	6.5	35	7.5	30

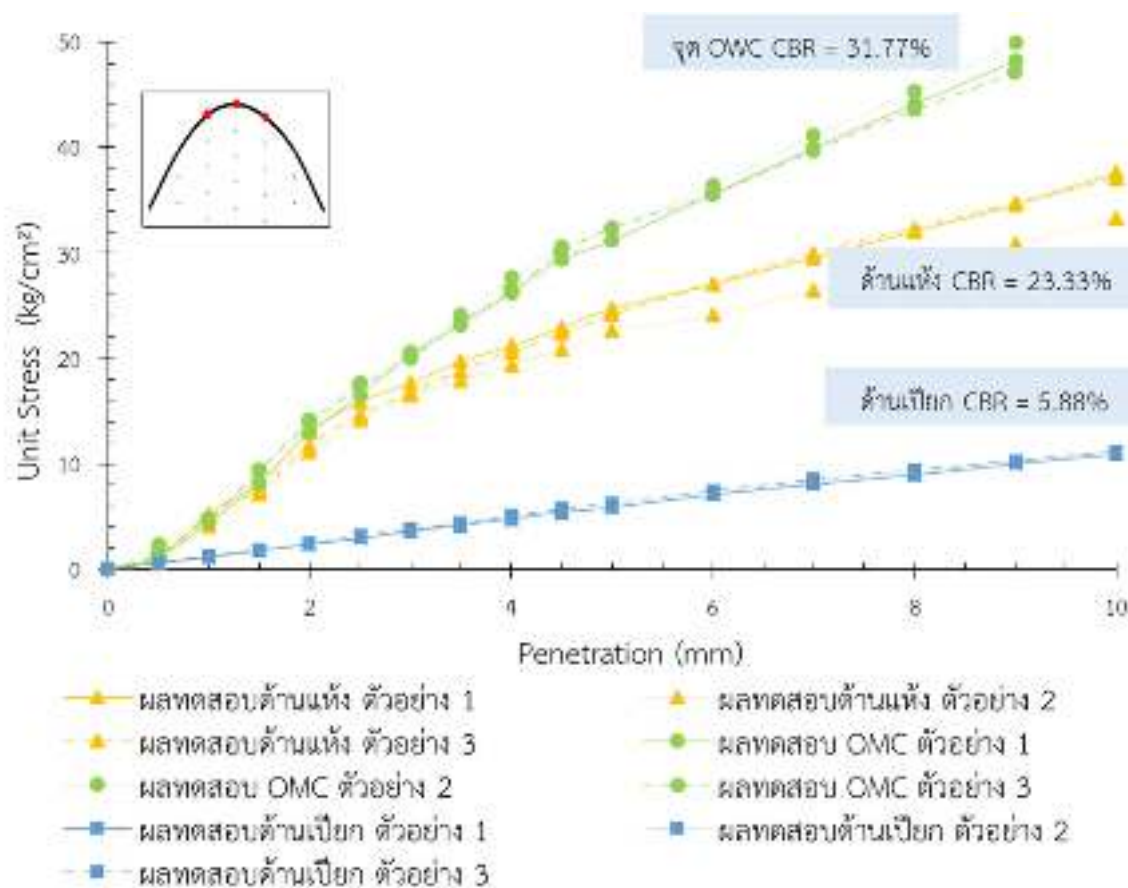


รูปที่ 4.13 ค่าซีบีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน

รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งการตัด section ค่าซีบีอาร์ภายใต้กราฟบดอัดที่ $\gamma_{dry} = 1.85 \text{ g/cm}^3$, 1.95 g/cm^3 และ 2.05 g/cm^3 ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.13 แสดงค่าซีบีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน พบว่าปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการรับกำลังของดิน คือปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันทำให้การรับหนักของดินแตกต่างกันไปด้วย

4.6 การทดสอบซีบีอาร์ (California Bearing Ratio) แบบแช่น้ำ

โดยนำความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณความชื้นที่ต่างกันภายใต้กราฟการบดอัดมาจำลองได้โดยการบดอัดด้วยน้ำหนักดินที่ต่างกันเหมือนกับการทดสอบซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำและมีการเตรียมตัวดินแบบ Static method เช่นเดียวกันกับการทดสอบซีบีอาร์แบบไม่แช่น้ำ



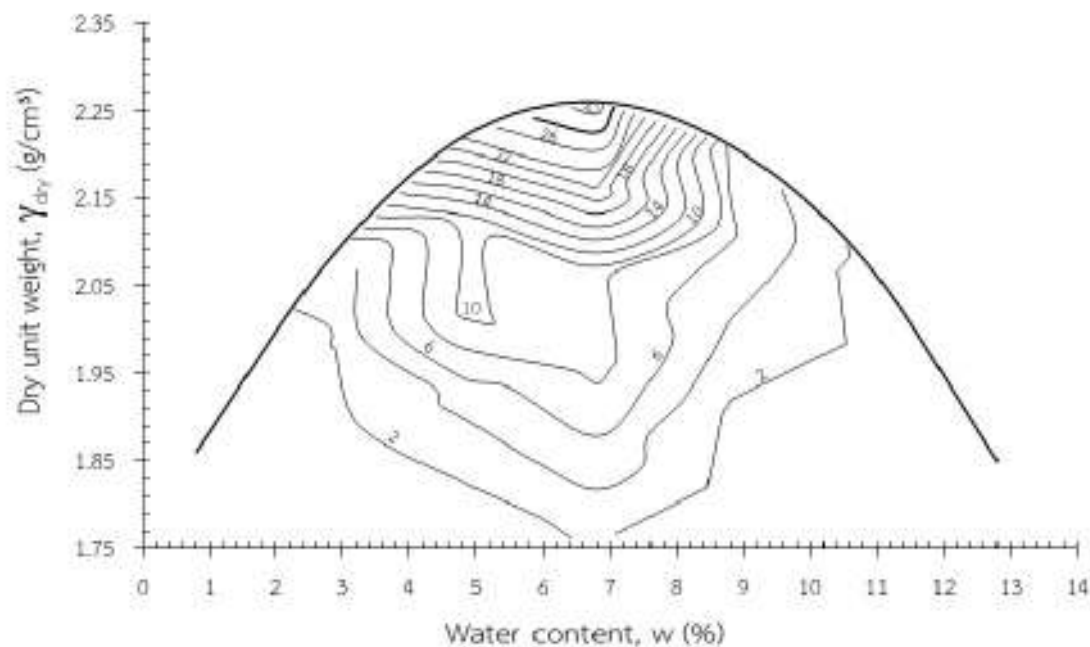
รูปที่ 4.14 กราฟการทดสอบซีบีอาร์แบบแช่น้ำ

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบ CBR แบบแช่น้ำสำหรับดินด้านแห้ง ที่จุด OMC และดินด้านเปียก จะเห็นว่าค่าซีบีอาร์มีค่าแปรผันตามหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้น จากการทดสอบได้คำนวณหาค่าซีบีอาร์ที่ระยะการจมตัวที่ 2.5 และ 5.0 มิลลิเมตร พบว่าดินที่มีปริมาณความชื้นที่ OMC ค่าซีบีอาร์จะมีค่าซีบีอาร์มากที่สุดและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ที่ดินด้านแห้งจะมีค่าซีบีอาร์ลดน้อยลงมาและในดินเปียกค่าซีบีอาร์จะได้ค่าน้อยสุดเพราะน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดินทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาณที่เท่ากันลดลงส่งผลให้การรับน้ำหนักของดินลดลงไปด้วย

ตารางที่ 4.6 ผลสรุปการทดลองที่ได้จากการทดสอบซีบีอาร์แบบแช่น้ำ

NO.	CBR (%)			
	Simple 1	Simple 2	Simple 3	Average
1	0	0	0	0
2	0.94	1.14	1.12	1.07
3	1.66	0.84	0.84	1.11
4	1.23	1.12	1.11	1.15
5	1.89	1.80	1.98	1.89
6	2.37	1.99	2.56	2.31
7	1.85	1.27	1.42	1.51
8	4.57	4.98	4.20	4.58
9	10.38	9.37	8.89	9.55
10	10.43	10.05	9.48	9.99
11	24.18	23.04	22.76	23.33
12	2.12	2.28	2.12	2.17
13	5.41	6.26	5.19	5.62
14	8.72	9.96	9.20	9.29
15	8.39	8.53	9.25	8.72
16	21.81	22.57	22.00	22.13
17	31.29	32.24	31.77	31.77
18	1.27	1.27	1.27	1.27
19	1.80	2.01	1.80	1.87
20	3.97	3.60	3.97	3.85
21	6.26	5.45	6.16	5.96
22	5.59	5.59	6.45	5.88
23	0.42	0.42	1.01	0.42
24	1.01	1.00	1.27	1.09
25	1.69	1.79	1.69	1.72
26	1.51	1.69	1.79	1.66
27	0.17	0.17	0.17	0.17
28	0.56	0.27	67	0.50

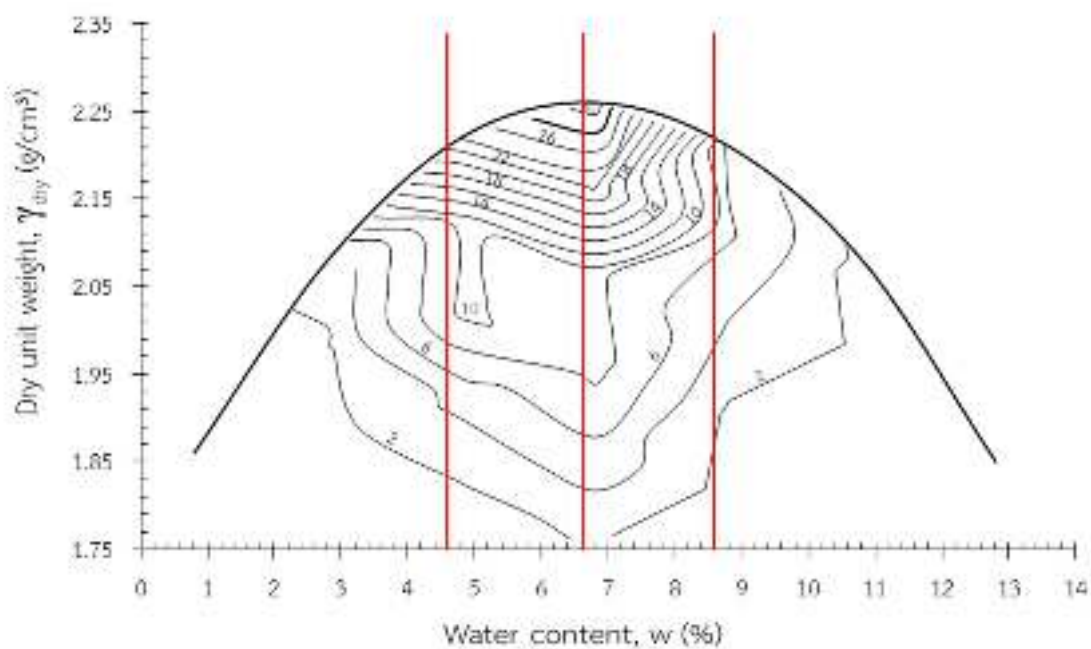
4.7 เส้นชั้นความสูงของค่าซีพียาร์แบบแช่น้ำใต้กราฟการบดอัด



รูปที่ 4.15 เส้นชั้นความสูงของค่าซีพียาร์แบบแช่น้ำใต้กราฟการบดอัด

เมื่อนำค่าซีพียาร์ของตัวอย่างดินที่ปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งต่างๆ มาสร้างกราฟเส้นชั้นความสูงภายใต้กราฟการบดอัดโดยโปรแกรม Civil 3D 2017 Metric จะได้ดังรูปที่ 4.15 โดยเส้นชั้นความสูงของค่าซีพียาร์แบบแช่น้ำแต่ละเส้นห่างกัน 2%

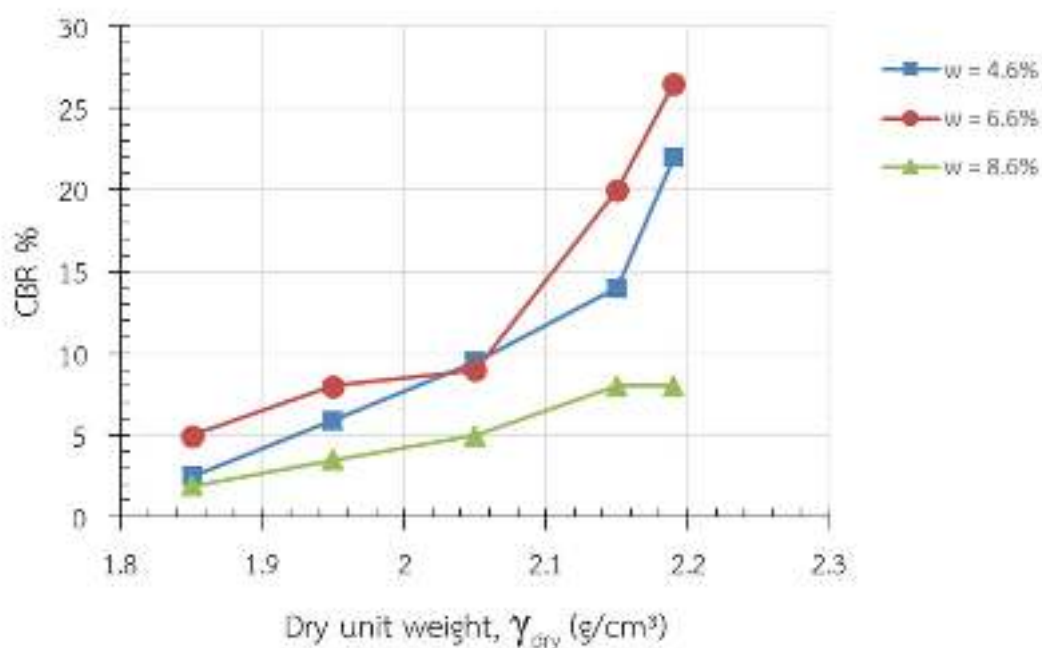
4.7.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับหน่วยน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นคงที่



รูปที่ 4.16 ตัด section ค่าซีบีอาร์ ที่ $w = 4.6\%$, 6.6% และ 8.6% ภายใต้กราฟบดอัด

ตารางที่ 4.7 ค่าซีบีอาร์กับความหน่วยน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน

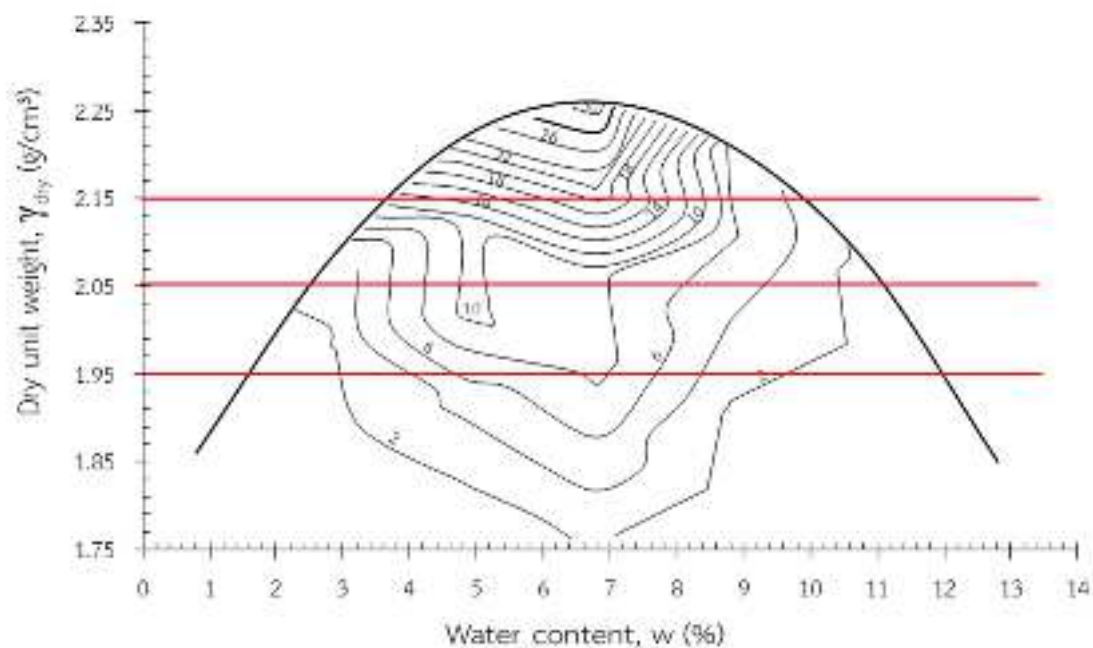
w%	CBR	γ_{dry}	w%	CBR	γ_{dry}	w%	CBR	γ_{dry}
4.6	2.5	1.85	6.6	5	1.85	8.6	1.9	1.85
4.6	5.9	1.95	6.6	8	1.95	8.6	3.5	1.95
4.6	9.5	2.05	6.6	9	2.05	8.6	5	2.05
4.6	14	2.15	6.6	20	2.15	8.6	8	2.15
4.6	22	2.19	6.6	26.5	2.19	8.6	8	2.19



รูปที่ 4.17 ค่าซีบีอาร์กับความหน่วงน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน

รูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งการตัด section ค่าซีบีอาร์ภายใต้กราฟบดอัดที่ $w = 4.6\%$, 6.6% และ 8.6% ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.17 แสดงค่าซีบีอาร์กับความหน่วงน้ำหนักแห้งที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน พบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการรับกำลังของดิน คือที่ปริมาณความชื้นคงที่ เมื่อหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างดินบดอัดเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าซีบีอาร์สูงตามไปด้วย นั่นคือ ค่าซีบีอาร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยน้ำหนักแห้ง

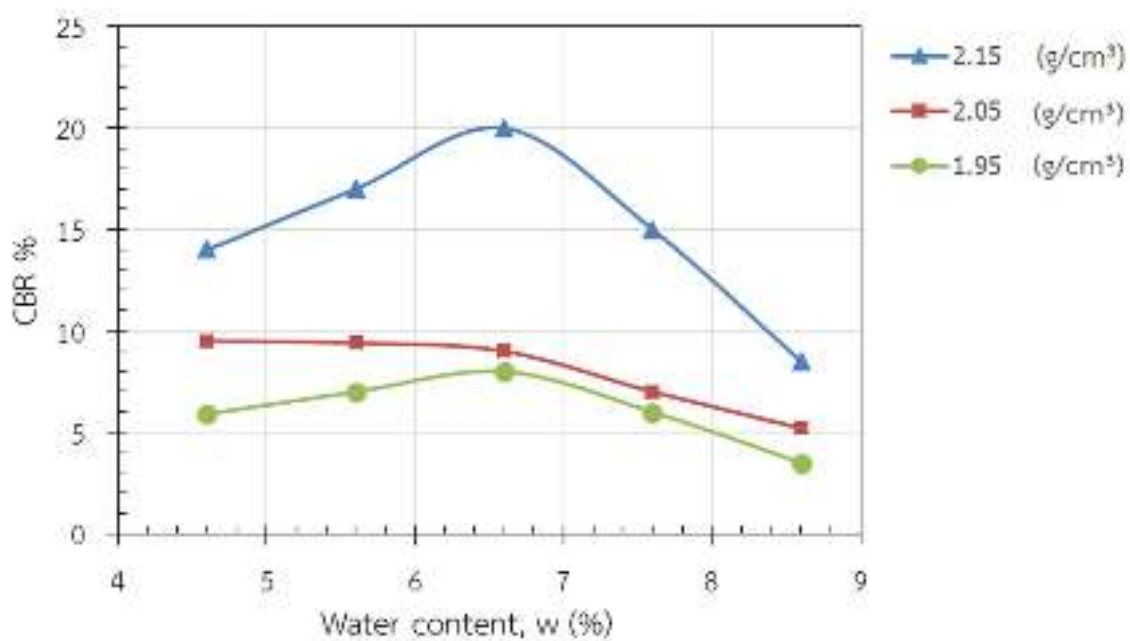
4.7.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งคงที่



รูปที่ 4.18 ตัด section ค่าซีบีอาร์ ที่ $\gamma_{dry} = 1.95 \text{ g/cm}^3$, 2.05 g/cm^3 และ 2.15 g/cm^3 ภายใต้งราฟบดอัด

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน

$\gamma_{dry} = 1.95 \text{ (g/cm}^3\text{)}$		$\gamma_{dry} = 2.05 \text{ (g/cm}^3\text{)}$		$\gamma_{dry} = 2.15 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	
w%	CBR	w%	CBR	w%	CBR
4.6	5.9	4.6	9.5	4.6	14
5.6	7	5.6	9.4	5.6	17
6.6	8	6.6	9	6.6	20
7.6	6	7.6	7	7.6	15
8.6	3.5	8.6	5.2	8.6	8.5



รูปที่ 4.19 ค่าซีบีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน

รูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งการตัด section ค่าซีบีอาร์ภายใต้กราฟบดอัดที่ $\gamma_{dry} = 1.95 \text{ g/cm}^3$, 2.05 g/cm^3 และ 2.15 g/cm^3 ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.19 แสดงค่าซีบีอาร์กับปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน พบว่าปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการรับกำลังของดิน คือปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันทำให้การรับหนักของดินแตกต่างกันไปด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการสร้างเส้นชั้นความสูงของค่าซีบีอาร์ได้กราฟการบดอัดของดินในจังหวัดชลบุรี โดยเลือกใช้ความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณความชื้นภายใต้กราฟการบดอัดเพื่อมาทำการทดสอบซีบีอาร์ สามารถสรุปผลของการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน

ดินที่นำมาทำการทดสอบการจำแนกประเภทของดินตามระบบ Unified Soil Classification System สามารถสรุปได้ว่า ดินที่นำมาทดสอบเป็นดินทรายมีตะกอนทรายปน คือ (silty sand, SM) โดยมีคุณสมบัติพื้นฐานดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5-1 แสดงตารางการคำนวณข้อมูลดิน

เหตุผล	ชนิดดิน	สัญลักษณ์
1. หยาบหรือละเอียด	หยาบ (#200) 21.94% < 50%	S ,G
2. กรวดหรือทราย	ทราย (#4) 96.5% > 50 %	S
3. มีเม็ดละเอียดมากหรือน้อย	มาก (#200) > 12%	SM, SG, GM, GC
4. การกระจายของเม็ดดิน	ดินเม็ดละเอียดไม่พิจารณา	
5. ส่วนเม็ดละเอียดเป็นจำพวกใด	Silt ไม่มีความเหนียว (NP)	M
6. สัญลักษณ์ของดินเม็ดละเอียด	SM	SM

5.1.2 การทดสอบหาค่าซีบีอาร์ภายใต้กราฟการบดอัดดินแบบไม่แช่น้ำ

จากการทดสอบค่าซีบีอาร์มีค่าแปรผันตามหน่วยน้ำหนักและปริมาณความชื้น ค่าซีบีอาร์จะมีค่ามากสุดในด้านแห้ง ดินที่มีปริมาณความชื้นที่ OWC ค่าซีบีอาร์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และในด้านเปียกค่าซีบีอาร์จะได้ค่าน้อยสุดเพราะน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดินทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาณที่เท่ากันลดลง ส่งผลให้การรับน้ำหนักของดินลดลงไปด้วย

5.1.3 การทดสอบหาค่าซีบีอาร์ภายใต้กราฟการบดอัดดินแบบแช่น้ำ

จากการทดสอบ CBR แบบแช่น้ำสำหรับดินด้านแห้ง ที่จุด OWC และดินด้านเปียก จะเห็นว่าค่าซีบีอาร์มีค่าแปรผันตามหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้น พบว่าดินที่มีปริมาณความชื้นที่ OWC ค่าซีบีอาร์จะมีค่ามากที่สุดและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ที่ดินด้านแห้งจะมีค่าซีบีอาร์ลดน้อยลงมา เพราะเมื่อมีการแช่น้ำจึงส่งผลให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปแทนที่เนื้อดินทำให้การรับน้ำหนักของดินลดน้อยลงเมื่อเทียบกับการทดสอบแบบไม่แช่น้ำและในด้านเปียกค่าซีบีอาร์จะได้ค่าน้อยสุด

5.1.4 การทดสอบหาค่าซีบีอาร์ภายใต้กราฟการบดอัดดิน

เมื่อมีการทดสอบซีบีอาร์ด้วยปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งได้ผลสรุปดังตารางที่ 4.3 และ 4.6 ผลสรุปการทดลองที่ได้จากการทดสอบซีบีอาร์ใต้กราฟการบดอัดดินแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำ ตามข้อกำหนดมาตรฐานการก่อสร้างถนนจะต้องมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมากกว่าร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่ $OWC \pm 3\%$ ซึ่งตามข้อกำหนดสามารถทำได้ แต่ผลที่ได้จากการทดสอบหาค่าซีบีอาร์จากตำแหน่งต่างๆภายใต้กราฟการบดอัดยังมีความแปรปรวนอยู่ระหว่าง 110% - 30% ในการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ และ 30% - 4% ซึ่งมีความแปรปรวนอย่างมากในดินด้านเปียก จากการทดสอบหาค่าซีบีอาร์อาจสรุปได้ว่าการก่อสร้างถนน ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในการก่อสร้างถนนเพราะปริมาณความชื้นมีผลต่อการรับน้ำหนักของดิน ถ้าปริมาณความชื้นในดินมากกว่าความชื้นที่ OWC จะส่งผลให้การรับน้ำหนักของดินลดลงและค่าซีบีอาร์ยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยน้ำหนักแห้ง ค่าซีบีอาร์จะมีค่ามากเมื่อหน่วยน้ำหนักแห้งสูงในขณะที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน

ค่าปริมาณความชื้นที่แนะนำสำหรับการนำไปก่อสร้างถนนคือ ที่ปริมาณน้ำ $OWC \pm 2\%$ และค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมากกว่าร้อยละ 97 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะทำให้กำลังการรับน้ำหนักของดินมากเพียงพอซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากที่จะนำไปใช้ก่อสร้างถนนได้ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ค่าที่ได้จากการทดสอบซีบีอาร์ พบว่าปริมาณความชื้นที่ OWC มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้ในการก่อสร้างถนน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในวัสดุที่ทำถนนชั้นอื่นๆ เช่น วัสดุมวลรวม หินคลุก เป็นต้น

5.2.2 ควรมีการศึกษาการบดอัดดินในสนามด้วยเครื่องมือกลควบคู่กับการทดสอบหาค่าซีบีอาร์ในสนาม

5.2.3 เนื่องจากการทดสอบทั้งหมดมีค่าซีบีอาร์ที่แปรปรวนมากในด้านเปียก จึงควรมีการศึกษาการปรับปรุงการรับกำลังของดินเมื่อปริมาณความชื้นมากกว่าปริมาณความชื้นที่ OWC

บรรณานุกรม

- ผศ.มานะ อภิพัฒน์มนตรี. (2546). วิศวกรรมปฐพีและฐานราก. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- ผศ.วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. (2554). ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : B.J. Plate Processor.
- สถาพร คูวิจิตรจารุ. (2542). ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ไลบารี นาย พับลิชชิง.
- Hogentogler, C.A. Jr. 1936. Essential of soil Compaction. Proc. HRB.
- Buchanan, S.J.. 1942. Soil compaction. Proc. 5th. Texas Conf. Soil Mech.
- Hilf, J.W.. 1956. An investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soil.
- Lambe, T.W.. 1958. The Engineering Behavior of Compacted Clay. J. Soil Mech. Found. Div. ASCE.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข, รุ่งลาวัลย์ ราชัน. (2554). ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล.
- วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. (2554). ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : โฟร์เพช.
- ดิงศักดิ์ เหลืองเจริญทิพย์. (2558). เทคนิคการใช้โปรแกรม Microsoft Excel คำนวณผลการทดสอบการบดอัดดิน (Compaction Test). แหล่งที่มา <http://cste.sut.ac.th/articles/?p=5>.
- กรมทางหลวง. ทล.-ท 108/2517. วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน
- กรมทางหลวง. ทล.-ท 205/2516. วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง
- กรมทางหลวง. ทล.-ท 109/2517. วิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR
- กรมทางหลวง. ทล.-ท 107/2517. วิธีการทดลอง Compaction Test แบบมาตรฐาน

ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ-สกุล	นายบดีศร ไมตรีจิตต์
ประวัติการศึกษา	- ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา - ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา - ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี
ชื่อ-สกุล	นายวิศิษฐ์ โยมา
ประวัติการศึกษา	- ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสมคิดจิตต์วิทยา อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี - ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบ้านบึง “อุตสาหกรรมนุเคราะห์” อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี - ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี