อิทธิพลของความเร็วรถบดอัดต่อการพัฒนาความแน่นในสนาม ของหินคลุกบดอัด

นายนิติ พันธุ์โอภาส

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

อิทธิพลของความเร็วรถบดอัดต่อการพัฒนาความแน่นในสนาม ของหินคลุกบดอัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
ประธานกรรมการ

_____

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

_____

(ผศ. ดร.รัฐพล ภู่บุบผาพันธ์)
กรรมการ

_____

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

นิติ พันธุ์โอภาส : อิทธิพลของความเร็วรถบดอัดต่อการพัฒนาความแน่นในสนามของหินคลุกบดอัด (INFLUNENCE OF VELOCITY OF ROLLER ON FIELD DENSITY DEVELOPMENT OF CRUSHED ROCK) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข

โครงสร้างชั้นทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นชั้นๆ พื้นทางเป็นชั้นโครงสร้างชั้นทางลำดับที่สองถัดจากผิวทาง ชั้นพื้นทางมักเป็นหินคลุก ซึ่งเมื่อบดอัดแล้วจะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สูง การบดอัดเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชั้นพื้นทางหินคลุกให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น (กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้น และการอัดตัวและการซึมผ่านน้ำลดลง) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการบดอัดและซีบีอาร์ของหินคลุกจำนวน 52 ชนิด ในพื้นที่บุรีรัมย์ พบว่าซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในฟังก์ชั่นเชิงเส้นตรง ผลการตรวจวัดในสนามแสดงให้เห็นว่าความเร็วและจำนวนเที่ยวของรถบดอัดมีอิทธิพลต่อการพัฒนาความแน่นของชั้นพื้นทางหินคลุก ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นและจำนวนเที่ยววิ่งที่ความเร็วค่าหนึ่งสามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชั่นล็อกการิทึม แม้ว่าการเพิ่มความเร็วของรถบดอัดทำให้ความหนาแน่นของหินคลุกบดอัดน้อยลง ในจำนวนเที่ยววิ่งที่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการบดอัดเพื่อให้ได้ความแน่นแห้งสูงสุด ส่งผลให้ค่าเช่าเครื่องจักรต่อชั่วโมงลดลง

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

NITI PANOPAS : INFLUNENCE OF VELOCITY OF ROLLER ON FIELD DENSITY DEVELOPMENT OF CRUSHED ROCK. ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

Flexible pavement is generally composed of several soil layers. Base is located next to pavement surface. Crushed rocks are commonly used for road base construction because it exhibits favorable engineering properties when compacted. The compaction increases shear strength as well as reduces compressibility and permeability of crushed rock. An analysis of the collected laboratory compaction and CBR test data of 52 crushed rocks in Burirum provience shows that soaked CBR values increase with increasing dry density in liner relationship. Field measured data show that vehicle velocity and number of roller passes control the development in unit weight of compacted crushed rock. The relationship between unit weight and number of roller passes at a given velocity can be represented by a logarithm function. Even with an increase in velocity causes the reduction in unit weight for the same number of roller passes, it reduces total compaction time to attain the maximum dry unit weight; hence, the cost-effectiveness.

School of Civil Engineering Student's Signature_____
Academic Year 2013 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานบัณฑิตนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องด้วยคณาจารย์และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือสนับสนุนเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงาน และอนุเคราะห์ข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข อย่างสุดซึ้งที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อมูลทางวิชาการและช่วยกระตุ้น จนโครงงานฉบับนี้สำเร็จด้วยดี รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ประธานกรรมการที่กรุณาให้การแนะนำให้คำปรึกษางานวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล ภู่บุบผาพันธ์ คณะกรรมการ ที่ช่วยให้คำแนะนำในการศึกษางานวิจัย คุณณัฐชัย โปร่งมณี ที่ให้คำปรึกษาจนโครงงานเสร็จสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งกรมทางหลวงที่ได้ให้ทุนการศึกษาในระดับปริญญาโท ตลอดจนแขวงการทางบุรีรัมย์ และส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำนักทางหลวงที่ 8 (นครราชสีมา) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและช่วยเหลือในการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุนันท์ คุณแม่จารุวรรณ พันธุ์โอภาส ที่ได้อบรมสั่งสอนสนับสนุนให้การศึกษาจนได้มาถึงวันนี้ อีกทั้งขอขอบคุณ คุณวัชรี พันธุ์โอภาส ภรรยา และเด็กหญิงอาริชยาภรณ์ พันธุ์โอภาส บุตรสาว ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกาลังใจให้จนกระทั่งโครงงานฉบับนี้สำเร็จ

นิติ พันธุ์โอภาส

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญรูปภาพ ..... ฌ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 บทนำ 5
2.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930) 5
2.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936) 6
2.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (1942) 8
2.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956) 9
2.6 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985) 10
2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve) 11
2.7.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน 13
2.7.2 ชนิดของดิน 13
2.8 พลังงานการบดอัด 16
2.9 การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม 18
2.10 การทำนายกราฟการบดอัด 21
2.11 มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก 34
2.11.1 ขอบข่าย 34
2.11.2 คุณสมบัติ 34

2.12 วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ 35
2.12.1 ขอบข่าย 35
2.12.2 นิยาม 35
2.12.3 วิธีทำ 35
2.12.4 การเตรียมตัวอย่าง 36
2.12.5 การทดสอบ 36
2.12.6 การคำนวณ 37
2.12.7 การรายงาน 38
2.12.8 ข้อควรระวัง 38
2.13 วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ 38
2.13.1 ขอบข่าย 38
2.13.2 วิธีทำ 38
2.13.3 การเตรียมตัวอย่าง 40
2.13.4 การทดสอบ 40
2.13.5 การคำนวณ 41
2.13.6 การรายงาน 41
2.13.7 ข้อควรระวัง 41
2.14 วิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน 41
2.14.1 ขอบข่าย 41
2.14.2 วิธีทำ 42
2.14.3 การเตรียมตัวอย่าง 43
2.14.4 การทดสอบ 44
2.14.5 การคำนวณ 45
2.14.6 การรายงาน 46
2.14.7 ข้อควรระวัง 46
2.15 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. 47
2.15.1 ขอบข่าย 47
2.15.2 วิธีทำ 47
2.15.3 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดสอบ 48
2.15.4 การเตรียมตัวอย่าง 48

2.15.5 การทดสอบ 49
2.15.6 การคำนวณ 51
2.15.7 การรายงาน 52
2.15.8 ข้อควรระวัง 53
2.16 การก่อสร้างและการบดอัดโครงสร้างทางชั้นพื้นทางหินคลุก 54
2.16.1 งานพื้นทางชนิดหินคลุก 54
2.16.1.1 วิธีการก่อสร้าง 54
2.16.1.2 ผลการทดสอบความแน่นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ 55
2.17 เครื่องจักรกลที่ใช้บดอัดในสนาม 55
2.17.1 รถบดล้อเรียบ 55
2.17.2 รถบดล้อยาง 56
2.17.3 รถบดอัดแบบสั่นสะเทือน 57
2.18 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม 59
2.18.1 วิธีการทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม 59
2.18.1.1 ขอบข่าย 59
2.18.1.2 วิธีทำ 59
2.18.1.3 การทดสอบวิธีหาปริมาตรขวด พร้อมกรวย 61
2.18.1.4 วิธีตรวจสอบความแน่นแบบ บัลค์ ของทราย 62
2.18.1.5 วิธีหาน้ำหนักของทรายที่บรรจุเต็มกรวย 63
2.18.1.6 วิธีหาค่าความแน่นของดินในสนาม 63
2.18.1.7 การคำนวณความแน่นแบบ บัลค์ ของทราย 64
2.18.1.8 ความแน่นแห้งของดินที่ขุดออกจากหลุม 65
2.18.1.9 การรายงาน 65
2.18.1.10 ข้อควรระวัง 66
2.18.2 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนามโดยวิธี Nuclear Gauge 66
2.18.2.1 หลักการทั่วไปของเครื่องมือ Nuclear Gauge 66
2.18.2.2 วิธีการทดสอบหาค่าความชื้นในวัสดุชั้นทาง 68
2.18.2.3 ส่วนประกอบของชุดวัดความชื้นและความหนาแน่น 71
2.18.2.4 การทำ Calibration 72

2.18.2.5 การทำ Standard Count 73
2.18.2.6 การเตรียมสถานที่สำหรับงาน asphalt, คอนกรีต, ดินแข็ง 77
2.18.2.7 การทดสอบใน Soil Mode 77
3 วิธีดำเนินการทำโครงงาน 79
3.1 บทนำ 79
3.2 แผนงานดำเนินการ 79
3.3 ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ 80
3.4 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม (Field density test) โดยวิธีการ Nuclear Method 80
4 การวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผลการทดสอบ 82
4.1 บทนำ 82
4.2 ผลทดสอบและผลการวิเคราะห์ 82
4.2.1 ผลทดสอบที่รวบรวมในห้องปฏิบัติการ 82
4.2.2 การทดสอบในสนาม 89
5 สรุปผลการทดสอบ 95
5.1 สรุปผล 95
เอกสารอ้างอิง 96
ภาคผนวก ข้อมูลตารางค่าใช้จ่ายเครื่องจักรบดอัด 99
ประวัติผู้เขียน 101

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก 34

2.2 ขนาดคละของวัสดุ 37

2.3 จำนวนลูกเหล็กทรงกลม ที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชั้น (grading) 39

2.4 น้ำหนักชั้นของตัวอย่างต่อจำนวนรอบ 40

2.5 น้ำหนักมาตรฐานตากการกดท่อนเหล็กขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้วของวัสดุหินคลุก 52

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความแน่นของน้ำ 62

4.1 คุณสมบัติหินคลุกที่รวบรวม 85

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve)	5
2.2	ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ	6
2.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Hogentogler	7
2.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นนำเสนอ โดย Buchanan	9
2.5	กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอโดย Hilf	10
2.6	ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน	11
2.7	เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)	12
2.8	เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ	14
2.9	กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Horpibulsuk et al., 2005)	14
2.10	อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg. 1960)	16
2.11	อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (Horpibulsuk et al., 2004)	17
2.12	การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (Lambe, 1962)	19
2.13	ลักษณะการอัดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวบดอัดที่ด้านแห้งและด้านเปียก ของปริมาณ ความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ปริมาณความชื้น (สุขสันติ์, 2545)	19
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัด (สุขสันต์ 2545)	20
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินลูกรังบดอัด	21
2.16	กราฟการบดอัด Ohio (ปรับปรุงจาก Joslin, 1959)	22
2.17	แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด (Nagaraj et al., 2006)	22
2.18(a)	กราฟการบดอัด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัว ด้วยน้ำของดินเหนียวปนดินตะกอน (Horpibulsuk et al., 2008a)	24

2.19(a) กราฟการบดอัด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัว ด้วยน้ำของกรวดที่ขนาดคละดี (Horpibulsuk et al., 2009a) 25
2.20 อิทธิพลของ A_dและA_wต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008a) 26
2.21 อิทธิพลของ B_dและB_wต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008a) 27
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสม อัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสมและพลังงานการบดอัด (Horpibulsuk et al, 2009a) 28
2.23 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียว (ข้อมูลจาก Proctor, 1948) (Horpibuksuk et al., 2008a) 30
2.24 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของ Red earth (ข้อมูลจาก US Army Crops of Engineers, 1970) (Horpibusluk et al., 2008a) 30
2.25 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน(ข้อมูลจาก Turnbull and Foster, 1956) (Horpibulsuk et al., 2008a) 31
2.26 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินลูกรัง (ข้อมูลจาก Horpibulsuk et al., 2004c) (Horpibulsuk et al., 2009a) 31
2.27 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของกรวดปนดินเหนียว (ข้อมูลจาก Ruenkrairergsa, 1982) (Horpibulsuk et al., 2009a) 32
2.28 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a) 32
2.29 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a) 33
2.30 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a) 33
2.31 รถบดล้อเรียบ 56
2.32 รถบดล้อยางทำงานด้วยระบบความดันลม (pneumatic-tired roller) 56
2.33 รถบดสั่นสะเทือน (vibrating roller) 57
2.34a) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่าน (Johnson and Sallberg. 1960) 58
2.34b) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่าน (D'Appolonia et al., 1969) 58
2.35 การประมาณความหนาของระดับชั้นของดินสำหรับความหนาแน่นสัมพัทธ์ 75% กับจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่านเท่ากับ 5 รอบ 59

2.36 รูปร่างลักษณะของเครื่องมือและตำแหน่งของ source rod positions ในการใช้งานที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน 68
2.37 การจัดเครื่องมือทดสอบเพื่อหาค่าความชื้นในสนาม 69
2.38 กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย pcf 69
2.39 กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย kg/m^3 top layer effect 70
2.40 กราฟผลกระทบที่เรียกว่า top layer effect ที่มีต่อการวัดค่าความแน่นแบบ backscatter ที่ความหนาต่าง ๆ กัน 70
2.41 ส่วนประกอบของชุดวัดความชื้นและความหนาแน่นของเครื่องมือ 71
2.42 การทำ Calibration ของเครื่องมือ โดยทดสอบบนวัสดุที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอน 72
2.43 การนำเครื่องทดสอบวางบนแผ่นบอล์คพาราฟินเพื่อทำ Standard count 74
2.44 การเจาะรูโดยใช้ Scraper plate (Drill Rod guid) และแท่ง Drill Rod เป็นการระบุตำแหน่งที่จะนำสารรังสีลงไปในสนามในการเลือกลักษณะการใช้งานแบบ Direct transmission โดยมีการทำสัญลักษณ์หลังจากเจาะเตรียมไว้เพื่อที่จะได้นำเครื่องมือมาวางให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง 76
2.45 การกดแท่งรังสีให้เลื่อนลงไปในรูเจาะให้ลึกตามที่ต้องการ โดยคลายล๊อคกลไกที่แขนจับ หลังจากนั้นกดปุ่มคำสั่งให้เครื่องทำงาน 78
3.1 แผนผังขั้นตอนการก่อสร้างชั้นพื้นทาง 81
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำกับความแน่นแห้งสูงสุดของชั้นทางหินคลุก 83
4.2 ผลทดสอบการบดอัดและ CBR ของหินคลุกจากโครงการก่อสร้างทางหลวงในพื้นที่จังหวัดบุรีรัมย์ 84
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR/CBR_{max} และค่า $\gamma_d/\gamma_{d,\,max}$ 88
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งในสนามกับจำนวนรอบการบดอัดด้วยรถบด 90
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความแน่นแห้งในสนามต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับจำนวนรอบการบดอัดด้วยรถบด 91
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความแน่นแห้งในสนามต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับจำนวนรอบการบดอัดด้วยรถบดที่ใช้ความต่างกัน 92
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ c และความเร็วการบดอัด 93

4.8a ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ใช้ในการบดอัดจนได้ 94
4.8b ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ใช้ในการบดอัดจนได้ 94

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างชั้นทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement)โดยทั่วไปประกอบไปด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง วัสดุถมคันทาง และ/หรือ ชั้นดินเดิม (Subgrade) โครงสร้างชั้นทางแบบยืดหยุ่นถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นชั้นๆ เพื่อให้ความเค้นในแนวดิ่งที่เกิดจากน้ำหนักรถจะกระจายไปสู่ชั้นโครงสร้างทางตามความลึก ความเข้มข้นของความเค้นมีค่าสูงที่บริเวณใกล้ผิวจราจร และลดลงตามความลึก ดังนั้น ผู้ออกแบบจึงมักเลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่มีคุณภาพดีในชั้นโครงสร้างใกล้กับผิวจราจร และวัสดุที่มีคุณภาพรองลงมาในชั้นลึกลงไป เพื่อประหยัดงบประมาณค่าก่อสร้าง พื้นทางเป็นชั้นโครงสร้างชั้นทางลำดับที่สองถัดจากผิวทาง ซึ่งมีหน้าที่หลักในการต้านทานความเค้นในแนวดิ่งจากน้ำหนักรถและทำหน้าที่กระจายหน่วยแรงลงไปยังชั้นโครงสร้างถัดไป ชั้นพื้นทางมักเป็นหินคลุก ซึ่งเมื่อบดอัดแล้วจะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สูงหินคลุกที่นำมาใช้ในงานทางต้องมีขนาดคละดีตามมาตรฐาน ทล.-ม. 201/2544

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเทคโนโลยีใหม่ในการปรับปรุงคุณภาพการของชั้นพื้นทางหินคลุกให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น การใช้ปูนซีเมนต์ (Jiang and Fan 2013; Moropoulou et al. 2002) การใช้แคลเซียมซัลเฟต (Zhang et al 2013) และการใช้เส้นใยพอลิโพรไพลินผสมซีเมนต์ (Moropoulou et al. 2002) ในการปรับปรุงคุณภาพ อย่างไรก็ตาม การบดอัดก็ยังคงเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากการบดอัดทำได้ง่ายและประหยัด การบดอัดเป็นการไล่อากาศออกจากดินโดยการเติมน้ำและให้พลังงานงานบดอัดแก่ดิน น้ำมีหน้าที่ทำให้เม็ดดินอ่อนนุ่มและเป็นตัวหล่อลื่นให้เม็ดดินเคลื่อนตัวได้ง่าย ทำให้เม็ดดินสามารถเคลื่อนตัวเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลง ดินบดอัดจึงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น (กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้น และการอัดตัวและการซึมผ่านน้ำลดลง) ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดแปรผันตามปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัด ที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง ความหนาแน่นแห้งของดินจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในดิน แต่หากปริมาณน้ำในดินมีมากเกินไป น้ำส่วนเกินจะเข้าไปแทนที่เม็ดดิน ทำให้ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ความหนาแน่นแห้งของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้น ปริมาณน้ำที่ให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเรียกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum water content, OWC) ที่ปริมาณน้ำในดินค่าหนึ่ง ความหนาแน่นแห้งของดินจะเพิ่มขึ้นได้ เมื่อเพิ่มพลังงานการบดอัด การบดอัดในสนามทำโดยใช้

รถบดอัดบดอัดจนได้ความหนาแน่นแห้งไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ โดยควบคุมให้ปริมาณน้ำในดินมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ $\pm$ 3 ของ OWC แม้ว่าพลังงานการบดอัดที่ให้แก่ดินจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนเที่ยวของรถบดอัด แต่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดสำหรับปริมาณความชื้นในสนามค่าหนึ่งจะมีค่าได้ไม่เกินความหนาแน่นแห้งที่ปริมาณอากาศในดินเป็นศูนย์ (ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ) (Horpibulsuk et al., 2013)

นอกจากจำนวนเที่ยวจะมีอิทธิพลต่อความแน่นแล้ว ความเร็วและน้ำหนักล้อก็เป็นตัวแปรที่มีควบคุมความแน่นของดินบดอัด (Smith and Dickson 1990; Raper and Reeves 2007; Patel and Mani 2011; Taghavifar and Mardani 2013) การเพิ่มน้ำหนักของรถบดอัดช่วยเพิ่มความดันให้กับดิน ซึ่งมีผลทำให้ดินที่อยู่ในระดับที่ลึกลงไปมีค่าความแน่นเพิ่มขึ้น (Smith and Dickson 1990) การเพิ่มน้ำหนักและจำนวนเที่ยวช่วยให้ดินบดอัดมีความแน่นสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเร็วของรถบดอัดให้ผลในทางตรงกันข้าม (Taghavifar and Mardani 2013) การศึกษาอิทธิพลดังกล่าวข้างต้นต่อความแน่นของดินบดอัดในสนามในเชิงลึกยังมีอยู่อย่างจำกัดและจำเป็นต้องได้รับการศึกษาและวิเคราะห์อย่างลึกซึ้ง เพื่อนำมาซึ่งการบดอัดในสนามที่มีประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนเที่ยวและความเร็วในการบดอัดต่อความแน่นของดินบดอัด พร้อมทั้งวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการเลือกความเร็วและจำนวนรอบการบดอัด

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของหินคลุกในห้องปฏิบัติการ และการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม อันได้แก่ จำนวนเที่ยวและความเร็วในการบดอัด ต่อการพัฒนาความแน่นของชั้นทางหินคลุกในสนาม งานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อการประมาณความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ความเร็วในการบดอัดต่างๆ พร้อมทั้งสามารถประมาณเวลาและราคาค่าเช่าเครื่องจักร สำหรับการก่อสร้างชั้นทางหินคลุกและการควบคุมคุณภาพงานบดอัดที่มีประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อรวบรวมค่า CBRจากห้องปฏิบัติการ และนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBRและค่าความแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,\max}$) ความสัมพันธ์นี้สามารถใช้ประมาณค่า CBRเมื่อทราบค่าความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัด

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการพัฒนาความแน่นของหินคลุกที่มีลักษณะต่างกันและความเร็วของการบดอัดที่ต่างกัน

1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างความแน่นแห้งในสนาม และจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด

1.2.4 เพื่อนำเสนอขั้นตอนการบดอัดในสนามที่มีประสิทธิภาพ (ได้ความแน่นตามข้อกำหนดและลดต้นทุนการบดอัด)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งทำการการรวบรวมข้อมูลการบดอัดและซีบีอาร์ของวัสดุหินคลุกทั้งหมด 52 โครงการ ความแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำเหมาะสมได้จากการทดสอบการบดอัดแบบ Modified compaction test ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009) ค่าซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1883 (2007) ของหินคลุกที่รวบจากแหล่งวัสดุภายในจังหวัดบุรีรัมย์ โครงการก่อสร้างทางส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำนักทางหลวงที่ 8 (นครราชสีมา) กรมทางหลวงแห่งประเทศไทยผลทดสอบนำวิเคราะห์และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุหินคลุก ส่วนที่สองเป็นศึกษาตัวแปรควบคุมที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาความแน่นในสนามของชั้นพื้นทางหินคลุก ซึ่งประกอบไปด้วยความเร็วและจำนวนเที่ยวการบดอัด ความเร็วที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 1.5, 3.0 และ 6.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การทดสอบหาความแน่นในสนามของวัสดุพื้นทางหินคลุกใช้วิธีนิวเคลียร์ Nuclear method ตามมาตรฐาน ASTM D 5195-91 การทดสอบความแน่นในสนามเริ่มจากจำนวนเที่ยวที่ 5 ไปจนถึงจำนวนเที่ยวที่ 14 ผลการตรวจวัดนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งในสนามกับจำนวนเที่ยวที่ความเร็วต่างๆ การทดสอบในสนามดำเนินการที่โครงการก่อสร้างทาง ทางหลวงหมายเลข 224 ตอนต่อเขตเทศบาลตำบลละหานทราย – นิคมบ้านกรวด ตอน 1, ตอน 2 และตอน 3 อำเภอบ้านกรวดและอำเภอละหานทราย จังหวัดบุรีรัมย์ ชุดเครื่องจักรที่ใช้บดอัดชั้นพื้นทางหินคลุกในสนามประกอบไปด้วย รถบดล้อเหล็กแบบสั่นสะเทือน DYNAPAC รุ่นCA 302 ที่มีน้ำหนักล้อ (Wheel load, W) เท่ากับ 4000 กิโลปาสคาล แรงสั่นสะเทือนประมาณ 1,200 ถึง 4,000 รอบต่อนาที วิ่งตามด้วยรถบดล้อยางชนิดขับเคลื่อนด้วยตัวเอง และรถบดล้อเหล็กชนิดผิวหน้าเรียบ ท้ายสุด ผู้วิจัยจะนำเสนอแนวทางการควบคุมการบดอัดในสนามที่มีประสิทธิภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบความสัมพันธ์ระหว่าง ซี บี อาร์ และความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,\max}$)ของวัสดุพื้นทางหินคลุก ที่กระจายขนาดของเม็ดวัสดุ ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

1.4.2 พฤติกรรมการพัฒนาความแน่นของหินคลุกที่มีลักษณะต่างกันและความเร็วของการบดอัดที่ต่างกัน

1.4.3 ทราบลักษณะการพัฒนาความหนาแน่นแห้งในสนามตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด

1.4.4 ได้ขั้นตอนการทำงาน และควบคุมงานบดอัด ที่มีประสิทธิภาพ

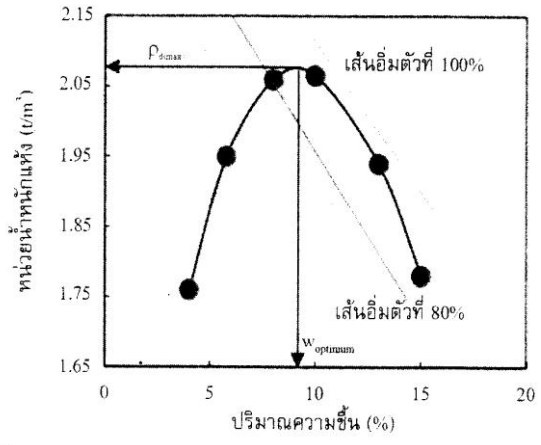
บทที่ 2
ปริทัศน์ วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานบดอัดเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญที่สุดในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิคอีกงานหนึ่ง เช่น งานก่อสร้างคันทางถนน (Road construction) การบดอัดคันดิน (raised embankment) งานถมดินหลังกำแพงกันดิน (backfill behind retraining wall) ตลอดจนงานเขื่อนดิน (earth dam) ซึ่งการบดอัดเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างมีความจำเป็นอย่างมาก ดังนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีการบดอัด การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบในสนาม เพื่อประกอบการออกแบบโครงสร้างดังกล่าวให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ของหน่วยงานต่างๆ

2.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)

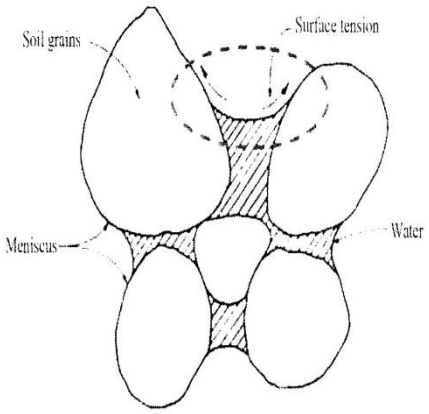
ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R.Proctor (1930) โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering New-Record (proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve)

Proctor ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดเส้นการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 2.1 ไว้ว่า ประสิทธิภาพของการบดอัดดินถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน โดยแบ่งการบดอัดดิน

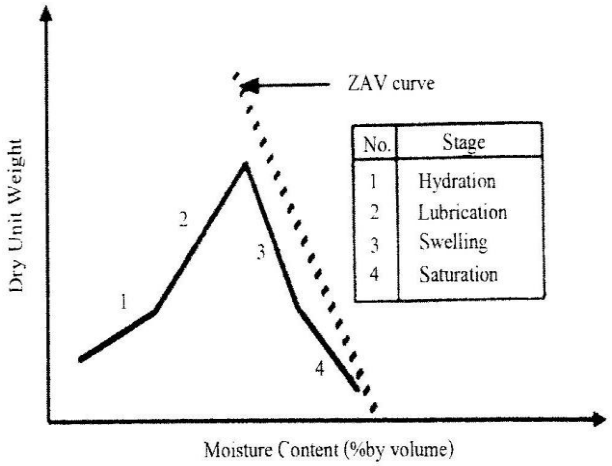
เป็น 2 ด้านคือ ด้านแห้งและด้านเปียก สำหรับการบดอัดดินที่แห้งมากๆ ดินจะมีแรงเสียดทานที่สูงมาก เนื่องจากแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี่ (Capillary Moisture) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมากๆ น้ำจะไปลดแรงคาพิลลารี่ และเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย ถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกเรื่อยๆ จนน้ำไปสลายแรงเสียดทานได้แล้ว น้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จนถึงปริมาณน้ำที่เต็มช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเรียกจุดที่ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดว่า maximum dry density และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้ว่า optimum moisture content หลังจากจุดนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินสูงมากๆ พบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป



รูปที่ 2.2 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ

2.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936)

Hogentogler นำเสนอเส้นกราฟการบดอัดที่แตกต่างกับ Proctor กล่าวคือ เขาได้นำเสนอเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (dry density) กับปริมาณความชื้นในรูปของปริมาณน้ำต่อปริมาตรรวม (molding moisture content: V_w/V) โดยลักษณะของเส้นกราฟแสดงด้วยเส้นตรง 4 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสาเหตุที่เขาได้นำเสนอการพล็อตเส้นกราฟแบบนี้เนื่องจากเขาพบว่าน้ำมีบทบาทอยู่ 4 ส่วน แบ่งได้เป็น 4 ช่วงที่มีผลทำให้ดินเกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด และทำให้โครงสร้างของดินบดอัดมีความแตกต่างกันโดยมีรายละเอียดแต่ละช่วง



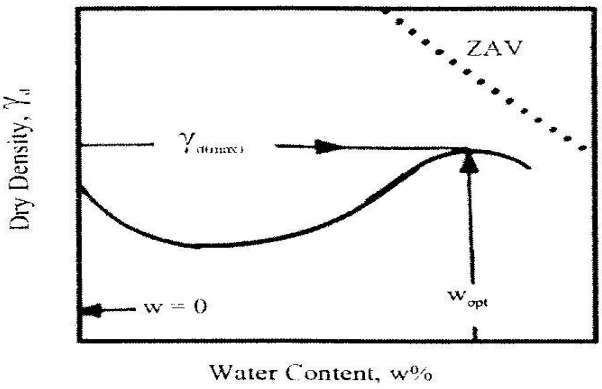
รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Hogentogler

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

ดังที่ Hogentogler ได้อธิบายไว้ข้างต้น มักจะประยุกต์ใช้โดยตรงกับดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกับ Proctor

2.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (1942)

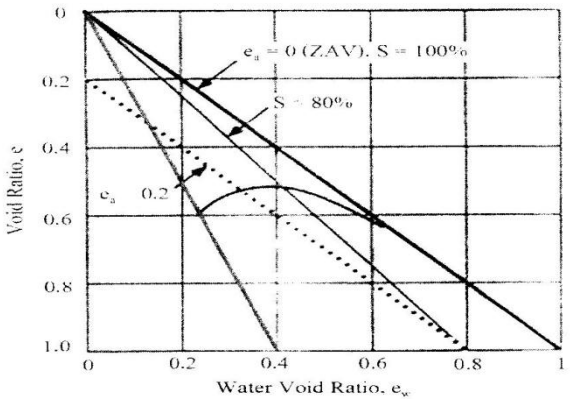
เขาได้อธิบายเส้นกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบ โดยเขาพบว่า นอกจากจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ปรากฏบนเส้นกราฟการบดอัดแล้ว ก่อนถึงด้านแห้งของการบดอัดจะมีจุดที่แสดงถึงค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเขาได้อธิบายถึงช่วงที่ดินมีความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดที่มีค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุดว่า ถ้าหากเริ่มบดอัดดินเม็ดหยาบที่แห้งมากๆ หรือดินที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์ เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงแรกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดความหนาแน่นแห้งต่ำสุด เมื่อเลยจุดนี้ไปก็จะเข้าสู่เส้นกราฟการบดอัดปกติ ซึ่งถ้าสังเกตจากเส้นกราฟพบว่า เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งที่จุดปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์กับจุดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด จะมีช่วงความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย และเขาได้กล่าวในเชิงวิชาการไว้ว่า สำหรับกรณีของทรายที่มีความแห้งมากๆ เมื่อเติมน้ำในช่วงแรก อนุภาคดินจะจับตัวกันด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ของน้ำในลักษณะคล้ายกระจุกของก้อนดินหรือทรายรอบตัวเอง ที่เรียกว่า Arching Effect ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินมากขึ้น โดย Arching Effect จะพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ดังนั้นปฏิกิริยาของน้ำที่เติมในช่วงแรกๆ จะแตกต่างจากกรณีของ Hogentrogler และ Proctor เนื่องจากดินทรายไม่มีประจุลบ ดังนั้นเมื่อเติมน้ำจะเกิดแรงตึงผิวทำให้เกิดแรงยึดแน่นปรากฏ (apparent cohesion) และเมื่อเติมน้ำมากขึ้นแผ่นฟิล์มจะมีความหนาขึ้น มีผลทำให้ Arching Effect ลดน้อยลงไป เป็นผลให้แรงดึงดูดของแรงตึงผิวลดลงตามลำดับ แล้วอนุภาคดินก็เริ่มจัดเรียงตัวกันใหม่ และหลังจากนั้นก็จะเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้วแต่เขาได้ให้ความหมายของ OMC แตกต่างจากคนอื่น กล่าวคือ OMC คือน้ำที่มีอยู่พอดีในมวลดินบดอัดที่ทำให้ดินอยู่ในสภาพที่ไปสลายแรงตึงผิวพอดี ที่เรียกว่า neutralizes surface tension และเมื่อมีพลังงานบดอัดมากระทำ จึงทำให้ทรายจัดเรียงตัวกันใหม่ทำให้ทรายแน่นขึ้น จนสุดท้ายถึงจุดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด เมื่อน้ำสูงขึ้นเกิน OMC ดินก็จะอ่อนตัวลง เป็นผลให้ความหนาแน่นแห้งลดลง โดยสรุปแล้ว ในการบดอัดดินทราย การที่จะให้ได้ความหนาแน่นแห้งค่อนข้างดี คือช่วงที่ทรายแห้งมากๆ และช่วงความชื้นที่ค่อนไปทางด้านเปียกไปแล้ว



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นนำเสนอโดย Buchanan

2.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956)

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



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอโดย Hilf

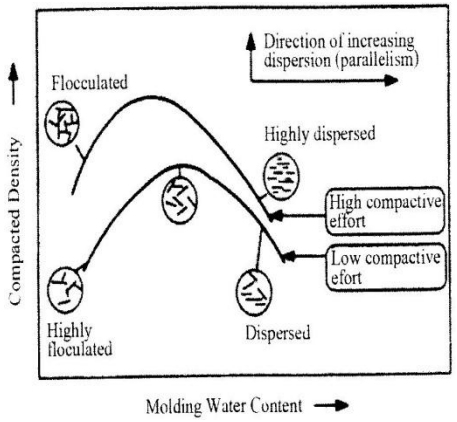
โดยพบว่า ที่จุด OMC ค่าอัตราส่วนช่องว่างจะมีค่าน้อยที่สุด โดยจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟเป็นจุดที่ค่าอัตราส่วนช่องว่างมาก และมีค่าระดับความอิ่มตัวน้อย เมื่อบดอัดไปก็จะได้ค่าอัตราส่วนช่องว่างที่น้อยที่สุด ซึ่งจุดนี้สามารถจะหาค่าสัดส่วนของอากาศได้ด้วย และพบว่าที่ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ค่าระดับความอิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ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

2.6 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985)

เขาได้เริ่มนำผลจากการดูโครงสร้างภายในดินเปรียบเทียบกับความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัด โดยเขาสนใจว่าคุณสมบัติของดินที่บดอัดทางด้านเปียกและทางด้านแห้งมีความแตกต่างกันเกิดจากสาเหตุใด เขาสังเกตจากปัจจัยหลายๆ อย่างพบว่า ในความเป็นจริงแล้ว การบดอัดในสนามไม่สามารถบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ดังนั้นในการเติมน้ำจะมีช่วงหนึ่งที่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงนี้แล้วคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเป็นไปตามที่ต้องการ แต่เมื่อเติมน้ำเกินช่วงนี้ไปเป็นช่วงที่เขาไม่แนะนำ ซึ่งเขาให้เหตุผลจากการพิจารณาดูโครงสร้างภายในของดินเหนียว พบว่า ในช่วงการบดอัดดินทางด้านแห้ง ลักษณะโครงสร้างของดินจับตัวกันเป็นกระจุก โดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นเดียวกัน การใช้พลังงานบดอัดต่ำ ความเป็นกระจุกของดินมีมาก และจะน้อยลงเมื่อใช้พลังงานการบดอัดที่สูง เป็นผลให้โครงสร้างของดินชิดกันมากขึ้นด้วย เมื่อเติมน้ำเข้าไปโดยที่พลังงานคงที่ สังเกตเห็นว่าโครงสร้างของดินแน่นขึ้น อัตราส่วนช่องว่างลดลงจนกระทั่งเกินจุด OMC ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างดินจะเป็นแบบขนานกันมากขึ้น เมื่อ

ความชื้นยิ่งมากขึ้น ความเป็นระเบียบของโครงสร้างดินก็ยิ่งมากขึ้นตาม การที่โครงสร้างดินจัดเรียงตัวกันในแนวขนานถือว่าไม่ดี เพราะว่าเป็นระนาบที่อ่อนแอที่สุด โดยสรุปแล้วเขาพยายามตอบคำถามว่าทำไมจุดที่มีความหนาแน่นแห้งเท่ากันแต่ปริมาณน้ำไม่เท่ากัน เมื่อเขาใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูพบว่าการบดอัดดินในด้านแห้งมีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบระเกะระกะ (flocculated structure) ในทางตรงกันข้าม เมื่อเติมน้ำเกินจุด OMC เป็นการบดอัดทางด้านเปียก มีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบขนาน (dispersed structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นแห้งเท่ากัน โดยเปรียบเทียบดินบดอัดทางด้านแห้งกับดินบดอัดทางด้านเปียก พบว่า

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



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน

2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)

ทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ในงานบดอัดดิน คือ สมการความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับระดับขั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำ

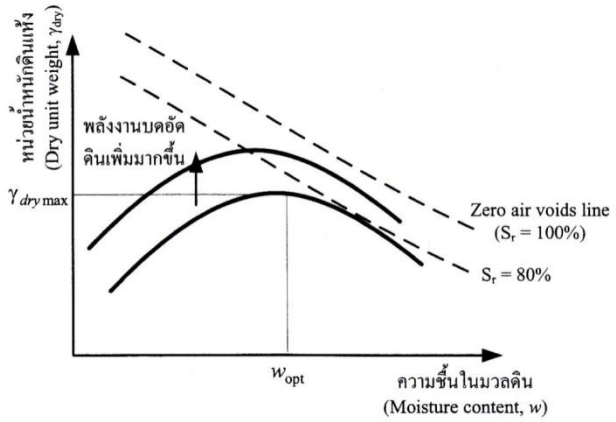
$$\gamma_{dry} = \left(\frac{G_s}{1+e}\right)\gamma_w = \left(\frac{G_s}{1+wG_s/S_r}\right)\gamma_w \qquad (2.1)$$

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

1. $S_r = 1$ หมายถึง ดินจะต้องอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ

2. w_{opt} หมายถึง ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ไม่แห้งจนเกินไป (เพราะถ้าแห้งไปดินจะไม่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ) และไม่มากจนเกินไป (เพราะจะทำให้อัตราส่วนช่องว่างมากขึ้น)

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



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)

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

ในทางปฏิบัติแล้ว การที่จะบดอัดดินให้อยู่ในสภาพทางทฤษฎีนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าการบดอัดดินนอกจากจะขึ้นกับปริมาณน้ำแล้ว ยังขึ้นกับระดับพลังงานกล (Mechanical energy) ที่กระทำกับดินที่บดอัดอีกด้วย โดยพลังงานที่ให้กับดินขณะทำการบดอัดจะต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะขับไล่ฟองอากาศให้ออกจากมวลดิน จนทำให้ดินอยู่เข้าใกล้สภาวะไร้ช่องว่างอากาศ (Zero

air voids) จากรูปที่ 2.7 เมื่อเพิ่มพลังงานการบดอัดดิน จะพบว่าเส้นโค้งการบดอัดดินจะเคลื่อนตัวมาทิศทางบนซ้าย โดยหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด จะมีค่ามากขึ้น แต่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม w_{opt} จะมีค่าลดลง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเส้นโค้งการบดอัดดินจะถูกควบคุมด้วยเส้นไร้ช่องว่างอากาศ (Zero air voids line) เส้นโค้งการบดอัดดินจะไม่ตัดเส้นไร้ช่องว่างอากาศ สมการเส้นไร้ช่องว่างอากาศจะหาได้จากสมการที่ 2.1 และแทนค่า $S_r = 1$ นั่นคือ

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

2.7.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน

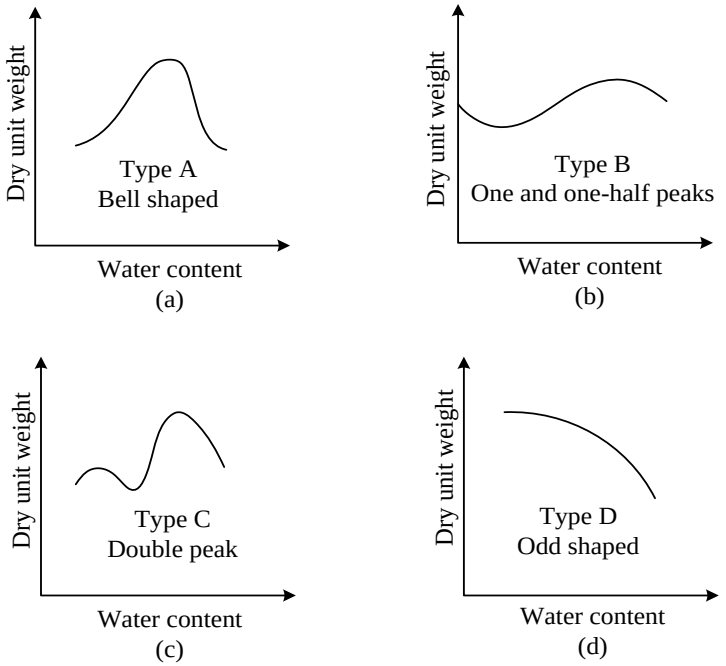
ดังได้อธิบายแล้วข้างต้นว่าปริมาณความชื้นในดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อความหนาแน่นของดินบดอัดนอกเหนือจากปริมาณความชื้นแล้ว ยังมีปัจจัยอีกสองปัจจัย ซึ่งก็คือชนิดของดิน และพลังงานในการบดอัด

2.7.2 ชนิดของดิน

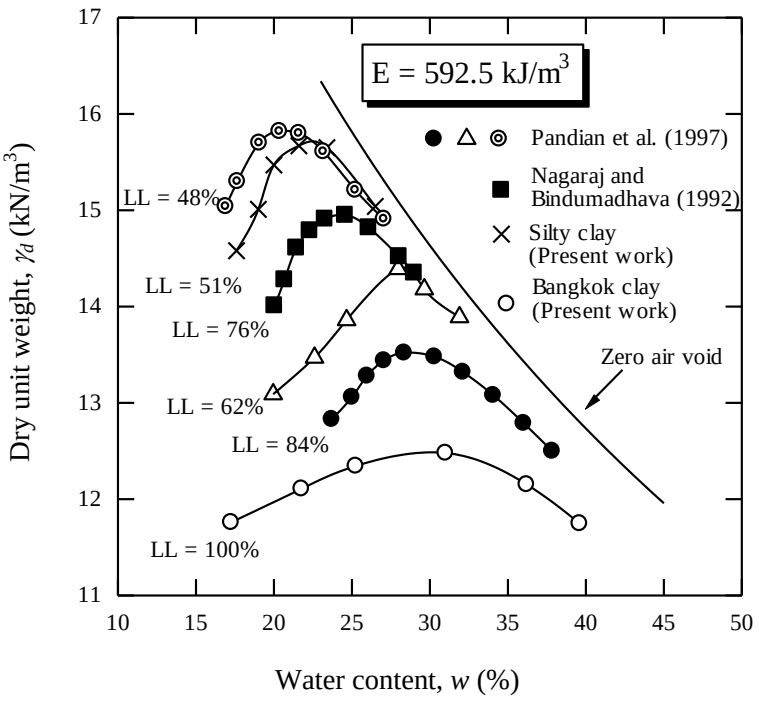
ชนิดของดินในที่นี้ครอบคลุมถึง การกระจายของเม็ดดิน รูปร่างของเม็ดดินความถ่วงจำเพาะของดินและปริมาณและชนิดของแร่ดินเหนียว

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

สำหรับการบดอัดดินเหนียว Horpibulsuk (2005) แสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟการบดอัดแปรผันอย่างมากกับขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดเหลวยิ่งมาก หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดยิ่งมีค่าน้อยลง ในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมยิ่งมีค่ามากขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงผลทดสอบการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor test) การที่ขีดจำกัดเหลวมีอิทธิพลต่อเส้นกราฟการอัดตัวคายน้ำ เนื่องจากขีดจำกัดเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนผลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (pore fluid)



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ



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

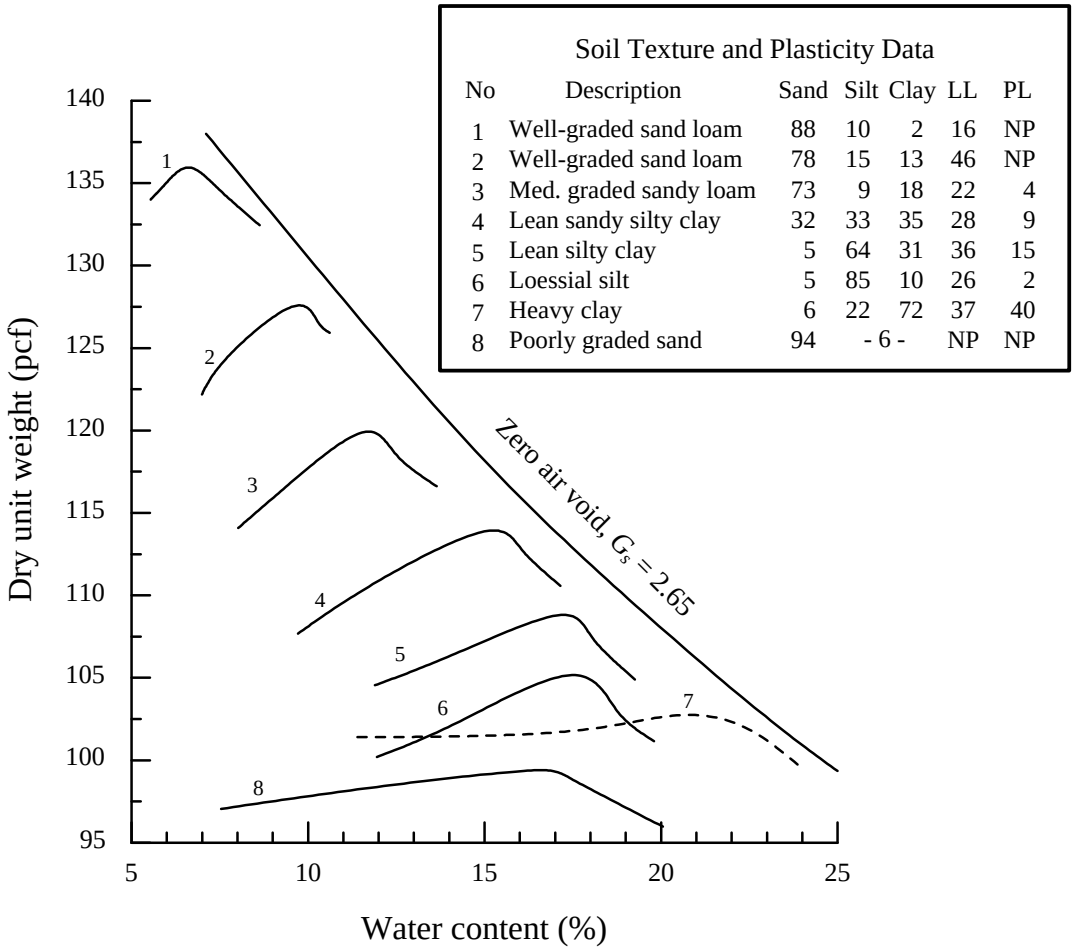
Gurtug and Sridharan (2002) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเม็ดละเอียด (fine-grained soil) ที่บดอัดแบบวิธีมาตรฐาน (standard Proctor test) มีความสัมพันธ์โดยตารางกับพิกัดพลาสติก ดังนี้

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

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

เมื่อ γ_{dPL} คือหน่วยน้ำหนักแห้งที่พิกัดพลาสติก คำนวณโดยสมมติว่าพิกัดพลาสติกมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ เท่ากับร้อยละ 100ความสัมพันธ์นี้ช่วยให้สามารถประมาณจุดเหมาะสม (Optimum point) ได้อย่างทันที เมื่อทราบค่าพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก

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



รูปที่ 2.10 อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg. 1960)

2.8 พลังงานการบดอัด

พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย (E) สามารถคำนวณได้ดังนี้

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

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

NL = จำนวนชั้นของการบดอัด (number of layers)

W = น้ำหนักของค้อน (weight of hammer)

H = ระยะตกกระทบของค้อน (height of drop of hammer)

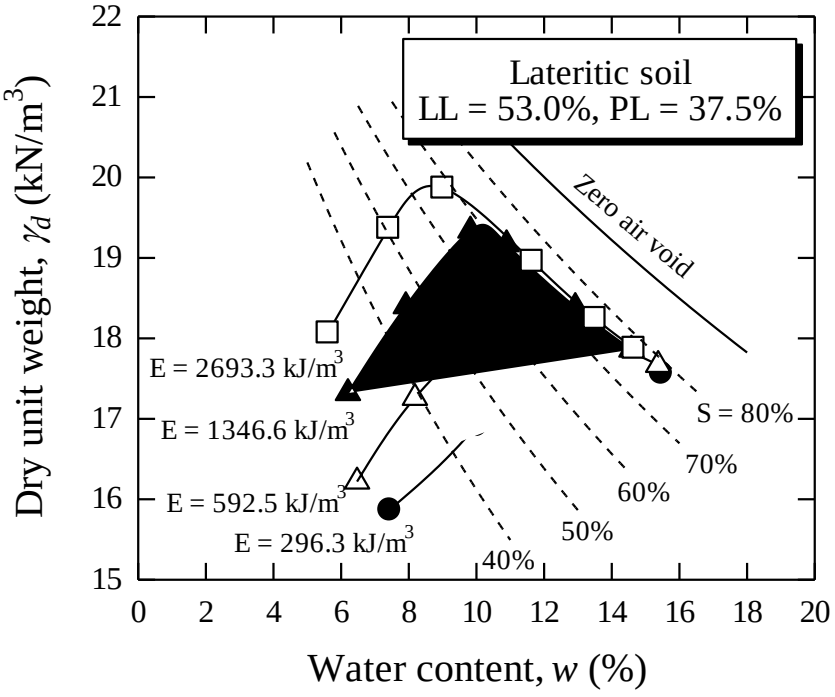
ดังนั้น พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย ในแบบหล่อขนาด 4 นิ้ว สำหรับการบดอัดแบบมาตรฐาน (E_{st}) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน (E_{mod}) คือ

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

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

$$= 2693.3 \text{ กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร}$$

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



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (Horpibulsuk et al., 2004)

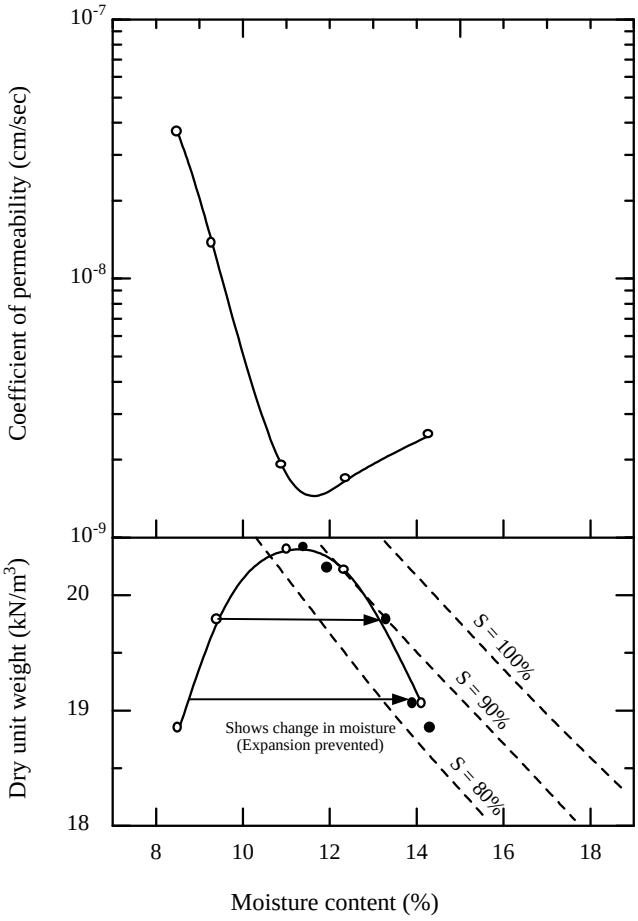
จากรูปที่ 2.11 เราสามารถสรุปได้ว่า

1. หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้น
2. ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มของพลังงานการบดอัด

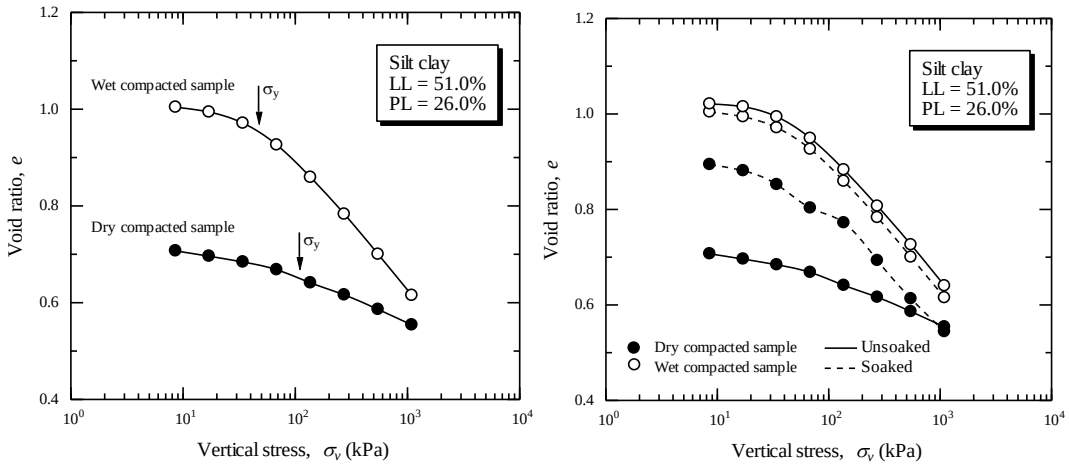
2.9 การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม

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

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



รูปที่ 2.12 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (Lambe, 1962)

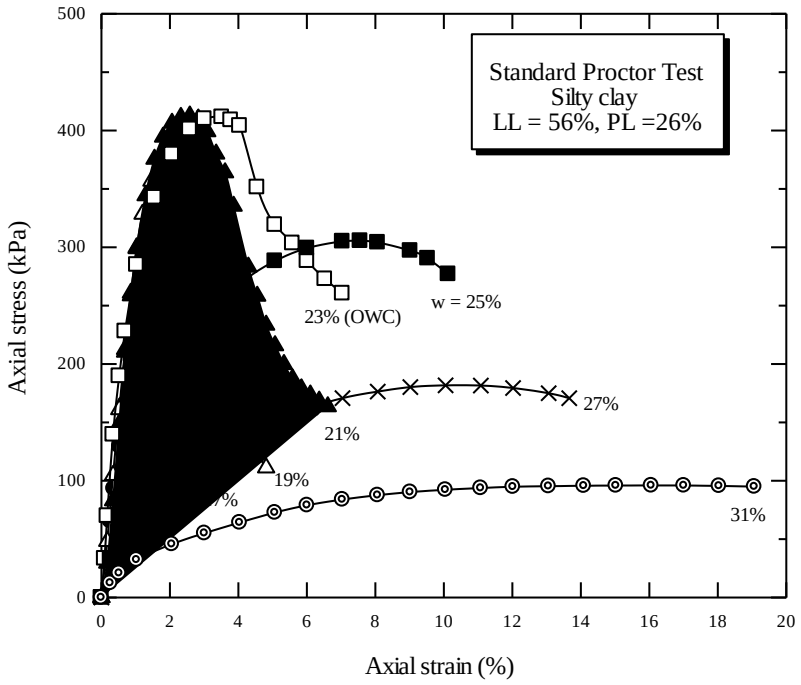


(a) (b)

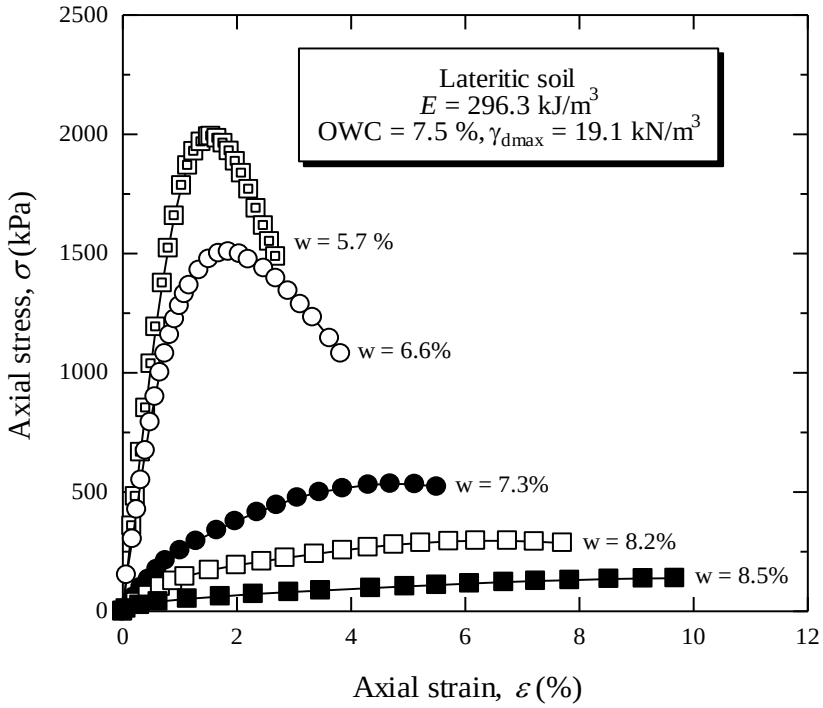
รูปที่ 2.13 ลักษณะการอัดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวบดอัดที่ด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณ ความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (สุขสันติ์, 2545)

อิทธิพลของปริมาณความชื้น ต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินบดอัดจะมีความแตกต่างกันตามแต่ชนิดของดิน (ดูรูปที่ 2.14 และ 2.15) สำหรับดินเม็ดละเอียด (รูปที่ 2.14) ดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านแห้งจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากนี้ดินบดอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมีค่าความเครียดที่จุดวิบัติต่ำกว่าดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านเปียก ดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จะแสดงพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว (Ductile)

สำหรับดินเม็ดหยาบ (รูปที่ 2.15) กำลังอัดแกนเดียวของดินบดอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มที่จะมีคุณสมบัติแบบแตกง่าย (Brittle) มากกว่าด้านเปียก เช่นเดียวกับดินเม็ดละเอียดแต่กำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบที่ด้านแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น และมีค่ามากที่สุดปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัด (สุขสันต์ 2545)



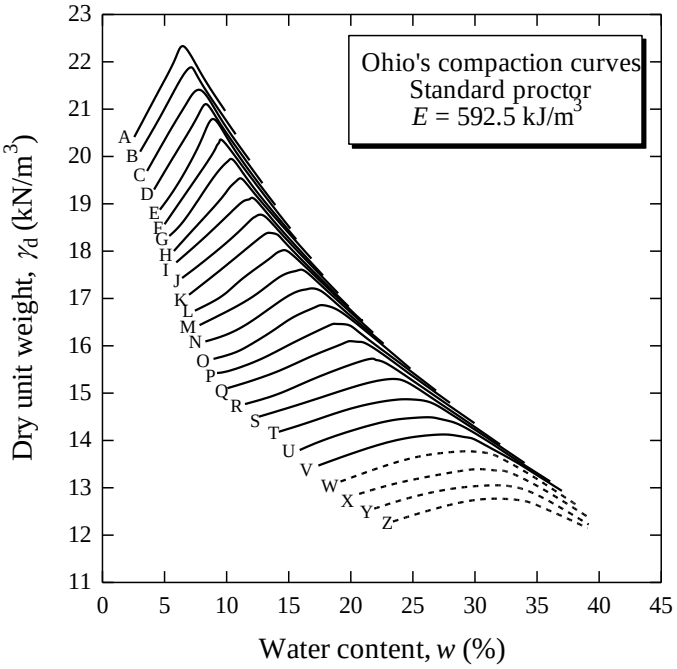
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินลูกรังบดอัด

2.10 การทำนายกราฟการบดอัด

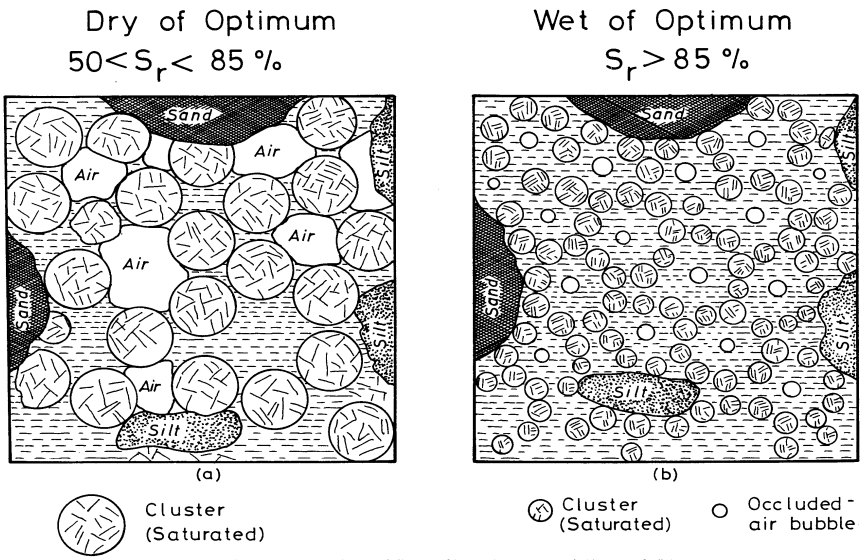
การทำนายกราฟการบดอัดเริ่มต้นครั้งแรกโดยJoslin (1959)ซึ่งเป็นผู้สร้างกราฟการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานจำนวน 26 กราฟ และให้ชื่อว่ากราฟ Ohio (Ohio curves) ดังแสดงในรูปที่ 2.16กราฟเหล่านี้สร้างขึ้นจากการรวบรวมผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของดินชนิดต่างๆ จำนวนมาก ในมลรัฐ Ohio กราฟ Ohio นี้มีประโยชน์ในการประมาณกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทราบผลทดสอบของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งค่าหนึ่ง แต่การประมาณนี้ทำได้เพียงแค่ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

Nagaraj et al. (2006) ได้นำเสนอแบบจำลองโพรงระหว่างอนุภาคดินอุดมคติสำหรับการทำนายกราฟการบดอัดดินเม็ดละเอียดภายใต้พลังงานการบดอัดต่างๆ (รูปที่ 2.17) โดยกล่าวว่าทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม สถานะของน้ำ (Water phase) และอากาศ (Air phase) ในมวลดินบดอัดจะมีความต่อเนื่อง จุดเชื่อมต่อระหว่างอากาศและน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากความโค้งผิวน้ำ (Meniscus) จะเชื่อมต่อโพรงระหว่างกลุ่มอนุภาคดินเหนียวเมื่อระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเพิ่มขึ้น ความต่อเนื่องของอากาศ (Air phase) จะลดลงจนในที่สุดอากาศจะก่อตัวเป็นฟองอากาศ (Air bubble) จากแบบจำลองดังกล่าว Nagaraj et al. (2006) ได้เสนอพารามิเตอร์สถานะสองตัว ($w/S^{0.5}$และ w/S^2) สำหรับดินเม็ดละเอียดที่บดอัดทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้น

เหมาะสม และกล่าวว่าที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง แม้ว่าปริมาณความชื้นจะเปลี่ยนแปลงตามระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่พารามิเตอร์สถานะจะมีค่าคงที่



รูปที่ 2.16 กราฟการบดอัด Ohio (ปรับปรุงจาก Joslin, 1959)



รูปที่ 2.17 แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด (Nagaraj et al., 2006)

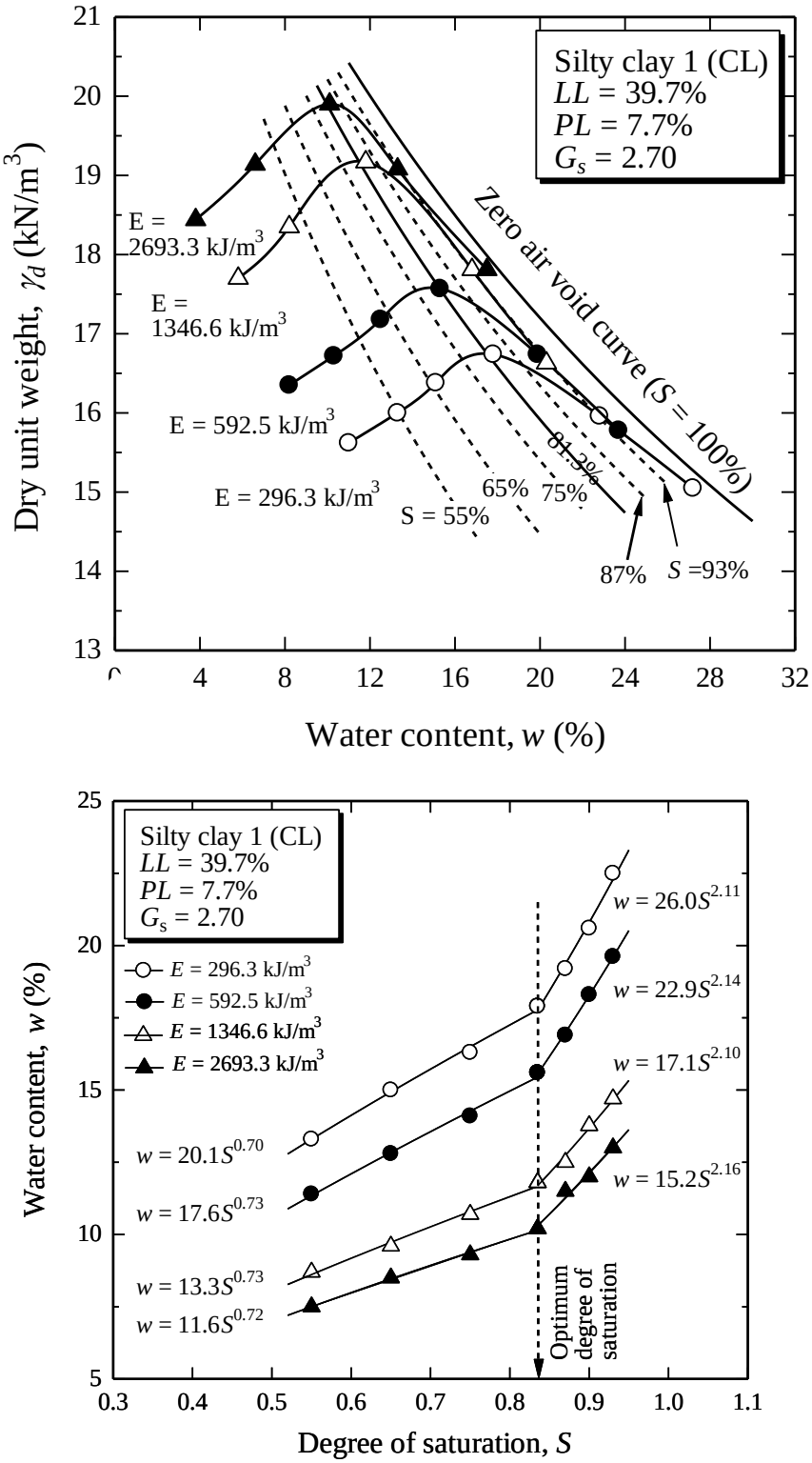
Horpibulsuk et al. (2008a และ 2009a) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะกราฟการบดอัดของดินเม็ดละเอียด 9 ชนิด ซึ่งครอบคลุมดินที่มีระดับการบวมตัวและสภาพความเป็นพลาสติกตั้งแต่ต่ำจนถึงสูง (FSR = 0.2 ถึง 2.1, LL = 39.7 ถึง 256.3% และ PL = 6.1 ถึง 48.2%) และดินเม็ดหยาบ 16 ชนิด ซึ่งครอบคลุมดินทั้งหมดที่จำแนกด้วยระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) พวกเขาพบว่าพารามิเตอร์สถานะที่เสนอโดย Nagaraj et al. (2006) ไม่สามารถใช้ได้กับดินทุกชนิด จึงได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งในฟังก์ชันพาวเวอร์ ดังนี้

$$w = A_d S^{B_d} \qquad \text{สำหรับการบดอัดด้านแห้ง} \qquad (2.10)$$

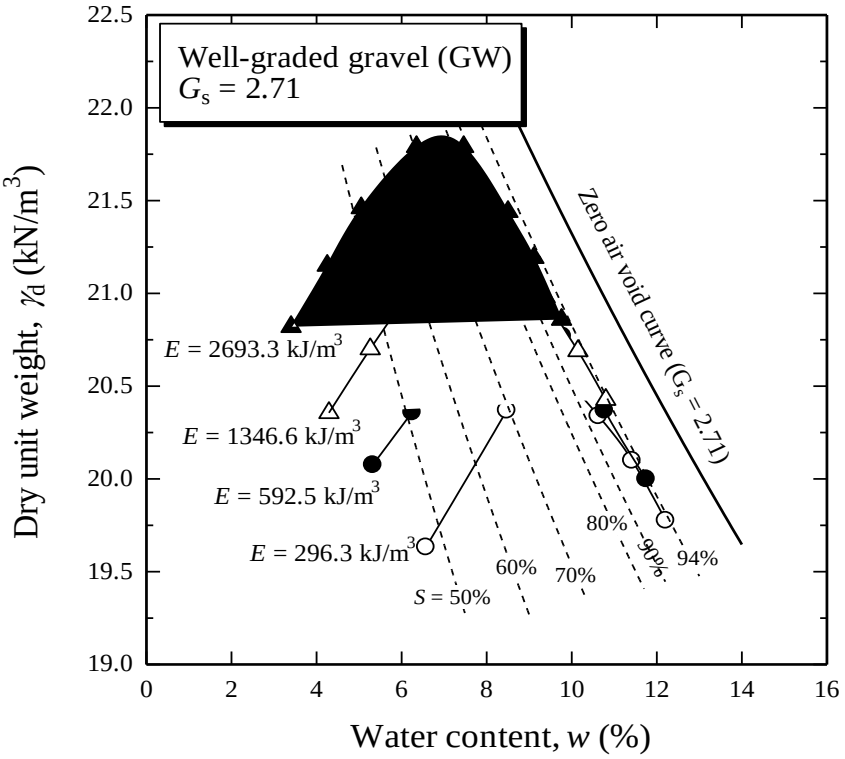
$$w = A_w S^{B_w} \qquad \text{สำหรับการบดอัดด้านเปียก} \qquad (2.11)$$

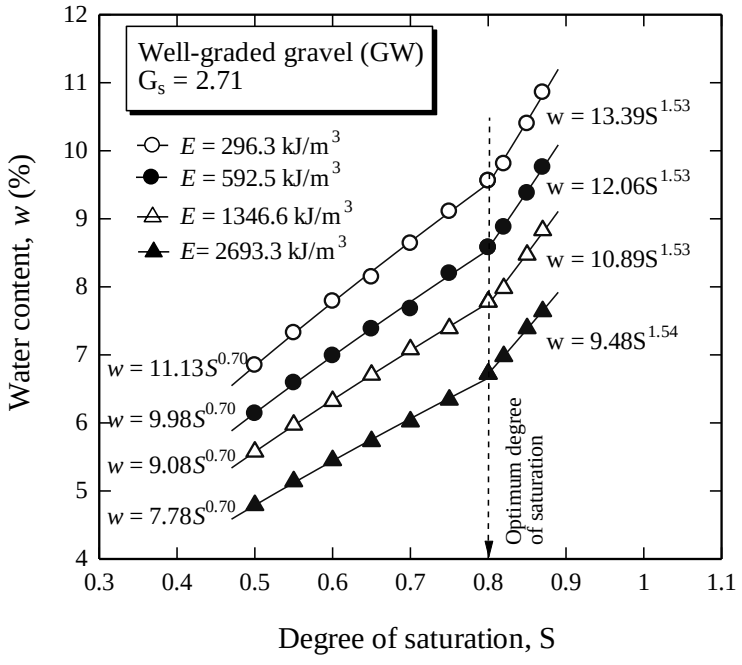
เมื่อ A_d, B_d, A_w, และ B_wคือค่าคงที่ ปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำมีหน่วยเป็นร้อยละและจุดทศนิยม ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถอธิบายผลทดสอบในห้องปฏิบัติการได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 2.16 สำหรับดินเหนียวปนดินตะกอน (Silty clay) และรูปที่ 2.17 สำหรับกรวดที่มีความคละดี (Well-graded gravel) จากความสัมพันธ์นี้ Horpibulsuk et al. (2008a) ได้เสนอวิธีการประมาณระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่จุดเหมาะสม (Optimum degree of saturation, *ODS*) แบบใหม่ โดยนิยามว่าเป็นจุดตัดระหว่างสมการที่ (2.10) และ (2.11)



รูปที่ 2.18(a) กราฟการบดอัด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินเหนียวปนดินตะกอน (Horpibulsuk et al., 2008a)



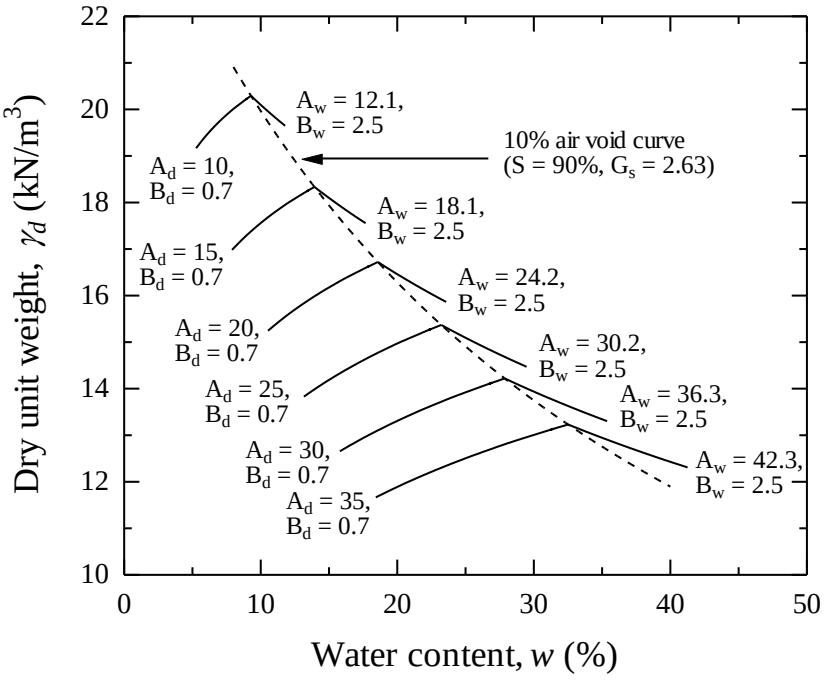


(a) (b)

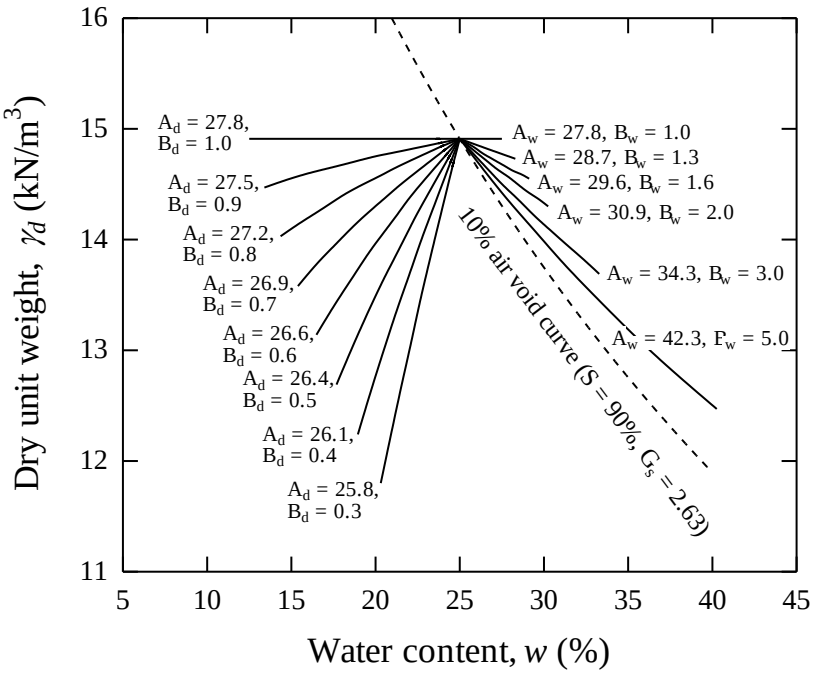
รูปที่ 2.19(a) กราฟการบดอัด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของกรวดที่ขนาดคละดี (Horpibulsuk et al., 2009a)

ถึงแม้ว่าลักษณะกราฟการบดอัดแปรผันตามชนิดของดิน (ยกตัวอย่างเช่น ดินตะกอนมีความไวตัวต่อปริมาณความชื้น และดินเหนียวมีความไวตัวต่อพลังงานการบดอัด เป็นต้น) แต่พารามิเตอร์ A_d, B_d, A_w, และB_wสามารถอธิบายลักษณะกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19 สำหรับ B_dและ B_wค่าหนึ่ง เมื่อ A_dและ A_wมีค่าลดลง หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น (ปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมีค่าลดลง) (รูปที่ 2.18) พารามิเตอร์ B_dและ B_wเป็นตัวควบคุมระดับความไวตัวต่อน้ำ (ความชันของกราฟการบดอัด) ทางด้านแห้งและด้านเปียกตามลำดับ ระดับความไวตัวต่อน้ำมีค่าสูงขึ้น เมื่อ B_dมีค่าลดลง และ B_w มีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 2.19) ความชันของกราฟการบดอัดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณความชื้น) เมื่อ B_dและ B_wมีค่าเท่ากับ 1.0

จากผลทดสอบการบดอัดดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดหลายชนิด Horpibulsuk et al. (2008a และ 2009a) สรุปว่าสำหรับดินชนิดหนึ่ง A_dและ A_wมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัด ขณะที่ B_dและ B_wมีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด (ไม่แปรผันตามพลังงานการบดอัด) (ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17) B_dมีค่าประมาณ 0.70 ถึง 0.86 สำหรับดินเม็ดละเอียด และประมาณ 0.62 ถึง 0.74 สำหรับดินเม็ดหยาบB_wมีค่าประมาณ 1.50 ถึง 2.72 สำหรับดินเม็ดละเอียด และประมาณ 1.53 ถึง 2.35 สำหรับดินเม็ดหยาบ ซึ่งแตกต่างจากผลงานวิจัยของ Nagaraj et al. (2006) (สมมติว่า B_d = 0.5 และ B_w = 2.0)



รูปที่ 2.20 อิทธิพลของ A_dและA_wต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008a)



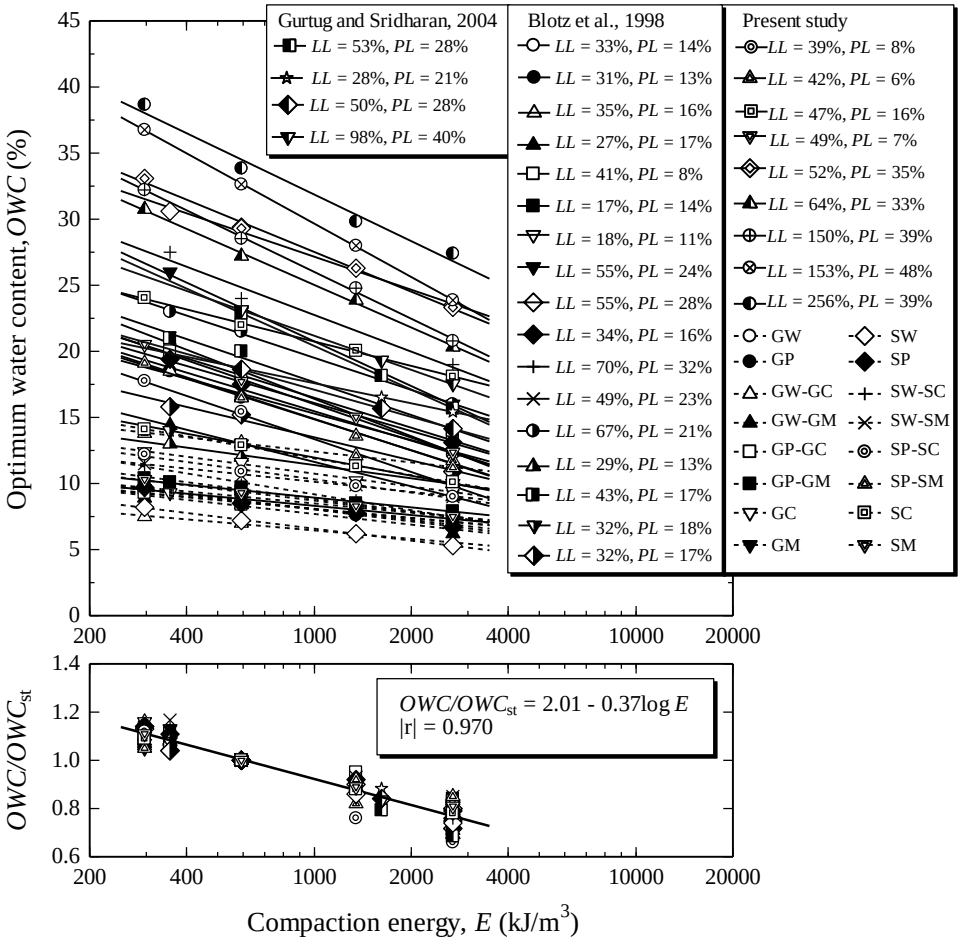
รูปที่ 2.21 อิทธิพลของ B_dและB_wต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008a)

แม้ว่าพารามิเตอร์ A_d, B_d, A_wและ B_wจะมีความแตกต่างกันตามแต่ชนิดของดิน แต่อัตราส่วนระหว่าง A_d/A_{dst}และ A_w/A_{wst}ที่แต่ละพลังงานการบดอัด (เมื่อ A_{dst}และ A_{wst}คือค่าของ A_dและ A_wที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ) มีค่าประมาณเกือบคงที่สำหรับทุกดิน และมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2009a) ดังนั้น เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.10) และ (2.11) จะพบว่าอัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC/OWC_{st}) จะมีค่าแปรผันตามพลังงานการบดอัด และเป็นค่าคงที่สำหรับดินบดอัดทุกชนิด เพราะ B_dและ B_wมีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสมและพลังงานการบดอัดแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์นี้เป็นเอกภาพสำหรับทั้งดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบบดอัด และสามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$\frac{OWC}{OWC_{st}} = 2.01 - 0.37 \log E \qquad (2.12)$$

สมการนี้สามารถประมาณปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดใดๆ ได้ เพียงแค่ทราบปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินนั้นที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดสามารถประมาณได้โดยสมมติว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่พลังงานการบดอัดต่างๆ มีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสม อัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสม และพลังงานการบดอัด (Horpibulsuk et al, 2009a)

โดยอาศัยสมการพาวเวอร์ของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วย (สมการที่ (2.10) และ (2.11)) และสมการอัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสม (สมการที่ (2.12) การทำนายกราฟการบดอัดที่พลังงานการบดอัดใดๆ จากผลทดสอบการบดอัดที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งสามารถสรุปได้เป็นขั้นตอนดังนี้

1. จากข้อมูลกราฟการบดอัด ที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง หาค่า A_d, B_d, A_wและ B_wและจุดเหมาะสม ($\square_{d\max}$, OWCและ ODS)

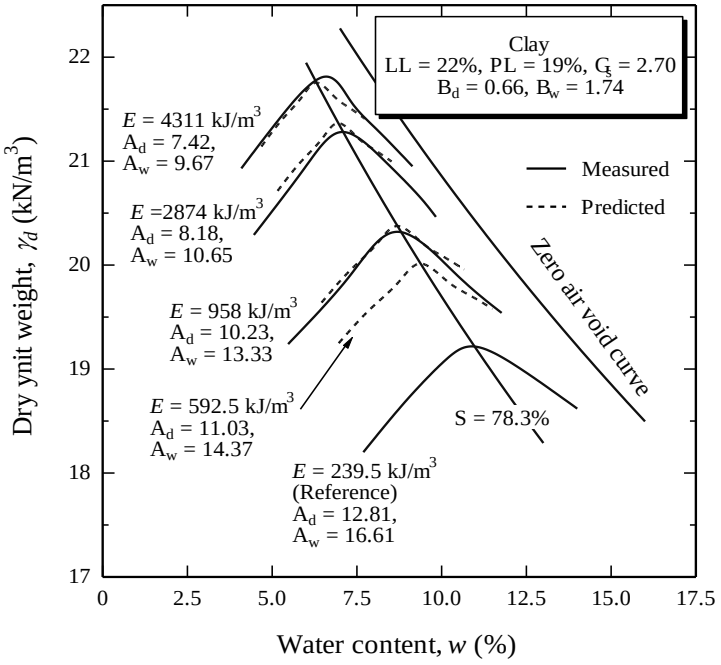
2. จากค่า *OWC*และ *ODS*ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1) หาค่า OWC_{st}จากสมการ (2.12) และประมาณค่า $(\square_{d\max})_{st}$โดยสมมติว่า *ODS*มีค่าคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด
3. หาค่าจุดเหมาะสม ($\square_{d\max}$, *OWC*)สำหรับพลังงานที่ต้องการโดยการแทนค่าOWC_{st}ในสมการที่ (2.12)
4. หาค่า A_dและ A_wที่พลังงานการบดอัดที่ต้องการจากสมการที่ (2.13) และ (2.14)

$$A_d = \frac{OWC}{ODS^{B_d}} \tag{2.13}$$

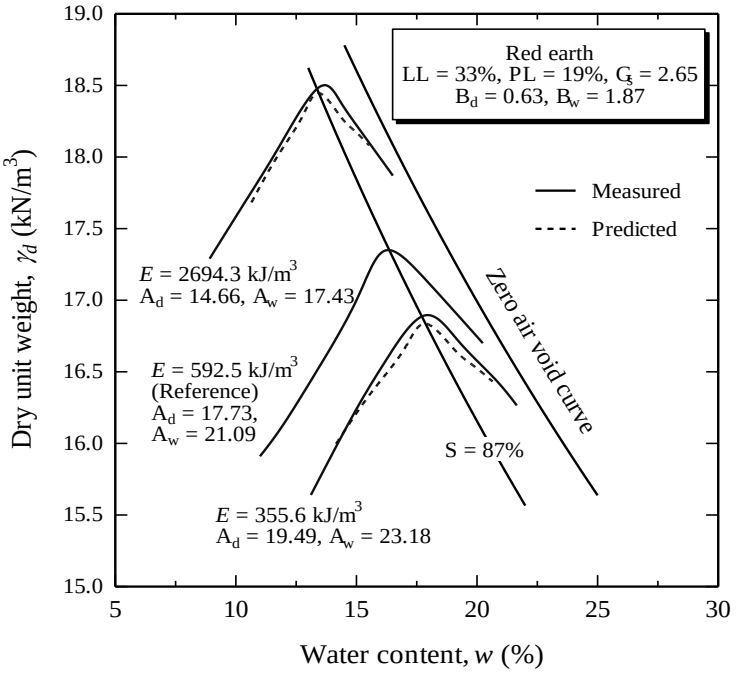
$$A_w = \frac{OWC}{ODS^{B_w}} \tag{2.14}$$

5. หาค่าปริมาณความชื้น (*w*) ทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำค่าต่างๆ โดยอาศัยสมการที่ (2.10) และ (2.11) ตามลำดับ และหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง ($\square_d$)
6. วาดเส้นกราฟการบดอัดดินทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมโดยการต่อเส้นเชื่อมจุด ($\square_d$, *w*) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5

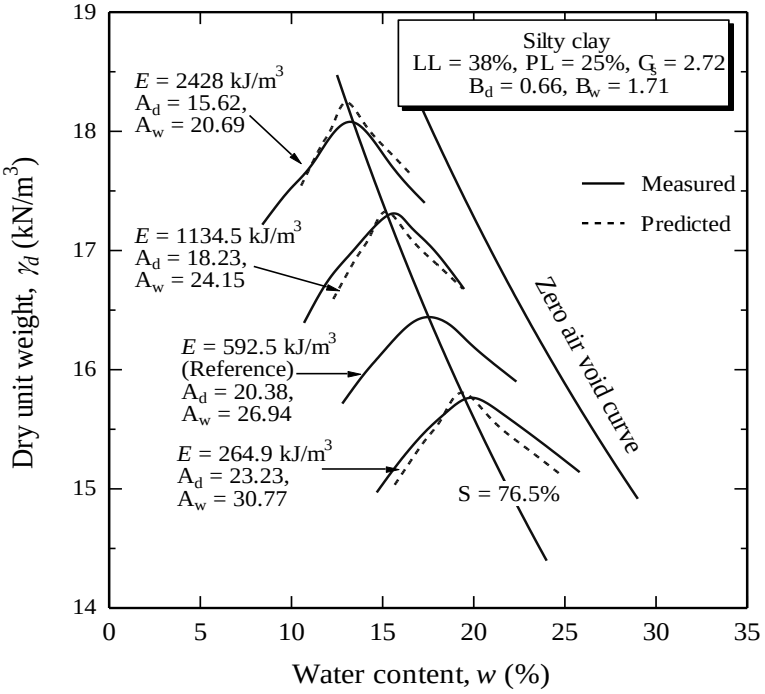
รูปที่ 2.21 ถึง 2.25 แสดงกราฟการบดอัดของดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบที่รวบรวมจากผลงานวิจัยในอดีต จะเห็นได้ว่ากราฟการบดอัดดินที่ได้จากการทำนายมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมากซึ่งเป็นการแสดงความแม่นยำของวิธีการทำนายกราฟการบดอัดที่นำเสนอ เมื่อใช้กราฟการบดอัดของ Ohio เป็นกราฟอ้างอิงสำหรับดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบที่บดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) กราฟการบดอัดที่พลังงานใดๆ สามารถสร้างขึ้นได้ตามขั้นตอนที่นำเสนอข้างต้น กราฟที่สร้างขึ้นนี้เรียกว่ากราฟการบดอัดของ Ohio ปรับปรุง (Modified Ohio's compaction curves) รูปที่ 2.26 และ 2.28 แสดงกราฟการบดอัดของ Ohio ปรับปรุง สำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับกราฟเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากในการทำนายกราฟการบดอัดที่พลังงานที่ต้องการโดยอาศัยเพียงแค่หนึ่งผลทดสอบของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้ง



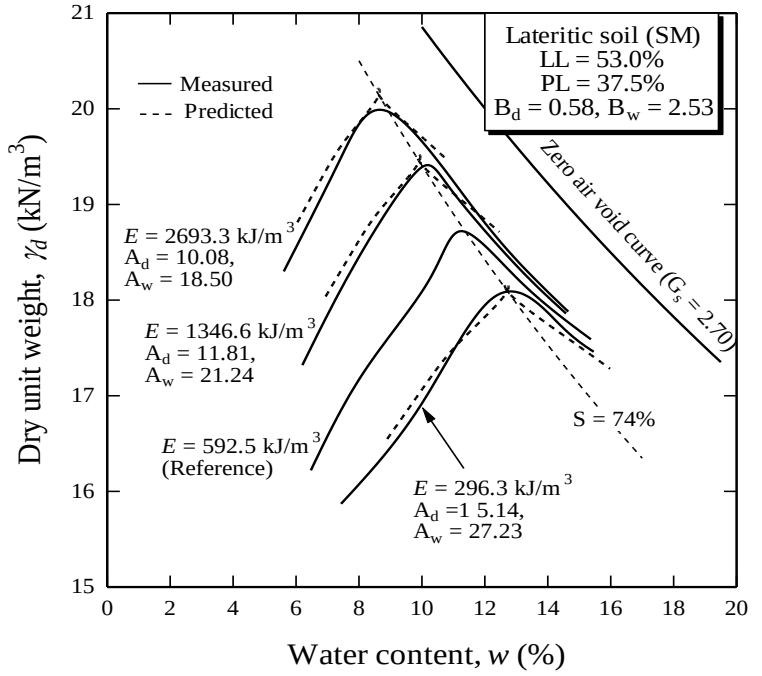
รูปที่ 2.23 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียว (ข้อมูลจาก Proctor, 1948) (Horpibuksuk et al., 2008a)



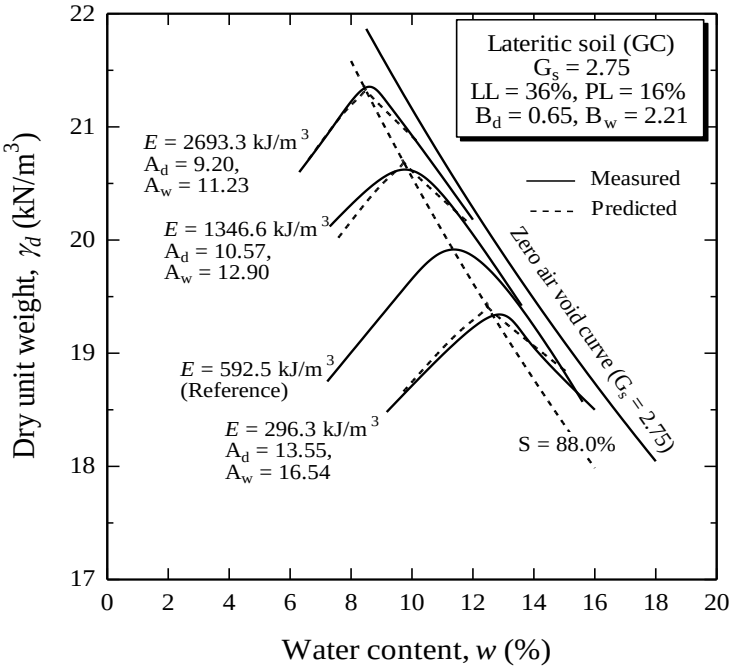
รูปที่ 2.24 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของ Red earth (ข้อมูลจาก US Army Crops of Engineers, 1970) (Horpibusluk et al., 2008a)



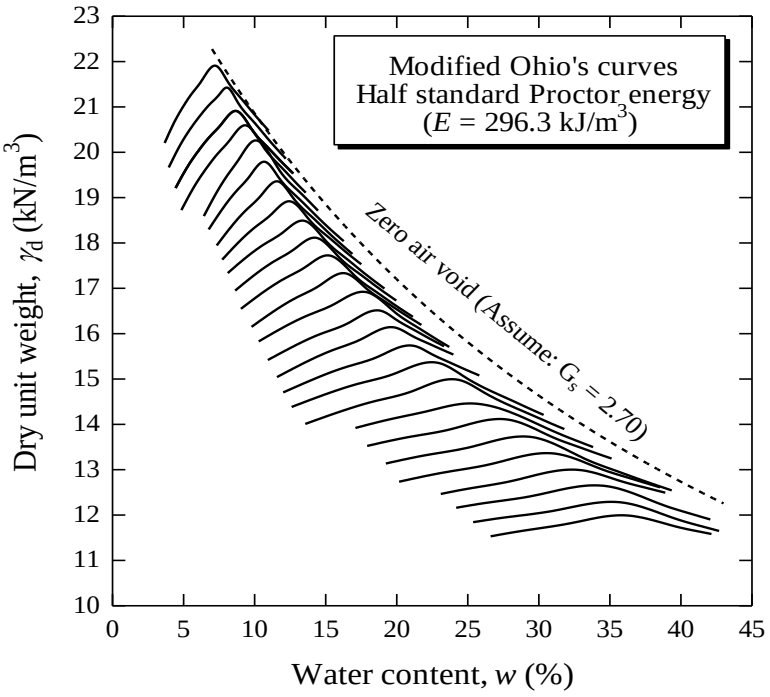
รูปที่ 2.25 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน (ข้อมูลจาก Turnbull and Foster, 1956) (Horpibulsuk et al., 2008a)



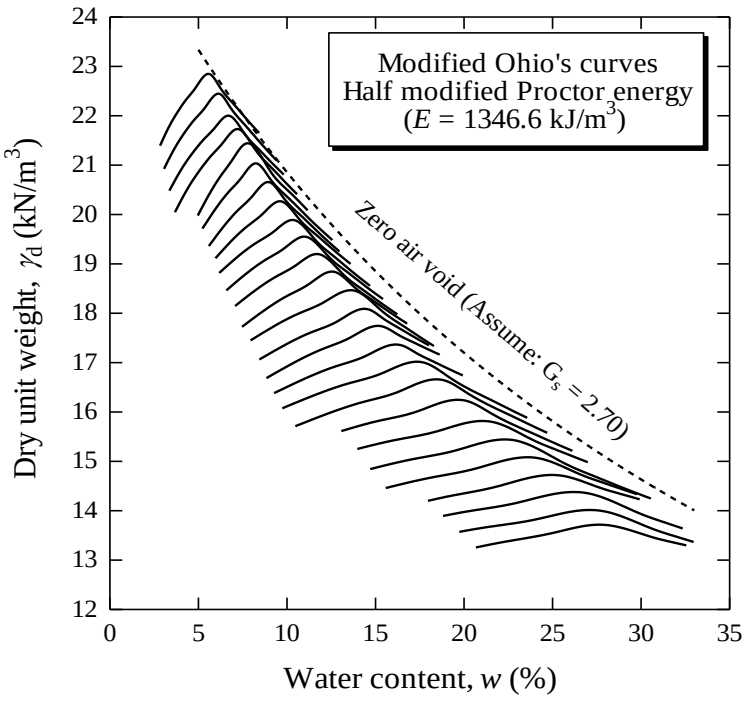
รูปที่ 2.26 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินลูกรัง (ข้อมูลจาก Horpibulsuk et al., 2004c) (Horpibulsuk et al., 2009a)



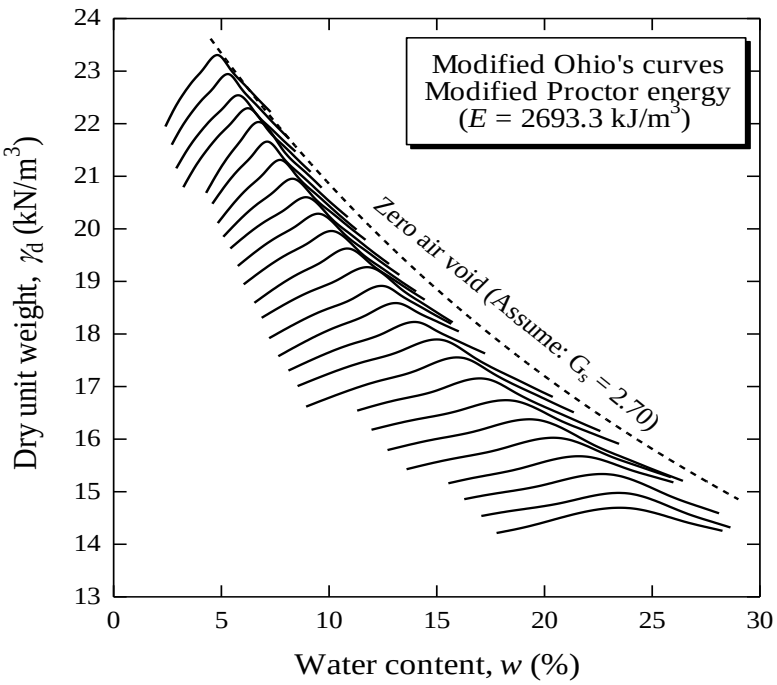
รูปที่ 2.27 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของกรวดปนดินเหนียว (ข้อมูลจาก Ruenkrairergsa, 1982) (Horpibulsuk et al., 2009a)



รูปที่ 2.28 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a)



รูปที่ 2.29 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a)



รูปที่ 2.30 กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a)

2.11 มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (Crushed rock soil aggregate type base) (ทล.ม. 201/2544)

2.11.1 ขอบข่าย

วัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก หมายถึง วัสดุซึ่งมีขนาดคละกันสม่ำเสมอจากใหญ่ไปหาเล็ก นำมาเสริมบนชั้นรองพื้นทางหรือชั้นคันทาง

2.11.2 คุณสมบัติ

- ปราศจากก้อนดินเหนียว (clay lump) วัสดุจำพวกเซล (shale) รากไม้ หรือวัชพืช อื่นๆ
- มีอัตราส่วนคละสม่ำเสมอประกอบด้วยส่วนหยาบและส่วนละเอียด
- ส่วนหยาบต้องเป็นหินโม่
- ส่วนละเอียดเป็นวัสดุชนิดเดียวกับส่วนหยาบ หากมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพ จะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน
- ค่าขีดเหลว (liquid limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 25
- ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (plasticity index) ไม่มากกว่าร้อยละ 6
- ค่าจำนวนส่วนร้อยละของความสึกหรอ (percentage of wear) ไม่มากกว่าร้อยละ 40
- ค่า ซี.บี.อาร์ จากห้องทดลอง (Lab C.B.R.) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor density) ตาม มทช.(ท) 501.3 : วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าซี.บี.อาร์ (C.B.R.) หรือไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง
- มีมวลคละผ่านตะแกรง ดังตารางข่างล่างนี้

ตารางที่ 2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก

ขนาดของตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ		
	ชนิด ก.	ชนิด ข.	ชนิด ค.
2 นิ้ว	100	100	-
1 นิ้ว	-	79-95	100
3./8 นิ้ว	30-65	40-75	50-85
เบอร์ 4	25-55	30-60	35-65

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ขนาดของตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ		
	ชนิด ก.	ชนิด ข.	ชนิด ค.
เบอร์ 10	15-40	20-45	25-50
เบอร์ 40	8-20	15-30	15-30
เบอร์ 200	2-8	5-20	5-15

2.12 วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (sieve analysis) (ทล.ท. 204/2516)

2.12.1 ขอบข่าย

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

2.12.2 นิยาม

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

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

2.12.3 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- ตะแกรงร่อนดิน (sieve) ช่องผ่านต้องเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดช่องผ่านต่าง ๆ ได้ขนาดตามต้องการ พร้อมเครื่องมือเขย่าตระแกรง
- เครื่องชั่ง แบบบาล๊านซ์ (balance) จะต้องสามารถชั่งได้ละเอียดถึงร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักตัวอย่าง
- ตู้อบ (oven) ต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส (230±9 องศาฟาเรนไฮต์)

- เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง (sample splitter)
- แปรงทำความสะอาดตะแกรงชนิดลวดทองเหลือง และแปรงขน หรือแปรงพลาสติก
- ภาชนะสำหรับใช้แช่ และล้างตัวอย่างดิน ด้วยมือหรือด้วยชนิดใช้เครื่องเขย่า

2.12.4 การเตรียมตัวอย่าง

- การเตรียมตัวอย่างโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง

  นำตัวอย่างมาคลุกให้เข้ากันและแยกตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่างในขณะที่ตัวอย่างมีความชื้นเพื่อลดการแยกตัว ถ้าตัวอย่างไม่มีส่วนละเอียดอาจจะแบ่งขณะที่ตัวอย่างแห้งอยู่ก็ได้ ถ้ามีส่วนละเอียดจับเป็นก้อนใหญ่หรือมีส่วนละเอียดจับกันเองเป็นก้อนต้องทำให้ส่วนละเอียดหลุดออกจากก้อนใหญ่โดยให้ทุบแยกดินออกเป็นเม็ดอิสระด้วยค้อนยางแต่ต้องระวังอย่าให้แรงมากจนเม็ดดินแตก

- การเตรียมตัวอย่างโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง

  นำตัวอย่างที่มีส่วนละเอียดจับกันเป็นก้อนไปแยกออกจากกันโดยใช้ค้อนยางทุบแล้วนำตัวอย่างไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส (230±9 องศาฟาเรนไฮต์) เพื่อหาน้ำหนักตัวอย่างแห้ง นำตัวอย่างใส่ภาชนะสำหรับใช้ล้างตัวอย่าง โดยใช้น้ำยาล้างส่วนละเอียด ซึ่งเตรียมได้จากการละลายผลึกโซเดี่ยมเฮคซะเมตตาฟอสเฟต ซึ่งทำให้เป็นกลางด้วยโซเดี่ยมคาร์บอเนต (sodium hexametaphosphate buffered with sodium carbonate) 45.7 กรัม ละลายในน้ำ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนผสมกันให้ทั่วตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ซม. แล้วนำไปเขย่า ประมาณ 10 นาที ขณะเขย่าระวังอย่าให้น้ำกระฉอกออกจากภาชนะ เทตัวอย่างดินในภาชนะลงบนตะแกรงเบอร์ 200 ถ้าหากมีตัวอย่างขนาดใหญ่ปนอยู่มากควรใช้ตะแกรงที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 200 ซ้อนไว้ข้างบน แล้วใช้น้ำล้างจนกว่าไม่มีวัสดุผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ตะแกรงที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 200 ซ้อนไว้ข้างบน แล้วใช้น้ำล้างจนกว่าไม่มีวัสดุผ่านตะแกรงเบอร์ 200 อีก เทตัวอย่างลงในภาชนะแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส (230±9 องศาฟาเรนไฮต์)

2.12.5 การทดสอบ

- นำตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมตัวอย่าง แล้วแต่จะต้องการทดสอบแบบใดมาโดยประมาณให้ได้ตัวอย่างเมื่อแห้งแล้วตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 ขนาดคละของวัสดุ

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

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

2.12.6 การคำนวณ

- หาน้ำหนักที่ค้าง (weigh tretained) บนตะแกรงแต่ละขนาดโดยชั่งน้ำหนักของตัวอย่างดินที่ค้างบนแต่ละตะแกรงและน้ำหนักที่หายไป เมื่อเอาน้ำหนักของตัวอย่างในทุกตะแกรงรวมกันแล้ว หักออกจากน้ำหนักตัวอย่างอบแห้งทั้งหมดซึ่งใช้ทดสอบจะได้น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 รวมกับน้ำหนักที่ค้างบนถาดรอง (pan)

- หาน้ำหนักที่ผ่าน (weight passing) ตะแกรงแต่ละขนาด โดยคิดจากบรรทัดล่างของช่องน้ำหนักที่ค้างขึ้นไป (ดูแบบฟอร์ม) เอาน้ำหนักของน้ำหนักที่ค้างบนถาดรองเป็นช่องน้ำหนักที่ค้าง ของตะแกรง เบอร์ 200 รวมน้ำหนักของน้ำหนักที่ค้าง น้ำหนักช่องน้ำหนักที่ผ่าน ของตะแกรงเบอร์ 200 เป็นน้ำหนักของช่องน้ำหนักที่ผ่าน บรรทัดบนสุดจะเท่ากับน้ำหนักของตัวอย่างแห้งทั้งหมด ซึ่งใช้ทดสอบ
- คำนวณหาร้อยละผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก (percentage passing) ได้ดังนี้

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

2.12.7 การรายงาน

ให้รายงานค่าร้อยละ ผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ โดยน้ำหนักด้วยทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2.12.8 ข้อควรระวัง

- การแบ่งตัวอย่างด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่าง ต้องใช้เครื่องมือขนาดช่องกว้างประมาณ 1 1/2 เท่าของก้อนโตที่สุด
- ตรวจดูตะแกรงบ่อย ๆ ถ้าชำรุดต้องซ่อมก่อนใช้ โดยเฉพาะเบอร์ 200
- ห้ามใส่ตัวอย่างลงในตะแกรงขณะที่ยังร้อนอยู่
- การทุบตัวอย่างดินต้องไม่แรงมากจนทำให้เม็ดดินแตก
- การเขย่าอย่าเขย่านานจนตัวอย่างกระแทกแตกเป็นผง

2.13 วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (coarse aggregates) โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (los angeles abrasion) มท.ล. 202/2515

2.13.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้ เป็นการหาค่าความสึกหรอของหินย่อย กรวดย่อย กรวด วัสดุลูกรัง หรือมวลรวมดิน (soil aggregates) และวัสดุชนิดเม็ดหยาบ

2.13.2 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- เครื่องมือทดสอบความสึกหรอมีลักษณะขนาด ประกอบด้วยทรงกระบอกเหล็กปิดหัวและท้ายมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 711±5 มม. (28±0.2 นิ้ว) ความยาวภายใน 508±5 มม. (20±0.2 นิ้ว) ทรงกระบอกนี้ติดอยู่กับเพลา

และหมุนรอบแกนได้ในแนวราบ มีช่องสำหรับใส่วัสดุพร้อมฝาเหล็กปิด ฝาเหล็กเมื่อปิดแล้วต้องมีลักษณะผิวเหมือนกับผิวด้านในของทรงกระบอกเหล็กและเสมอกัน ซึ่งไม่ทำให้ลูกเหล็กทรงกลม (abrasive charge) สะดุดเวลากลิ้งผ่านรอยต่อมีแผ่นเหล็กขวางสูง 89±2 มม. (3.5±0.1 นิ้ว) ยาว 508±2 มม. (20±0.2 นิ้ว) ติดแน่นตามยาวด้านในทรงกระบอกเหล็ก ระยะจากแผ่นเหล็กขวางถึงช่องสำหรับใส่วัสดุไม่น้อยกว่า 1,270 มม. (50 นิ้ว) วัดตามความยาวเส้นรอบวงภายนอกทรงกระบอกเหล็ก

หมายเหตุ แผ่นเหล็กขวางควรมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ติดอยู่กับผนังของทรงกระบอกเหล็ก หรืออาจใช้เหล็กฉากแทน โดยติดที่ริมฝาเหล็กช่องใส่วัสดุ ให้ด้านนอกของเหล็กฉากหันไปตามทิศทางที่หมุน

- ตะแกรงสำหรับ หาขนาดของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ ใช้ตะแกรงมีช่องผ่านเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 75.0 มม. (3 นิ้ว), 63.0 มม. (2 1/2 นิ้ว), 50.8 มม. (2 นิ้ว), 37.5 มม. (1 1/2 นิ้ว) 25.0 มม. (1 นิ้ว), 19.0 มม. (3/4 นิ้ว), 12.5 มม. (1/2 นิ้ว), 9.5 มม. (3/8 นิ้ว), 6.4 มม. (1/4 นิ้ว), 4.75 มม. (เบอร์ 4) , 2.36 มม. (เบอร์ 8), 1.70 มม. (เบอร์ 12)
- ลูกเหล็กทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 46.8 มม. (1 27/32 นิ้ว แต่ละลูกหนักระหว่าง 390-445 กรัม จำนวนลูกเหล็กทรงกลมขึ้นอยู่กับชั้นของตัวอย่าง ซึ่งกำหนดไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 จำนวนลูกเหล็กทรงกลม ที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชั้น (grading)

ชั้น	ลูกเหล็กทรงกลม (ลูก)	น้ำหนักรวม (กรัม)
A	12	5,000±25
B	11	4.584±25
C	8	3,330±20
D	6	2,500±15
E	12	5,000±25
F	12	5,000±25
G	12	5,000±25

- เครื่องชั่งต้องสามารถชั่งได้ 15 กิโลกรัม ความละเอียดอ่านได้ถึง 1 กรัม

2.13.3 การเตรียมตัวอย่าง

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

2.13.4 การทดสอบ

นำตัวอย่างที่เตรียมไว้และลูกเหล็กทรงกลม ตามจำนวนลูกในตารางที่ 2.4 ใส่เข้าไปในเครื่องทดสอบหาความสึกหรอหมุนเครื่องด้วยความเร็วที่ 30-33 รอบต่อนาที ให้ได้จำนวนตามตารางที่ 2.5 เมื่อหมุนได้ครบตามกำหนดแล้วให้เอาตัวอย่างออกจากเครื่องล้างส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 12 ออกทิ้ง นำส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 12 มาอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส (221-230 องศาฟาเรนไฮต์) จนได้น้ำหนักคงที่จึงชั่งหาน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือ

ตารางที่ 2.4 น้ำหนักชั้นของตัวอย่างต่อจำนวนรอบ

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

2.13.5 การคำนวณ

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

W_1 = น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ

W_2 = น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12

2.13.6 การรายงาน

ให้รายงานค่าความสึกหรอเป็นร้อยละ ด้วยทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2.13.7 ข้อควรระวัง

- ให้ทำการชั่งลูกเหล็กทรงกลม แต่ละลูกอย่างน้อย 1 ครั้ง ทุก ๆ 6 เดือน เพื่อตรวจสอบให้เป็นไปตามข้อกำหนด
- ในกรณีที่แผ่นเหล็กขวาง เป็นเหล็กฉากตัดริมแผ่นเหล็กปิดช่องใส่วัสดุ การติดต้องให้ด้านนอกของเหล็กฉากหันไปในทิศทางที่เครื่องหมุน

2.14 วิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน(modified compaction test) มท.ท. 108/2517

2.14.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นของดิน กับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดในแบบที่กำหนดขนาดไว้ด้วยตุ้มเหล็กหนัก 4.54 กก.(10 ปอนด์) ระยะปล่อยตุ้มตกกระทบสูง 457 มม. (18 นิ้ว) วิธีทดสอบ มี 4 วิธี ต่าง ๆ กันดังนี้

วิธี ก. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ตามวิธีพร็อกเตอร์แบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor)

วิธี ข. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ตามวิธีแอสโต ที 180 (AASHTO T 180)

วิธี ค. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ตามวิธีพร็อกเตอร์แบบสูงกว่ามาตรฐาน

วิธี ง. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ตามวิธีแอสโต ที 180

การใช้วิธีทดสอบวิธีใดให้เป็นไปตามรายการที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง ถ้าไม่ได้ระบุวิธีการทดสอบให้ใช้ วิธี ก.

2.14.2 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- แบบ (mold) ทำด้วยโลหะมีลักษณะทรงกระบอกกลวง ผนังแข็งแรงมี 2 ขนาด มีปลอกที่สามารถถอดได้สูง 60 มม.(2 3/8 นิ้ว) เพื่อให้สามารถบดอัดดินให้สูง และมีปริมาตรตามต้องการ แบบและปลอกต้องยึดกันได้อย่างมั่นคง กับฐานแบบซึ่งสามารถถอดได้ ทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกับ
- แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม.(4 นิ้ว) สูง 116.43±0.127 มม. (4.584±0.005 นิ้ว) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแบบ 101.6±0.406 มม. (4.000±0.016 นิ้ว) โดยมีขนาดความจุ 0.000943±0.000008 ลบ.ม (0.0333±0.0003 ลบ.ฟ.) และมีปลอกขนาดเดียวกันสูง 60 มม. (2 3/8 นิ้ว)
- แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว) สูง 116.43±0.127 มม. (4.584±0.005 นิ้ว) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแบบ 152.4±0.6604 มม. (6.000±0.026 นิ้ว) โดยมีความจุ 0.002124±0.000021ลบ.ม.(0.07500±0.00075 ลบ.ฟ.) และมีปลอกขนาดเดียวกันสูง 60 มม. (2 3/8 นิ้ว)
- ตุ้ม (rammer) ทำด้วยโลหะทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8±0.127 มม. (2.000±0.005 นิ้ว) น้ำหนักรวมทั้งด้ามถือ 2.5359±0.0081 กก. (10.00±0.05 ปอนด์) มีปลอกบังคับให้ยกได้สูง 457.2±1.524 มม. (18.00±0.06 นิ้ว) เหนือระดับดินที่บดอัดโดยตุ้มตกลงกระทบได้อย่างอิสระ ปลอกบังคับต้องมีรูระบายอากาศอย่างน้อย 4 รู มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9.5 มม. (3/8 นิ้ว) ทำมุมกัน 90 องศา และห่างจากปลายปลอกทั้งสองข้างประมาณ 19 มม. (3/4 นิ้ว)
- เครื่องดันตัวอย่างออกจากแบบ (sample extruder) ประกอบด้วยแม่แรง (jack) ก้านโยกแม่แรง โครงเหล็กจับแบบขณะดันตัวอย่างออกจากแบบ ใช้ดันตัวอย่างที่บดอัดในแบบแล้วออกจากแบบ หรืออาจใช้เครื่องมืออย่างอื่น ที่สามารถขุดแคะตัวอย่างดินออกจากแบบก็ได้
- เครื่องชั่ง (balance and scale) สามารถชั่งน้ำหนักได้อย่างน้อย 11.5 กก. และอ่านละเอียดได้ถึง 5 กรัม 1 เครื่อง และสามารถชั่งน้ำหนักได้อย่างน้อย 1,000 กรัม อ่านละเอียดได้ถึง 0.01 กรัม อีก 1 เครื่อง

- ตู้อบ (oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ 110±5 องศาเซลเซียส (230±9 องศาฟาเรนไฮต์) สำหรับอบดินชื้นให้แห้ง
- เหล็กปาดดิน (strainght edge) ทำด้วยเหล็กชุบแข็ง (hardened steel) มีขอบเรียบยาวไม่น้อยกว่า 254 มม. (10 นิ้ว) มีขอบที่ลบมุมด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งเรียบตรงตลอดความยาวของเหล็กปาดดิน โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 0.1 (0.01 นิ้วต่อความยาว 10 นิ้ว) ในช่วงที่ใช้ปาดแต่งผิวดินในแบบ
- ตะแกรงร่อนดิน (sieve) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 203 มม. (8 นิ้ว) สูง 50.8 มม. (2 นิ้ว) มี 2 ขนาด คือ 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) และ 4.75 มม. (เบอร์ 4)
- เครื่องผสมดิน (mixing tool) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการคลุกผสมดินให้เข้ากัน ได้แก่ ถาดใส่ดิน ช้อนตักดิน พลั่ว เกรียง ถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำ เป็นต้น หรืออาจเป็นเครื่องผสมดินที่ทำงานด้วยเครื่องจักร ซึ่งสามารถคลุกเคล้าผสมตัวอย่างดินให้เข้ากับน้ำที่ผสมเพิ่มลงไปในตัวอย่างดินทีละน้อย ๆ ได้
- ตลับบรรจุดิน (container) ทำด้วยโลหะมีฝาปิดป้องกันความชื้นระเหยออกไปก่อนชั่งน้ำหนัก หรือระหว่างการชั่งน้ำหนักเพื่อหาความชื้นในดิน

2.14.3 การเตรียมตัวอย่าง

- ถ้าตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบชื้นให้ผึ่งให้แห้งจนสามารถใช้เกรียงบดให้ร่วนได้ หรือใช้ตู้อบอบดินให้แห้งก็ได้แต่ต้องใช้อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส (140 องศาฟาเรนไฮต์) แล้วบดให้เม็ดดินหลุดออกจากกัน โดยไม่ทำให้เม็ดดินแตก
- ในกรณีที่ขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุดโตกว่า 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ร่อนเอาดินที่ค้างบนตะแกรงนี้ออกแล้วแทนด้วยดินที่ร่อนผ่านตะแกรงนี้แล้วค้างบนตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) จำนวนน้ำหนักเท่ากันใส่ลงแทนแล้วคลุกเคล้าให้ทั่วทำการแบ่งสี่ (quartering) หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง (sample splitter)
- ในกรณีที่ขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุดไม่โตกว่า 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ให้แบ่งตัวอย่างตามวิธีการแบ่งสีหรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง
- ในกรณีที่จะทำการทดสอบตามวิธี ค. หรือ ง. ให้ใช้ตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) เท่านั้น ส่วนที่ค้างบนตะแกรงนี้ให้ทิ้งไป

- ให้เตรียมตัวอย่างหนักประมาณ 6,000 กรัม (14 ปอนด์) สำหรับการทดสอบวิธี ข. และ ง. ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง และหนักประมาณ 3,000 กรัม (7 ปอนด์) สำหรับการทดสอบวิธี ก. และ ค. ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง การเตรียมตัวอย่างต้องเตรียมให้พอทดสอบได้ไม่น้อยกว่า 4 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง

2.14.4 การทดสอบ

การทดสอบวิธี ก.

- นำตัวอย่างดินที่เตรียมมาพรมน้ำให้ทั่วเพื่อให้ดินชื้นโดยเมื่อคลุกผสมกันแล้วจะมีความชื้นต่ำปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (optimum moisture content) ร้อยละ 4 ใส่ดินที่ผสมน้ำแล้ว ลงในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) ซึ่งมีปลอก (collar) สวมอยู่เรียบร้อยแล้ว โดยประมาณว่าเมื่อบดอัดแล้วจะเหลือดินสูง 1/5 ของความสูงของแบบ แล้วบดอัดโดยตุ้มยกสูง 457 มม. (18 นิ้ว) จำนวน 25 ครั้ง ให้ทั่วผิวของดินในแบบ
- ทำซ้ำอีก 4 ครั้ง จนดินที่ถูกบดอัดแน่นในแบบมีความสูงกว่าแบบประมาณ 10 มม.
- ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดดินปาดแต่งหน้าดินในแบบให้เรียบเท่ากับระดับขอบบนของแบบ ถ้าดินก้อนใหญ่หลุดออกให้เติมดินตัวอย่างลงไปแทนแล้วลดให้แน่นพอควรจนเรียบแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เมื่อหักน้ำหนักของแบบออกจะได้น้ำหนักของดินชื้น ต้องอ่านเครื่องชั่งละเอียดถึง 5 กรัม
- แกะดินออกจากแบบ แล้วผ่าตามแนวตั้งผ่านจุดศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างดิน เก็บดินจากที่ผ่าประมาณ 300 กรัม ใส่ตลับบรรจุดินชั่งน้ำหนักทันที อ่านละเอียดถึง 0.01 กรัม
- นำดินในตลับบรรจุดินไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส (230±9 องศาฟาเรนไฮต์) อย่างน้อย 12 ชั่วโมง แล้วชั่งหาน้ำหนักอ่านละเอียดถึง 0.01 กรัม
- บดดินตัวอย่างที่แกะออกจากแบบที่เหลือให้ร่วน แล้วคลุกผสมกับดินในตอนแรกให้เข้ากัน พรมน้ำให้ความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 ถึง 2
- ดำเนินการโดยเพิ่มน้ำทุกครั้งจนกว่าน้ำหนักดินที่บดอัดในแบบลดลง หรือไม่เปลี่ยนแปลง หรืออาจลดน้ำที่ผสมลงเมื่อพบว่าการเพิ่มน้ำแล้วน้ำหนักดินที่บดอัดในแบบกลับลดลง

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

2.14.5 การคำนวณ

- คำนวณหาค่าความชื้นในดินเป็นร้อยละ

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad (2.10)$$

เมื่อ W = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง
W1 = น้ำหนักของดินชื้น หน่วยเป็นกรัม
W2 = น้ำหนักของดินอบแห้ง หน่วยเป็นกรัม

- คำนวณหาค่าความแน่นชื้น (WET DENSITY)

$$\gamma_w = \frac{A}{V} \quad (2.11)$$

เมื่อ γ_w = ความแน่นชื้นของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
A = น้ำหนักดินชื้นที่บดอัดในแบบ หน่วยเป็นกรัม
V = ปริมาตรของแบบ ซึ่งเท่ากับปริมาตรของดินชื้นที่บดอัดในแบบ หน่วย เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

- คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (dry density)

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

เมื่อ γ_d = ความแน่นแห้งของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
γ_w = ความแน่นชื้นของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
W = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

2.14.6 การรายงาน

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

2.14.7 ข้อควรระวัง

- การประมาณปริมาตรน้ำที่ใช้ผสมดินที่เกาะติดกันเป็นก้อน (cohesive soil) ควรเผื่อให้ต่ำและสูงกว่าจำนวนน้ำ ที่ทำให้ได้ค่าความชื้นที่ทำให้ดินบดอัด ได้แน่นสูงสุด (OMC) ดินพวกดินทราย (cohesionless soil) ควรผสมน้ำตั้งแต่น้อยที่สุด คือ เริ่มจากดินผึ่งแห้งจนกระทั่งมากที่สุดเท่าที่จะทำได้
- ในการบดอัดดินให้วางแบบบนพื้นที่มั่นคงแข็งแรง ราบเรียบ ขณะทำการบดอัดแบบต้องไม่กระดอนไปมา
- ควรเตรียมตัวอย่างให้เพียงพอ โดยให้มีตัวอย่างทดสอบทางด้านแห้งกว่า (dry side) ความชื้นที่ทำให้ดินบดอัดได้แน่นสูงสุด (OMC) ไม่น้อยกว่า 2 ตัวอย่าง และให้มีตัวอย่างทดสอบพอทดสอบทางด้านชื้นกว่า (wet side) ความชื้นที่ทำให้ดินบดอัดได้แน่นสูงสุด (OMC) 1 ตัวอย่าง
- ดินชนิดที่มีปริมาณดินเหนียวมาก (heavy clay) หลัง จากผึ่งให้แห้งแล้วให้บดด้วยค้อนยาง หรือใช้เครื่องบด จนได้ตัวอย่างที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) มากที่สุดเท่าที่จะทำได้
- ปริมาตรของแบบ ให้ทำการวัดและคำนวณ เพื่อให้ได้ปริมาตรที่แท้จริงของแต่ละแบบ
- แบบที่ใช้งานแล้ว ต้องคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 50 ของความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้

2.15 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. (C.B.R.) (ทล.ท. 109/2517)

2.15.1 ขอบข่าย

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

การทดสอบ ซี.บี.อาร์. อาจทำได้ 2 วิธี คือ

วิธี ก. การทดสอบแบบแช่น้ำ (soaked)

วิธี ข. การทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (unsoaked)

ถ้าไม่ระบุวิธีใด ให้ใช้วิธี ก.

2.15.2 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- loading; device แบบ hydraulic jack หรือ screw jack มีอุปกรณ์วัดแรงได้ไม่น้อยกว่า 5,000 กิโลกรัม (ประมาณ 10,000 ปอนด์)
- แบบสำหรับเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 152.4±0.66 มม. (6.0±0.026 นิ้ว) สูง 177.8±0.66 มม. (7.0±0.016 นิ้ว) พร้อมปลอก (collar) สูงโดยประมาณ 50.8 มม. (2.0 นิ้ว) และฐานแบบ (BASE PLATE) สำหรับยึดแบบและปลอก
- แท่งโลหะรอง (spacer disc) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 134.9 (5 5/16 นิ้ว) มีความสูงขนาดต่างๆ
- ตุ้มหนัก 4,537 กรัม (10 ปอนด์) และ 2,495 กรัม (5.5 ปอนด์)
- เครื่องวัดการพองตัว ประกอบด้วย
  - แผ่นวัดการพองตัว (swell plate)
  - สามขา (tripod) สำหรับติดมาตรวัด (dial gauge) วัดได้ 25 มม. ซึ่งวัดได้ละเอียด 0.01 มม. เพื่อวัดอัตราการพองตัวของดินเมื่อแช่น้ำ
- โลหะถ่วงน้ำหนัก (surcharge weight) เป็นเหล็กทรงกระบอกแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง 149.2 มม. (5 7/8 นิ้ว) มีรูกลวง เพื่อให้ท่อนกด (piston) ลอดไปได้หนักแผ่นละ 2,268 กรัม (5 ปอนด์)

- ท่อนกด ทำด้วยโลหะทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 49.5 มม. (1.95 นิ้ว) มีเนื้อที่หน้าตัด 1,935.5 ตร.มม. (3 ตร.นิ้ว) ยาวไม่น้อยกว่า 102 มม. (4 นิ้ว)
- เครื่องดันตัวอย่างเป็นเครื่องดันดินออกจากแบบภายหลัง เมื่อทดสอบเสร็จแล้ว
- เครื่องชั่งแบบบาล๊านซ์ (balance) มีขีดความสามารถชั่งได้อย่างน้อย 20 กก. ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กิโลกรัม
- เครื่องชั่งแบบสเกล (scale) หรือแบบบาล๊านซ์ มีขีดความสามารถชั่งได้อย่างน้อย 1,000 กรัม ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม
- ตู้อบ (oven) ต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ได้ที่ 110±5 องศาเซลเซียส
- เหล็กปาด มีความยาวไม่น้อยกว่า 300 มม. และไมยาวเกินไปหนาประมาณ 3.0 มม. (0.12 นิ้ว)
- เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง
- ตะแกรงร่อนดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มม. (8 นิ้ว) 50.8 มม. (2 นิ้ว) มีขนาด ดังนี้

  ก. ขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว)

  ข. ขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4)
- เครื่องผสม เป็นเครื่องมือจำเป็นต่าง ๆ ที่ใช้ผสมตัวอย่างกับน้ำ เช่น ถาด ช้อน พลั่ว เกรียง คอนยาง ถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำ
- ตลับบรรจุดินสำหรับใส่ตัวอย่างดิน เพื่ออบหาจำนวนน้ำในดิน
- นาฬิกาจับเวลา

2.15.3 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดสอบ

กระดาษกรองอย่างหยาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว)

2.15.4 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างได้แก่ ดิน หินคลุก หรือวัสดุมวลรวมดินหรือวัสดุอื่นใดที่ต้องการทดสอบ ให้เตรียมตัวอย่าง ดังนี้

- วัสดุตัวอย่าง ก่อนจะนำมาทดสอบจะต้องปล่อยทิ้งให้แห้ง (air dry) ในห้องปฏิบัติการทำการแบ่งสี่ (quartering) แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ ¾ นิ้ว ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ ¾ นิ้วให้ทิ้งไปและชดเชยด้วยดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ ¾ นิ้ว แต่ค้างบนตระแกรง เบอร์ 4 ด้วยจำนวนน้ำหนักเท่ากัน
- หาปริมาณความชื้นที่ความแน่นสูงสุด โดยวิธีการทดสอบความแน่น

2.15.5 การทดสอบ

สำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ต้องมีการแช่น้ำ (unsoaked c.b.r. test)

- ชั่งดินที่เตรียมไว้ประมาณ 6 กก. (12 ปอนด์) และนำดินตัวอย่างประมาณ 100 กรัม เพื่อนำไปหาความชื้นในดินตัวอย่าง (initial water content)
- เตรียมแบบไว้ 2 ชุด ชั่งหาน้ำหนักแบบ (ไม่รวมฐานแบบ)
- ประกอบแบบ เข้ากับฐานแบบและแท่งโลหะรอง ใช้กระดาษกรองปูทับบนแท่งโลหะรอง เพื่อป้องกันไม่ให้เกาะติดกับแผ่นเหล็ก
- กระทุ้งดินอัดแน่นในแบบ ตามวิธีการทดสอบความแน่นที่ปริมาณความชื้น ที่ความแน่นแห้งสูงสุด (เตรียมตัวอย่างดิน 3 ตัวอย่าง โดยทำการบดอัดแต่ละชั้นด้วยตุ้ม จำนวน 12 ครั้ง 25 ครั้ง และ 56 ครั้งต่อชั้น)
- หลังจากบดอัดจนครบจำนวนชั้น และจำนวนครั้งแล้วถอดปลอกออกใช้เหล็กปาดปาดดินส่วนที่สูงเกินขอบแบบ พร้อมกับซ่อมแต่งผิวบนของดินตัวอย่างให้เรียบเสมอกับปากแบบ
- ถอดฐานแบบ และแท่งโลหะรองออก นำแบบและดินไปชั่งหาน้ำหนัก เพื่อจะนำไปหาความแน่นชื้น (wet density)
- เอากระดาษกรองวางบนฐานแบบ เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะแบบติดแผ่นเหล็กประกอบแบบ ที่มีดินอัดแน่นนี้เข้ากับฐานแบบ โดยให้ปากแบบด้านที่มีดินเสมอปากวางบนฐานแบบ และส่วนที่มีช่องว่างอยู่ด้านบนสำหรับการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ
- วางแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนัก (surcharge) จำนวน 2 ชิ้น สำหรับวัสดุพื้นทาง, วัสดุรองพื้นทาง, วัสดุคัดเลือกและจำนวน 3 ชิ้น สำหรับวัสดุคันทางทับบนดินตัวอย่างในแบบ
- นำแบบเข้าเครื่องกดทดสอบ ซึ่งมีท่อนกดขนาดพื้นที่หน้าตัด 1,935.5 ตร.มม. (3 ตร.นิ้ว) ประกอบติดอยู่ จัดให้ผิวหน้าของดินในแบบ แตะสัมผัสกับท่อนกดดังกล่าว จัดเข็มของมาตรวัด ที่จะใช้วัดค่าการจมตัว (penetration) ให้อยู่ที่จุดศูนย์
- กดท่อนกดในอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที พร้อมกับอ่านค่าน้ำหนักที่ตรงกับค่าการจมตัว 0, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.175, 0.200, 0.250, 0.300, 0.350, 0.400, 0.450 และ 0.500 นิ้ว

- เสร็จแล้วถอดแบบออกจากเครื่องกดทดสอบ เก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 4.75 มม. หรือประมาณ 300 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 19.0 มม. แล้วนำไปหาความชื้น สำหรับการทดสอบแบบแช่น้ำ
- วางแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนัก จำนวน 2 ชิ้น สำหรับวัสดุพื้นทาง, วัสดุรองพื้นทาง, วัสดุคัดเลือด และจำนวน 3 ชิ้น สำหรับวัดสุคันทางลงบนดินตัวอย่าง ใส่แผ่นวัดการพองตัว สำหรับวัดอัตราการบวมของดิน ซึ่งมีด้ามขัดเกลียวขึ้นลงได้ติดอยู่กลางแผ่น ก่อนวางแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักลงบนดินตัวอย่าง จะต้องเอากระดาษรองวางคั่นได้แผ่นนี้เสียก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้ดินติดแน่นกับแผ่นเหล็กหลังจากแช่น้ำแล้ว
- แช่แบบที่เตรียมไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ ให้น้ำท่วมแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักประมาณ 1 นิ้ว ใช้มาตรวัดอ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว ยึดติดกับสามขา แล้ววางบนปากแบบ จัดให้ปลายของมาตรวัดแตะสัมผัสกับก้านของแผ่น วัดการพองตัว เพื่อวัดหาค่าการพองตัวของดินต่อไป
- จดค่าการขยายตัวจากมาตรวัดทุกวัน จนครบ 4 วัน (ถ้าหากค่าการพองตัวคงที่ อาจหยุดอ่านได้ หลังจากแช่น้ำแล้ว 48 ชั่วโมง)
- ยกแบบออกจากน้ำและตะแคงแบบ เพื่อรินน้ำทิ้งและปล่อยทิ้งไว้ ประมาณ 15 นาที เพื่อให้น้ำไหลออกจากแบบ
- นำแบบพร้อมดินไปชั่งหาน้ำหนัก
- เสร็จแล้วถอดแบบออกจากเครื่องกดทดสอบ เก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 4.75 มม. หรือประมาณ 300 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 19.0 มม. แล้วนำไปหาความชื้น
- เขียนกราฟระหว่างน้ำหนักกด และค่าการจมตัว (stress vs penetration) เพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. ต่อไปสำหรับในการเขียนกราฟระหว่างน้ำหนักกด และค่าการจมตัว เพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. จำเป็นจะต้องทำการแก้เส้นกราฟโดยเลื่อนจุดศูนย์ของค่าการจมตัว ในกรณีที่เส้นกราฟหงายเพื่อให้ได้ค่า ซี.บี.อาร์. ที่แท้จริง

- เมื่อได้ค่า ซี.บี.อาร์. ของแต่ละตัวอย่างแล้วเขียนเส้นกราฟ ระหว่างค่า ซี.บี.อาร์. และค่าความหนาแน่นแห้ง (dry density) เพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. เป็นร้อยละของการบดอัดที่ต้องการต่อไป

2.15.6 การคำนวณ

- คำนวณหาค่าความชื้นในดินเป็นร้อยละ

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

เมื่อ W = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

W1 = น้ำหนักของดินชื้น หน่วยเป็นกรัม

W2 = น้ำหนักของดินอบแห้ง หน่วยเป็นกรัม

- คำนวณหาค่าความแน่นชื้น (wet density)

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

เมื่อ γ_w = ความแน่นชื้นของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

A = น้ำหนักดินชื้นที่บดอัดในแบบ หน่วยเป็นกรัม

V = ปริมาตรของแบบ ซึ่งเท่ากับปริมาตรของดินชื้นที่บดอัดในแบบ หน่วย เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

- คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (dry density)

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

เมื่อ γ_d = ความแน่นแห้งของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

γ_w = ความแน่นชื้นของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

W =ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

- คำนวณหาค่าการพองตัว (swelling)

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

ค่าการพองตัว (มม.) = ผลต่างระหว่างการอ่านค่าที่มาตรวัด ครั้งแรกและครั้งสุดท้าย

- คำนวณหาค่า ซี.บี.อาร์.

ในการคำนวณหาค่า ซี.บี.อาร์. ให้ถือน้ำหนักมาตรฐาน (standard load) ดังนี้

ตารางที่ 2.5 น้ำหนักมาตรฐานตากการกดท่อนเหล็กขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้วของวัสดุหินคลุก

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

จากสูตร

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

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

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

2.15.7 การรายงาน

ในการทำการทดสอบ ซี.บี.อาร์. ให้รายงาน ดังนี้

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

เกณฑ์การตัดสินและความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้

ค่า ซี.บี.อาร์. เป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการรับน้ำหนักกับวัสดุหินมาตรฐาน ดังนั้น จึงไม่มีการกำหนดเกณฑ์ตัดสินและความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้

2.15.8 ข้อควรระวัง

- สำหรับดินจำพวกดินเหนียวมาก (heavy clay) หลังจากตากแห้งแล้วให้ทุบด้วยค้อนยาง จนได้ตัวอย่างผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้
- ในการใช้ตุ้มทำการบดอัด ให้วางแบบบนพื้นที่มั่นคง แข็งแรง ราบเรียบ เช่น พื้นคอนกรีตไม่ให้แบบกระดก หรือกระดอนขึ้นขณะทำการบดอัด
- ในการทดสอบหาค่าการจมตัว โดยใช้เครื่องกดทดสอบแบบวงแหวน (proving ring) เป็นตัวอย่างอ่านน้ำหนักและใช้มาตรวัดค่าการจมตัวติดที่โครง (frame) ของเครื่องกดทดสอบต้องทำการแก้ค่าการจมตัว เนื่องจากการหดตัวของวงแหวน (proving ring) โดยหักค่าการหดตัวของวงแหวนออกจากค่าการจมตัว กรณีที่ติดมาตรวัดค่าการจมตัว (penetration dial) ที่ท่อนกดไม่ต้องปฏิบัติตามความในข้อนี้
- ในการเขียนกราฟระหว่างค่าน้ำหนักมาตรฐาน และค่าการจมตัว จำเป็นจะต้องแก้จุดศูนย์สำหรับเส้นกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายขึ้น เนื่องจากความไม่ราบเรียบ หรือเกิดจากการอ่อนยุ่ยที่ผิวหน้าของตัวอย่างเนื่องจากการแช่น้ำ ให้ทำการแก้โดยลากเส้นตรงให้สัมผัสกับเส้นที่ชันที่สุดของส่วนโค้งของเส้นกราฟ ไปตัดกับแกนตามแนวราบ คือเส้นที่ลากผ่านค่าน้ำหนักมาตรฐาน เท่ากับศูนย์ ต่อจากนั้นให้เลื่อนค่าศูนย์ของค่าการจมตัวไปที่จุดที่ตัดแล้วจึงหาค่า ซี.บี.อาร์. ที่ปรับค่า (corrected c.b.r. value) ต่อไป
- ค่า ซี.บี.อาร์. ที่ได้จากการปรับค่า หรือที่ได้จริงจากการอ่านค่าน้ำหนักมาตรฐาน (true load value) ซึ่งคำนวณจากค่าการจมตัวที่ 2.54 มม.(0.1 นิ้ว) และที่ค่าการจมตัว 5.08 มม. (0.2 นิ้ว) เป็นค่า ซี.บี.อาร์ ที่ใช้รายงาน โดยปกติค่า ซี.บี.อาร์. ที่มีค่าการจมตัว 2.54 มม. จะต้องมีค่าสูงกว่าค่า ซี.บี.อาร์. ที่มีค่าการจมตัว 5.08 มม. ถ้าหากไม่เป็นดังนั้น คือค่า ซี.บี.อาร์. ที่ 5.08 มม. สูงกว่าที่ 2.54 มม. ให้ทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบใหม่ทั้งหมด แต่ถ้าค่า ซี.บี.อาร์. ที่ได้ยังคงสูงกว่าอีก ให้ใช้ค่า ซี.บี.อาร์. 5.08 มม.
- ในการทำตัวอย่างเพื่อทดสอบ ในกรณีที่ต้องการบดอัดมากหรือน้อยกว่าที่ต้องการตามวิธีการทดสอบนี้ อาจจะเพิ่มการบดอัดเป็นชั้นละ 75 ครั้ง หรือลดการบดอัดเป็นชั้นละ 8 ครั้ง เพื่อให้ได้ตัวอย่างมากขึ้นในการนำมาเขียนเส้นกราฟ

- ตุ้มที่ใช้ทำการลดอัดเพื่อเตรียมตัวอย่าง เพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. มี 2 ขนาด (ตามข้อ 2.1.4) ในการเตรียมตัวอย่าง ซี.บี.อาร์. โดยวิธีการทดสอบความแน่นแบบมาตรฐานให้ใช้ตุ้มขนาดเล็ก ส่วนการเตรียมตัวอย่าง ซี.บี.อาร์. ตามวิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานให้ใช้ตุ้มขนาดใหญ่

2.16 การก่อสร้างและการบดอัดโครงสร้างทางชั้นพื้นทางหินคลุก

2.16.1 งานพื้นทางชนิดหินคลุก (base) ทล.ม. 201/2544

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

2.16.1.1 วิธีการก่อสร้าง

การก่อสร้างต้องตรวจสอบระดับและความแน่นของชั้นรองพื้นทางให้ถูกต้อง ก่อนนำวัสดุพื้นทางมาถมบนชั้นรองพื้นทางทำการคลุกเคล้าวัสดุกับน้ำให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอและมีความชื้นพอเหมาะใกล้เคียงกับค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) จากห้องปฏิบัติการ จากนั้นจึงเกลี่ยแผ่แล้วบดอัดเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นหนาไม่เกิน 15 เซนติเมตร บดอัดแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density บริเวณใดหรือช่วงใดวัสดุพื้นทางที่เกลี่ยแผ่และทำการบดอัดแล้วมีมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดแยกตัวจากกัน (segregation) ให้แก้ไขโดยการขุดรื้อออกแล้วทำการผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หรือรื้อออกใส่วัสดุพื้นทางที่มีส่าวนผสมสม่ำเสมอลงไปแทน แล้วสเปรย์น้ำให้ได้ความชื้นที่เหมาะสม เกลี่ยให้ได้รูปตามแบบก่อสร้างแล้วทำการบดอัดแน่น ในระหว่างการบดอัดให้มีการสเปรย์ น้ำบาง ๆ เพื่อให้วัสดุจับตัวกันจะช่วยให้ผิวหน้าเรียบปราศจากหลุมบ่อ และเพื่อให้ผิวหน้าเรียบแน่นสม่ำเสมอ ให้ทำการบดอัดชั้นสุดท้ายด้วยรถบดล้อเหล็กน้ำหนักไม่น้อยกว่า 12 ตัน ซึ่งในระหว่างก่อสร้างหากมีฝนตกน้ำขัง ทำให้ความชื้นในระหว่างการบดอัดมากเกินไปจนเป็นเหตุให้ชั้นพื้นทางเสียหายหรืออาจเสียหายลึกลงไปถึงชั้นรองพื้นทางด้วย ดังนั้นเมื่อพบว่าพื้นทางส่วนที่ได้ก่อสร้างแล้วมีการบวมตัว (soft spot) จะต้องรื้อออกและอาจต้องตรวจสอบชั้นรองพื้นทางด้วยว่ามีความเสียหายหรือไม่ หากเสียหายจะต้องรีบดำเนินการแก้ไขปรับปรุงชั้นรองพื้นทางให้เรียบร้อยก่อนแล้วจึงทำการแก้ไขพื้นทางต่อไปถ้าแบบ

ก่อสร้างกำหนดความหนาพื้นทางมากกว่า 15 เซนติเมตร ให้แบ่งการทำงานเป็น 2 ชั้น หนาชั้นละเท่า ๆ กัน (โดยประมาณ) บดอัดให้แน่นและได้ระดับตามแบบก่อสร้าง

งานชั้นพื้นทางที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ และยังไม่ได้ก่อสร้างลาดยางรองพื้นแอสฟัลต์ (prime coat) ตามขั้นตอนปกติ ให้ฉีดพ่นน้ำหล่อเลี้ยงผิวหน้าป้องกันการสูญเสียความชื้น

2.16.1.2 ผลการทดสอบความแน่นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ หากผลทดสอบความแน่นในสนามน้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density ให้พิจารณาดำเนินการดังนี้

- หากปริมาณน้ำอยู่ในช่วง ใกล้เคียงค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่การทดสอบความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ให้ทำการบดทับซ้ำโดยเพิ่มพลังงานการบดอัดและเพิ่มจำนวนเที่ยว เพื่อให้ได้ความแน่นตามที่ต้องการ
- หากปริมาณน้ำไม่อยู่ในช่วงใกล้เคียงค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะต้องขุดคุ้ยวัสดุ (scarify) เพื่อตากให้แห้งกรณีที่ปริมาณน้ำมากเกินไป หรือผสมน้ำเพิ่ม กรณีที่ปริมาณน้ำน้อย แล้วจึงบดอัดใหม่ให้ได้ความแน่นตามข้อกำหนด

2.17 เครื่องจักรกลที่ใช้บดอัดในสนาม

อุปกรณ์และเครื่องจักรกลที่ใช้ในการทำงานมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีความเหมาะสมเฉพาะงาน ดังนั้นการรู้จักใช้อุปกรณ์และเครื่องจักรกลให้เหมาะสมกับขนาดและประเภทของงานเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การบดอัดดินในสนามพอที่จะจำแนกระบบบนพื้นฐานการทำงานของเครื่องจักรกลได้ดังนี้

2.17.1 รถบดล้อเรียบ (รูปที่ 2.31) เป็นรถบดอัดที่เหมาะสำหรับกรวด ทราย หรือวัสดุที่คล้ายคลึง ล้อรถบดทำด้วยเหล็กที่มีความแข็งแรงมาก การบดอัดจะทำให้เกิดการแตกหักของเม็ดดินและทำให้ผิวถนนเรียบ ความดันที่จุดสัมผัสระหว่างดินกับล้อประมาณ 45 ถึง 55 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (310 ถึง 380 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) รถบดอัดประเภทนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการบดอัดในชั้นดินที่หนามาก เนื่องจากความดันล้อมีค่าไม่สูงนัก

รูปที่ 2.31 รถบดล้อเรียบ

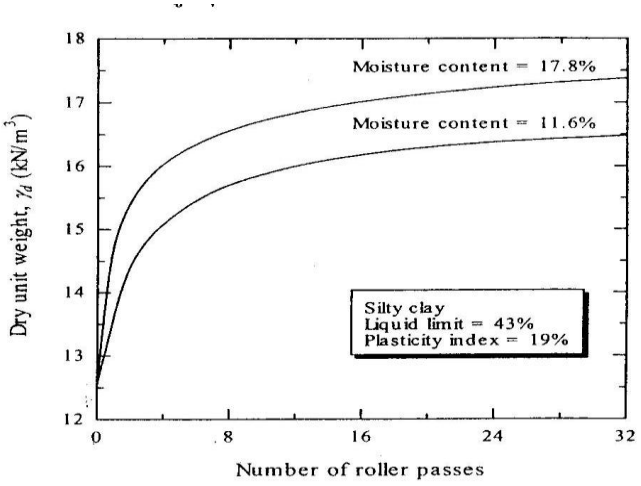
2.17.2 รถบดล้อยาง (รูปที่ 2.32) เป็นรถบดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่ารถบดล้อเรียบในหลายๆ ด้าน รถบดประเภทนี้เป็นรถบดที่มีน้ำหนักมาก และประกอบด้วยล้อประมาณ 4 ถึง 6 ล้อในหนึ่งแถว แต่ละล้อมีระยะห่างใกล้กัน ความดันที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับดินประมาณ 85 ถึง 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (585 ถึง 690 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) รถบดแบบนี้เหมาะสำหรับดินทรายและดินเหนียว การบดอัดเป็นการผสมผสานระหว่างการบดอัดด้วยความดันและการนวด

รูปที่ 2.32 รถบดล้อยางทำงานด้วยระบบความดันลม (pneumatic-tired roller)

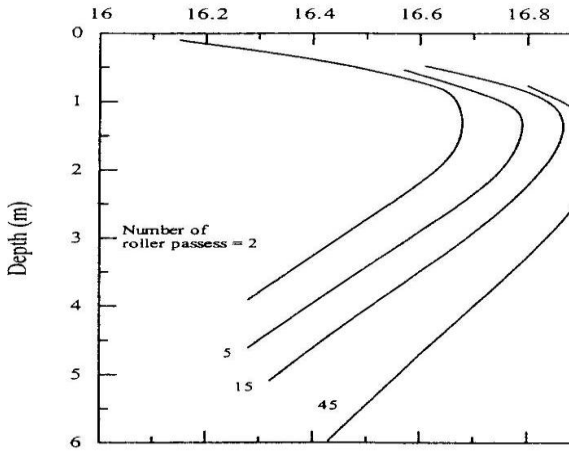
2.17.3 รถบดอัดแบบสั่นสะเทือนเป็นรถบดอัดที่มีประสิทธิภาพอย่างมากสำหรับกรวดและทราย เครื่องสั่นสะเทือนสามารถติดตั้งกับรถบดอัดได้ทุกประเภท รูปที่ 2.34 แสดงหลักการของรถบดอัดประเภทนี้การสั่นสะเทือนเกิดจากเครื่องที่ติดตั้งไว้นอกจุดศูนย์กลางของล้อ (off-center rotation weight) เครื่องสั่นนี้จะเคลื่อนที่ขึ้นลงระหว่างการบดอัดด้วยความถี่ 20 ถึง 30 รอบต่อวินาที

รูปที่ 2.33 รถบดสั่นสะเทือน (vibrating roller)

นอกจากชนิดของดินและปริมาณความชื้นแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบดอัดในสนามอีก ปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่ ความหนาของชั้นดินที่ทำการบดอัด (lift) ความเข้มข้นของความดันจากเครื่องบดอัด และพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อกับดิน เนื่องจากความดันล้อที่กระทำที่ผิวดินจะลดลงตามความลึก ส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับการบดอัด (degree of compaction) นอกจากนี้ ความหนาแน่นแห้งของดินยังแปรผันกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่าน รูปที่ 2.34a แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง ความหนาแน่นแห้งจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านจนถึงค่าหนึ่ง และความหนาแน่นแห้งจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ถึงแม้ว่าจำนวนรอบที่บดอัดจะเพิ่มขึ้น โดยทั่วๆ ไป จำนวนรอบที่เท่ากับ 10 ถึง 15 รอบ ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด



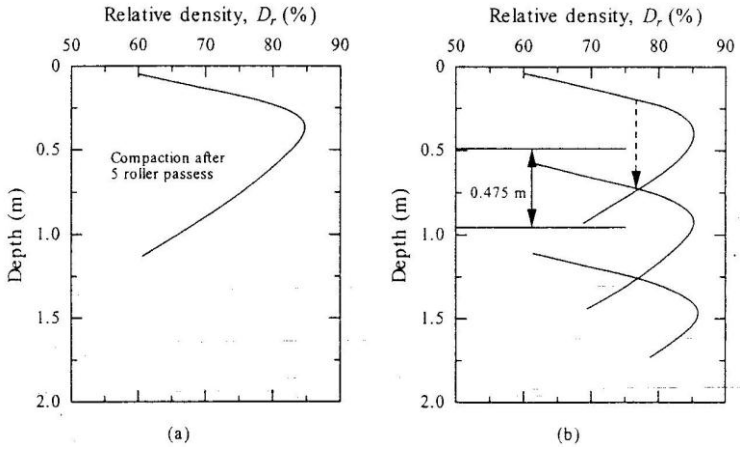
รูปที่ 2.34a) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่าน (Johnson and Sallberg. 1960)



รูปที่ 2.34b) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยนำหนักแห้งกับจำนวนรอบทีรถบดอัดวิ่งผ่าน (D'Appolonia et al., 1969)

รูปที่ 2.34b แสดงการเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักแห้งกับความลึกสำหรับทรายที่มีขนาดคละไม่ดี การบดอัดกระทำโดยใช้รถบดอัดตีนแกะแบบสั่นสะเทือน น้ำหนักของรถบดอัดเท่ากับ 55.6 กิโลนิวตัน และเส้นผ่านศูนย์กลางของตีนแกะเท่ากับ 1.19 เมตร ความหนาของชั้นบดอัดเท่ากับ 2.44 เมตร ตระหนักว่า ที่ความลึกใดๆ ความหนาแน่นแห้งของการบดอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการวิ่งผ่านของรถบดอัด แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงหลังจากจำนวนรอบที่ 15 ความจริงอีกประการหนึ่งที่ค้นพบจากรูปที่ 2.35b คือความหนาแน่นแห้ง

มีค่ามากทีสุดที่ความลึกประมาณ 0.5 เมตรและค่อยๆ มีค่าน้อยลงตามความลึก เนื่องจากการลดลงของความเค้นตามความลึก ทันทีที่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ (หรือความหนาแน่นแห้ง) สำหรับดินชนิดหนึ่งๆ ที่จำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านค่าหนึ่ง เราสามารถประมาณความหนาของการบดอัดแต่ละชั้นได้ วิธีการนี้แสดงในรูปที่ 2.35(D'Appolonia et al., 1969)



รูปที่ 2.35 การประมาณความหนาของระดับชั้นของดินสำหรับความหนาแน่นสัมพัทธ์ 75% กับจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่านเท่ากับ 5 รอบ

2.18 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม (field density test)

2.18.1 วิธีการทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม(field density test) ทล.ท. 603/2517

2.18.1.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้เป็นการหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางที่บดอัดในสนาม (in place density) ของวัสดุที่มีเม็ดไม่โตกว่า 50.8 มม. (2 นิ้ว) โดยใช้ทรายแทนที่ เพื่อหาปริมาตร

2.18.1.2 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วยชุดเครื่องมือทดสอบความแน่น (density apparatus) ประกอบด้วย

- ขวด (jar) ทำด้วยแก้วหรือพลาสติกโปร่งใสปริมาตรจุ 4 ลิตร ตัวขวดมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 160 มม. ปากขวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มม. และมีเกลียวสำหรับต่อกับกรวย

- กรวย (metal funnel) ทำด้วยโลหะสูงประมาณ 210 มม. ตรงกลางมีลิ้น (valve) สำหรับปิดเปิดรูทรงกระบอก (orifice) เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. (1/2 นิ้ว) ยาว 28.6 มม. (1 1/8 นิ้ว) ปากกรวยบานออกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 165.1 มม. (6 1/2 นิ้ว) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 171.5 มม. (6 ¾ นิ้ว) สูง 136.5 มม. (5 3/8 นิ้ว) ปลายอีกข้างหนึ่งมีเกลียว สำหรับต่อกับขวด ขณะทำการทดสอบรอยต่อระหว่างขวด และกรวยต้องสนิท ในกรณีที่มีช่องว่างหรือเคลื่อนตัวได้ ต้องใส่แหวนยางหรือ ปะเก็น (gasket) รองลิ้นจะต้องมีที่บังคับให้หยุดเมื่อเปิด หรือ ปิดจนสุดรูปทรงกระบอกแล้ว
- แผ่นฐาน (base plate) ทำด้วยโลหะขนาด 305 มม. X 305 มม. (12 นิ้ว x 12 นิ้ว) ตรงกลางมีรูกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 165.1 มม. (เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของปากกรวย) มีช่องกว้างประมาณ 3.2 มม. (1/8 นิ้ว) สำหรับวางปากกรวยให้สนิทขอบ

  ขอบแผ่นฐานยกสูงขึ้น เพื่อความสะดวกในการเก็บดินตัวอย่างหมายเหตุ ชุดเครื่องทดสอบความแน่นนี้ ใช้กับดินตัวอย่างประมาณ 2,800 ลูกบาศก์เซนติเมตร (0.01 ลบ.ฟ.) อาจดัดแปลงชุดเครื่องมือให้เล็กลงหรือใหญ่ขึ้นได้แล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งานแต่ละชนิด
- ทราย ใช้ทรายออตตาวา (ottawa sand) หรือเตรียมจากทรายที่มีในท้องที่หรือวัสดุอื่นใด ที่คล้ายทราย ต้องสะอาด แห้ง ไหลได้อย่างอิสระ (free flowing) ปราศจากเชื้อประสาน แข็ง กลม ไม่มีรอยแตก ไม่มีเหลี่ยมมุม ขนาดผ่านตะแกรงขนาด 2.00 มม. (เบอร์ 10) และค้างบนตะแกรงขนาด 0.075 มม. (เบอร์ 200) เล็กน้อย และมีความแน่นแบบบัลค์ (bulk density) เปลี่ยนแปลงได้ไม่เกินร้อยละ 1
- เครื่องชั่ง ที่สามารถชั่งได้หนักถึง 10 กก. อ่านได้ละเอียดถึง 1.0 กรัม
- เครื่องชั่งที่สามารถชั่งได้หนักถึง 500 กรัม อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

- อุปกรณ์ทำให้ดินแห้ง ได้แก่ เตาน้ำมันก๊าด เตาแก๊ส กระทะคั่วดิน เป็นต้น หรืออาจใช้ตู้อบไฟฟ้า ตู้อบน้ำมันก๊าด ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้ดินตัวอย่างแห้งสำหรับความชื้นได้
- อุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ เช่น ช้อนตักดิน ตลับบรรจุดินพร้อมฝาปิด ภาชนะสำหรับใส่ดิน เกรียง สิ่ว ค้อน แปรงขน แปรงลวด เหล็กปาด ตะแกรงขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) 2.00 มม. (เบอร์ 10) และ 0.075 มม. (เบอร์ 200) และเทอร์โมมิเตอร์ เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำ เป็นต้น

2.18.1.3 การทดสอบวิธีหาปริมาตรขวด พร้อมกรวย จนถึงรูลิ้นที่ปิด ดำเนินการดังนี้

- ชั่งน้ำหนักขวดเปล่าพร้อมกรวย
- ตั้งขวดเปล่าพร้อมกรวยบนพื้นที่มั่นคง เมื่อได้ระดับแล้วเปิดลิ้นไว้
- ใส่น้ำกลั่นลงในกรวย จนกระทั่งระดับน้ำขึ้นท่วมกรวย และไม่มีฟองอากาศค้างอยู่ในขวด แล้วจึงปิดลิ้นให้สนิท และเทน้ำที่ล้นข้างบนออกให้หมด
- ถ้าน้ำซึมออกตามบริเวณเกลียวปากขวด ให้ใช้ขี้ผึ้งหรือเทปป้องกันน้ำซึม
- เช็ดน้ำที่ติดกรวย หรือข้างขวดให้แห้งแล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักเมื่อน้ำเต็มขวด เมื่อนำน้ำหนักในข้อมาหักออกจะได้น้ำหนักน้ำเมื่อเต็มขวด
- วัดอุณหภูมิของน้ำในขวด
- ให้ทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักของน้ำเต็มขวด โดยแต่ละครั้งมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 3 กรัม และอุณหภูมิของน้ำเพื่อนำไปหาค่าความแน่นของน้ำ ตามตารางที่ 1คำนวณหาปริมาตรของขวด

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความแน่นของน้ำ

อุณหภูมิ		ปริมาณของน้ำ ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก
องศาเซลเซียส	องศาฟาเรนไฮต์	ลบ.ซม./กรัม (T)
12	53.6	1.00048
14	57.2	1.00073
16	60.8	1.00103
18	64.4	1.00138
20	68.0	1.00177
22	71.6	1.00221
24	75.2	1.00268
26	78.8	1.00320
28	82.4	1.00375
30	86.0	1.00435
32	89.6	1.00497

หมายเหตุ ให้ทำเครื่องหมายไว้ด้วยว่าเกลียวของขวดและกรวยเคลื่อนตัวหรือไม่ เกลียวต้องไม่ขยับในขณะทดสอบ เพื่อให้ปริมาตรของขวดมีค่าคงที่ตลอดเวลาที่ทดสอบ

2.18.1.4 วิธีตรวจสอบความแน่นแบบ บัลค์ ของทราย (bulk density of sand) ดำเนินการดังนี้

- วางขวดเปล่าที่ประกอบเข้ากับกรวยซึ่งได้ทำความสะอาดและชั่งเรียบร้อยแล้วหงายลงบนพื้นที่ราบมั่นคง และได้ระดับ ปิดลิ้นให้สนิทแล้วเททรายใส่ในกรวยจนเต็ม
- เปิดลิ้นให้ทรายไหลลงในขวด คอยเติมทรายในกรวยไม่ให้น้อยกว่าครึ่งของกรวยอยู่ตลอดเวลา ต้องระวังไม่ให้ขวดและกรวยกระเทือน ซึ่งจะทำให้ค่าความแน่นของทรายผิดได้ เมื่อทรายเต็มขวดโดยหยุดไหลแล้ว ให้ปิดลิ้นเททรายที่เหลือในกรวยทิ้ง
- ชั่งน้ำหนักขวดพร้อมกรวยและทราย ที่บรรจุอยู่เต็มขวด หักออกด้วยน้ำหนักของทรายเต็มขวด
- ให้ทำการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักของทรายเต็มขวด

2.18.1.5 วิธีหาน้ำหนักของทรายที่บรรจุเต็มกรวย ดำเนินการ ดังนี้

- ดำเนินการชั่งน้ำหนักขวด พร้อมกรวยและทรายที่บรรจุอยู่เต็มขวด คว่ำกรวยลงบนแผ่นฐาน ให้ปากกรวยตรงกับร่องของแผ่นฐาน โดยแผ่นฐานต้องวางอยู่บนพื้นที่ราบเรียบสะอาดและตรึงสนิทกับพื้น
- เปิดลิ้นให้ทรายไหลจนเต็มกรวยโดยไม่ให้ขวดทรายกระเทือนเมื่อทรายหยุดไหลแล้วจึงปิดลิ้น
- นำขวดทรายที่เหลือไปชั่งน้ำหนัก นำมาหักออกจากน้ำหนักที่หาได้จะได้น้ำหนักของทรายที่บรรจุเต็มกรวย
- ให้ทำการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักของทรายที่บรรจุเต็มกรวย

2.18.1.6 วิธีหาค่าความแน่นของดินในสนาม ดำเนินการดังนี้

- ปรับแต่งพื้นผิวบริเวณที่จะทดสอบให้ราบเรียบ สะอาด
- วางแผ่นฐานลงบนพื้นที่จะทดสอบแล้วตรึงแผ่นฐานให้แน่น
- เจาะดินตรงรูกลางแผ่นฐานเป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ารูกลางของแผ่นฐาน โดยเจาะเป็นแนวดิ่ง ตลอดชั้นวัสดุที่ทดสอบ หรือลึกประมาณ 10-15 ซม. แล้วแต่ชนิดของงาน แต่งหลุมให้เรียบร้อยเพื่อให้ทรายไหลลงแทนที่ได้สะดวก
- นำดินที่เจาะขึ้นมาทั้งหมดไปชั่งหาน้ำหนัก จะได้น้ำหนักของดินชื้น และภาชนะใส่ดิน เมื่อหักน้ำหนักภาชนะที่ใส่ดินออกแล้ว จะเหลือน้ำหนักรวมของดินชื้น
- คลุกดินที่เก็บจากหลุมในภาชนะใส่ดินให้ทั่วแล้วเก็บใส่ตลับบรรจุดินอย่างน้อย 100 กรัม ปิดฝากตลับแล้วนำไปชั่งและอบให้แห้ง คำนวณหาปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในดินเป็นร้อยละ ของน้ำหนักดินที่อบแห้ง
- คว่ำขวดที่บรรจุทรายอยู่เต็มพร้อมกรวยซึ่งชั่งน้ำหนักไว้แล้วลงบนร่องของแผ่นฐาน เปิดลิ้นให้ทรายไหลลงจนเต็มหลุม โดยไม่ให้ขวดทรายกระเทือน เมื่อทรายหยุดไหลแล้วจึงปิดลิ้น นำขวดทรายที่เหลือไปชั่งน้ำหนัก เก็บทรายสะอาดเพื่อใช้งานต่อไป ส่วนทรายที่ชื้นหรือสกปรก ให้นำไปทำความสะอาดนำน้ำหนักในตอนหลัง

หักออกจากน้ำหนักที่ชั่งได้ก่อนคว่ำกรวย จะได้น้ำหนักของทรายที่ไหลออกไปจากขวด

- นำน้ำหนักที่ได้ไปหักออกจากน้ำหนักของทรายที่ไหลออกไปจากขวด แล้วจะได้น้ำหนักทรายที่แทนที่ดินในหลุม

2.18.1.7 การคำนวณความแน่นแบบ บัลค์ ของทราย

- หาปริมาตรของขวด

$$L = MT$$

เมื่อ L = ปริมาตรของขวด (ลบ.ซม.)

M = น้ำหนักของน้ำเต็มขวด (กรัม)

T = ปริมาตรของน้ำซึ่งหนัก 1 กรัม ที่อุณหภูมิทดลอง (ตารางที่ 1) (ลบ.ซม./กรัม)

- ความแน่นแบบ บัลค์ ของทราย

$$\gamma_s = \frac{M_1}{L}$$

เมื่อ γ_s = ความแน่นแบบบัลค์ของทราย (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

M_1 = น้ำหนักของทรายเต็มขวด (กรัม)

L = ปริมาตรของขวด (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

- ความชื้นในดินเป็นร้อยละ

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

เมื่อ W = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

W1 = น้ำหนักของดินชื้น (กรัม)

W2 = น้ำหนักของดินอบแห้ง (กรัม)

- หาปริมาตรของหลุม

$$V = \frac{M_2}{\gamma_s}$$

เมื่อ V = ปริมาตรของหลุม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

M_2 = น้ำหนักทรายที่แทนที่ดินในหลุม (กรัม)

γ_s = ความแน่นแบบบัลค์ของทราย (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

- ความแน่นชื้นของดินที่ขุดออกจากหลุม

$$\gamma w = \frac{P}{V}$$

เมื่อ γw = ความแน่นชื้นของดินที่ขุดออกจากหลุม (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

P = น้ำหนักรวมของดินชื้นที่ขุดออกจากหลุม (กรัม)

V = ปริมาตรของหลุม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.18.1.8 ความแน่นแห้งของดินที่ขุดออกจากหลุม

$$\gamma d = \frac{\gamma_w}{1+\frac{w}{100}}$$

เมื่อ γ_d = ความแน่นแห้งของดินที่ขุดออกจากหลุม (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

γ_w = ความแน่นชื้นของดินที่ขุดออกจากหลุม(กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

- ร้อยละของการบดอัด

$$Pc = \frac{\gamma_d}{\gamma_m}$$

เมื่อ Pc = ร้อยละของการบดอัด

γ_d = ความแน่นแห้งของดินที่ขุดออกจากหลุม (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

γ_m = ความแน่นแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างชนิดเดียวกับดินที่ขุดออกจากหลุม (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.18.1.9 การรายงาน

- ให้รายงานชื่อโครงการ สายทาง ชั้นของวัสดุ ชนิดของวัสดุ รายนามเจ้าหน้าที่ที่ทดสอบ วันเวลาที่ทดสอบ ความแน่นของทรายที่หาได้ ตำแหน่งที่ทดสอบ ความหนาของชั้นต่าง ๆ ตามสัญญา และความหนาจริงในการก่อสร้าง และรายละเอียดอื่น ๆ

- ค่าความแน่นของดินให้ใส่ทศนิยม 3 ตำแหน่ง และร้อยละของการบดอัดให้ใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2.18.1.10 ข้อควรระวัง

- แผ่นฐานที่วางบนพื้นทดสอบต้องตรึงให้แน่น
- พื้นผิวที่ทดสอบควรราบเรียบได้ระดับ สะอาด
- ขณะทดสอบต้องไม่ให้ขวดทรายกระเทือน
- หาค่าความแน่นแบบบัลค์ ของทราย อย่างน้อยสัปดาห์ละ 1 ครั้ง
- ทรายที่ใช้ทดสอบต้องสะอาดและแห้ง
- ต้องปิดลิ้นก่อนคว่ำขวดทรายทุกครั้ง
- ในขณะขนย้ายเครื่องมือให้อุ้มตัวขวดโดยตรง ห้ามหิ้วที่กรวย เพราะตรงบริเวณลิ้นไม่แข็งแรงอาจขาดได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีทรายบรรจุอยู่เต็มขวด

2.18.2 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนามโดยวิธี Nuclear Gauge

2.18.2.1 หลักการทั่วไปของเครื่องมือ Nuclear Gauge

Nuclear Gauge เป็นเครื่องมืออิเลคโทรนิกส์ที่สามารถวัดหาปริมาณความชื้น ความหนาแน่นและการอัดแน่นของวัสดุ เช่น ดิน,หิน คอนกรีตและยางมะตอยหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีความชื้นและความหนาแน่นในช่วงที่เครื่องมือกำหนดไว้ ในการวัดความแน่นนั้นใช้รังสีแกมมาหรือโฟตอนจากต้นกำเนิดรังสี คือ ซีเซียม 137 (Cs – 137) ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีชนิดที่มีความแรงของรังสีในระดับที่ต่ำ มีค่าครึ่งชีวิต 30 ปี ความแรงรังสี 8 mCi (มิลลิคูรี) ส่วนการวัดหาปริมาณความชื้นในวัสดุนั้นใช้รังสีรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี คือ อเมอริเซียม 241 และเบอริลเลียม (Am 241:Be) มีค่าครึ่งชีวิต 432 ปี ความแรงรังสี 40 mCi (มิลลิคูรี) วิธีการทดสอบได้ผ่านการรับรองให้เป็นเครื่องมือในการควบคุมการบดอัดตามมาตรฐาน ASTM D2922, D2950, D3017 และ D-1040

ส่วนประกอบของเครื่องมือนิวเคลียร์จะมีตัวต้นกำเนิดรังสี ถูกบรรจุอยู่ในแคบซูลสเตนเลสหนาสองชั้น (เป็น Seal Source ซึ่งไม่สามารถรั่วออกมาได้) ซีเซียม 137 (Cs-137) เชื่อมติดอยู่กับปลายแท่งสเตนเลส ส่วนอเมอริเซียม 241 และเบอริลเลียม (Am 241:Be) เชื่อมติดอยู่กับฐานภายในตัวนิวเคลียร์เกจ การวัดความหนาแน่นทำได้โดยการปล่อยรังสีแกมมาผ่านชั้นความหนาของวัสดุที่ต้องการทดสอบ จากนั้นตัวตรวจวัด (Detector) ซึ่งจะตรวจนับรังสีตามเวลาที่กำหนดแล้วคำนวณค่าตามคุณสมบัติของรังสีที่ผ่านตัวกลางโดยนำค่าที่ได้จากการตรวจนับไป

เปรียบเทียบกับค่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีกับความแน่นออกมาเป็นค่าความแน่นที่เราต้องการวัด ตัวตรวจวัดที่ใช้ในการวัดความหนาแน่นได้แก่ G-M Tubes ซึ่งเป็น Photon detector มีอยู่ 2 ตัว ในการวัดความชื้นทำได้โดยการปล่อยรังสีนิวตรอนลงไปในชั้นวัสดุ แล้วใช้ Helium-3 detector เป็นตัวตรวจวัด Slowed neutron

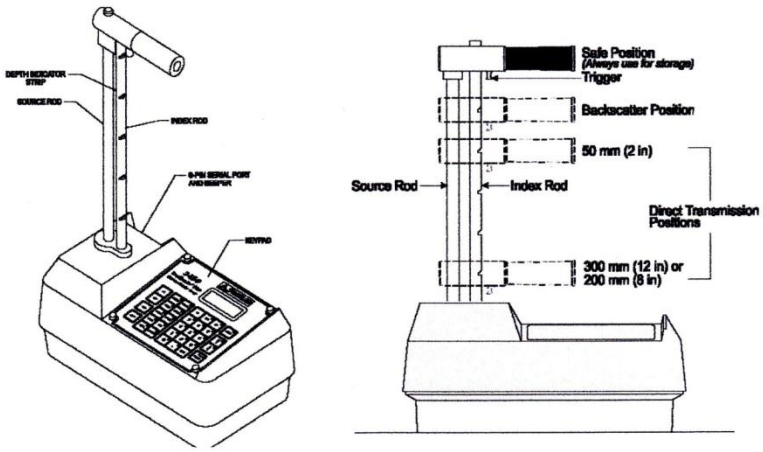
รูปแบบการทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Nuclear Gauge เครื่องมือ Nuclear Gauge มีลักษณะการใช้งานในการวัดความหนาแน่นอยู่ 2 แบบคือ backscatter และ direct transmission

วิธีวัดแบบ backscatter mode เป็นวิธีการทำงานที่รวดเร็วและยังไม่เป็นการทำลายชั้นทาง เพราะจะวางเครื่องมืออยู่ชั้นทางที่ต้องการทดสอบโดยไม่มีการขุดหรือตอกที่ชั้นทาง ตำแหนงของ source rode จะอยู่ที่ต่ำจากตำแหน่ง safe position ลงมาหนึ่งขั้นซึ่งจะทำให้ทั้งต้นกำเนิดรังสีแกมมาและ Detectors (ตัวตรวจจับรังสี) จะยังคงติดอยู่ที่ภายในตัว gauge ซึ่งวางอยู่บนระนาบชั้นวัสดุที่ต้องการทดสอบ การตรวจนับรับสีเป็นการอ่านค่า ของ detector จากการสะท้อนกลับ (scatter of reflect) การวัดค่าโดยใช้ backscatter mode นั้นโดยปกติใช้กับชั้นโครงสร้างที่ไม่หนามาก เช่น ชั้นผิวทาง asphalt และ concrete เป็นการวัดค่าที่ความหนาประมาณ 10 ซม. แต่การวัดแบบ backscatter นั้นจะถูกต้องแม่นยำน้อยกว่าวิธี direct transmission

วิธีวัดแบบ direct transmission mode เป็นการทดสอบกับชั้นทางที่หนา วิธีการทดสอบทำโดยเลื่อนแท่งรังสี (source rod) ที่มีแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาที่ปลายแกนในรูที่เจาะลึกลงไปโดยใช้ drill rod ตามระยะความลึกที่ต้องการทดสอบ เมื่อทำการทดสอบรังสีแกมมาจะถูกปล่อยผ่านไปยังชั้นวัสดุและชนกับอิเล็คตรอนจนทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป ยิ่งวัสดุมีความหนาแน่นมากเท่าไรก็จะยิ่งทำให้เกิดการชนระหว่างโฟตอนกับอิเล็คตรอนมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ลดจำนวนโปรตอนที่จะเหลือให้ detector ที่ติดอยู่ที่ฐานของ gauge ตรวจพบ ดังนั้นจำนวนนับรังสีแกรมมาจากหัววัดรังสี (detector) จึงเป็นอัตราส่วนผกผันกับความหนาแน่นของวัสดุ จากการปรับเทียบ gauge calibration (ซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนับรังสีในแต่ละระดับความลึกกับความแน่นของวัสดุที่ทำการทดสอบ) และใช้โปรแกรมคำนวณจะทำให้สามารถหาค่าความหนาแน่นจากค่าที่ตรวจจับได้จากหัววัดรังสี วิธีนี้จะได้ค่าที่เป็นค่าเฉลี่ยของชั้นวัสดุที่ความลึกจากแหล่งกำเนิดรังสีกับตำแหน่งที่ detector ดังนั้นจะได้ค่าที่คลาดเคลื่อนน้อยกว่า จะลดความคลาดเคลื่อนจากผิวที่ขรุขระลงได้ด้วย การทดสอบโดยใช้วิธีนี้ใช้ได้กับชั้น aggregate ที่หนาหรือแม้กระทั่งชั้น ผิว asphalt และ concrete ก็ใช้ได้

ค่าความลึกที่ทดสอบโดยวิธี direct transmission นั้น จะสามารถเซตความลึกได้ 2 แบบ คือ automatic depth เครื่องวัดจะทำการอ่านค่าความลึกของตำแหน่ง source rod ที่เคลื่อนที่ลง

ไปจากผิวโดยใช้ depth sensor และอีกแบบหนึ่งก็คือเซตความลึกแบบ manually depth ซึ่งผู้ใช้จะต้องป้อนค่าระยะความลึกของ source rod ที่เคลื่อนที่ลงไปในวัสดุทดสอบ

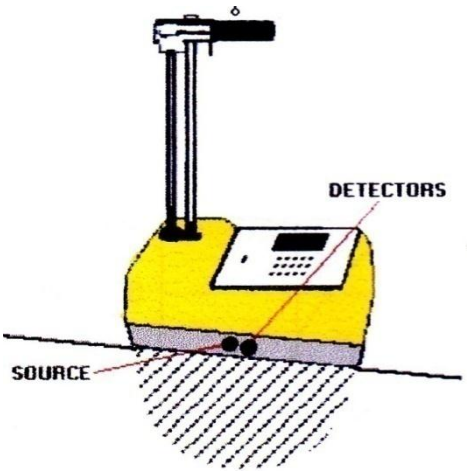


รูปที่ 2.36 รูปร่างลักษณะของเครื่องมือและตำแหน่งของ source rod positions ในการใช้งานที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน

2.18.2.2 วิธีการทดสอบหาค่าความชื้นในวัสดุชั้นทาง

การทดสอบหาค่า moisture content เป็นการทดสอบที่ไม่ทำลายชั้นทาง หลักการในการทดสอบคือ Fast neutron จะถูกปล่อยออกไปในชั้นวัสดุและจะช้าลงหลังจากที่แผ่รังสีนิวตรอนชนกับอะตอมของไฮโดรเจนกลายเป็น slowed neutrons หรือ thermalized neutrons จากนั้นตัวตรวจวัด (detector) ใน gauge ก็จะตรวจนับจำนวนของนิวตรอน (slowed neutrons) ซึ่งก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความชื้นในดินตัวอย่างที่ทำการทดสอบ รายงานผลออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้น ซึ่งการวัดรังสีนิวตรอนโดย Detector นั้นอาศัยปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ในการวัดรังสีนิวตรอน (slowed neutrons of thermalized neutrons) ใช้สารที่มีโอกาสที่จะทำปฏิกิริยากับนิวตรอนสูง ในเครื่องมือนี้ได้แก่ He (ไอโซโทปของาตุฮีเลียมที่มีเลขมวลหรือมวลอะตอมเท่ากับ 3) ซึ่ง sensitive ต่อ slow neutron เท่านั้น การวัดปริมาณความชื้นดังกล่าวทำงานเหมือนกับการวัดความแน่นโดยใช้ backscatter mode กล่าวคือทั้งตัวตรวจจับรังสี (helium-3 detector) และต้นกำเนิดรังสี (Am-241:Be) อยู่บนระนาบเดียวกับบนชั้นวัสดุที่ต้องการตรวจวัด

ค่าความลึกที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามของเครื่องมือทดสอบนั้นขึ้นอยู่กับว่าวัสดุที่ต้องการวัดนั้นมีค่าความชื้นอยู่มากน้อยเพียงใด ถ้าหากวัสดุมีความชื้นน้อยอนุภาคนิวตรอนก็สามารถแผ่ไปได้ลึกกว่า แต่ถ้าวัสดุมีความชื้นมาก อนุภาคนิวตรอนก็จะยังเหลือไปถึงชั้นที่ลึกได้น้อยเพราะจะเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็น slowed neutron เมื่อเจอกับอะตอมไฮโดรเจนที่มีอยู่มากดังแสดงในรูปที่ 2.38

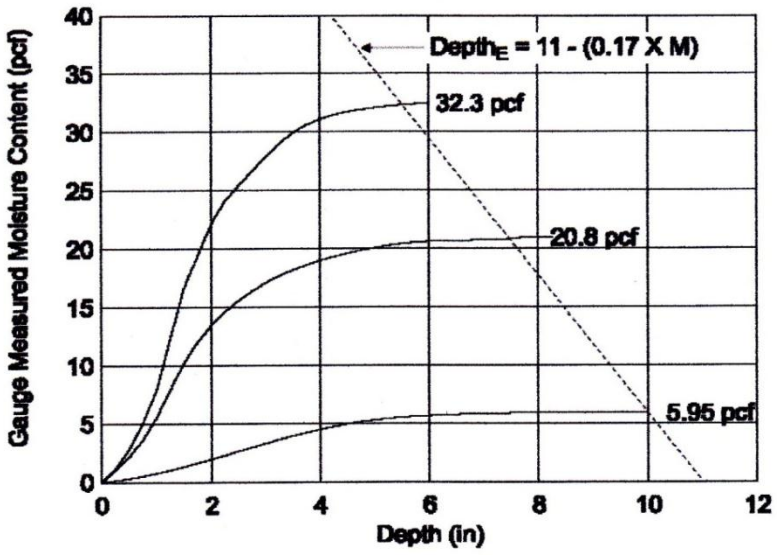


รูปที่ 2.37 การจัดเครื่องมือทดสอบเพื่อหาค่าความชื้นในสนาม

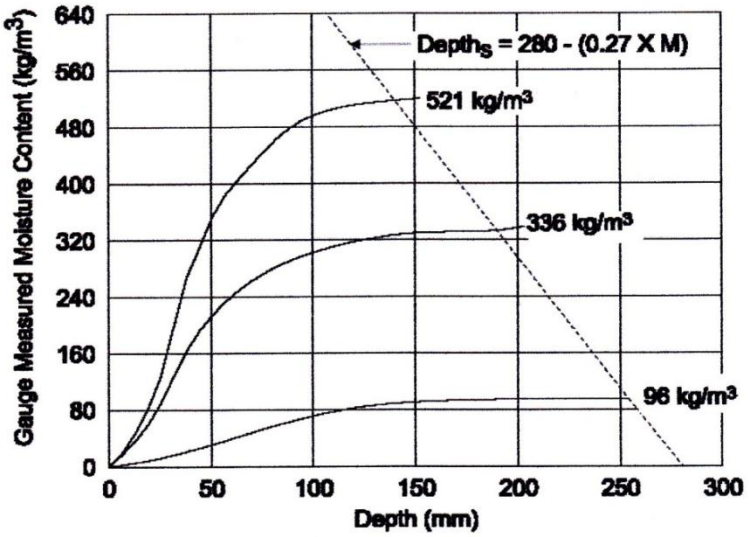
สมการต่อไปนี้แสดงค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนาม

depth (inches) = 11 – (0.17 x M) M คือ ค่าความชื้นในหน่วย pcf รูปที่ 2.38

depth (mm) = 280 – (0.27 x M) M คือ ค่าความชื้นในหน่วย kg/m^3 รูปที่ 2.39

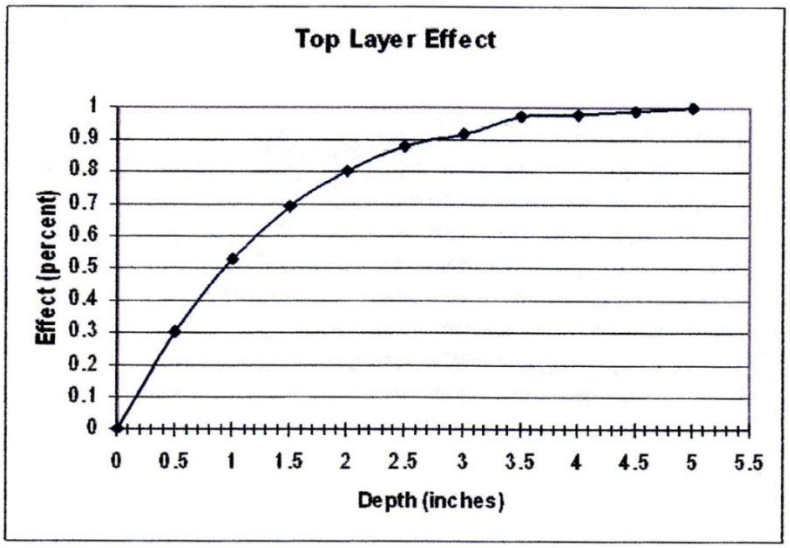


รูปที่ 2.38 กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย pcf



รูปที่ 2.39 กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย kg/m^3 top layer effect

ในการวัดค่าความแน่นในสนามนั้น หากเราเลือกใช้การวัดแบบ backscatter จำเป็นต้องรู้ถึงผลกระทบที่เรียกว่า top layer effect คือ ที่ความหนา 5 ซม. แรกจะมีผลต่อการวัดประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความหนา 5 ซม. ด้านล่างจะมีผลต่อการวัดประมาณร้อยละ 18 ดังรูปที่ 2.40

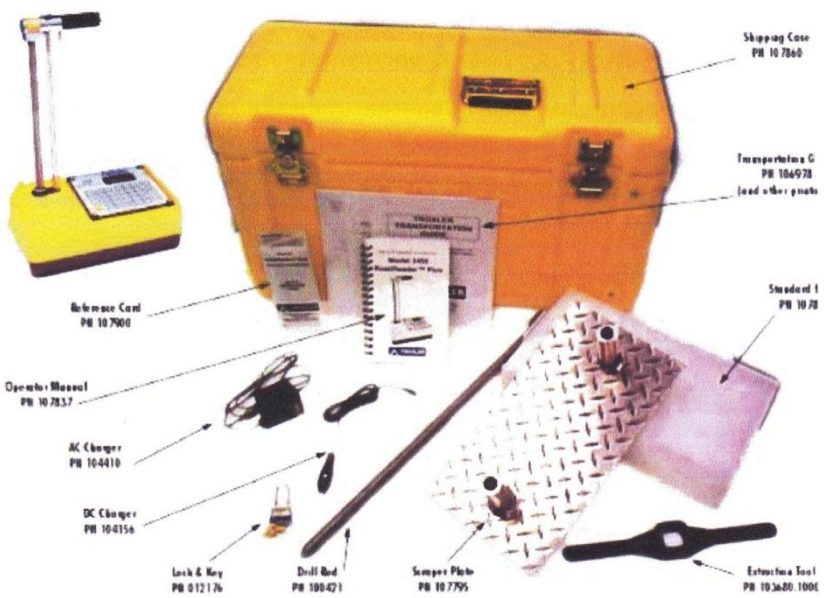


รูปที่ 2.40 กราฟผลกระทบที่เรียกว่า top layer effect ที่มีต่อการวัดค่าความแน่นแบบ backscatter ที่ความหนาต่าง ๆ กัน

ดังนั้นในการวัดค่าความแน่นในสนามแบบ backscatter จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องปรับผิวหน้าพื้นที่ที่จะวัดให้มีความเรียบ เพื่อไม่ให้มีช่องว่างในขณะที่วางฐานเครื่องทดสอบลงไป เพราะจะทำให้มีผลกระทบอย่างมากต่อค่าที่วัดออกมา ทำให้ค่าที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

2.18.2.3 ส่วนประกอบของชุดวัดความชื้นและความหนาแน่น

Nuclear gauge เป็นเครื่องมือวัดประเภท protable (เคลื่อนย้ายได้) สามารถอ่านข้อมูลได้ในการวัดความชื้นหรือความหนาแน่น ภายในบรรจุสารกัมมันตรังสี วงจรอิเล็คโทรนิค ชุดแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ด้านหลังจะมีสลากบอกเกี่ยวกับตัวเครื่อง เช่น ความแรงของรังสี หมายเลขเครื่องReference block ใช้ในการปรับตั้งมาตรฐานการนับเพื่อเช็คการทำงานของเครื่องว่าพร้อมหรือไม่ ก่อนที่จะนำไปใช้งาน หรือเป็นการปรับแก้ไขค่าการวัดให้ถูกต้องจากที่สารรังสีลดลงไปตามเวลาScraper plate (Drill Rod guide) ใช้ในการระบุตำแหน่งที่จะเจาะเพื่อทำเป็นรูให้ท่อนำสารรังสีลงไปในงานสนาม โดยเลือกลักษณะการใช้งานแบบ direct transmission drill rod ใช้ในการเจาะรูสำหรับการใช้งานแบบ direct transmission drill rod extraction tool ใช้ดึงที่เจาะ (drill rod) ออกจากวัสดุที่ทำการเจาะอยู่ charger มี 2 ชนิดคือแบบรับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบ DC (12 โวลต์) หรือรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟแบบ AC (115/230V ,50/60 Hz) extra battery case เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบใช้ถ่าน alkaline transport case เป็นกล่องบรรจุเครื่องมือและเครื่องวัดที่ใช้ในการขนย้าย ดังรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.41 ส่วนประกอบของชุดวัดความชื้นและความหนาแน่นของเครื่องมือ

2.18.2.4 การทำ Calibration

การ Calibrate เครื่องมือวัดทำได้โดย คำนวณหาค่าการนับรังสี จากการวัดค่าจากวัสดุที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอนแล้ว นำค่าที่อ่านได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่านับรังสีที่อ่านได้กับค่าความหนาแน่นที่เรารู้ค่าที่แท้จริงแล้ว

วัสดุที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอนที่ใช้ ได้แก่ Magnesium มีความหนาแน่น 1,760 kg/m^{3}Magnesium Aluminum มีความหนาแน่น 2,157 kg/m^3 และ Aluminum มีความหนาแน่น 2,640 kg/m^3

วิธีการ Calibrate ทำโดยนำเครื่องมือวางบนวัสดุมาตรฐานดังกล่าวแล้วทำการนับรังสีที่แต่ละความลึก ค่าที่อ่านได้จะถูกบันทึกโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และคำนวณหาค่าความสัมพันธ์เป็นค่าคงที่ที่ใช้เป็นสมการในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นในสนาม โดยปกติควรมีการทำ Calibration ทุก ๆ 12 ถึง 18 เดือนโดยผู้ผลิตดังรูปที่ 2.44

รูปที่ 2.42 การทำ Calibration ของเครื่องมือ โดยทดสอบบนวัสดุที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอน

การคำนวณในการหาความหนาแน่นในสนาม

$$WD = 1/B\{In[A/CRd + C]\} - M/20 \quad (2.16)$$

$$M = \{CRm - E\} / F \quad (2.17)$$

CRd = Density Measure Count / Density Standard Count

CRm = Moisture Measure Count / Moisture Standard Count

In = natural log base e

A,B,C,E and F are calibration constants specific to the gauge and the depth

2.18.2.5 การทำ Standard Count

ทำไมต้องทำ Standard Count ? คำตอบก็คือ เพื่อให้การวัดค่าได้ผลออกมาถูกต้อง เพราะเมื่อเวลาผ่านไป ต้นกำเนิดรังสีจะมีปริมาณลดน้อยลง ทำให้อัตราการสลายตัวให้รังสีลดลงไปด้วย ฉะนั้นผู้ใช้จำเป็นที่จะต้องมีการทำ Standard Count เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา Count Ratio ซึ่งมี 2 ค่า คือ CRd และ CRm (ในสมการที่ 4 และ 5) ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปเครื่องทดสอบก็ยังวัดค่าความแน่นได้ถูกต้อง โดยที่ Count Ratio = Count ในสนาม / Standard Count

หลักการในการทำ Standard Count ก็เพื่อที่จะนำค่า Count Ratio จากบอล์คพาราฟินซึ่งเป็นวัสดุอ้างอิงที่เรารู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอนก่อนแล้ว

การเลือกสถานที่ที่จะทำ Standard Count ควรจะประกอบด้วย

1. จะต้องเป็นสถานที่ที่แห้งและเป็นพื้นราบ
2. จะต้องห่างจากกำแพงอย่างน้อย 3 เมตร หรือ 10 ฟุต
3. จะต้องห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีอื่นไม่น้อยกว่า 3 เมตร
4. พื้นจะต้องเป็นแอสฟัลต์, หรือดินที่บดอัดแล้ว โดยมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เซนติเมตรหรือ 4 นิ้ว

หลังจากเลือกสถานที่ทำ Standard Count ได้แล้ว ก็ให้นำเครื่องทดสอบออกมาแล้ว Turn On เมื่อหน้าจอแสดงผลอยู่ในเมนู Ready Screen แล้วให้กดคีย์ (Standard) จอแสดงผลจะแสดงค่า STD ของ DS และ MS ที่อยู่ในเครื่องก่อนหน้านี้ ดังนี้

DE = xxxx x.x % P MS = xxx x.x % P Do You Want To Use The New Std.?

หมายเหตุ DS = Density Standard Count

MS = Moisture Standard Count

ถ้าต้องการทำ Standard Count ใหม่ให้กดคีย์เลข (1) จากนั้นกดคีย์ (2) แล้ว ENTER เครื่องจะถามออกมาว่า

Rod In STD Pos Place Gauge On Standard Block Press ENTER

ให้ผู้ใช้นำบอล์คพาราฟินสี่เหลี่ยมมาแล้วนำเครื่องทดสอบวางบนแผ่นบอล์คพาราฟินนั้น ดังรูปที่ 2.46

รูปที่ 2.43 การนำเครื่องทดสอบวางบนแผ่นบอล์คพาราฟินเพื่อทำ Standard count

การวางเครื่องทดสอบจะต้องให้ทุกส่วนของฐานวางอยู่บนบอล์คพาราฟินโดยปลายด้านหนึ่งชิดกับแผ่นเหล็ก และให้ตำแหน่งของแท่งรังสี (Soure Rod) อยู่ในตำแหน่ง Safe Position จากนั้นทำการยืนยันคำสั่งให้กดคีย์ (ENTER) การทำ Std Count จะใช้เวลาครั้งละ 4 นาที เมื่อเสร็จสิ้นการนับรังสีแล้ว เครื่องจะแสดงผลที่หน้าจอ

DE = xxxx x.x % P MS = xxx x.x % P Do You Want To Use The New Std.?

ค่า DS1 และ DS2 จะผิดพลาดไม่เกิน ±1.3% ของค่าเฉลี่ยและค่า MS จะผิดพลาดได้ไม่เกิน ±1% ของค่าเฉลี่ย

หลังจากทำ STD Count ผ่านแล้วให้กดคีย์ (YES) จากนั้นเครื่องจะทำการ Calibrate ตำแหน่งของแท่งรังสี โดยหน้าจอจะแสดงข้อความว่า

Taking Standard Count xxx x Renalning

จากนั้นให้กดคีย์ (ENTER)

ในกรณีที่ไม่ได้ใช้เครื่องทดสอบเป็นเวลานานเป็นเดือน ผลการทำ STD Count อาจจะ Fail ได้ให้ผู้ใช้ทำการยืนยันค่าใหม่ให้เข้าไปเก็บแทนค่าเก่า และให้ทำทดลองทำใหม่อีกสัก 4 ครั้ง ค่าที่ทำครั้งหลังสุดน่าจะได้ DS1 และ MS ผ่าน ถ้ายังไม่ผ่านให้ติดต่อบริษัทผู้ขาย ทำการซ่อมบำรุง

ตัวอย่างการคำนวณในการทำ Standard count

Density 1	Density 2	Moisture
7128	1987	1084
7134	1985	1071
7121	1990	1073
7140	1981	1083
28523/4=**7131**	7943/4=**1986**	4311/4=**1078** Average of these counts

Today's standard count:

Density 1	Density 2	Moisture
7139	1979	1080

Formula: [today's – average] = n ; (n / average) x 100 = %

Density 1	Density 2	Moisture
7139 -7131= 8 ; (8 / 7131) x100 = 0.11% Pss	1979-1986 = 7 ; (7 / 1986) x100 = 0.35% Pass	1080-1078 = 2 ; (2/1078)x100 = 0.12% Pass
must be within +/-1% of average	must be within +/-1.2% of average	must be within +/-2% of average

การเตรียมสถานที่สำหรับการทดสอบงานดิน (soil site)

1. สถานที่จะต้องเป็นพื้นเรียบห่างจากรอยร้าวหรือรูโพรงขนาดใหญ่
2. ถ้าจำเป็น ที่จะต้องทำการปรับพื้นให้เรียบก็ให้ใช้แผ่นเพลท ที่ใช้เจาะรูทำการปรับพื้นให้เรียบ
3. ปรับพื้นที่เป็นรูเล็ก ๆ ด้วยทรายละเอียด
4. นำเพลทโลหะที่สำหรับเจาะรูวางบนสถานที่ที่เตรียมไว้ แล้วกดเพลทลงไปผิวดิน

5. สำหรับการทดสอบแบบ Direct Transmission เป็นวิธีที่สามารถวัดได้ถูกต้อง และมีความแน่นอนสูง จะต้องทำการเจาะรู เพื่อหย่อนแท่งรังสีลงไปต่ำกว่าบริเวณผิวทางดังรูป
6. ใช้ค้อนปอนด์ตอกแท่งเหล็กเจาะรูลงไประยะความลึก สังเกตได้จากตำแหน่งบอกระยะที่แท่งเจาะช่องละ 2 นิ้ว ควรจะตอกลงไปลึกกว่าตำแหน่งที่ต้องการทดสอบ เช่น ถ้าทดสอบที่ความลึก 10 เซนติเมตร (4 นิ้ว) ก็ควรตอกให้ลึก 6 นิ้ว หรือ 5 นิ้ว เพราะเวลาถอนเอาแท่งเจาะออกจะมีดินบางส่วนเคลื่อนปิดลงไปทำให้ระยะลึกน้อยกว่าระยะที่ตอกจริง
7. ทำการถอนแท่งเจาะออก
8. เมื่อจะเอาแผ่นเพลทออก ควรใช้ไม้หรือเหล็กแหลมขีดทำเครื่องหมายบอกที่รอบแผ่นเพลงบนผิวดินให้ครบทั้ง 4 มุม เพราะเวลาเอาเครื่องทดสอบไว้วางบนบริเวณที่เตรียมพื้นที่ไว้ แท่งรังสีจะหย่อนลงไปในรูเจาะได้พอดี ดังรูปที่ 2.45

รูปที่ 2.44 การเจาะรูโดยใช้ Scraper plate (Drill Rod guid) และแท่ง Drill Rod เป็นการระบุตำแหน่งที่จะนำสารรังสีลงไปในสนามในการเลือกลักษณะการใช้งานแบบ Direct transmission โดยมีการทำสัญลักษณ์หลังจากเจาะเตรียมไว้เพื่อที่จะได้นำเครื่องมือมาวางให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง

หมายเหตุ อย่าลืมใส่ตัวถอนแท่งเจาะลงบนเพลทโลหะ เพราะเมื่อตอกแท่งเจาะลงไปแล้วไม่มีตัวถอนออก จะเกิดปัญหาเอาแท่งเจาะดึงกลับออกมาไม่ได้

2.18.2.6 การเตรียมสถานที่สำหรับงาน asphalt, คอนกรีต, ดินแข็ง (asphalt site) ก็จะมีขั้นตอนเหมือนกันกับงานดินเพียงแต่การเจาะรูเพื่อทำการวัดแบบ direct transmission จะทำได้ยาก เพราะวัสดุทดสอบจะมีความแข็งมากบางครั้งจำเป็นที่จะต้องใช้สว่านไฟฟ้าเจาะรู แทนการตอกด้วยแท่งเหล็ก แต่ถ้าไม่ต้องการเจาะรู เราอาจเลือกทำการวัดแบบ backscatter ก็ได้แต่ผลความแน่นอนจะน้อยกว่าวิธี direct transmission

2.18.2.7 การทดสอบใน Soil Mode

การวัดความแน่นและความชื้นของดิน, หินคลุก, ทราย มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกการทดสอบแบบ Soil Mode
2. ทำการป้อนค่า Protor (ค่า Max Lab) จากห้องปฏิบัติการ
3. เตรียมสถานที่ที่ทำการทดสอบ
4. วางเครื่องทดสอบบนสถานที่ที่เตรียมทดสอบ
5. กดแท่งรังสีให้เลื่อนลงไปในรูที่เจาะไว้ให้ลึกตามที่ต้องการ โดยคลายล๊อคกลไกที่แขนจับก่อนทำได้โดยใช้นิ้วมือกดสลักล๊อค
6. สังเกตความลึกจากแท่งรังสีที่เคลื่อนลงไปจากเสาบอกระยะ ที่มีระยะบอกช่วงละ 2 นิ้ว เมื่อถึงตำแหน่งที่ต้องการ จะต้องให้ตัวล๊อคซึ่งเป็นกลไกอยู่ที่แขนจับเลื่อนล๊อคกับร่องปากที่เสาบอกระยะพอดี เมื่อปล่อยคลายกลไก ผู้ใช้จะได้ยินเสียงคลิกส์ เมื่อแท่งรังสีล๊อคเข้ากับตำแหน่งที่ทดสอบ
7. กดคีย์ (Start) โดยปกติจะใช้เวลาในการทดสอบแต่ละครั้งนาน 1 นาที ดังนั้นจะต้องเซตค่า (Time) ไว้ที่ 1 นาทีก่อน เมื่อครบเวลา 1 นาที และหน้าจอแสดงผลจะแสดงผลการทดสอบออกมาดังนี้

%PR = xxx.x DD = xxxx WD = xxxx M = xxx %M = xx.x

%PR = Percent Proctor

DD = Dry Density

WD = Wet Density

M = Moisture

%M = Percent Moisture

ถ้าต้องการบันทึกค่าลงในไฟล์โปรเจค ที่ตั้งชื่อไว้ให้กดคีย์ (store) จากนั้น ต้อการกลับสู่เมนู Ready Screen ให้กดคีย์ (ESC) และถ้าต้องการเริ่มทดสอบใหม่อีกครั้งก็ให้กดคีย์ (start) เมื่อจบการทดสอบแล้วให้เลื่อนแท่งรังสีกลับสู่ตำแหน่ง Safe position รูปที่ 2.49

รูปที่ 2.45 การกดแท่งรังสีให้เลื่อนลงไปในรูเจาะให้ลึกตามที่ต้องการ โดยคลายล๊อคกลไกที่แขนจับ หลังจากนั้นกดปุ่มคำสั่งให้เครื่องทำงาน

บทที่ 3
วิธีดำเนินการทำโครงงาน

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เก็บรวบรวมผลทดสอบการบดอัด และ ซี บี อาร์ ในห้องปฏิบัติการของวัสดุพื้นทางหินคลุก จากพื้นที่งานก่อสร้างทางในการควบคุมของแขวงการทางบุรีรัมย์ สำนักทางหลวงที่ 8 (นครราชสีมา) กรมทางหลวง วัสดุอย่างทั้งหมดเป็นหินคลุกที่มีความคละตามมาตรฐานข้อกำหนดของกรมทาง ผลทดสอบทั้งหมดจะนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า ซี บี อาร์ และค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้เก็บข้อมูลความแน่นของวัสดุพื้นทางหินคลุกที่บดอัดในสนามและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด เพื่อพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งในสนามและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ความแน่นแห้งในสนามตรวจวัดจากการทดสอบด้วย วิธีนิวเคลียร์ (Nuclear method) วิธีการนี้จะคำนวณหาหน่วยน้ำหนักแห้งโดยการส่งผ่านรังสีแกมม่า (Gamma ray) ไปยังวัสดุบดอัดและสะท้อนขึ้นสู่เครื่องรับรังสี ถ้าปริมาณรังสีสะท้อนกลับมายังเครื่องรับมากแสดงว่า วัสดุมีความแน่นแห้งสูง การหาปริมาณความชื้นทำโดยการใช้รังสีนิวตรอน (new tron) ส่งผ่านไปยังวัสดุบดอัดและสะท้อนกลับไปยังเครื่องรับ อนุภาคของนิวตรอนจะไปชนกับอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำ ถ้านิวตรอนสะท้อนกลับเข้าเครื่องรับช้า แสดงว่า ปริมาณน้ำในมวลวัสดุบดอัดมีมาก นอกจากความสะดวกรวดเร็วแล้ว วิธีการนี้ยังเป็นการทดสอบที่ไม่ทำลายชั้นทาง

3.2 แผนงานดำเนินการ

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยงานสองส่วนหลัก ส่วนแรกเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลผลทดสอบในห้องปฏิบัติการอันได้แก่การกระจายขนาดของเม็ดวัสดุ ผลทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ผลทดสอบ ซี บี อาร์ (CBR) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบแบบแช่น้ำ (Soaked) และผลทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Coarse aggregates) โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (Los angeles abrasion) ส่วนที่สองเป็นการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนาม เพื่อพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งในสนามและจำนวนเที่ยวรถบด การทดสอบการบดอัดในสนามดำเนินงานในโครงการก่อสร้างทางหลวง หมายเลข 224 นิคมบ้านกรวด – ต่อเขตเทศบาลตำบลละหานทราย ตอน 1 อำเภอละหานทราย, ตอน2 อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ ซึ่งเป็นการบดอัดวัสดุชั้นพื้นทางหินคลุก

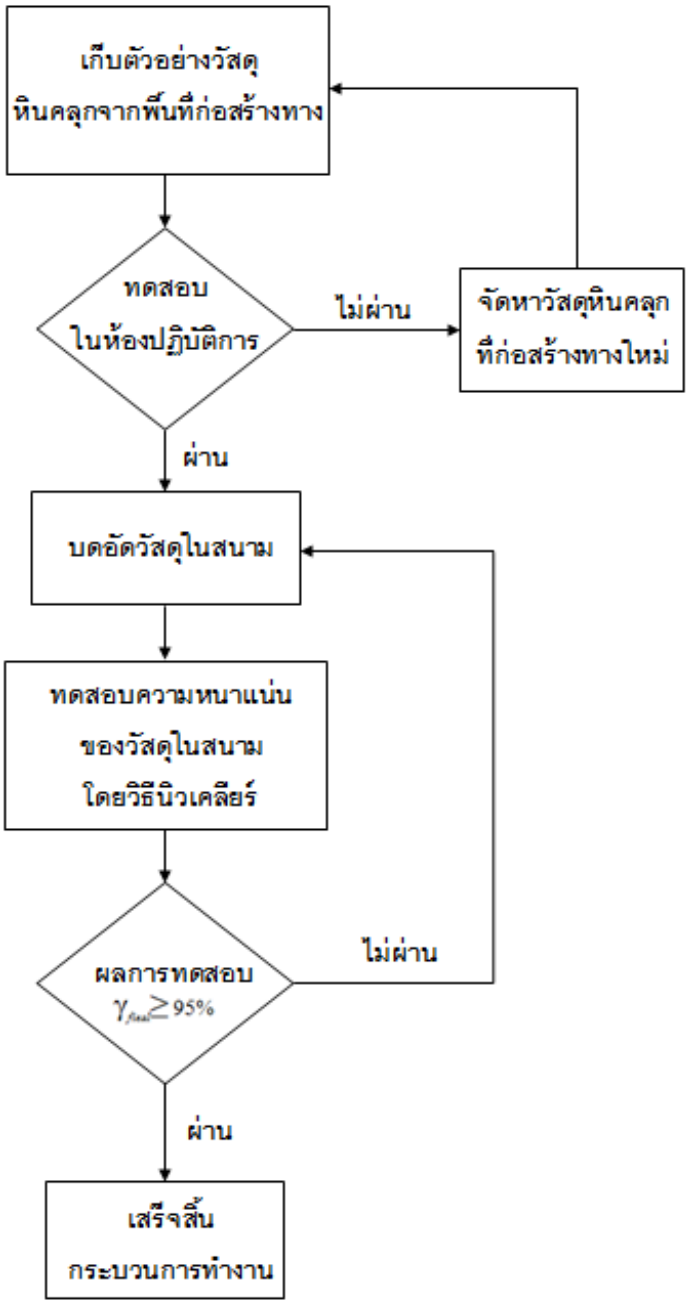
3.3 ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

วัสดุตัวอย่างที่รวบรวมมาจากงานโครงการก่อสร้างทาง ได้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานของกรมทางหลวง วัสดุตัวอย่างที่ได้จะนำมาตากให้แห้ง และแบ่งตัวอย่างให้ได้ปริมาณเพียงพอต่อการทดสอบด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่าง การทดสอบทั้งหมดกระทำตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงดังนี้

- การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง (Sieve analysis) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบ ทล.ท. 204/2516
- การทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบ ทล.ท. 108/2517
- การทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์ (C.B.R.) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบ แบบแช่น้ำ (Soaked) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบ ทล.ท. 109/2517
- การทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Coarse aggregates) โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (Los angeles abrasion) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบ ทล.ท. 202/2515

3.4 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม (Field density test) โดยวิธีการ Nuclear Method

ขั้นตอนในการทำงานบดอัดในสนาม สามารถแสดงได้ด้วยแผนผังการทำงานดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเริ่มต้นจากการคัดเลือกวัสดุและทำการทดสอบการบดอัด ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาความแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำเหมาะสม และทำการบดอัดหินคลุกในสนามให้ได้ความหนาแน่นแห้งไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ ในระหว่างการบดอัด ความหนาแน่นแห้งของหินคลุกตรวจวัดได้จากเครื่องนิวเคลียร์ ผลการตรวจวัดความหนาแน่นแห้งและจำนวนเที่ยวรถบดอัดจะนำมาใช้ในการพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนเที่ยวรถบดอัด



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการก่อสร้างชั้นพื้นทาง

บทที่ 4
การวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

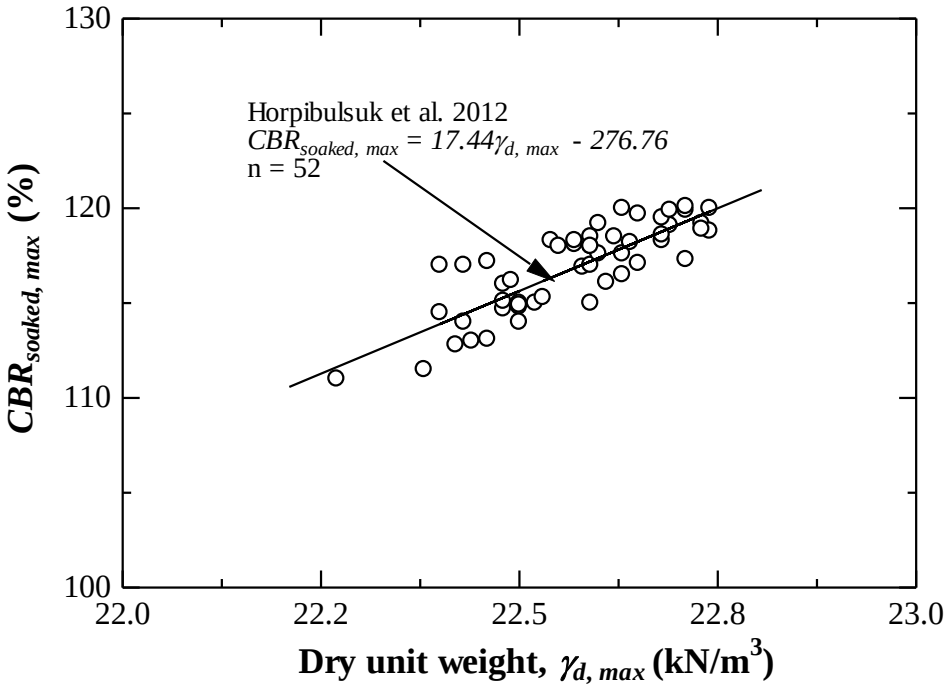
งานวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งทำการการรวบรวมข้อมูลการบดอัดและซีบีอาร์ของวัสดุหินคลุกทั้งหมด 52 โครงการ ความแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำเหมาะสมได้จากการทดสอบการบดอัดแบบ Modified compaction test ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009) ค่าซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1883 (2007) ของหินคลุกที่รวบจากแหล่งวัสดุภายในจังหวัดบุรีรัมย์ โครงการก่อสร้างทางส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำนักทางหลวงที่ 8 (นครราชสีมา) กรมทางหลวงแห่งประเทศไทยผลทดสอบนำวิเคราะห์และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุหินคลุก ส่วนที่สองเป็นศึกษาตัวแปรควบคุมที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาความแน่นในสนามของชั้นพื้นทางหินคลุกซึ่งประกอบไปด้วยความเร็วและจำนวนเที่ยวการบดอัด ความเร็วที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 1.5, 3.0 และ 6.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การทดสอบหาความแน่นในสนามของวัสดุพื้นทางหินคลุกใช้วิธีนิวเคลียร์ Nuclear method ตามมาตรฐาน ASTM D 5195-91 การทดสอบความแน่นในสนามเริ่มจากจำนวนเที่ยวที่ 5 ไปจนถึงจำนวนเที่ยวที่ 14 ผลการตรวจวัดนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งในสนามกับจำนวนเที่ยวที่ความเร็วต่างๆ การทดสอบในสนามดำเนินการที่โครงการก่อสร้างทาง ทางหลวงหมายเลข 224 ตอนต่อเขตเทศบาลตำบลละหานทราย – นิคมบ้านกรวด ตอน 1, ตอน 2 และตอน 3 อำเภอบ้านกรวดและอำเภอละหานทราย จังหวัดบุรีรัมย์ ชุดเครื่องจักรที่ใช้บดอัดชั้นพื้นทางหินคลุกในสนามประกอบไปด้วย รถบดล้อเหล็กแบบสั่นสะเทือน DYNAPAC รุ่นCA 302 ที่มีน้ำหนักล้อ (Wheel load, W) เท่ากับ 3800 กิโลปาสคาล แรงสั่นสะเทือนประมาณ 1,200 ถึง 4,000 รอบต่อนาที วิ่งตามด้วยรถบดล้อยางชนิดขับเคลื่อนด้วยตัวเอง และรถบดล้อเหล็กชนิดผิวหน้าเรียบ ท้ายสุด ผู้วิจัยจะนำเสนอแนวทางการควบคุมการบดอัดในสนามที่มีประสิทธิภาพ

4.2 ผลทดสอบและผลการวิเคราะห์

4.2.1 ผลทดสอบที่รวบรวมในห้องปฏิบัติการ

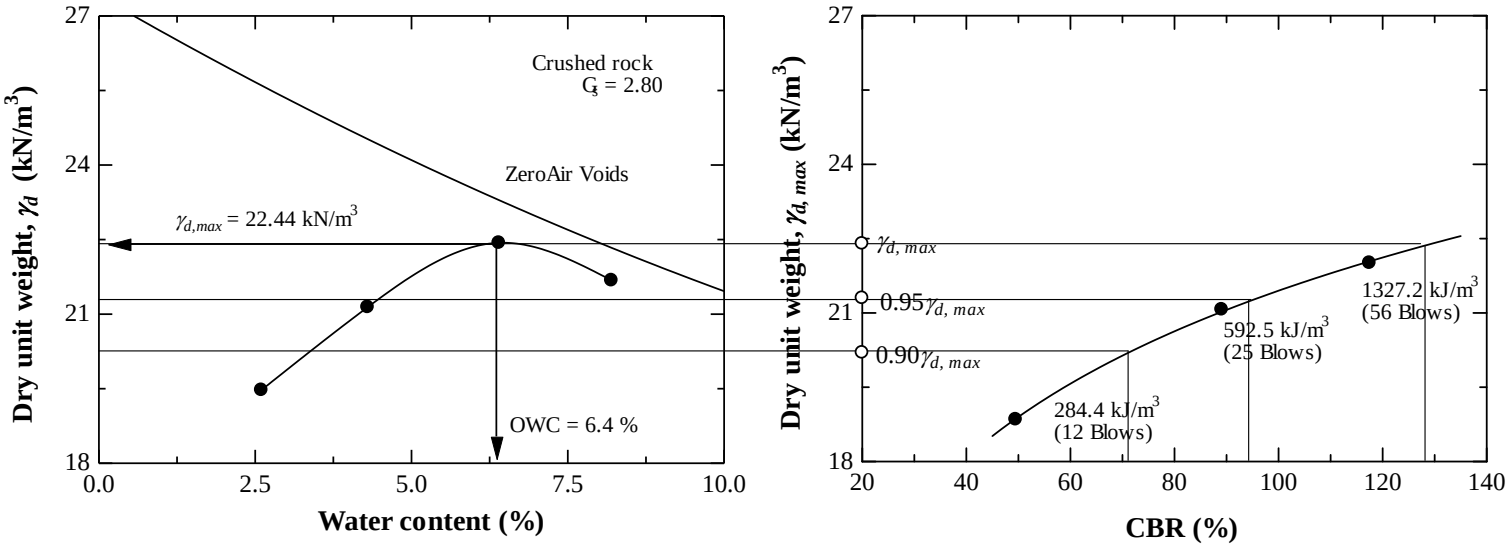
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำกับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการของหินคลุกตัวอย่างที่เก็บจากโครงการก่อสร้างทางหลวงในพื้นที่จังหวัดบุรีรัมย์ คุณสมบัติของดินแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ AASHTO แล้ว หินคลุก

ที่นำมาทดสอบจัดอยู่ในกลุ่ม A-1-a เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานเป็นตัวควบคุมกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน (Nagaraj et al., 2006 และGurtug and Sridharan, 2002) ดังนั้น ค่าซีบีอาร์ของหินคลุกจึงแปรผันตามหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำ ($CBR_{soaked, max}$) ของหินคลุกจากโรงโม่ต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในฟังก์ชั่นเชิงเส้นตรง ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถประมาณได้ด้วยความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2013) สำหรับหินคลุกที่รวบรวมจากพื้นที่เขตจังหวัดสระบุรี



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำกับความแน่นแห้งสูงสุดของชั้นทางหินคลุก

รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบการบดอัดและ CBR สำหรับหินคลุกจากโครงการก่อสร้างทางหลวงใน พื้นที่จังหวัดบุรีรัมย์ โดยที่กราฟทางซ้ายมือแสดงกราฟการบดอัด ส่วนกราฟทางขวามือแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและ CBR ของตัวอย่างที่ถูกบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดต่างๆ ที่ปริมาณความชื้นเดียวกันคือปริมาณความชื้นเหมาะสม พลังงานการบดอัดที่แตกต่างกันจำลองได้โดยการบดอัดด้วยจำนวนตกกระทบของค้อนบดอัดที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าค่า CBR มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง ในช่วงที่หน่วยร้อยละของการบดอัดมีค่าระหว่าง 90 ถึง 100



รูปที่ 4.2 ผลทดสอบการบดอัดและ CBR ของหินคลุกจากโครงการก่อสร้างทางหลวงในพื้นที่จังหวัดบุรีรัมย์

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติหินคลุกที่รวบรวม

Zone		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Grade		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
H.R.B. Classification		A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a
Sieve Analysis % Passing	50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	25	90.20	90.10	90.80	94.30	91.80	91.50	93.10	90.70	94.10	91.10	90.10	90.20	89.50	90.50	90.60	91.70	93.80	91.10
	19	79.60	79.60	78.90	76.90	78.80	78.70	77.90	82.40	77.20	78.90	79.10	78.40	70.30	69.30	77.90	78.70	76.50	79.40
	9.5	57.70	58.80	57.50	57.30	58.10	58.90	56.80	60.20	57.40	58.80	57.60	58.90	45.90	46.00	58.50	57.90	57.20	55.00
	#4	38.60	38.20	37.90	37.20	37.30	37.50	38.20	43.60	37.50	37.90	38.10	37.70	38.20	38.10	38.20	37.60	41.30	43.80
	#10	27.90	29.60	28.20	28.50	28.50	28.50	29.10	29.10	28.30	27.50	28.50	27.50	25.30	24.30	27.90	28.10	27.30	31.50
	#40	17.90	18.90	17.60	17.60	18.40	18.60	18.90	19.40	18.50	17.80	18.60	17.80	22.50	23.50	17.90	17.60	17.20	20.80
	#200	7.80	7.90	7.90	7.40	7.80	7.80	7.70	9.00	7.90	7.70	7.50	7.70	7.50	7.50	7.60	7.70	7.80	10.90
Plasticity	L.L.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.
	P.L.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.
Comp.	Opt. Mc%	6.70	6.80	6.80	6.80	6.70	6.80	6.70	6.60	6.80	6.80	6.70	6.70	7.20	7.20	6.80	6.60	7.50	7.60
DH.T.108/2517	Gd.	2.27	2.27	2.27	2.28	2.27	2.27	2.28	2.28	2.28	2.27	2.27	2.27	2.28	2.28	2.27	2.27	2.28	2.28
Lab. C.B.R.	C.B.R.	90.20	90.60	92.40	91.30	91.60	91.00	90.80	92.50	91.50	91.70	92.00	91.80	94.40	92.40	93.60	91.80	91.80	93.10
DH.T.109/2517	Swell.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A.b.r.%		19.10	19.90	19.30	20.10	19.00	19.10	20.20	20.60	19.60	19.80	19.50	18.90	23.00	20.00	19.10	19.20	22.20	25.20

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Zone		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Grade		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
H.R.B. Classification		A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a
Sieve Analysis % Passing	50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	25	90.40	94.80	90.80	90.80	91.50	90.20	92.80	90.60	90.10	94.50	91.70	90.10	90.20	90.60	93.20	90.50	94.10	96.40
	19	59.60	82.20	78.90	78.80	78.90	83.20	73.60	78.90	81.50	80.60	79.50	79.60	79.60	78.90	79.80	81.40	82.90	87.80
	9.5	37.80	60.30	57.70	58.60	57.50	56.30	54.30	57.70	58.70	60.50	57.10	58.80	57.70	57.70	61.90	61.20	60.40	55.70
	#4	37.80	38.50	37.90	37.20	38.60	45.00	41.40	37.80	39.00	44.50	39.20	38.20	38.60	37.60	41.10	40.10	39.60	46.30
	#10	28.10	21.80	28.20	28.50	28.60	31.50	30.50	28.20	28.90	25.90	29.80	29.60	27.90	28.20	31.10	25.60	28.80	32.10
	#40	19.60	17.20	17.60	17.90	17.80	21.40	21.10	18.50	19.20	14.20	19.10	18.90	17.90	18.50	23.80	12.10	14.90	16.70
	#200	8.10	6.30	7.90	7.80	7.80	11.10	7.50	7.60	9.80	6.90	9.30	7.90	7.80	7.60	7.90	6.60	6.80	5.90
Plasticity	L.L.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.
	P.L.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.
Comp.	Opt. Mc%	6.80	7.20	6.80	6.70	6.80	7.20	7.10	6.70	6.80	6.90	7.20	6.80	6.70	6.70	7.20	6.80	6.80	7.60
DH.T.108/2517	Gd.	2.27	2.28	2.27	2.27	2.27	2.28	2.28	2.27	2.27	2.27	2.28	2.27	2.27	2.27	2.28	2.29	2.29	2.29
Lab. C.B.R.	C.B.R.	90.80	93.80	92.40	91.20	91.50	92.60	91.40	91.00	92.30	93.50	91.80	90.60	90.20	90.00	93.60	96.00	98.00	96.50
DH.T.109/2517	Swell.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A.b.r.%		19.20	21.50	19.30	19.20	19.60	23.20	22.00	19.50	19.30	19.90	20.10	19.90	19.50	18.50	21.70	20.40	21.20	25.80

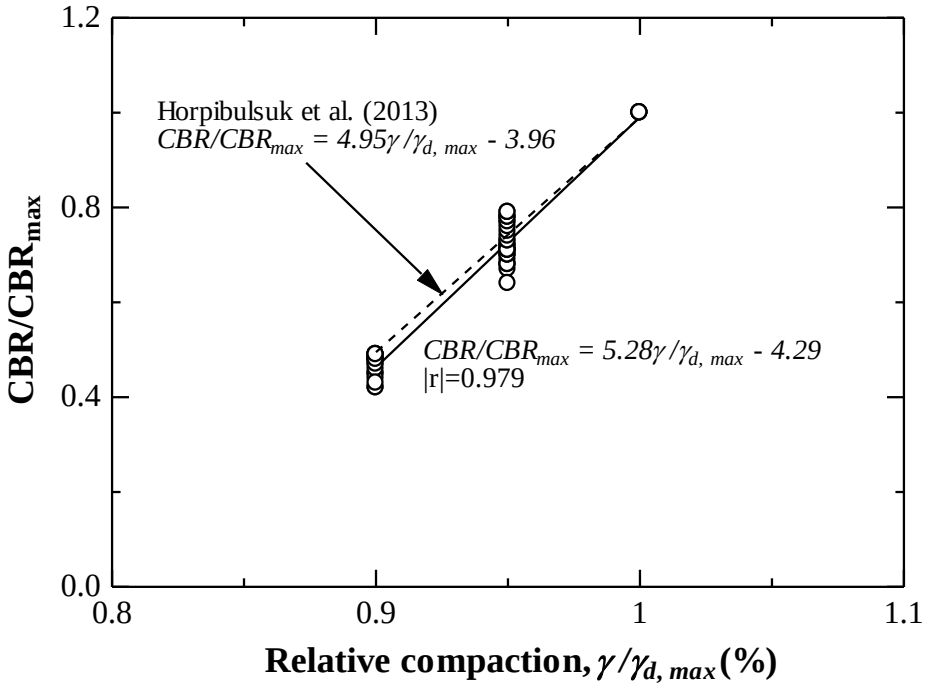
ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Zone		37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Grade		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
H.R.B. Classification		A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a
Sieve Analysis % Passing	50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	25	90.60	94.50	91.10	89.80	91.70	91.20	91.10	92.70	90.10	91.80	90.70	92.80	90.10	91.35	91.24	91.37
	19	82.80	80.60	74.00	74.20	79.20	78.90	80.50	78.90	81.50	78.50	82.10	78.20	79.30	79.53	79.78	79.20
	9.5	55.80	60.50	40.90	57.70	57.40	57.70	58.80	59.60	58.80	58.40	60.50	56.60	57.20	58.18	58.12	57.52
	#4	39.80	44.50	28.70	38.90	39.20	38.90	38.40	38.80	38.90	37.00	43.70	38.40	38.30	39.35	39.94	39.45
	#10	25.60	25.90	18.90	29.80	29.80	28.70	28.70	28.50	29.40	28.80	29.00	28.90	28.70	28.85	28.86	28.83
	#40	12.20	14.20	10.10	18.40	19.10	19.60	19.50	18.70	18.70	14.30	19.10	19.20	18.50	17.78	18.64	18.53
	#200	8.80	6.90	6.40	9.50	9.30	9.70	9.30	9.30	9.80	7.90	9.30	7.70	7.60	8.13	8.18	7.90
Plasticity	L.L.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.
	P.L.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.
Comp.	Opt. Mc%	7.80	6.80	7.00	6.90	6.90	6.90	6.20	5.90	6.70	6.80	6.70	6.60	6.80	6.73	6.71	6.71
DH.T.108/2517	Gd.	2.28	2.29	2.28	2.28	2.28	2.27	2.26	2.27	2.27	2.28	2.27	2.28	2.27	2.27	2.27	2.27
Lab. C.B.R.	C.B.R.	92.10	95.00	92.00	91.30	92.20	92.30	91.80	92.00	91.80	92.20	91.30	92.50	90.30	91.58	91.42	91.45
DH.T.109/2517	Swell.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A.b.r.%		20.20	21.70	21.60	19.70	19.00	18.90	19.20	18.70	19.50	19.10	20.00	19.60	19.60	19.58	19.69	19.62

แม้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และความหนาแน่นแห้ง แตกต่างกันตามแต่ชนิดของหินคลุก กำลังต้านทานแรงเฉือน ความคละของดิน และความต้านทานการสึกหรอ เป็นต้น แต่อัตราส่วน CBR และอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งของหินคลุกประเภทต่างๆ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เดียวกันได้ดังรูปที่ 4.3 และสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{CBR}{CBR_{\max}} = 5.28\frac{\gamma_d}{\gamma_{d,\max}} - 4.29 \qquad (4.1)$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ซึ่งมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับสมการของ Horpibulsuk et al. (2013) ที่สร้างขึ้นจากผลทดสอบของดินสามชนิดที่รวบรวมจากพื้นที่จังหวัดสระบุรี ได้แก่หินคลุก ดินลูกรัง และดินคันทาง (ดินเม็ดละเอียด) สมการดังกล่าวมีประโยชน์ต่อการประมาณค่าซีบีอาร์ที่พลังงานต่างๆ เมื่อทราบค่าอัตราส่วน $\gamma_d/\gamma_{d,\ max}$ ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR/CBR_{max} และค่า $\gamma_d/\gamma_{d,\ max}$

4.2.2 การทดสอบในสนาม

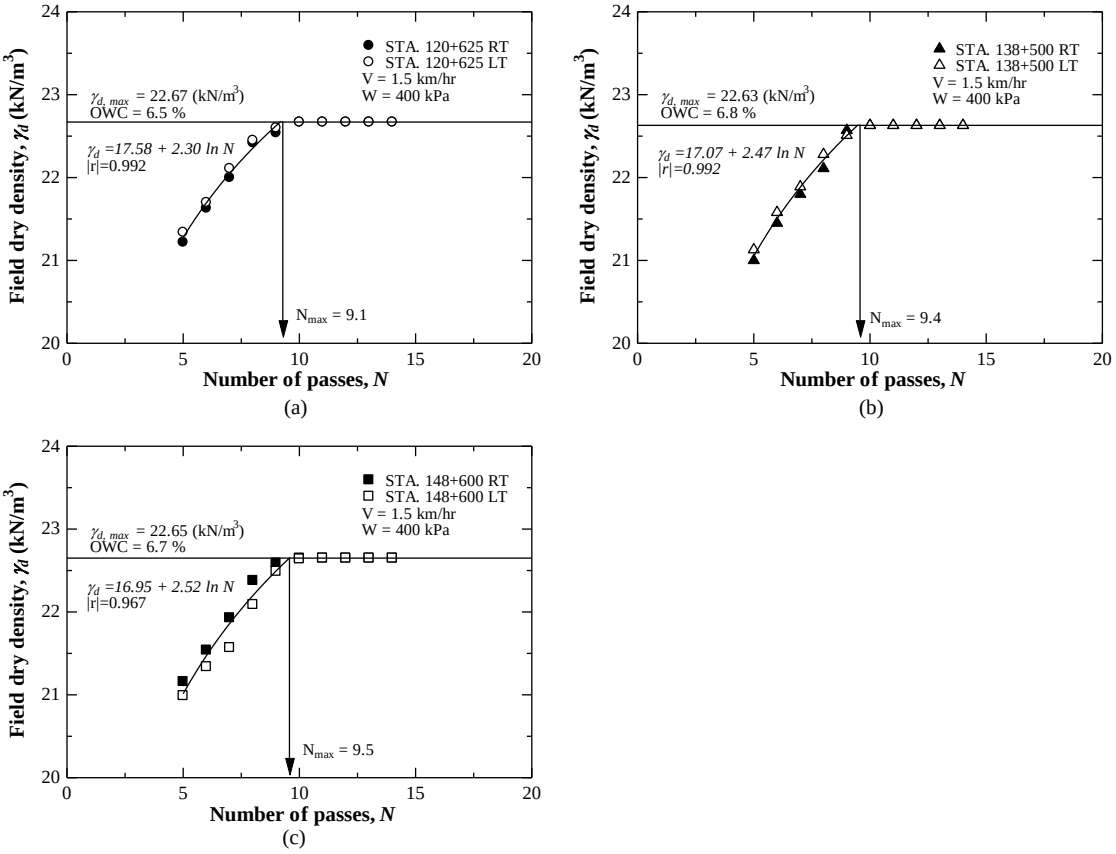
รูปที่ 4.4a ถึง 4.4c แสดงผลการตรวจวัดความหนาแน่นแห้งในสนามตามจำนวนรอบวิ่งของรถบดอัด สำหรับรถบดอัดชุดรถบดอัดที่วิ่งด้วยความเร็ว 1.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักแห้งในสนามมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงจำนวนเที่ยวที่ 6 ถึง 9 หลังจากนั้นความหนาแน่นแห้งในสนามเริ่มคงที่ แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนเที่ยวของรถบดก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งต่อจำนวนเที่ยววิ่งสามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชั่นล็อกการิทึม ดังสมการที่ (4.2)

$$\gamma_{df} = a + b \ln N \tag{4.2}$$

เมื่อ γ_{df} คือหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัดในสนาม a และ b เป็นค่าคงที่ และ N คือจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ a มีค่าเท่ากับ 17.58, 17.07 และ 16.95 และค่าคงที่ b มีค่าเท่ากับ 2.30, 2.47 และ 2.52 สำหรับแปลงศึกษาที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

จำนวนเที่ยวสูงสุด (N_{max}) ประมาณได้จากการแทนค่า $\gamma_{df,max}$ ลงในสมการที่ (4.2) ค่า N_{max} ที่ได้จากการประมาณเท่ากับ 9.1, 9.4 และ 9.5 สำหรับโครงการก่อสร้างตอนที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าจำนวนเที่ยววิ่งที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดทั้งสามแปลงศึกษาเท่ากับ 10 ซึ่งเท่ากันทั้งสามแปลงศึกษา ทั้งนี้เนื่องจากการบดอัดกระทำภายใต้สภาวะการบดอัดเดียวกัน กล่าวคือดินบดอัดเป็นดินชนิดเดียวกัน และความเร็วและน้ำหนักของเครื่องจักรที่ใช้ในการบดอัดเท่ากัน

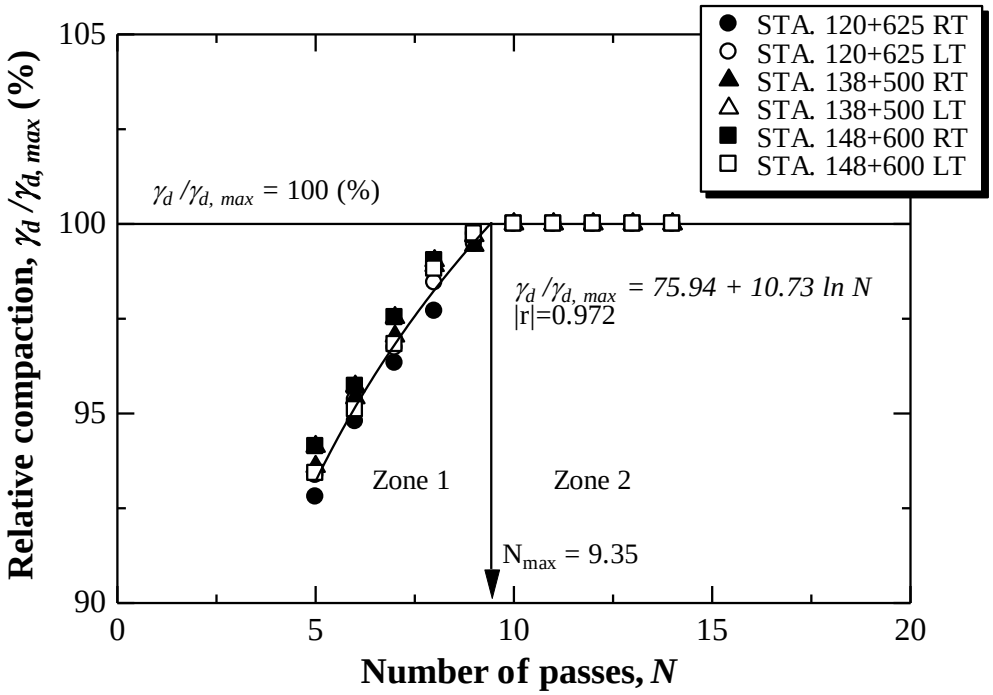
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งในสนามและความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ ($\gamma_{df}/\gamma_{d,\max}$) กับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด จะเห็นได้ว่าค่า $\gamma_{df}/\gamma_{d,\max}$ ที่จำนวนรอบที่ 9 ขึ้นไป มีค่าใกล้เคียงกับสภาวะการบดอัดแน่นที่สุด ($\gamma_{df}/\gamma_{d,\max}$ = 100%) แม้ว่าจะทำการเพิ่มพลังงานการบดอัดให้มากขึ้น (เพิ่มจำนวนเที่ยวของการบดอัด) แต่หน่วยน้ำหนักแห้งก็จะไม่สามารถเพิ่มขึ้นต่อไปได้อีก เนื่องจากระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่สภาวะนี้มีค่าใกล้เคียงกับหน่วยน้ำหนักแห้งในสภาวะไม่มีอากาศในโพรงดิน (Zero air void) ดังนั้น จำนวนเที่ยววิ่งที่มากเกินไปจึงไม่เกิดประโยชน์อันใดในทางปฏิบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างการบดอัดสัมพันธ์ (Relative compaction, $\gamma_{df}/\gamma_{d,\max}$) และจำนวนเที่ยววิ่งรถบดอัดแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงล็อกการิทึม (Horpibulsuk et al., 2013) ดังแสดงในสมการที่ (4.3)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งในสนามกับจำนวนรอบการบดอัดด้วยรถบด

$$\frac{\gamma_{df}}{\gamma_{d,\max}} = c + d \ln N \qquad (4.3)$$

เมื่อ γ_{df} คือหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัดในสนาม c และ d เป็นค่าคงที่ และ N คือจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า c และ d มีค่าเท่ากับ 75.94 และ 10.73 ตามลำดับ ค่าที่ได้ทั้งสองนี้มีความใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Horpibulsuk et al. (2013) ซึ่ง c และ d มีค่าเท่ากับ 75.92 และ 9.61 ตามลำดับ จำนวนเที่ยววิ่งที่เหมาะสมสามารถประมาณได้จากการแทนค่า N เท่ากับ 100

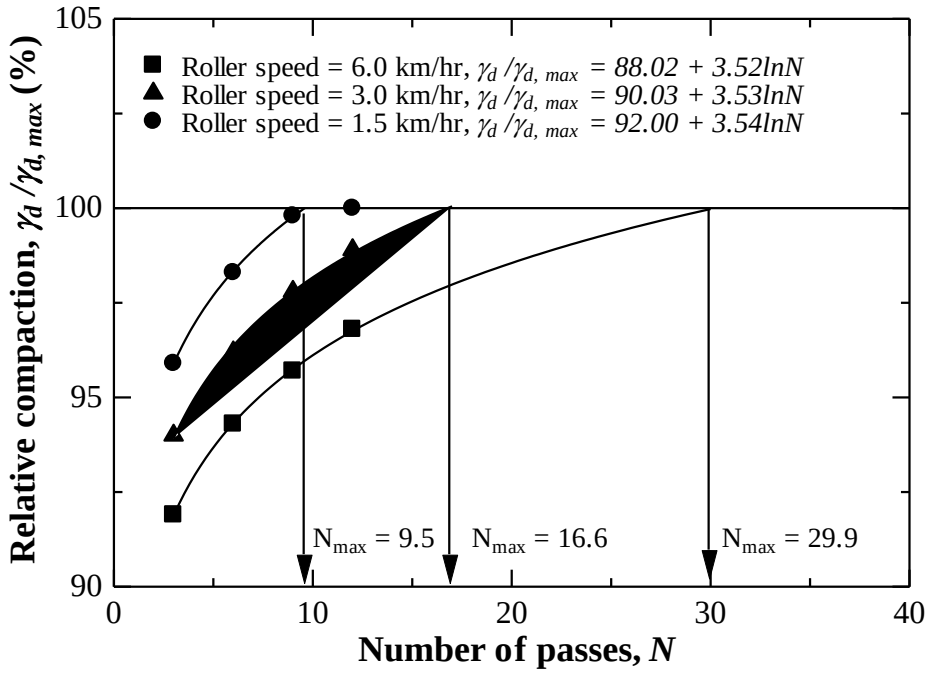


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความแน่นแห้งในสนามต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับจำนวนรอบการบดอัดด้วยรถบด

ผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาความแน่นสามารถประมาณได้ด้วยสมการเชิงล็อกกาลิทึม เมื่อทราบค่าคงที่ c และ d ซึ่งจะคงที่ สำหรับสภาวะการบดอัดเดียวกัน (ดังแสดงในรูปที่ 4.4a ถึง 4.4c)อย่างไรก็ตาม เมื่อสภาวะการบดอัดเปลี่ยนไป การพัฒนาความแน่นจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย กล่าวคือค่าคงที่ cและ d จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพลังงานการบดอัด รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความแน่นแห้งในสนามต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับจำนวนรอบการบดอัด ที่ความเร็วในการบดอัดต่างกันสามค่า (1.5, 3.0 และ 6.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าคงที่ c เท่ากับ 92.00, 90.03 และ 88.02 และค่าคงที่ d เท่ากับ 3.54, 3.53 และ 3.52 ที่ความเร็ว 1.5 3.0 และ 6.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าค่าคงที่ c แปรผันตามตามความเร็วที่ใช้ในการบดอัด อย่างไรก็ตาม ค่าคงที่ dแทบจะไม่แปรผันตามความเร็วของรถบดอัด

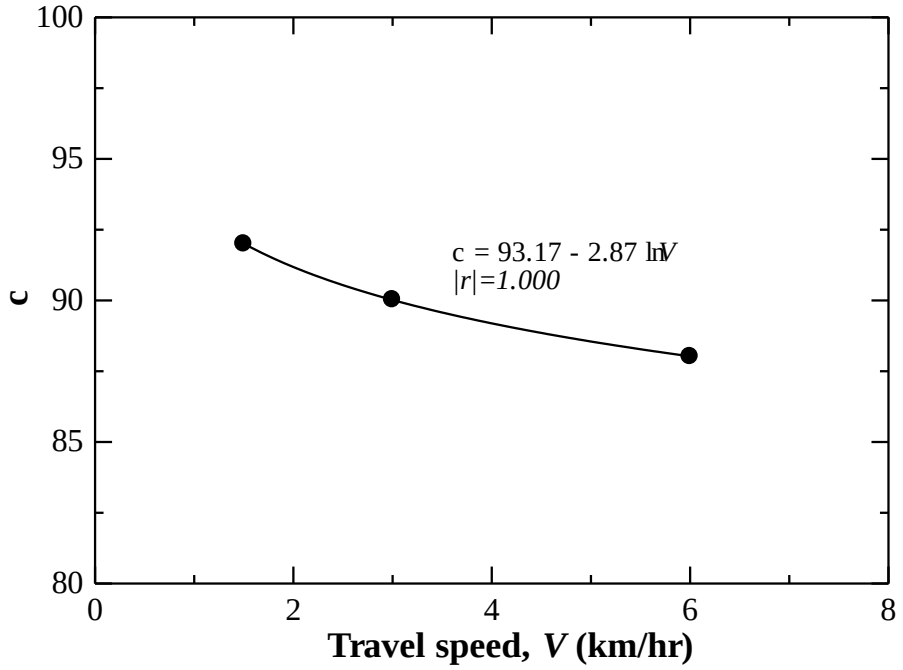
ค่า N_{max} สามารถประมาณได้เมื่อแทนค่า $\gamma_{df}/\gamma_{d,\max}$ เท่ากับ 100 ลงในสมการที่ (4.3) ค่า N_{max} ที่ประมาณได้มีค่าเท่ากับ 9.5, 16.6 และ 29.9 สำหรับความเร็วเท่ากับ 1.5, 3.0 และ 6.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบในการบดอัดเพื่อให้ได้ความหนาแน่น

แห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นตามความเร็วในการบดอัด เนื่องจากการเพิ่มความเร็วในการบดอัดส่งผลให้เกิดความเค้นสูงบริเวณใกล้กับผิวดิน แต่ในทางกลับกัน ความเค้นที่ระดับลึกกลับมีค่าต่ำ ซึ่งการลดลงของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดินจะมีแนวโน้มเป็นฟังก์ชันเส้นตรงเมื่อความเร็วในการบดอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น (Liu and Kushwaha 2012) การลดลงของความเค้นตามความลึกนี้ส่งผลต่อการพัฒนาความแน่นของดินบดอัด



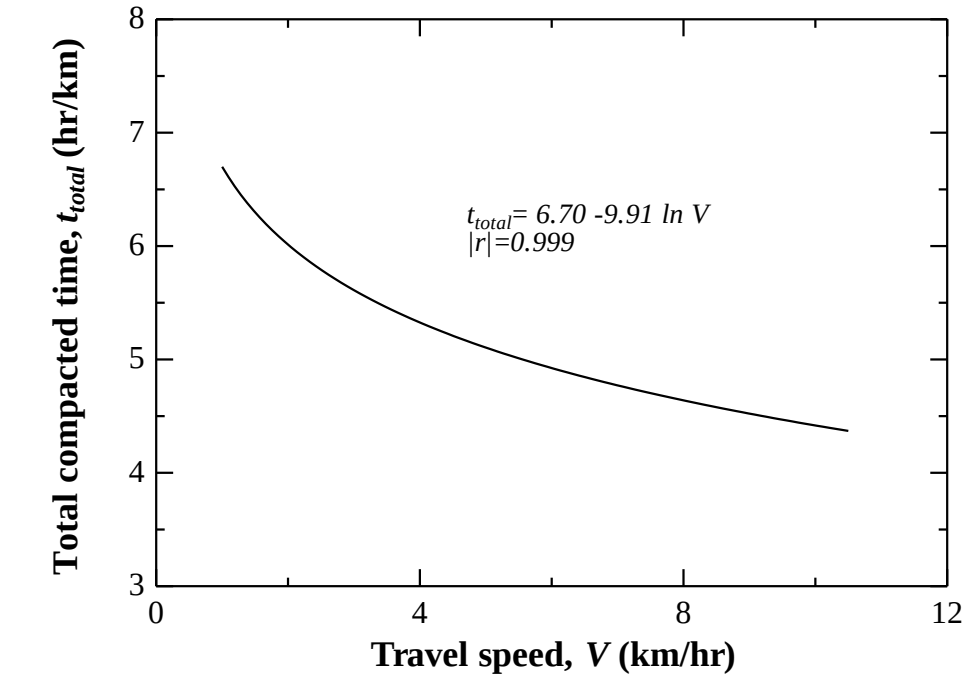
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความแน่นแห้งในสนามต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับจำนวนรอบการบดอัดด้วยรถบดที่ใช้ความต่างกัน

ผลการทดสอบการบดอัดในสนาม (รูปที่ 4.6) นำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ *c* และความเร็วได้ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งค่าคงที่ *c* มีความสัมพันธ์เป็นฟังชั่นผกผันแบบล็อกกาลิทึมกับความเร็ว ดังนั้น เมื่อความเร็วในการบดอัดเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ *c* จะลดลง ระยะเวลาที่ใช้ในการบดอัดทั้งหมดสามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่าความเร็ว บนสมมติฐานที่ว่าการบดอัดแต่ละรอบใช้ความเร็วคงที่ในการบดอัด

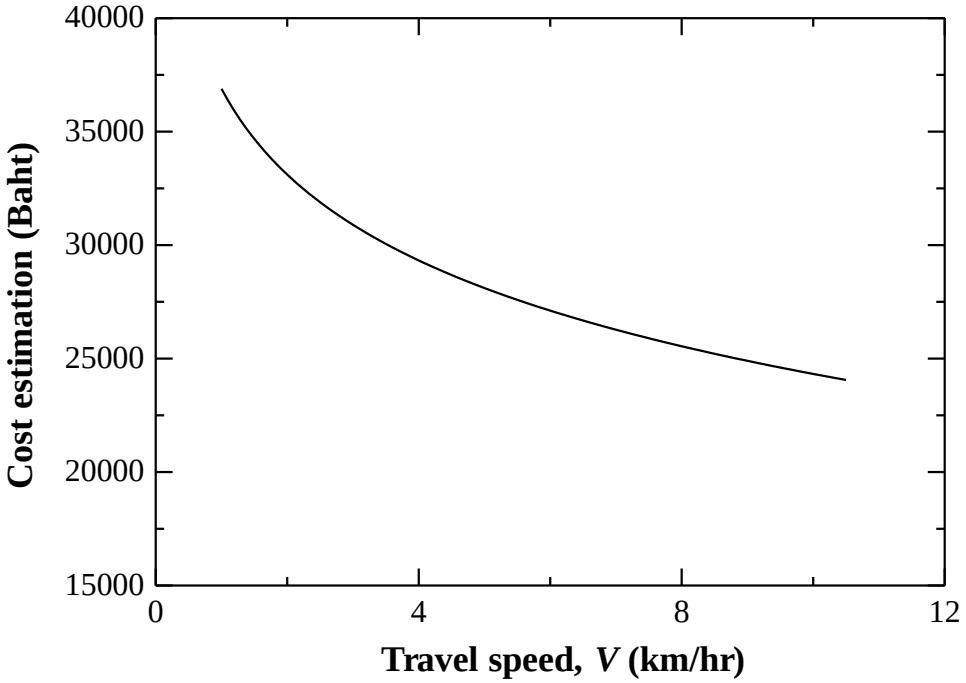


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ c และความเร็วการบดอัด

รูปที่ 4.8a แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับความเร็วของรถบดอัด ระยะเวลาที่ใช้ในการบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดคำนวณได้จาก N_{max}/V โดยค่า N_{max} ที่ความเร็วใดๆ คำนวณได้จากสมการที่ (4.3) เมื่อกำหนดให้ $\gamma_{df}/\gamma_{df,\,max} = 100$ ค่าคงที่ c คำนวณได้จากรูปที่ 4.7 เมื่อทราบค่าความเร็วที่ใช้ในการบดอัด ค่าคงที่ d มีค่าประมาณคงที่เท่ากับ 3.53 สำหรับวัสดุหินคลุก ระยะเวลาบดอัดที่ประมาณจากความเร็วบดอัดแสดงในรูปที่ 4.8a ระยะเวลาที่ใช้ในการบดอัดมีค่าลดลงเป็นฟังก์ชั่นล็อกกาลิทึม เมื่อความเร็วในการบดอัดมีค่าสูงขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการบดอัดเพื่อให้ได้ความแน่นแห้งสูงสุดในสนามลดลง แม้ว่าจำนวนเที่ยวในการบดอัดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าเช่าเครื่องจักรต่อชั่วโมงเทียบกับความเร็วในการบดอัด การบดอัดที่ใช้ความเร็วสูงจะมีผลให้ราคาค่าเช่าเครื่องจักรต่อชั่วโมงต่ำกว่าการบดอัดที่ใช้ความเร็วต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 4.8b ความเร็วที่ใช้ในการบดอัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าเช่าเครื่องจักรต่อชั่วโมงมีค่าลดลง



(a)



(b)

รูปที่ 4.8a และ 4.8b ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ใช้ในการบดอัดจนได้

ความแน่นแห้งสูงสุดในสนาม และความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับค่าเช่าเครื่องจักร

บทที่ 5
สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผล

จากการทดสอบวัสดุพื้นทางหินคลุกทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม ดังที่ได้วิเคราะห์ผลทดสอบคุณสมบัติของวัสดุหินคลุก แล้วสามารถนำมาสรุปผลการทดสอบวัสดุได้ดังนี้

1. ค่าซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ สอดคล้องกับสมการที่แนะนำโดย Horpibulsuk et al.2013
2. ค่าคงที่ cในสมการเชิงล็อกกาลิทึมที่นำเสนอโดย Horpibulsuk et al.2013 มีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วที่ใช้ในการบดอัด ส่งผลให้ที่ความเร็วต่างกัน พฤติกรรมการพัฒนาความแน่นของหินคลุกมีลักษณะต่างกันการใช้ความเร็วต่ำในการบดอัดจะใช้จำนวนเที่ยวในการบดอัดหินคลุกให้ได้ความแน่นแห้งสูงสุดในสนามต่ำกว่าการใช้ความเร็วสูงในการบดอัด
3. ความเร็วและจำนวนรอบการบดอัดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งแบบโพลีโนเมียลกำลังสองที่มีค่า degree of correlation สูงถึง 0.999 สำหรับการบดอัดชั้นพื้นทางหินคลุก
4. การเพิ่มความเร็วในการบดอัดช่วยลดระยะเวลาในการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ซึ่งมีผลให้ค่าเช่าเครื่องจักรในการบดอัดลดลง ความเร็วประมาณ 8 ถึง 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นค่าที่เหมาะสมในการบดอัดในสนาม

เอกสารอ้างอิง

สุขสันติ์ หอพิบูลสุข.(2545).**ลักษณะการอัดตัวของดินตะกอนปนดินตะกอน ปนดินเหนียวบดอัดที่ด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น.** ปฐพีกลศาสตร์. หน้า 240

สุขสันติ์ หอพิบูลสุข.(2545).**ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัด.**ปฐพีกลศาสตร์. หน้า 241

รุ้งลาวัลย์ ราชัน และ สุขสันติ์ หอพิบูลสุข.**ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและพลังงานการบดอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนและหินคลุกและเส้น Normalization.** ปฐพีกลศาสตร์. หน้า 243

รุ้งลาวัลย์ ราชัน และ สุขสันติ์ หอพิบูลสุข.(2548). **เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลการทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน.** ปฐพีกลศาสตร์. หน้า 248

โภคินทร์ ช้ำเกต. (2554). การศึกษาการบดอัดดินและค่าซีบีอาร์ของดินเม็ดละเอียด ลูกรัง หินคลุก. **วิทยานิพนธ์ปริญญาศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**

Proctor.(1930). **ทฤษฎีการบดอัดดิน.** ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ คีรีรัตน์. หน้า 738 – 739

Hogentogler.(1936). **ทฤษฎีบดอัดดิน.** ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ คีรีรัตน์. หน้า 739 – 740

Buchanan.(1942). **ทฤษฎีบดอัดดิน.** ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ คีรีรัตน์. หน้า 740 – 741

Hilf.(1956). **ทฤษฎีบดอัดดิน.** ปฐพีกลศาสตร์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ คีรีรัตน์. หน้า 741 – 742

Lambe.(1985).**ทฤษฎีบดอัดดิน.** ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ คีรีรัตน์. หน้า 742– 743

สำนักวิเคราะห์ และตรวจสอบ.(2544).**มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก.** ทล.ม. 201/2544 กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ และตรวจสอบ.(2516). **มาตรฐานวิธีทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ.** ทล.ท. 204/2516 กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ และตรวจสอบ. (2515). **มาตรฐานวิธีทดสอบหาความสึกหรอของCoarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion**. ทล.ท. 202/2515 กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ และตรวจสอบ.(2517). **มาตรฐานวิธีทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน.** ทล.ท. 108/2517 กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์ และตรวจสอบ.(2517). **มาตรฐานวิธีทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์.** ทล.ท. 109/2517 กรมทางหลวง

Gurtug, Y and Sridharan, A. (2002). **Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils", Geotechnigue**. vol.52, No.10, pp.761-763

Horpibulsuk, s., Miura, N, Nagaraj, T.S. (2005). **Clay-Water Cement ration identity of cement and mixed soft clay**. Journal of Geotechnical and Geoenviroment Engineering, ASCE, vol.131, No.2 (in press)

Johnson, A.W. and Sallberg, J.R. (1960). **Factors Hat influence field compaction of soil.** Bulletin No.272, High survey research board, 206p.

Lambe, T.W. (1962). **Soil stabilization", Chapter 4 of foundation engineering**. G.A. Leonard (ed.), McGraw Hill, New York.

Lee, P.Y. and Suedkamp, R.J. (1972). **Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils.**Highway research record No.381, National academic of sciences, Washington D.C., pp.1-9.

Zhong Wu, Zhongjie Zhang, Mingjiang Tao., 2010. **"Stabilizing blended calcium sulfate materials for roadway base construction"** Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 10, Pages 1861-1868

Y.J. Jiang, L.F. Fan., 2013. **"An investigation of mechanical behavior of cement-stabilized crushed rock material using different compaction methods"** Construction and Building Materials, Volume 48, Pages 508-515

Peng Zhang, Chen-hui Liu, Qing-fu Li, Tian-hang Zhang., 2013. **"Effect of polypropylene fiber on fracture properties of cement treated crushed rock"** Composites Part B: Engineering, Volume 55, Pages 48-54

A. Moropoulou, A.S. Cakmak, G. Biscontin, A. Bakolas, E. Zendri., 2002. **"Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia"** *Construction and Building Materials*, Volume 16, Issue 8, December, Pages 543-552

SuksunHorpibulsuk, ApichatSuddeepong, PokinChamket, AvirutChinkulkijniwat., 2013.

"Compaction behavior of fine-grained soils, lateritic soils and crushed rocks" Soils and Foundations, Volume 53, Issue 1, Pages 166-172

Smith, D.L.O., Dickson, J.W., 1990. **Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction.** Journal of Agricultural Engineering Research 46, 13–29.

Raper, R.L., Reeves, D.W., 2007**.In-Row subsoiling and controlled traffic effects on coastal plain soils**.Transactions of the ASABE 50 (4), 1109–1115, ISSN 0001-2351.

Patel, S.K., Mani, I., 2011. **Effect of multiple passes of tractor with varying normal load on subsoil compaction**. Journal of Terramechanics 48, 277–284.

Hamid Taghavifar, ArefMardani. 2013 **"Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction"** *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, In Press, Corrected Proof, Available online 30 January

Nagaraj, T.S., Lutenegger, A.J., Pandian, N.S., Manoj, M., 2006. **Rapid estimation of compaction parameters for field control**.Geotechnical Testing Journal, ASTM 29 (6), 1–10.

Gurtug, Y., Sridharan, A., 2002. **Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils**.Geotechnique 52 (10), 761–763.

Jude Liu, Radhey L. Kushwaha., 2012. **"Effect of travel speed and vertical load on the subsoil force and displacement under a smooth steel roller"** Journal of Terramechanics, Volume 49, Issue 5, Pages 263-270

ภาคผนวก
ข้อมูลตารางค่าใช้จ่ายเครื่องจักรบดอัด

ตารางที่ ภ 1 มาตรฐานค่าใช้จ่ายเครื่องจักรกลต่อชั่วโมงของกรมทางหลวง (Appendix)

ลำดับที่	ชนิดของเครื่องจักรกล (Types of Equipment)	(Size/HP.)	(Year of Useful Life) (ปี)	(Delivered Prices) (บาท)	(Owning Cost) (Investment Cost) (บาท/ชม.)	(Depreciation Cost) (บาท/ชม.)	Total Owning Cost (บาท/ชม.)	(Operating Cost) (Repair Cost) (บาท/ชม.)	(Fuel Cost) (ลิตร/ชม.)	(Fuel Cost) (บาท/ชม.)	(Maintenance Cost) (บาท/ชม.)	(Tires Cost) (บาท/ชม.)	(Operator Wage) (บาท/ชม.)	รวมค่าใช้จ่าย งานจัดทำเอง (บาท/ชม.)	รวมค่าใช้จ่าย งานจ้างเหมา (บาท/ชม.)
1	รถเกลี่ยดิน	140-160	10	4,000,000	12.80	160.00	172.80	146.07	23.87	715.86	107.38	16.50	55.00	985.81	1,213.61
2	รถบดล้อเหล็กสั่นสะเทือน	100-120	10	2,200,000	7.04	88.00	95.04	288.39	15.40	461.85	69.28	0.00	40.00	819.51	954.55
3	รถบดล้อเหล็กแบบเดินตาม	5-15	10	350,000	1.12	14.00	15.12	32.77	0.77	23.09	3.46	0.00	40.00	59.33	114.45
4	รถแทรคเตอร์ล้อยาง	80-100	10	1,200,000	3.84	48.00	51.84	28.09	13.09	392.57	58.89	9.00	40.00	488.54	580.38
5	รถบดล้อยางขับเคลื่อนตัวเอง	70-90	10	1,800,000	5.76	72.00	77.76	94.04	12.32	369.48	55.42	6.60	40.00	525.54	643.30
														รวมทั้งสิ้น	3506.29

ประวัติผู้เขียน

นายนิติ พันธุ์โอภาส เกิดวันที่ 6 พฤษภาคม 2528 ที่อำเภอบัวใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นที่ โรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัย ชัยภูมิ จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) แผนกวิชาช่างก่อสร้าง ที่วิทยาลัยเทคนิคชัยภูมิ จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรชั้นสูง (ปวส.) แผนกวิชาช่างโยธา ที่สถาบันเทคโนโลยี ราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

ปัจจุบันปฏิบัติงานในตำแหน่งนายช่างโยธาปฏิบัติงาน แขวงการทางบุรีรัมย์ สำนักทางหลวงที่ 8 กรมทางหลวง ระหว่างปฏิบัติงานมีความสนใจในงานด้านวิศวกรรมงานทางและการบริหารงานโครางการ ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท เพื่อพัฒนาความรู้ความสามารถ และกรมทางหลวงได้สนับสนุนทุนการศึกษา จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปี พ.ศ. 2554