

อิทธิพลของความเร็วและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดต่อความแน่นแข็ง
ในสนามของวัสดุชั้นทางดินลูกรัง

นายสามารถ พงษ์วิมลสวัสดิ์

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

อิทธิพลของความเร็วและจำนวนเที่ยววิ่งของรถต่อความแน่นแฟ้น
ในสนามของวัดคู่ชั้นทางดินลูกรัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

(รศ. ดร. วรภูมิ เบญจโอฬาร)
ประธานกรรมการ

(ศ. ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(ผศ. ดร. ปรีชาพร โภษา)
กรรมการ

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

สามารถ พงษ์วิมลสวัสดิ์ : อิทธิพลของความเร็วและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดต่อความแน่นแห้งในสนามของวัสดุชั้นทางดินลูกรัง (INFLUENCE OF VELOCITY AND NUMBER OF ROLLER PASSES ON FIELD DRY DENSITY OF LATERITIC SOIL SUBBASE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดต่อความแน่นแห้งในสนามของวัสดุชั้นทางดินลูกรัง ซึ่งดำเนินการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 12 สาย กาฬสินธุ์-อ.สมเด็จ ตอน 1 สำนักทางหลวงทางที่ 3 กรมทางหลวง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นแห้งในสนามของวัสดุชั้นลูกรังเพิ่มขึ้นตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดในฟังก์ชันสี่เอกการิทึม สำหรับความเร็วรถบดอัดที่ทำการทดสอบ (6.0 และ 11.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) เมื่อบดอัดจนได้ความแน่นแห้งในสนามใกล้เคียงความแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการแล้ว แม้ว่าจะมีการเพิ่มเที่ยววิ่งรถบดอัดความแน่นแห้งในสนามเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยยะ เนื่องจากระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่สถานะนี้มีค่าใกล้เคียงกับระดับอิ่มตัวด้วยน้ำที่สถานะไม่มีอากาศในโพรงดิน (Zero air void) ในระยะทาง 1 กิโลเมตรเท่ากัน การบดอัดด้วยความเร็ว 6.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจะใช้จำนวนเที่ยว 11 เที่ยว ในเวลา 110 นาที และค่าใช้จ่ายเช่ารถบดอัดเป็นเงิน 6,427 บาท เพื่อให้ได้ความแน่นแห้งสูงสุดในขณะที่การบดอัดด้วยความเร็ว 11.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจะใช้จำนวนเที่ยว 23 เที่ยว ในเวลา 125.4 นาที และมีค่าใช้จ่ายเช่ารถบดอัดเป็นเงิน 7,327 บาท ค่าใช้จ่ายในการบดอัดด้วยความเร็ว 6.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการบดอัดด้วยความเร็ว 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ถึงร้อยละ 15.57 และใช้เวลาในการบดอัดน้อยกว่าถึงร้อยละ 13.63 ดังนั้น การบดอัดด้วยความเร็ว 6.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีข้อได้เปรียบทั้งในด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SAMART PONGWIMONSAWAT : INFLUENCE OF VELOCITY AND
NUMBER OF ROLLER PASSES ON FIELD DRY DENSITY OF
LATERITIC SOIL SUBBASE. ADVISOR : PROF. SUKSUN
HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

This research studies the influence of velocity and number of roller passes on the field dry density of a lateritic subbase at a construction project on Highway No. 12 Kalasin – Somdat district 1, Bureau of Highway 3, Department of Highways. The study shows that the field dry density of the compacted subbase increases with increasing number of roller pass in logarithmic function for both test roller velocities of 6 and 11 km/hr. When the field dry density is close to the laboratory maximum dry density, the field dry density insignificantly increases even with increasing number of roller passes. This is because the degree of saturation is very close to that at zero air void state. For the same 1 km of compaction, the compaction with 6 km/hr needs 11 number of roller passes in 110 minutes and costs 6427 baht of roller rental to meet the field maximum dry density whereas the compaction with 11 km/hr needs 23 number of roller passes in 125.4 minutes and costs 7327 baht of roller rental. The rental and compaction time for 6 km/hr velocity is 15.57% and 13.63 lower than those for 11 km/hr, respectively. Consequently, the compaction with 6 km/hr is advantage both in term of engineering and economical perspectives.

School of Civil Engineering
Academic Year 2013

Student's Signature _____
Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ประสบความสำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ ให้คำปรึกษาในด้านวิชาการและด้านการดำเนินโครงการในครั้งนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่คอยชี้แนะแนวทางการทำโครงการ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจนทำให้โครงการเล่มนี้สมบูรณ์ ผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณประธานกรรมการสอบโครงการ และกรรมการทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาแก่ข้าพเจ้า และขอบคุณเจ้าหน้าที่มหาวิทยาลัย ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการศึกษาและการทำโครงการมหัศจรรย์ของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบริษัทประชาพัฒน์และเจ้าหน้าที่โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 12 สายกาฬสินธุ์ – อ.สมเด็จ ตอน 1 กรมทางหลวง ที่ให้ข้อมูลและให้ความช่วยเหลือสนับสนุนเครื่องจักรที่ใช้ในการทำโครงการของข้าพเจ้าในครั้งนี้

ขอขอบคุณนายชาญ เพ็ญทอง นายช่างโครงการฯ ที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษารวมทั้งที่พักอาศัยและอาหารตลอดช่วงเวลาที่เข้าไปเก็บข้อมูลงานสนาม และข้อมูลวัสดุโครงการฯ

ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่น้องบัณฑิตศึกษาหลักสูตรบริหารงานก่อสร้างและสาธาณูปโภคทุกท่านที่ช่วยเหลือหาข้อมูลในการทำวิจัยและมีส่วนร่วมในการทำโครงการครั้งนี้

สุดท้ายผู้วิจัย ระลึกถึงพระคุณอย่างสูง บิดามารดา ผู้ให้กำเนิดและผู้อบรมเลี้ยงดู รวมทั้งภรรยา บิดา มารดาของภรรยาที่คอยให้กำลังใจที่ดีเสมอมา จนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สามารถ พงษ์วิมลสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรีทัศน์ วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930).....	3
2.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hogentogler (1936).....	4
2.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (1942).....	6
2.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956).....	7
2.6 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985).....	8
2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve).....	9
2.7.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน.....	11
2.7.2 ชนิดของดิน.....	11
2.8 พลังงานการบดอัด.....	14
2.9 การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม.....	16
2.10 ปรัชญาการบดอัดงานเขื่อนและงานถนน.....	20
2.11 การทำนายกราฟการบดอัด.....	20

2.12	มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุรวม (Soil-Aggregate Subbase) (ทล.-ม. 205/2532)	33
2.12.1	ขอบข่าย	33
2.12.2	คุณสมบัติ	33
2.13	วิธีการทดสอบหาค่า Liquid Limit (L.L.) : การทดลองที่ ทล.-ท. 102/2515	34
2.13.1	ขอบข่าย	34
2.13.2	นิยาม	34
2.13.3	วิธีทำ	34
2.13.4	การเตรียมตัวอย่าง	35
2.13.5	การทดสอบ	35
2.13.6	การคำนวณ	37
2.13.7	การรายงาน	37
2.13.8	ข้อควรระวัง	37
2.14	วิธีการทดสอบหาค่า Plastic Limit (P.L.) และ Plastic Index (P.I.) ของดิน : การทดลองที่ ทล.-ท. 103/2515	38
2.14.1	ขอบข่าย	38
2.14.2	นิยาม	38
2.14.3	วิธีทำ	38
2.14.4	การเตรียมตัวอย่าง	39
2.14.5	การทดสอบ	39
2.14.6	การคำนวณ	40
2.14.7	การรายงาน	40
2.14.8	ข้อควรระวัง	40
2.15	วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง : การทดลองที่ทล.-ท. 205/2517	41
2.15.1	ขอบข่าย	41
2.15.2	คุณสมบัติ	41
2.15.3	วิธีทำ	41
2.15.4	การเตรียมตัวอย่าง	42
2.15.5	การทดสอบ	42
2.15.6	การคำนวณ	43
2.15.7	การรายงาน	44
2.15.8	ข้อควรระวัง	44

2.16	วิธีการทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน :	
	การทดลองที่ ทล.-ท.108/2517.....	45
	2.16.1 ขอบข่าย.....	45
	2.16.2 วิธีทำ.....	45
	2.16.3 การเตรียมตัวอย่าง.....	47
	2.16.4 การทดสอบ.....	47
	2.16.5 การคำนวณ.....	48
	2.16.6 การรายงาน.....	49
	2.16.7 ข้อควรระวัง.....	49
2.17	วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า C.B.R. : การทดลองที่ ทล.-ท. 109/2517	50
	2.17.1 ขอบข่าย.....	50
	2.17.2 วิธีทำ.....	50
	2.17.3 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดสอบ.....	52
	2.17.4 การเตรียมตัวอย่าง.....	52
	2.17.5 การทดสอบ.....	52
	2.17.6 การคำนวณ.....	54
	2.17.7 การรายงาน.....	56
	2.17.8 ข้อควรระวัง.....	56
2.18	วิธีการทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย	
	(field density test) : การทดลองที่ ทล.-ท. 603/2517.....	57
	2.18.1 ขอบข่าย.....	57
	2.18.2 วิธีทำ.....	57
	2.18.3 การทดสอบ.....	59
	2.18.4 การคำนวณ.....	61
	2.18.5 การรายงาน.....	63
	2.18.6 ข้อควรระวัง.....	63
2.19	การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนามโดย	
	วิธี Nuclear Gauge.....	63
	2.19.1 หลักการทั่วไปของเครื่องมือ Nuclear Gauge.....	63
	2.19.2 วิธีการทดสอบหาค่าความชื้นในวัสดุชั้นทาง.....	68

2.19.3	วิธีการวัดแบบ Thin Layer	71
2.19.4	ส่วนประกอบของชุดวัดความชื้นและความหนาแน่น	72
2.19.5	การเตรียมใช้เครื่องมือ	73
2.20	การก่อสร้างและการบดอัด ชั้น โครงสร้างทาง	81
2.20.1	งานชั้นดินถมคันทาง	81
2.20.2	งานชั้นวัสดุคัดเลือก ก. (Selected Material A)	81
2.20.3	งานชั้นรองพื้นทาง (Subbase)	82
2.20.4	งานพื้นทาง (base)	84
2.21	เครื่องจักรกลที่ใช้บดอัดดินในสนาม	85
2.21.1	รถบดล้อเรียบ	85
2.21.2	รถบดล้อยาง	86
2.21.3	รถบดตีนแกะ	86
2.21.4	รถบดอัดแบบสันสะเทือน	87
3	วิธีดำเนินการทำโครงการ	90
3.1	บทนำ	90
3.2	แผนงานดำเนินการ	90
3.3	ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	90
3.4	การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม (field density test) โดยวิธีการ Nuclear Method	91
4	ผลทดลองและวิจารณ์ผล	94
4.1	บทนำ	94
4.2	วิธีดำเนินการทำวิจัย	94
4.3	ผลทดสอบและผลการวิเคราะห์	95
5	สรุป และข้อเสนอแนะ	102
5.1	สรุปผลการทดสอบ	102
5.2	ข้อเสนอแนะ	103
	เอกสารอ้างอิง	104
	ประวัติผู้เขียน	106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดคละของรองพื้นทางวัสดุรวม.....	33
2.2 สำหรับหินย่อย.....	42
2.3 สำหรับ Soil Aggregate.....	43
2.4 น้ำหนักมาตรฐานตากการกดท่อนเหล็กขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้วของวัสดุหินคลุก....	55
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความแน่นของน้ำ.....	59
4.1 มาตรฐานค่าใช้จ่ายเครื่องจักรกลต่อชั่วโมงของกรมทางหลวงชนบท.....	100
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว เวลาและราคาเช่าเครื่องจักร.....	101

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve).....	3
2.2 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ.....	4
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Hogentogler.....	5
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น นำเสนอโดย Buchanan.....	7
2.5 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอโดย Hilf.....	8
2.6 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน.....	9
2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve).....	10
2.8 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่าง ๆ.....	12
2.9 กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่าง ๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Horpibulsuk et al., 2005).....	13
2.10 อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg. 1960).....	14
2.11 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (Horpibulsuk et al., 2004).....	16
2.12 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (Lambe, 1962).....	17
2.13 ลักษณะการอัดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวบดอัดที่ด้านแห้งและด้านเปียก ของปริมาณ ความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ปริมาณความชื้น (สุขสันต์, 2545).....	18
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัด.....	19
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินลูกรังบดอัด.....	19
2.16 กราฟการบดอัด Ohio (ปรับปรุงจาก Joslin, 1959).....	21
2.17 แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด (Nagaraj et al., 2006).....	21
2.18 (a) กราฟการบดอัด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับความ อิ่มตัวด้วยน้ำของดินเหนียวปนดินตะกอน (Horpibulsuk et al., 2008a).....	23
2.19 (a) กราฟการบดอัด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระดับ ความ อิ่มตัวด้วยน้ำของกรวดที่ขนาดคละดี (Horpibulsuk et al., 2009a).....	24

2.20	อิทธิพลของ Ad และ Aw ต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008a)	25
2.21	อิทธิพลของ Bd และ Bw ต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008a)	26
2.22	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสม อัตราส่วนปริมาณความชื้นเหมาะสม และพลังงานการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2009a)	27
2.23	เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียว (ข้อมูลจาก Proctor, 1948) (Horpibulsuk et al., 2008a)	29
2.24	เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของ Red earth (ข้อมูลจาก US Army Corps of Engineers, 1970) (Horpibulsuk et al., 2008a)	29
2.25	เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปน ดินตะกอน (ข้อมูลจาก Turnbull and Foster, 1956) (Horpibulsuk et al., 2008a)	30
2.26	เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินลูกรัง (ข้อมูลจาก Horpibulsuk et al., 2004c) (Horpibulsuk et al., 2009a)	30
2.27	เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของกรวดปนดินเหนียว (ข้อมูลจาก Ruenkrairergsa, 1982) (Horpibulsuk et al., 2009a)	31
2.28	กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a)	31
2.29	กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a)	32
2.30	กราฟ Ohio ปรับปรุงสำหรับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Horpibulsuk et al., 2008a)	32
2.31	รูปแบบของการจัดระบบการวัดสำหรับการกระเจิงกลับของรังสีกับวัตถุเทียบได้กับการใช้เครื่องมือวัดในการวัดแบบ backscatter	65
2.32	รูปแบบของการจัดระบบการวัดสำหรับการใช้รังสีส่งผ่านวัตถุเทียบได้กับการใช้เครื่องมือวัดในการวัดแบบ direct transmission	66
2.33	รูปร่างลักษณะของเครื่องมือและตำแหน่งของ source rod positions ในการใช้งานที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน	66
2.34	การจัดเครื่องมือทดสอบเพื่อหาค่าความชื้นในสนาม	69
2.35	กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย pcf	70
2.36	กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย kg/m ³ top layer effect	70

2.37	กราฟผลกระทบที่เรียกว่า top layer effect ที่มีต่อการวัดค่าความแน่นแบบ backscatter ที่ความหนาต่าง ๆ กัน	71
2.38	การจัดตำแหน่งของเครื่องมือเพื่อทำการทดสอบในโหมดThin Layer	72
2.39	ส่วนประกอบของชุดวัดความชื้นและความหนาแน่นของเครื่องมือ	73
2.40	การทำ Calibration ของเครื่องมือ โดยทดสอบบนวัสดุที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอน	74
2.41	การนำเครื่องทดสอบวางบนแผ่นบอล์คพาราฟินเพื่อทำ Standard count	76
2.42	การเจาะรูโดยใช้ Scraper plate (Drill Rod guid) และแท่ง Drill Rod เป็นการระบุตำแหน่งที่จะนำสารรังสีลงไปในสนามในการเลือกลักษณะการใช้งานแบบ Direct transmission โดยมีการทำสัญลักษณ์หลังจากเจาะเตรียมไว้เพื่อที่จะได้นำเครื่องมือมาวางให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง	78
2.43	การกดแท่งรังสีให้เลื่อนลงไปในรูเจาะให้ลึกตามที่ต้องการ โดยคลายล๊อคกลไกที่แขนจับ หลังจากนั้นกดปุ่มคำสั่งให้เครื่องทำงาน	81
2.44	รถบดล้อเรียบ	86
2.45	รถบดล้อทำงานด้วยระบบความดันลม (pneumatic-tired roller)	86
2.46	รถบดตีนแกะ	87
2.47	รถบดสั่นสะเทือน (vibrating roller)	87
2.48	a) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่าน (Johnson and Sallberg, 1960)	88
2.48	b) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่าน (D'Appolonia et al., 1969)	88
2.49	การประมาณความหนาของระดับชั้นของดินสำหรับความหนาแน่นสัมพัทธ์ 75% กับจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่านเท่ากับ 5 รอบ	89
3.1	แผนผังขั้นตอนการทดสอบวัสดุ	92
3.2	การทดสอบความแน่นในสนาม	93
3.3	การทดสอบความแน่นในสนาม	93
4.1	ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบในสนามของชั้นรองพื้นทางดินลูกรัง	96
4.2	a) ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งในสนามกับจำนวนเที่ยวรถบด และ b) ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งความหนาแน่นสัมพัทธ์กับจำนวนเที่ยวรถบดที่ใช้ความเร็วต่างกัน	97
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ใช้ในการบดอัดจนได้ความแน่นแห้งสูงสุดในสนาม	99

4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับราคาเช่าเครื่องจักรต่อความยาว 400 เมตรและ ผิวทางกว้าง 9.50 เมตร	100
-----	--	-----

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสัญจรที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบันคือการสัญจรทางบก ซึ่งมีรถยนต์และถนนเป็นองค์ประกอบหลัก การบดอัดเป็นวิธีปรับปรุงดินที่ง่ายและได้รับความนิยมอย่างมากในการก่อสร้างถนนการบดอัดเป็นการไล่อากาศออกจากดินและทำให้ดินแน่นขึ้นด้วยวิธีทางกล ในทางปฏิบัติการ การบดอัดในสนามจะทำได้ก็ต่อเมื่อทราบผลการวิเคราะห์วัสดุและการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ (ปริมาณน้ำเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด) การบดอัดในสนามทำโดยอาศัยรถบดอัดจนได้ความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ หน่วยงานหลัก เช่น กรมทางหลวง กรมโยธาธิการและผังเมือง และกรมทางหลวงชนบท มีข้อกำหนดในการบดอัดดังนี้ ความหนาแน่นแห้งในสนามต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งในสนามสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ การบดอัดในสนามจะเป็นแบบนวด (kneading) ด้วยรถบดอัดและให้พลังงานการบดอัดดินแก่ดินผ่านจำนวนเที่ยววิ่ง รถบดอัดที่ใช้กับงานถนน ได้แก่ รถบดล้อเหล็ก รถบดล้อยาง และ รถบดสันเที้น การทำงานบดอัดและควบคุมงานบดอัดแน่นในสนามไม่มีมาตรฐานควบคุมจำนวนเที่ยววิ่งและอัตราเร็วของรถบดอัดไว้ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ควบคุมความแน่นของดินบดอัด คนขับรถบดอัดส่วนใหญ่อาศัยประสบการณ์ในการบดอัดโดยพยายามวิ่งให้ได้จำนวนเที่ยวมากที่สุดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห้งที่กำหนดผู้ควบคุมงานจะตรวจสอบความหนาแน่นในสนามด้วยวิธีแทนที่ด้วยทราย (sand cone method) และนิวเคลียร์ (nuclear) หากความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำในดินไม่ได้ตามข้อกำหนดผู้รับจ้างต้องทำการบดอัดใหม่ Horpibulsuk et al. (2013) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยววิ่งกับความหนาแน่นแห้งของดินคันทาง และพบว่าความหนาแน่นของดินบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนเที่ยววิ่งในฟังก์ชันลึอกกาลิทิมจนถึงความหนาแน่นแห้งสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราเร็วของรถบดอัดต่อความหนาแน่นของดินบดอัดยังมีอยู่อย่างจำกัด

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วของรถบดอัดต่อความหนาแน่นของดินบดอัดชั้นดินลูกรัง (ชั้นรองพื้นทาง) โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลการทดสอบวัสดุ การทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการและในสนามจาก โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 12 สาย กาฬสินธุ์ – อ.สมเด็จ ตอน 1 สำนักทางหลวงทางที่ 3 กรมทางหลวง ผลการศึกษาทั้งหมดนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพงานทางและช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบดอัด

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างความแน่นแข็งในสนาม กับอัตราเร็วและจำนวน เที้ยววิ่งของรถบดอัด
- 1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะการพัฒนาความหนาแน่นแข็งในสนามจากแต่ละอัตราเร็วและ จำนวนเที้ยววิ่งของรถบดอัด
- 1.2.3 เพื่อนำเสนอความเร็วและจำนวนที่ขอรถบดอัดที่เหมาะสมในการบดอัดดินลูกรัง (ได้ความแน่นตามข้อกำหนดและลดต้นทุนการบดอัด)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการตรวจวัดความแน่นแข็งในสนามด้วยวิธีนิวเคลียร์ (Nuclear Method) ซึ่งเป็นวัสดุที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง และได้รับอนุญาตให้ใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางดิน ลูกรัง ผลการทดสอบดินลูกรังในห้องปฏิบัติการประกอบด้วยการกระจายขนาดของเม็ดดิน การ บดอัดดิน และ CBR ข้อมูลผลทดสอบรวบรวมจากโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 12 สาย กापสินธุ์ – อ.สมเด็จ ตอน 1 ระหว่าง กม.640+400.000 - กม.651+400.000 รวมระยะทางประมาณ 11.000 กิโลเมตร ดินลูกรังในห้องปฏิบัติการจะถูกบดอัดด้วยพลังงานสูงกว่ามาตรฐาน การเพิ่มขึ้น ของความหนาแน่นของดินบดอัดในสนาม ตามอัตราเร็วและจำนวนเที้ยววิ่งของรถบดอัดวัดโดยชุด ตรวจวัดนิวเคลียร์ ผลทดสอบในสนามจะนำมาสร้างความเข้าใจถึงอิทธิพลของความเร็วและจำนวน เที้ยววิ่งต่อการพัฒนาความหนาแน่นแข็ง ผลการศึกษาจะนำมาวิเคราะห์เพื่อนำเสนอจำนวนเที้ยว วิ่งและความเร็วรถบดอัดที่เหมาะสมในทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบความสัมพันธ์ ระหว่าง ความแน่นแข็งในสนามกับอัตราเร็วและจำนวนเที้ยววิ่ง ของรถบดอัด
- 1.4.2 ทราบลักษณะการพัฒนาความหนาแน่นแข็งในสนามจากอัตราเร็วและจำนวนเที้ยววิ่ง ของรถบดอัด
- 1.4.3 ทราบจำนวนเที้ยววิ่งและความเร็วของรถบดอัดที่เหมาะสมในทางวิศวกรรมและ เศรษฐศาสตร์ (ได้ความแน่นตามข้อกำหนดและลดต้นทุนการบดอัด)

บทที่ 2

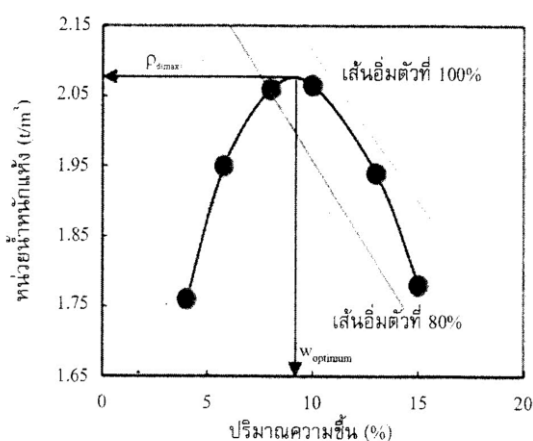
ปริทัศน์ วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานบดอัดดินเป็นงานก่อสร้างที่สำคัญอีกงานหนึ่งในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค เช่น การก่อสร้างคันดิน (raised embankment) งานถมดินหลังกำแพงกันดิน (backfill behind retaining wall) บดอัดกลบดิน (Backfilled trench) ตลอดจนงานเขื่อนดิน (earth dam) ซึ่งการบดอัดดินเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างมีความจำเป็นอย่างมาก ดังนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีการบดอัดดิน การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบในสนามเพื่อประกอบการออกแบบโครงสร้างดังกล่าว

2.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)

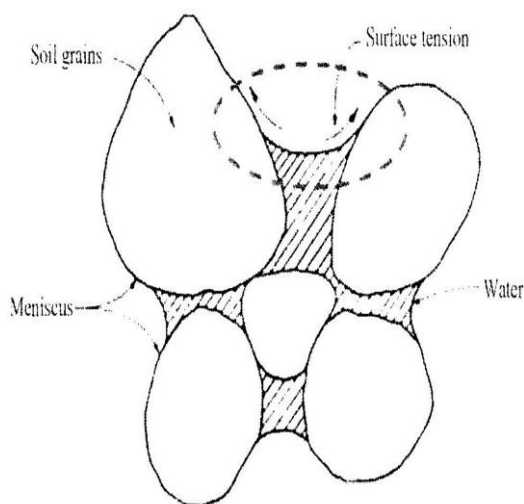
ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความชื้นแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R.Proctor (1930) โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering News-Record (proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า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



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve)

Proctor ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดเส้นการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 2.1 ไว้ว่า ประสิทธิภาพของการบดอัดดินถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน โดยแบ่งการบดอัดดินเป็น 2 ด้านคือ ด้านแห้งและด้านเปียก สำหรับการบดอัดดินที่แห้งมาก ๆ ดินจะมีแรงเสียดทานที่

สูงมาก เนื่องจากแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี (Capillary Moisture) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมาก ๆ น้ำจะไปลดแรงคาพิลลารี และเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย ถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกเรื่อยๆ จนน้ำไปสลายแรงเสียดทานได้แล้ว น้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จนถึงปริมาณน้ำที่เติมช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเรียกจุดที่ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดว่า maximum dry density และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้ว่า optimum moisture content หลังจากจุดนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินสูงมาก ๆ พบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป

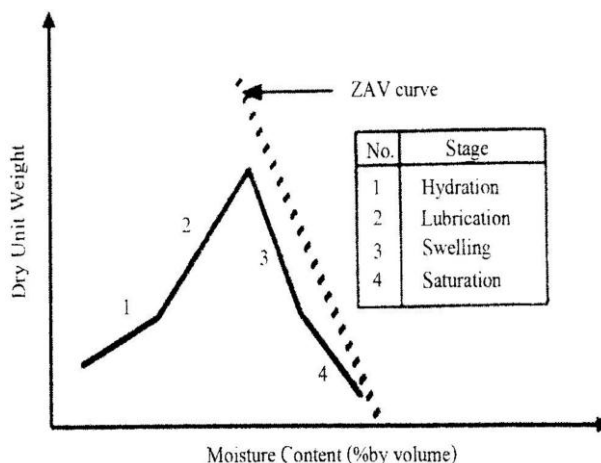


รูปที่ 2.2 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ

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 ซึ่งสาเหตุที่เขาได้นำเสนอการพล็อตเส้นกราฟแบบนี้

เนื่องจากเขาพบว่าน้ำมีบทบาทอยู่ 4 ส่วน แบ่งได้เป็น 4 ช่วงที่มีผลทำให้ดินเกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด และทำให้โครงสร้างของดินบดอัดมีความแตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดแต่ละช่วง



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น
นำเสนอโดย Hogentogler

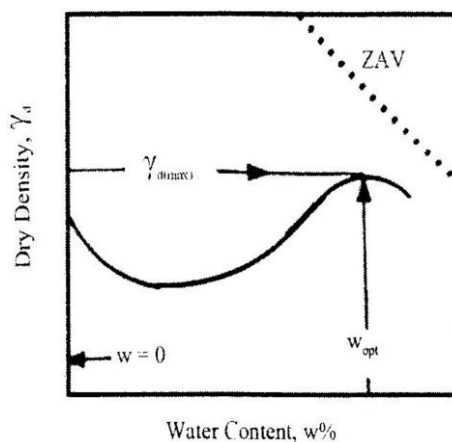
1. Hydration Stage เขากล่าวว่าในช่วงนี้ น้ำจะถูกดูดซึมโดยอนุภาคของดินในลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ห่อหุ้มอนุภาคดิน ในลักษณะเดียวกับเมื่อพรมน้ำลงไปบนดินแห้ง ในช่วงแรกอนุภาคดินจะดูดซึมน้ำทันทีเพื่อไปห่อหุ้มอนุภาคดินก่อน โดยน้ำส่วนกลางที่จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นนั้นยังไม่มี
2. Lubrication Stage ในช่วงนี้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

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

ดังที่ Hogentogler ได้อธิบายไว้ข้างต้น มักจะประยุกต์ใช้โดยตรงกับดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกับ Proctor

2.4 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Buchanan (1942)

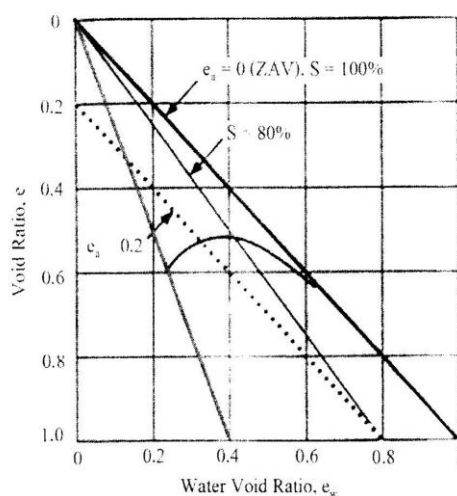
เขาได้อธิบายเส้นกราฟการบดอัดของดินเม็ดหยาบ โดยเขาพบว่า นอกจากจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ปรากฏบนเส้นกราฟการบดอัดแล้ว ก่อนถึงด้านแห้งของการบดอัดจะมีจุดที่แสดงถึงค่าความหนาแน่นแห้งต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเขาได้อธิบายถึงช่วงที่ดินมีความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดที่มีความหนาแน่นแห้งต่ำสุดว่า ถ้าหากเริ่มบดอัดดินเม็ดหยาบที่แห้งมาก ๆ หรือดินที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์ เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงแรกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลงจนถึงจุดความหนาแน่นแห้งต่ำสุด เมื่อเลยจุดนี้ไปก็จะเข้าสู่เส้นกราฟการบดอัดปกติ ซึ่งถ้าสังเกตจากเส้นกราฟพบว่า เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งที่จุดปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์กับจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด จะมีช่วงความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย และเขาได้กล่าวในเชิงวิชาการไว้ว่า สำหรับกรณีของทรายที่มีความแห้งมาก ๆ เมื่อเติมน้ำในช่วงแรกอนุภาคดินจะจับตัวกันด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ของน้ำในลักษณะคล้ายกระจกของก้อนดินหรือทรายรอบตัวเอง ที่เรียกว่า Arching Effect ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินมากขึ้น โดย Arching Effect จะพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่ความหนาแน่นแห้งต่ำสุด ดังนั้นปฏิกิริยาของน้ำที่เติมในช่วงแรกๆ จะแตกต่างจากกรณีของ Hogentogler และ Proctor เนื่องจากดินทรายไม่มีประจุลบ ดังนั้นเมื่อเติมน้ำจะเกิดแรงดึงผิวทำให้เกิดแรงยึดแน่นปรากฏ (apparent cohesion) และเมื่อเติมน้ำมากขึ้น แผ่นฟิล์มจะมีความหนาขึ้น มีผลทำให้ Arching Effect ลดน้อยลงไป เป็นผลให้แรงดึงดูดของแรงดึงผิวลดลงตามลำดับ แล้วอนุภาคดินก็เริ่มจัดเรียงตัวกันใหม่ และหลังจากนั้นก็จะเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้วแต่เขาได้ให้ความหมายของ OMC แตกต่างจากคนอื่น กล่าวคือ OMC คือน้ำที่มีอยู่พอดีในมวลดินบดอัดที่ทำให้ดินอยู่ในสภาพที่ไปสลายแรงดึงผิวพอดี ที่เรียกว่า neutralizes surface tension และเมื่อมีพลังงานบดอัดมากระทำ จึงทำให้ทรายจัดเรียงตัวกันใหม่ ทำให้ทรายแน่นขึ้น จนสุดท้ายถึงจุดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด เมื่อน้ำสูงเกิน OMC ดินก็จะอ่อนตัวลง เป็นผลให้ความหนาแน่นแห้งลดลง โดยสรุปแล้ว ในการบดอัดดินทราย การที่จะให้ได้ความหนาแน่นแห้งค่อนข้างดี คือช่วงที่ทรายแห้งมาก ๆ และช่วงความชื้นที่ค่อนข้างน้อยไปทางด้านเปียกไปแล้ว



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น
นำเสนอโดย Buchanan

2.5 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Hilf (1956)

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



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงผลของการบดอัดดินนำเสนอโดย Hilf

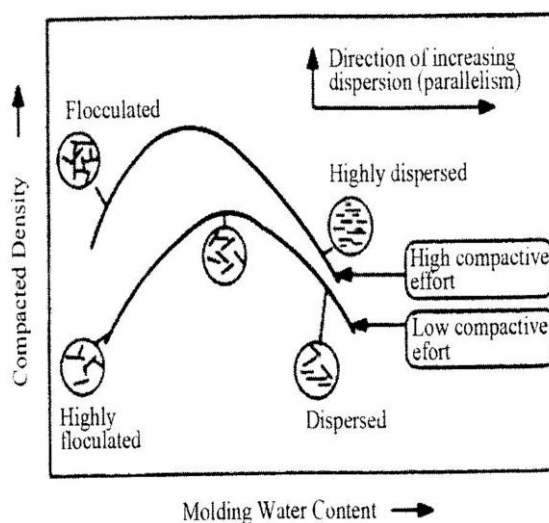
โดยพบว่า ที่จุด OMC ค่าอัตราส่วนช่องว่างจะมีค่าน้อยที่สุด โดยจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟเป็นจุดที่ค่าอัตราส่วนช่องว่างมาก และมีค่าระดับความอิ่มตัวน้อย เมื่อบดอัดไปก็จะได้ค่าอัตราส่วนช่องว่างที่น้อยที่สุด ซึ่งจุดนี้สามารถหาค่าสัดส่วนของอากาศได้ด้วย และพบว่าที่ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ค่าระดับความอิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ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

2.6 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Lambe (1985)

เขาได้เริ่มนำผลจากการดูโครงสร้างภายในดินเปรียบเทียบกับความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัด โดยเขาสนใจว่าคุณสมบัติของดินที่บดอัดทางด้านเปียกและทางด้านแห้งมีความแตกต่างกันเกิดจากสาเหตุใด เขาสังเกตจากปัจจัยหลายๆ อย่างพบว่า ในความเป็นจริงแล้ว การบดอัดในสนามไม่สามารถบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ดังนั้นในการเติมน้ำจะมีช่วงหนึ่งที่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในช่วงนี้แล้วคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเป็นไปตามที่ต้องการ แต่เมื่อเติมน้ำเกินช่วงนี้ไปเป็นช่วงที่เขาไม่แนะนำ ซึ่งเขาให้เหตุผลจากการพิจารณาโครงสร้างภายในของดินเหนียวพบว่า ในช่วงการบดอัดดินทางด้านแห้ง ลักษณะโครงสร้างของดินจับตัวกันเป็นกระจุก โดยเมื่อพิจารณาที่ความชื้นเดียวกัน การใช้พลังงานบดอัดต่ำ ความเป็นกระจุกของดินมีมาก และจะน้อยลงเมื่อใช้พลังงานการบดอัดที่สูง เป็นผลให้โครงสร้างของดินชิดกันมากขึ้นด้วย เมื่อเติมน้ำเข้าไปโดยที่พลังงานคงที่ สังเกตเห็นว่าโครงสร้างของดินแน่นขึ้น อัตราส่วนช่องว่างลดลง

จนกระทั่งเกินจุด OMC ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างดินจะเป็นแบบขนานกันมากขึ้น เมื่อความชื้นยิ่งมากขึ้น ความเป็นระเบียบของโครงสร้างดินก็ยิ่งมากขึ้นตาม การที่โครงสร้างดินจัดเรียงตัวกันในแนวขนานถือว่าไม่ดี เพราะว่าเป็นระนาบที่อ่อนแอที่สุด โดยสรุปแล้วเขาพยายามตอบคำถามว่าทำไมจุดที่มีความหนาแน่นแห้งเท่ากันแต่ปริมาณน้ำไม่เท่ากัน เมื่อเขาใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูพบว่าการบดอัดดินในด้านแห้งมีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบระเกะระกะ (flocculated structure) ในทางตรงกันข้าม เมื่อเติมน้ำเกินจุด OMC เป็นการบดอัดทางด้านเปียก มีผลทำให้โครงสร้างดินเป็นแบบขนาน (dispersed structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นแห้งเท่ากัน โดยเปรียบเทียบดินบดอัดทางด้านแห้งกับดินบดอัดทางด้านเปียกพบว่า

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



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน

2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)

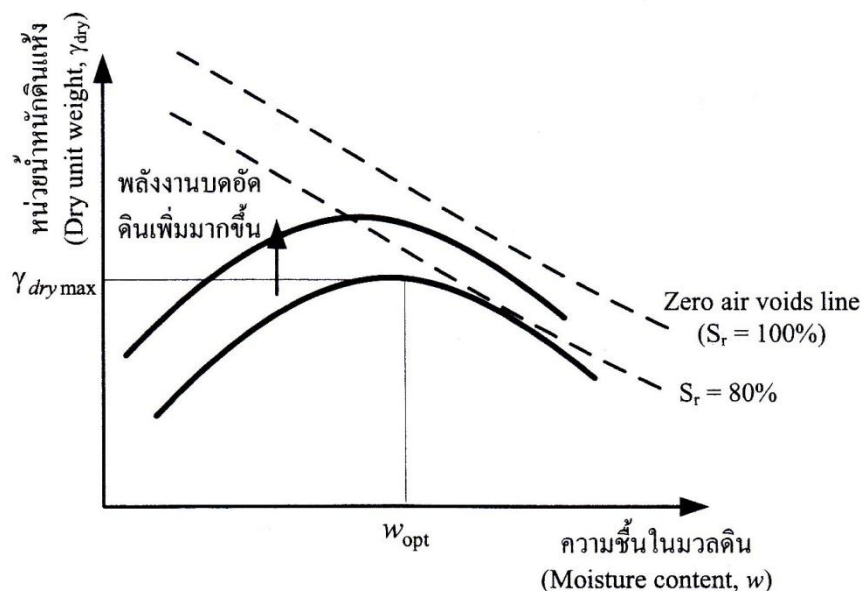
ทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ในงานบดอัดดิน คือ สมการความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับระดับชั้นความอึดตัวด้วยน้ำ

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

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

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

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



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)

จากเส้นโค้งการบดอัดดินในรูปที่ 2.7 พบว่าหน่วยน้ำหนักดินแห้งในตอนแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด

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

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

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

2.7.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบดอัดดิน

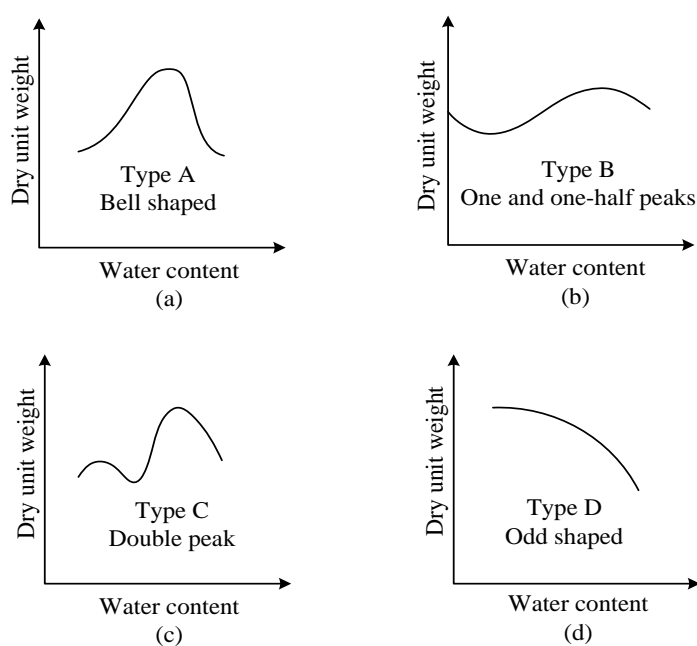
ดังได้อธิบายแล้วข้างต้นว่าปริมาณความชื้นในดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อความหนาแน่นของดินบดอัดนอกเหนือจากปริมาณความชื้นแล้ว ยังมีปัจจัยอีกสองปัจจัย ซึ่งก็คือชนิดของดิน และพลังงานในการบดอัด

2.7.2 ชนิดของดิน

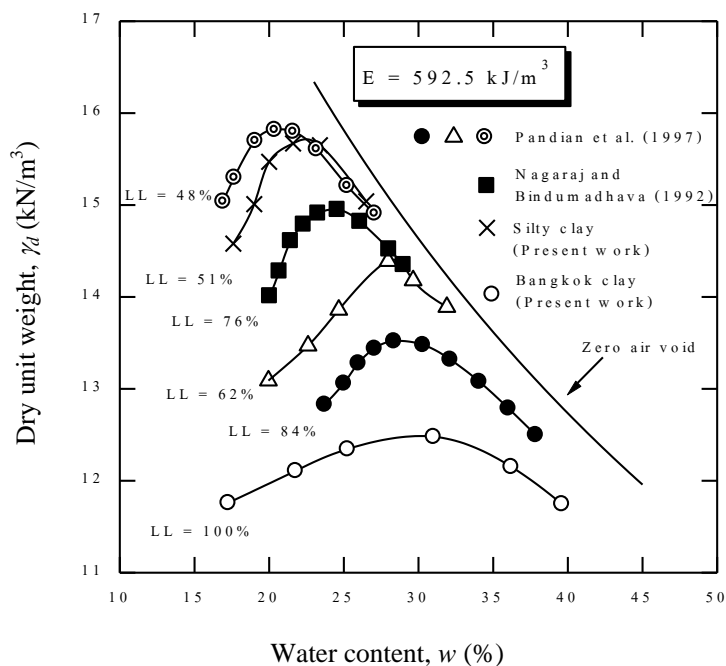
ชนิดของดินในที่นี้ครอบคลุมถึง การกระจายของเม็ดดินรูปร่างของเม็ดดินความถ่วงจำเพาะของดินและปริมาณและชนิดของแร่ดินเหนียว

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

สำหรับการบดอัดดินเหนียว Horpibulsuk (2005) แสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟการบดอัดแปรผันอย่างมากกับขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดเหลวยิ่งมาก หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดยิ่งมีค่าน้อยลง ในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมยิ่งมีค่ามากขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงผลทดสอบการบดอัดของดินชนิดต่าง ๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor test) การที่ขีดจำกัดเหลวมีอิทธิพลต่อเส้นกราฟการอัดตัวคายนํ้า เนื่องจากขีดจำกัดเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนผลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (pore fluid)



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2.9 กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่าง ๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Horpibulsuk et al., 2005)

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

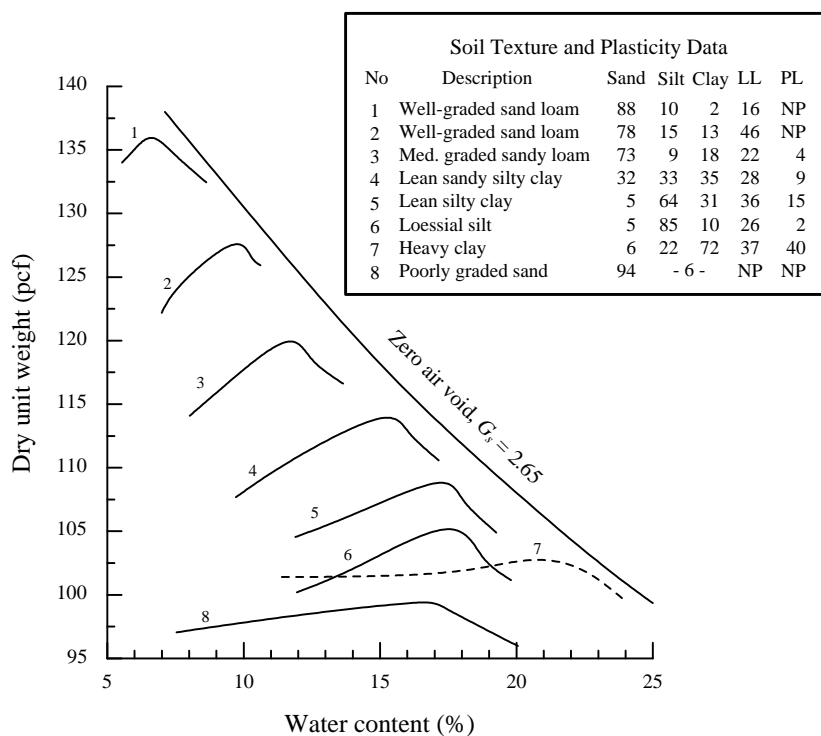
$$OMC = 0.92PL \quad (2.3)$$

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

เมื่อ γ_{dPL} คือหน่วยน้ำหนักแห้งที่พิกัดพลาสติก กำหนดโดยสมมติว่าพิกัดพลาสติกมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ เท่ากับร้อยละ 100 ความสัมพันธ์นี้ช่วยให้สามารถประมาณจุดเหมาะสม (Optimum point) ได้อย่างทันที เมื่อทราบค่าพิกัดอัตราเบอร์ก

รูปที่ 2.4 แสดงอิทธิพลของชนิดของดินต่อลักษณะการบดอัด กราฟการบดอัดมีลักษณะแบนสำหรับทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ (Uniformly graded sand) ในทางตรงกันข้าม ทรายที่มีขนาด

คละดี (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

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

เมื่อ NB = จำนวนการตกระทบของค้อนใน 1 ชั้น (number of blows per layer)
 NL = จำนวนชั้นของการบดอัด (number of layers)
 W = น้ำหนักของค้อน (weight of hammer)
 H = ระยะตกระทบของค้อน (height of drop of hammer)

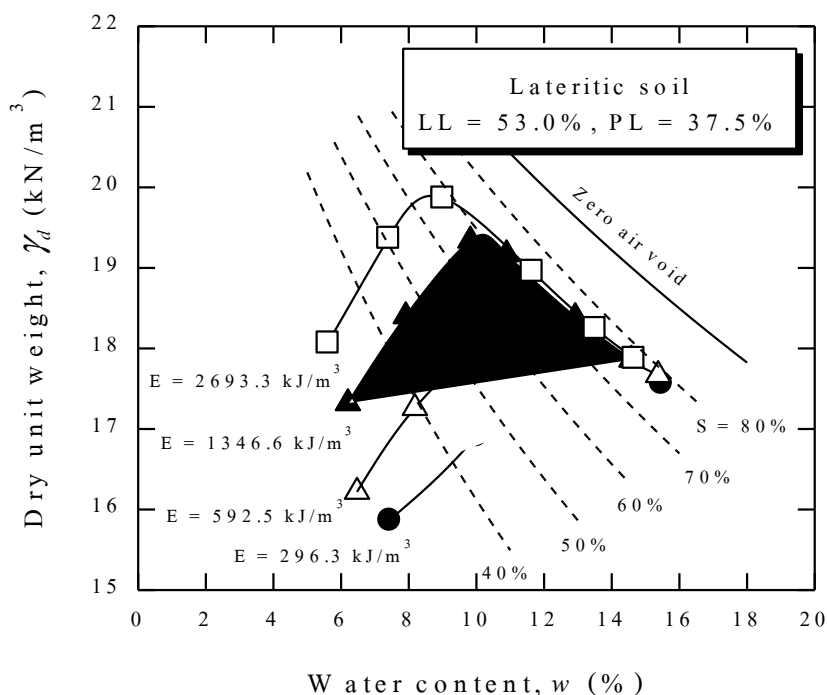
ดังนั้น พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย ในแบบหล่อขนาด 4 นิ้ว สำหรับการบดอัดแบบมาตรฐาน (E_{st}) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน (E_{mod}) คือ

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

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

$$= 2693.3 \text{ กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร}$$

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



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (Horpibulsuk et al., 2004)

จากรูปที่ 2.11 เราสามารถสรุปได้ว่า

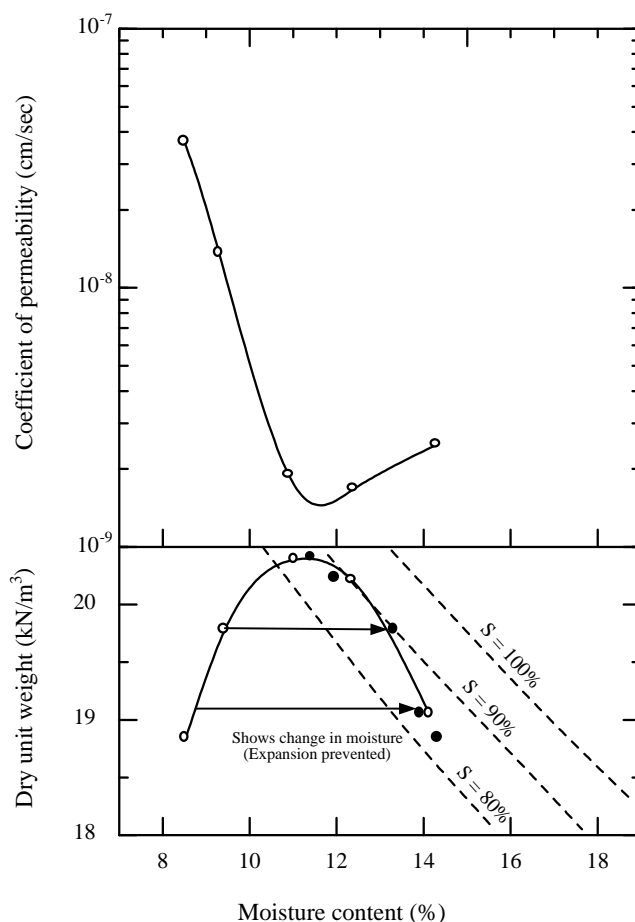
1. หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้น
2. ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มของพลังงานการบดอัด

2.9 การบดอัดและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม

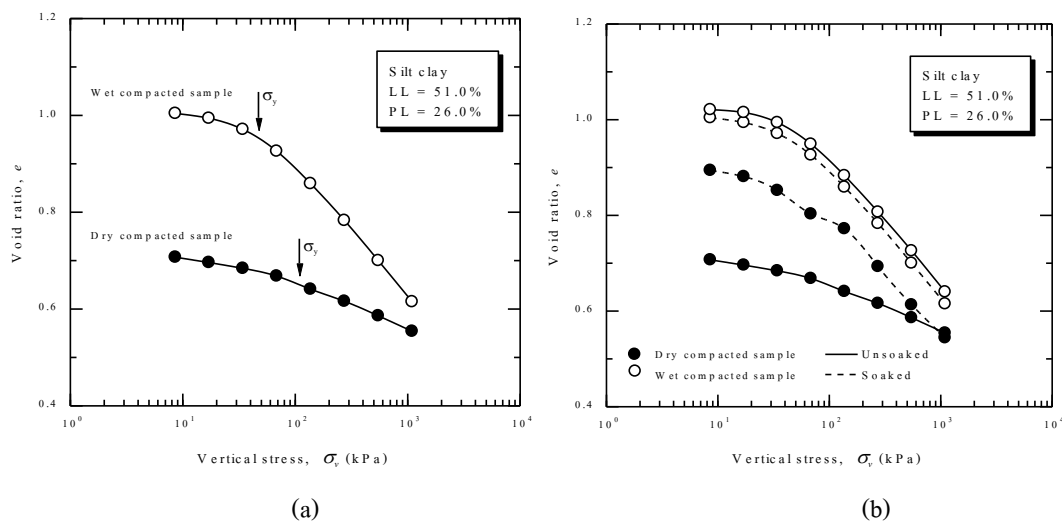
ในกรณีของดินเหนียว การเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นส่งผลให้ความสามารถในการไหลซึมลดลงในด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม (dry side of optimum moisture content) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีค่ามากขึ้นในด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 2.12 นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัดจะช่วยลดสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ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

เพื่อความเข้าใจถึงลักษณะการอัดตัวของดินบดอัด ผู้เขียนได้ทำการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอน ที่เก็บจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และนำเสนอผลทดสอบดังรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงอิทธิพลของปริมาณความชื้นที่ทำการบดอัดต่อการทรุดตัวของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัดสองตัวอย่างที่มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากัน (ร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) ตัวอย่างหนึ่ง

บดอัดที่ด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสม อีกตัวอย่างบดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จากผลทดสอบพบว่าดินที่บดอัดด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสมมีความสามารถด้านการทรุดตัวมากกว่า ดังจะเห็นได้จากความชันของกราฟมีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ ดินที่บดอัดที่ด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสมยังมีค่าความเค้นคราก (σ_c) สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ดินบดอัดที่ด้านหนึ่งจะได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (Expansive due to wetting) ในขณะที่ ดินบดอัดด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จะเกิดการอัดตัวเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น แต่อิทธิพลของการเพิ่มปริมาณความชื้นมีน้อยมาก เนื่องจากดินบดอัดด้านเปียกมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำใกล้เคียง ร้อยละ 100 ดังแสดงในรูปที่ 2.13b



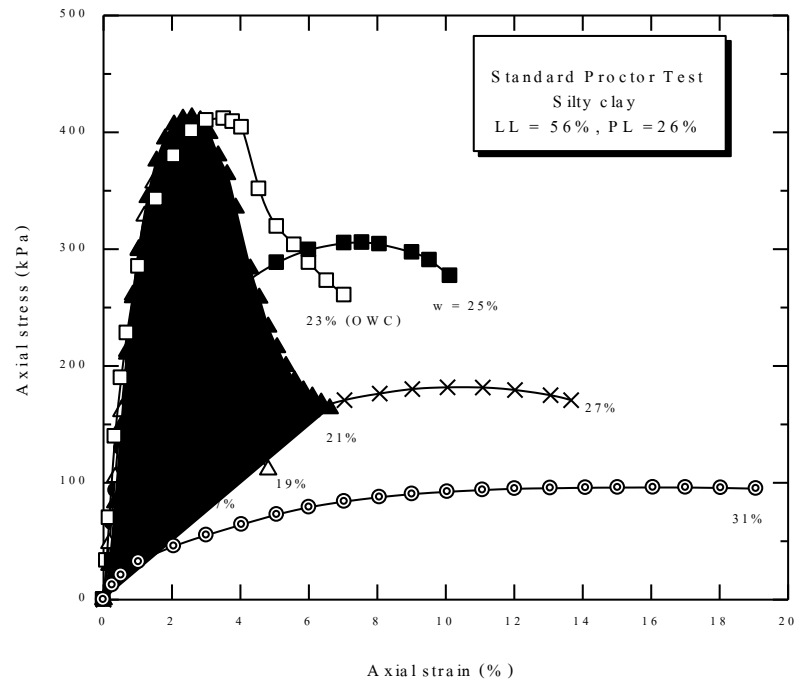
รูปที่ 2.12 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (Lambe, 1962)



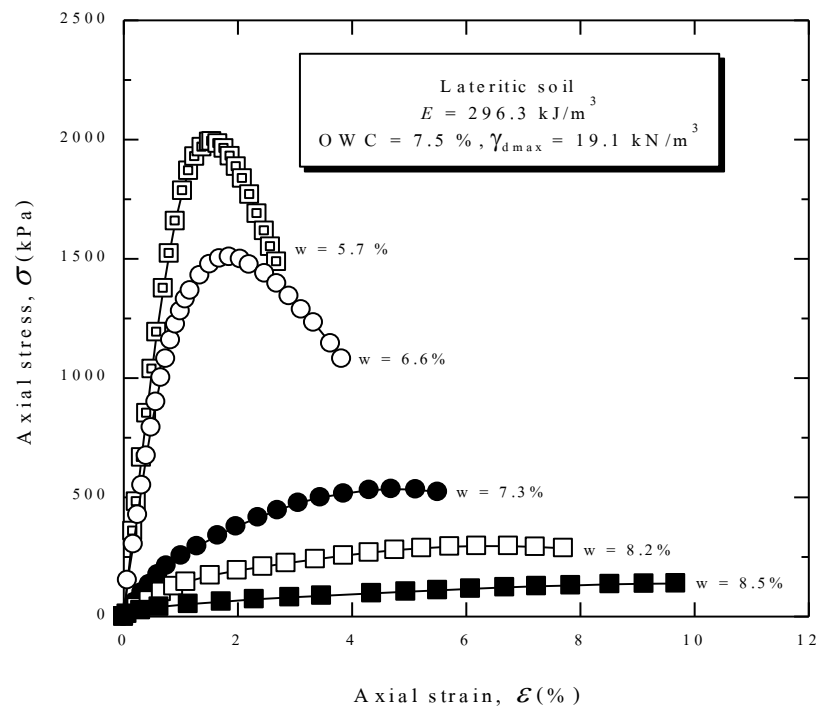
รูปที่ 2.13 ลักษณะการอัดตัวของดินตะกอนปนดินเหนียวอัดที่ด้านข้างและด้านเปียกของปริมาณ ความชื้นเหมาะสม (b) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น (สุขสันต์, 2545)

อิทธิพลของปริมาณความชื้น ต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินบดอัด จะมีความแตกต่างกันตามแต่ชนิดของดิน (ดูรูปที่ 2.14 และ 2.15) สำหรับดินเม็ดละเอียด (รูปที่ 2.14) ดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านข้างจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากนี้ดินบดอัดด้านข้างของปริมาณความชื้นเหมาะสม จะมีค่าความเครียดที่จุดวิบัติต่ำกว่าดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านเปียก ดินตัวอย่างที่บดอัดที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม จะแสดงพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว (Ductile)

สำหรับดินเม็ดหยาบ (รูปที่ 2.15) กำลังอัดแกนเดียวของดินบดอัดด้านข้างของปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มที่จะมีคุณสมบัติแบบแตกง่าย (Brittle) มากกว่าด้านเปียก เช่นเดียวกับดินเม็ดละเอียดแต่กำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบที่ด้านข้างมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น และมีค่ามากที่สุดปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัด (สุขสันต์ 2545)



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของดินลูกรังบดอัด

2.10 ปรัชญาการบดอัดงานเขื่อนและงานถนน

สำหรับดินฐานราก (ดินเดิม) ที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูง และมีการอัดตัวต่ำ ควรทำการบดอัดดินถมที่ด้านข้างของปริมาณความชื้นเหมาะสม ในการบดอัดแบบนี้ นอกจากความคืบหน้าส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการบดอัดจะมีค่าต่ำแล้ว กำลังต้านทานแรงเฉือนรวมทั้งสติฟเนส (Stiffness) ของดินบดอัดจะมีค่าสูง

ในพื้นที่ที่ดินฐานรากเป็นดินอ่อนควรทำการบดอัดดินถมที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมถึงแม้ว่าการบดอัดแบบนี้จะก่อให้เกิดความคืบหน้าส่วนเกินที่มาก และดินบดอัดมีกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ค่อนข้างต่ำ แต่ดินบดอัดจะมีความยืดหยุ่นสูง และสามารถต้านทานการทรุดตัวที่แตกต่าง (Differential settlement) ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการทรุดตัวอย่างมากของดินฐานราก

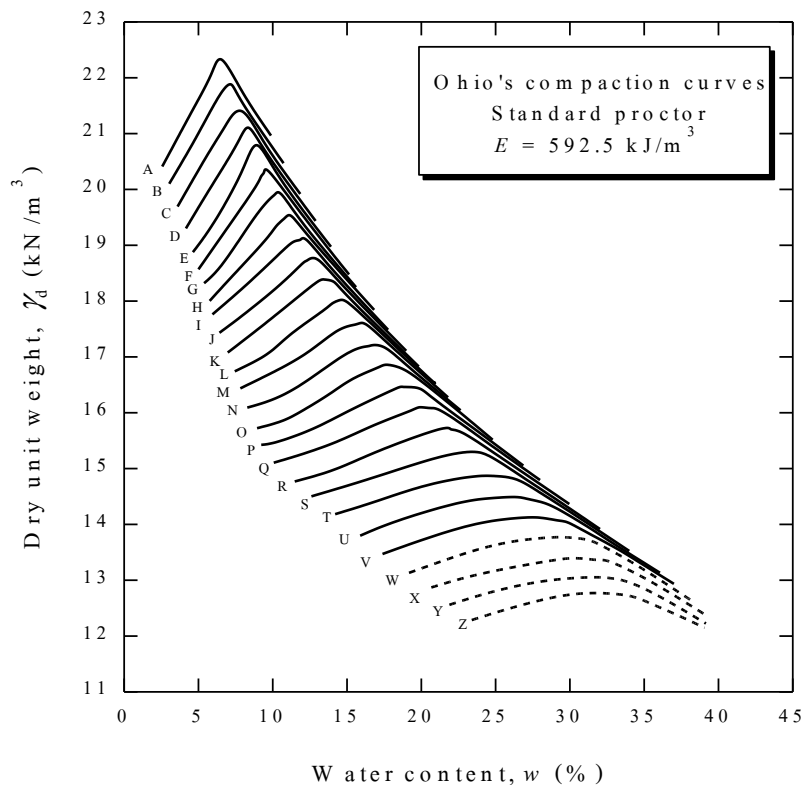
สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับการเก็บกักน้ำ ควรบดอัดดินถมที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมเนื่องจากดินบดอัดมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำ และมีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำ ดังนั้นสามารถป้องกันการลดลงของกำลังต้านทานแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวด้วยน้ำ (Strength reduction and volume change due to wetting)

2.11 การทำนายกราฟการบดอัด

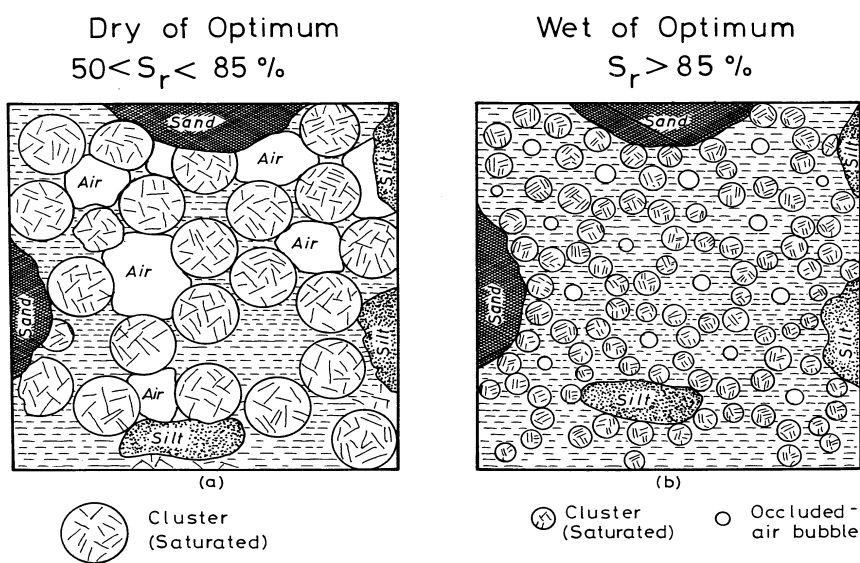
การทำนายกราฟการบดอัดเริ่มต้นครั้งแรกโดย Joslin (1959) ซึ่งเป็นผู้สร้างกราฟการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานจำนวน 26 กราฟ และให้ชื่อว่ากราฟ Ohio (Ohio curves) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 กราฟเหล่านี้สร้างขึ้นจากการรวบรวมผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของดินชนิดต่าง ๆ จำนวนมาก ในมลรัฐ Ohio กราฟ Ohio นี้มีประโยชน์ในการประมาณกราฟการบดอัดของดินชนิดต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทราบผลทดสอบของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งค่าหนึ่ง แต่การประมาณนี้ทำได้เพียงแค่ว่าพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

Nagaraj et al. (2006) ได้นำเสนอแบบจำลองโพรงระหว่างอนุภาคดินอุดมคติสำหรับการทำนายกราฟการบดอัดดินเม็ดละเอียดภายใต้พลังงานการบดอัดต่าง ๆ (รูปที่ 2.17) โดยกล่าวว่าทางด้านข้างของปริมาณความชื้นเหมาะสม 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) สำหรับดินเม็ดละเอียดที่บดอัดทางด้านข้างและด้านเปียกของปริมาณความชื้น

เหมาะสม และกล่าวไว้ที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง แม้ว่าปริมาณความชื้นจะเปลี่ยนแปลงตามระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่พารามิเตอร์สถานะจะมีค่าคงที่



รูปที่ 2.16 กราฟการบดอัด Ohio (ปรับปรุงจาก Joslin, 1959)



รูปที่ 2.17 แบบจำลองโครงสร้างดินบดอัด (Nagaraj et al., 2006)

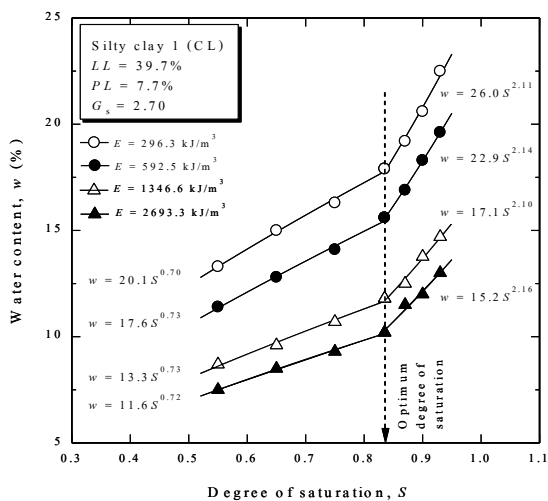
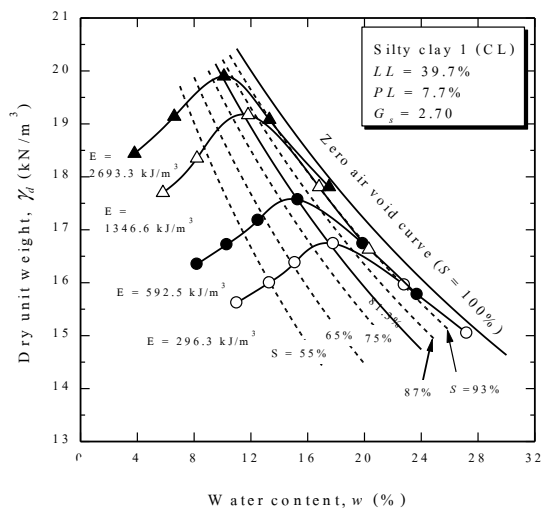
Horpibulsuk et al. (2008a และ 2009a) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะกราฟการบดอัดของดินเม็ดละเอียด 9 ชนิด ซึ่งครอบคลุมดินที่มีระดับการบวมตัวและสภาพความเป็นพลาสติกตั้งแต่ต่ำจนถึงสูง ($FSR = 0.2$ ถึง 2.1 , $LL = 39.7$ ถึง 256.3% และ $PL = 6.1$ ถึง 48.2%) และดินเม็ดหยาบ 16 ชนิด ซึ่งครอบคลุมดินทั้งหมดที่จำแนกด้วยระบบเอกภาพ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

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

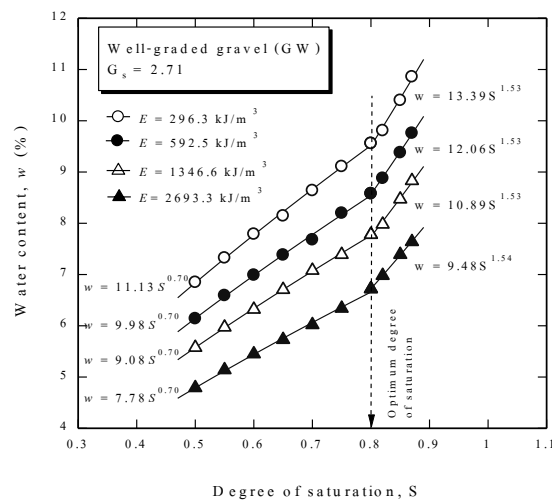
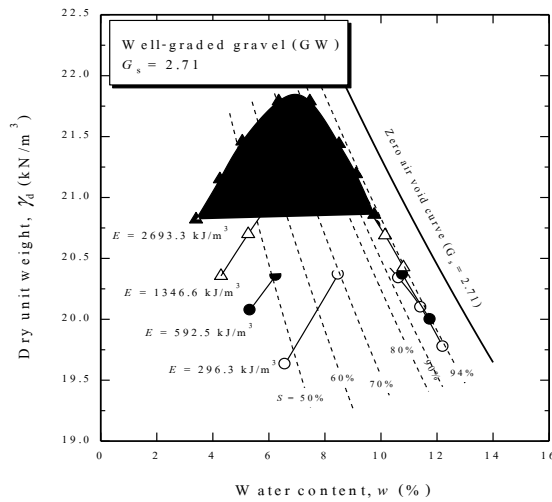
$$w = A_w S^{B_w} \quad \text{สำหรับการบดอัดด้านเปียก} \quad (2.11)$$

เมื่อ A_d , B_d , A_w , และ B_w คือค่าคงที่ ปริมาณความชื้นและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำมีหน่วยเป็นร้อยละ และจุดทศนิยม 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)

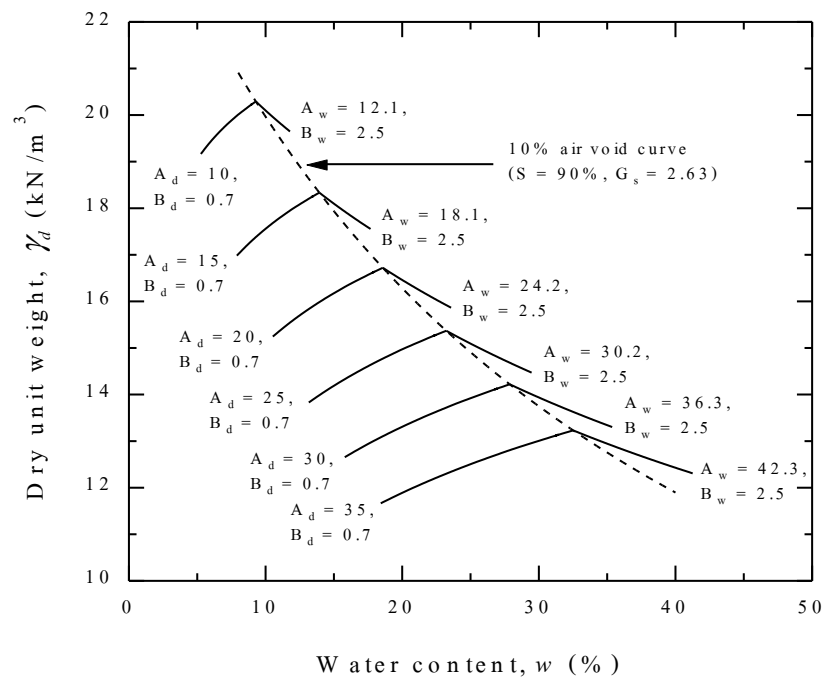
(b)

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

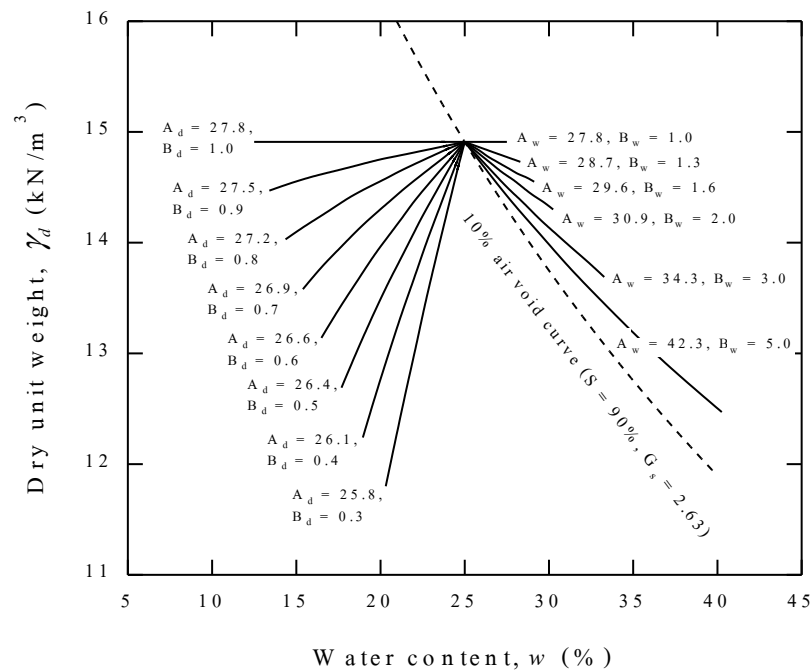
ถึงแม้ว่าลักษณะกราฟการบดอัดแปรผันตามชนิดของดิน (ยกตัวอย่างเช่น ดินตะกอนมีความไวตัวต่อปริมาณความชื้น และดินเหนียวมีความไวตัวต่อพลังงานการบดอัด เป็นต้น) แต่พารามิเตอร์ A_d , B_d , A_w , และ B_w สามารถอธิบายลักษณะกราฟการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19 สำหรับ B_d และ B_w ค่าหนึ่ง เมื่อ A_d และ A_w มีค่าลดลง หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น (ปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมีค่าลดลง) (รูปที่ 2.18) พารามิเตอร์ B_d และ B_w เป็นตัวควบคุมระดับความไวตัวต่อน้ำ (ความชันของกราฟการบดอัด) ทางด้านแห้งและด้านเปียก ตามลำดับ ระดับความไวตัวต่อน้ำมีค่าสูงขึ้น เมื่อ B_d มีค่าลดลง และ B_w มีค่าสูงขึ้น (รูปที่

2.19) ความชันของกราฟการบดอัดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณความชื้น) เมื่อ B_d และ B_w มีค่าเท่ากับ 1.0

จากผลทดสอบการบดอัดดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดหลายชนิด Horpibulsuk et al. (2008a และ 2009a) สรุปว่าสำหรับดินชนิดหนึ่ง A_d และ A_w มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัด ขณะที่ B_d และ B_w มีค่าประมาณคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด (ไม่แปรผันตามพลังงานการบดอัด) (ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17) B_d มีค่าประมาณ 0.70 ถึง 0.86 สำหรับดินเม็ดละเอียด และประมาณ 0.62 ถึง 0.74 สำหรับดินเม็ดหยาบ B_w มีค่าประมาณ 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_d และ A_w ต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008a)



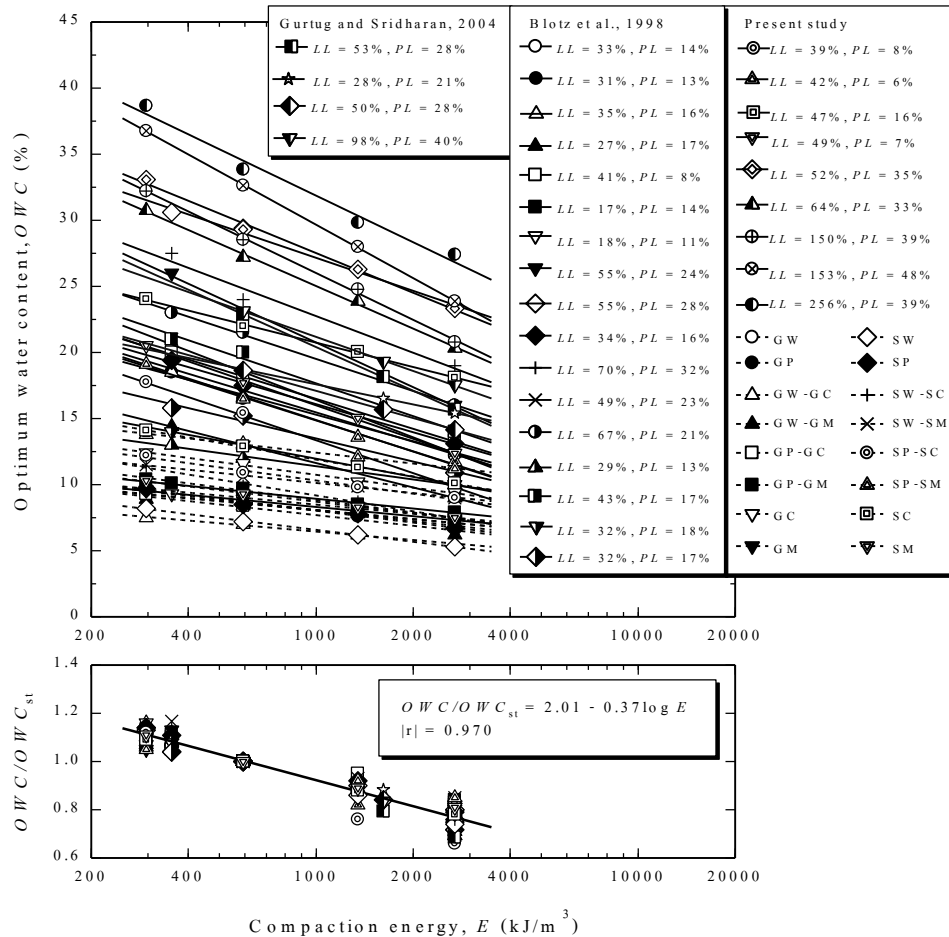
รูปที่ 2.21 อิทธิพลของ B_d และ B_w ต่อกราฟการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008a)

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

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

สมการนี้สามารถประมาณปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินชนิดต่าง ๆ ที่พลังงานการบดอัดใด ๆ ได้ เพียงแค่ทราบปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินนั้นที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดสามารถประมาณได้โดยสมมติว่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่พลังงานการบดอัดต่าง ๆ 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_b , B_b , A_w และ B_w และจุดเหมาะสม (σ_{dmax} , OWC และ ODS)

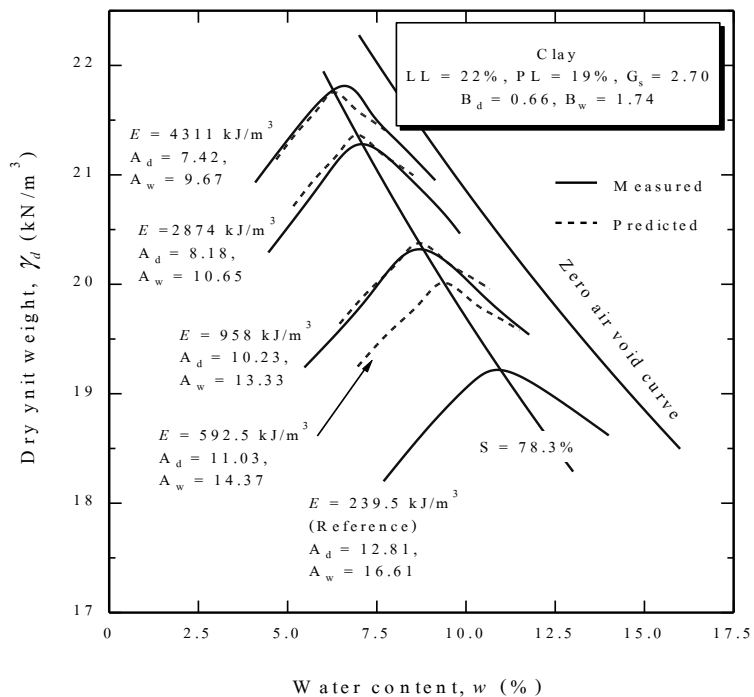
2. จากค่า OWC และ ODS ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1) หาค่า OWC_{st} จากสมการ (2.12) และประมาณค่า $(\sigma_{dmax})_{st}$ โดยสมมติว่า ODS มีค่าคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด
3. หาค่าจุดเหมาะสม (σ_{dmax}, OWC) สำหรับพลังงานที่ต้องการ โดยการแทนค่า OWC_{st} ในสมการที่ (2.12)
4. หาค่า A_d และ A_w ที่พลังงานการบดอัดที่ต้องการจากสมการที่ (2.13) และ (2.14)

$$A_d = \frac{OWC}{ODS^{B_d}} \quad (2.13)$$

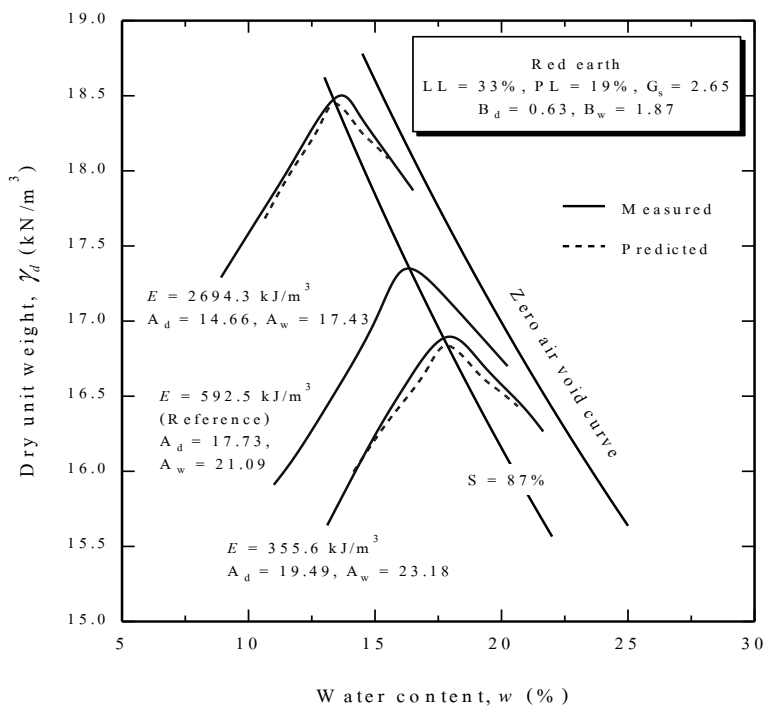
$$A_w = \frac{OWC}{ODS^{B_w}} \quad (2.14)$$

5. หาค่าปริมาณความชื้น (w) ทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำค่าต่าง ๆ โดยอาศัยสมการที่ (2.10) และ (2.11) ตามลำดับ และหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_d)
6. วาดเส้นกราฟการบดอัดดินทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยการต่อเส้นเชื่อมจุด (γ_d, w) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5

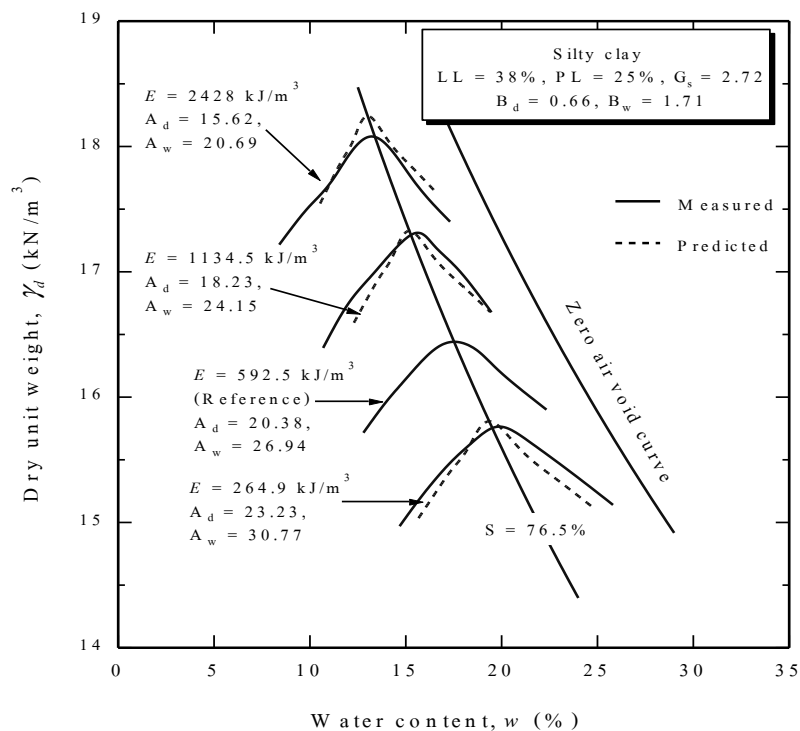
รูปที่ 2.21 ถึง 2.25 แสดงกราฟการบดอัดของดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบที่รวบรวมจากผลงานวิจัยในอดีต จะเห็นได้ว่ากราฟการบดอัดดินที่ได้จากการทำนายมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมากซึ่งเป็นการแสดงความแม่นยำของวิธีการทำนายกราฟการบดอัดที่นำเสนอ เมื่อใช้กราฟการบดอัดของ Ohio เป็นกราฟอ้างอิงสำหรับดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบที่บดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (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 ตามลำดับกราฟเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากในการทำนายกราฟการบดอัดที่พลังงานที่ต้องการ โดยอาศัยเพียงค่าหนึ่งผลทดสอบของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้ง



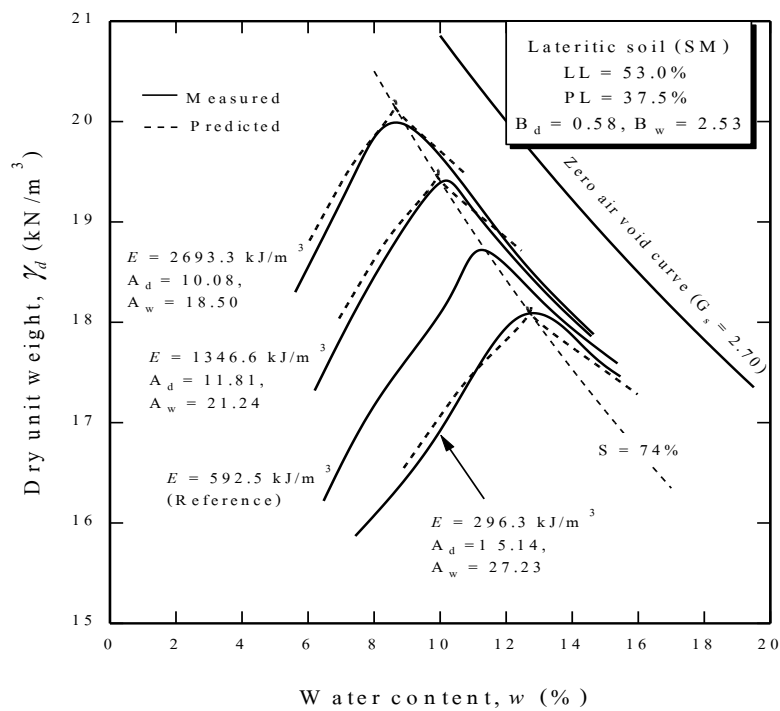
รูปที่ 2.23 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียว (ข้อมูลจาก Proctor, 1948) (Horpibuksuk et al., 2008a)



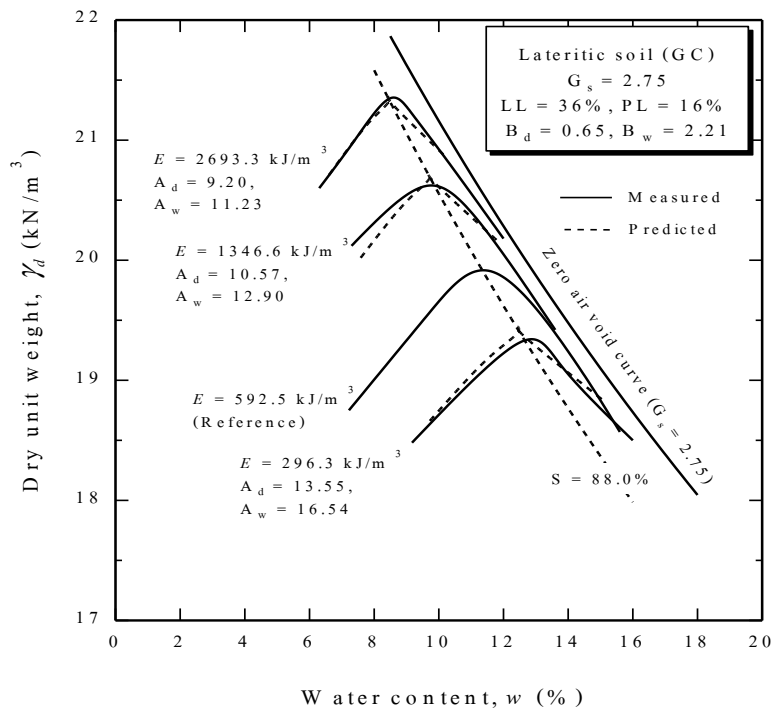
รูปที่ 2.24 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของ Red earth (ข้อมูลจาก US Army Corps of Engineers, 1970) (Horpibusluk et al., 2008a)



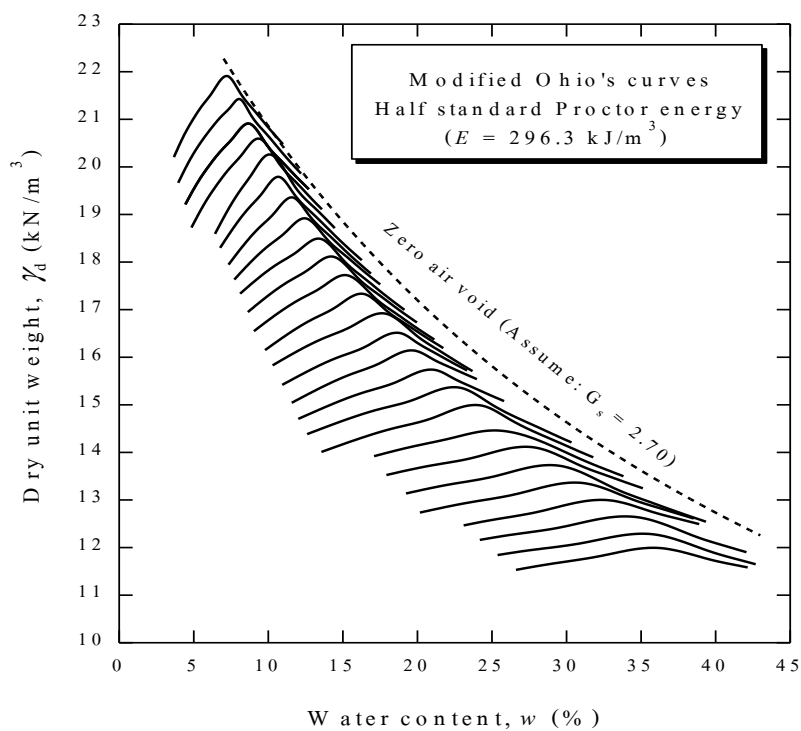
รูปที่ 2.25 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินเหนียวปนดินตะกอน (ข้อมูลจาก Turnbull and Foster, 1956) (Horpibulsuk et al., 2008a)



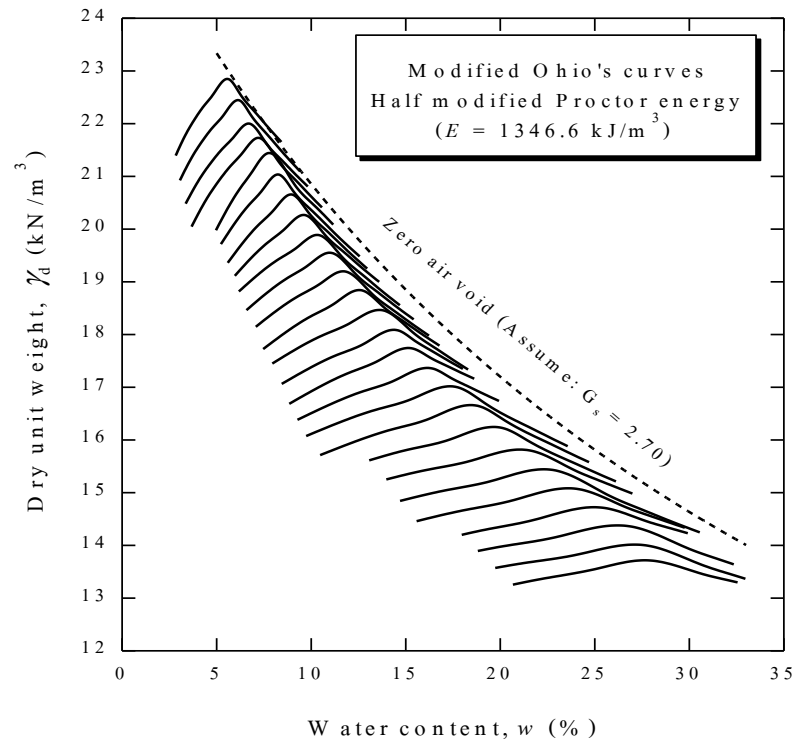
รูปที่ 2.26 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของดินลูกรัง (ข้อมูลจาก Horpibulsuk et al., 2004c) (Horpibulsuk et al., 2009a)



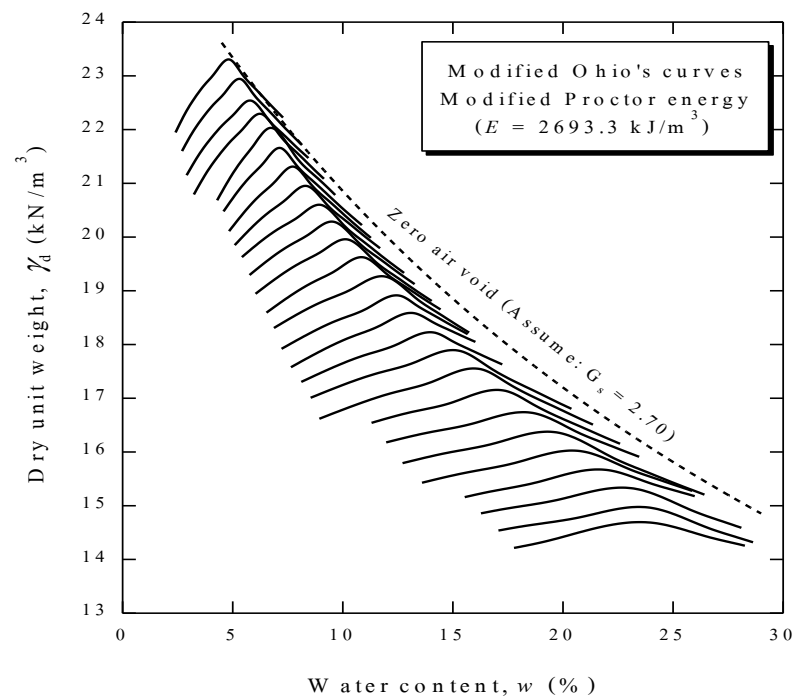
รูปที่ 2.27 เส้นกราฟการบดอัดดินที่ได้จากผลทดสอบและการทำนายของกรวดปนดินเหนียว (ข้อมูลจาก Ruenkrairergsa, 1982) (Horpibulsuk et al., 2009a)



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)

2.12 มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม (Soil-Aggregate Subbase) (ทล.-ม. 205/2532)

2.12.1 ขอบข่าย

วัสดุมวลรวม (Soil Aggregate) ต้องเป็นวัสดุที่มีเม็ดแข็ง ทนทาน มีส่วนหยาบผสมกับส่วนละเอียดที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ดี ปราศจากก้อนดินเหนียว และวัชพืชอื่น ๆ ส่วนที่จับตัวกันเป็นก้อนหรือยึดเกาะแน่นขนาดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร

2.12.2 คุณสมบัติ

- มีค่าความสึกหรอ เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 202/2515 : วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ไม่เกินร้อยละ 60
- มีขนาดคละที่ดี และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 205/2517 : วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง ดังตารางที่ 2.1
- ค่าขีดเหลว (Liquid Limit) ไม่เกินร้อยละ 35 ตาม ทล.-ท. 102/2515 : วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (L.L.) ของดิน
- ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) ไม่เกินร้อยละ 11ตาม ทล.-ท. 103/2515 :วิธีการทดลองหาค่า Plasticity Indexและ Plasticity Index
- ค่า ซี.บี.อาร์. เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท 109/2517 : วิธีการทดลองหาค่า C.B.R. ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test)ตาม ทล.-ท. 108/2515 : วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

ตารางที่ 2.1 ขนาดคละของรองพื้นทางวัสดุมวลรวม

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน(มม.)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรง โดยมีวล				
	A.	B	C	D	E
2" (50)	100	100	-	-	-
1" (25)	-	-	100	100	100
3/8" (9.5)	30-65	40-75	50-85	60-100	-
เบอร์ 10 (2.0)	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
เบอร์ 40 (0.425)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
เบอร์ 200(0.075)	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20

2.13 วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (L.L.) : การทดลองที่ ทล.-ท. 102/2515

2.13.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้เป็นการหาค่าขีดเหลวของดิน

2.13.2 นิยาม

ขีดเหลวของดินคือ ปริมาณน้ำเป็นร้อยละที่ผสมอยู่ในดิน ซึ่งพอเหมาะที่ทำให้ดินเปลี่ยนจากภาวะพลาสติก (plastic) มาเป็นภาวะเหลว (liquid) โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักของเนื้อดินนั้นเมื่ออบแห้ง

2.13.3 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- ถ้วยกระเบื้องเคลือบหรือถ้วยที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 115 มม. (4 1/2 นิ้ว)
- โบพายกวาดดิน (spatula) ทำด้วยแผ่นโลหะบางไร้สนิม มีปลายมนขนาดยาวประมาณ 75 มม. (3 นิ้ว) กว้าง 19 มม. (3/4 นิ้ว)
- เครื่องมือทดสอบ แบ่งเป็น 2 ชนิด
 - เครื่องมือทดสอบที่ทำงานด้วยเครื่องมือ ประกอบด้วยถ้วยทองเหลืองและที่ยกถ้วย สร้างอย่างถูกต้องตามแบบและขนาด
 - เครื่องมือทดสอบที่ทำงานด้วยเครื่องกล เป็นเครื่องมือที่ทำงานด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า โดยมีความสูงในการยกถ้วยทองเหลือง และอัตราการตกกระทบพื้นตามข้อกำหนดของการทดสอบนี้ ขนาดของถ้วยทองเหลือง และขนาดของส่วนที่สำคัญของเครื่อง ต้องสอดคล้อง และผลการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบที่ทำงานด้วยเครื่องกลนี้ ต้องเหมือนกับผลการทดสอบที่ทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบที่ทำงานด้วยมือ
- เครื่องมือปาดร่องดิน (grooving tool) ต้องมีขนาดได้มาตรฐาน
- เครื่องวัดระยะ (gage) ถ้าติดอยู่กับเครื่องมือปาดร่องดินต้องมีขนาดได้มาตรฐาน ถ้าแยกส่วนกับเครื่องมือปาดร่องดินจะต้องมีลักษณะเป็นแท่งทำด้วยโลหะหนา 10.00 ± 0.02 มม. (0.39 ± 0.001 นิ้ว) และยาวประมาณ 50.8 มม. (2 นิ้ว)
- ตลับบรรจุดิน (contianer) ต้องมีขนาดพอเหมาะทำด้วยโลหะมีฝาปิด เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นขณะก่อนชั่งและระหว่างชั่งน้ำหนัก
- เครื่องชั่ง ต้องสามารถชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม

- ตู้อบ ต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส (230 ± 9 องศาฟาเรนไฮต์) ตลอดเวลาที่ทำการอบดิน
- ถ้วยตวงน้ำ สำหรับตวงน้ำ เพื่อผสมลงในดิน
- เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง (sample splitter) ใช้สำหรับผสมและแบ่งตัวอย่างดิน เพื่อนำมาทดสอบ
- ตะแกรงร่อนขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) และขนาด 0.425 มม. (เบอร์ 40)

2.13.4 การเตรียมตัวอย่าง

- ผึ่งตัวอย่างดินให้แห้ง หรืออบให้แห้งโดยใช้อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส คลุกเคล้ากันให้ทั่ว แล้วแบ่งออกเป็นสี่ส่วน (quartering) หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่างแบ่งดินให้ได้ตัวอย่างซึ่งสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ได้ประมาณ 300 กรัม
- ถ้าตัวอย่างดินจับกันเป็นก้อนให้ใช้ก้อนขยทาบเบา ๆ พอให้เม็ดดินหลุดออกจากกัน โดยไม่ให้เม็ดดินแตก
- เอาดินที่ได้มาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ส่วนที่ค้างบนตะแกรงให้ทิ้งไปและเอาดินส่วนที่ร่อนผ่านมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 อีกครั้งหนึ่งโดยใช้เวลาร่อนไม่น้อยกว่า 5 นาที
- ดินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 40 ให้ทิ้งไป ส่วนดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 คือ ดินที่จะนำไปใช้ทดสอบต่อไป

2.13.5 การทดสอบ

ก่อนทำการทดสอบทุกครั้งให้ตรวจสอบเครื่องมือที่ใช้ทดสอบทั้งหมดว่าอยู่ในสภาพที่ดี มีขนาดถูกต้องตรงตามข้อกำหนด และตรวจดูถ้วยทองเหลืองของเครื่องทดสอบขีดจำกัดเหลวว่ายกได้สูง 1 ซม. แล้วสามารถกระทบพื้นได้อย่างอิสระหรือไม่ ถ้าไม่ได้ให้ปรับให้ถูกต้อง

- เอาดินที่เตรียมไว้ประมาณ 100 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องเคลือบเติมน้ำกลั่นที่ปราศจากสารใด ๆ เจือปนประมาณ 15 ถึง 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงผสมและกวนให้เนื้อดินและน้ำผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้ใบพายกวนดินนวดและเคล้าไปมา เติมน้ำอีกครั้งละ 1-3 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วกวนจนดินและน้ำเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที ห้ามใช้ถ้วยทองเหลืองของเครื่องทดสอบขีดเหลว เป็นที่ผสมดินกับน้ำ

- เมื่อผสมน้ำกวนดินจนเหนียวพอประมาณเคาะได้ 40 ครั้ง ให้ใช้แผ่นกระจกปิดปากถ้วยไว้ แล้วทิ้งไว้ประมาณ 50-60 นาที เพื่อให้ดินชุ่มน้ำตลอดทั่วถึงกัน
- แบ่งดินส่วนหนึ่ง จำนวนพอควร ใสลงในถ้วยทองเหลืองของเครื่องมือทดสอบขีดเหลว บริเวณเหนือก้นถ้วยทองเหลืองที่อยู่บนฐาน ใช้พายกวนดิน ปาดแต่งให้ได้ระดับ และไม่ให้มีฟองอากาศในเนื้อดิน และให้เนื้อดินที่ก้นถ้วยทองเหลืองหนาประมาณ 1 ซม. พยายามปาดแต่งให้น้อยที่สุด ดินส่วนที่เหลือตัดออกใส่ถ้วยกระเบื้องเคลือบอย่างเดิม
- จับถ้วยทองเหลืองให้แน่น แล้วใช้เครื่องมือปาดร่องดิน ปาดดินให้เป็นร่องตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยทองเหลือง โดยลากตัดไปมาจนร่องที่ได้สะอาดและเกลี้ยงมูมคม ขนาดของร่องต้องไม่ให้ร่องดินฉีกขาด หรือดินในถ้วยทองเหลืองเลื่อนไถล ให้ค่อย ๆ ลากเครื่องมือปาดร่องดินไปมา โดยเพิ่มความลึกลงในเนื้อดินทีละน้อยแต่ต้องไม่ปาดไปมาเกิน 6 ครั้ง โดยครั้งสุดท้ายเครื่องมือปาดร่องดินจะขูดผิวของก้นถ้วยทองเหลืองพอดี
- หมุนเคาะถ้วยทองเหลืองด้วยอัตราเร็ว 2 ครั้งต่อวินาที จนดินสองข้างของร่องเลื่อนมาชนกันที่ก้นถ้วยทองเหลืองยาวประมาณ 12.7 มม. (0.5 นิ้ว) บันทึกจำนวนครั้งที่เคาะไว้ การทดสอบต้องใช้เวลาไม่เกิน 3 นาที
- ให้เก็บตัวอย่างดินตรงที่เลื่อนมาชนกันตลอดแนวความกว้างของดินที่ตั้งฉากกับร่องดิน ใสลงตลับบรรจุดินนำไปชั่งทันที บันทึกน้ำหนักไว้ ออบดินในตลับจนแห้งด้วยอุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส (230 ± 9 องศาฟาเรนไฮต์) แล้วนำไปชั่งบันทึกน้ำหนักที่ชั่งไว้ น้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของน้ำที่ระเหยออกไป การชั่งน้ำหนักดินในช้อนนี้ต้องอ่านได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม
- เอาดินที่เหลือในถ้วยทองเหลืองใส่กลับลงในถ้วยกระเบื้องเคลือบ แล้วเติมน้ำผสมลงไปกวนจนเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนถ้วยทองเหลืองและเครื่องมือปาดร่องดิน ให้ล้างและเช็ดให้แห้ง
- ทำการทดสอบทั้งสิ้น 4 ครั้ง ด้วยการเติมน้ำลงในดิน เพื่อให้เหลวมากขึ้นในการทดสอบครั้งถัดไป โดยให้การหมุนเคาะถ้วยทองเหลืองในการทดสอบแต่ละครั้งในอัตรา 35-40, 25-35, 20-30, 15-25 ครั้ง คือ ให้เคาะต่างกันประมาณ 5-7 ครั้ง ถ้าหมุนเคาะน้อยกว่า 15 ครั้ง หรือมากกว่า 40 ครั้ง ถือว่าการทดสอบนั้นใช้ไม่ได้

- ในกรณีที่ผสมดินเหลวไป ให้เกลี่ยดินออกเป็นชั้นบาง ๆ แล้วฝังลมไว้ชั่วคราว จนดินแห้งตามต้องการ อย่าทิ้งไว้ให้แห้งจนแข็ง ห้ามใช้วิธีเอาดินแห้งผสมเพิ่มลงไปดินเหลว

2.13.6 การคำนวณ

คำนวณปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในดินเป็นร้อยละของน้ำหนักต่อน้ำหนักดินอบแห้ง ดังนี้

- คำนวณหาค่าความชื้น (wet density)

$$\text{ความชื้นเป็นร้อยละ (W)} = \frac{\text{มวลของน้ำในดิน(กรัม)}}{\text{มวลของดินอบแห้ง(กรัม)}} \times 100$$

เมื่อ (W) = ปริมาณน้ำในดิน มีหน่วยเป็นร้อยละ

2.13.7 การรายงาน

- เขียนโฟลว์เคิร์ฟ (flow curve) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในเนื้อดิน และจำนวนครั้งของการหมุนเคาะในการทดสอบลงบนกระดาษกราฟ กึ่งลอการิทึม (semi-logarithmic graph) โดยให้แกนตั้งแสดงค่าความชื้นในเนื้อดินเป็นร้อยละ และจำนวนครั้งที่เคาะอยู่บนแกนนอน ซึ่งเป็นมาตราลอการิทึม (logarithmic) Flow Curve ควรเป็นเส้นตรง ที่ลากผ่านหรือใกล้จุดที่ได้บนกระดาษกราฟ มากจุดที่สุด
- ค่าขีดเหลว (Liquid Limit) คือ ความชื้นเป็นร้อยละ (Percentage Of Moisture) ตรงจุดที่ Flow Curve ตัดกับจำนวนหมุนเคาะที่ 25 ครั้ง

2.13.8 ข้อควรระวัง

- ในดินบางชนิดที่มีค่า “ดัชนีความเป็นพลาสติก (% Plasticity Index : P.I.)” ต่ำ การเคลื่อนตัวของดินมาชนกันในตัวทองเหลือง ขณะทดสอบอาจมีลักษณะชนกันเฉย ๆ ไม่เชื่อมเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถใช้ใบพายกวาดดินเปียกให้แยกออกจากกันได้ ต้องเติมน้ำลงผสมในเนื้อดิน แล้วทำการทดสอบใหม่
- การเตรียมตัวอย่างดินก่อนการร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 40 ต้องบดให้เม็ดดินหลุดออกจากกันให้หมดโดยไม่ทำให้เม็ดดินแตก และไม่บดตัวอย่างดินเกินอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเพราะจะทำให้ค่า PI และ LL ของวัสดุบางชนิดลดลงและ Organic Matters อาจจะถูกเผาไหม้
- เมื่อสิ้นสุดการเคาะดินแต่ละการทดสอบ ให้รีบเก็บตัวอย่างดินแล้วชั่งเพื่อหาความชื้นทันที เพราะน้ำในดินจะระเหยทำให้ผลการทดสอบคลาดเคลื่อนได้

- ห้ามผสมดินในด้วยทองเหลืองของเครื่องมือทดสอบขีดเหลว ให้ผสมในด้วยกระเบื้องเคลือบเท่านั้น
- ในขณะที่ทำการทดสอบให้วางเครื่องทดสอบบนพื้นที่ยึดแน่นแข็งแรง และจับยึดเครื่องมือทดสอบไม่ให้เคลื่อนที่ขณะหมุนเคาะด้วยทองเหลือง
- น้ำที่ใช้ผสมดินทดสอบ ต้องบริสุทธิ์ สะอาดปราศจากสารใด ๆ ที่สามารถทำให้ผลการทดสอบคลาดเคลื่อน

2.14 วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (P.L.) และ Plastic Index (P.I.) ของดิน : การทดลองที่ ทล.-ท. 103/2515

2.14.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้เป็นการหาค่าขีดพลาสติกของดิน

2.14.2 นิยาม

- ขีดพลาสติกของดิน (Plastic Limit : P.L.) หมายถึง ปริมาณน้ำจำนวนน้อยที่สุดที่วัดโดยกรรมวิธีทดสอบที่จะกล่าวต่อไป ซึ่งยังคงทำให้ดินมีสภาพเป็นพลาสติก โดยมีค่าเป็นร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักดินอบแห้ง
- ค่าดัชนี ความเป็นพลาสติก (Plasticity Index : P.I.) ของดิน หมายถึง ปริมาณน้ำในดินช่วงหนึ่ง ซึ่งดินนั้นยังคงสภาพเป็นพลาสติก มีค่าเป็นผลต่างระหว่างค่าขีดเหลว และขีดพลาสติกของดินนั้น

2.14.3 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- แผ่นกระจกขนาดประมาณ 150 มิลลิเมตรx 150 มิลลิเมตรx10 มิลลิเมตร
- ถ้วยกระเบื้องเคลือบหรือถ้วยที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน สำหรับใส่ดินกวนผสมกับน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 115 มม. (4 1/2 นิ้ว)
- โบพายกวนดิน (spatula) ทำด้วยแผ่นโลหะบางไร้สนิม มีปลายมนขนาดยาวประมาณ 75 มม. (3 นิ้ว) กว้าง 19 มม. (3/4 นิ้ว)
- พื้นผิวเรียบสำหรับคลึงดิน อาจใช้แผ่นกระจกเรียบหรือแผ่นวัสดุพื้นผิวเรียบ ไม่ดูดซึมน้ำในขณะที่คลึงตัวอย่างดิน
- คลັບบรรจุดินต้องมีขนาดพอเหมาะทำด้วยโลหะมีฝาปิด เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นขณะก่อนชั่งและระหว่างชั่งน้ำหนัก

- เครื่องชั่ง ต้องสามารถชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม
- ตู้อบ ต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส (230 ± 9 องศาฟาเรนไฮต์) ตลอดเวลาที่ทำกรอบดิน
- ตะแกรงร่อนดินขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) และขนาด 0.425 มม. (เบอร์ 40)

2.14.4 การเตรียมตัวอย่าง

ดำเนินการตามวิธีการเตรียมตัวอย่าง เช่นเดียวกับการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว Liquid Limit ของดิน ตามการทดลองที่ ทล.-ท. 102/2515

2.14.5 การทดสอบ

- เอาดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ประมาณ 20 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องเคลือบเติมน้ำกลั่นลงแล้วกวนให้ทั่วจนเป็นเนื้อเดียวกันและเหนียวพอที่จะปั้นเป็นก้อนได้ แบ่งดินนั้นมาประมาณ 8 กรัม คลึงให้เป็นรูปลักษณะแท่งกลมยาว หรือเส้นยาว (ellipsoidal shape)
- นวดและคลึงดินรูปลักษณะแท่งกลมยาวนั้นบนผิวเรียบสำหรับคลึงดินที่วางราบอยู่ด้วยนิ้วมือ ให้กดดินด้วยแรงพอสมควรจนดินมีลักษณะเป็นเส้นยาว และมีเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอจนตลอดเส้นด้วยอัตราการคลึงไปมาระหว่าง 80-90 เที้ยวต่อนาที โดยถือว่าการคลึงไปและกลับเป็นหนึ่งเที้ยว
- เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของดินที่คลึงมีขนาด 3.2 มม. ($1/8$ นิ้ว) แล้วตัวอย่างดินยังไม่แตกให้ตัดดินนี้ออกเป็น 6 ถึง 8 ส่วน บีบนวดเข้าด้วยกันด้วยนิ้วมือจนดินเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน คลึงให้เป็นรูปลักษณะแท่งกลมยาวแล้วทำซ้ำใหม่
- เมื่อคลึงจนดินมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. ($1/8$ นิ้ว) แล้วดินแตกแล้วออก ไม่สามารถคลึงให้เป็นเส้นต่อเนื่องกันได้ให้รวบรวมตัวอย่างดินที่แตกทั้งหมดใส่ลงตลับบรรจุดินปิดฝาทันที แล้วนำไปชั่งบนตีกน้ำหนักไว้แล้วเอาไปอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส (230 ± 9 องศาฟาเรนไฮต์) จนแห้ง นำไปชั่งใหม่ บนตีกน้ำหนักดินแห้งไว้ น้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของน้ำที่อยู่ในดิน การชั่งน้ำหนักให้อ่านละเอียดถึง 0.01 กรัม
- การแตกของดิน มีหลายลักษณะแล้วแต่ชนิดของดิน อาจแตก่วนเป็นก้อนเล็ก ๆ อาจลอกออกเป็นชั้น ๆ จากปลายทั้งสองข้างเข้าหาส่วนกลางจนแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ เป็นต้น
- สำหรับดินเหนียวมาก ๆ (heavy clay soil) ต้องใช้แรงกดในการคลึงมาก โดยเฉพาะเมื่อใกล้จะแตกแต่เมื่อคลึงจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. ($1/8$

นิ้ว) แล้วดินเหนียวยังไม่แตกให้ลดแรงกด หรืออัตราความเร็วของการคลึงลง หรือลด ทั้งสองอย่าง แล้วคลึงต่อไปโดยไม่ทำให้เส้นดินขึ้นเล็กลงจนในที่สุด ดินเหนียวจะขาดออกเป็นท่อน ๆ ยาวประมาณ 6.4 มม. ถึง 9.5 มม. (1/4 นิ้ว ถึง 3/8 นิ้ว)

- สำหรับดินเหนียวที่อ่อนมาก (very soft clay) ให้คลึงเป็นรูปไข่ยาวในตอนเริ่ม การทดสอบให้มีขนาดใกล้เคียงเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. (1/8 นิ้ว) ได้ เพื่อ ลดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดิน
- ในกรณีที่คลึงดินจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียง 3.2 มม. (1/8 นิ้ว) หรือ ใหญ่กว่าเล็กน้อยแล้วดินนั้นแตก ถ้าดินนั้นแตกคลึงให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 3.2 มม. (1/8 นิ้ว) ได้มาก่อน ให้ถือว่าดินนั้นแตกที่ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 3.2 มม. (1/8 นิ้ว)
- ในการคลึงให้ดินเป็นเส้น ให้คลึงด้วยแรงกดและอัตราความเร็วสม่ำเสมอคงที่ ห้ามเร่งเพื่อให้ดินแตกเมื่อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. (1/8 นิ้ว)
- ต้องทำการทดสอบอย่างน้อยตัวอย่างละ 2 ครั้ง และผลต่างของผลที่ได้จะต้อง ต่างกันไม่เกินร้อยละ 2

2.14.6 การคำนวณ

คำนวณหาค่า Plastic Limit (P.L.) และค่า Plasticity Index (P.I.) ได้จากสูตร

$$\text{Plastic Limit (P.L.)} = \frac{\text{มวลของน้ำ(กรัม)}}{\text{มวลของดินแห้ง(กรัม)}} \times 100$$

$$\text{Plasticity Index (P.I.)} = \text{L.L.} - \text{P.L.}$$

2.14.7 การรายงาน

ให้รายงานเป็นค่าขีดพลาสติก และค่าดัชนีความเป็นพลาสติก นอกจากดินมีสภาพต่อไปนี้

- ให้รายงานค่าดัชนีความเป็นพลาสติก เป็น (Non-Plastic) เมื่อไม่สามารถวัด ค่าขีดเหลว หรือขีดพลาสติก
- เมื่อค่าขีดพลาสติกเท่ากับ หรือมากกว่าค่าขีดเหลว ให้รายงานค่าดัชนีความเป็น พลาสติก (P.I) เป็น (Non-Plastic)

2.14.8 ข้อควรระวัง

- ในการคลึงให้ดินเป็นรูปลักษณะแท่งกลมยาว ให้คลึงด้วยแรงกดและอัตราเร็ว สม่ำเสมอและคงที่ ห้ามเร่งเพื่อให้ดินแตก
- เมื่อคลึงดินแตกแล้ว ให้รีบชั่งน้ำหนักทันที ก่อนที่น้ำจะระเหยหายไป

- ดินที่มีค่าดัชนีความเป็นพลาสติกต่ำ ให้แต่งดินเป็นแท่งยาวก่อนคลึงและนำหน้าก้นที่กดขณะคลึงต้องเบา และให้คอยซับน้ำที่ซึมออกจากตัวอย่างดินมาคิดแผ่นผิวเรียบ
- ตัวอย่างดินที่มีทรายปนมากอาจเป็นพวก นอน-พลาสติก ให้ทดลองหาค่าขีดพลาสติกก่อนเพื่อประหยัดเวลา

2.15 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง: การทดลองที่ทล.-ท. 205/2517

2.15.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้ เป็นการหาการกระจายของขนาดเม็ดดิน (Particle Size Distribution) ของ Aggregate ทั้งชนิดเม็ดละเอียดและหยาบ โดยให้ผ่านตะแกรงจากขนาดใหญ่ จนถึงขนาดเล็ก ที่มีขนาดช่องผ่าน 0.075 มม. (เบอร์ 200) แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่านหรือค้าง ตะแกรงขนาดต่าง ๆ กับมวลทั้งหมดของตัวอย่าง

2.15.2 นิยาม

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

การกระจายของขนาดเม็ดดิน แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดดินในลอการิทึม (logarithm) อยู่บนแกนนอน และร้อยละโดยมวลของเม็ดที่มีขนาดเล็กกว่าที่ระบุ (Percent Finer) อยู่บนแกนตั้ง ซึ่งเรียกว่า กราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (Grainsize Distribution Curve)

2.15.3 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- ตะแกรงร่อนดิน (Sieve) ช่องผ่านต้องเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดช่องผ่านต่าง ๆ ได้ขนาดตามต้องการ พร้อมเครื่องมือเขย่าตะแกรง
- เครื่องชั่ง สามารถชั่งได้ละเอียดถึงร้อยละ 0.2 ของตัวอย่างทั้งหมด
- ตู้อบ ต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส (230 ± 9 องศาฟาเรนไฮต์)
- เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง (Sample Splitter)
- แปรงทำความสะอาดตะแกรงชนิดลวดทองเหลือง และแปรงขน หรือแปรงพลาสติก

- ภาชนะสำหรับใช้แช่ และล้างตัวอย่างดิน ด้วยมือหรือด้วยชนิดใช้เครื่องเขย่า

2.15.4 การเตรียมตัวอย่าง

- การเตรียมตัวอย่างโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง

นำตัวอย่างมาคลุกให้เข้ากันและแยกตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่างในขณะที่ตัวอย่างมีความชื้นเพื่อลดการแยกตัว ถ้าตัวอย่างไม่มีส่วนละเอียดอาจจะแบ่งขณะที่ตัวอย่างแห้งอยู่ก็ได้ ถ้ามีส่วนละเอียดจับเป็นก้อนใหญ่หรือมีส่วนละเอียดจับกันเองเป็นก้อนต้องทำให้ส่วนละเอียดหลุดออกจากก้อนใหญ่โดยให้ทุบแยกดินออกเป็นเม็ดอิสระด้วยค้อนยางแต่ต้องระวังอย่าให้แรงมากจนเม็ดดินแตก

- การเตรียมตัวอย่างโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง

นำตัวอย่างที่มีส่วนละเอียดจับกันเป็นก้อนไปแยกออกจากกันโดยใช้ค้อนยางทุบแล้วนำตัวอย่างไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส (230 ± 9 องศาฟาเรนไฮต์) เพื่อหาน้ำหนักตัวอย่างแห้ง นำตัวอย่างใส่ภาชนะสำหรับใช้ล้างตัวอย่าง โดยใช้น้ำยาล้างส่วนละเอียด ซึ่งเตรียมได้จากการละลายฟอสเฟตโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต ซึ่งทำให้เป็นกลางด้วยโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Hexametaphosphate Buffered With Sodium Carbonate) 45.7 กรัม ละลายในน้ำ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนผสมกันให้ทั่วตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง แล้วนำไปเขย่าประมาณ 10 นาที ขณะเขย่าระวังอย่าให้น้ำกระฉอกออกจากภาชนะ เทตัวอย่างดินในภาชนะลงบนตะแกรงเบอร์ 200 ถ้าหากมีตัวอย่างขนาดใหญ่ป็นอยู่มากควรใช้ตะแกรงที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 200 ซ้อนไว้ข้างบน แล้วใช้น้ำล้างจนกว่าไม่มีวัสดุผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ตะแกรงที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 200 ซ้อนไว้ข้างบน แล้วใช้น้ำล้างจนกว่าไม่มีวัสดุผ่านตะแกรงเบอร์ 200 อีก เทตัวอย่างลงในภาชนะแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส (230 ± 9 องศาฟาเรนไฮต์)

2.15.5 การทดสอบ

- นำตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมตัวอย่าง แล้วแต่จะต้องการทดสอบแบบใดมา โดยประมาณให้ได้ตัวอย่างเมื่อแห้งแล้วตามตารางที่ 2.2 หรือ 2.3

ตารางที่ 2.2 สำหรับหินย่อย

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

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

ขนาดตะแกรง	น้ำหนักตัวอย่างไม่น้อยกว่า (กก.)
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

ตารางที่ 2.3 สำหรับ Soil Aggregate

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
ใหญ่กว่า 25.0 มม. (1 นิ้ว)	10.0

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

2.15.6 การคำนวณ

- หาน้ำหนักที่ค้าง (weigh retained) บนตะแกรงแต่ละขนาดโดยชั่งน้ำหนักของตัวอย่างดินที่ค้างบนแต่ละตะแกรงและน้ำหนักที่หายไป เมื่อเอาน้ำหนักของ

ตัวอย่างในทุกตะแกรงรวมกันแล้ว หักออกจากน้ำหนักตัวอย่างอบแห้งทั้งหมดซึ่งใช้ทดสอบจะได้น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 รวมกับน้ำหนักที่ค้างบนถาดรอง (pan)

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

$$\text{ร้อยละผ่านตะแกรงต่อมวลรวม} = \frac{\text{มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดต่าง ๆ}}{\text{มวลของตัวอย่างแห้งทั้งหมดที่ใช้ทดลอง}} \times 100$$

- กำหนดหาร้อยละรวมผ่านตะแกรงต่อมวลรวม (Total Percent Passing) ของวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละรวมผ่านตะแกรงต่อมวลรวม} = \frac{X \times Y}{100}$$

เมื่อ X = ร้อยละผ่านตะแกรงต่อมวลรวมของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)

Y = ร้อยละผ่านตะแกรงต่อมวลรวมของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ในการทดลองพวกวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)

2.15.7 การรายงาน

ให้รายงานค่าร้อยละ ผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ โดยน้ำหนักด้วยทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2.15.8 ข้อควรระวัง

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

- การทุบตัวอย่างดินต้องไม่แรงมากจนทำให้เม็ดดินแตก
- การเขย่าอย่างเขย่านานจนตัวอย่างกระแทกแตกเป็นผง

2.16 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน: การทดลองที่ ทล.-ท.108/2517

2.16.1 ขอบข่าย

วิธีการทดลองนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นของดิน กับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดในแบบที่กำหนดขนาดไว้ด้วยค้อนเหล็กหนัก 4.537 กก.(10 ปอนด์) ระยะปล่อยค้อนตก กระทบสูง 457.2 มม. (18 นิ้ว) วิธีทดสอบ มี 4 วิธี ต่าง ๆ กันดังนี้

- วิธี ก. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มม. (4 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ตามวิธีพร็อกเตอร์แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)
- วิธี ข. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มม. (6 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ตามวิธี AASHTO T 180
- วิธี ค. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มม. (4 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ตามวิธี Proctor แบบสูงกว่ามาตรฐาน
- วิธี ง. ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มม. (6 นิ้ว) และดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) ตามวิธี AASHTO T 180

การใช้วิธีทดลอง วิธีใดให้เป็นไปตามรายการที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง ถ้าไม่ได้ระบุวิธีการทดสอบให้ใช้ วิธี ก.

2.16.2 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- แบบ (mold) ทำด้วยโลหะมีลักษณะทรงกระบอกกลวง ผนังแข็งแรงมี 2 ขนาด มีปลอกที่สามารถถอดได้สูง 60 มม.(2 3/8 นิ้ว) เพื่อให้สามารถบดอัดดินให้สูง และมีปริมาตรตามต้องการ แบบและปลอกต้องยึดกันได้อย่างมั่นคงกับฐานแบบซึ่งสามารถถอดได้ ทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกับ
- แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 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 152.4 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 ± 0.000021 ลบ.ม. (0.07500 ± 0.00075 ลบ.ฟ.) และมีปลอกขนาดเดียวกันสูง 60 มม. ($2 \frac{3}{8}$ นิ้ว)
- ค้อน (rammer) ทำด้วยโลหะทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 ± 0.127 มม. (2.000 ± 0.005 นิ้ว) น้ำหนักรวมทั้งด้ามถือ 4.537 กก. (10.00 ± 0.05 ปอนด์) มีปลอกบังคับให้ยกได้สูง 457.2 ± 1.524 มม. (18.00 ± 0.06 นิ้ว) เหนือระดับดินที่บดอัดโดยค้อนตกลงกระทบได้อย่างอิสระ ปลอกบังคับต้องมีระยะบายอากาศอย่างน้อย 4 รู มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9.5 มม. ($\frac{3}{8}$ นิ้ว) ทำมุมกัน 90 องศา และห่างจากปลายปลอกทั้งสองข้างประมาณ 19 มม. ($\frac{3}{4}$ นิ้ว)
- เครื่องดันตัวอย่างออกจากแบบ (sample extruder) ประกอบด้วยแม่แรง (jack) ก้านโยกแม่แรง โครงเหล็กจับแบบขณะดันตัวอย่างออกจากแบบ ใช้ดันตัวอย่างที่บดอัดในแบบแล้วออกจากแบบ หรืออาจใช้เครื่องมืออย่างอื่นที่สามารถขูดและตัวอย่างดินออกจากแบบก็ได้
- เครื่องชั่ง (balance and scale) สามารถชั่งน้ำหนักได้อย่างน้อย 16 กก. และอ่านละเอียดได้ถึง 0.001 กิโลกรัม 1 เครื่อง และสามารถชั่งน้ำหนักได้อย่างน้อย 1,000 กรัม อ่านละเอียดได้ถึง 0.01 กรัม อีก 1 เครื่อง
- ตู้อบ (oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ 110 ± 5 องศาเซลเซียส (230 ± 9 องศาฟาเรนไฮต์) สำหรับอบดินชื้นให้แห้ง
- เหล็กปาดดิน (straight edge) ทำด้วยเหล็กชุบแข็ง (hardened steel) มีขอบเรียบยาวไม่น้อยกว่า 300 มม. และหนาประมาณ 3.0 มม. มีขอบที่ลบมุมด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งเรียบตรงตลอดความยาวของเหล็กปาดดิน
- ตะแกรงร่อนดิน (sieve) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 203 มม. (8 นิ้ว) สูง 50.8 มม. (2 นิ้ว) มี 2 ขนาด คือ 19.0 มม. ($\frac{3}{4}$ นิ้ว) และ 4.75 มม. (เบอร์ 4)
- เครื่องผสมดิน (Mixing Tool) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการคลุกผสมดินให้เข้ากันได้แก่ ถาดใส่ดิน ช้อนตักดิน พลั่ว เกรียง ถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำ เป็นต้น หรืออาจเป็นเครื่องผสมดินที่ทำงานด้วยเครื่องจักร ซึ่งสามารถคลุกเคล้าผสมตัวอย่างดินให้เข้ากับน้ำที่ผสมเพิ่มลงไปในตัวอย่งดินที่ละเอียด ๆ ได้

- ตลับบรรจุดิน (container) ทำด้วยโลหะมีฝาปิดป้องกันความชื้นระเหยออกไป ก่อนชั่งน้ำหนัก หรือระหว่างการชั่งน้ำหนักเพื่อหาความชื้นในดิน

2.16.3 การเตรียมตัวอย่าง

- ตัวอย่าง ได้แก่ ดินหรือ หินคลุก หรือ Soil Aggregate หรือวัสดุอื่นที่ต้องการ ทดลอง โดยตัวอย่างที่นำมาทดลองให้ผึ่งให้แห้งจนสามารถใช้เกรียงบดให้ร่วน ไปได้ หรือใช้ตุ๋นบอบดินให้แห้งก็ได้แต่ต้องใช้อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส (140 องศาฟาเรนไฮต์) แล้วบดให้เม็ดดินหลุดออกจากกัน โดยไม่ทำให้เม็ดดินแตก
- ในกรณีที่ขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุดโตกว่า 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ร่อนเอาดินที่ค้างบนตะแกรงนี้้ออกแล้วแทนด้วยดินที่ร่อนผ่านตะแกรงนี้แล้วค้างบนตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) จำนวนน้ำหนักเท่ากันใส่ลงแทนแล้วคลุกเคล้าให้ทั่วทำการแบ่งสี่ (quartering) หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง (sample splitter)
- ในกรณีที่ขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุดไม่โตกว่า 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ให้แบ่งตัวอย่างตามวิธีการแบ่งสี่หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง
- ในกรณีที่จะทำการทดสอบตามวิธี ก. 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

2.16.4 การทดสอบ

การทดสอบวิธี ก.

- นำตัวอย่างที่เตรียมมาพรมน้ำให้ทั่วเพื่อให้ดินชื้นโดยเมื่อคลุกผสมกันแล้วจะมีความชื้นต่ำประมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (optimum moisture content) ร้อยละ 4 ใส่ดินที่ผสมน้ำแล้ว ลงในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) ซึ่งมีปลอก (collar) สวมอยู่เรียบร้อยแล้ว โดยประมาณว่าเมื่อบดอัดแล้วจะเหลือดินสูง 1/5 ของความสูงของแบบ แล้วบดอัดโดยค้อนยกสูง 457 มม. (18 นิ้ว) จำนวน 25 ครั้ง ให้ทั่วผิวของดินในแบบ

- ทำซ้ำอีก 4 ครั้ง จนดินที่ถูกบดอัดแน่นในแบบมีความสูงกว่าแบบประมาณ 10 มม.
- ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดดินปาดแต่งหน้าดินในแบบให้เรียบเท่ากับระดับขอบบนของแบบ ถ้าดินก้อนใหญ่หลุดออกให้เติมดินตัวอย่างลงไปแทนแล้วลดให้แน่นพอควรจนเรียบแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เมื่อหักน้ำหนักของแบบออกจะได้น้ำหนักของดินขึ้น ต้องอ่านเครื่องชั่งละเอียดถึง 5 กรัม
- แกะดินออกจากแบบ แล้วผ่าตามแนวตั้งผ่านจุดศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างดิน เก็บดินจากที่ผ่าประมาณ 300 กรัม ใส่ตลับบรรจุดินชั่งน้ำหนักทันที อ่านละเอียดถึง 0.01 กรัม
- นำดินในตลับบรรจุดินไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส (230 ± 9 องศาฟาเรนไฮต์) อย่างน้อย 12 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักอ่านละเอียดถึง 0.01 กรัม
- บดดินตัวอย่างที่แกะออกจากแบบที่เหลือให้ร่วน แล้วคลุกผสมกับดินในคอนแรกให้เข้ากัน พรมน้ำให้ความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 ถึง 2
- ดำเนินการโดยเพิ่มน้ำทุกครั้งจนกว่าน้ำหนักดินที่บดอัดในแบบลดลง หรือไม่เปลี่ยนแปลง หรืออาจลดน้ำที่ผสมลงเมื่อพบว่า การเพิ่มน้ำแล้วน้ำหนักดินที่บดอัดในแบบกลับลดลง
- 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

2.16.5 การคำนวณ

- คำนวณหาค่าความชื้นในดินเป็นร้อยละ

$$W = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

เมื่อ W = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง

W1 = มวลของดินขึ้น หน่วยเป็นกรัม

W2 = มวลของดินอบแห้ง หน่วยเป็นกรัม

- คำนวณหาค่าความแน่นชื้น (WET DENSITY)

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

(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

2.16.6 การรายงาน

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

2.16.7 ข้อควรระวัง

- การประมาณปริมาตรน้ำที่ใช้ผสมดินที่เกาะติดกันเป็นก้อน (cohesive soil) ควรเพื่อให้ต่ำและสูงกว่าจำนวนน้ำ ที่ทำให้ได้ค่าความชื้นที่ทำให้ดินบดอัดได้

แน่นสูงสุด (OMC) ดินพวกดินทราย (cohesionless soil) ควรผสมน้ำตั้งแต่ น้อยที่สุด คือ เริ่มจากดินฝั่งแห้งจนกระทั่งมากที่สุดเท่าที่จะทำได้

- ในการบดอัดดินให้วางแบบบนพื้นที่มีมั่นคงแข็งแรง ราบเรียบ ขณะทำการบดอัดแบบต้องไม่กระดอนไปมา
- ควรเตรียมตัวอย่างให้เพียงพอ โดยให้มีตัวอย่างทดสอบทางด้านแห้งกว่า (dry side) ความชื้นที่ทำให้ดินบดอัดได้แน่นสูงสุด (OMC) ไม่น้อยกว่า 2 ตัวอย่าง และให้มีตัวอย่างทดสอบพอทดสอบทางด้านชื้นกว่า (wet side) ความชื้นที่ทำให้ดินบดอัดได้แน่นสูงสุด (OMC) 1 ตัวอย่าง
- ดินชนิดที่มีปริมาณดินเหนียวมาก (heavy clay) หลังจากฝั่งให้แห้งแล้วให้บดด้วยค้อนยาง หรือใช้เครื่องบด จนได้ตัวอย่างที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. (เบอร์ 4) มากที่สุดเท่าที่จะทำได้
- ปริมาตรของแบบ ให้ทำการวัดและคำนวณ เพื่อให้ได้ปริมาตรที่แท้จริงของแต่ละแบบ
- แบบที่ใช้งานแล้ว ต้องกลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 50 ของความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้

2.17 วิธีการทดลองเพื่อหาค่า C.B.R. : การทดลองที่ ทล.-ท. 109/2517

2.17.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้เป็นการหาค่าเปรียบเทียบ ค่าความสามารถในการรับน้ำหนัก (bearing value) กับวัสดุหินมาตรฐานเพื่อทดสอบวัสดุมวลรวมดิน (soil aggregate) หินคลุกหรือวัสดุอื่นใด เมื่อทำการบดอัดวัสดุนั้นโดยใช้ตุ้มบดอัดในแบบ (mold) เมื่อมีความชื้นที่ความแน่นแห้งสูงสุด (Optimum Moisture Content) หรือปริมาณอื่นใด เพื่อนำมาใช้ออกแบบโครงสร้างของถนน และเพื่อใช้ควบคุมงาน เมื่อบดอัดให้ได้ความแน่นและความชื้นตามต้องการ

การทดสอบ ซี.บี.อาร์. อาจทำได้ 2 วิธี คือ

วิธี ก. การทดสอบแบบแช่น้ำ (soaked)

วิธี ข. การทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (unsoaked)

ถ้าไม่ระบุวิธีใด ให้ใช้วิธี ก.

2.17.2 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- loading; device แบบ hydraulic jack หรือ screw jack มีอุปกรณ์วัดแรงได้ ไม่น้อยกว่า 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) มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 134.9 ($5 \frac{5}{16}$ นิ้ว) มีความสูงขนาดต่าง ๆ
- ตู้น้ำหนัก 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) เป็นเหล็กทรงกระบอกแบบเส้นผ่าศูนย์กลาง 149.2 มม. ($5 \frac{7}{8}$ นิ้ว) มีรูกลวง เพื่อให้ท่อนกด (piston) ลอดไปได้หนักแผ่นละ 2,268 กรัม (5 ปอนด์)
- ท่อนกด ทำด้วยโลหะทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 49.5 มม. (1.95 นิ้ว) มีเนื้อที่หน้าตัด 1,935.5 ตร.มม. (3 ตร.นิ้ว) ยาวไม่น้อยกว่า 102 มม. (4 นิ้ว)
- เครื่องดันตัวอย่างเป็นเครื่องดันดินออกจากแบบภายหลัง เมื่อทดสอบเสร็จแล้ว
- เครื่องชั่งแบบบาลานซ์ (balance) มีขีดความสามารถชั่งได้อย่างน้อย 20 กก. ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กิโลกรัม
- เครื่องชั่งแบบสเกล (scale) หรือแบบบาลานซ์ มีขีดความสามารถชั่งได้อย่างน้อย 1,000 กรัม ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม
- ตู้อบ (oven) ต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
- เหล็กปาด มีความยาวไม่น้อยกว่า 300 มม. และไม่ยาวเกินไปหนาประมาณ 3.0 มม. (0.12 นิ้ว)
- เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง
- ตะแกรงร่อนดินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 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 ถาดช้อน พลั่ว เกรียง คอนยาง ถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำ
- คลັບบรรจุดินสำหรับใส่ตัวอย่างดิน เพื่ออบหาจำนวนน้ำในดิน
- นาฬิกาจับเวลา

2.17.3 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดสอบ

กระดาษกรองอย่างหยาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มม. (6 นิ้ว)

2.17.4 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างได้แก่ ดิน หินคลุก หรือวัสดุมวลรวมดินหรือวัสดุอื่นใดที่ต้องการทดสอบ ให้เตรียมตัวอย่าง ดังนี้

- วัสดุตัวอย่าง ก่อนจะนำมาทดสอบจะต้องปล่อยให้แห้ง (air dry) ในห้องปฏิบัติการทำการแบ่งสี่ (quartering) แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้ว ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้วให้ทิ้งไปและชดเชยด้วยดินที่ผ่านตะแกรง เบอร์ 3/4 นิ้ว แต่ค้างบนตะแกรง เบอร์ 4 ด้วยจำนวนน้ำหนักเท่ากัน
- หาปริมาณความชื้นที่ความแน่นสูงสุด โดยวิธีการทดสอบความแน่นตามทล.-ม.(ท) 501.1-2545 หรือ ทล.-ม.(ท) 501.2-2545

2.17.5 การทดสอบ

สำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ต้องมีการแช่น้ำ (unsoakedc.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 พร้อมกับซ่อมแต่งผิวบนของดินตัวอย่าง ให้เรียบเสมอกับปากแบบ

- ถอดฐานแบบ และแท่งโลหะรองออก นำแบบและดินไปชั่งหาน้ำหนัก เพื่อจะนำไปหาความแน่นขึ้น (wet density)
- เอากระดาษกรองวางบนฐานแบบ เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะแบบติดแผ่นเหล็กประกอบแบบ ที่มีดินอัดแน่นนี้เข้ากับฐานแบบ โดยให้ปากแบบด้านที่มีดินเสมอปากวางบนฐานแบบ และส่วนที่มีช่องว่างอยู่ด้านบนสำหรับการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ
- วางแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนัก (surcharge) จำนวน 2 ชั้น สำหรับวัสดุพื้นทาง, วัสดุรองพื้นทาง, วัสดุคัดเลือดและจำนวน 3 ชั้น 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 ชั้น สำหรับวัสดุพื้นทาง, วัสดุรองพื้นทาง, วัสดุคัดเลือด และจำนวน 3 ชั้น สำหรับวัสดุคันทางลงบนดินตัวอย่างใส่แผ่นวัดการพองตัว สำหรับวัดอัตราการบวมของดิน ซึ่งมีด้ามขัดเกลียวขึ้นลงได้ติดอยู่กลางแผ่น ก่อนวางแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักลงบนดินตัวอย่างจะต้องเอากระดาษรองวางกันได้แผ่นนี้เสียก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้ดินติดแน่นกับแผ่นเหล็กหลังจากแช่น้ำแล้ว
- แช่แบบที่เตรียมไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ ให้น้ำท่วมแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักประมาณ 1 นิ้ว ใช้มาตรวัดอ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว ยึดติดกับสามขา แล้ววางบนปากแบบ จัดให้ปลายของมาตรวัดแตะสัมผัสกับก้านของแผ่น วัดการพองตัว เพื่อวัดหาค่าการพองตัวของดินต่อไป

- จัดค่าการขยายตัวจากมาตรวัดทุกวัน จนครบ 4 วัน (ถ้าหากค่าการพองตัวคงที่ อาจหยุดอ่านได้ หลังจากแช่น้ำแล้ว 48 ชั่วโมง)
- ยกแบบออกจากน้ำและตะแกรงแบบ เพื่อรินน้ำทิ้งและปล่อยให้แห้ง ประมาณ 15 นาที เพื่อให้น้ำไหลออกจากแบบ
- นำแบบพร้อมดินไปชั่งน้ำหนัก
- เสร็จแล้วถอดแบบออกจากเครื่องทดสอบ เก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 4.75 มม. หรือประมาณ 300 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 19.0 มม. แล้วนำไปหาความชื้น
- เขียนกราฟระหว่างน้ำหนักกด และค่าการจมตัว (stress vs penetration) เพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. ต่อไปสำหรับการเขียนกราฟระหว่างน้ำหนักกด 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

2.17.6 การคำนวณ

- คำนวณหาค่าความชื้นในดินเป็นร้อยละ

$$W = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

เมื่อ W = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

M_1 = มวลของดินชื้น หน่วยเป็นกรัม

M_2 = มวลของดินอบแห้ง หน่วยเป็นกรัม

- คำนวณหาค่าความแน่นชื้น (wet density)

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

เมื่อ γ_w = ความแน่นชื้นของดิน หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

A = มวลดินชื้นที่บดอัดในแบบ 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

- คำนวณหาค่าการขยายตัว (Swelling)

$$\text{ค่าการขยายตัวร้อยละ} = \frac{\text{ค่าการขยายตัว(ม.ม.)}}{\text{ความสูงของแท่งตัวอย่าง}}$$

ค่าการขยายตัว (ม.ม.) = ผลต่างระหว่างการอ่านค่าที่มาตรวัด ครั้งแรกและครั้งสุดท้าย

- คำนวณหาค่า ซี.บี.อาร์.

ในการคำนวณหาค่า ซี.บี.อาร์. ให้ถือแรงมาตรฐาน (Standard load) ดังนี้

ตารางที่ 2.4 น้ำหนักมาตรฐานตากการกดก่อนเหล็กขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้วของวัสดุหิน
คลุก

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

จากสูตร

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

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

$Y =$ ค่าหน่วยแรงมาตรฐาน (Standard Unit Load) กก./ตร.ซม. (จากตารางข้างต้น)

2.17.7 การรายงาน

ในการทำการทดสอบ ซี.บี.อาร์. ให้รายงาน ดังนี้

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

เกณฑ์การตัดสินและความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

ค่า ซี.บี.อาร์. เป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการรับน้ำหนักกับวัสดุหินมาตรฐาน ดังนั้น จึงไม่มีการกำหนดเกณฑ์ตัดสินและความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

2.17.8 ข้อควรระวัง

- สำหรับดินจำพวกดินเหนียวมาก (heavy clay) หลังจากตากแห้งแล้วให้ทุบด้วยก้อนยาง จนได้ตัวอย่างผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้
- 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 หรือเกิดจากการอ่อนยุบที่ผิวหน้าของตัวอย่างเนื่องจากการแช่น้ำ ให้ทำการแก้โดยลากเส้นตรงให้สัมผัสกับเส้นที่ชันที่สุดของส่วนโค้งของเส้นกราฟ ไปตัดกับแกนตามแนวราบ คือเส้นที่ลากผ่านค่าน้ำหนัก

มาตรฐาน เท่ากับศูนย์ ต่อจากนั้นให้เลื่อนค่าศูนย์ของค่าการจมตัวไปที่จุดที่ตัด แล้วจึงหาค่า ซี.บี.อาร์. ที่ปรับค่า (corrected c.b.r. value) ต่อไป

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

2.18 วิธีการทดลองหาค่าความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย (field density test) :การทดลองที่ ทล.-ท. 603/2517

2.18.1 ขอบข่าย

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

2.18.2 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 3/4 นิ้ว) สูง 136.5 มม. (5 3/8 นิ้ว) ปลายอีกข้างหนึ่งมีเกลียว สำหรับต่อกับขวด ขณะทำการทดสอบรอยต่อระหว่างขวด และกรวยต้องสนิท ในกรณีที่มีช่องว่างหรือเคลื่อนตัวได้ ต้องใส่แหวนยางหรือ ปะเก็น (gasket) รองลิ้น จะต้องมีที่บังคับให้หยุดเมื่อเปิด หรือ ปิดจนสุดรูทรงกระบอกแล้ว
- 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) สำหรับวางปากกรวยให้สนิทขอบขอบแผ่นฐานยกสูงขึ้น เพื่อความสะดวกในการเก็บดินตัวอย่าง หมายเหตุ ชุดเครื่องทดสอบความแน่นนี้ ใช้กับดินตัวอย่างประมาณ 2,800 ลูกบาศก์เซนติเมตร (0.01 ลบ.ฟ.) อาจดัดแปลงชุดเครื่องมือให้เล็กลงหรือใหญ่ขึ้นได้แล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งานแต่ละชนิด
- ทราย ใช้ทรายออกตาวา (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) เล็กน้อยและมีความแน่นแบบบด (bulk density) เปลี่ยนแปลงได้ไม่เกินร้อยละ 1
- เครื่องชั่ง ที่สามารถชั่งได้หนักถึง 10 กก. อ่านได้ละเอียดถึง 1.0 กรัม
- เครื่องชั่งที่สามารถชั่งได้หนักถึง 500 กรัม อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
- อุปกรณ์ทำให้ดินแห้ง ได้แก่ เตาน้ำมันก๊าด เตาแก๊ส กระทะควั่วดิน เป็นต้น หรืออาจใช้ตู้อบไฟฟ้า ตู้อบน้ำมันก๊าด ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ที่อุณหภูมิ 100 ± 5 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้ดินตัวอย่างแห้งสำหรับความชื้นได้
- อุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ เช่น ช้อนตักดิน ตลับบรรจุดินพร้อมฝาปิด ภาชนะสำหรับใส่ดิน เกรียง สิว 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

2.18.3 การทดสอบ

วิธีหาปริมาตรขวด พร้อมกรวย จนถึงรูลิ้นที่ปิด ดำเนินการ ดังนี้

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

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความแน่นของน้ำ

อุณหภูมิ		ปริมาณของน้ำ ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ลบ.ซม./กรัม (T)
องศาเซลเซียส	องศาฟาเรนไฮต์	
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 ให้ทำเครื่องหมายไว้ด้วยว่าเกลียวของขวดและกรวยเคลือบตัวหรือไม่ เกลียวต้องไม่ขยับในขณะที่ทดสอบ เพื่อให้ปริมาตรของขวดมีค่าคงที่ตลอดเวลาที่ทดสอบ

วิธีตรวจสอบความแน่นแบบ บัลค์ ของทราย (bulk density of sand) ดำเนินการดังนี้

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

วิธีหาน้ำหนักของทรายที่บรรจุเต็มกรวย ดำเนินการ ดังนี้

- ดำเนินการชั่งน้ำหนักขวด พร้อมกรวยและทรายที่บรรจุอยู่เต็มขวด
- คิวกรวยลงบนแผ่นฐาน ให้ปากกรวยตรงกับร่องของแผ่นฐาน โดยแผ่นฐานต้องวางอยู่บนพื้นที่ราบเรียบสะอาดและตั้งสนิทกับพื้น
- เปิดลิ้นให้ทรายไหลจนเต็มกรวยโดยไม่ให้ขวดทรายกระเทือนเมื่อทรายหยุดไหลแล้วจึงปิดลิ้น
- นำขวดทรายที่เหลือไปชั่งน้ำหนัก นำมาหักออกจากรายที่หาได้จะได้ น้ำหนักของทรายที่บรรจุเต็มกรวย
- ให้ทำการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักของทรายที่บรรจุเต็มกรวย

วิธีหาค่าความแน่นของดินในสนาม ดำเนินการดังนี้

- ปรับแต่งพื้นผิวบริเวณที่จะทดสอบให้ราบเรียบ สะอาด
- วางแผ่นฐานลงบนพื้นที่จะทดสอบแล้วตรึงแผ่นฐานให้แน่น
- เจาะดินตรงศูนย์กลางแผ่นฐานเป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับศูนย์กลางของแผ่นฐาน โดยเจาะเป็นแนวตั้ง ตลอดชั้นวัสดุที่ทดสอบ หรือลึกประมาณ 10-15 ซม. แล้วแต่ชนิดของงาน แต่งหลุมให้เรียบร้อยเพื่อให้ทรายไหลลงแทนที่ได้สะดวก

- นำดินที่เจาะขึ้นมาทั้งหมดไปชั่งหาน้ำหนัก จะได้น้ำหนักของดินชั้น และ ภาชนะใส่ดิน เมื่อหักน้ำหนักภาชนะที่ใส่ดินออกแล้ว จะเหลือน้ำหนักรวมของดินชั้น
- คลุกดินที่เก็บจากหลุมในภาชนะใส่ดินให้ทั่วแล้วเก็บใส่ตลับบรรจุดินอย่างน้อย 100 กรัม ปิดฝาตลับแล้วนำไปชั่งและอบให้แห้งคำนวณหาปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในดินเป็นร้อยละ ของน้ำหนักดินที่อบแห้ง
- คำนวณที่บรรจุทรายอยู่เต็มพร้อมกรวยซึ่งชั่งน้ำหนักไว้แล้วลงบนร่องของแผ่นฐาน เปิดลิ้นให้ทรายไหลลงจนเต็มหลุม โดยไม่ให้ขวดทรายกระเทือน เมื่อทรายหยุดไหลแล้วจึงปิดลิ้น นำขวดทรายที่เหลือไปชั่งน้ำหนัก เก็บทรายสะอาดเพื่อใช้งานต่อไป ส่วนทรายที่ขึ้นหรือสกปรก ให้นำไปทำความสะอาด นำน้ำหนักในตอนหลังหักออกจากน้ำหนักที่ชั่งได้ก่อนคำนวณกรวย จะได้ น้ำหนักของทรายที่ไหลออกไปจากขวด
- นำน้ำหนักที่ได้ไปหักออกจากน้ำหนักของทรายที่ไหลออกไปจากขวด แล้วจะ ได้น้ำหนักทรายที่แทนที่ดินในหลุม

2.18.4 การคำนวณ

ความแน่นแบบ 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 = ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดิน
อบแห้ง

W_1 = น้ำหนักของดินชื้น (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของดินอบแห้ง (กรัม)

- หาปริมาตรของหลุม

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

เมื่อ V = ปริมาตรของหลุม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

M_2 = น้ำหนักทรายที่แทนที่ดินในหลุม (กรัม)

γ_s = ความแน่นแบบบัลค์ของทราย

(กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

- ความแน่นขึ้นของดินที่ขุดออกจากหลุม

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

เมื่อ γ_w = ความแน่นขึ้นของดินที่ขุดออกจากหลุม
(กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

P = น้ำหนักรวมของดินชื้นที่ขุดออกจากหลุม (กรัม)

V = ปริมาตรของหลุม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

- ความแน่นแห้งของดินที่ขุดออกจากหลุม

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

เมื่อ γ_d = ความแน่นแห้งของดินที่ขุดออกจากหลุม
(กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

γ_w = ความแน่นขึ้นของดินที่ขุดออกจากหลุม
(กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

- ร้อยละของการบดอัด

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

เมื่อ P_c = ร้อยละของการบดอัด

γ_d = ความแน่นแห้งของดินที่ขุดออกจากหลุม
(กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

γ_m = ความแน่นแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างชนิดเดียวกับ
ดินที่ขุดออกจากหลุม (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
ตามวิธีทดสอบ ทล.-ม.(ท) 501.1-2545 หรือ
ทล.-ม.(ท) 501.2-2545

2.18.5 การรายงาน

- ให้รายงานชื่อโครงการ สายทาง ชั้นของวัสดุ ชนิดของวัสดุ รายงาน
เจ้าหน้าที่ที่ทดสอบ วันเวลาที่ทดสอบ ความแน่นของทรายที่หาได้ ตำแหน่ง
ที่ทดสอบ ความหนาของชั้นต่าง ๆ ตามสัญญา และความหนาจริงในการ
ก่อสร้าง และรายละเอียดอื่น ๆ
- ค่าความแน่นของดินให้ใส่ทศนิยม 3 ตำแหน่ง และร้อยละของการบดอัดให้
ใส่ทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2.18.6 ข้อควรระวัง

- แผ่นฐานที่วางบนพื้นทดสอบต้องตรึงให้แน่น
- พื้นผิวที่ทดสอบควรราบเรียบได้ระดับ สะอาด
- ขณะทดสอบต้องไม่ให้ขวดทรายกระเทือน
- หาค่าความแน่นแบบบัลค์ ของทราย อย่างน้อยสัปดาห์ละ 1 ครั้ง
- ทรายที่ใช้ทดสอบต้องสะอาดและแห้ง
- ต้องปิดลิ้นก่อนกว่าขวดทรายทุกครั้ง
- ในขณะที่ขนย้ายเครื่องมือให้อุ้มตัวขวดโดยตรง ห้ามหิ้วที่กรวยเพราะตรง
บริเวณลิ้นไม่แข็งแรงอาจขาดได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีทรายบรรจุอยู่เต็มขวด

2.19 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนามโดยวิธี Nuclear Gauge

2.19.1 หลักการทั่วไปของเครื่องมือ Nuclear Gauge

Nuclear Gauge เป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถวัดหาปริมาณความชื้น ความ
หนาแน่นและการอัดแน่นของวัสดุ เช่น ดิน, หิน คอนกรีตและยางมะตอยหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มี
ความชื้นและความหนาแน่นในช่วงที่เครื่องมือกำหนดไว้ ในการวัดความแน่นนั้นใช้รังสีแกมมา
หรือโพตอนจากต้นกำเนิดรังสี คือ ซีเซียม 137 (Cs-137) ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีชนิดที่มีความ
แรงของรังสีในระดับที่ต่ำ มีค่าครึ่งชีวิต 30 ปี ความแรงรังสี 8mCi (มิลลิวูรี) ส่วนการวัดหา

ปริมาณความชื้นในวัสดุนั้นใช้รังสีรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี คือ อเมอริเซียม 241 และ เบอริลเลียม (Am 241:Be) มีค่าครึ่งชีวิต 432 ปี ความแรงแรงรังสี 40 mCi (มิลลิคูรี) วิธีการทดสอบได้ผ่านการรับรองให้เป็นเครื่องมือในการควบคุมการบดอัดตามมาตรฐาน ASTM D2922, D2950, D3017 และ D-1040

ส่วนประกอบของเครื่องมือนิวเคลียร์จะมีตัวต้นกำเนิดรังสี ถูกบรรจุอยู่ในแคปซูลสเตนเลสหนาสองชั้น (เป็น Seal Source ซึ่งไม่สามารถรั่วออกมาได้) ซีเซียม 137 (Cs-137) เชื่อมติดอยู่กับปลายแท่งสเตนเลสส่วนอเมอริเซียม 241 และเบอริลเลียม (Am 241:Be) เชื่อมติดอยู่กับฐานภายในตัวนิวเคลียร์เกจ การวัดความหนาแน่นทำได้โดยการปล่อยรังสีแกมมาผ่านชั้นความหนาของวัสดุที่ต้องการทดสอบ จากนั้นตัวตรวจวัด (Detector) ซึ่งจะตรวจนับรังสีตามเวลาที่กำหนดแล้วคำนวณค่าตามคุณสมบัติของรังสีที่ผ่านตัวกลางโดยนำค่าที่ได้จากการตรวจนับไปเปรียบเทียบกับค่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีกับความหนาแน่นออกมาเป็นค่าความหนาแน่นที่เราต้องการวัด 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

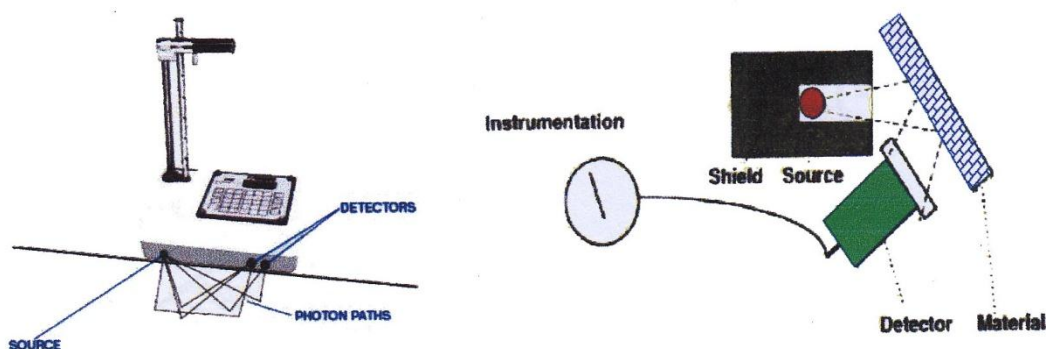
วิธีวัดแบบ backscatter mode เป็นวิธีการทำงานที่รวดเร็วและยังไม่เป็นการทำลายชั้นทาง เพราะจะวางเครื่องมืออยู่ชั้นทางที่ต้องการทดสอบโดยไม่มีการขูดหรือตอกที่ชั้นทาง ตำแหน่งของ source rod จะอยู่ที่ต่ำจากตำแหน่ง safe position ลงมาหนึ่งชั้นซึ่งจะทำให้ทั้งต้นกำเนิดรังสีแกมมาและ Detectors (ตัวตรวจจับรังสี) จะยังคงติดอยู่ที่ภายในตัว gauge ซึ่งวางอยู่บนระนาบชั้นวัสดุที่ต้องการทดสอบ การตรวจนับรังสีเป็นการอ่านค่า ของ detector จากการสะท้อนกลับ (scatter of reflect) การวัดค่าโดยใช้ backscatter mode นั้นโดยปกติใช้กับชั้นโครงสร้างที่ไม่หนา มาก 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 เมื่อทำการทดสอบรังสีแกมมาจะถูกปล่อยผ่านไปยังชั้นวัสดุและชนกับอิเล็กตรอนจนทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป ยิ่งวัสดุมีความหนาแน่นมากเท่าไรก็จะยิ่งทำให้เกิดการชนระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอนมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ลดจำนวนโปรตอนที่จะเหลือให้ detector ที่ติดอยู่ที่ฐานของ gauge ตรวจพบ ดังนั้นจำนวนนับรังสีแกมมา

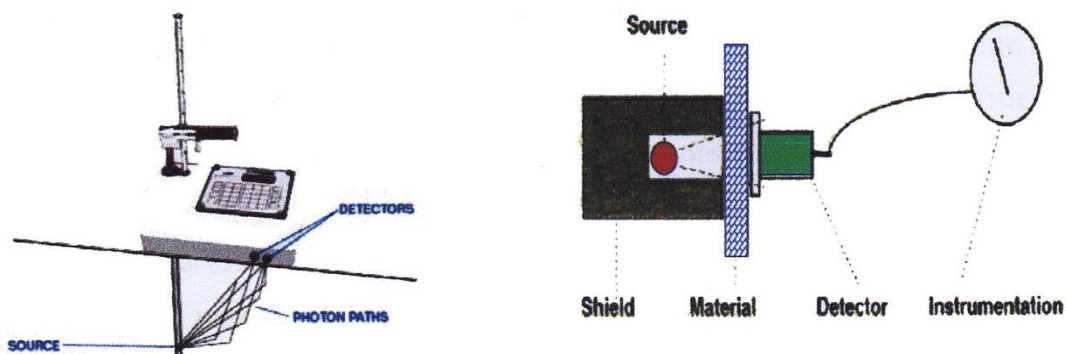
จากหัววัดรังสี (detector) จึงเป็นอัตราส่วนผกผันกับความหนาแน่นของวัสดุ จากการปรับเทียบ gauge calibration (ซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนับรังสีในแต่ละระดับความลึกกับความหนาแน่นของวัสดุที่ทำการทดสอบ) และใช้โปรแกรมคำนวณจะทำให้สามารถหาค่าความหนาแน่นจากค่าที่ตรวจจับได้จากหัววัดรังสี วิธีนี้จะได้ค่าที่เป็นค่าเฉลี่ยของชั้นวัสดุที่ความลึกจากแหล่งกำเนิดรังสีกับตำแหน่งที่ detector ดังนั้นจะได้ค่าที่คลาดเคลื่อนน้อยกว่า จะลดความคลาดเคลื่อนจากผิวที่ขรุขระลงได้ด้วย การทดสอบโดยใช้วิธีนี้ใช้ได้กับชั้น aggregate ที่หนาหรือแม้กระทั่งชั้น ผิว asphalt และ concrete ก็ใช้ได้

ค่าความลึกที่ทดสอบโดยวิธี direct transmission นั้น จะสามารถเซตความลึกได้ 2 แบบ คือ automatic depth เครื่องวัดจะทำการอ่านค่าความลึกของตำแหน่ง source rod ที่เคลื่อนที่ลงไปจากผิวโดยใช้ depth sensor และอีกแบบหนึ่งก็คือเซตความลึกแบบ manually depth ซึ่งผู้ใช้จะต้องป้อนค่าระยะความลึกของ source rod ที่เคลื่อนที่ลงไปวัสดุทดสอบ

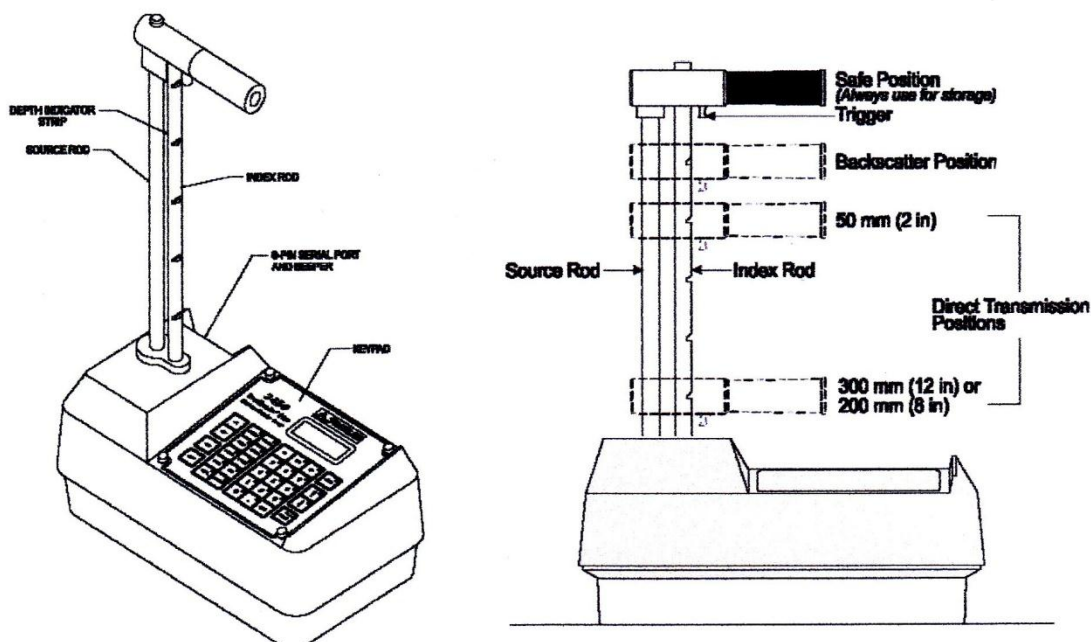
สาเหตุที่ต้องมีการบอกค่าความลึกแบบ manually depth นั้นจะใช้ในกรณีที่ตัวเซนเซอร์วัดความลึก (depth sensor) เสียหาย บอกค่าความลึกไม่ได้ ผู้ทดสอบจะต้องใส่ค่าความลึกที่ถูกต้องเข้าไปในเครื่องทดสอบ จากนั้นเครื่องจะคำนวณค่าความหนาแน่นได้ถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 2.31-2.33



รูปที่ 2.31 รูปแบบของการจัดระบบการวัดสำหรับการกระเจิงกลับของรังสีกับวัตถุเทียบได้กับการใช้เครื่องมือวัดในการวัดแบบ backscatter



รูปที่ 2.32 รูปแบบของการจัดระบบการวัดสำหรับการใช้รังสีส่งผ่านวัตถุเทียบได้กับการใช้เครื่องมือวัดในการวัดแบบ direct transmission



รูปที่ 2.33 รูปร่างลักษณะของเครื่องมือและตำแหน่งของ source rod positions ในการใช้งานที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน

ในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ทำให้เกิดรังสีที่นำมาใช้ในการทดสอบความแน่นในสนามอธิบายได้ดังนี้คือ เมื่อนิวเคลียสของตัวต้นกำเนิดรังสี เช่น ซีเซียม 137 ($cs - 137$) ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีมีการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติเพื่อให้เกิดความเสถียร นิวเคลียสซึ่งยังอยู่ในสถานะที่ต้นตัวก็จะคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีแกมมา เพื่อที่จะได้เป็นนิวเคลียสที่มีอยู่ใน

สภาพปกติสำหรับรังสีแกมมาเองนี้มีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก คืออยู่ระหว่างประมาณ 0.001 อังสตรอม (angstrom) ถึง 1.5 อังสตรอม ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$)

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมและค่าครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสีนั้น โดยอาศัยความจริงที่ว่า โอกาสที่นิวเคลียสจะสลายต่อ 1 หน่วยเวลา มีค่าคงที่ เรียกค่าคงที่นี้ว่า ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant) ใช้สัญลักษณ์ λ มีหน่วยเป็น เวลา^{-1} โดยกำหนดว่าเมื่อเวลา t มี $N(t)$ อะตอม ตามคำจำกัดความของค่าคงที่ของการสลาย ในระหว่างเวลา t ถึง $t+dt$ คือช่วงเวลา dt จำนวนนิวคลีไอสลายได้ $\lambda(t)dt$

อัตราที่อะตอมสลายตัวจะเป็น $\lambda N(t)$ ครั้งต่อ 1 หน่วยเวลา อัตราการสลายนี้ เรียกว่า “ความแรง หรือกัมมันตภาพ” (Activity) ของสารตัวอย่าง ใช้สัญลักษณ์ A ดังนั้นความแรงเมื่อเวลา t เขียนได้ว่า

$$A(t) = \lambda N$$

เนื่องจาก $\lambda N(t)dt$ นิวคลีไอ สลายในช่วงเวลา dt จะทำให้จำนวนนิวคลีไอที่เหลืออยู่ลดน้อยลง ดังนั้นในช่วงเวลา dt สลายได้

$$-dN(t) = \lambda N(t)dt$$

โดยการอินทิเกรต จะได้

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

(2.13)

เมื่อ N_0 เป็นจำนวนอะตอมเมื่อเวลา $t = 0$

คูณทั้งสองข้างของสมการ ด้วย λ , จะได้ความแรงของสารตัวอย่างเมื่อเวลา t คือ

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

(2.14)

เมื่อ A_0 คือ ความแรงเมื่อเวลา $t = 0$

นั่นคือความแรงจะลดลงเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) กับเวลา

เวลาที่ทำให้จำนวนอะตอมของสารกัมมันตรังสีลดลงครึ่งหนึ่งเรียก “ครึ่งชีวิต” (half life) ใช้สัญลักษณ์ $T_{1/2}$ ดังนั้น

$$N\left(T_{\frac{1}{2}}\right) = \frac{N_0}{2}$$

หรือ

$$A\left(T_{\frac{1}{2}}\right) = \frac{A_0}{2}$$

ใช้ความหมายนี้แทนในสมการ (2.4) จะได้

ได้ลอกทั้งสองข้างของสมการ แล้วแก้สมการ หาครึ่งชีวิต จะได้

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

หรือ

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.15)$$

ในสเปกของเครื่องมือ Nuclear Gauge ที่ใช้ห้อง troxler รุ่น 3450 นั้นใช้ซีเซียม 137 ปริมาณหนึ่งซึ่งทำให้มีค่าความแรงรังสี หรือกัมมันตภาพ (activity) 8 mCi ± ร้อยละ 10

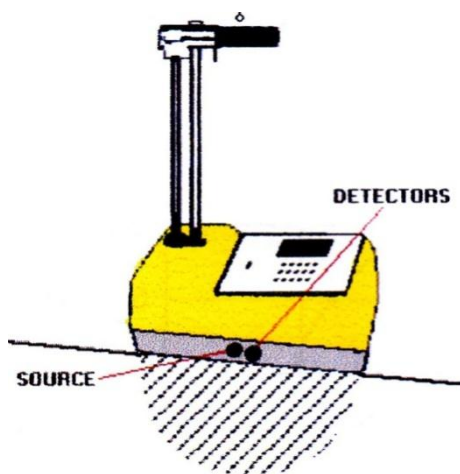
โดยที่ 1 Ci (curie) = มีค่าเท่ากับความแรงที่นิวเคลียสสลายได้ 3.7×10^{10} ครั้งต่อวินาที

2.19.2 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 (ไอโซโทปของธาตุฮีเลียมที่มีเลขมวลหรือมวลอะตอมเท่ากับ 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 เมื่อเจอกับอะตอมไฮโดรเจนที่มีอยู่มาก ดังแสดงในรูปที่ 2.34

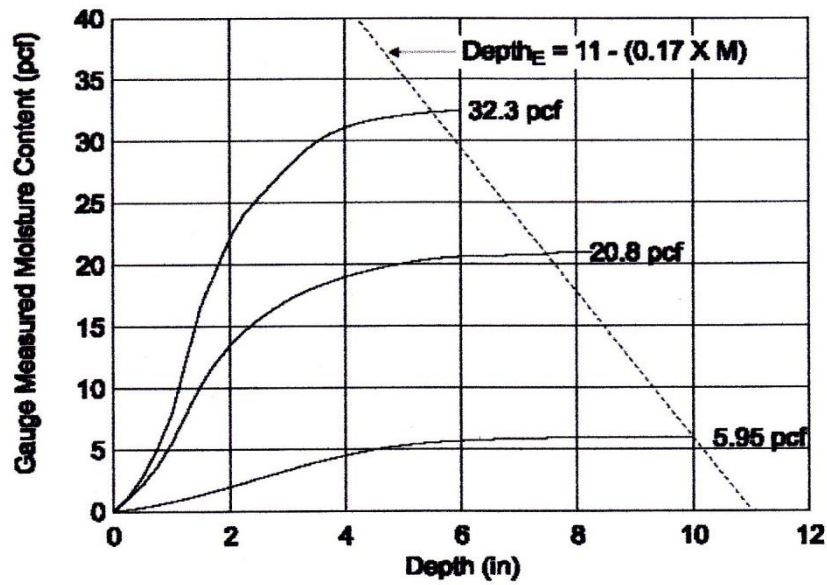


รูปที่ 2.34 การจัดเครื่องมือทดสอบเพื่อหาค่าความชื้นในสนาม

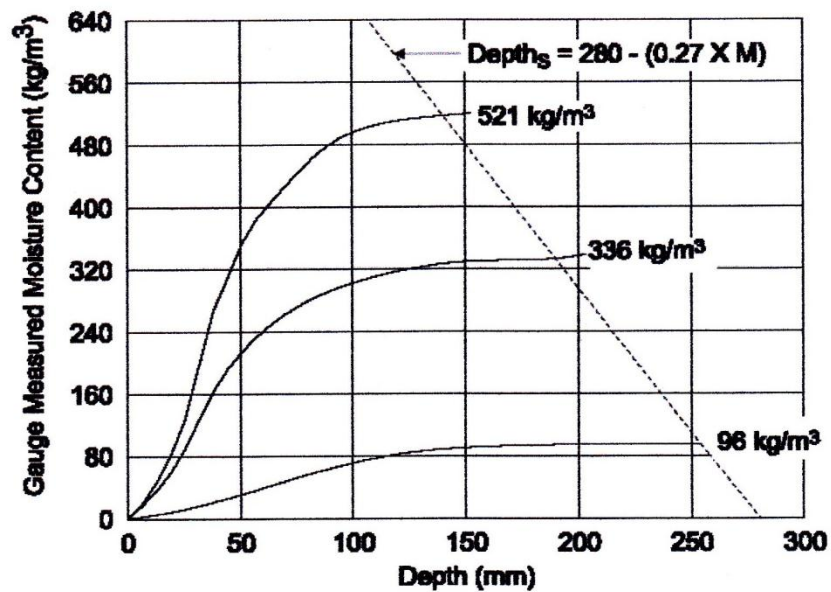
สมการต่อไปนี้จะแสดงค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนาม

$$\text{depth (inches)} = 11 - (0.17 \times M) \quad M \text{ คือ ค่าความชื้นในหน่วยpcf รูปที่ 2.35}$$

$$\text{depth (mm)} = 280 - (0.27 \times M) \quad M \text{ คือ ค่าความชื้นในหน่วย kg/m}^3 \text{ รูปที่ 2.36}$$

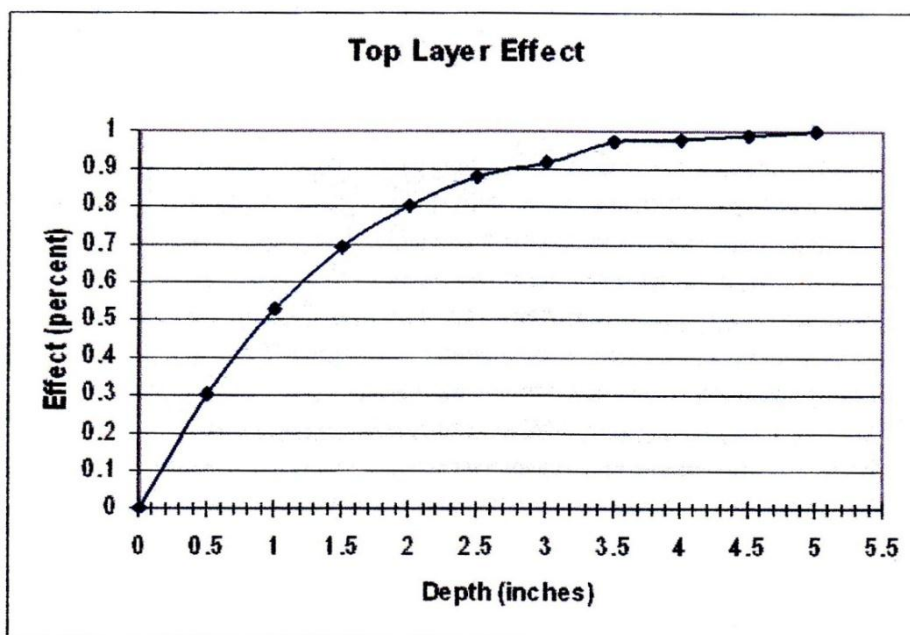


รูปที่ 2.35 กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย pcf



รูปที่ 2.36 กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย kg/m^3 top layer effect

ในการวัดค่าความชื้นในสนามนั้น หากเราเลือกใช้การวัดแบบ backscatter จำเป็นต้องรู้ถึงผลกระทบที่เรียกว่า top layer effect คือ ที่ความหนา 5 ซม. แรกจะมีผลต่อการวัดประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความหนา 5 ซม. ด้านล่างจะมีผลต่อการวัดประมาณร้อยละ 18 ดังรูปที่ 2.37

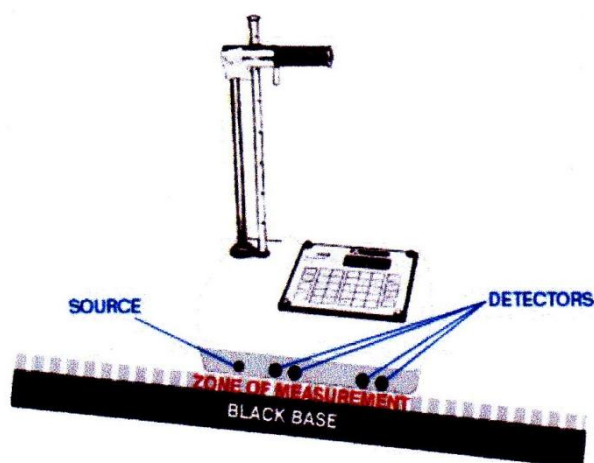


รูปที่ 2.37 กราฟผลกระทบที่เรียกว่า top layer effect ที่มีต่อการวัดค่าความแน่นแบบ backscatter ที่ความหนาต่าง ๆ กัน

ดังนั้นในการวัดค่าความแน่นในสนามแบบ backscatter จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องปรับผิวหน้าพื้นที่ที่จะวัดให้มีความเรียบ เพื่อไม่ให้มีช่องว่างในขณะที่วางฐานเครื่องทดสอบลงไป เพราะจะทำให้มีผลกระทบอย่างมากต่อค่าที่วัดออกมา ทำให้ค่าที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

2.19.3 วิธีการวัดแบบ Thin Layer

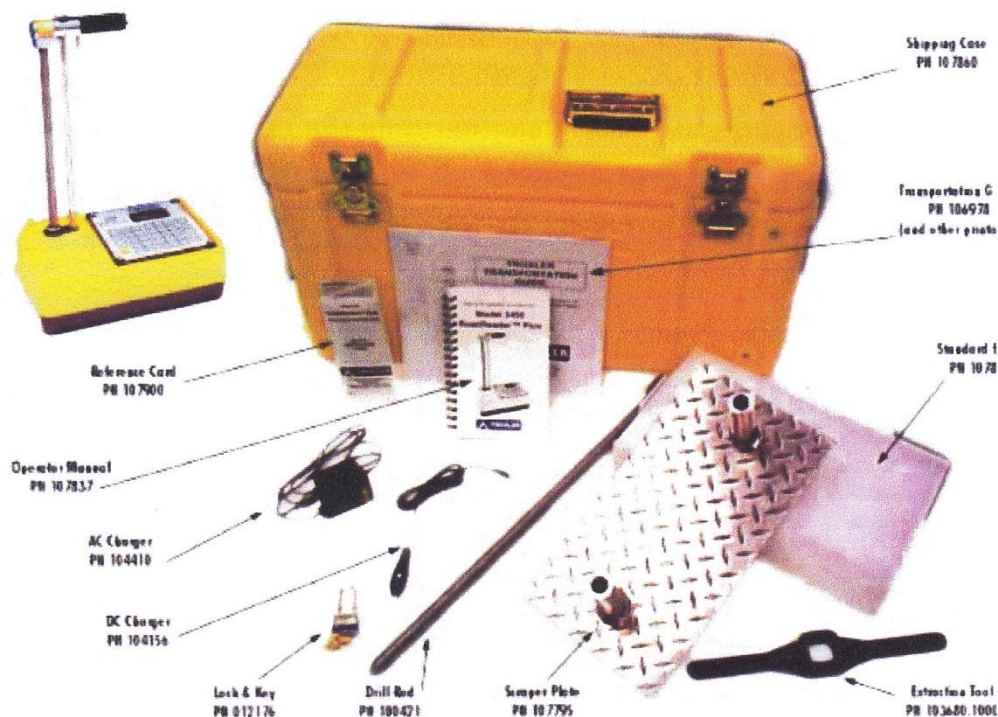
เครื่องมือวัดความแน่นในสนามยี่ห้อ troxler รุ่น model 3450 มี g-m tubes ที่ใช้เป็น photon detector อยู่ 2 ตำแหน่ง เมื่อมีการทำงานแบบที่วัดรังสีสะท้อนกลับ ตัวที่อยู่ไกลไปจากแหล่งกำเนิดมากกว่าจะมีความเหมาะสมมากกว่าในการวัดรังสีที่สะท้อนมาจากวัสดุที่อยู่ลึกกว่า ส่วนตัวที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดรังสีมากกว่าเหมาะกับการวัดรังสีที่สะท้อนมาจากวัสดุที่อยู่ตื้นกว่า ในการทดสอบสามารถเลือกการทดสอบชนิดเป็นชนิด thin layer ได้เพื่อจะสามารถวัดค่าที่ความหนาที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 การจัดตำแหน่งของเครื่องมือเพื่อทำการทดสอบในโหมด Thin Layer

2.19.4 ส่วนประกอบของชุดวัดความชื้นและความหนาแน่น

Nuclear gauge เป็นเครื่องมือวัดประเภท portable (เคลื่อนย้ายได้) สามารถอ่านข้อมูลได้ในการวัดความชื้นหรือความหนาแน่น ภายในบรรจุสารกัมมันตรังสี วงจอร์เจียโคโรนิก ชุดแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ด้านหลังจะมีสลักบอกเกี่ยวกับตัวเครื่อง เช่น ความแรงของรังสี หมายเลขเครื่อง Reference block ใช้ในการปรับตั้งมาตรฐานการนับเพื่อเช็คการทำงานของเครื่องว่าพร้อมหรือไม่ ก่อนที่จะนำไปใช้งาน หรือเป็นการปรับแก้ไขค่าการวัดให้ถูกต้องจากที่สารรังสีลดลงไปตามเวลา Scaper 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 2.39



รูปที่ 2.39 ส่วนประกอบของชุดวัดความชื้นและความหนาแน่นของเครื่องมือ

2.19.5 การเตรียมใช้เครื่องมือ

ในขณะที่ไม่ได้ทำการทดสอบ source rod คือแท่งที่มีแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาอยู่ที่ปลายแท่งนั้นควรอยู่ที่ตำแหน่ง safe position

การใช้งานเมื่อเริ่มเปิดสวิตช์ไฟเข้าเครื่อง เครื่องมือจะมีการตรวจสอบตัวเองว่าพร้อมที่จะใช้งานหรือไม่ หากมีอะไรผิดปกติจะแสดงผลออกมาที่จอแสดงผล จากนั้นจะเป็นการ warm up เครื่องเป็นเวลาประมาณ 10 นาที จึงจะพร้อมใช้งานได้ ในการใช้งานเครื่องนั้นผู้ทดสอบจะต้องทราบการกำหนดค่ารารามิเตอร์ที่ต้องป้อนเข้าไปและบันทึกไว้ในหน่วยความจำของเครื่องเพื่อให้ทราบค่าการ set up เครื่องก่อนใช้งาน เครื่องทดสอบยี่ห้อ troxler รุ่น model 3450 สามารถบันทึกเก็บค่าผลการทดสอบไว้ในหน่วยความจำโดยให้ผู้ใช้ตั้งชื่อโปรเจกต์ที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูล การดูข้อมูลที่เก็บไว้ก็โดยการเรียกชื่อไฟล์ โปรเจกต์ซึ่งอาจเก็บไว้หลาย ๆ ไฟล์โปรเจกต์ ภายในเครื่องสามารถเก็บข้อมูลได้ 1000 ผลการทดสอบ เก็บข้อมูลได้สูงสุดใน 1 ไฟล์โปรเจกต์ได้ 650 ผลการทดสอบ

การ Calibrate เครื่องมือวัดทำได้โดย คำนวณหาค่าการนับรังสี จากการวัดค่าจากวัสดุที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอนแล้ว นำค่าที่อ่านได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับรังสีที่อ่านได้กับค่าความหนาแน่นที่เรารู้ค่าที่แท้จริงแล้ว

วัสดุที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอนที่ใช้ ได้แก่ Magnesium มีความหนาแน่น 1,760 kg/m³ Magnesium Aluminum มีความหนาแน่น 2,157 kg/m³ และ Aluminum มีความหนาแน่น 2,640 kg/m³

วิธีการ Calibrate ทำโดยนำเครื่องมือวางบนวัสดุมาตรฐานดังกล่าวแล้วทำการนับรังสีที่แต่ละความลึก ค่าที่อ่านได้จะถูกบันทึกโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และคำนวณหาความสัมพันธ์เป็นค่าคงที่ที่ใช้เป็นสมการในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นในสนาม โดยปกติควรมีการทำ Calibration ทุก ๆ 12 ถึง 18 เดือนโดยผู้ผลิตดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 การทำ Calibration ของเครื่องมือ โดยทดสอบบนวัสดุที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอน

การคำนวณในการหาความหนาแน่นในสนาม

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

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

CRd = Density Measure Count / Density Standard Count

CRm = Moisture Measure Count / Moisture Standard Count

\ln = natural log base e

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

การทำ Standard Count

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

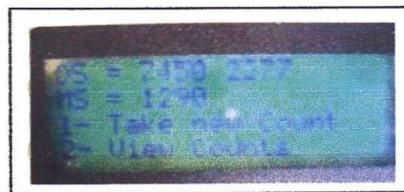
หลักการในการทำ Standard Count ก็เพื่อที่จะนำค่า Count Ratio จากบอรัลกราฟาฟิน ซึ่งเป็นวัสดุอ้างอิงที่เรารู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอนก่อนแล้ว

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

DS = x x x x x x x x
MS = x x x x
1 - Take new Count
2 - View Coung



หมายเหตุ

DS = Density Standard Count

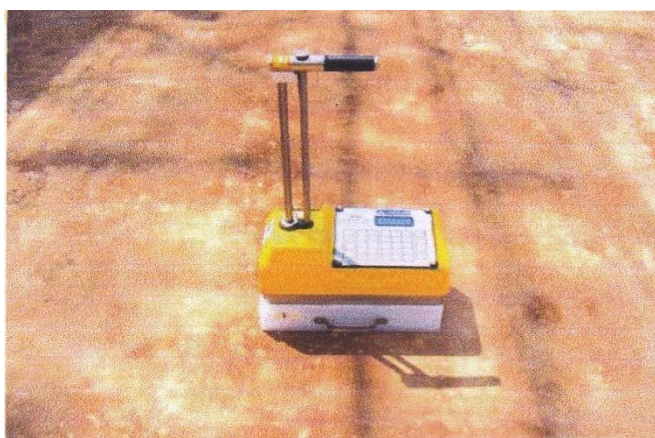
MS = Moisture Standard Count

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

**Put Rod In STD Pos
Place Gauge On
Standard Block
Press Enter**



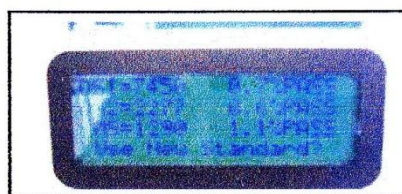
ให้ผู้นำนับวัดค่าพาราฟินสี่เหลี่ยมมาแล้วนำเครื่องทดสอบวางบนแผ่นบอลลัคพาราฟินนั้น
ดังรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 การนำเครื่องทดสอบวางบนแผ่นบอลลัคพาราฟินเพื่อทำ Standard count

การวางเครื่องทดสอบจะต้องให้ทุกส่วนของฐานวางอยู่บนบอลลัคพาราฟินโดยปลายด้านหนึ่งชิดกับแผ่นเหล็ก และให้ตำแหน่งของแท่งรังสี (Source Rod) อยู่ในตำแหน่ง Safe Position จากนั้นทำการยืนยันคำสั่งให้กดคีย์ (ENTER) การทำStd Count จะใช้เวลาครั้งละ 4 นาที เมื่อเสร็จสิ้นการนับรังสีแล้ว เครื่องจะแสดงผลที่หน้าจอ

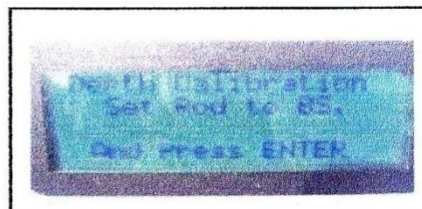
**DS1 = x x x x x.x PASS
DS2 = x x x x x.x PASS
MS = x x x x x.x PASS
Use New Standard**



ค่า DS1 และ DS2 จะผิดพลาดไม่เกิน $\pm 1.3\%$ ของค่าเฉลี่ยและค่า MS จะผิดพลาดได้ไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย

หลังจากทำ STD Count ผ่านแล้วให้กดคีย์ (YES) จากนั้นเครื่องจะทำการ Calibrate ตำแหน่งของแท่งรังสี โดยหน้าจอจะแสดงข้อความว่า

**Depth Calibration
Set Rod To B.S
And Press Enter**



จากนั้นให้กดคีย์ (ENTER)

ในกรณีที่ไม่ได้ใช้เครื่องทดสอบเป็นเวลานานเป็นเดือน ผลการทำ STD Count อาจจะมี 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 = %

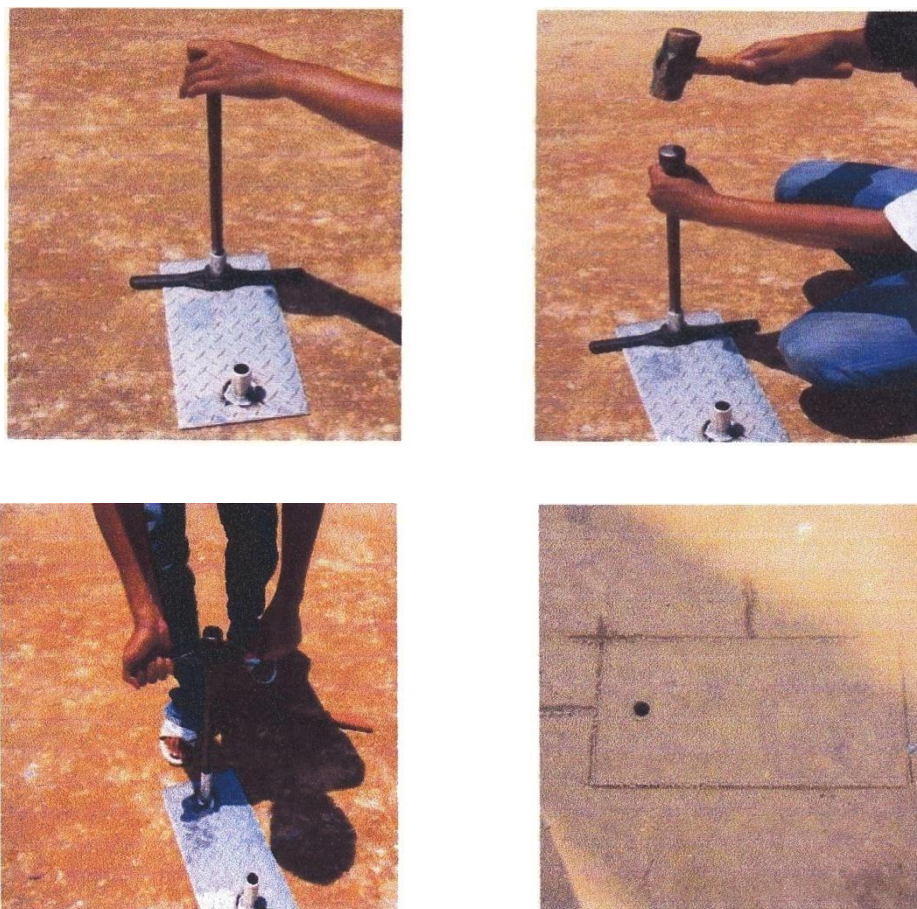
Density 1	Density 2	Moisture
7139 - 7131 = 8 ; (8 / 7131) x 100 = 0.11% Pss	1979 - 1986 = 7 ; (7 / 1986) x 100 = 0.35% Pass	1080 - 1078 = 2 ; (2 / 1078) x 100 = 0.12% Pass

must be within +/-1% of average must be within +/-1.2% of average must be within +/-2% of average

การเตรียมสถานที่ทำการทดสอบ (preparing a teatsite)

การเตรียมสถานที่สำหรับการทดสอบงานดิน (soil site)

1. สถานที่จะต้องเป็นพื้นเรียบห่างจากรอยร้าวหรือรูโพรงขนาดใหญ่
2. ถ้าจำเป็น ที่จะต้องทำการปรับพื้นให้เรียบก็ให้ใช้แผ่นเพลท ที่ใช้เจาะรูทำการปรับพื้นให้เรียบ
3. ปรับพื้นที่เป็นรูเล็ก ๆ ด้วยทรายละเอียด
4. นำเพลทโลหะที่สำหรับเจาะรูวางบนสถานที่ที่เตรียมไว้ แล้วกดเพลทลงไปที่ผิวดิน
5. สำหรับการทดสอบแบบ Direct Transmission เป็นวิธีที่สามารถวัดได้ถูกต้อง และมีความแน่นอนสูง จะต้องทำการเจาะรู เพื่อหย่อนแท่งรังสีลงไปที่ต่ำกว่าบริเวณผิวทางครึ่งรูป
6. ใช้ก้อนปูนค้ดกแท่งเหล็กเจาะรูลงไประยะความลึก สังกเกตได้จากตำแหน่งบอกระยะที่แท่งเจาะช่องละ 2 นิ้ว ควรจะตอกลงไปลึกกว่าตำแหน่งที่ต้องการทดสอบ เช่น ถ้าทดสอบที่ความลึก 10 เซนติเมตร (4 นิ้ว) ก็ควรตอกลงให้ลึก 6 นิ้ว หรือ 5 นิ้ว เพราะเวลาถอนเอาแท่งเจาะออกจะมีดินบางส่วนเคลื่อนปิดลงไปทำให้ระยะลึกน้อยกว่าระยะที่ตอกจริง
7. ทำการถอนแท่งเจาะออก
8. เมื่อจะเอาแผ่นเพลทออก ควรใช้ไม้หรือเหล็กแหลมขีดทำเครื่องหมายบอกที่รอบแผ่นเพลทบนผิวดินให้ครบทั้ง 4 มุม เพราะเวลาเอาเครื่องทดสอบไว้วางบนบริเวณที่เตรียมพื้นที่ไว้ แท่งรังสีจะหย่อนลงไปในรูเจาะได้พอดี ดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 การเจาะรูโดยใช้ Scraper plate (Drill Rod guid) และแท่ง Drill Rod เป็นการระบุตำแหน่งที่จะนำสารรังสีลงไปในสนามในการเลือกลักษณะการใช้งานแบบ Direct transmission โดยมีการทำสัญลักษณ์หลังจากเจาะเตรียมไว้เพื่อที่จะได้นำเครื่องมือมาวางให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง

หมายเหตุ อย่าลืมใส่ตัวถอนแท่งเจาะลงบนเพลทโลหะ เพราะเมื่อตอกแท่งเจาะลงไปแล้วไม่มีตัวถอนออก จะเกิดปัญหาเอาแท่งเจาะดึงกลับออกมาไม่ได้

การเตรียมสถานที่สำหรับงาน asphalt, คอนกรีต, ดินแข็ง (asphalt site)

ก็จะมีขั้นตอนเหมือนกันกับงานดินเพียงแต่การเจาะรูเพื่อทำการวัดแบบ direct transmission จะทำได้ยาก เพราะวัสดุทดสอบจะมีความแข็งมากบางครั้งจำเป็นที่จะต้องใส่สว่านไฟฟ้าเจาะรู แทนการตอกด้วยแท่งเหล็ก แต่ถ้าไม่ต้องการเจาะรู เราอาจเลือกทำการวัดแบบ backscatter ก็ได้แต่ผลความแน่นอนจะน้อยกว่าวิธี direct transmission

การทดสอบใน Soil Mode

การวัดความแน่นและความชื้นของดิน, หินคลุก, ทราย มีขั้นตอนดังนี้

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

```

%PR = x x x x x %
DD = x x x x x pcf
WD = x x x x x pcf
M = x x x x x %M = x x x x x
  
```



%PR = Percent Proctor

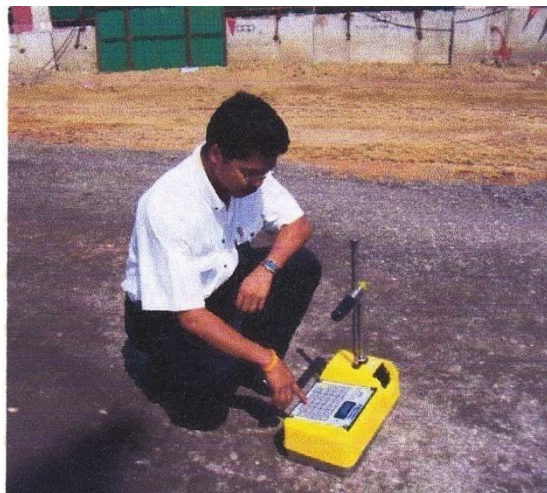
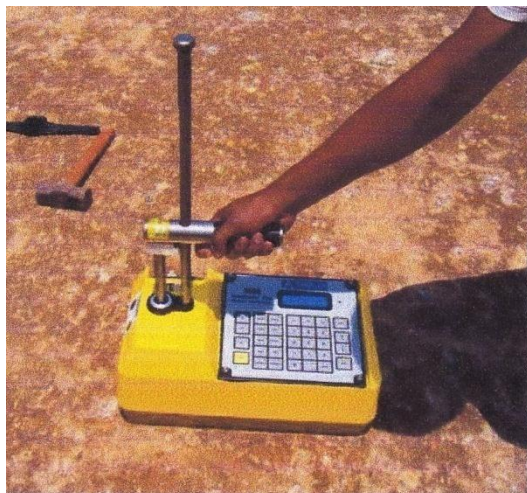
DD = Dry Density

WD = Wet Density

M = Moisture

%M = Percent Moisture

ถ้าต้องการบันทึกค่าลงในไฟล์โปรเจก ที่ตั้งชื่อไว้ให้กดคีย์ (store) จากนั้น ต้องการกลับสู่เมนู Ready Screen ให้กดคีย์ (ESC) และถ้าต้องการเริ่มทดสอบใหม่อีกครั้งก็ให้กดคีย์ (start) เมื่อจบการทดสอบแล้วให้เลื่อนแท่งรังสีกลับสู่ตำแหน่ง Safe position รูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 การกดแท่งรังสีให้เลื่อนลงไปในรูเจาะให้ลึกตามที่ต้องการ โดยคลายล็อกกลไกที่แขนจับ หลังจากนั้นกดปุ่มคำสั่งให้เครื่องทำงาน

2.20 การก่อสร้างและการบดอัด ชั้นโครงสร้างทาง

2.20.1 งานชั้นดินถมคันทาง

งานชั้นดินถมคันทาง หมายถึง การก่อสร้างวัสดุบนชั้นดินเดิมได้บดอัดแล้วเสร็จ โดยใช้วัสดุดินถม นำมาคลุกเคล้าผสมน้ำ (mix Process) แล้วทำการปรับเกลี่ยแต่งและบดอัดแน่นให้ได้รูปแบบ ความหนาชั้นละไม่เกิน 20 ซม. ความแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 Standard proctor density

2.20.2 งานชั้นวัสดุคัดเลือก ก. (Selected Material A)

งานชั้นวัสดุคัดเลือก ก. หมายถึง การก่อสร้างวัสดุคัดเลือก ก. บนชั้นวัสดุคัดเลือก ข. หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้แล้ว ด้วยวัสดุรวมที่มีคุณภาพตามข้อกำหนด โดยการเกลี่ยแต่งและบดทับให้ได้แนวระดับและรูปร่างตามที่แสดงไว้ในแบบความหนาชั้นละไม่เกิน 15 ซม. ความแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density

2.20.2.1 วิธีการก่อสร้าง

ให้ราดน้ำชั้นโครงสร้างที่รองรับวัสดุคัดเลือก ก. ให้เปียกชื้นโดยทั่วตลอด ใช้เครื่องจักรที่เหมาะสมขนวัสดุคัดเลือก ก. ไปปูบนชั้นทางที่เตรียมไว้แล้วตีแผ่เกลี่ยวัสดุคลุกเคล้า ผสมกับน้ำโดยที่ประมาณว่าให้มีปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content +/- 3% หลังจากเกลี่ยแต่งวัสดุจนได้ที่แล้วให้ทำการบดทับทันที ด้วยเครื่องมือบดทับที่เหมาะสมบดทับที่ผิวหน้าอย่างสม่ำเสมอ จนได้ความแน่นตลอดจนความหนาตามข้อกำหนด เกลี่ยแต่งวัสดุให้ได้แนว ระดับ ความลาด ขนาด และรูปตัด ตามที่แสดงไว้ในแบบ ไม่มีหลุมบ่อหรือวัสดุที่หลุดหลวมไม่แน่นอยู่บนผิว

2.20.2.2 ผลการทดสอบความแน่นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ หากผลทดสอบความแน่นในสนามน้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density ให้พิจารณาดำเนินการดังนี้

- หากปริมาณน้ำอยู่ในช่วงของ $\pm 3\%$ ของค่าปริมาณความชื้นที่ทำให้ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่การทดสอบความแน่นไม่ผ่านตามข้อกำหนดให้ทำการบดอัดซ้ำโดยเพิ่มปริมาณพลังงาน (recompaction) และเพิ่มจำนวนเที่ยวเพื่อให้ได้ความแน่นตามที่กำหนด
- หากปริมาณน้ำไม่อยู่ในช่วง $\pm 3\%$ ของค่าปริมาณความชื้นที่ทำให้ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะต้องขุดคุ้ยวัสดุ (scarify) เพื่อตากให้แห้ง กรณีที่ปริมาณน้ำมากเกินไป หรือผสมน้ำเพิ่ม กรณีที่ปริมาณน้ำน้อย แล้วจึงทำการบดอัดใหม่ให้ได้ความแน่นตามที่กำหนด

2.20.2.3 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

- ก่อนก่อสร้างชั้นวัสดุคัดเลือก ก. หากพื้นผิววัสดุชั้นล่างแห้ง ให้สเปรย์น้ำเพื่อเพิ่มความชื้นก่อน และเป็นการป้องกันการดูดซึมน้ำจากชั้นวัสดุคัดเลือก ก. ที่กำลังก่อสร้าง ซึ่งอาจทำให้ค่าปริมาณความชื้น ของชั้นรองพื้นทางเปลี่ยนแปลงไปทำให้ความแน่นไม่ได้ตามข้อกำหนด นอกจากนี้การให้ความชื้นยังทำให้การประสานระหว่างวัสดุ 2 ชั้น ดีขึ้นด้วย
- ให้สังเกตวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างจะต้องมีลักษณะเป็นวัสดุชนิดและแหล่งเดียวกันโดยจะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติ ทั้งจากแหล่ง general test และในระหว่างการก่อสร้าง control test ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด

2.20.3 งานชั้นรองพื้นทาง (Subbase)

งานชั้นรองพื้นทาง หมายถึง การก่อสร้างวัสดุบนชั้นกันทาง หรือบนชั้นวัสดุคัดเลือกที่ได้ก่อสร้างแล้วเสร็จ โดยใช้วัสดุลูกรัง หรือมวลรวมดิน (Soil Aggregate) นำมาคลุกเคล้าผสมน้ำ (Mix Process) แล้วทำการปรับเกลี่ยแต่งและบดอัดแน่นให้ได้รูปแบบ ความหนาชั้นละไม่เกิน 15 ซม. ความแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density

2.20.3.1 วิธีการก่อสร้าง

กรณีที่กำลังก่อสร้างบนคันทาง ที่ได้บดอัดและปรับแต่งเรียบร้อยแล้ว ให้นำวัสดุรองพื้นทางที่มีคุณสมบัติตามที่กำหนด มาเกลี่ยแผ่บดอัดเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นไม่เกิน 15 เซนติเมตร ความหนาไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 Modified Proctor Density บริเวณใดหรือช่วงใดหากวัสดุรองพื้นทางที่เกลี่ยแผ่และทำการบดอัดแล้ววัสดุรวมรวมหยาบและมวลรวมละเอียดมีการแยกตัวออกจากกัน (segregation) ให้แก้ไขโดยขูดออกแล้วทำการผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หรือรื้อออกแล้วนำวัสดุรองพื้นทางที่มีส่วนผสมสม่ำเสมอใส่ลงไปแทน ในกรณีที่ใช้วัสดุมากกว่าหนึ่งชนิด นำมาผสมกันเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางนั้น วัสดุแต่ละชนิดจะต้องได้รับการคลุกเคล้าให้มีลักษณะสม่ำเสมอ และต้องได้รับการตรวจสอบความถูกต้องตรงตามมาตรฐานวัสดุรองพื้นทางจากผู้ควบคุมงานก่อน และเมื่อทำการก่อสร้างชั้นรองพื้นทางเสร็จเรียบร้อยแล้วจะต้องมีผิวหน้าเรียบแน่นสม่ำเสมอได้ระดับถูกต้องตามแบบก่อสร้าง

2.20.3.2 ผลการทดสอบความแน่นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ หากผลทดสอบความแน่นในสนามน้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density ให้พิจารณาดำเนินการดังนี้

- หากปริมาณน้ำอยู่ในช่วงของ $\pm 3\%$ ของค่าปริมาณความชื้นที่ให้ ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่การทดสอบความแน่นไม่ผ่านตามข้อกำหนดให้ทำการบดอัดซ้ำ โดยเพิ่มปริมาณพลังงาน (recompaction) และเพิ่มจำนวนเที่ยว เพื่อให้ได้ความแน่นตามที่กำหนด
- หากปริมาณน้ำไม่อยู่ในช่วง $\pm 3\%$ ของค่าปริมาณความชื้นที่ให้ ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะต้องขุดคุ้ยวัสดุ (scarify) เพื่อตากให้แห้ง กรณีที่ปริมาณน้ำมากเกินไป หรือผสมน้ำเพิ่ม กรณีที่ปริมาณน้ำน้อย แล้วจึงทำการบดอัดใหม่ให้ได้ความแน่นตามที่กำหนด

2.20.3.3 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

- ก่อนก่อสร้างชั้นรองพื้นทางหากพื้นผิววัสดุชั้นล่างแห้ง ให้สเปรย์น้ำเพื่อเพิ่มความชื้นก่อน และเป็นการป้องกันการดูดซึมน้ำจากวัสดุรองพื้นทางที่กำลังก่อสร้าง ซึ่งอาจทำให้ค่าปริมาณความชื้น ของชั้นรองพื้นทางเปลี่ยนแปลงไปทำให้ความแน่นไม่ได้ตามข้อกำหนด นอกจากนี้การให้ความชื้นยังทำให้การประสานระหว่างวัสดุ 2 ชั้น ดีขึ้นด้วย

- ให้สังเกตวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างจะต้องมีลักษณะเป็นวัสดุชนิดและแหล่งเดียวกัน โดยจะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติ ทั้งจากแหล่ง general test และในระหว่างการก่อสร้าง control test ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด

2.20.4 งานพื้นทาง (base)

งานชั้นพื้นทาง หมายถึง การก่อสร้างงานชั้นบนสุดของโครงสร้างทาง ทำหน้าที่รองรับผิวจราจรและเบกทานน้ำหนักที่ถ่ายมาจากผิวจราจร กระจายน้ำหนักลงสู่ฐานด้านล่าง วัสดุที่ใช้ก่อสร้างได้แก่หินคลุก หินโม้ กรวดโม้ ที่มีขนาดคละสม่ำเสมอจากใหญ่ไปหาเล็ก ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานวัสดุพื้นทาง นำมาคลุกเคล้าผสมน้ำ (mix process) ทำการปรับเกลี่ยแต่งและบดอัดแน่นให้ได้ตามรูปแบบ หนาชั้นละไม่เกิน 15 ซม. ความแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density

2.20.4.1 วิธีการก่อสร้าง

การก่อสร้างต้องตรวจสอบระดับและความแน่นของชั้นรองพื้นทางให้ถูกต้อง ก่อนนำวัสดุพื้นทางมาถมบนชั้นรองพื้นทางทำการคลุกเคล้าวัสดุกับน้ำให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอและมีความชื้นพอเหมาะใกล้เคียงกับค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) จากห้องปฏิบัติการ จากนั้นจึงเกลี่ยแผ่แล้วบดอัดเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นหนาไม่เกิน 15 เซนติเมตร บดอัดแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density บริเวณใดหรือช่วงใดวัสดุพื้นทางที่เกลี่ยแผ่และทำการบดอัดแล้วมีมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดแยกตัวจากกัน (segregation) ให้แก้ไขโดยการขูดหรือออกแล้วทำการผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หรือหรือออกใส่วัสดุพื้นทางที่มีส่วนผสมสม่ำเสมอลงไปแทน แล้วสเปรย์น้ำให้ความชื้นที่เหมาะสม เกลี่ยให้ได้รูปตามแบบก่อสร้างแล้วทำการบดอัดแน่น ในระหว่างการบดอัดให้มีการสเปรย์ น้ำบาง ๆ เพื่อให้วัสดุจับตัวกันจะช่วยให้ผิวหน้าเรียบปราศจากหลุมบ่อ และเพื่อให้ผิวหน้าเรียบแน่นสม่ำเสมอ ให้ทำการบดอัดชั้นสุดท้ายด้วยรถบดล้อเหล็กน้ำหนักไม่น้อยกว่า 12 ตัน ซึ่งในระหว่างการก่อสร้างหากมีฝนตกน้ำขัง ทำให้ความชื้นในระหว่างการบดอัดมากเกินไปจนเป็นเหตุให้ชั้นพื้นทางเสียหายหรืออาจเสียหายลึกถึงชั้นรองพื้นทางด้วย ดังนั้นเมื่อพบว่าพื้นทางส่วนที่ได้ก่อสร้างแล้วมีการบวมตัว (soft spot) จะต้องรื้อออกและอาจต้องตรวจสอบชั้นรองพื้นทางด้วยว่ามีความเสียหายหรือไม่ หากเสียหายจะต้องรีบดำเนินการแก้ไขปรับปรุงชั้นรองพื้นทางให้เรียบร้อยก่อนแล้วจึงทำการแก้ไขพื้นทางต่อไปถ้าแบบก่อสร้างกำหนดความหนาพื้นทางมากกว่า 15 เซนติเมตร ให้แบ่งการทำงานเป็น 2 ชั้น หนาชั้นละเท่า ๆ กัน (โดยประมาณ) บดอัดให้แน่นและได้ระดับตามแบบก่อสร้าง

งานชั้นพื้นทางที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ และยังไม่ได้ก่อสร้างลาดยางรองพื้นแอสฟัลต์ (prime coat) ตามขั้นตอนปกติ ให้ฉีดพ่นน้ำหล่อเลี้ยงผิวหน้าป้องกันการสูญเสียน้ำ

ผลการทดสอบความแน่นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ หากผลการทดสอบความแน่นในสนามน้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density ให้พิจารณาดำเนินการดังนี้

- หากปริมาณน้ำอยู่ในช่วง ใกล้เคียงค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่การทดสอบความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ให้ทำการรดน้ำโดยเพิ่มพลังงานการรดน้ำและเพิ่มจำนวนเที่ยว เพื่อให้ได้ความแน่นตามที่ต้องการ
- หากปริมาณน้ำไม่อยู่ในช่วงใกล้เคียงค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด (o.m.c.) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะต้องขุดคุ้ยวัสดุ (scarify) เพื่อตากให้แห้งกรณีที่มีปริมาณน้ำมากเกินไป หรือผสมน้ำเพิ่ม กรณีที่มีปริมาณน้ำน้อย แล้วจึงบดอัดใหม่ให้ได้ความแน่นตามข้อกำหนด

2.21 เครื่องจักรกลที่ใช้บดอัดดินในสนาม

อุปกรณ์และเครื่องจักรกลที่ใช้ในการทำงานมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีความเหมาะสมเฉพาะงาน ดังนั้นการรู้จักใช้อุปกรณ์และเครื่องจักรกลให้เหมาะสมกับขนาดและประเภทของงานเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การบดอัดดินในสนามพอที่จะจำแนกระบบบนพื้นฐานการทำงานของเครื่องจักรกลได้ดังนี้

2.21.1 รถบดล้อเรียบ (รูปที่ 2.44) เป็นรถบดอัดที่เหมาะสมสำหรับกรวด ทราช หรือวัสดุที่คล้ายคลึง ล้อรถบดทำด้วยเหล็กที่มีความแข็งแรงมาก การบดอัดจะทำให้เกิดการแตกหักของเม็ดดินและทำให้ผิวถนนเรียบ ความดันที่จุดสัมผัสระหว่างดินกับล้อประมาณ 45 ถึง 55 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (310 ถึง 380 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) รถบดอัดประเภทนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการบดอัดในชั้นดินที่หนามาก เนื่องจากความดันล้อมีค่าไม่สูงนัก



รูปที่ 2.44 รถบดล้อเรียบ

2.21.2 รถบดล้อยาง (รูปที่ 2.45) เป็นรถบดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่ารถบดล้อเรียบในหลายๆ ด้าน รถบดประเภทนี้เป็นรถบดที่มีน้ำหนักมาก และประกอบด้วยล้อประมาณ 4 ถึง 6 ล้อในหนึ่งแถว แต่ละล้อมีระยะห่างใกล้เคียงกัน ความดันที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับดินประมาณ 85 ถึง 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (585 ถึง 690 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) รถบดแบบนี้เหมาะสำหรับดินทรายและดินเหนียว การบดอัดเป็นการผสมผสานระหว่างการบดอัดด้วยความดันและการนวด



รูปที่ 2.45 รถบดล้อยางทำงานด้วยระบบความดันลม (pneumatic-tired roller)

2.21.3 รถบดตีนแกะ (รูปที่ 2.46) ประกอบด้วยล้อโลหะรูปทรงกระบอกที่มีเหล็กยื่นออกมา (projection) พื้นที่ของแต่ละ projection จะประมาณ 4 ถึง 13 ตารางนิ้ว (25 ถึง 85 ตารางเซนติเมตร) รถบดประเภทนี้เป็นรถบดที่มีประสิทธิภาพในการบดอัด

ดินเหนียวมากที่สุด ความดันที่จุดสัมผัสระหว่างดินและล้อบดประมาณ 200 ถึง 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (1380 ถึง 6900 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) การวิ่งผ่านของรถรอบแรกๆ จะบดอัดดินส่วนที่อยู่ด้านล่าง และการวิ่งผ่านของรถรอบหลังๆ จะบดอัดดินที่อยู่ชั้นบน



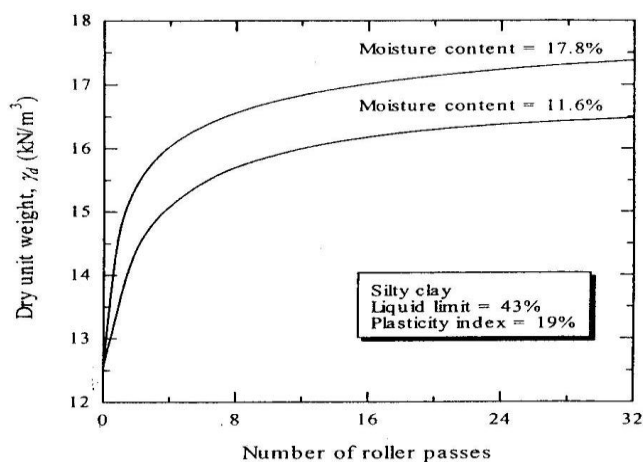
รูปที่ 2.46 รถบดดินแกละ

2.21.4 รถบดอัดแบบสั่นสะเทือน เป็นรถบดอัดที่มีประสิทธิภาพอย่างมากสำหรับกรวดและทราย เครื่องสั่นสะเทือนสามารถติดตั้งกับรถบดอัดได้ทุกประเภท รูปที่ 2.47 แสดงหลักการของรถบดอัดประเภทนี้การสั่นสะเทือนเกิดจากเครื่องที่ติดตั้งไว้นอกจุดศูนย์กลางของล้อ (off-center rotation weight) เครื่องสั่นนี้จะเคลื่อนที่ขึ้นลงระหว่างการบดอัดด้วยความถี่ 20 ถึง 30 รอบต่อวินาที

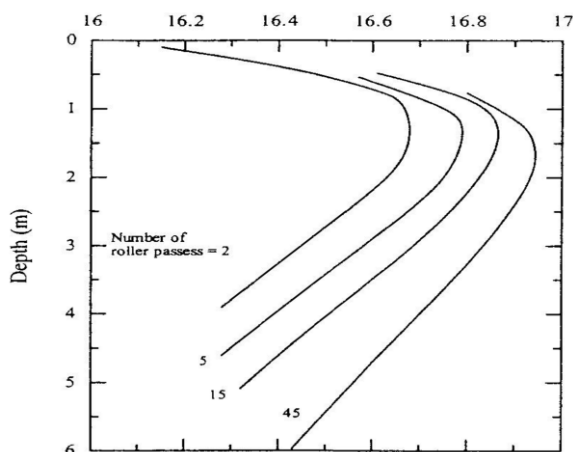


รูปที่ 2.47 รถบดสั่นสะเทือน (vibrating roller)

นอกจากชนิดของดินและปริมาณความชื้นแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบดอัดในสนามอีก ปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่ ความหนาของชั้นดินที่ทำการบดอัด (lift) ความเข้มข้นของความดันจากเครื่องบดอัด และพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อกับดิน เนื่องจากความดันล้อยที่กระทำที่ผิวดินจะลดลงตามความลึก ส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับการบดอัด (degree of compaction) นอกจากนี้ความหนาแน่นแห้งของดินยังแปรผันกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่าน รูปที่ 2.48a แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง ความหนาแน่นแห้งจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านจนถึงค่าหนึ่ง และความหนาแน่นแห้งจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ถึงแม้ว่าจำนวนรอบที่บดอัดจะเพิ่มขึ้น โดยทั่วไป จำนวนรอบที่เท่ากับ 10 ถึง 15 รอบ ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด

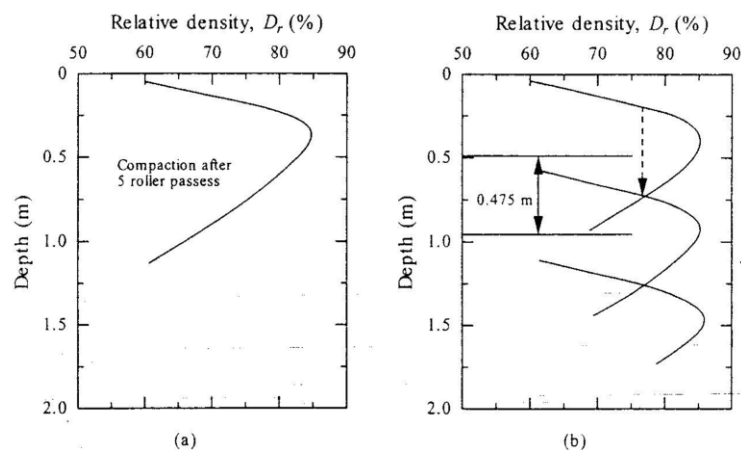


รูปที่ 2.48 a) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่าน (Johnson and Sallberg, 1960)



รูปที่ 2.48 b) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่าน (D'Appolonia et al., 1969)

รูปที่ 2.48b แสดงการเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักแห้งกับความลึกสำหรับทรายที่มีขนาดละเอียด การบดอัดกระทำโดยใช้รถบดอัดดินแกละแบบสันสะเทือน น้ำหนักของรถบดอัดเท่ากับ 55.6 กิโลนิวตัน และเส้นผ่านศูนย์กลางของดินแกละเท่ากับ 1.19 เมตร ความหนาของชั้นบดอัดเท่ากับ 2.44 เมตร ตระหนักว่า ที่ความลึกใดๆ ความหนาแน่นแห้งของการบดอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการวิ่งผ่านของรถบดอัด แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงหลังจากจำนวนรอบที่ 15 ความจริงอีกประการหนึ่งที่ค้นพบจากรูปที่ 2.48b คือความหนาแน่นแห้งมีค่ามากที่สุดที่ความลึกประมาณ 0.5 เมตรและค่อยๆ มีค่าน้อยลงตามความลึก เนื่องจากการลดลงของความเค้นตามความลึก ทันทีที่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ (หรือความหนาแน่นแห้ง) สำหรับดินชนิดหนึ่งๆ ที่จำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านค่าหนึ่ง เราสามารถประมาณความหนาของการบดอัดแต่ละชั้นได้ วิธีการนี้แสดงในรูปที่ 2.49 (D'Appolonia et al., 1969)



รูปที่ 2.49 การประมาณความหนาของระดับชั้นของดินสำหรับความหนาแน่นสัมพัทธ์ 75% กับจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่านเท่ากับ 5 รอบ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทำโครงการ

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เก็บรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบการบดอัด และ CBR ในห้องปฏิบัติการของดินลูกรัง จากโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 12 สาย กาฬสินธุ์ – อ.สมเด็จ ตอน 1 สำนักทางหลวงที่ 3 กรมทางหลวง ดินตัวอย่างทั้งหมดเป็นดินที่มีความคละตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ผลทดสอบที่ได้จะนำมาใช้ในการควบคุมการบดอัดในสนาม งานวิจัยนี้ได้เก็บข้อมูลความแน่นของดินบดอัดในสนามในแต่ละช่วงความเร็วและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด เพื่อเข้าใจการพัฒนาความแน่นแห้งในสนามเนื่องจากความเร็วของรถบดอัด ความแน่นแห้งในสนามได้จากการทดสอบด้วยวิธีนิวเคลียร์ (Nuclear method) วิธีการนี้จะคำนวณหาหน่วยน้ำหนักแห้งโดยการส่งผ่านรังสีแกมมา (Gamma ray) ไปยังดินถมและสะท้อนขึ้นสู่เครื่องรับรังสี ถ้าปริมาณรังสีสะท้อนกลับมายังเครื่องรับมากแสดงว่า วัสดุมีความแน่นแห้งสูง การหาปริมาณความชื้นทำโดยการใช้รังสีนิวตรอน (neutron) ส่งผ่านไปยังวัสดุดินถมและสะท้อนกลับ ไปเครื่องรับ อนุภาคของนิวตรอนจะไปชนกับอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำ ถ้านิวตรอนสะท้อนกลับเข้าเครื่องรับช้า แสดงว่า ปริมาณน้ำในมวลวัสดุดินถมมีมาก นอกจากความสะดวกรวดเร็วแล้ววิธีการนี้ยังเป็นการทดสอบที่ไม่ทำลายชั้นทาง

3.2 แผนงานดำเนินการ

งานวิจัยนี้ดำเนินการรวบรวมผลการตรวจวัดความแน่นในสนามสนามด้วยวิธีนิวเคลียร์ ความเร็วรถที่กำหนดในงานวิจัยนี้ ได้แก่ 6.0 และ 11.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การตรวจวัดความแน่นจะดำเนินการตั้งแต่เที่ยวที่ 6 จนถึงเที่ยวที่ 11 โดยใช้วัสดุที่ผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง อันได้แก่ ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน (การกระจายขนาดของเม็ดดิน และพิกัด Atterberg) ผลทดสอบการบดอัด และผลทดสอบ CBR ข้อมูลผลการทดสอบทั้งหมดรวบรวมโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 12 สาย กาฬสินธุ์ – อ.สมเด็จ ตอน 1 สำนักทางหลวงที่ 3 กรมทางหลวง

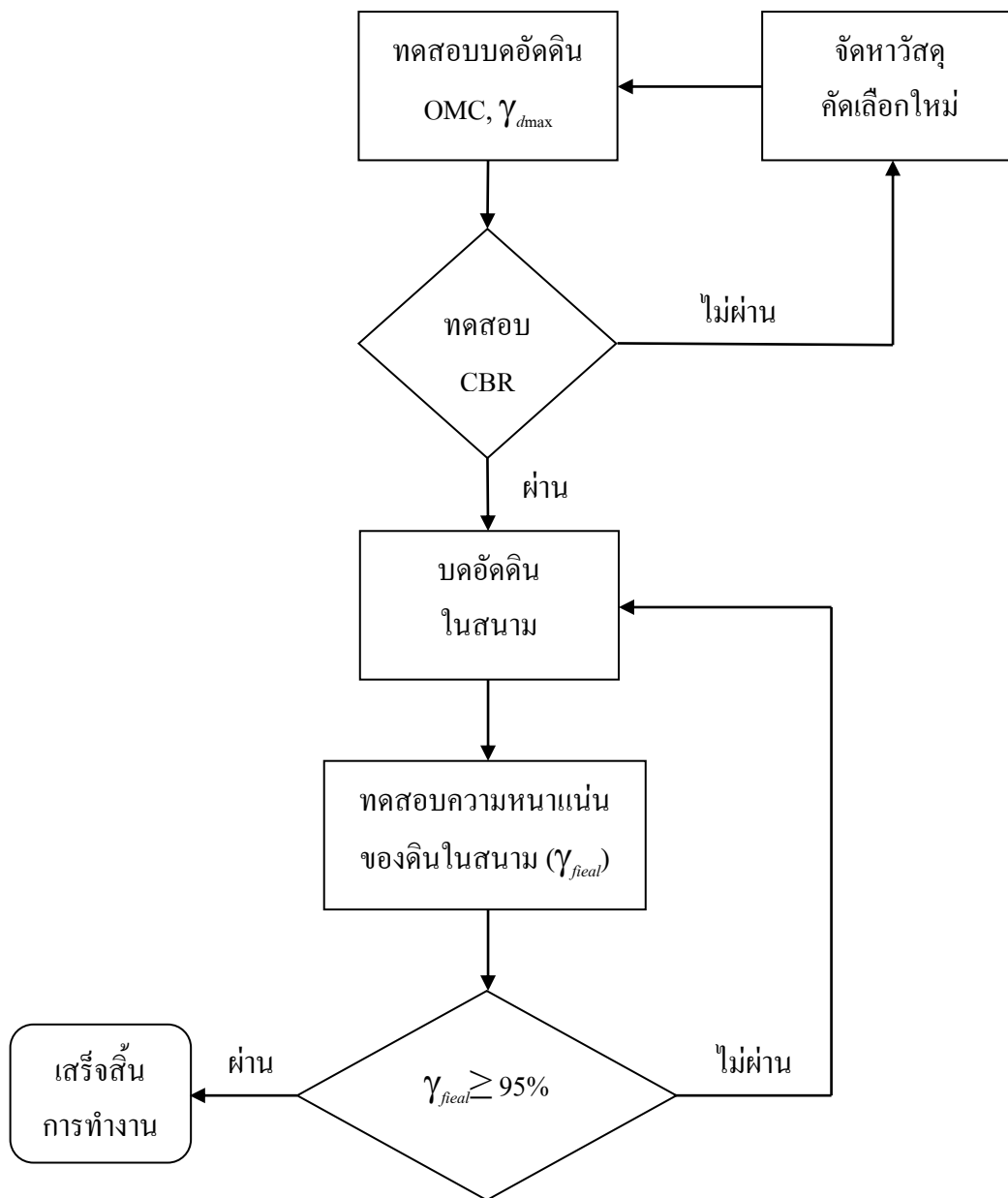
3.3 ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ดินตัวอย่างที่รวบรวมจากสนามจะนำมาทดสอบตามมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยดินตัวอย่างจะนำไปตากให้แห้ง และแบ่งจนได้ปริมาณเพียงพอต่อการทดสอบด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่าง วิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงประกอบด้วย

- วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม้ล้างตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516
- วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL) ของดิน ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท 102/2515
- วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plastic Index (PI) ของดินตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท103/2515
- วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517
- วิธีการทดลองเพื่อหาค่า C.B.R. ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท 109/2517

3.4 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม (Field density test) โดยวิธีการ Nuclear Method

ขั้นตอนในการทำงานก่อสร้างถนน สามารถเขียนเป็นแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเริ่มต้นจากการคัดเลือกวัสดุและทำการทดสอบการบดอัด และ CBR ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง เพื่อกำหนดความปริมานน้ำและหน่วยน้ำหนักแห้งในสนาม และทำการบดอัดในสนามด้วยรถบดอัดจนได้ความแน่นสัมพัทธ์ (ร้อยละของการบดอัด) ไม่น้อยกว่า 95 การบดอัดในสนามและการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามแสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทดสอบวัสดุ



รูปที่ 3.2 การทดสอบความแน่นในสนาม



รูปที่ 3.3 การทดสอบความแน่นในสนาม

บทที่ 4

ผลทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 บทนำ

ผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต (Asphaltic Concrete Surface) ประกอบด้วยชั้นดินคันทาง (Embankment) ชั้นวัสดุค้ำค้ำ (Subgrade) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ชั้นพื้นทาง (Base) และผิวทาง (Surface) ที่มีความแข็งแรงของวัสดุต่างกัน เนื่องจากชั้นโครงสร้างทางด้านล่างจะรับความเค้นจากน้ำหนักบรรทุกที่น้อยกว่าชั้นบน ผู้ออกแบบจึงสามารถออกแบบและเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพต่างกันตามความลึก เพื่อลดต้นทุนค่าวัสดุก่อสร้าง โดยชั้นโครงสร้างทางด้านล่างจะมีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนและ CBR ต่ำกว่าชั้นโครงสร้างทางด้านบน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (จำนวนเที่ยวและความเร็วของรถบดอัด) ต่อการพัฒนาความแน่นของชั้นรองพื้นทางชนิดดินลูกรัง เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการประมาณความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ความเร็วในการบดอัดต่าง ๆ พร้อมทั้งสามารถประมาณเวลาในการทำงานของเครื่องจักรสำหรับการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง และเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพงานบดอัดให้มีประสิทธิภาพทั้งในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ ความแน่นแห้งในสนามวัดด้วยวิธีนิวเคลียร์ Nuclear method ตามมาตรฐาน ASTM D 5195-91 การบดอัดจะดำเนินการจนกระทั่งความหนาแน่นแห้งในสนามมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ โดยการควบคุมความชื้นของดินในสนามให้อยู่ระหว่างร้อยละ ± 3 ของปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) ผลการตรวจวัดในสนามจะนำมาวิเคราะห์และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด เพื่อเป็นแนวทางการควบคุมการบด พร้อมทั้งสามารถประมาณเวลาสำหรับการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง

4.2 วิธีดำเนินการทำวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาตัวแปรควบคุมที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาความแน่นในสนามของชั้นรองพื้นทาง ตัวแปรอิทธิพลประกอบด้วยความเร็วและจำนวนเที่ยวของรถบดอัด ความเร็วที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 6.0 และ 11.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การทดสอบหาความแน่นในสนามของวัสดุรองพื้นทางวัสดุชนิดดินลูกรัง ใช้วิธีนิวเคลียร์ Nuclear method ตามมาตรฐาน ASTM D 5195-91 ในแต่ละจำนวนเที่ยวการบดอัด โดยการทดสอบความแน่นในสนามเริ่มจากจำนวนเที่ยวที่ 6 ไปจนถึงจำนวนเที่ยวที่ 11 ผลการตรวจวัดจะนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งในสนาม

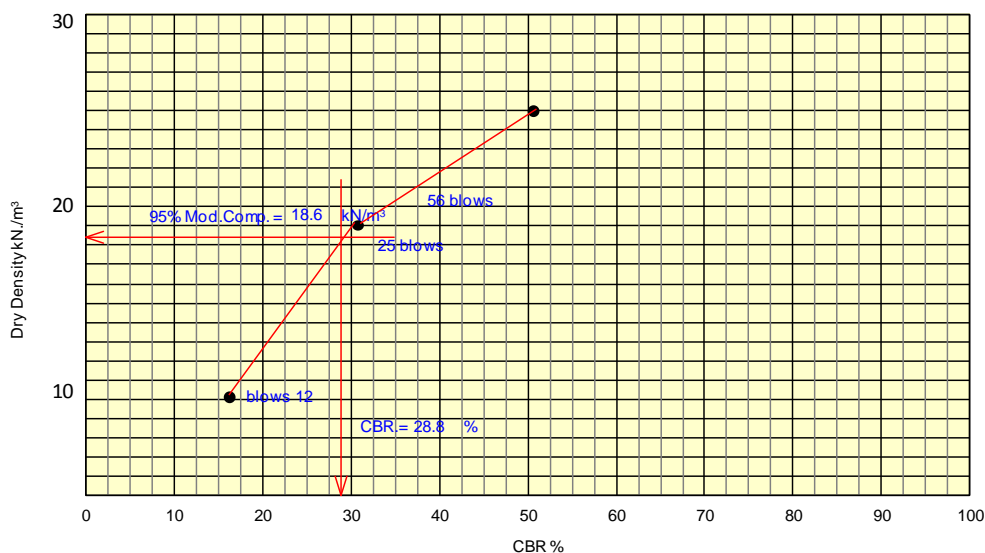
กับจำนวนเที่ยว ที่ความเร็วต่างๆ การศึกษาดำเนินการที่โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 12 สาย กापสินธุ์ – อ.สมเด็จ ตอน 1 สำนักก่อสร้างทางที่ 3 กรมทางหลวง ชุดเครื่องจักรที่ใช้บดอัดชั้นพื้นรองพื้นทางดินลูกรังในสนามประกอบไปด้วยรถบดล้อเหล็กแบบสันสะเทือน รถบดล้อยาง และรถบดล้อเหล็กเรียบ การบดอัดเริ่มต้นด้วยรถบดล้อเหล็กแบบสันสะเทือน และตามด้วยรถบดล้อยางและรถบดล้อเหล็กเรียบ รถบดล้อเหล็กแบบสันสะเทือน Caterpillar CS 76 มีน้ำหนักล้อ (Wheel load, W) เท่ากับ 332 กิโลนิวตัน แรงสันสะเทือนประมาณ 1,400 ถึง 1,800 รอบต่อนาที รถบดล้อยางเป็นชนิดขับเคลื่อนด้วยตัวเอง และรถบดล้อเหล็กชนิดพิวหน้าเรียบ

4.3 ผลทดสอบและผลการวิเคราะห์

คุณสมบัติของดินลูกรังที่ใช้ในโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 12 สาย กापสินธุ์ – อ.สมเด็จ ตอน 1 สำนักก่อสร้างทางที่ 3 กรมทางหลวง เป็นวัสดุที่ผ่านค่ามาตรฐานการทดลองตาม ทล.-ม. 205/2532 ดังข้อมูลที่แสดงตามรูปที่ 4.1 วัสดุทดสอบจัดเป็นดินเกรด C ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ค่าดัชนีพลาสติกมีค่าเท่ากับ 9.6 หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 19.2 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และปริมาณน้ำเหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 15.5

Material	HRB. Classification	Passing								LL.	PI.
		50.0	25.0	19.0	9.5	#4	#10	#40	#200		
A	A - 1 - a	-	100	98.4	79.8	58.7	44.6	26.2	12.0	31.7	9.6
B	Spec.	-	100	-	50-85	-	25-50	15-30	5-15		
MIX A : B	Grade "C"										

Blows	Dry Density (gm./ml.)	CBR (%)	Swell (%)	100%.....Mod.....Comp. Dry Density = 19.2 kN/m ³
				95%.....Mod.....Comp. Dry Density = 18.6 kN/m ³
				O.M.C.= 15.5 % Water content of (molding) CBR = 13.2 %
12	9.6	16.9	0.70	Required CBR ≥ 25 %
25	18.6	30.2	0.62	at 95% Mod. Comp.CBR = 28.8 %
56	21.2	51.1	0.51	Raise percent Compaction - %

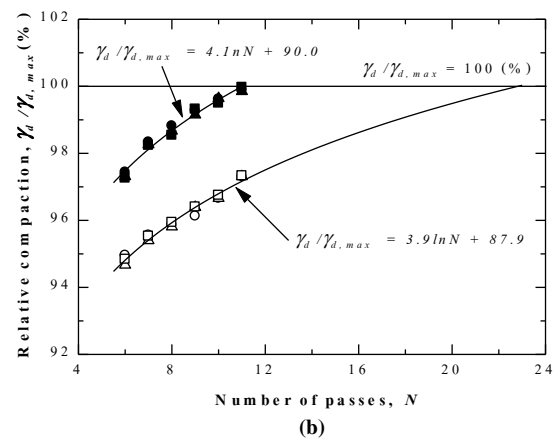
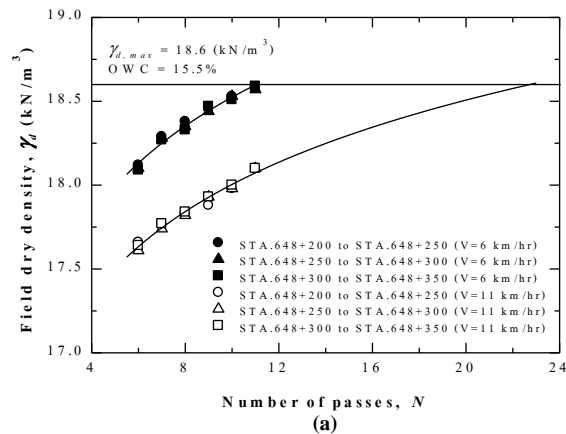


รูปที่ 4.1 ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบในสนามของชั้นรองพื้นทางดินลูกรัง

รูปที่ 4.2a แสดงผลการตรวจวัดความหนาแน่นแห้งในสนามตามจำนวนรอบบดอัด สำหรับชุดรถบดอัดที่วิ่งด้วยความเร็ว 6.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ผลการตรวจวัดแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งในสนามมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ จนถึงจำนวนรอบที่ 11 ซึ่งมีสอดคล้องกับผลการศึกษาการพัฒนาความแน่นแห้งในสนามของ Horpibulsuk et al. (2013) เมื่อบดอัดดินสนามจนได้ความแน่นแห้งเข้าใกล้ความแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ ความหนาแน่นแห้งในสนามจะเริ่มคงที่ แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนเที่ยวของรถบด ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับจำนวนเที่ยววิ่งของดินบดอัดสามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชันลอการิทึมดังสมการที่ (4.1)

$$\gamma_{df} = a + b \ln N \quad (4.1)$$

เมื่อ γ_{df} คือหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัดในสนาม a และ b เป็นค่าคงที่ และ N คือจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ a เท่ากับ 16.7 และ 16.3 และค่าคงที่ b เท่ากับ 0.77 และ 0.73 สำหรับความเร็วรถบดอัดเท่ากับ 6 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 a) ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งในสนามกับจำนวนเที่ยวรถบด และ
b) ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งความหนาแน่นสัมพัทธ์กับจำนวนเที่ยวรถบดที่ใช้ความเร็วต่างกัน

รูปที่ 4.2b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์ ($\gamma_{df}/\gamma_{d,max}$) กับจำนวนเที่ยวรถบดอัด ที่จำนวนเที่ยวรถบดอัดเท่ากัน ความเร็วรถบดอัดที่ต่ำกว่าให้ความแน่นแห้งในสนามที่สูงกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการบดอัดสัมพัทธ์ (Relative compaction, $\gamma_{df}/\gamma_{d,max}$) และจำนวนเที่ยววิ่งรถบดอัดแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงลอการิทึม (Horpibulsuk et al., 2013) ดังแสดงในสมการที่ (4.2)

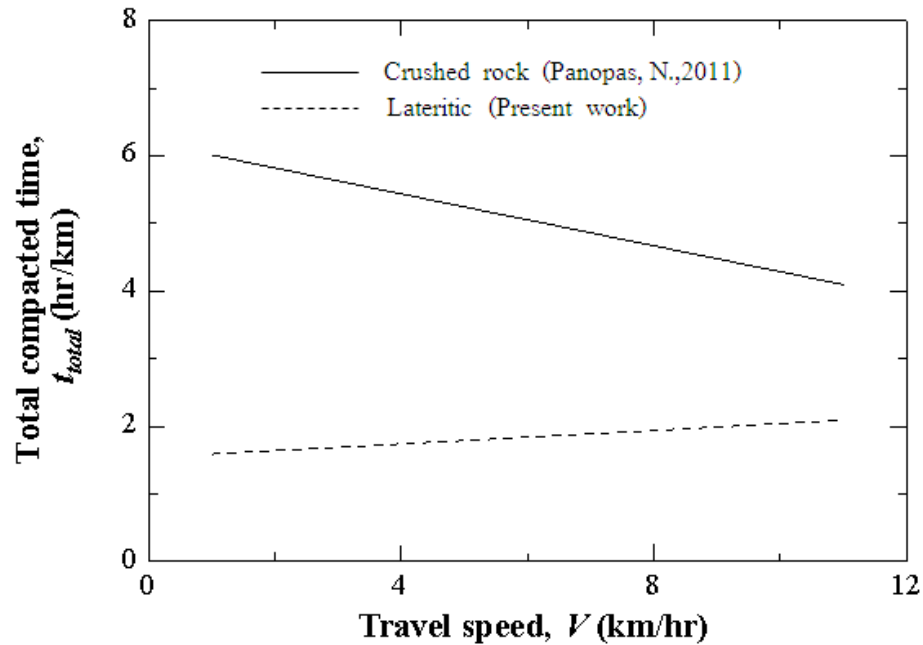
$$\frac{\gamma_{df}}{\gamma_{d,max}} = c + d \ln N \quad (4.2)$$

เมื่อ γ_{df} คือหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัดในสนาม และ c และ d เป็นค่าคงที่ ค่าคงที่ c และ d เท่ากับ 90.1 และ 4.1 และ 87.9 และ 3.90 สำหรับความเร็ว 6 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ จำนวนเที่ยววิ่งที่เหมาะสมสามารถประมาณได้จากการแทนค่า $\gamma_{df}/\gamma_{d,max}$ เท่ากับ 100 ค่า N_{max} ที่ประมาณได้มีค่าเท่ากับ 11 และ 23 สำหรับความเร็วเท่ากับ 6.0 และ 11.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าจำนวนเที่ยวรถบดอัดที่ให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นตามความเร็วรถบดอัด เนื่องจากการเพิ่มความเร็วในการบดอัดส่งผลให้เกิดความเค้นสูงบริเวณใกล้กับผิวดิน แต่ในทางกลับกัน ความเค้นที่ระดับลึกกลับมีค่าต่ำ ซึ่งการลดลงของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดินจะมีแนวโน้มเป็นฟังก์ชันเส้นตรงเมื่อความเร็วในการบดอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น (Liu and Kushwaha 2012) ดังรูป 4.3

ผลการศึกษการบดอัดหินคลุกโดยนิตี พันธุ์โอภาส (2556) พบว่าที่จำนวนเที่ยววิ่งรถบดอัดเดียวกัน ความแน่นของหินคลุกบดอัดมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วรถบดอัดในฟังก์ชันลออการิทึม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การบดอัดด้วยความเร็วรถที่สูงจะใช้จำนวนเที่ยววิ่งมากกว่าการบดอัดด้วยความเร็วรถที่ต่ำ เพื่อให้ได้ความหนาแน่นเท่ากัน แต่การบดอัดด้วยความเร็วรถที่สูงกว่าจะใช้เวลาในการบดอัดน้อยกว่าการบดอัดที่ใช้ความเร็วต่ำ เช่นเดียวกันกับการศึกษาในครั้งนี้ การบดอัดดินลูกรังด้วยความเร็วรถที่สูงก็ใช้จำนวนเที่ยววิ่งมากกว่าการบดอัดด้วยความเร็วที่ต่ำ

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาที่ใช้ในการบดอัดในระยะทาง 1 กิโลเมตร กับความเร็วของรถบดอัด ความสัมพันธ์ดังกล่าวสร้างขึ้นจากผลทดสอบ 2 ชุด กล่าวคือ ที่ความเร็ว 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จำนวนเที่ยวรถบดอัดที่ให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 11 เที่ยว และที่ความเร็ว 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จำนวนเที่ยวรถบดอัดที่ให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 23 เที่ยว เมื่อพิจารณาระยะทางที่รถบดอัดใน 1 เที่ยวเท่ากับ 1 กิโลเมตร รถบดอัดที่ใช้ความเร็ว 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะใช้เวลา 10 นาที เพื่อให้ได้ระยะทาง 1 กิโลเมตร ดังนั้น การบดอัดเพื่อให้ได้ความแน่นแห้งสูงสุด (11 เที่ยว) จึงใช้เวลา 110 นาที หรือ 1.83 ชั่วโมง ในทำนองเดียวกัน สำหรับความเร็ว 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ระยะเวลาที่ต้องการเพื่อบดอัดให้ได้ความแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.09 ชั่วโมง เมื่อนำผลการศึกษานี้มาทำการวาดกราฟร่วมกับผลการศึกษาของนิตี พันธุ์โอภาส (2556) พบว่าการบดอัดดินด้วยความเร็วต่างกันแทบไม่ผลต่อการระยะเวลาการบดอัดมากนัก ซึ่งแตกต่างจากการบดอัดหินคลุก การบดอัดหินคลุกด้วยความเร็วที่สูงช่วยลดระยะเวลาในการบดอัด

ได้อย่างมีนัยยะสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากหินคลุกถูกบดอัดได้แน่นกว่าดินลูกรัง ภายใต้ความเร็วรถบดอัดที่เท่ากัน

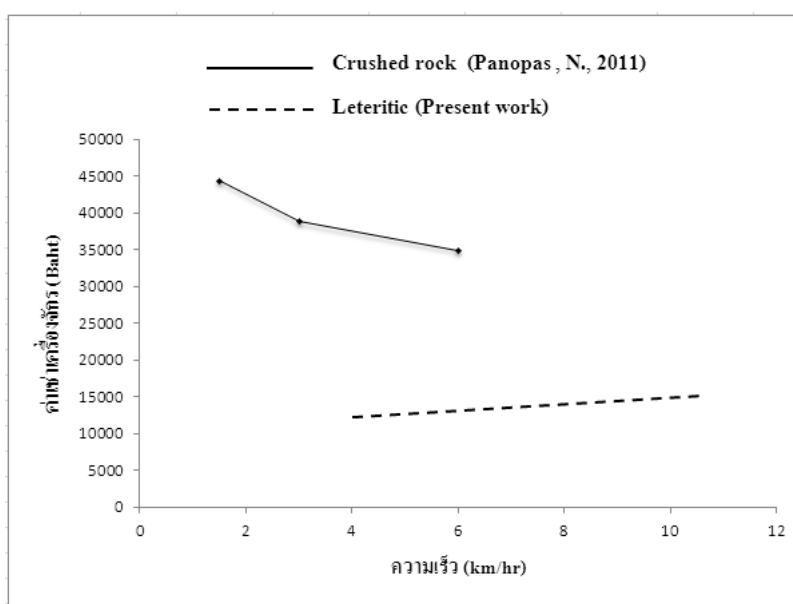


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ใช้ในการบดอัดจนได้ความแน่นแห้งสูงสุดในสนาม

รูปแบบมาตรฐานถนนของทางหลวงมี 4 เลน (2 เลน ต่อ 1 ทิศทางจราจร) ความกว้างของแต่ละทิศทางจราจรเท่ากับ 9.50 เมตร ดังนั้น รถบดอัดซึ่งมีความกว้างของล้อบดอัดเท่ากับ 2.15 เมตร จะต้องวิ่งเป็นจำนวน 5 แนววิ่ง จึงจะสามารถบดอัดได้เต็มผิวหน้าของถนน การบดอัดนิยมใช้ความยาวไม่เกิน 400 เมตรต่อเที่ยววิ่ง เพื่อลดการระเหยของน้ำ ซึ่งมีผลต่อค่าปริมาณน้ำเหมาะสมของวัสดุ การประมาณราคาค่าเงินการได้ดังนี้

รถบดอัดที่วิ่งด้วยความเร็ว 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะใช้เวลา 4 นาที ต่อระยะทาง 400 เมตร ดังนั้น การบดอัด 5 แนววิ่งๆ ละ 11 เที่ยว (ได้ความแน่นแห้งสูงสุดในสนาม) จะใช้เวลาทั้งสิ้น 3 ชั่วโมง 40 นาที โดยไม่คิดรวมกับเวลาที่สูญเสียจากการเบรครถและกลับรถ และเมื่อนำมาคูณกับค่าเช่าเครื่องจักรตามมาตรฐานค่าใช้จ่ายเครื่องจักรกลต่อชั่วโมงของกรมทางหลวงชนบท (ตารางที่ 4.1) จะทำให้เกิดค่าใช้จ่ายประมาณ 12,856 บาทต่อระยะทาง 400 เมตร ในทำนองเดียวกับการบดอัดด้วยความเร็ว 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งต้องการ 23 เที่ยววิ่ง จะใช้เวลาทั้งสิ้น 4 ชั่วโมง 10 นาที และเกิดค่าใช้จ่ายประมาณ 14,856 บาทต่อระยะทาง 400 เมตร

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเช่าเครื่องจักรและความเร็ว จะเห็นได้ว่า ค่าใช้จ่ายในการเช่าเครื่องจักรจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วของการบดอัด รูปที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบค่าเช่าเครื่องจักรและความเร็วของการบดอัดหินคลุกและดินลูกรัง ข้อมูลหินคลุกได้จากงานวิจัยของนิติ พันธุ์โอภาส (2556) การบดอัดดินลูกรังมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วบดอัด ในขณะที่ การบดอัดหินคลุกมีค่าใช้จ่ายน้อยลงตามความเร็วบดอัดที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น การบดอัดดินลูกรังควรใช้ความเร็วที่ต่ำประมาณ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การใช้ความเร็วบดอัดที่สูงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิง เวลา และทำให้เครื่องจักรสึกหรอ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับราคาค่าเช่าเครื่องจักรต่อความยาว 400 เมตร และผิวทางกว้าง 9.50 เมตร

ตารางที่ 4.1 มาตรฐานค่าใช้จ่ายเครื่องจักรกลต่อชั่วโมงของกรมทางหลวงชนบท

ชนิดของเครื่องจักรกล (Types of Equipment)	Size/HP.)	Year of Useful Life	Delivered Prices	Owning Cost			Operating Cost					รวมค่าใช้จ่าย			
				Investment Cost	Depreciation Cost	Total Owning Cost	Repair Cost	Fuel Cost		Maintenance Cost	Tires Cost	Operator Wage	งานจัดทำเอง	งานจ้างเหมา	
		(ปี)	(บาท)	(บาท/ชม.)	(บาท/ชม.)	(บาท/ชม.)	(บาท/ชม.)	(ลิตร/ชม.)	(บาท/ชม.)	(บาท/ชม.)	(บาท/ชม.)	(บาท/ชม.)	(บาท/ชม.)	(บาท/ชม.)	(บาท/ชม.)
รถเกี่ยดิน	140-160	10	4,000,000	12.8	160	172.8	146.07	23.87	715.86	107.38	16.5	55	985.81	1,213.61	
รถบดอัดเหล็ก สันสะเทือน	100-120	10	2,200,000	7.04	88	95.04	288.39	15.4	461.85	69.28	0	40	819.51	954.55	
รถบดอัดเหล็กแบบเดินตาม	5-15	10	350,000	1.12	14	15.12	32.77	0.77	23.09	3.46	0	40	59.33	114.45	
รถแทรกเตอร์ล้อยาง	80-100	10	1,200,000	3.84	48	51.84	28.09	13.09	392.57	58.89	9	40	488.54	580.38	
รถบดอัดยางขับเคลื่อนตัวเอง	70-90	10	1,800,000	5.76	72	77.76	94.04	12.32	369.48	55.42	6.6	40	525.54	643.30	
													รวมทั้งสิ้น	3,506.29	

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว เวลาและราคาเช่าเครื่องจักร

ความเร็ว (km/hr)	ระยะทาง(ม.)	ความกว้าง(ม.)	เวลาที่ใช้ในการบดอัด	ค่าเช่าเครื่องจักร/ชั่วโมง	ราคาเช่าเครื่องจักร (บาท)
6	400	9.50	3 ชั่วโมง 40 นาที	3,506.29	12,856.00
7	400	9.50	3 ชั่วโมง 43 นาที	3,506.29	13,256.00
8	400	9.50	3 ชั่วโมง 50 นาที	3,506.29	13,656.00
9	400	9.50	3 ชั่วโมง 56 นาที	3,506.29	14,056.00
10	400	9.50	4 ชั่วโมง 03 นาที	3,506.29	14,456.00
11	400	9.50	4 ชั่วโมง 10 นาที	3,506.29	14,856.00

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วยกข้อต่อความหนาแน่นแห่งของดินลูกรัง ผลการตรวจวัดในสนามนำมาวิเคราะห์ในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ และเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต ผลลัพธ์ของงานวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นและจำนวนเที่ยววิ่งรถอัดแสดงได้ด้วยฟังก์ชันลอการิทึม ซึ่งประกอบด้วยค่าคงที่สองตัว ได้แก่ a และ b ค่าคงที่ a เท่ากับ 16.7 และ 16.3 และค่าคงที่ b เท่ากับ 0.77 และ 0.73 สำหรับความเร็วยกข้อเท่ากับ 6 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความเร็วยกข้อที่ต่ำในการบดอัดจะใช้จำนวนเที่ยวในการบดอัดให้ได้ความแน่นแห่งสูงสุดในสนามต่ำกว่าการใช้ความเร็วสูงในการบดอัด
2. ความหนาแน่นสัมพันธ์ ($\gamma/\gamma_{d,max}$) เพิ่มขึ้นตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถอัดจนกระทั่งความหนาแน่นแห่งในสนามมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นแห่งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ แม้ว่าจะทำการเพิ่มพลังงานการบดอัดให้มากขึ้นแต่หน่วยน้ำหนักแห่งก็จะไม่สามารถเพิ่มขึ้นต่อไปได้อีกเนื่องจากระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่สถานะนี้มีค่าใกล้เคียงกับหน่วยน้ำหนักแห่งในสถานะไม่มีอากาศในโพรงดิน (Zero air void) ดังนั้นจำนวนเที่ยววิ่งที่มากเกินไปจึงไม่เกิดประโยชน์อันใดในทางปฏิบัติ
3. การวิ่งรถอัดความเร็วต่ำจะต้องใช้จำนวนเที่ยววิ่งรถอัดที่มาก จำนวนเที่ยววิ่งรถอัดที่ความหนาแน่นแห่งสูงสุด (N_{max}) มีค่าประมาณ 11 และ 23 สำหรับความเร็วเท่ากับ 6.0 และ 11.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
4. เวลาที่ใช้ในการบดอัดดินลูกรังให้ได้ความแน่นแห่งสูงสุดในสนาม เมื่อความกว้างของผิวทางเท่ากับ 9.5 เมตร และความยาวเท่ากับ 400 เมตร เท่ากับ 3 ชั่วโมง 40 นาที และ 4 ชั่วโมง 10 นาที สำหรับความเร็ว 6.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ 11.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้น ค่าเช่าเครื่องจักรในการบดอัดประมาณ 12,856 บาท และ 14,856 บาท ตามลำดับ
5. การใช้ความเร็วที่ต่ำในการบดอัดสามารถลดระยะเวลาและจำนวนรอบในการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นแห่งสูงสุดในสนาม และสามารถลดค่าเช่าเครื่องจักรได้ถึงร้อยละ 15.56 เมื่อลดความเร็วในการบดอัดจาก 11.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็น 6.0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

6. เนื่องจากดินลูกรังเป็นวัสดุที่มีความเป็นความเป็นพลาสติกสูงกว่าหินคลุก ดังนั้น หินคลุกจึงมีความสามารถในการรับพลังงานการบดอัดได้ดีกว่าดินลูกรัง เมื่อได้รับพลังงานจากการบดอัดที่เท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนเที่ยววิ่งรถบดอัดจึงแตกต่างกัน ในกรณีของการบดอัดหินคลุก การบดอัดด้วยความเร็วที่สูงมีประสิทธิภาพในเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งแตกต่างจากการบดอัดดินลูกรัง

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในครั้งนี้และงานวิจัยในอดีตเป็นการศึกษาพฤติกรรมการบดอัดของดินลูกรังและหินคลุก งานวิจัยในอนาคตที่ควรดำเนินการคือการศึกษาพฤติกรรมการบดอัดคันทาง ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างทาง หากมีการจัดทำโครงการงานเรื่องดังกล่าวแล้วจะทำให้เกิดประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับการก่อสร้างและปรับปรุงถนนเป็นอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน (2545). **ปฐพีกลศาสตร์**. สำนักพิมพ์ McGraw Hill.
- Proctor. (1930). **ทฤษฎีการบดอัดดิน**. ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ กิริรัตน์. หน้า 738 – 739
- Hogentogler (1936). **ทฤษฎีบดอัดดิน**. ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ กิริรัตน์. หน้า 739 – 740
- Buchanan(1942). **ทฤษฎีบดอัดดิน**. ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ กิริรัตน์. หน้า 740 – 741
- Hilf (1956). **ทฤษฎีบดอัดดิน**. ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ กิริรัตน์. หน้า 741 – 742
- Lambe (1985). **ทฤษฎีบดอัดดิน**. ปฐพีกลศาสตร์. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักดิ์ กิริรัตน์. หน้า 742– 743
- สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ(2532). **มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม (Soil-Aggregate Subbase)**. ทล.-ม. 205/2532 กรมทางหลวง
- สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ(2544). **มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (Crushed Rock Soil Aggregate Type Base)**. ทล.-ม. 201/2544 กรมทางหลวง
- สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ(2515). **วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL)**. ทล.-ท102/2515 กรมทางหลวง
- สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ (2515). **วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plastic Index (PI) ของดิน**.ทล.-ท103/2515 กรมทางหลวง
- สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ(2516). **วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม้ล้าง**. ทล.-ท. 204/2516 กรมทางหลวง
- สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ (2515). **วิธีการทดลองหาความสึกหรอของ (Coarse Aggregates) โดยใช้เครื่องมือ Los Angeles Abrasion**. ทล.-ท. 202/2515 กรมทางหลวง
- สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ(2517). **วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน**. ทล.-ท. 108/2517กรมทางหลวง
- สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ(2517). **วิธีการทดลองเพื่อหาค่า C.B.R.**ทล.-ท 109/2517 กรมทางหลวง

- Gurtug, Y and Sridharan, A. (2002). **Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils.** Geotechnique. Vol.52, No.10, pp.761-763
- Horpibulsuk, s., Miura, N, Nagaraj, T.S. (2005). **Clay-Water/Cement ratio identity of cement and mixed soft clay.** Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, ASCE, vol.131, No.2 , pp.187-192.
- Horpibulsuk, S., Suddepong, A., Chamket, P. and Chinkulkijniwat, A. (2013). **Compaction behavior of fine-grained soils, lateritic soils and crushed rocks.** Soils and Foundations. Vol.53, No.1, pp.166-172.
- 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). **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.

ประวัติผู้เขียน

นายสามารถ พงษ์วิมลสวัสดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 มกราคม 2521 ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 453 หมู่ที่ 1 ถนนราชสีมา-โชคชัย ต.หัวทะเล อ.เมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เมื่อปีพุทธศักราช 2552 ในปัจจุบันทำงานอยู่ที่สำนักพัฒนาพื้นที่ปฏิรูปที่ดิน สำนักงานการปฏิรูปที่ดินเพื่อเกษตรกรรม เลขที่ 166 อาคารปิติพงศ์ ถ.ประดิพัทธ์-สะพานควาย แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400 ตำแหน่ง วิศวกรโยธา ปฏิบัติการ