ความหนาแน่นแห้งและกำลังอัดของผิวทางที่ได้รับการซ่อมแซม ด้วยเทคนิคการนำวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่

นายธนกฤต เกตุสงเคราะห์

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

ความหนาแน่นแห้งและกำลังอัดของผิวทางที่ได้รับการซ่อมแซม ด้วยเทคนิคการนำวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ

_____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

_____

(รศ. ดร.วชรภูมิ เบญจโอพาร)

กรรมการ

_____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ธนกฤต เกตุสงเคราะห์ : ความหนาแน่นแห้งและกำลังอัดของผิวทางที่ได้รับการซ่อมแซมด้วยเทคนิคการนำวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (DRY DENSITY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF STABILIZED PAVEMENT BY RECYCLING TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการบดอัด ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนเที่ยวรถบดอัด และอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของผิวทางซีเมนต์บดอัดในสนามและในห้องปฏิบัติการ แปลงทดสอบที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีทั้งสิ้น 4 แปลง และอยู่ในพื้นที่จังหวัดสระบุรี ของสำนักงานทางหลวงชนบทที่ 2 (สระบุรี) กรมทางหลวงชนบท ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นแห้งของผิวทางซีเมนต์บดอัดเพิ่มขึ้นตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดในฟังก์ชั่นล็อกการิทึม ความไม่สม่ำเสมอในการผสมซีเมนต์เข้ากับผิวทางเดิมส่งผลให้กำลังอัดของผิวทางซีเมนต์บดอัดในสนามมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดในห้องปฏิบัติการ ในทางปฏิบัติ อาจกล่าวได้ว่าความไม่สม่ำเสมอในการผสมมีอิทธิพลต่อกำลังอัดในสนามไม่มาก ดังจะเห็นได้จากอัตราส่วนกำลังในสนามต่อกำลังอัดในห้องปฏิบัติการที่สูงถึงร้อยละ 90 ถึง 95 ดังนั้น ผิวทางเดิมผสมซีเมนต์ในสนามที่ได้รับการบดอัดจนได้ความหนาแน่นแห้งได้ตามที่ออกแบบ และได้รับการบ่มในสนามด้วยปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับกำลังอัดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ การวิเคราะห์ผลการศึกษาทั้งหมดนำมาซึ่งการกำหนดขั้นตอนในการซ่อมแซมผิวทางด้วยเทคนิคการนำวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่อย่างมีประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

TANAKRIT KETSONGKHO : DRY DENSITY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF STABILIZED PAVEMENT BY RECYCLING TECHNIQUE. ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

This research studies compaction behavior, relationship between dry density and number of roller passes, and field strength to laboratory strength ratio of stabilized pavement. Four field tests are included in this study and they are in Saraburi province under the supervision of the Office of Rural Highway No. 2 (Saraburi), Department of Rural Roads. The dry unit weight of the stabilized pavement increases with increasing number of roller passes in a logarithm function. Non-uniformity of mixing cement with damaged pavement leads to the field strength being lower than the laboratory strength. The influence of non-uniformity of mixing is considered as low due to significantly low field strength to laboratory strength ratio of approximately 90-95%. Consequently, the stabilized pavement, with designed dry unit weight and sufficient water for hydration, exhibits the field strength similar to the laboratory strength. An analysis of the test results yields an effective procedure for the pavement recycling technique in term of engineering and economic perspectives.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Civil Engineering Student's Signature_____

Academic Year 2013 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานบัณฑิตนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องด้วยคณาจารย์และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือสนับสนุนเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงานวิจัยและอนุเคราะห์ข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข อย่างสุดซึ้งที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนช่วยกระตุ้น จนโครงงานฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ประธานกรรมการสอบโครงงานบัณฑิตที่ช่วยให้คำแนะนำในการศึกษางานวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.วชรภูมิ เบญจโอฬาร กรรมการสอบโครงงานบัณฑิต ที่ช่วยให้คำแนะนำในการศึกษางานวิจัย

สำนักงานทางหลวงชนบทจังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและช่วยเหลือในการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการและในสนาม

สำนักทางหลวงชนบทที่ 2 (สระบุรี) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและช่วยเหลือในการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการและในสนาม

พี่นิยม กิจหนองสรวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือปัจจัยและให้โอกาสทางการศึกษา

อาจารย์วรรชัย เกษกัน ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือปัจจัยและให้โอกาสทางการศึกษา

พี่โภคิน ช้าเกตุ ที่คอยให้คำปรึกษาและข้อมูล เกี่ยวกับงานวิจัย

คุณณัฐชัย โปร่งมณี ที่คอยให้คำปรึกษาและข้อมูล เกี่ยวกับงานวิจัย

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมศักดิ์ คุณแม่เลียบ คุณตาพวง คุณยายบาง ที่ได้อบรมสั่งสอน สนับสนุนให้การศึกษาจนได้มาถึงวันนี้ และที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

ธนกฤต เกตุสงเคราะห์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ฉ

สารบัญรูปภาพ ..... ช

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ปริทัศน์ วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 บทนำ 4

2.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930) 4

2.3 เส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction Curve) 5

2.4 วิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) 7

2.5 การก่อสร้างและการบดอัด ชั้นโครงสร้างทาง 13

2.6 เครื่องจักรกลที่ใช้บดอัดดินในสนาม 16

2.7 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนามโดยวิธี Nuclear Gauge หลักการทั่วไปของเครื่องมือ Nuclear Gauge 20

2.8 มาตรฐานการทดสอบความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีต (Compressive Strength Of Concrete) 38

3 วิธีดำเนินการศึกษา 44

3.1 บทนำ 44

3.2 แผนงานดำเนินการ 44

3.3 ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ 44
3.4 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม (Field Density Test) โดยวิธีการ Nuclear Method 45
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล 47
4.1 บทนำ 47
4.2 วิธีดำเนินการทำวิจัย 48
4.3 ผลทดสอบและการวิเคราะห์ 49
4.4 ขั้นตอนการควบคุมงานบดอัดในสนาม 59
5 สรุปผลการทดสอบ 61
5.1 สรุปผลการศึกษา 61
เอกสารอ้างอิง 62
ประวัติผู้เขียน 63

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางกับตัวคูณที่ใช้แก้ไขค่าความต้านแรงอัด 42

4.1 คุณสมบัติหินคลุกที่ทำการทดสอบ 49

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve)	4
2.2	ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion)ในดินเม็ดหยาบ	5
2.3	เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)	6
2.4	รถบดล้อเรียบ	16
2.5	รถบดล้อยางทำงานด้วยระบบความดันลม (pneumatic-tired roller)	17
2.6	รถบดตีนแกะ	18
2.7	รถบดสั่นสะเทือน (vibrating roller)	18
2.8	a)ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่าน (Johnson and Sallberg. 1960	19
2.8	b)ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่าน (D'Appolonia et al., 1969)	19
2.9	การประมาณความหนาของระดับชั้นของดินสำหรับความหนาแน่นสัมพัทธ์ 75% กับจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่านเท่ากับ 5 รอบ	20
2.10	รูปแบบของการจัดระบบการวัดสำหรับการกระเจิงกลับของรังสีกับวัตถุเทียบได้กับการใช้เครื่องมือวัดในการวัดแบบ backscatter	22
2.11	รูปแบบของการจัดระบบการวัดสำหรับการใช้รังสีส่งผ่านวัตถุเทียบได้กับการใช้เครื่องมือวัดในการวัดแบบ direct transmission	22
2.12	รูปร่างลักษณะของเครื่องมือและตำแหน่งของ source rod positions ในการใช้งานที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน	23
2.13	การจัดเครื่องมือทดสอบเพื่อหาค่าความชื้นในสนาม	26
2.14	กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย pcf	26
2.15	กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย kg/m3 top layer effect	27
2.16	กราฟผลกระทบที่เรียกว่า top layer effect ที่มีต่อการวัดค่าความแน่นแบบ back scatter ที่ความหนาต่าง ๆ กัน	28
2.17	การจัดตำแหน่งของเครื่องมือเพื่อทำการทดสอบในโหมดThin Layer	29
2.18	ส่วนประกอบของชุดวัดความชื้นและความหนาแน่นของเครื่องมือ	30

2.19 การทำ Calibration ของเครื่องมือ โดยทดสอบบนวัสดุที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอน 31
2.20 จอแสดงผลจะแสดง ค่า STD ของ DS และ MS 32
2.21 จอแสดงผลการทำ Standard Count ใหม่ 33
2.22 การนำเครื่องทดสอบวางบนแผ่นบอล์คพาราฟินเพื่อทำ Standard count 33
2.23 จอแสดงผลเมื่อเสร็จสิ้นการนับรังสีแล้ว 34
2.24 จอแสดงการ Calibrate ตำแหน่งของแท่งรังสี 34
2.25 การเจาะรูโดยใช้ Scraper plate (Drill Rod guid) และแท่ง Drill Rod เป็นการระบุตำแหน่งที่จะนำสารรังสีลงไปในสนามในการเลือกลักษณะการใช้งานแบบ Direct transmission โดยมีการทำสัญลักษณ์หลังจากเจาะเตรียมไว้เพื่อที่จะได้นำเครื่องมือมาวางให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง 36
2.26 จอแสดงผลการทดสอบเมื่อครบเวลา 1 นาที 37
2.27 การกดแท่งรังสีให้เลื่อนลงไปในรูเจาะให้ลึกตามที่ต้องการ โดยคลายล๊อคกลไกที่แขนจับ หลังจากนั้นกดปุ่มคำสั่งให้เครื่องทำงาน 38
3.1 แผนผังขั้นตอนการซ่อมบำรุงผิวทางด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ 46
4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดินของหินคลุก 50
4.2 ผลทดสอบการบดอัดและ CBR ของหินคลุกจากโครงการก่อสร้างทาง 51
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR/CBR_{max} และค่า $\gamma_d/\gamma_{d,\,max}$ 52
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความแน่นแห้งในสนามต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับจำนวนรอบการบดอัดด้วยรถบด 53
4.5 กำลังอัดของโครงการทดสอบหาดสองแคว ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และขอบซ้ายและขวาของถนน 54
4.6 กำลังอัดของโครงการทดสอบสองคอน ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และขอบซ้าย และขวาของถนน 55
4.7 กำลังอัดของโครงการทดสอบซับครก ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และขอบซ้าย และขวาของถนน 56
4.8 กำลังอัดของโครงการทดสอบดงมะเกลือที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ขอบซ้าย และขวาของถนน 57
4.9 อัตราส่วนของ qufh/qul ของสถานีต่างๆ 58
4.10 อัตราส่วนของ qufr/qufhของสถานีต่างๆ 58

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กรมทางหลวงชนบทได้นำวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยวัสดุเชื่อมประสาน (cementing agents) มาใช้ในการแก้ไขผิวทางที่ชำรุดและไม่สามารถใช้งานได้ การปรับปรุงทำโดยการผสมชั้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง (base or subbase) ที่เสียหายเข้ากับวัสดุเชื่อมประสาน เช่น ปูนซีเมนต์หรือปูนขาว และแอสฟัลต์ เป็นต้น และอาจมีการเติมวัสดุผสมเพิ่ม เช่น หิน ทราย และดินเม็ดหยาบ (soil aggregate) เป็นต้น ต่อจากนั้นทำการบดอัด จนได้ความแน่นตามต้องการ วิธีการนี้เรียกว่า “การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement In-Place Recycling)” ข้อดีของวิธีการนี้คือรวดเร็วและประหยัดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงและซ่อมแซมถนนโดยวิธีการอื่น นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ยังเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศ ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์

การบดอัดในสนามจะเริ่มดำเนินการได้ก็ต่อเมื่อทราบผลทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ (ปริมาณน้ำเหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุด) การบดอัดในสนามทำโดยอาศัยรถบดอัดจนได้ความหนาแน่นแห้งตามข้อกำหนด หน่วยงานหลัก เช่น กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรมโยธาธิการและผังเมือง และกรมทางหลวงชนบท มีข้อกำหนดในการบดอัดดังนี้ ความหนาแน่นแห้งในสนามต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งในสนามสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ และปริมาณน้ำในดินต้องมีค่าอยู่ระหว่าง -3 OWC และ +3 OWC เมื่อ OWC คือปริมาณน้ำเหมาะสมที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ การบดอัดในสนามจะเป็นแบบนวด (kneading) ด้วยรถบดอัดและให้พลังงานการบดอัดดินแก่ดินผ่านจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดวิ่ง จำนวนเที่ยววิ่งยิ่งมาก พลังงานการบดอัดที่ให้แก่ดินก็ยิ่งมากตาม รถบดอัดที่ใช้กับงานถนน ได้แก่ รถบดล้อเหล็ก รถบดล้อยาง และรถบดสั่นเทือน การบดอัดและการควบคุมงานบดอัดแน่นในสนามไม่มีมาตรฐานควบคุมจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด คนขับรถบดอัดส่วนใหญ่อาศัยประสบการณ์ในการบดอัดโดยพยายามวิ่งให้ได้จำนวนเที่ยวมากที่สุด เพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห้งที่กำหนด ผู้ควบคุมงานจะตรวจสอบความหนาแน่นในสนามด้วยวิธีแทนที่ด้วยทราย (sand cone method) และนิวเคลียร์ (nuclear) หากความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำในดินไม่ได้ตามข้อกำหนด ผู้รับจ้างต้องทำการบดอัดใหม่ จะเห็นได้ว่าจำนวนเที่ยวของรถบดอัดมีความสำคัญอย่างมากต่อการบดอัดและควบคุมการทำงาน หากจำนวนเที่ยวการบดอัดน้อยเกินไปความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำในดินไม่ได้ตามข้อกำหนด แต่หากจำนวนเที่ยวการบดอัดมาก

เกินไป ถึงแม้ความหนาแน่นแห้งในสนาม จะได้ตามข้อกำหนด แต่ก็เป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ทั้งแรงงาน น้ำมันเชื้อเพลิง และความเสื่อมสภาพของรถบดอัด

นอกจากความแน่นแล้ว ประสิทธิภาพของการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับวัสดุพื้นทางเดิมหรือชั้นรองพื้นทางเดิมด้วยเครื่องจักร รวมทั้งสภาพการบ่มวัสดุดินซีเมนต์ในสนาม เป็นตัวแปรที่ควบคุมกำลังอัดของถนนดินซีเมนต์ในสนาม Horpibulsuk et al. (2006) แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการถึงประมาณสองเท่า สภาพอากาศที่ร้อนของประเทศไทยเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามมีค่าต่ำลง (Chinkulkijniwat and Horpibulsuk, 2012)

งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการบดอัดดินซีเมนต์ในสนาม ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนเที่ยวรถบดอัด และหาจำนวนเที่ยวที่เหมาะสมในการบดอัดดินซีเมนต์ รวมทั้งศึกษาอิทธิพลที่ควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนาม และอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ แปลงทดสอบที่จะใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีทั้งสิ้น 4 แปลง และอยู่ในพื้นที่จังหวัดสระบุรี ผลการศึกษาทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์เพื่อนำเสนอแนวทาง การปฏิบัติงานและควบคุมงานซ่อมบำรุงผิวทาง ด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ ผลการศึกษาทั้งหมดนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพงานทางและช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบดอัด

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างความแน่นแห้งของดินซีเมนต์บดอัดในสนาม และจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการผสม การบดอัด และการบ่มต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนาม

1.2.3 เพื่อนำเสนอขั้นตอนการปฏิบัติงานและควบคุมงานซ่อมบำรุงผิวทางด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ที่มีประสิทธิภาพ (ได้ความหนาแน่นตามข้อกำหนดด้วยกำลังอัดที่สูงและต้นทุนการปฏิบัติงานที่ต่ำ)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลัก: การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบในสนาม การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย การบดอัดและการทดสอบแรงอัดแกนเดียวของวัสดุชั้นทางผสมปูนซีเมนต์ การทดสอบในสนามประกอบด้วยการทดสอบความหนาแน่น

แห้งและปริมาณความชื้นในสนาม การเก็บตัวอย่างและการทดสอบแรงอัดแกนเดียวของวัสดุชั้นทางผสมปูนซีเมนต์ ความหนาแน่นแห้ง และปริมาณน้ำในสนามวัดโดยชุดตรวจวัดนิวเคลียร์ แปลงทดสอบในงานวิจัยนี้มีทั้งสิ้น 4 แปลง และอยู่ในพื้นที่สระบุรี ผลทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามจะนำมาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาแนวทางการปฏิบัติงานและควบคุมงานซ่อมผิวทางด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ที่มีประสิทธิภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบลักษณะการพัฒนาความหนาแน่นแห้งของวัสดุชั้นทางผสมปูนซีเมนต์ ตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด

1.4.2 ทราบการพัฒนากำลังอัดของวัสดุชั้นทางผสมกับปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ กำลังอัดของวัสดุชั้นทางผสมกับปูนซีเมนต์ในสนาม และกำลังอัดของวัสดุชั้นทางผสมกับปูนซีเมนต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ

1.4.3 ทราบความแตกต่างของกำลังอัดของวัสดุชั้นทางผสมกับปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและกำลังอัดของวัสดุชั้นทางผสมกับปูนซีเมนต์ในสนาม

1.4.4 ได้ขั้นตอนปฏิบัติงานและควบคุมงานซ่อมผิวทางด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิม มาใช้ใหม่ที่มีประสิทธิภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

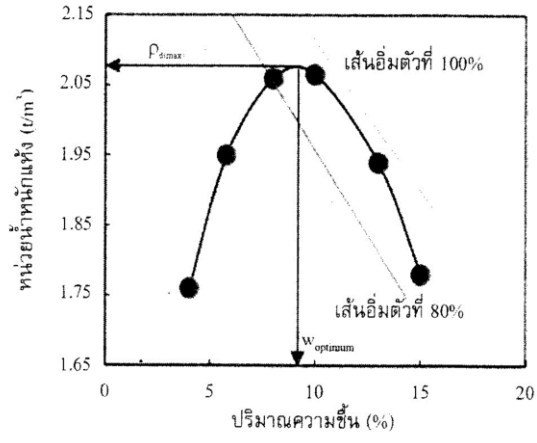
บทที่ 2
ปริทัศน์ วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษากำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อความเข้าใจถึงความแตกต่างของกำลังอัดในห้องปฏิบัติการและในสนาม ซึ่งการบดอัดดินเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างมีความจำเป็นอย่างมาก ดังนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีการบดอัด การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบในสนามเพื่อเป็นแนวทางการปฏิบัติงานและควบคุมงานซ่อมบำรุงผิวทางด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางมาใช้ใหม่

2.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)

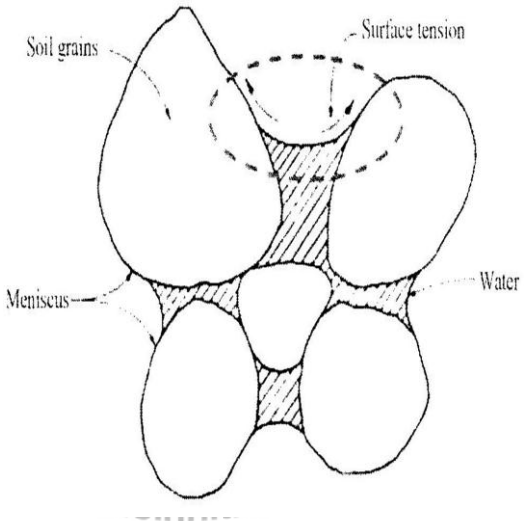
ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R.Proctor (1930) โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering New-Record (proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า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



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (typical compaction curve)

Proctor ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดเส้นการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 2.1 ไว้ว่า ประสิทธิภาพของการบดอัดดินถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน โดยแบ่งการบดอัดดินเป็น 2 ด้านคือ ด้านแห้งและด้านเปียก สำหรับการบดอัดดินที่แห้งมากๆ ดินจะมีแรงเสียดทานที่สูงมาก เนื่องจากแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี่ (Capillary Moisture) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมากๆ น้ำจะไปลดแรงคาพิลลารี่ และเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย ถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกเรื่อยๆ จนน้ำไปสลายแรงเสียดทานได้แล้ว น้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จนถึงปริมาณน้ำที่เต็มช่องว่าง ในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเรียกจุดที่ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดว่า maximum dry density และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้ว่า optimum water content หลังจากจุดนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินสูงมาก ๆ พบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป



รูปที่ 2.2 ผลของแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion) ในดินเม็ดหยาบ

2.3 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)

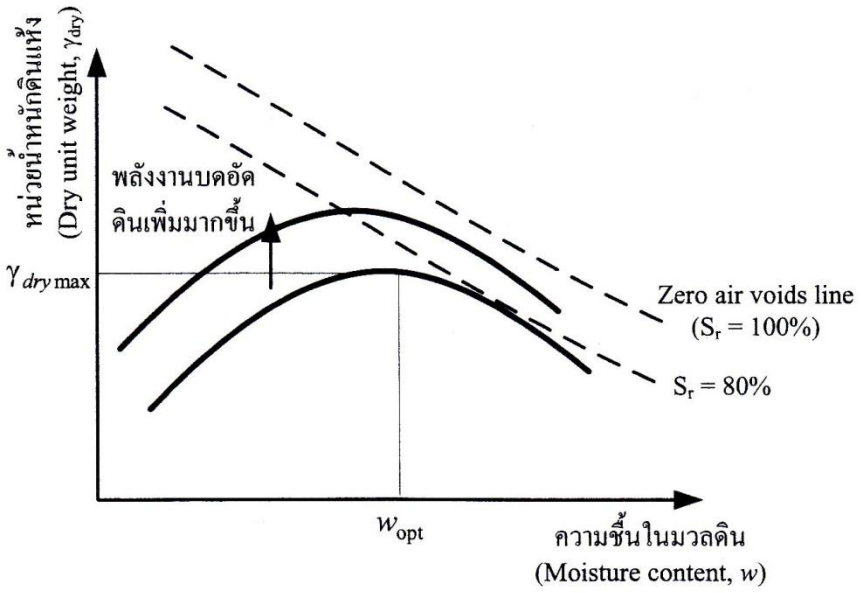
ทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ในงานบดอัดดิน คือ สมการความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับระดับขั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำ

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

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

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

ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในมวลดิน (แกนนอน) มาเขียนกับหน่วยน้ำหนักดินแห้ง (แกนตั้ง) ของการบดอัดดิน ซึ่งเรียกว่าเส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction curve) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งการบดอัดดิน (compaction curve)

จากเส้นโค้งการบดอัดดินในรูปที่ 2.3 พบว่าหน่วยน้ำหนักดินแห้งในตอนแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด (maximum dry unit weight, (γdry max) และเรียกปริมาณน้ำ ณ จุดนี้ว่า ปริมาณน้ำเหมาะสม และเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าจุดนี้จะทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งลดลง

ในทางปฏิบัติแล้ว การที่จะบดอัดดินให้อยู่ในสภาพทางทฤษฎีนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าการบดอัดดินนอกจากจะขึ้นกับปริมาณน้ำแล้ว ยังขึ้นกับระดับพลังงานกล (Mechanical energy) ที่กระทำกับดินที่บดอัดอีกด้วย โดยพลังงานที่ให้กับดินขณะทำการบดอัดจะต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะขับไล่ฟองอากาศให้ออกจากมวลดิน จนทำให้ดินอยู่เข้าใกล้สภาวะไร้ช่องว่างอากาศ (Zero air voids) จากรูปที่ 2.3 เมื่อเพิ่มพลังงานการบดอัดดิน จะพบว่าเส้นโค้งการบดอัดดินจะเคลื่อนตัว มาทิศทางบนซ้าย โดยหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด จะมีค่ามากขึ้น แต่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม w_{opt} จะมีค่าลดลง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเส้นโค้งการบดอัดดินจะถูกควบคุมด้วยเส้นไร้ช่องว่างอากาศ (Zero air voids line) เส้นโค้งการบดอัดดินจะไม่ตัดเส้นไร้ช่องว่างอากาศ สมการเส้นไร้ช่องว่างอากาศจะหาได้จากสมการที่ 2.1 และแทนค่า $S_r = 1$ นั่นคือ

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

2.4 วิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน(modified compaction test) มทช.(ท) 501.2-2545

2.4.1 ขอบข่าย

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

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

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

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

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

การใช้วิธีทดสอบวิธีใดให้เป็นไปตามรายการที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง ถ้าไม่ได้ระบุวิธีการทดสอบให้ใช้ วิธี ก.

2.4.2 วิธีทำ

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

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

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

2.4.3 การเตรียมตัวอย่าง

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

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

2.4.4 การทดสอบ

การทดสอบวิธี ก.

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

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

2.4.5 การคำนวณ

- คำนวณหาค่าความชื้นในดินเป็นร้อยละ

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

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

- คำนวณหาค่าความแน่นชื้น (WET DENSITY)

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

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

- คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (dry density)

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

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

2.4.6 การรายงาน

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

2.4.7 ข้อควรระวัง

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

2.5 การก่อสร้างและการบดอัด ชั้นโครงสร้างทาง

2.5.1 งานชั้นดินถมคันทาง

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

2.5.2 งานชั้นรองพื้นทาง (subbase)

งานชั้นรองพื้นทาง หมายถึง การก่อสร้างวัสดุบนชั้นคันทาง หรือบนชั้นวัสดุคัดเลือกที่ได้ก่อสร้างแล้วเสร็จ โดยใช้วัสดุลูกรัง หรือมวลรวมดิน (soil aggregate) นำมาคลุกเคล้าผสมน้ำ (mix Process) แล้วทำการปรับเกลี่ยแต่งและบดอัดแน่นให้ได้รูปแบบ ความหนาชั้นละไม่เกิน 15 ซม. ความแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density

- วิธีการก่อสร้าง

กรณีการก่อสร้างชั้นรองพื้นทางบนถนนเดิมที่มีผิวจราจรเป็นลูกรัง ให้ตบแต่งพื้นทางเดิมให้ได้แนวและระดับตามรูปแบบที่กำหนด หากมีวัสดุส่วนใดที่หลุดร่อนไม่คงทนหรือด้อยคุณภาพหรือเป็นหลุมบ่อ ต้องกวาดวัสดุเดิมออกให้หมด และดำเนินการกลบหลุมบ่อด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่ต่ำกว่ามาตรฐานของวัสดุคัดเลือก หรือหากพบบริเวณใดที่มีดินอ่อนอยู่ใต้ชั้นโครงสร้างเดิม (soft spot) ให้ขุดออกแล้วนำวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่ต่ำกว่ามาตรฐานของวัสดุคัดเลือกมาถมแทนที่ และบดอัดเป็นชั้น ๆ ความแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 standard proctor density

กรณีการก่อสร้างชั้นวัสดุรองพื้นทางใหม่บนชั้นวัสดุรองพื้นทางเดิม ซึ่งมีความหนาของชั้นน้อยกว่า 10 เซนติเมตร ต้องขุดคุ้ย วัสดุชั้นรองพื้นทางเดิมช่วงนั้นลึกไม่น้อยกว่า 5 เซนติเมตร แล้วผสมคลุกเคล้ากับวัสดุชั้นรองพื้นทางใหม่ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงทำการบดให้แน่นและได้ระดับตามแบบก่อสร้าง

กรณีที่ก่อสร้างบนคันทาง ที่ได้บดอัดและปรับแต่งเรียบร้อยแล้ว ให้นำวัสดุรองพื้นทางที่มีคุณสมบัติตามที่กำหนด มาเกลี่ยแผ่บดอัดเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นไม่เกิน 15 เซนติเมตร ความแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density บริเวณใดหรือช่วงใดหากวัสดุรองพื้นทางที่เกลี่ยแผ่และทำการบดอัดแล้ววัสดุมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดมีการแยกตัวออกจากกัน (segregation) ให้แก้ไขโดยขุดออกแล้วทำการผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หรือรื้อออกแล้วนำวัสดุรองพื้นทางที่มีส่วนผสมสม่ำเสมอใส่ลงไปแทน ในกรณีที่ใช้วัสดุมากกว่าหนึ่งชนิด นำมาผสมกันเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางนั้น วัสดุแต่ละชนิดจะต้องได้รับการคลุกเคล้าให้มีลักษณะสม่ำเสมอและต้องได้รับการตรวจสอบความถูกต้องตรงตามมาตรฐานวัสดุรองพื้นทางจากผู้ควบคุมงานก่อน

และเมื่อทำการก่อสร้างชั้นรองพื้นทางเสร็จเรียบร้อยแล้วจะต้องมีผิวหน้าเรียบแน่นสม่ำเสมอได้ระดับถูกต้องตามแบบก่อสร้าง

- ผลการทดสอบความแน่นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ หากผลทดสอบความแน่นในสนามน้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density ให้พิจารณา ดำเนินการดังนี้
  - หากปริมาณน้ำอยู่ในช่วงของ ±3% ของค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่การทดสอบความแน่นไม่ผ่านตามข้อกำหนดให้ทำการบดอัดซ้ำ โดยเพิ่มปริมาณพลังงาน (recompaction) และเพิ่มจำนวนเที่ยว เพื่อให้ได้ความแน่นตามที่กำหนด
  - หากปริมาณน้ำไม่อยู่ในช่วง ±3% ของค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะต้องขุดคุ้ยวัสดุเพื่อตากให้แห้ง กรณีที่ปริมาณน้ำมากเกินไป หรือผสมน้ำเพิ่ม กรณีที่ปริมาณน้ำน้อย แล้วจึงทำการบดอัดใหม่ให้ได้ความแน่นตามที่กำหนด
- ข้อแนะนำเพิ่มเติม
  - ก่อนก่อสร้างชั้นรองพื้นทางหากพื้นผิววัสดุชั้นล่างแห้ง ให้สเปรย์น้ำเพื่อเพิ่มความชื้นก่อน และเป็นการป้องกันการดูดซึมน้ำจากวัสดุรองพื้นทางที่กำลังก่อสร้าง ซึ่งอาจทำให้ค่าปริมาณความชื้น ของชั้นรองพื้นทางเปลี่ยนแปลงไปทำให้ความแน่นไม่ได้ตามข้อกำหนด นอกจากนี้การให้ความชื้นยังทำให้การประสานระหว่างวัสดุ 2 ชั้น ดีขึ้นด้วย
  - ให้สังเกตวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างจะต้องมีลักษณะเป็นวัสดุชนิดและแหล่งเดียวกันโดยจะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติ ทั้งจากแหล่ง general test และในระหว่างการก่อสร้าง control test ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด

2.5.3 งานพื้นทาง (base)

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

- วิธีการก่อสร้าง

การก่อสร้างต้องตรวจสอบระดับและความแน่นของชั้นรองพื้นทางให้ถูกต้อง ก่อนนำวัสดุพื้นทางมาถมบนชั้นรองพื้นทางทำการคลุกเคล้าวัสดุกับน้ำให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอและมีความชื้นพอเหมาะใกล้เคียงกับค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด จากห้องปฏิบัติการ จากนั้นจึงเกลี่ยแผ่แล้วบดอัดเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นหนาไม่เกิน 15 เซนติเมตร บดอัดแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density บริเวณใดหรือช่วงใดวัสดุพื้นทางที่เกลี่ยแผ่และทำการบดอัดแล้วมีมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดแยกตัวจากกัน (segregation) ให้แก้ไขโดยการขุดรื้อออกแล้วทำการผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หรือรื้อออกใส่วัสดุพื้นทางที่มีส่วนผสมสม่ำเสมอลงไปแทน แล้วสเปรย์น้ำให้ได้ความชื้นที่เหมาะสม เกลี่ยให้ได้รูปตามแบบก่อสร้างแล้วทำการบดอัดแน่น ในระหว่างการบดอัดให้มีการสเปรย์ น้ำบาง ๆ เพื่อให้วัสดุจับตัวกันจะช่วยให้ผิวหน้าเรียบปราศจากหลุมบ่อ และเพื่อให้ผิวหน้าเรียบแน่นสม่ำเสมอ ให้ทำการบดอัดชั้นสุดท้ายด้วยรถบดล้อเหล็กน้ำหนักไม่น้อยกว่า 12 ตัน ซึ่งในระหว่างก่อสร้างหากมีฝนตกน้ำขัง ทำให้ความชื้นในระหว่างการบดอัดมากเกินไปจนเป็นเหตุให้ชั้นพื้นทางเสียหายหรืออาจเสียหายลึกลงไปถึงชั้นรองพื้นทางด้วย ดังนั้นเมื่อพบว่าพื้นทางส่วนที่ได้ก่อสร้างแล้วมีการบวมตัว (soft spot) จะต้องรื้อออกและอาจต้องตรวจสอบชั้นรองพื้นทางด้วยว่ามีความเสียหายหรือไม่ หากเสียหายจะต้องรีบดำเนินการแก้ไขปรับปรุงชั้นรองพื้นทางให้เรียบร้อยก่อนแล้วจึงทำการแก้ไขพื้นทางต่อไปถ้าแบบก่อสร้างกำหนดความหนาพื้นทางมากกว่า 15 เซนติเมตร ให้แบ่งการทำงานเป็น 2 ชั้น หนาชั้นละเท่า ๆ กัน (โดยประมาณ) บดอัดให้แน่นและได้ระดับตามแบบก่อสร้าง

งานชั้นพื้นทางที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ และยังไม่ได้ก่อสร้างลาดยางรองพื้นแอสฟัลต์ (prime coat) ตามขั้นตอนปกติ ให้ฉีดพ่นน้ำหล่อเลี้ยงผิวหน้าป้องกันการสูญเสียความชื้น

- ผลการทดสอบความแน่นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ หากผลทดสอบความแน่นในสนามน้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density ให้พิจารณาดำเนินการดังนี้
  - หากปริมาณน้ำอยู่ในช่วง ใกล้เคียงค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่การทดสอบความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ให้ทำการบดทับซ้ำโดยเพิ่มพลังงานการบดอัดและเพิ่มจำนวนเที่ยว เพื่อให้ได้ความแน่นตามที่ต้องการ
  - หากปริมาณน้ำไม่อยู่ในช่วงใกล้เคียงค่าปริมาณความชื้นที่ให้ความแน่นสูงสุด ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะต้องขุดคุ้ยวัสดุ เพื่อตากให้แห้งกรณีที่ปริมาณน้ำมากเกินไป หรือผสมน้ำเพิ่ม กรณีที่ปริมาณน้ำน้อย แล้วจึงบดอัดใหม่ให้ได้ความแน่นตามข้อกำหนด

2.6 เครื่องจักรกลที่ใช้บดอัดดินในสนาม

อุปกรณ์และเครื่องจักรกลที่ใช้ในการทำงานมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีความเหมาะสมเฉพาะงาน ดังนั้นการรู้จักใช้อุปกรณ์และเครื่องจักรกลให้เหมาะสมกับขนาดและประเภทของงานเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การบดอัดดินในสนามพอที่จะจำแนกระบบบนพื้นฐานการทำงานของเครื่องจักรกลได้ดังนี้

2.6.1 รถบดล้อเรียบ (รูปที่ 2.4) เป็นรถบดอัดที่เหมาะสำหรับกรวด ทราย หรือวัสดุที่คล้ายคลึง ล้อรถบดทำด้วยเหล็กที่มีความแข็งแรงมาก การบดอัดจะทำให้เกิดการแตกหักของเม็ดดินและทำให้ผิวถนนเรียบ ความดันที่จุดสัมผัสระหว่างดินกับล้อประมาณ 45 ถึง 55 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (310 ถึง 380 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) รถบดอัดประเภทนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการบดอัดในชั้นดินที่หนามาก เนื่องจากความดันล้อมีค่าไม่สูงนัก

รูปที่ 2.4 รถบดล้อเรียบ

2.6.2 รถบดล้อยาง (รูปที่ 2.5) เป็นรถบดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่ารถบดล้อเรียบในหลายๆ ด้าน รถบดประเภทนี้เป็นรถบดที่มีน้ำหนักมาก และประกอบด้วยล้อประมาณ 4 ถึง 6 ล้อในหนึ่งแถว แต่ละล้อมีระยะห่างใกล้กัน ความดันที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับดินประมาณ 85 ถึง 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (585 ถึง 690 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) รถบดแบบนี้เหมาะสำหรับดินทรายและดินเหนียว การบดอัดเป็นการผสมผสานระหว่างการบดอัดด้วยความดันและการนวด

รูปที่ 2. 5 รถบดล้อยางทำงานด้วยระบบความดันลม (pneumatic-tired roller)

2.6.3 รถบดตีนแกะ (รูปที่ 2.6) ประกอบด้วยล้อโลหะรูปทรงกระบอกที่มีเหล็กยื่นออกมา (projection) พื้นที่ของแต่ละ projection จะประมาณ 4 ถึง 13 ตารางนิ้ว (25 ถึง 85 ตารางเซนติเมตร) รถบดประเภทนี้เป็นรถบดที่มีประสิทธิภาพในการบดอัดดินเหนียวมากที่สุด ความดันที่จุดสัมผัสระหว่างดินและล้อบดประมาณ 200 ถึง 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (1380 ถึง 6900 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) การวิ่งผ่านของรถรอบแรก ๆ จะบดอัดดินส่วนที่อยู่ด้านล่าง และการวิ่งผ่านของรถรอบหลัง ๆ จะบดอัดดินที่อยู่ชั้นบน

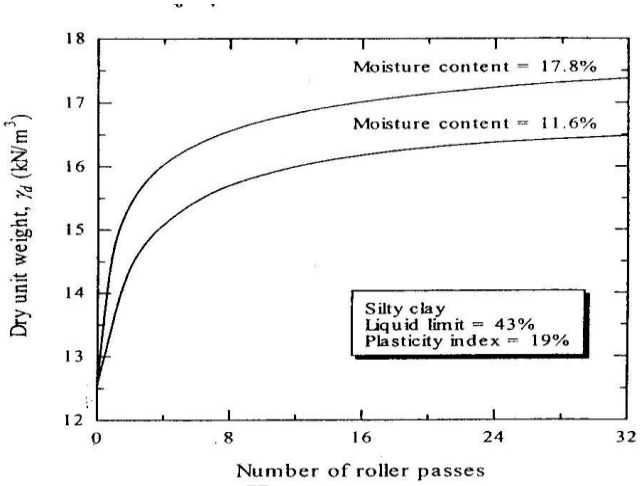
รูปที่ 2.6 รถบดตีนแกะ

2.6.4 รถบดอัดแบบสั่นสะเทือนเป็นรถบดอัดที่มีประสิทธิภาพอย่างมากสำหรับกรวดและทราย เครื่องสั่นสะเทือนสามารถติดตั้งกับรถบดอัดได้ทุกประเภท รูปที่ 2.7 แสดง

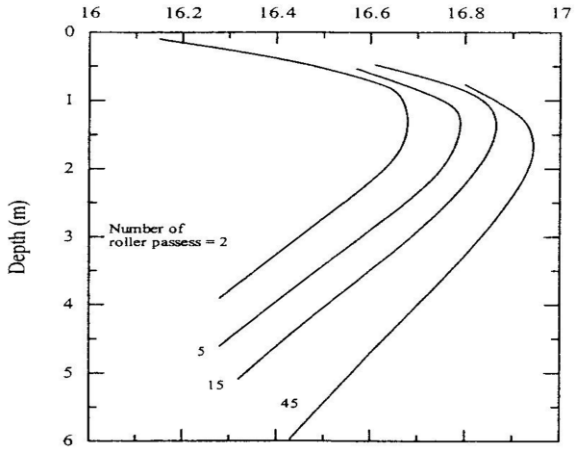
หลักการของรถบดอัดประเภทนี้ การสั่นสะเทือนเกิดจากเครื่องที่ติดตั้งไว้นอกจุดศูนย์กลางของล้อ เครื่องสั่นนี้จะเคลื่อนที่ขึ้นลงระหว่างการบดอัดด้วยความถี่ 20 ถึง 30 รอบต่อวินาที

รูปที่ 2.7 รถบดสั่นสะเทือน (vibrating roller)

นอกจากชนิดของดินและปริมาณความชื้นแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบดอัดในสนามอีก ปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่ ความหนาของชั้นดินที่ทำการบดอัด (lift) ความเข้มข้นของความดันจากเครื่องบดอัดและพื้นที่สัมผัสระหว่างล้อกับดิน เนื่องจากความดันล้อที่กระทำที่ผิวดินจะลดลงตามความลึก ส่งผลให้เกิดการลดลงของระดับการบดอัด นอกจากนี้ ความหนาแน่นแห้งของดินยังแปรผันกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่าน รูปที่ 2.8 a แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง ความหนาแน่นแห้งจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านจนถึงค่าหนึ่ง และความหนาแน่นแห้งจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ถึงแม้ว่าจำนวนรอบที่บดอัดจะเพิ่มขึ้น โดยทั่วๆ ไป จำนวนรอบที่เท่ากับ 10 ถึง 15 รอบ ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด



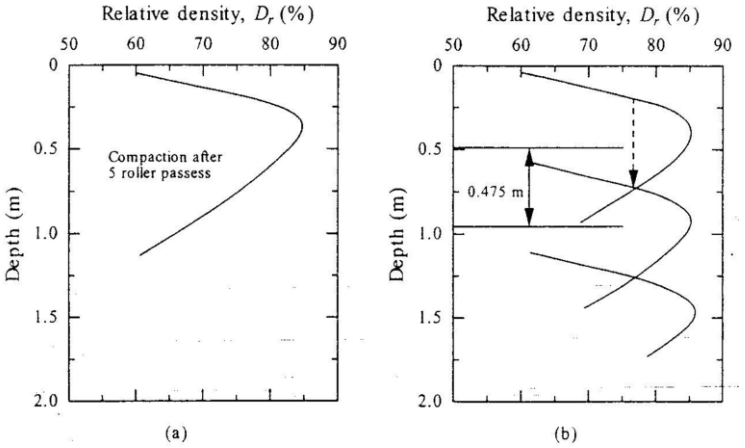
รูปที่ 2.8 a) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่าน (Johnson and Sallberg. 1960)



รูปที่ 2.8 b) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยนำหนักแห้งกับจำนวนรอบทีรถบดอัดวิ่งผ่าน (D'Appolonia et al., 1969)

รูปที่ 2.8 b แสดงการเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักแห้งกับความลึกสำหรับทรายที่มีขนาดคละไม่ดี การบดอัดกระทำโดยใช้รถบดอัดตีนแกะแบบสั่นสะเทือน น้ำหนักของรถบดอัดเท่ากับ 55.6 กิโลนิวตัน และเส้นผ่านศูนย์กลางของตีนแกะเท่ากับ 1.19 เมตร ความหนาของชั้นบดอัดเท่ากับ 2.44 เมตร ตระหนักว่า ที่ความลึกใดๆ ความหนาแน่นแห้งของการบดอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการวิ่งผ่านของรถบดอัด แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงหลังจากจำนวนรอบที่ 15 ความจริงอีกประการหนึ่งที่ค้นพบจากรูปที่ 2.8 b คือความหนาแน่นแห้งมีค่ามากทีสุดที่ความลึกประมาณ 0.5 เมตรและค่อยๆ มีค่าน้อยลงตามความลึก เนื่องจากการลดลง

ของความเค้นตามความลึก ทันทีที่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ (หรือความหนาแน่นแห้ง) สำหรับดินชนิดหนึ่งๆ ที่จำนวนรอบที่รถบดอัดวิ่งผ่านค่าหนึ่ง เราสามารถประมาณความหนาของการบดอัดแต่ละชั้นได้ วิธีการนี้แสดงในรูปที่ 2.9(D'Appolonia et al., 1969)



รูปที่ 2.9 การประมาณความหนาของระดับชั้นของดินสำหรับความหนาแน่นสัมพัทธ์ 75% กับจำนวนรอบของรถบดอัดที่วิ่งผ่านเท่ากับ 5 รอบ

2.7 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนามโดยวิธี Nuclear Gauge หลักการทั่วไปของเครื่องมือ Nuclear Gauge

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

ส่วนประกอบของเครื่องมือนิวเคลียร์จะมีตัวต้นกำเนิดรังสี ถูกบรรจุอยู่ในแคบซูลสเตนเลส หนาสองชั้น (เป็น Seal Source ซึ่งไม่สามารถรั่วออกมาได้) ซีเซียม 137 (Cs-137) เชื่อม

ติดอยู่กับปลายแท่งสเตนเลส ส่วนอเมอริเซียม 241 และเบอริลเลียม (Am 241:Be) เชื่อมติดอยู่กับฐานภายในตัวนิวเคลียร์เกจ การวัดความหนาแน่นทำได้โดยการปล่อยรังสีแกมมาผ่านชั้นความหนาของวัสดุที่ต้องการทดสอบ จากนั้นตัวตรวจวัด (Detector) ซึ่งจะตรวจนับรังสีตามเวลาที่กำหนดแล้วคำนวณค่าตามคุณสมบัติของรังสีที่ผ่านตัวกลางโดยนำค่าที่ได้จากการตรวจนับไปเปรียบเทียบกับ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีกับความแน่นออกมาเป็นค่าความแน่นที่เราต้องการวัดตัวตรวจวัดที่ใช้ในการวัดความหนาแน่นได้แก่ G-M Tubes ซึ่งเป็น Photon detector มีอยู่ 2 ตัว ในการวัดความชื้นทำได้โดยการปล่อยรังสีนิวตรอนลงไปในชั้นวัสดุ แล้วใช้ Helium-3 detector เป็นตัวตรวจวัด Slowed neutron

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

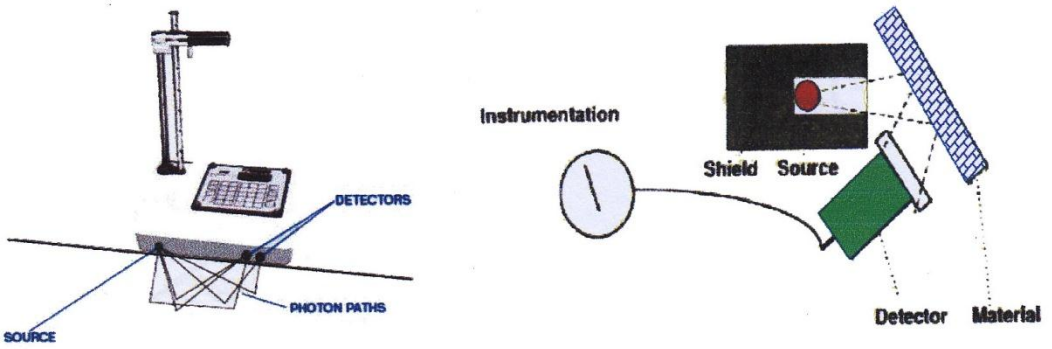
วิธีวัดแบบ backscatter mode เป็นวิธีการทำงานที่รวดเร็วและยังไม่เป็นการทำลายชั้นทาง เพราะจะวางเครื่องมืออยู่ชั้นทางที่ต้องการทดสอบโดยไม่มีการขุดหรือตอกที่ชั้นทาง ตำแหนงของ source rode จะอยู่ที่ต่ำจากตำแหน่ง safe position ลงมาหนึ่งขั้นซึ่งจะทำให้ทั้งต้นกำเนิดรังสีแกมมาและ Detectors (ตัวตรวจจับรังสี) จะยังคงติดอยู่ที่ภายในตัว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

วิธีวัดแบบ direct transmission mode เป็นการทดสอบกับชั้นทางที่หนา วิธีการทดสอบทำโดยเลื่อนแท่งรังสี (source rod) ที่มีแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาที่ปลายแกนในรูที่เจาะลึกลงไปโดยใช้ drill rod ตามระยะความลึกที่ต้องการทดสอบ เมื่อทำการทดสอบรังสีแกมมาจะถูกปล่อยผ่านไปยังชั้นวัสดุและชนกับอิเล็คตรอนจนทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป ยิ่งวัสดุมีความหนาแน่นมากเท่าไรก็จะยิ่งทำให้เกิดการชนระหว่างโฟตอนกับอิเล็คตรอนมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ลดจำนวนโปรตอนที่จะเหลือให้ detector ที่ติดอยู่ที่ฐานของ gauge ตรวจพบ ดังนั้นจำนวนนับรังสีแกรมมาจากหัววัดรังสี (detector) จึงเป็นอัตราส่วนผกผันกับความหนาแน่นของวัสดุ จากการปรับเทียบ gauge calibration (ซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนนับรังสีในแต่ละระดับความลึกกับความแน่นของวัสดุที่ทำการทดสอบ) และใช้โปรแกรมคำนวณจะทำให้สามารถหาค่าความหนาแน่นจากค่าที่ตรวจจับได้จากหัววัดรังสี วิธีนี้จะได้ค่าที่เป็นค่าเฉลี่ยของชั้นวัสดุที่ความลึกจากแหล่งกำเนิดรังสีกับตำแหน่งที่ detector ดังนั้นจะได้ค่าที่คลาดเคลื่อนน้อยกว่า จะลดความคลาดเคลื่อนจากผิวที่

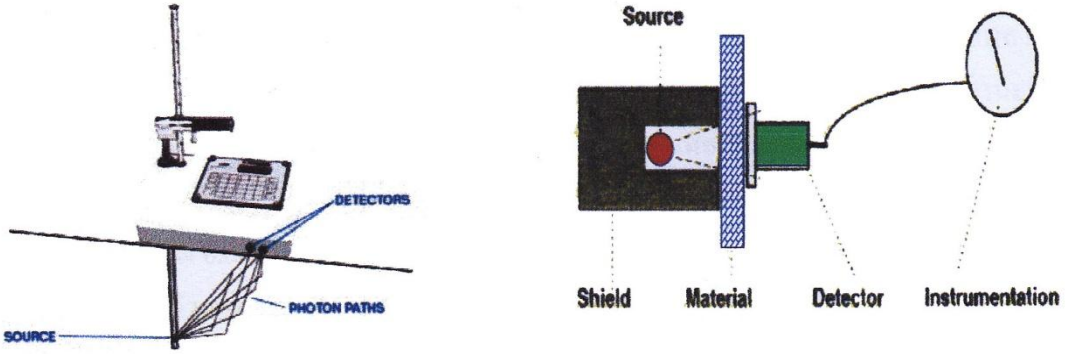
ขรุขระลงได้ด้วย การทดสอบโดยใช้วิธีนี้ใช้ได้กับชั้น aggregate ที่หนาหรือแม้กระทั่งชั้น ผิว asphalt และ concrete ก็ใช้ได้

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

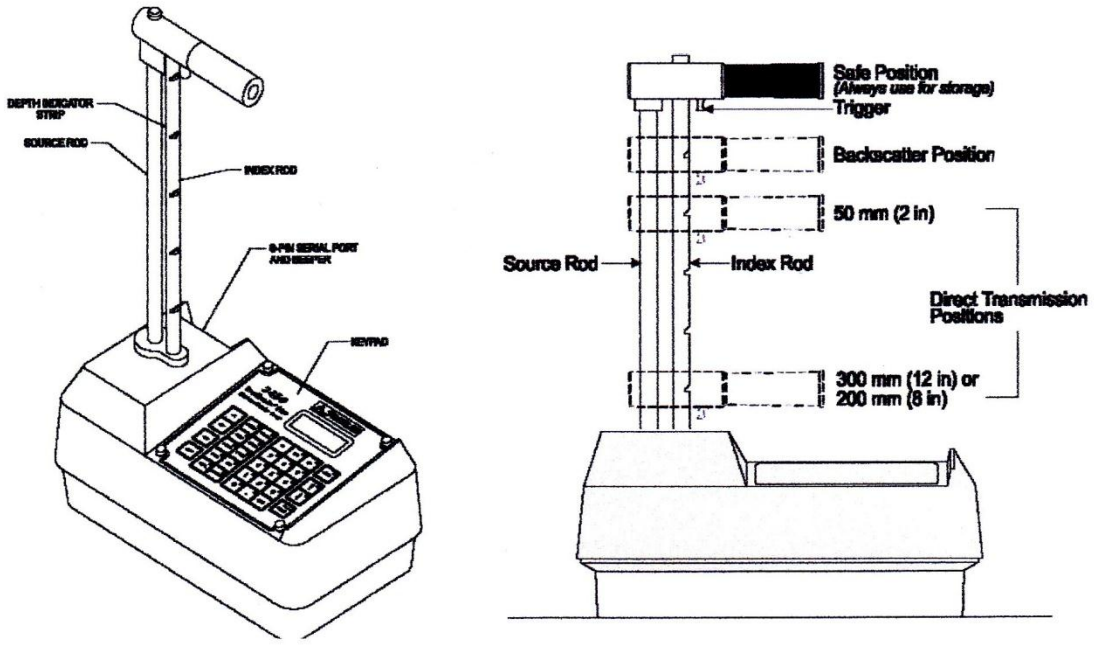
สาเหตุที่ต้องมีการบอกค่าความลึกแบบ manually depth นั้นจะใช้ในกรณีที่ตัวเซนเซอร์วัดความลึก (depth sensor) เสียหาย บอกค่าความลึกไม่ได้ ผู้ทดสอบจะต้องใส่ค่าความลึกที่ถูกต้องเข้าไปในเครื่องทดสอบ จากนั้นเครื่องจะคำนวณค่าความแน่นได้ถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 2.10 – 2.12



รูปที่ 2.10 รูปแบบของการจัดระบบการวัดสำหรับการกระเจิงกลับของรังสีกับวัตถุเทียบได้กับการใช้เครื่องมือวัดในการวัดแบบ backscatter



รูปที่ 2.11 รูปแบบของการจัดระบบการวัดสำหรับการใช้รังสีส่งผ่านวัตถุเทียบได้กับการใช้เครื่องมือวัดในการวัดแบบ direct transmission



รูปที่ 2.12 รูปร่างลักษณะของเครื่องมือและตำแหน่งของ source rod positions ในการใช้งานที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน

ในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ทำให้เกิดรังสีที่นำมาใช้ในการทดสอบความแน่นในสนามอธิบายได้ดังนี้คือ เมื่อนิวเคลียสของตัวต้นกำเนิดรังสี เช่น ซีเซียม 137 (cs – 137) ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีมีการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติเพื่อทำเกิดความเสถียร นิวเคลียสซึ่งยังอยู่ในสถานะที่ตื่นตัวก็จะคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีแกมมา เพื่อที่จะได้เป็นนิวเคลียสที่มีอยู่ในสภาพปกติสำหรับรังสีแกมมาเองนี้มีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก คือ อยู่ระหว่างประมาณ 0.001 อังสตรอม (angstrom) ถึง 1.5 อังสตรอม (1 Å = 10^{-8}cm)

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมและค่าครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสีนั้นโดยอาศัยความจริงที่ว่า โอกาสที่นิวเคลียสจะสลายต่อ 1 หน่วยเวลามีค่าคงที่ เรียกค่าคงที่นี้ว่า ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay contant) ใช้สัญลักษณ์λ มีหน่วยเป็นเวลา$^{-1}$ โดยกำหนดว่าเมื่อเวลา t มี N(t) อะตอม ตามคำจำกัดความของค่าคงที่ของการสลายในระหว่างเวลา t ถึง t+dt คือช่วงเวลา dt จำนวนนิวคลีไอสลายได้ λ(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

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

โดยการอินติเกรท จะได้

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \tag{2.13}$$

เมื่อ N_0 เป็นจำนวนอะตอมเมื่อเวลา t = 0

คูณทั้งสองข้างของสมการ ด้วย λ, จะได้ความแรงของสารตัวอย่างเมื่อเวลา t คือ

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \tag{2.14}$$

เมื่อ A_0 คือ ความแรงเมื่อเวลา t = 0

นั่นคือความแรงจะลดลงเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) กับเวลา

เวลาที่ทำให้จำนวนอะตอมของสารกัมมันตรังสีลดลงครึ่งหนึ่งเรียก “ครึ่งชีวิต” (half life) ใช้สัญลักษณ์ T½ 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 (2.14) จะได้

ใส่ลอกทั้งสองข้างของสมการ แล้วแก้สมการ หาครึ่งชีวิต จะได้

$$T½ = \frac{In2}{\lambda}$$

หรือ

$$T½ = \frac{0.693}{\lambda} \qquad (2.15)$$

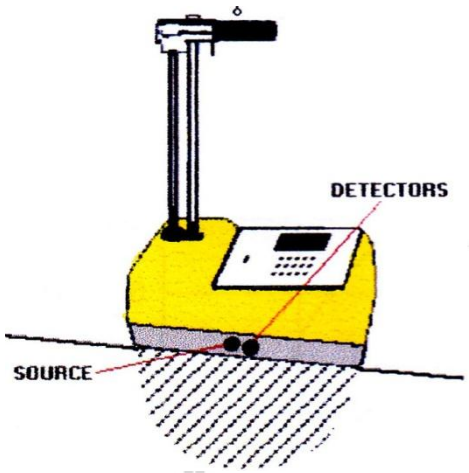
ในสเปกของเครื่องมือ Nuclear Gauge ที่ใช้ยี่ห้องtroxler รุ่น 3450นั้นใช้ซีเซียม 137 ปริมาณหนึ่งซึ่งทำให้มีค่าความแรงรังสี หรือกัมมันตภาพ (activity) 8 mCi ±ร้อยละ 10

โดยที่ 1 Ci (curie) = มีค่าเท่ากับความแรงที่นิวเคลียสสลายได้ 3.7 x 10^{10} ครั้ง ต่อวินาที

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) ใช้สารที่มีโอกาส ที่จะทำปฏิกิริยากับนิวตรอนสูง ในเครื่องมือนี้ได้แก่ He (ไอโซโทปของาตุฮีเลียมที่มีเลขมวลหรือมวลอะตอมเท่ากับ 3) ซึ่ง sensitive ต่อ slow neutron เท่านั้น การวัดปริมาณความชื้นดังกล่าวทำงานเหมือนกับการวัดความแน่นโดยใช้ backscatter mode กล่าวคือทั้งตัวตรวจจับรังสี (helium-3 detector) และต้นกำเนิดรังสี (Am-241 : Be) อยู่บนระนาบเดียวกับบนชั้นวัสดุที่ต้องการตรวจวัด

ค่าความลึกที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามของเครื่องมือทดสอบนั้นขึ้นอยู่กับว่าวัสดุที่ต้องการวัดนั้นมีค่าความชื้นอยู่มากน้อยเพียงใด ถ้าหากวัสดุมีความชื้นน้อยอนุภาคนิวตรอน ก็สามารถแผ่ไปได้ลึกกว่า แต่ถ้าวัสดุมีความชื้นมาก อนุภาคนิวตรอนก็จะยังเหลือไปถึงชั้นที่ลึกได้น้อยเพราะจะเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็น slowed neutron เมื่อเจอกับอะตอมไฮโดรเจนที่มีอยู่มากดังแสดงในรูปที่ 2.13

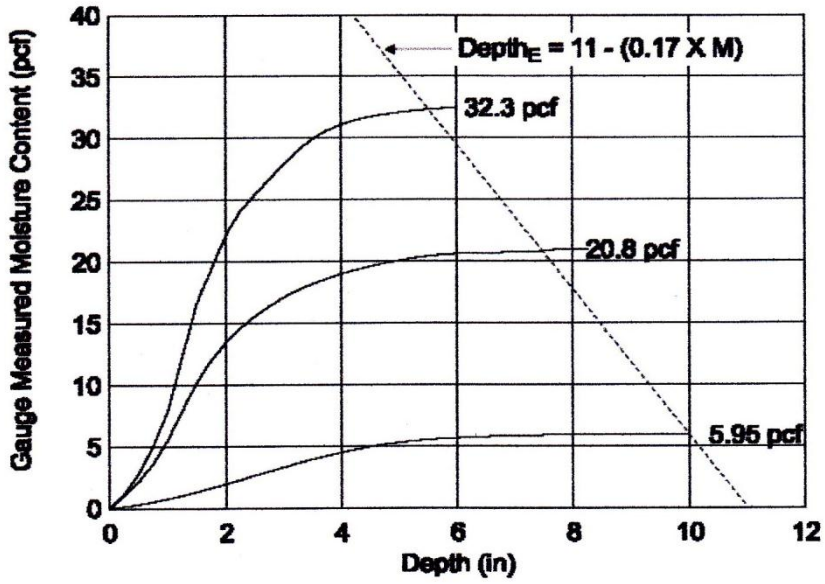


รูปที่ 2.13 การจัดเครื่องมือทดสอบเพื่อหาค่าความชื้นในสนาม

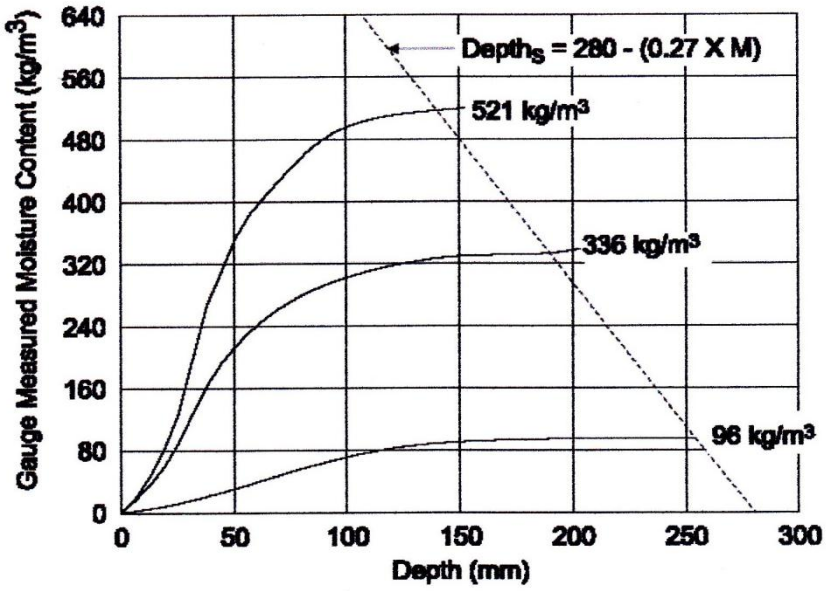
สมการต่อไปนี้แสดงค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนาม

depth (inches) = 11 – (0.17 x M) M คือ ค่าความชื้นในหน่วย pcf รูปที่ 2.14

depth (mm) = 280 – (0.27 x M) M คือ ค่าความชื้นในหน่วย kg/m^3 รูปที่ 2.15



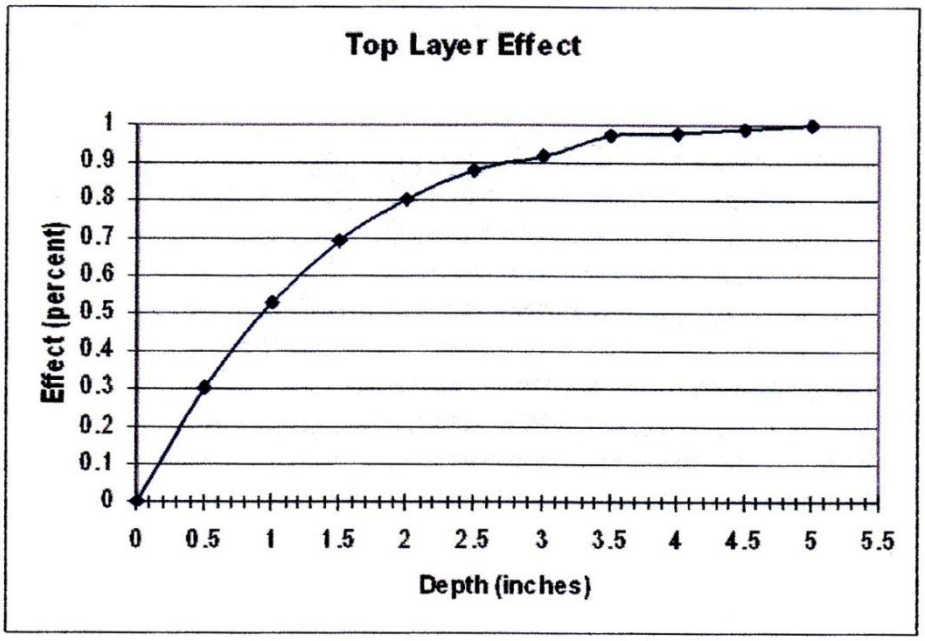
รูปที่ 2.14 กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย pcf



รูปที่ 2.15 กราฟค่าความหนาที่เหมาะสมในการวัดค่าความชื้นในสนามในหน่วย kg/m^3 top layer effect

ในการวัดค่าความแน่นในสนามนั้น หากเราเลือกใช้การวัดแบบ backscatter จำเป็นต้องรู้ถึงผลกระทบที่เรียกว่า top layer effect คือ ที่ความหนา 5 ซม. แรกจะมีผลต่อการวัดประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความหนา 5 ซม. ด้านล่างจะมีผลต่อการวัดประมาณร้อยละ 18 ดังรูปที่ 2.16

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

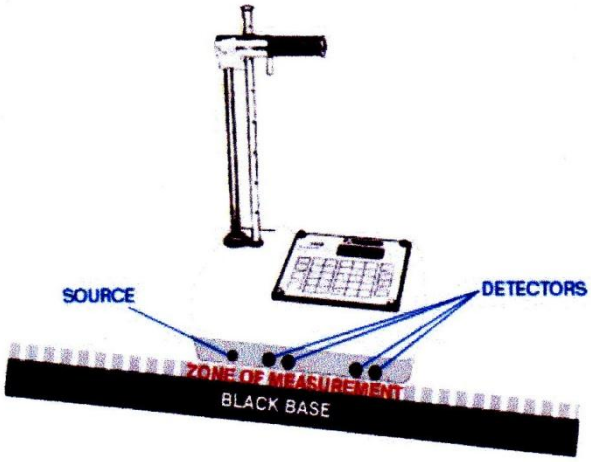


รูปที่ 2.16 กราฟผลกระทบที่เรียกว่า top layer effect ที่มีต่อการวัดค่าความแน่นแบบ backscatter ที่ความหนาต่าง ๆ กัน

ดังนั้นในการวัดค่าความแน่นในสนามแบบ backscatter จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องปรับผิวหน้าพื้นที่ที่จะวัดให้มีความเรียบ เพื่อไม่ให้มีช่องว่างในขณะที่วางฐานเครื่องทดสอบลงไป เพราะจะทำให้มีผลกระทบอย่างมากต่อค่าที่วัดออกมา ทำให้ค่าที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

วิธีการวัดแบบ Thin Layer

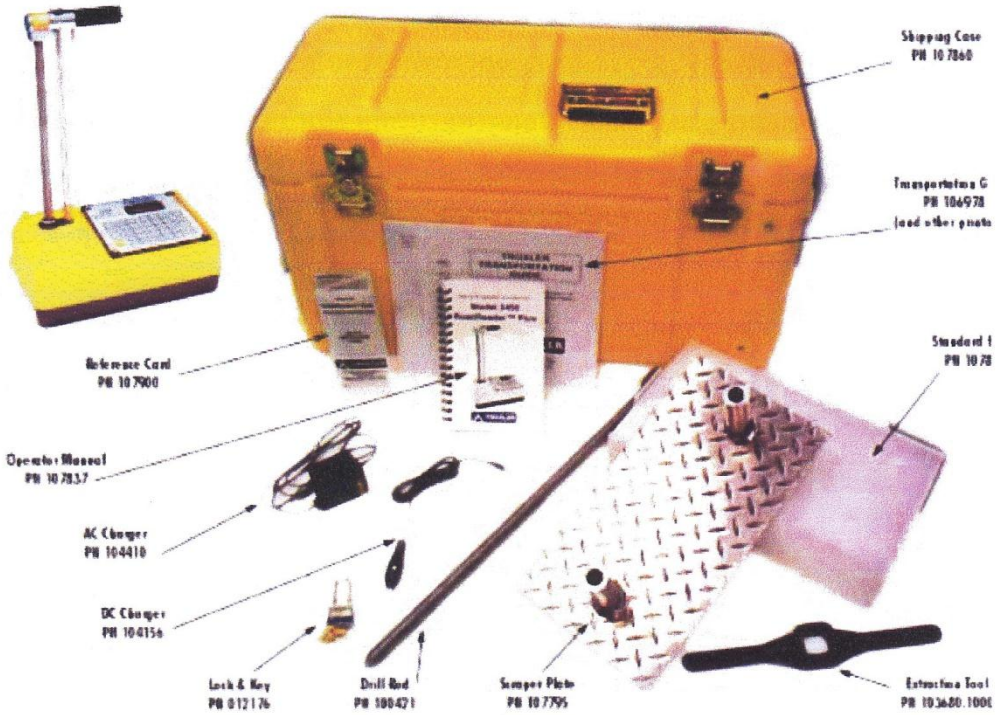
เครื่องมือวัดความแน่นในสนามยี่ห้อ troxler รุ่น model 3450 มี g-m tubes ที่ใช้เป็น photon detector อยู่ 2 ตำแหน่ง เมื่อมีการทำงานแบบที่วัดรังสีสะท้อนกลับ ตัวที่อยู่ไกลไปจากแหล่งกำเนิดมากกว่าจะมีความเหมาะสมมากกว่าในการวัดรังสีที่สะท้อนมาจากวัสดุที่อยู่ลึกกว่า ส่วนตัวที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดรังสีมากกว่าเหมาะกับการวัดรังสีที่สะท้อนมาจากวัสดุที่อยู่ตื้นกว่า ในการทดสอบสามารถเลือกการทดสอบชนิดเป็นชนิด thin layer ได้เพื่อจะสามารถวัดค่าที่ความหนาที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การจัดตำแหน่งของเครื่องมือเพื่อทำการทดสอบในโหมดThin Layer

ส่วนประกอบของชุดวัดความชื้นและความหนาแน่น

Nuclear gauge เป็นเครื่องมือวัดประเภท protable (เคลื่อนย้ายได้) สามารถอ่านข้อมูลได้ในการวัดความชื้นหรือความหนาแน่น ภายในบรรจุสารกัมมันตรังสี วงจรอิเล็คโทรนิค ชุดแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ด้านหลังจะมีสลากบอกเกี่ยวกับตัวเครื่อง เช่น ความแรงของรังสี หมายเลขเครื่อง Reference block ใช้ในการปรับตั้งมาตรฐานการนับเพื่อเช็คการทำงานของเครื่อง ว่าพร้อมหรือไม่ก่อนที่จะนำไปใช้งาน หรือเป็นการปรับแก้ไขค่าการวัดให้ถูกต้อง จากที่สารรังสีลดลงไป ตามเวลา Scraper plate (Drill Rod guide) ใช้ในการระบุตำแหน่งที่จะเจาะเพื่อทำเป็นรูให้ท่อนำ สารรังสีลงไปในงานสนาม โดยเลือกลักษณะการใช้งานแบบ direct transmission drill rod ใช้ในการเจาะรู สำหรับการใช้งานแบบ 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 2.18



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบของชุดวัดความชื้นและความหนาแน่นของเครื่องมือ

การเตรียมใช้เครื่องมือ

ในขณะที่ไม่ได้ทำการทดสอบ source rod คือแท่งที่มีแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาอยู่ที่ปลายแท่งนั้นควรอยู่ที่ตำแหน่ง safe position

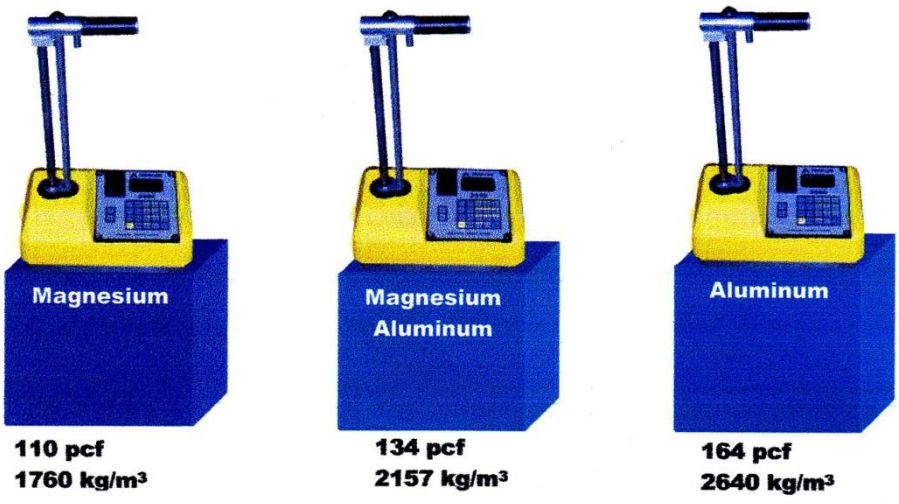
การใช้งานเมื่อเริ่มเปิดสวิทช์ไฟเข้าเครื่อง เครื่องมือจะมีการตรวจสอบตัวเองว่าพร้อมที่จะใช้งานหรือไม่ หากมีอะไรผิดปรกติจะแสดงผลออกมาที่จอแสดงผล จากนั้นจะเป็นการ warm up เครื่องเป็นเวลาประมาณ 10 นาที จึงจะพร้อมใช้งานได้ ในการใช้งานเครื่องนั้นผู้ทดสอบจะต้องทราบการกำหนดค่าราามิเตอร์ที่ต้องป้อนเข้าไป และบันทึกไว้ในหน่วยความจำของเครื่องเพื่อให้ทราบค่าการ set up เครื่องก่อนใช้งาน เครื่องทดสอบยี่ห้อ troxler รุ่น model 3450 สามารถบันทึกเก็บค่าผลการทดสอบไว้ในหน่วยความจำโดยให้ผู้ใช้ตั้งชื่อโปรเจคที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูล การดูข้อมูลที่เก็บไว้ก็โดยการเรียกชื่อไฟล์ โปรเจคซึ่งอาจเก็บไว้หลาย ๆ ไฟล์โปรเจค ภายในเครื่องสามารถเก็บข้อมูลได้ 1000 ผลการทดสอบ เก็บข้อมูลได้สูงสุดใน 1 ไฟล์โปรเจคได้ 650 ผลการทดสอบ

การทำ Calibration

การ Calibrate เครื่องมือวัดทำได้โดย คำนวณหาค่าการนับรังสี จากการวัดค่าจากวัสดุที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอนแล้ว นำค่าที่อ่านได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่านับรังสีที่อ่านได้กับค่าความหนาแน่นที่เรารู้ค่าที่แท้จริงแล้ว

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

วิธีการ Calibrate ทำโดยนำเครื่องมือวางบนวัสดุมาตรฐานดังกล่าวแล้วทำการนับรังสีที่แต่ละความลึก ค่าที่อ่านได้จะถูกบันทึกโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และคำนวณหาค่าความสัมพันธ์เป็นค่าคงที่ที่ใช้เป็นสมการในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นในสนาม โดยปกติควรมีการทำ Calibration ทุก ๆ 12 ถึง 18 เดือนโดยผู้ผลิตดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การทำ Calibration ของเครื่องมือ โดยทดสอบบนวัสดุที่รู้ค่าความหนาแน่นที่แน่นอน

การคำนวณในการหาความหนาแน่นในสนาม

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

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

CRd = Density Measure Count / Density Standard Count

CRm = Moisture Measure Count / Moisture Standard Count

In = natural log base e

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

การทำ Standard Count

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

หลักการในการทำ Standard Count ก็เพื่อที่จะนำค่า Count Ratio จากบอล์คพาราฟิน 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

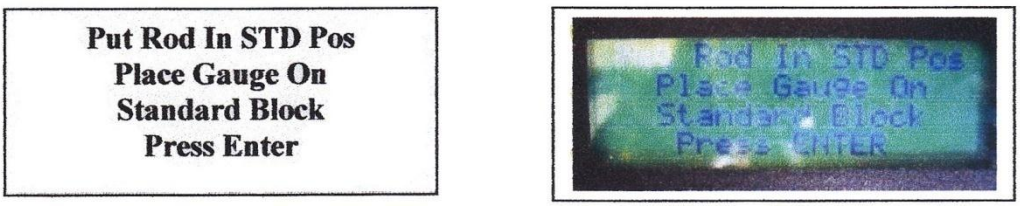
หลังจากเลือกสถานที่ทำ Standard Count ได้แล้ว ก็ให้นำเครื่องทดสอบออกมาแล้ว Turn On เมื่อหน้าจอแสดงผลอยู่ในเมนู Ready Screen แล้วให้กดคีย์ (Standard) จอแสดงผลจะแสดง ค่า STD ของ DS และ MS ที่อยู่ในเครื่องก่อนหน้านี้ รูปที่ 2.20

รูปที่ 2.20 จอแสดงผลจะแสดง ค่า STD ของ DS และ MS

หมายเหตุ DS = Density Standard Count

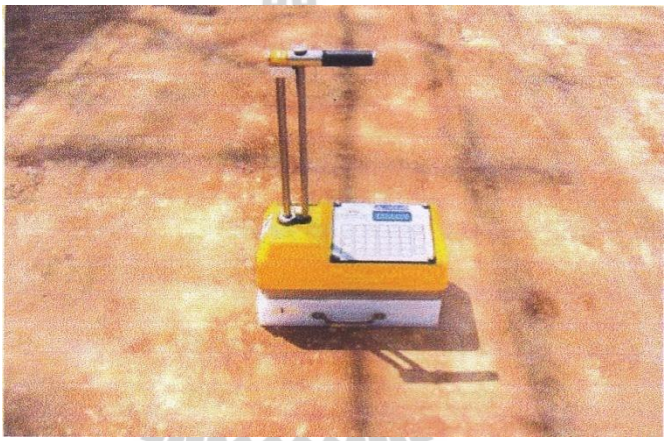
MS = Moisture Standard Count

ถ้าต้องการทำ Standard Count ใหม่ให้กดคีย์เลข (1) จากนั้นกดคีย์ (2) แล้ว ENTER เครื่องจะแสดงผล ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 จอแสดงผลการทำ Standard Count ใหม่

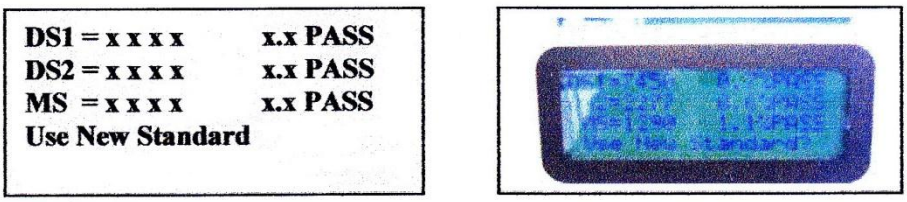
ให้ผู้ใช้นำบอล์คพาราฟินสี่เหลี่ยมมาแล้วนำเครื่องทดสอบวางบนแผ่นบอล์คพาราฟินนั้น ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การนำเครื่องทดสอบวางบนแผ่นบอล์คพาราฟินเพื่อทำ Standard count

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

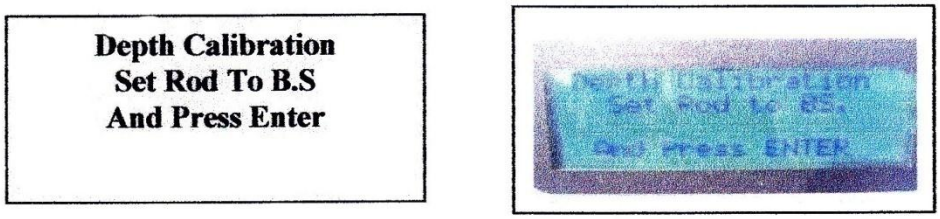
การวางเครื่องทดสอบจะต้องให้ทุกส่วนของฐานวางอยู่บนบอล์คพาราฟินโดยปลายด้านหนึ่งชิดกับแผ่นเหล็ก และให้ตำแหน่งของแท่งรังสี (Soure Rod) อยู่ในตำแหน่ง Safe Position จากนั้นทำการยืนยันคำสั่งให้กดคีย์ (ENTER) การทำ Std Count จะใช้เวลาครั้งละ 4 นาที เมื่อเสร็จสิ้นการนับรังสีแล้ว เครื่องจะแสดงผลที่หน้าจอ ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 จอแสดงผลเมื่อเสร็จสิ้นการนับรังสีแล้ว

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

หลังจากทำ STD Count ผ่านแล้วให้กดคีย์ (YES) จากนั้นเครื่องจะทำการ Calibrate ตำแหน่งของแท่งรังสี โดยหน้าจอจะแสดงข้อความ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 จอแสดงการ Calibrate ตำแหน่งของแท่งรังสี

จากนั้นให้กดคีย์ (ENTER)

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

ตัวอย่างการคำนวณในการทำ Standard count

Density 1	Density 2	Moisture
7128	1987	1084
7134	1985	1071
7121	1990	1073
7140	1981	1083

28523/4=**7131** 7943/4=**1986** 4311/4=**1078** Average of these counts

Today's standard count:

Density 1	Density 2	Moisture
7139	1979	1080

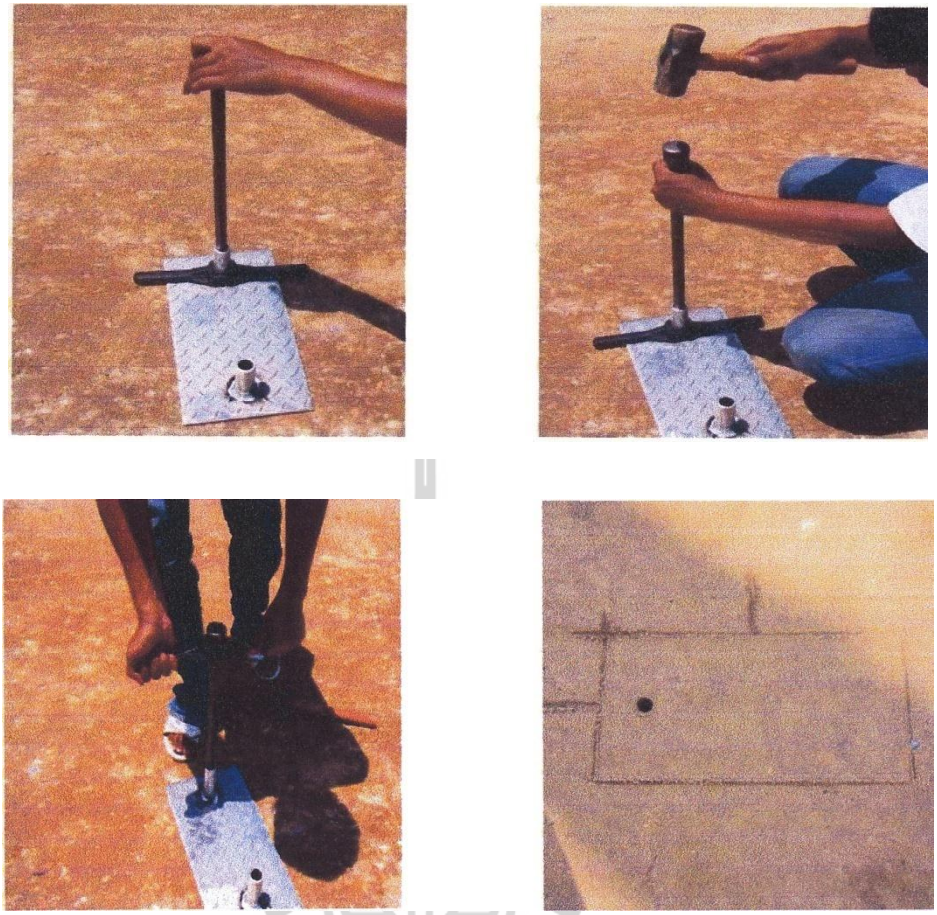
Formula: [today's – average] = n ; (n / average) x 100 = %

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

การเตรียมสถานทีสำหรับการทดสอบงานดิน (soil site)

1. สถานที่จะต้องเป็นพื้นเรียบห่างจากรอยร้าวหรือรูโพรงขนาดใหญ่
2. ถ้าจำเป็น ที่จะต้องทำการปรับพื้นให้เรียบก็ให้ใช้แผ่นเพลท ที่ใช้เจาะรูทำการปรับพื้นให้เรียบ
3. ปรับพื้นที่เป็นรูเล็ก ๆ ด้วยทรายละเอียด
4. นำเพลทโลหะที่สำหรับเจาะรูวางบนสถานที่ที่เตรียมไว้ แล้วกด เพลทลงไปผิวดิน
5. สำหรับการทดสอบแบบ Direct Transmission เป็นวิธีที่สามารถวัดได้ถูกต้อง และมีความแน่นอนสูง จะต้องทำการเจาะรู เพื่อหย่อนแท่งรังสีลงไปต่ำกว่าบริเวณผิวทางดังรูป
6. ใช้ค้อนปอนด์ตอกแท่งเหล็กเจาะรูลงไประยะความลึก สังเกตได้จากตำแหน่งบอกระยะที่แท่งเจาะช่องละ 2 นิ้ว ควรจะตอกลงไปลึกกว่าตำแหน่งที่ต้องการทดสอบ เช่น ถ้าทดสอบที่ความลึก 10 เซนติเมตร (4 นิ้ว) ก็ควรตอกให้ลึก 6 นิ้ว หรือ 5 นิ้ว เพราะเวลาถอนเอาแท่งเจาะออกจะมีดินบางส่วนเคลื่อนปิดลงไปทำให้ระยะลึกน้อยกว่าระยะที่ตอกจริง
7. ทำการถอนแท่งเจาะออก
8. เมื่อจะเอาแผ่นเพลทออก ควรใช้ไม้หรือเหล็กแหลมขีดทำเครื่องหมายบอกที่รอบแผ่นเพลงบนผิวดินให้ครบทั้ง 4 มุม เพราะเวลาเอาเครื่องทดสอบไว้วางบนบริเวณที่เตรียมพื้นที่ไว้ แท่งรังสีจะหย่อนลงไปในรูเจาะได้พอดี ดังรูปที่ 2.25

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.25 การเจาะรูโดยใช้ Scraper plate (Drill Rod guid) และแท่ง Drill Rod เป็นการระบุตำแหน่งที่จะนำสารรังสีลงไปในสนามในการเลือกลักษณะการใช้งานแบบ Direct transmission โดยมีการทำสัญลักษณ์หลังจากเจาะ เตรียมไว้เพื่อที่จะได้นำเครื่องมือมาวางให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง

หมายเหตุ อย่าลืมใส่ตัวถอนแท่งเจาะลงบนเพลทโลหะ เพราะเมื่อตอกแท่งเจาะลงไปแล้วไม่มีตัวถอนออก จะเกิดปัญหาเอาแท่งเจาะดึงกลับออกมาไม่ได้

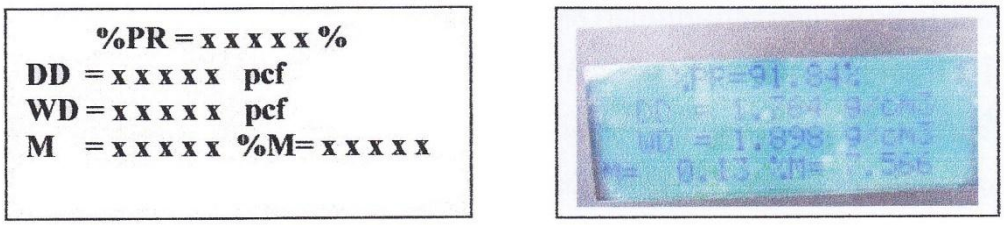
การเตรียมสถานที่สำหรับงาน asphalt, คอนกรีต, ดินแข็ง (asphalt site)

ก็จะมีขั้นตอนเหมือนกันกับงานดินเพียงแต่การเจาะรูเพื่อทำการวัดแบบ direct transmission จะทำได้ยาก เพราะวัสดุทดสอบจะมีความแข็งมากบางครั้งจำเป็นที่จะต้องใช้สว่านไฟฟ้าเจาะรูแทนการตอกด้วยแท่งเหล็ก แต่ถ้าไม่ต้องการเจาะรู เราอาจเลือกทำการวัดแบบ backscatter ก็ได้ แต่ผลความแน่นอนจะน้อยกว่าวิธี direct transmission

การทดสอบใน Soil Mode

การวัดความแน่นและความชื้นของดิน, หินคลุก, ทราย มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกการทดสอบแบบ Soil Mode
2. ทำการป้อนค่า Protor (ค่า Max Lab) จากห้องปฏิบัติการ
3. เตรียมสถานที่ที่ทำการทดสอบ
4. วางเครื่องทดสอบบนสถานที่ที่เตรียมทดสอบ
5. กดแท่งรังสีให้เลื่อนลงไปในรูที่เจาะไว้ให้ลึกตามที่ต้องการ โดยคลาย ล๊อคกลไกที่แขนจับก่อนทำได้โดยใช้นิ้วมือกดสลักล๊อค
6. สังเกตความลึกจากแท่งรังสีที่เคลื่อนลงไปจากเสาบอกระยะ ที่มีระยะบอกช่วงละ 2 นิ้ว เมื่อถึงตำแหน่งที่ต้องการ จะต้องให้ตัวล๊อคซึ่งเป็นกลไกอยู่ที่แขนจับเลื่อนล๊อคกับร่องปากที่เสาบอกระยะพอดี เมื่อปล่อยคลายกลไก ผู้ใช้จะได้ยินเสียงคลิกส์ เมื่อแท่งรังสีล๊อคเข้ากับตำแหน่งที่ทดสอบ
7. กดคีย์ (Start) โดยปกติจะใช้เวลาในการทดสอบแต่ละครั้งนาน 1 นาที ดังนั้นจะต้องเซตค่า (Time) ไว้ที่ 1 นาทีก่อน เมื่อครบเวลา 1 นาที และหน้าจอแสดงผลจะแสดงผลการทดสอบออกมา ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 จอแสดงผลการทดสอบเมื่อครบเวลา 1 นาที

%PR = Percent Proctor

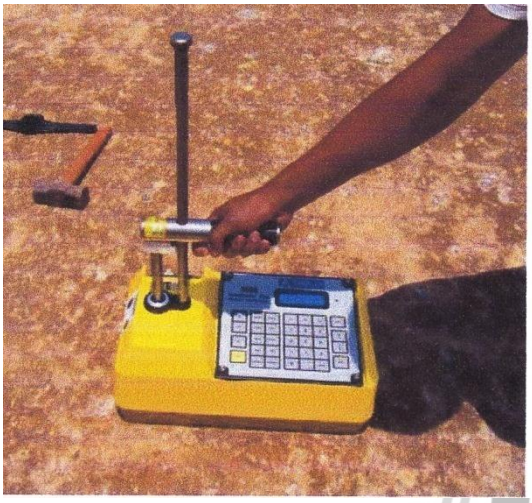
DD = Dry Density

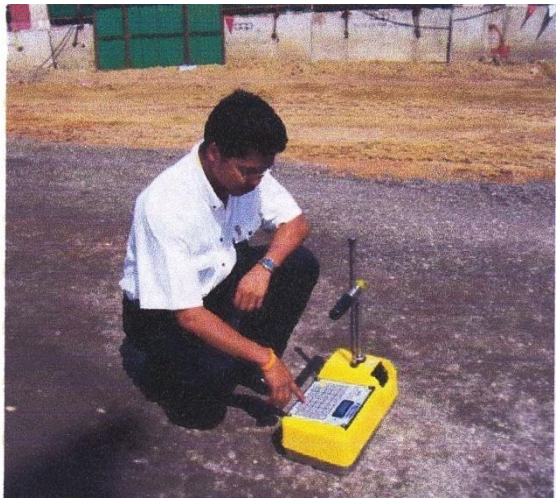
WD = Wet Density

M = Moisture

%M = Percent Moisture

ถ้าต้องการบันทึกค่าลงในไฟล์โปรเจค ที่ตั้งชื่อไว้ให้กดคีย์ (store) จากนั้น ต้อการกลับสู่เมนู Ready Screen ให้กดคีย์ (ESC) และถ้าต้องการเริ่มทดสอบใหม่อีกครั้งก็ให้กดคีย์ (start) เมื่อจบการทดสอบแล้วให้เลื่อนแท่งรังสีกลับสู่ตำแหน่ง Safe position รูปที่ 2.22





รูปที่ 2.27 การกดแท่งรังสีให้เลื่อนลงไปในรูเจาะให้ลึกตามที่ต้องการ โดยคลายล๊อคกลไกที่แขนจับ หลังจากนั้นกดปุ่มคำสั่งให้เครื่องทำงาน

2.8 มาตรฐานการทดสอบความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีต(compressive strength of concrete) มทช.(ท) 105.1- 2545

2.8.1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้ครอบคลุมถึงการหาความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ ซึ่งจะได้จากการหล่อในแบบหล่อ หรือจากการเจาะมาทดสอบก็ได้

2.8.2 วิธีทำ

- เครื่องมือ
  - เครื่องกดทดสอบ เครื่องกดเป็นแบบใดก็ได้ ที่ทำให้น้ำหนักกดได้สูงเพียงพออยู่ในช่วงใช้งานได้ และยอมให้ผิดพลาดได้ไม่เกินร้อยละ 1 เครื่องกดจะต้องสามารถเพิ่มแรงกดได้อย่างสม่ำเสมอและไม่กระตุก เครื่องทดสอบแบบหมุนเกลียว (SCREW-TYPE) จะต้องเป็นเครื่องที่ หัวกดสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับเครื่องทดสอบแบบไฮดรอลิก ต้องเป็นเครื่องที่สามารถให้น้ำหนักด้วยอัตราคงที่อยู่ในช่วง 1.43 ถึง 3.47 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

ส่วนที่ใช้กดของเครื่องทดสอบ จะต้องประกอบด้วยแผ่นเหล็กทดสอบ (STEEL BEARING PLATE) 2 แผ่น ขนาดใหญ่กว่าขนาดของแท่นทดสอบไม่น้อยกว่า 10มิลลิเมตร แผ่นเหล็กตัวบนมีลักษณะเป็นแป้นกดฐานครึ่งทรงกลม (SPHERICALLY SEATED BLOCK) แขวนยึดไว้กับเครื่องเพื่อให้ขยับตัวได้ ส่วนแผ่นเหล็กตัวล่าง จะต้องยึดติดกับส่วนล่างของเครื่อง และต้องมีความหนาอย่างน้อย 50 มิลลิเมตร ผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กทั้งสอง จะต้องเรียบมีความเรียบคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.025 มิลลิเมตร ในระยะทาง 150 มิลลิเมตร การเพิ่มแรงกดต้องทำได้อย่างต่อเนื่อง ไม่มีจังหวะหยุดหรือกระตุกในระหว่างการเพิ่มแรงกด

- เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ มีความละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร
- เครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งมีความละเอียดถึง 1 กรัม
- เครื่องมือเคลือบผิวหน้าของแท่งคอนกรีต รูปทรงกระบอก

- แบบฟอร์ม ให้บันทึกในแบบฟอร์ม บฟ. มทช.(ท) 105.1-2545 : มาตรฐานการทดสอบความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีต
- การเตรียมตัวอย่าง
  - แท่งทดสอบซึ่งได้จากการหล่อจะต้องเป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150±0.75 มิลลิเมตร และสูง 300±3 มิลลิเมตร หรือเป็นรูปลูกบาศก์ ขนาด 150±0.75 มิลลิเมตร โดยทำการเก็บตัวอย่างตาม มทช.(ท) 102-2545 : มาตรฐานการเก็บตัวอย่างคอนกรีตในหน้างานและการนำไปบำรุงรักษา
  - การเคลือบผิวหน้า (CAPPING) แท่งทดสอบรูปทรงกระบอก วัสดุที่ใช้ในการเคลือบผิวหน้ารับแรงอัดของแท่งตัวอย่าง (CAPPING COMPOUND) ต้องสามารถรับแรงอัดได้สูงกว่าแรงอัดของแท่งคอนกรีตทดสอบ การเคลือบปลายทั้งสองของแท่งทดสอบ ต้องเคลือบให้ตั้งฉากกับแกนของแท่งทดสอบ ความเรียบของผิวหน้าทดสอบที่ได้รับการเคลือบแล้ว ยอมให้คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร
  - แท่งทดสอบที่ได้จากการเจาะ จะต้องเป็นรูปกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 2 เท่า ของขนาดใหญ่ที่สุดของมวลหยาบ และต้องไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร ความยาวเมื่อยังไม่เคลือบปลายต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของเส้นผ่านศูนย์กลาง

ก่อนการเคลือบผิวแท่งคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ จะต้องมีความคลาดเคลื่อนของความเรียบที่ผิวหน้าตัดไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ของมุมที่หน้าตัดทำกับแกนตามยาวจากมุมฉากไม่เกิน 5 องศา และเส้นผ่านศูนย์กลาง ที่หน้าตัดทั้งสองจากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยไม่เกิน 2.5 มิลลิเมตร

ความเรียบของผิวหน้า แท่งทดสอบที่ได้จากการเจาะ เมื่อได้รับการเคลือบแล้ว ยอมให้คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร แท่งทดสอบ ซึ่งได้จากการเจาะให้เจาะเมื่อคอนกรีตมีอายุไม่ต่ำกว่า 14 วัน และต้องอยู่ในสภาพที่ดีไม่มีรอยร้าว รอยบิ่นหรือเป็นโพรง

- ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักแท่งทดสอบ โดยให้วัดหาเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือขนาดหน้าตัดแท่งสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นเซนติเมตร ทศนิยม 2 ตำแหน่ง โดยเฉลี่ยค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ค่า ที่วัดได้หรือวัดขนาดสี่เหลี่ยมหน้าตัด ที่ผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยหรือขนาดที่วัดได้นี้จะใช้เป็นค่าสำหรับคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแท่งทดสอบ ในการวัดความสูงให้วัดความสูงของแท่งทดสอบ รวมทั้งความหนาของวัสดุเคลือบผิวหน้าหน่วยเป็นเซนติเมตร ทศนิยม 2 ตำแหน่ง การชั่งน้ำหนักแท่งทดสอบ เพื่อหาความหนาแน่นของแท่งคอนกรีต ให้ชั่งน้ำหนักแท่งทดสอบเป็นกิโลกรัม ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- การวัดขนาดของแท่งทดสอบ ซึ่งได้จากการเจาะ ต้องวัดให้ได้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร ภายหลังการเคลือบผิวหน้าของแท่งทดสอบให้เรียบการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง ให้วัด 3 ตำแหน่ง คือ ปลายทั้งสองข้าง และที่กึ่งกลางแท่งทดสอบ โดยวัดตำแหน่งละ 2 แนวของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตั้งฉากกับค่าที่วัดได้ทั้ง 6 ค่า นำมาเฉลี่ยเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณ การวัดความยาวให้วัด 4 ตำแหน่ง คือ ที่ผิวตามยาวของแท่งทดสอบ โดยมีระยะห่างตามเส้นรอบรูปของภาคตัดขวางที่ปลายเท่ากัน แล้วหาค่าเฉลี่ยสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณ

- การทดสอบ
  - การวางแท่งทดสอบบนเครื่องกดต้องเป็นไปตามนี้
    - ผิวแผ่นเหล็กด้านสัมผัสกับแท่งทดสอบต้องสะอาดปราศจากน้ำมัน
    - จัดแนวศูนย์กลางของแผ่นเหล็กตั้งตัวบนและตัวล่างให้อยู่ในแนวเดียวกัน
    - การวางแท่งทดสอบต้องให้แนวแกนของแท่งทดสอบทับกับแนวศูนย์กลางของเครื่องกดทดสอบ

- ผิวแผ่นเหล็กต้องสัมผัสกับแท่งทดสอบแนบสนิท

- เมื่อวางแท่งทดสอบบนเครื่องกดทดสอบและจัดให้แผ่นเหล็กสัมผัสกับแท่งทดสอบแนบสนิทดีแล้ว จึงเริ่มให้น้ำหนักกดอย่างสม่ำเสมอ โดยมีอัตราคงที่อยู่ในช่วง 1.43 ถึง 3.47 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ในช่วงครึ่งแรกของน้ำหนักกดสูงสุดที่แท่งทดสอบจะรับได้นั้น ยอมให้ใช้อัตราการกดสูงกว่ากำหนดได้ และห้ามปรับอัตราการกดหรือส่วนใด ๆ ของเครื่องทดสอบ ในขณะที่แท่งทดสอบอยู่ในช่วงจุดคราก (YIELD POINT) และจุดวิบัติ (FAILURE)
- ให้ทำการกดจนกระทั่ง แท่งทดสอบถึงจุดวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุดที่แท่งทดสอบ สามารถรับได้ และให้บันทึกรูปลักษณะการแตกของแท่งทดสอบนั้นในแบบฟอร์ม ที่ บฟ. มทช.(ท) 105.1-2545 : มาตรฐาน

2.8.3 การคำนวณ

- การคำนวณ ค่าความต้านแรงอัด ของแท่งทดสอบให้ละเอียด ถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง ได้จากสูตร

$$\text{ความต้านทานอัดของแท่งทดสอบ (กิโลเมตรต่อตารางเซนติเมตร)} = \frac{\text{น้ำหนักกดสูงสุดที่แท่งทดสอบรับได้ (กิโลกรัม)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำหนักกดของแท่งทดสอบ(ตารางเซนติเมตร)}}$$

- การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของแท่งทดสอบ ให้มีความละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง ได้จากสูตร

$$\text{ความหนาแน่นของแท่งทดสอบ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \frac{\text{น้ำหนักของแท่งทดสอบ (กิโลกรัม)}}{\text{ปริมาตรของแท่งทดสอบ } \textit{(ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}$$

- ถ้าแท่งทดสอบที่ได้จากการเจาะมีส่วนสูงน้อยกว่า 2 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลาง ให้แก้ไขค่าความต้านแรงอัดตาม ตารางที่ 1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางกับตัวคูณที่ใช้แก้ไขค่าความต้านแรงอัด

อัตราส่วนความสูง ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทดสอบ	**ตัวคูณสำหรับแก้ไขค่าความต้านทานแรงอัด**
1.75	0.99
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

2.8.4 การรายงานผล

ให้รายงานผลการทดสอบ โดยมีรายละเอียดตามรายการดังต่อไปนี้

- หมายเลขประจำแท่งทดสอบ
- ขนาดของแท่งทดสอบ
- แรงอัดสูงสุด
- ความต้านแรงอัด
- ลักษณะการแตก
- ข้อบกพร่อง ของแท่งทดสอบ หรือการเคลือบ
- ประวัติการบ่ม
- วัน เดือน ปี ที่ทดสอบ และอายุของแท่งทดสอบ เมื่อทดสอบ
- ความหนาแน่น

บันทึกผลต่าง ๆ เหล่านี้ ในแบบฟอร์มในหัวข้อที่ 2.2

2.8.5 เกณฑ์การตัดสิน และความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้

- เกณฑ์ในการพิจารณาค่าความต้านแรงอัดของแท่งทดสอบให้เป็นไปตาม มทช. 101-2545 : มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก
- การคำนวณ ค่าความต้านแรงอัดของแท่งทดสอบ ให้แสดงในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีความละเอียดถึง ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- การคำนวณ ค่าความหนาแน่นของแท่งทดสอบ ให้แสดงในหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีความละเอียดถึง ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- การวัดขนาดของแท่งทดสอบให้วัดในหน่วยเซนติเมตร และละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง

- สำหรับแท่งทดสอบรูปทรงกระบอก ที่ได้จากการหล่อหรือการเจาะ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ยอมให้คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ร้อยละ ± 0.5 และความสูงยอมให้คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ร้อยละ ± 1.0
- สำหรับแท่งทดสอบรูปลูกบาศก์ มิติทุกด้านยอมให้คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ร้อยละ ± 0.5

2.8.6 ข้อควรระวัง

- ในกรณีที่ทดสอบแท่งทดสอบที่บ่มชื้น หากเป็นแท่งทดสอบรูปลูกบาศก์ต้องเช็ดผิวให้แห้งและทดสอบภายใน 1 ชั่วโมง และหากเป็นแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกต้องเช็ดผิวให้แห้ง และเคลือบผิวหน้าแท่งทดสอบทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง แล้วทดสอบภายใน 1 ชั่วโมง
- สำหรับแท่งทดสอบที่ได้จากการเจาะ นำมาแช่ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวที่อุณหภูมิห้อง ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง แล้วจึงเช็ดผิวให้แห้งเคลือบผิวหน้าแท่งทดสอบทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง แล้วทดสอบภายใน 1 ชั่วโมง
- การชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นของแท่งทดสอบ ให้ชั่งน้ำหนักเฉพาะแท่งทดสอบไม่รวมน้ำหนักของวัสดุที่เคลือบผิวหน้า
- ควรมีการตรวจสอบเครื่องกดที่ใช้งานประจำสม่ำเสมอ ปีละครั้ง และเมื่อสงสัยว่าเครื่องทดสอบอาจให้ผลทดสอบไม่ถูกต้อง หรือหลังจากการซ่อม หรือประกอบใหม่ให้ทำการตรวจสอบทุกครั้ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินการทำโครงงาน

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมด้านการบดอัดและกำลังอัดของวัสดุผิวทางที่ปรับปรุงด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ ในพื้นที่จังหวัดสระบุรี ของกรมทางหลวงชนบท งานวิจัยนี้เก็บข้อมูลความแน่นของวัสดุดินซีเมนต์บดอัดในสนามและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด เพื่อเข้าใจการพัฒนาความแน่นแห้งในสนามตามจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด ความแน่นแห้งในสนามได้จากการทดสอบด้วยวิธีนิวเคลียร์ (Nuclear method) วิธีการนี้จะคำนวณหาหน่วยน้ำหนักแห้งโดยการส่งผ่านรังสีแกมม่า (Gamma ray) ไปยังดินถมและสะท้อนขึ้นสู่เครื่องรับรังสี ถ้าปริมาณรังสีสะท้อนกลับมายังเครื่องรับมากแสดงว่า วัสดุมีความแน่นแห้งสูง การหาปริมาณความชื้นทำโดยการใช้รังสีนิวตรอน (new tron) ส่งผ่านไปยังวัสดุดินถมและสะท้อนกลับไปยังเครื่องรับ อนุภาคของนิวตรอนจะไปชนกับอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำ ถ้านิวตรอนสะท้อนกลับเข้าเครื่องรับช้า แสดงว่าปริมาณน้ำในมวลวัสดุดินถมมีมาก นอกจากความสะดวกรวดเร็วแล้ว วิธีการนี้ยังเป็นการทดสอบที่ไม่ทำลายชั้นทาง

3.2 แผนงานดำเนินการ

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยงานหลักสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยการทดสอบการบดอัด และการทดสอบกำลังอัดวัสดุผิวทงที่ชำรุดและปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ข้อมูลผลการทดสอบจาก ส่วนที่สองเป็นผลทดสอบการบดอัดผิวทางที่ชำรุดและปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในสนาม งานวิจัยนี้ทั้งสองส่วนจะดำเนินงานในพื้นที่จังหวัดสระบุรี สำนักทางหลวงชนบทที่ 2 (สระบุรี) กรมทางหลวงชนบท

3.3 ขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

วัสดุผิวทางที่ชำรุดจากสายทางจะนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และบดอัด และทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว เพื่อกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงชนบทแสดงดังนี้

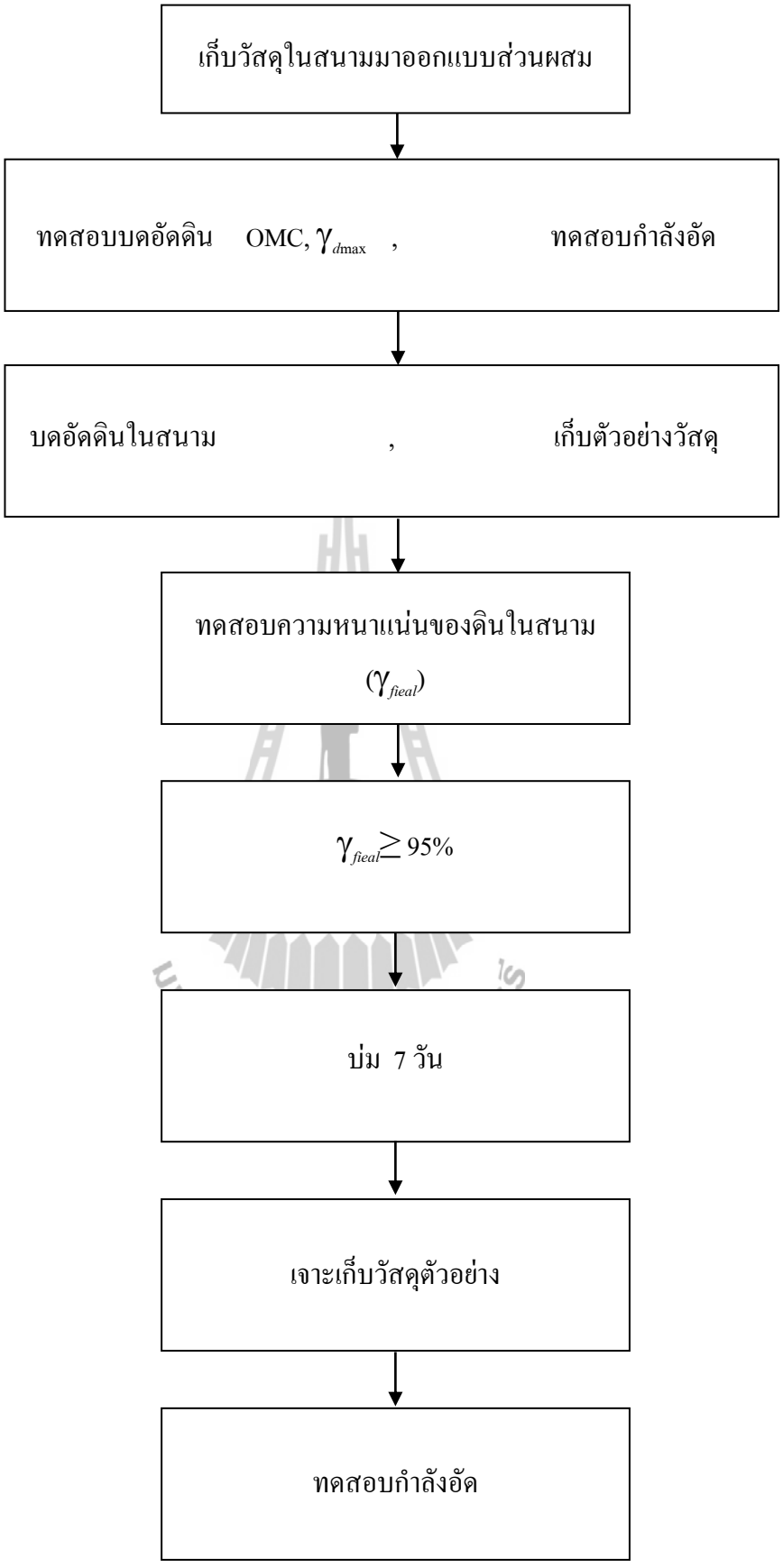
- การทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบ มทช.(ท) 501.2-2545

- มาตรฐานการทดสอบความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีต (compressive strength of concrete) มทช.(ท) 105.1- 2545

3.4 การทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม (Field density test) โดยวิธีการ Nuclear Method

ขั้นตอนในการทำงานบดอัดและตรวจสอบความหนาแน่น แสดงในแผนผังการทำงาน ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเริ่มต้นจากการเก็บตัวอย่างวัสดุและทำการทดสอบการบดอัด ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท และทำการบดอัดในสนามด้วยรถบดอัดในสนามด้วยรถบดอัดจนได้ร้อยละของการบดอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ ความหนาแน่นแห้งสามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือนิวเคลียร์ เมื่อได้ความแน่นตามต้องการ ผู้วิจัยจะทำการเก็บตัวอย่างในสนามหลังจากบ่มแล้ว 7 วัน เพื่อทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว และนำผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุดินซีเมนต์ที่บ่มในสนามมาเปรียบเทียบกับวัสดุดินซีเมนต์ที่บ่มในห้องปฏิบัติการ เพื่อกำหนดอัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมกับงานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกับมาใช้ใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการซ่อมบำรุงผิวทางด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่

บทที่ 4
การวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

การบูรณะและปรับปรุงถนนลาดยางที่เสียหายสามารถทำได้หลายวิธี โดยทั่วไปวิธีการซ่อมบำรุงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักขึ้นอยู่กับระดับความเสียหายของถนนการซ่อมบำรุงถนนที่มีความเสียหายไม่รุนแรง (ความความเสียหายที่มีลักษณะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวทางเท่านั้นไม่เสียหายลึกถึงชั้นโครงสร้างทาง) มีวิธีการปฏิบัติอยู่ด้วยกัน 5 วิธีได้แก่การปะซ่อมผิว (Patching) การอุดรอยแตก (Sealing) การปรับระดับผิวทาง (Leveling) การฉาบผิวโดยใช้ Seal Coat และการฉาบผิวโดยใช้ Slurry Sealการซ่อมบำรุงถนนที่มีความเสียหายรุนแรง (ความเสียหายลึกถึงชั้นโครงสร้างทาง) ส่วนใหญ่ทำโดยเทคนิคที่เรียกว่า Deep Patching ซึ่งจะใช้เวลาในการก่อสร้างนาน ส่งผลให้มีผลต่อสภาพการจราจร ด้วยข้อได้เปรียบด้านเวลาในการซ่อมบำรุงและการเปิดใช้ถนน เทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่(Pavement recycling technique) โดยการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุเดิมที่ชำรุดด้วยปูนซีเมนต์/ปูนขาว/สารผสมเพิ่มแล้วทำการบดอัดจึงได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในงานซ่อมบำรุงของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท

การบดอัดเป็นการไล่อากาศออกจากดินโดยการเติมน้ำและให้พลังงานงานบดอัดแก่ดินน้ำมีหน้าที่ทำให้เม็ดดินอ่อนนุ่มและเป็นตัวหล่อลื่นให้เม็ดดินเคลื่อนตัวได้ง่ายทำให้เม็ดดินสามารถเคลื่อนตัวเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลง และดินบดอัดมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น (กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้น และการอัดตัวและการซึมผ่านน้ำลดลง) ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดแปรผันตามปริมาณน้ำและพลังงานการบดอัดที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่งความหนาแน่นแห้งของดินจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในดินแต่หากปริมาณน้ำในดินมีมากเกินไปน้ำส่วนเกินจะเข้าไปแทนที่เม็ดดิน ทำให้ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ความหนาแน่นแห้งของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดและจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้น ปริมาณน้ำที่ให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเรียกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum water content, OWC) ที่ปริมาณน้ำในดินค่าหนึ่งความหนาแน่นแห้งของดินจะเพิ่มขึ้นได้เมื่อเพิ่มพลังงานการบดอัด การบดอัดในสนามทำโดยใช้รถบดอัดบดอัดจนได้ความหนาแน่นแห้งไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ โดยควบคุมให้ปริมาณน้ำในดินมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ $\pm$ 3 ของ OWC แม้ว่าพลังงานการบดอัดที่ให้แก่ดินจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนเที่ยวของรถบดอัด แต่ความ

หนาแน่นแห้งสูงสุดสำหรับปริมาณความชื้นในสนามค่าหนึ่งจะมีค่าได้ไม่เกินความหนาแน่นแห้งที่ปริมาณอากาศในดินเป็นศูนย์ (ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ) (Horpibulsuk et al., 2013)

กำลังอัดในสนามของผิวทางที่ซ่อมบำรุงด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่มีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (Horpibulsuk et al. 2004; Horpibulsuk et al. 2006 and Horpibulsuk et al. 2011a) งานวิจัยในอดีตพบว่าความแตกต่างของกำลังอัดในสนามกับกำลังอัดในห้องปฏิบัติการเกิดจากความไม่สม่ำเสมอในการผสมผิวทางเก่ากับซีเมนต์ (Non-uniformity in mixing soil with cement) สภาวะการบ่ม (Curing condition) และวิธีการบดอัด (Compaction method)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาการพัฒนาความแน่นและกำลังอัดของผิวที่ซ่อมแซมด้วยการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ เปรียบเทียบกับค่าในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการประมาณความหนาแน่นแห้งสูงสุดและกำลังอัดของผิวทางที่ซ่อมแซมด้วยการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่และต่อการควบคุมคุณภาพงานบดอัดที่มีประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

4.2 วิธีดำเนินการทำวิจัย

งานวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ส่วนแรกเป็นการทดสอบการบดอัดและซีบีอาร์ของวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์ โครงการงานซ่อมถนนลาดยาง สายแยกทางหลวงหมายเลข 362 บ้านหาดสองแคว อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรีภายใต้การควบคุมของสำนักทางหลวงชนบทที่ 2 (สระบุรี) กรมทางหลวงชนบท จังหวัดสระบุรีการทดสอบบดอัดเป็นแบบสูงกว่ามาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM D1557 (2009) การทดสอบซีบีอาร์ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1883 (2007) ผลทดสอบนำมาวิเคราะห์และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นและซีบีอาร์ของวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์ความแน่นแห้งและปริมาณน้ำเหมาะสมที่ได้ในห้องปฏิบัติการ นำไปใช้บดอัดชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ในสนามการทดสอบหาความแน่นในสนามของวัสดุพื้นทางหินคลุกใช้วิธีนิวเคลียร์ Nuclear method ตามมาตรฐาน ASTM D 5195-91การทดสอบความแน่นในสนามเริ่มจากจำนวนเที่ยวที่ 6ไปจนถึงจำนวนเที่ยวที่ 14 ผลการตรวจวัดในสนาม นำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งในสนามกับจำนวนเที่ยวชุดเครื่องจักรที่ใช้บดอัดในสนามประกอบไปด้วย รถบดล้อเหล็กแบบสั่นสะเทือนความถี่ 20 ถึง 30 รอบต่อวินาที วิ่งตามด้วยรถบดล้อยางที่มีความดันที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับดินประมาณ 585 ถึง 690 กิโลนิวตันต่อตารางเมตรและรถบดล้อเหล็กชนิดผิวหน้าเรียบที่มีความดันที่จุดสัมผัสระหว่างดินกับล้อประมาณ 310 ถึง 380 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

ส่วนที่สองทำการศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของหินคลุกผสมซีเมนต์ ใน 3 สภาวะที่ต่างกัน ได้แก่ สภาวะที่ 1: กำลังอัดของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ (laboratory strength) ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งในการทดสอบเพื่อสุ่มหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ใช้สัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำหนักหินคลุกเท่ากับร้อยละ 3.5 สำหรับการซ่อมแซมผิวทางด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่สภาวะที่ 2: กำลังอัดของตัวอย่างหลังจากที่เครื่องจักรผสมพื้นทางเก่าผสมกับปูนซีเมนต์แล้วนำมาทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ (field hand-compacted strength)ตัวอย่างบดอัดจะนำมาห่อด้วยถุงพลาสติกแล้วนำไปทดสอบที่อายุบ่ม 7 วัน (field hand-compacted strength) สภาวะที่ 3: กำลังอัดของตัวอย่างที่เก็บจากในสนาม (field roller-compacted strength)หลังก่อสร้างเป็นเวลา 7 วัน การเก็บตัวอย่างทำด้วยวิธี coringตัวอย่างมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 250 มิลลิเมตรและสูง 300 มิลลิเมตร สัญลักษณ์ของกำลังอัดทั้ง 3 สภาวะคือq_{ul},q_{ufh} และ q_{ufr} ตามลำดับ โครงการทดสอบมีด้วยกัน 4โครงการ ได้แก่ โครงการหาดสองแคว โครงการสองคอน โครงการซับครกและโครงการดงมะเกลือ ในแต่ละโครงการทดสอบ ผู้วิจัยรวบรวมกำลังอัดจากสามสถานี ซึ่งห่างกัน 500 เมตร และในแต่ละสถานีจะทำการเก็บตัวอย่างที่บริเวณกึ่งกลาง และขอบซ้ายและขวาของถนน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างกัน 2.50 เมตร

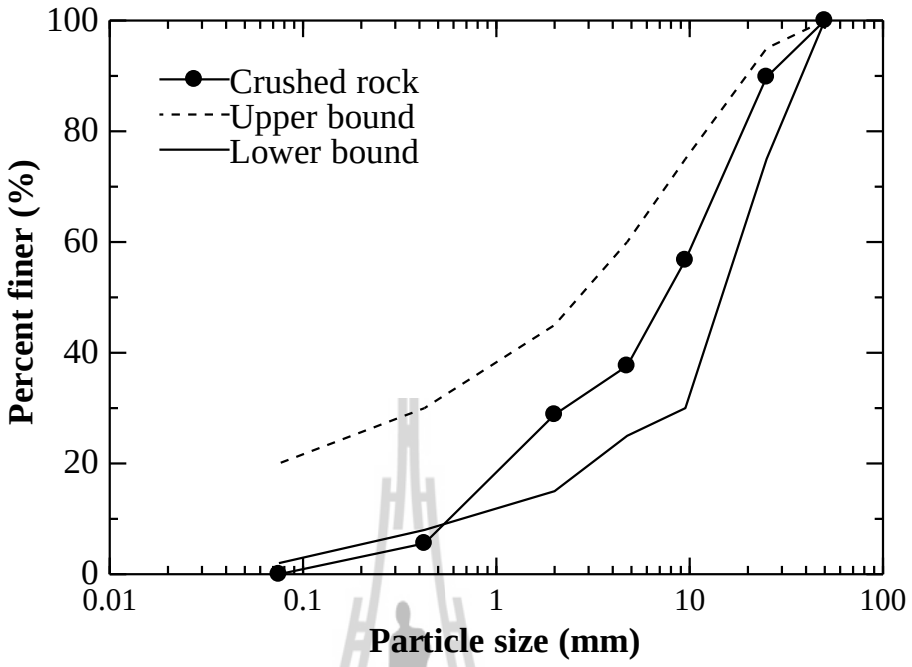
4.3 ผลทดสอบและการวิเคราะห์

4.3.1 ผลทดสอบหินคลุกในห้องปฏิบัติการ

หินคลุกที่ใช้ในงานวิจัยมีช่วงการกระจายขนาดของเม็ดดินเป็นไปตามมาตรฐาน ทล.-ม. 201/2544 ดังแสดงในภาพที่ 4.1 สามารถจำแนกประเภทของหินคลุกได้เป็นชนิด A-1-a ตามมาตรฐานของ AASHTO หินคลุกที่ใช้ไม่มีสภาพความเป็นพลาสติกและการบวมตัวมีค่า Abrasion loss เท่ากับร้อยละ 19.2 ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกรมทางหลวง ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 40 การทดสอบ Los Angeles abrasion ทำตามมาตรฐาน ASTM C131 (2006) คุณสมบัติพื้นฐานของหินคลุกที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการทั้งหมดสรุปในตารางที่ 4.1

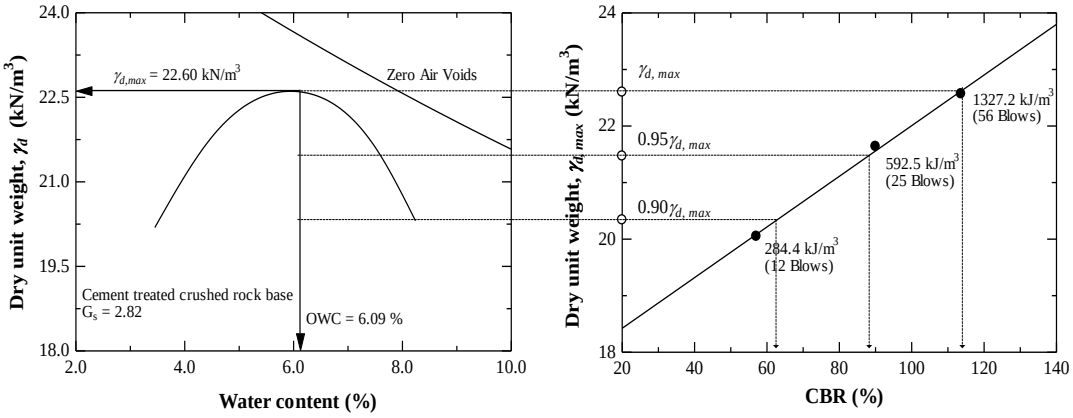
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติหินคลุกที่ทำการทดสอบ

Grade	Classification	Sieve Analysis % Passing								Plasticity		Swell.	Abrasion loss(%)
		50	25	19	9.5	#4	#10	#40	#200	LL	PL		
A	A-1-a	100	91.7	78.7	57.9	37.6	28.1	17.6	7.7	N.P.	N.P.	-	19.2



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดินของหินคลุก

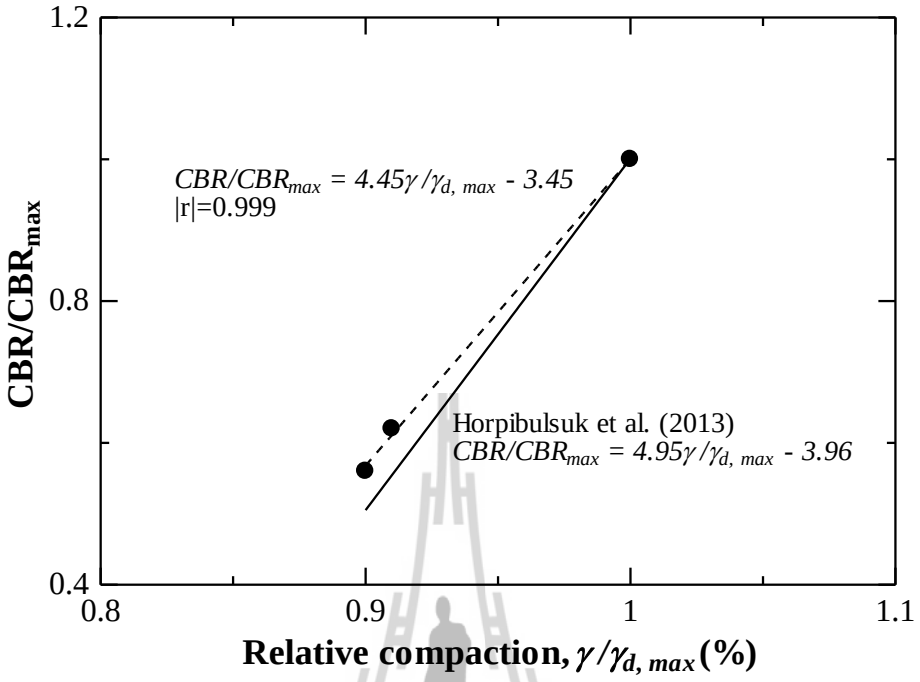
อิทธิพลที่ทำให้ความแน่นแห้งของดินมีค่าเพิ่มขึ้น ได้แก่ปริมาณน้ำและพลังงานในการบดอัด ดังแสดงรูปที่ 4.2a และ 4.2b ซึ่งแสดงผลการทดสอบการบดอัดและ CBR สำหรับหินคลุก โดยที่รูปที่ 4.2a แสดงผลทดสอบการบดอัดของหินคลุกที่พลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง (1327.2 kJ/m^3) ความแน่นแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งปริมาณน้ำถึงจุดที่ให้ความแน่นแห้งสูงสุด และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณน้ำต่อไปอีก ความแน่นแห้งของหินคลุกจะมีค่าต่ำลง รูปที่ 4.3b แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มพลังงานในการบดอัดที่ปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง CBR มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง ในช่วงที่หน่วยร้อยละของการบดอัดมีค่าระหว่าง 90 ถึง 100



(a) **(b)**

รูปที่ 4.2 ผลทดสอบการบดอัดและ CBR ของหินคลุกจากโครงการก่อสร้างทาง

แม้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และความหนาแน่นแห้ง แตกต่างกันตามแต่ชนิดของหินคลุก กำลังต้านทานแรงเฉือน ความคละของดิน และความต้านทานการสึกหรอ เป็นต้น แต่อัตราส่วน CBR และอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งของหินคลุกประเภทต่างๆ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เดียวกันได้ดังรูปที่ 4.3ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ซึ่งมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับสมการของ Horpibulsuk et al. (2013) ที่สร้างขึ้นจากผลทดสอบของดินสามชนิดที่รวบรวมจากพื้นที่จังหวัดสระบุรี ได้แก่หินคลุก ดินลูกรัง และดินคันทาง (ดินเม็ดละเอียด) สมการดังกล่าวมีประโยชน์ต่อการประมาณค่าซีบีอาร์ที่พลังงานต่างๆ เมื่อทราบค่าอัตราส่วน $\gamma_d/\gamma_{d,\,max}$ ในห้องปฏิบัติการ



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

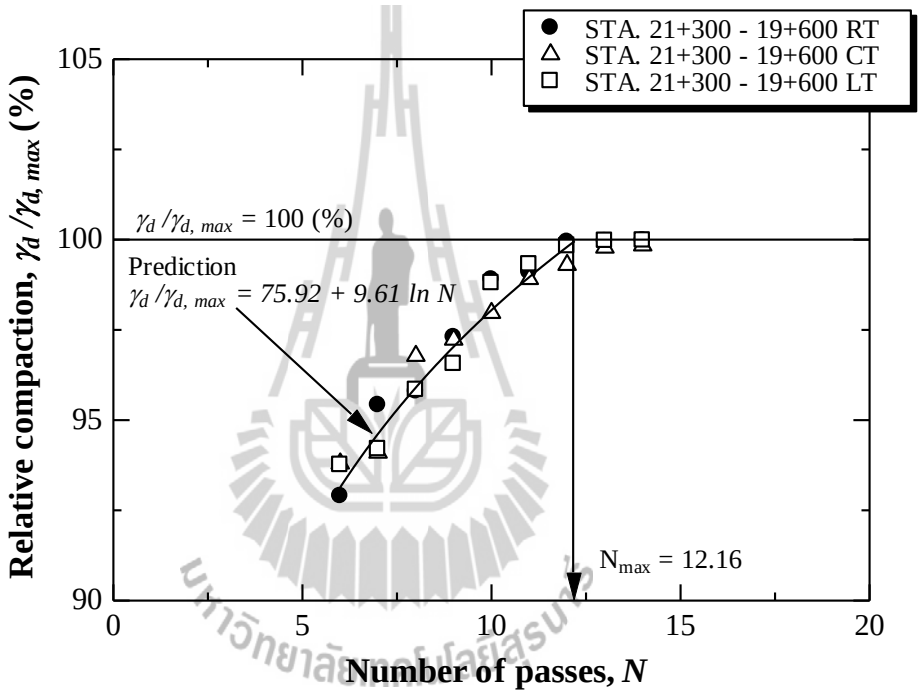
4.3.2 การทดสอบการบดอัดในสนาม

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งในสนามและความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ ($\gamma_d/\gamma_{d,\max}$) กับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดจะเห็นได้ว่าค่า $\gamma_{df}/\gamma_{d,\max}$ ที่เที่ยวรถบดอัด 12 รอบขึ้นไปมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะการบดอัดแน่นที่สุด ($\gamma_{df}/\gamma_{d,\max}$ = 100%) แม้ว่าจะทำการเพิ่มพลังงาน การบดอัดให้มากขึ้น(เพิ่มจำนวนเที่ยวของการบดอัด) แต่หน่วยน้ำหนักแห้งก็จะไม่สามารถเพิ่มขึ้นต่อไปได้อีกเนื่องจากระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่สภาวะนี้มีค่าใกล้เคียงกับหน่วยน้ำหนักแห้งในสภาวะไม่มีอากาศในโพรงดิน (Zero air void) ดังนั้นจำนวนเที่ยววิ่งที่มากเกินไปจึงไม่เกิดประโยชน์อันใดในทางปฏิบัติความสัมพันธ์ระหว่างการบดอัดสัมพันธ์ (Relativecompaction, $\gamma_d/\gamma_{d,\max}$) และจำนวนเที่ยววิ่งรถบดอัดแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงล็อกการิทึม (Horpibulsuk et al., 2013)

$$\frac{\gamma_{df}}{\gamma_{d,\max}} = a + b\ln N \qquad (4.1)$$

เมื่อ γ_d คือหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัดในสนาม a และ b เป็นค่าคงที่ และ N คือจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด จำนวนเที่ยววิ่งที่เหมาะสมสามารถประมาณได้จากการแทนค่า N เท่ากับ 100 เมื่อทราบค่าคงที่ a และ b

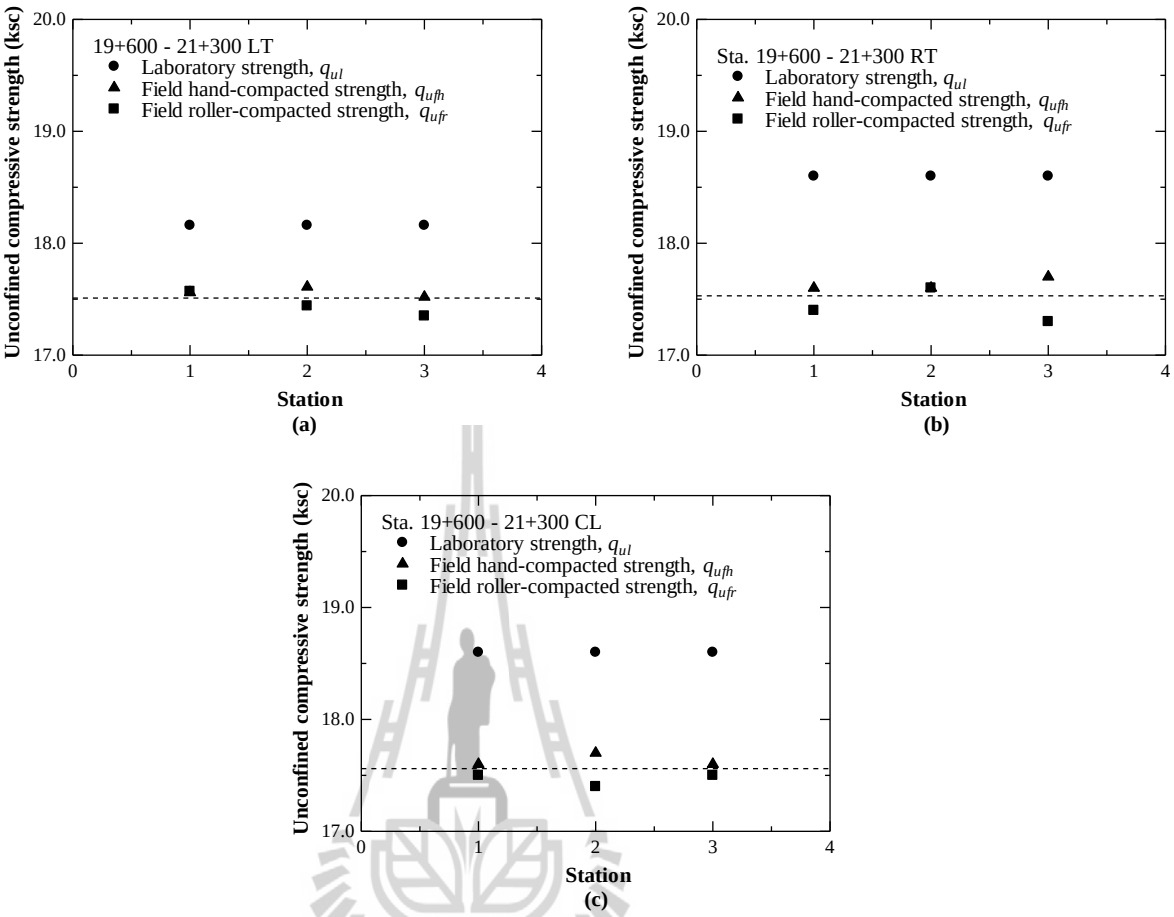
ผลการประมาณการพัฒนาความแน่นในสนามแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ a และ b เท่ากับ 75.96 และ 9.61 ตามลำดับ ทดสอบพบว่าพฤติกรรมการพัฒนาความแน่นของหินคลุกผสมซีเมนต์มีลักษณะเช่นเดียวกับหินคลุกสังเกตได้จากผลทดสอบที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทำนายจากค่าคงที่ a และ b ของหินคลุกซึ่งมีค่าเท่ากับ 75.94 และ 10.73 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความแน่นแห้งในสนามต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับจำนวนรอบการบดอัดด้วยรถบด

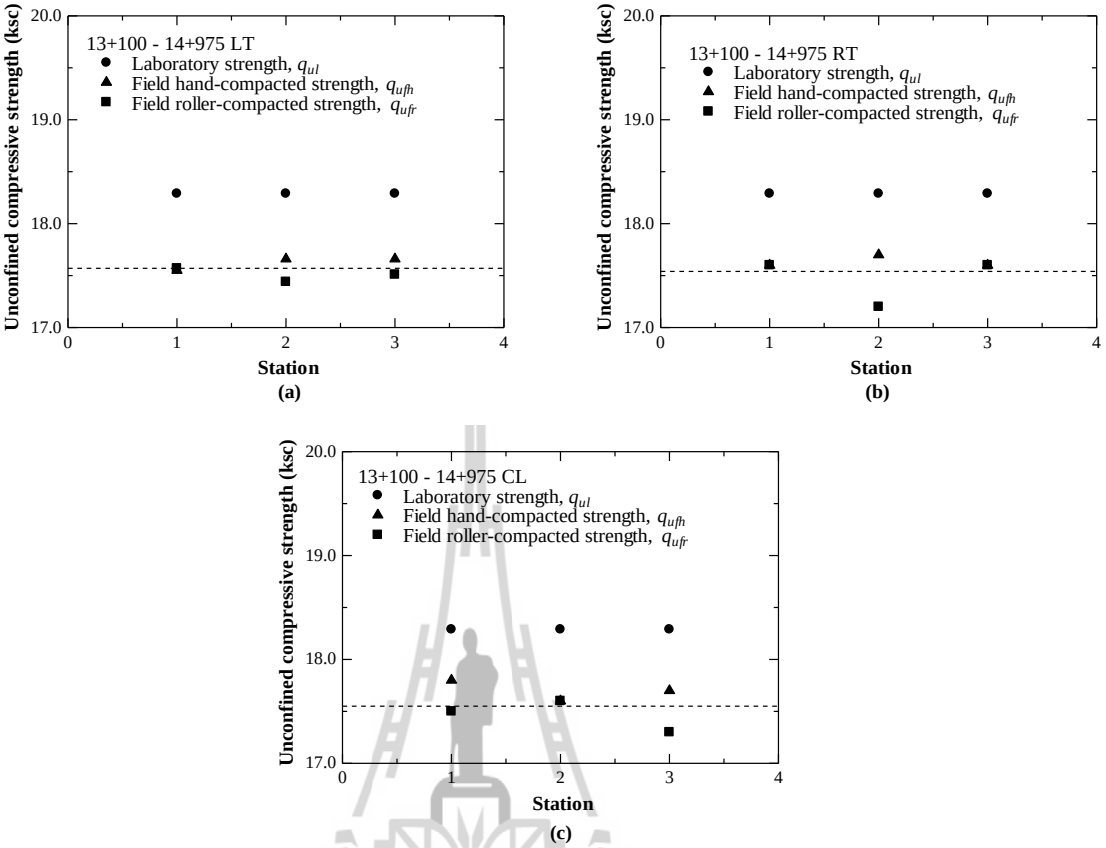
4.3.3 กำลังอัดของผิวทาง

รูปที่ 4.5 ถึง4.8 แสดงการพัฒนากำลังอัดของทั้งสามสภาวะที่สถานีทดสอบทั้งสามแห่ง กำลังอัดในห้องปฏิบัติการ (q_{ul}) ของทั้งสามโครงการทดสอบมีค่าอยู่ระหว่าง 18.1 ถึง 18.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผสมในสนามแต่บดอัดในห้องปฏิบัติการ (q_{ufh}) มีค่าอยู่ระหว่าง 17.5 ถึง 17.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และกำลังอัดที่ผสมและบดอัดด้วยรถบดอัด (q_{ufr}) มีค่าต่ำที่สุดอยู่ระหว่าง 17.2 ถึง 17.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



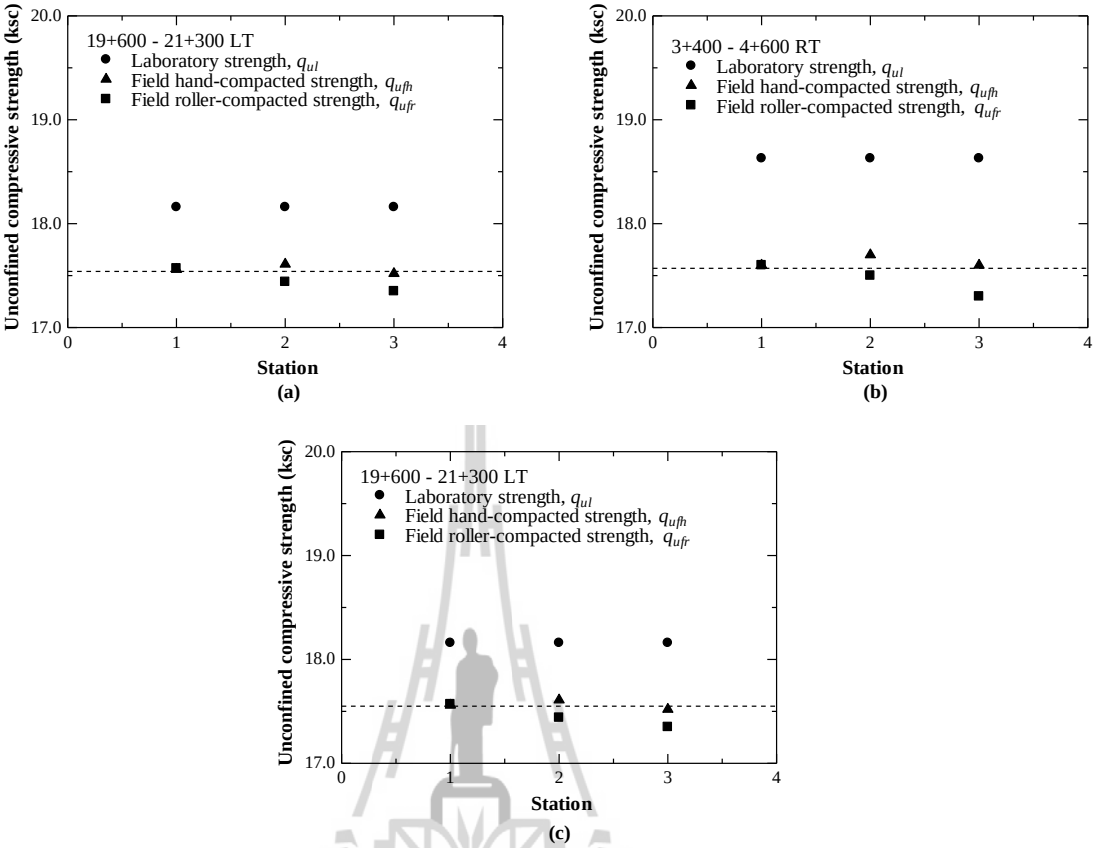
รูปที่ 4.5 กำลังอัดของโครงการทดสอบหาดสองแคว ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และขอบซ้ายและขวาของถนน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



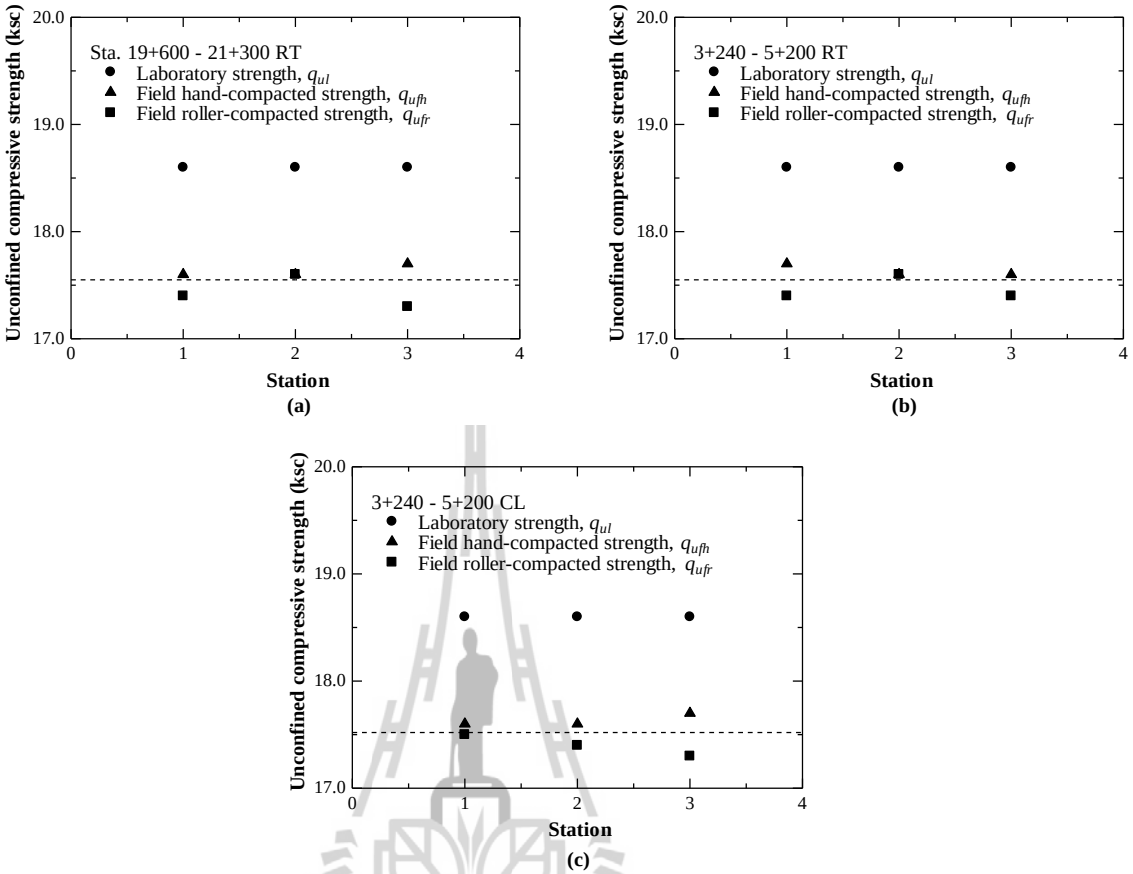
รูปที่ 4.6 กำลังอัดของโครงการทดสอบสองคอนที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และขอบซ้าย และขวาของถนน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



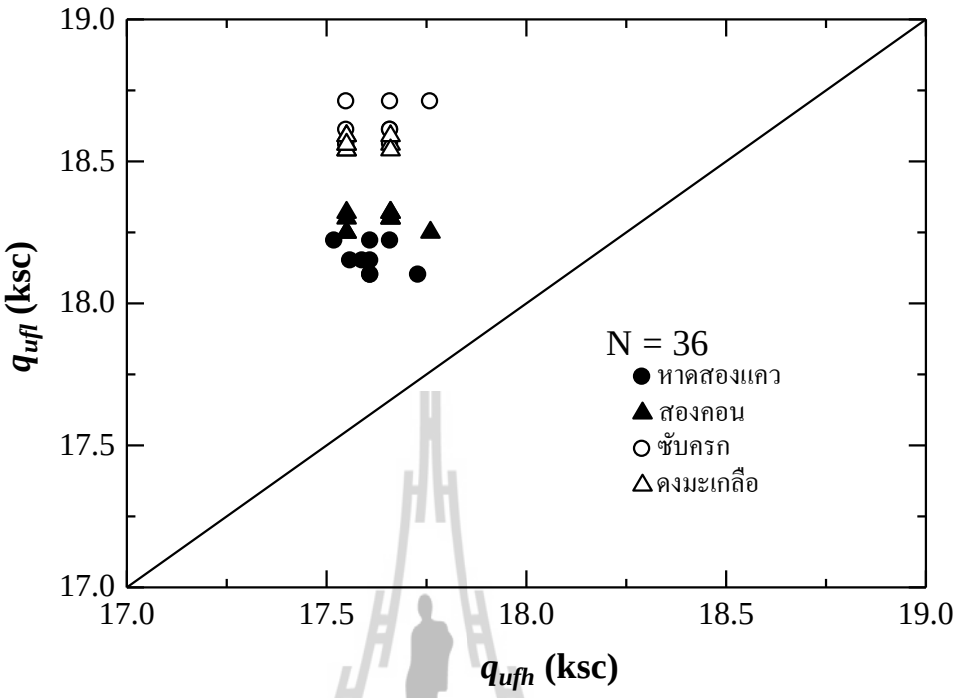
รูปที่ 4.7 กำลังอัดของโครงการทดสอบซับครกที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และขอบซ้าย และขวาของถนน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

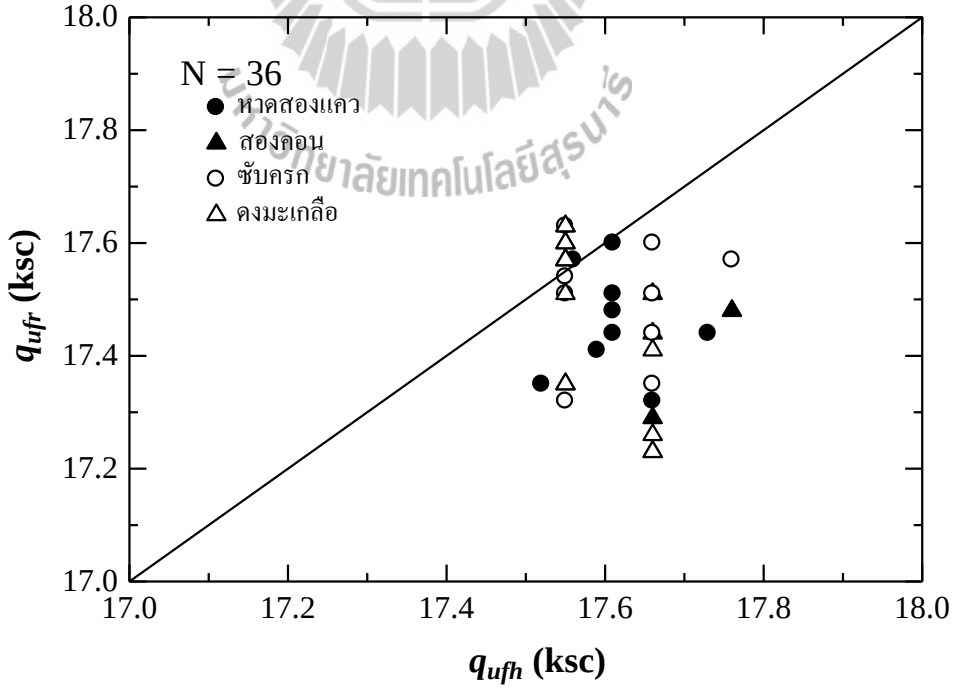


รูปที่ 4.8 กำลังอัดของโครงการทดสอบดงมะเกลือที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ขอบซ้าย และขวาของถนน

อัตราส่วน q_{ufh}/q_{ul} (รูปที่ 4.9) ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของความไม่สม่ำเสมอในการผสมผิวทางเก่ากับซีเมนต์ มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 93.8 ถึง 98.0 และอัตราส่วน q_{ufr}/q_{uh} (รูปที่ 4.10) ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของสภาวะการบดอัดและสภาวะการบ่ม มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 98 ถึง 105 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของการบดอัดและการบ่มที่แตกต่างในสนามและในห้องปฏิบัติการต่อกำลังมีไม่มากนัก ความแตกต่างของกำลังอัดในสนามและห้องปฏิบัติการเกิดจากความไม่สม่ำเสมอในการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับผิวทางเก่าเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตาม อิทธิพลดังกล่าวจัดว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบในเชิงปฏิบัติ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าหากหินคลุกผสมซีเมนต์ในสนามได้รับการบดอัดจนได้ความแน่นตามมาตรฐานกำหนด q_{ufr} มีใกล้เคียงกับ q_{ul} โดยที่การผสมหินคลุกเข้ากับปูนซีเมนต์มีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 4.9 อัตราส่วนของ q_{ufh}/q_{ul}ของสถานีต่างๆ



รูปที่ 4.10 อัตราส่วนของ q_{ufr}/q_{ufh}ของสถานีต่างๆ

4.4 ขั้นตอนการควบคุมงานบดอัดในสนาม

จากผลการศึกษาทั้งหมดผู้วิจัยนำเสนอแนวทางการตรวจสอบความแน่นของผิวทางที่ซ่อมบำรุงด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ โดยมีขั้นตอนดังนี้

<u>การเตรียมข้อมูลในห้องปฏิบัติการ</u>

1. ทำการทดสอบการบดอัดของวัสดุปรับปรุงเพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสม
2. จากปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ทราบค่า ทำการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดต่างๆ เพื่อทำการทดสอบหาความหนาแน่นแห้ง

<u>การควบคุมงานบดอัดในสนาม</u>

3. ทำการบดอัดดินในสนาม โดยกำหนดปริมาณความชื้นของดินบดอัดให้อยู่ในช่วงร้อยละ 2 ของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่หาได้จากห้องปฏิบัติการ
4. วัดค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัด เพื่อหาค่า a และ b และประมาณจำนวนเที่ยววิ่งเหมาะสม โดยการแทนค่าความหนาแน่นสัมพันธ์ (อัตราส่วนความหนาแน่น) เท่ากับ 100
5. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและจำนวนเที่ยววิ่งจากพารามิเตอร์ a และ b ที่ทราบค่า
6. เมื่อจำนวนเที่ยววิ่งเท่ากับจำนวนเที่ยววิ่งเหมาะสม ทำการตรวจสอบความหนาแน่นแห้งในสนาม ความหนาแน่นแห้งสัมพันธ์ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ที่สภาวะนี้ qufr มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 93.8 ของ qul (จากผลการศึกษาในสนาม)
7. เมื่อบดอัดจนได้ความหนาแน่นแห้งตามที่ออกแบบไว้ ทำการบ่มด้วยน้ำที่เพียงพอเพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสมบูรณ์
8. ทำการทดสอบตัวอย่างที่เก็บในสนามเพื่อทำการตรวจสอบกำลังอัดในสนามเทียบกับกำลังอัดในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 5
สรุปผลการทดสอบ

1. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีบีอาร์ในสภาวะแช่น้ำกับหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการของ หินคลุกที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2013) สามารถใช้ในการประมาณค่าซีบีอาร์ของหินคลุกที่ได้จากผิวทางที่ชำรุดและต้องการปรับปรุงด้วยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่
2. แม้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และความหนาแน่นแห้ง แตกต่างกันตามแต่ชนิดของหินคลุก เนื่องจากกำลังต้านทานแรงเฉือน ความคละของดิน และความต้านทานการสึกหรอ เป็นต้น แต่อัตราส่วน CBR และอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งของหินคลุกในการศึกษาครั้งนี้สามารถประมาณได้ด้วยความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2013)สมการดังกล่าวมีประโยชน์ต่อการประมาณค่า ซีบีอาร์ที่พลังงานต่างๆ เมื่อทราบค่าอัตราส่วน $\gamma_d/\gamma_{d,\,max}$ ในห้องปฏิบัติการ
3. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งในสนามและความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ ($\gamma_d/\gamma_{d,\max}$) กับจำนวนเที่ยววิ่งของรถบดอัดที่เที่ยวรถบดอัด 12 รอบขึ้นไปมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะการบดอัดแน่นที่สุด ซึ่งแม้ว่าจะทำการเพิ่มพลังงานการบดอัดให้มากขึ้นแต่หน่วยน้ำหนักแห้งก็จะไม่สามารถเพิ่มขึ้นต่อไปได้อีกเนื่องจากระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่สภาวะนี้มีค่าใกล้เคียงกับหน่วยน้ำหนักแห้งในสภาวะไม่มีอากาศในโพรงดิน (Zero air void) ดังนั้นจำนวนเที่ยววิ่งที่มากเกินไปจึงไม่เกิดประโยชน์อันใดในทางปฏิบัติ
4. ผลการประมาณการพัฒนาความแน่นในสนามแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ *a*และ *b*เท่ากับ 75.96 และ 9.61 ตามลำดับ สำหรับหินคลุกผสมซีเมนต์ซึ่งมีความใกล้เคียงกับผลการประมาณสำหรับหินคลุกที่ไม่ผสมซีเมนต์ (ค่าคงที่ *a* และ *b*เท่ากับ 75.94 และ 10.73 ตามลำดับ) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการพัฒนา ความแน่นของหินคลุกผสมซีเมนต์ (ก่อนปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน) และหินคลุกมีพฤติกรรม ที่คล้ายกัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากสัดส่วนปูนซีเมนต์ที่ผสมเข้าไปในหินคลุกมีปริมาณน้อย (ร้อยละ 3.5) และไม่มีผลอย่างเป็นนัยยะต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายขนาดของหินคลุกซึ่งเป็นอิทธิพลหลักต่อความแน่นของดินเม็ดหยาบบดอัด
5. ความแตกต่างของกำลังอัดในสนามและห้องปฏิบัติการเกิดจากความไม่สม่ำเสมอในการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับผิวทางเดิมเป็นหลัก โดยที่อิทธิพลจากการบ่มและการบดอัด

มีค่าไม่มากนัก อย่างไรก็ตามกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากอิทธิพลดังกล่าวมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบในเชิงปฏิบัติ ดังนั้นในการก่อสร้างจริงถ้าหินคลุกผสมซีเมนต์ในสนามมีความหนาแน่นแห้งได้ตามที่ออกแบบและการบ่มในสนามมีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน กำลังอัดของผิวทางที่ปรับปรุงจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

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

Horpibulsuk et al. (2006). ตัวแปรที่ควบคุมกำลังอัดของถนนดินซีเมนต์ในสนาม. ศ.ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา. (2545). มาตรฐานวิธีทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน. มทช.(ท) 501.2-2545 กรมทางหลวงชนบท

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา. (2545). มาตรฐานการทดสอบความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีต มทช.(ท) 105.1-2545 กรมทางหลวงชนบท

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายธนกฤต เกตุสงเคราะห์ เกิดวันที่ 13 มิถุนายน 2520 ที่หมู่บ้านช่องโค ตำบลศรีละกอ อำเภอจักราช จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษาประถมศึกษาที่ โรงเรียนบ้านช่องโค จบการศึกษามัธยมศึกษาที่ โรงเรียนจักราชวิทยา อำเภอจักราช จังหวัดนครราชสีมา และระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) แผนกช่างโยธา ที่วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา และสำเร็จการศึกระดับปริญญาตรี ปี พ.ศ. 2553 คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และปัจจุบันรับราชการตำแหน่ง วิศวกรโยธาปฏิบัติการ กลุ่มออกแบบถนนและสะพาน สังกัดสำนักพัฒนาพื้นที่ สำนักงานการปฏิรูปที่ดินเพื่อการเกษตรกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี