การศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับอายุวัสดุที่ใช้ในการบูรณะทางผิวทางแอสฟัทต์ โดยวิธี Pavement In – Place Recycling

นายวรรณพงศ์ คล่องแคล่ว

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2553

การศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับอายุวัสดุที่ใช้ในการบูรณะทางผิวทางแอสฟัทต์ โดยวิธี Pavement In – Place Recycling

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.วชรภูมิ เบญจโอฬาร)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

(ผศ. ดร.ปรียาพร โกษา)
กรรมการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วรรณพงศ์ คล่องแคล่ว : การศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับอายุวัสดุที่ใช้ในการบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์ โดยวิธี PAVEMENT IN-PLACE RECYCLE (A COMPRESSION TEST OF RESTORED MATERIALS FROM THE PAVEMENT IN-PLACE RECYCLE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วชรภูมิ เบญจโอฬาร

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดกับอายุบ่มของวัสดุทางเดิมที่ใช้ในงานบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์ โดยวัสดุทางเดิมประกอบด้วยผิวทาง Asphalt concrete และพื้นทางหินคลุกผสมรวมกันแล้วนำวัสดุทางเดิมผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ได้อัตราส่วนที่สามารถทำให้ปรับปรุงคุณภาพวัสดุพื้นทางเดิมให้มีกำลังรับแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในอายุบ่มที่ 7 วันตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุทางเดิมจาก 4 สายทาง ในการศึกษาหาความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดกับอายุบ่มที่ 24,72,120,168 และ216 ชั่วโมงในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามอายุบ่มของแผนการทดลองมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์กับข้อกำหนดตามมาตรฐานการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทั้ง 4 สายทาง ในห้องปฏิบัติการ จะได้สมการกำลังอัดเฉลี่ย $y = 0.087x+21.07$ และค่า $R^2= 0.533$ ซึ่งพยากรณ์ได้ว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 168 ชั่วโมง มีค่าเป็น1.23 เท่าของกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 72 ชั่วโมง และสมการกำลังอัดต่ำที่สุด $y = 0.040x+16.03$ มีค่า $R^2 = 0.960$ อัตราส่วนเท่ากับ 1.20 เท่า ผลการศึกษานี้ได้ค่าพยากรณ์กำลังรับแรงอัด เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนาการบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์ ในการบริหารจัดการงานสนามในโอกาสต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

WANNAPONG KHLONGKHLAEO : A COMPRESSION TEST OF RESTORED MATERIALS FROM THE PAVEMENT IN-PLACE RECYCLE. THESIS ADVISER: ASST. PROF. VACHARAPOOM BENJAORAN, Ph.D.

The research studies the relationships of compressive strength with ages of recycling pavement materials. The restored materials consist of asphalt-concrete pavement and base – course aggregate. These restored materials are then mixed with Portland cement using a suitable ratio to improve the compressive strength of the original base-course aggregate. The acceptable strength standard is not less than 24.5 kg./cm.^{2} at the curing age of 7 days. This research conducted a test that use the restored materials from 4 different highways. The compression test of these restored materials way conducted at the curing ages of 24, 72, 120, 168 and 216 hours in laboratory. The test results were compared and analyzed with the highway standard of the pavement in- place recycling.

The test results indicate the relationship equation of the average compressive strength as $y = 0.087x+21.07$ and $R^2 = 0.533$. This provided the ratio of compressive strength at 168 hours to 72 hours of ages as 1.23. The relationship equation of the lowest compressive strength is $y = 0.040x+16.03$ and $R^2 = 0.960$ and the ratio of compressive strength at 168 hours to 72 hours of ages is 1.20. The finding from this research can be use for forecasting the compressive strength of the restored pavement materials at the early age of 168 hours using the strength at the age of 72 hours .This can reduce the waiting time for the strength test in the field and expedite the renovation of the highway.

School of Civil Engineering Student's Signature_____

Academic Year 2010 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบคุณ กลุ่มบุคคลต่างๆ ที่กรุณาแนะนำ ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินโครงงานวิจัย อาทิเช่น

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำให้คำปรึกษา และตรวจทานเนื้อหาโครงงานจนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วชรภูมิ เบญจโอฬาร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ซึ่งเป็นบุคคลที่สำคัญอย่างมากที่คอยแนะนำ ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือจนโครงงานฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียาพร โกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ รองศาสตราจารย์ ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ อาจารย์ ดร.ฉัตรเพชร ทศพล อาจารย์ผู้สอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขอขอบพระคุณกรมทางหลวงที่ได้ให้ทุนการศึกษาในระดับปริญญาโท และนายช่างวิทวัส หล่อโชติอนันต์ ผู้อำนวยการส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำนักทางหลวงที่ 8 ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และสนับสนุนตลอดมา ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำนักทางหลวงที่ 8 ที่ช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างวัสดุในสนามและทดลองในห้องปฏิบัติการ

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ นางสิงห์ทองผู้เป็น มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมด้านการศึกษา เป็นอย่างดีตลอดมา อีกทั้งขอขอบคุณ คุณพอใจ คล่องแคล่ว ภรรยา และบุตร ทั้งสองคือ ด.ช. เมธาสิทธ์ คล่องแคล่ว และ ด.ญ. สวิตตา คล่องแคล่ว ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้จนกระทั่งโครงงานฉบับนี้สำเร็จ

วรรณพงศ์ คล่องแคล่ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฉ
สารบัญรูปภาพ ..... ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฎ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 2
1.3 ขอบเขตการทำโครงงาน 3
1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ 3
1.5 แผนการดำเนินโครงการ 3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
2 ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 บทนำ 5
2.2 มาตรฐานงานทาง 5
2.2.1 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก 5
2.2.2 มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) 7
2.2.3 การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) 10
2.3 มาตรฐานวิธีการทดลอง 14
2.3.1 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน 14
2.3.2 วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน 18
2.4 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์ 22

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์ 24
2.5.1 ปริมาณซีเมนต์และประเภทของซีเมนต์ 24
2.6 การบ่มดินซีเมนต์ 26
2.7 กำลังของดินซีเมนต์ 27
3 วิธีดำเนินการทำโครงงาน 28
3.1 บทนำ 28
3.2 แผนงาน 28
3.2.1 การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ 29
3.2.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ 29
3.3 ขั้นตอนการทดลองในห้องปฏิบัติ 33
4 การศึกษาผลทดลองและวิจารณ์ผล 34
4.1 บทนำ 34
4.2 วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ 34
4.3 ผลการทดลองคุณสมบัติของวัสดุ ทางหลวงหมายเลข 2 40
4.4 ผลการทดลองคุณสมบัติของวัสดุ ทางหลวงหมายเลข 205 45
4.5 ผลการทดลองคุณสมบัติของวัสดุ ทางหลวงหมายเลข 2090 51
4.6 ผลการทดลองคุณสมบัติของวัสดุ ทางหลวงหมายเลข 2247 56
4.7 ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ 60
4.8 ผลการทดลองในสนาม 61
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 62
5.1 สรุปผลการวิจัย 62
5.2 ข้อเสนอแนะ 62
เอกสารอ้างอิง 64
ภาคผนวก 65
ประวัติผู้เขียน 102

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนดำเนินการโครงการ 3

2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก 6

2.2 ขนาดคละของมวลและปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ 8

2.3 ขนาดคละวัสดุแทรก 10

4.1 Job mix design for pavement in-place recycling HW 2 35

4.2 Unconfined compressive strength HW 2 35

4.3 Sieve analysis 0f fine and coarse aggregates HW 2 36

4.4 Compaction test HW 2 37

4.5 Summary job mix design percent cement HW 2 38

4.6 Summary unconfined compressive strength HW 2 39

4.7 Job mix design for pavement in-place recycling HW 205 40

4.8 Unconfined compressive strength HW 205 41

4.9 Sieve analysis 0f fine and coarse aggregates HW 205 42

4.10 Compaction test HW 205 43

4.11 Summary job mix design percent cement HW 205 44

4.12 Summary unconfined compressive strength HW 205 44

4.13 Job mix design for pavement in-place recycling HW 2090 46

4.14 Unconfined compressive strength HW 2090 46

4.15 Sieve analysis 0f fine and coarse aggregates HW 2090 47

4.16 Compaction test HW 2090 48

4.17 Summary job mix design percent cement HW 2090 49

4.18 Summary job mix design percent cement HW 2090 50

4.19 Job mix design for pavement in-place recycling HW 2247 51

4.20 Unconfined compressive strength HW 2247 52

4.21 Sieve analysis 0f fine and coarse aggregates HW 2247 53

4.22 Compaction test HW 2247 54

4.23 Summary job mix design percent cement HW 2247 55

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.24 Summary job mix design percent cement HW 2247 55
4.25 Unconfined compressive strength HW 2 cement 1.0 % 66
4.26 Unconfined compressive strength HW 2 cement 2.0 % 67
4.27 Unconfined compressive strength HW 2 cement 3.0 % 68
4.28 Unconfined compressive strength HW 2 cement 4.0 % 69
4.29 Unconfined compressive strength HW 2 อายุ 24 ชั่วโมง 70
4.30 Unconfined compressive strength HW 2 อายุ 72 ชั่วโมง 71
4.31 Unconfined compressive strength HW 2 อายุ 120 ชั่วโมง 72
4.32 Unconfined compressive strength HW 2 อายุ 168 ชั่วโมง 73
4.33 Unconfined compressive strength HW 2 อายุ 216 ชั่วโมง 74
4.34 Unconfined compressive strength HW 205 cement 1.0 % 75
4.35 Unconfined compressive strength HW 205 cement 2.0 % 76
4.36 Unconfined compressive strength HW 205 cement 3.0 % 77
4.37 Unconfined compressive strength HW 205 cement 4.0 % 78
4.38 Unconfined compressive strength HW 205 อายุ 24 ชั่วโมง 79
4.39 Unconfined compressive strength HW 205 อายุ 72 ชั่วโมง 80
4.40 Unconfined compressive strength HW 205 อายุ 120 ชั่วโมง 81
4.41 Unconfined compressive strength HW 205 อายุ 168 ชั่วโมง 82
4.42 Unconfined compressive strength HW 205 อายุ 216 ชั่วโมง 83
4.43 Unconfined compressive strength HW 2090 cement 1.0 % 84
4.44 Unconfined compressive strength HW 2090 cement 2.0 % 85
4.45 Unconfined compressive strength HW 2090 cement 3.0 % 86
4.46 Unconfined compressive strength HW 2090 cement 4.0 % 87
4.47 Unconfined compressive strength HW 2090 อายุ 24 ชั่วโมง 88
4.48 Unconfined compressive strength HW 2090 อายุ 72 ชั่วโมง 89
4.49 Unconfined compressive strength HW 2090 อายุ 120 ชั่วโมง 90
4.50 Unconfined compressive strength HW 2090 อายุ 168 ชั่วโมง 91
4.51 Unconfined compressive strength HW 2090 อายุ 216 ชั่วโมง 92
4.52 Unconfined compressive strength HW 2247 cement 1.0 % 93
4.53 Unconfined compressive strength HW 2247 cement 2.0 % 94

4.54 Unconfined compressive strength HW 2247 cement 3.0 % 95
4.55 Unconfined compressive strength HW 2247 cement 4.0 % 96
4.56 Unconfined compressive strength HW 2247 อายุ 24 ชั่วโมง 97
4.57 Unconfined compressive strength HW 2247 อายุ 72 ชั่วโมง 98
4.58 Unconfined compressive strength HW 2247 อายุ 120 ชั่วโมง 99
4.59 Unconfined compressive strength HW 2247 อายุ 168 ชั่วโมง 100
4.60 Unconfined compressive strength HW 2247 อายุ 216 ชั่วโมง 101

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	สภาพความเสียหายของถนน	2
1.2	เครื่องจักรขุดตัดผิวทางและพื้นทาง	2
3.1	การตากตัวอย่าง	30
3.2	การแบ่งตัวอย่าง	30
3.3	การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดลอง	31
3.4	การบ่มก้อนตัวอย่าง	31
3.5	การทดสอบกำลังรับแรงอัด	32
3.6	แผนการดำเนินโครงการในห้องปฏิบัติการ	33
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัด HW 2	36
4.2	การกระจายตัวของวัสดุพื้นทางเดิม HW 2	37
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับความแน่นสูงสุดของวัสดุ HW 2	38
4.4	กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดกับระยะการบ่ม HW 2	39
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัด HW 205	41
4.6	การกระจายตัวของวัสดุพื้นทางเดิม HW 205	42
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับความแน่นสูงสุดของวัสดุ HW 205	43
4.8	กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดกับระยะการบ่ม HW 205	45
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัด HW 2090	47
4.10	การกระจายตัวของวัสดุพื้นทางเดิม HW 2090	48
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับความแน่นสูงสุดของวัสดุ HW 2090	49
4.12	กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดกับระยะการบ่ม HW 2090	50
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัด HW 2247	52
4.14	การกระจายตัวของวัสดุพื้นทางเดิม HW 2247	53
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับความแน่นสูงสุดของวัสดุ HW 2247	54
4.16	กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดกับระยะการบ่ม HW 2247	56
4.17	กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยตามระยะการบ่มของ4 สายทาง	57
4.18	กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดและสมการ HW 2	57
4.19	กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดและสมการ HW 205	58

4.20 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดและสมการ HW 2090 58
4.21 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดและสมการ HW 2247 59
4.22 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและสมการ 59
4.23 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดต่ำสุดและสมการ 60

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ทล.ท. = มาตรฐานงานทาง กรมทางหลวง

ทล.ม. = มาตรฐานวิธีการทดลอง กรมทางหลวง

A = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงกด

AC = Asphalt cement

AO = พื้นที่หน้าตัดเดิมของแท่งตัวอย่าง

ASSHTO = American Association of State Highway and Transportation Officials

CBR = California bearing ratio

HW = Highway

LL = ขีดจำกัดความเหลว (Liquid limit)

LO = ความยาวเดิมองแท่งตัวอย่าง

M1 = มวลของดินเปียก

M2 = มวลของดินอบแห้ง

OMC = ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (maximum moisture content)

P = แรงกด

PI = ดัชนีสภาพพลาสติก (plasticity index)

PL = ขีดจำกัดพลาสติก (plasticity limit)

R^2 = สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

UCS = Unconfined compressive strength

V = ปริมาตรของแบบหรือปริมาตรของดินเปียกที่บดทับในแบบ

W = ปริมาณน้ำในดิน

x = ระยะการบ่ม

y = กำลังอัด

ρd = ความแน่นแห้ง

ρt = ความแน่นเปียก

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถนนผิวทางลาดยางแอสฟัลต์หรือ Asphalt Concrete เป็นถนนที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไป กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย มีหน้าที่รับผิดชอบดูแลบำรุงรักษา คิดเป็นระยะทาง 57,328 กิโลเมตรซึ่งจำเป็นต้องได้รับการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องและถูกวิธี เพื่อให้ทางหลวงสามารถรองรับปริมาณจราจร ได้สะดวก รวดเร็ว และปลอดภัยตามเวลาที่ออกแบบไว้ แต่เนื่องด้วยมีข้อจำกัดทั้งด้านงบประมาณ และทรัพยากร ประกอบกับปริมาณจราจรที่เพิ่มขึ้น ตามการขยายตัวของสภาพทางเศรษฐกิจของประเทศ ทำให้ถนนผิวทางแอสฟัลต์ที่มีอยู่ เกิดความเสียหายไม่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและจำเป็นต้องได้รับการบูรณะบำรุงรักษา ดังรูปที่ 1.1 และ รูปที่ 1.2

ปี 2537 กรมทางหลวง ได้กำหนดมาตรฐานงานทาง ใช้ในการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์ตามมาตรฐานที่ ทล.ม.213/2537 เรื่องมาตรฐานการปรับปรุงชั้นทางเดิมในที่ (Pavement In – Place Recycling) เป็นการปรับปรุงชั้นทางเดิม ให้เป็นชั้นทางที่มีคุณภาพสูงขึ้น โดยใช้เครื่องจักรขุดตัดรื้อชั้นทางเดิม ให้ร่วนซุย พร้อมผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันกับวัสดุที่ผสมเพิ่ม เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แล้วทำการบดอัดให้ได้ความแน่น และกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานที่กำหนด การทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยทั่วไปกระทำเมื่อตัวอย่างมีอายุบ่ม 7 วันเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดที่มีค่าได้ตามมาตรฐาน จึงจะดำเนินงานในชั้นต่อไปคืองาน Prime Coat และงานปูผิวทาง Asphalt Concrete ของสายทาง

เพื่อให้การทำงานรวดเร็วขึ้นวิศวกรจึงจำเป็นต้องศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงอัด ของแท่งตัวอย่างวัสดุชั้นทางเดิมผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับอายุบ่ม ซึ่งจะช่วยให้การพิจารณากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน โดยอาศัยกำลังอัดที่อายุบ่ม 3 วัน ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างกับอายุบ่มในช่วงระยะเริ่มต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 1.1 สภาพความเสียหายของถนน

รูปที่ 1.2 เครื่องจักรขุดตัดผิวทางและพื้นทาง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างวัสดุชั้นทางและผิวทางเดิม ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับระยะเวลาบ่มในช่วงต้น โดยเฉพาะที่อายุบ่ม 72 ชั่วโมงในห้องปฏิบัติการและนำมาทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างที่อายุบ่ม 168 ชั่วโมง จากหน้างาน

1.3 ขอบเขตของการทำโครงงาน

โครงงานนี้เลือกถนนที่ทำการบูรณะที่เป็นผิวทางแอสฟัลต์ ที่มีชั้นพื้นทางเดิมเป็นหินคลุก และมีผิวทางแอสฟัลต์หนาไม่เกิน 10 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องขุดตัดลึก 20 เซนติเมตร ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 24, 72, 120, 168 และ 216 ชั่วโมงจำนวนตัวอย่าง (วัสดุพื้นทางเดิมผสมซีเมนต์) ในแต่ละสายทางที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด ในแต่ละช่วงอายุบ่ม ใช้ตัวอย่างจำนวน 7 ตัวอย่าง แล้วนำมาหาเป็นค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย เพื่อสร้างความสัมพันธ์กับอายุบ่มที่ 24, 72, 120, 168 และ 216 ชั่วโมง

1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1.4.1 แบบ (Mold) ชุดการทดลอง Compaction test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

1.4.2 เครื่องดันตัวอย่าง (Sample extruder)

1.4.3 ตาชั่ง

1.4.4 เครื่องแบ่งตัวอย่าง (Sample splitter)

1.4.5 เตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส

1.4.6 เหล็กปาด (Straight edge)

1.4.7 ตะแกรงร่อนตัวอย่าง ขนาด 19.0 มม. และ 4.75 มม.

1.4.8 เครื่องกด (Loading machine)

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1.1 แผนดำเนินการโครงงาน

รายละเอียดแผนดำเนินการ	ต.ค. 2553	พ.ย. 2553	ธ.ค. 2553	ม.ค. 2554	ก.พ. 2554	มี.ค. 2554
ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูล						
เก็บตัวอย่างจากสายทางและเตรียมตัวอย่าง						
ทดลองและออกแบบส่วนผสมปูนซีเมนต์						
ทดลองและทดสอบกำลังรับแรงอัด						
สรุปผลการทดลองและรายงานผล						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเพิ่มความรู้ความเข้าใจถึงคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างที่อายุ 72 ชั่วโมง เพื่อนำไปสู่การพัฒนาการบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์
2. เป็นข้อมูลประกอบการบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์ในการบริหารจัดการเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษากำลังรับแรงอัดในงานบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์โดยวิธี Pavement In-Place Recycling เป็นสิ่งสำคัญในการปรับปรุงชั้นทางเดิมในที่ให้มีคุณภาพสูงขึ้น เพื่อให้การบูรณะทางหลวงเกิดความคุ้มค่าสูงสุด และมีอายุการใช้งานได้ยาวนาน การหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะการบ่ม และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 24, 72, 120, 168 และ216 ชั่วโมงเป็นการพัฒนาการบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์อีกทางหนึ่งที่จะทำให้การดำเนินงานก่อสร้างในสนามและสามารถคืนสภาพของถนนได้เร็วขึ้น

2.2 มาตรฐานงานทาง

2.2.1 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก

งานนี้ประกอบด้วย หินโม่มวลรวมซึ่งมีขนาดคละอย่างสม่ำเสมอ จากใหญ่ไปหาเล็ก โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียว หรือหลายชั้นไปบนชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้ และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้วโดยการเกลี่ยแต่งและบดอัดให้ถูกต้องตามแนวระดับ ความลาด ขนาดตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ วัสดุหินโม่มวลรวม (Crush rock soil aggregate typebase) ต้องเป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็งเหนียว สะอาด ไม่ผุและปราศจากวัสดุอื่นเจือปน จากแหล่งที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงแล้ว วัสดุจำพวก Shale ห้ามนำมาใช้ ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุพื้นทางหินคลุกไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำหินคลุกจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- มีค่าความสึกหรอ เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 202/2515“วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ไม่เกินร้อยละ 40
- มีค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.213/2531“ วิธีการทดลองหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวม” โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ มีค่าไม่เกินร้อยละ 9 ให้มีการทดลองทุกครั้งที่นำมาใช้

- ส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับส่วนหยาบ (Coarse Aggregate) การใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปน เพื่อปรับปรุงคุณภาพจะต้องได้รับความคิดเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน
- มีขนาดคละที่ดี และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.205/2517“วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 2.1
- ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสาม(2/3) ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)
- มีค่า Liquid Limit เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 102/2515“วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (L.L.) ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 25
- มีค่า Plasticity Index เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.103/2515“วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (P.L.) และ Plasticity Index (P.I.)ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 6

ตารางที่ 2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก

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

- มีค่า CBR เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 109/2517“วิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีต และไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางแบบเซอร์เฟสทรีตเมนต์ที่ความแน่นแห้งของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุด ที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517“วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐานการควบคุมคุณภาพ

ขณะก่อสร้างการก่อสร้างพื้นทางหินคลุกให้ก่อสร้างเป็นชั้นๆ โดยให้มีความหนาเท่า ๆ กัน และแต่ละชั้นไม่เกิน 150 มิลลิเมตร เมื่อได้ก่อสร้างพื้นทางหินคลุก ซึ่งแบบกำหนดไว้หนาไม่เกิน 150 มิลลิเมตร จนได้ความยาวพอเหมาะในแต่ละวันแล้ว ดำเนินการตรวจสอบค่าระดับและทดสอบความแน่นของการบดทับ หากผลที่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างชั้นถัดไปได้ ในกรณีที่แบบพื้นทางหินคลุกกำหนดไว้หนา 200 มิลลิเมตร ให้ผู้รับจ้างก่อสร้างพื้นทางเป็น 2 ชั้น หนาชั้นละประมาณ 100 มิลลิเมตร โดยที่เมื่อได้ก่อสร้างพื้นทางชั้นแรกจนได้พอเหมาะที่จะก่อสร้างพื้นทางในชั้นถัดไปแล้ว ให้ดำเนินการทดลองความแน่นของการบดทับ หากผลทดลองเป็นไปตามข้อกำหนด ก็ให้ดำเนินการก่อสร้างพื้นทางหินคลุกชั้นถัดไปได้ ตามข้อกำหนดก่อนการปูพื้นทางหินคลุกชั้นถัดไป ให้ทำการพ่นน้ำให้ผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วชุ่มชื้น ถ้าผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกเรียบเป็นมัน ให้ผู้รับจ้างทำการครูดผิวหน้าของชั้นพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้เป็นริ้วรอยก่อน แล้วค่อยพ่นน้ำให้ชุ่มชื้น ผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไปแล้วควรมีความชุ่มชื้นพอควร ในขณะที่ทำการปูพื้นทางหินคลุกในชั้นถัดไป เพื่อช่วยให้ชั้นหินคลุกแต่ละชั้นยึดกันดี ผิวหน้าที่หยาบของพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไปแล้วที่มีความชื้นพอเหมาะจะช่วยให้เกิดการเกาะยึดที่ดีกับชั้นพื้นทางหินคลุกที่กำลังจะก่อสร้างทับลงไป การทดสอบความแน่นของการบดทับ งานพื้นทางหินคลุกจะต้องทำการบดทับให้ได้ความแน่นแห้งสม่ำเสมอตลอดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตัวอย่างหินคลุกเก็บจากหน้างานในสนามหลังจากคลุกเคล้าผสมและปูลงบนถนนแล้ว ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517“วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” การทดสอบความแน่นของการบดทับ ให้ดำเนินการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 603/2517“ วิธีการทดลองหาค่าความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย” ทุกระยะประมาณ 100 เมตร ต่อ 1 ช่องจราจร หรือ ประมาณพื้นที่ 500 ตารางเมตร ต่อ 1 หลุม ตัวอย่างหรือตามที่กำหนดไว้ในแบบเป็นอย่างอื่น

2.2.2 มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)

แอสฟัลต์คอนกรีตคือวัสดุผสมที่ได้จากการผสมร้อนระหว่างมวลรวม (Aggregate) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่โรงงานผสม (Asphalt Concrete Mixing Plant) โดยการควบคุมอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิตามที่กำหนด มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง งานบูรณะ และงานบำรุงทาง โดยการปูหรือเกลี่ยแต่งและบดทับบนชั้นทางที่ได้เตรียมไว้และผ่านการตรวจสอบแล้ว ให้ถูกต้องตาม

แนว ระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดที่ได้แสดงไว้ในแบบมวลรวมประกอบด้วยมวลหยาบ (Coarse Aggregate) และมวลละเอียด (Fine Aggregate) กรณีที่มวลรวมละเอียดไม่พอ หรือต้องการปรับปรุงคุณภาพและความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีต อาจเพิ่มวัสดุแทรก (Mineral Filler) ด้วยก็ได้ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของมวลหยาบไว้เป็นอย่างอื่น มวลหยาบต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ขนาดคละของมวลและปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หมายเหตุ กรมทางหลวงอาจพิจารณาเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวม และปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้แตกต่างจาก ตารางที่ 2.2 ก็ได้ ทั้งนี้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้ต้องมีคุณสมบัติและความแข็งแรงถูกต้อง

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

คละตาม ตารางที่ 2.3 ในกรณีที่ไม่ได้ระบุชนิดของแอสฟัลต์ไว้เป็นอย่างอื่น ให้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 ตามข้อกำหนดที่ ทล.ก. 401/2531 “ Specification for Asphalt Cement ” การใช้แอสฟัลต์อื่นๆหรือแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารใดๆนอกเหนือจากนี้ต้องมีคุณภาพเทียบเท่าหรือดีกว่า ทั้งนี้ต้องผ่านการทดสอบและพิจารณาความเหมาะสม รวมทั้งต้องได้รับอนุญาตให้ใช้ได้จากกรมทางหลวงเป็นกรณีไป

ตารางที่ 2.3 ขนาดคละวัสดุแทรก

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

ในกรณีที่กรมทางหลวงเห็นว่าวัสดุที่มีขนาดคละแตกต่างไปจากตารางที่ 2.2 แต่เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุผสมแทรกแล้ว จะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้น ก็จะอนุมัติให้ใช้วัสดุนั้นเป็นวัสดุแทรกได้

แอสฟัลต์ใช้ใน งานซ่อมผิวทาง (Patching) เพื่อปะซ่อม (Skin Patching) ขุดซ่อม (Deep Patching) งานปรับระดับ (Leveling) เพื่อปรับผิวถนนเดิมให้ได้ระดับตามที่ต้องการ งานเสริม (Overlay) เพื่อเสริมความแข็งแรงของผิวทางเดิม หรือเพิ่มความฝืดให้กับผิวทางเดิม

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

2.2.3 การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling)

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ หมายถึง การนำวัสดุจากชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำไปใช้งานใหม่ โดยให้มีคุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด ในการนี้อาจจะ

เพิ่มเติมวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงขนาดคละและเพิ่มปริมาณ เช่น หิน ทราย Soil Aggregate ฯลฯ และวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ (Stabilizing Agents) เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แอสฟัลต์ และสารผสมเพิ่ม (Admixture) อื่นใด ทั้งนี้ในการปรับปรุงอาจจะกระทำได้ทั้งในที่ (In – Place) หรือที่โรงงาน (Central Plant) หรือทั้งในที่และที่โรงงานด้วย ขึ้นอยู่กับการกำหนดไว้ในรูปแบบ โดยจะต้องก่อสร้างให้ถูกต้องตามขั้นตอนและปิดทับด้วยผิวทางใหม่ การปรับปรุงชั้นทางอาจจะทำการปรับปรุงเพียงชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ การใช้งานใช้ในงานปรับปรุงหรือก่อสร้างชั้นทางใด ๆ โดยให้เป็นไปตามรูปแบบและข้อกำหนดวัสดุชั้นทางเดิมรวมกับวัสดุที่ผสมเพิ่มจะต้องมีคุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้งานจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

วัสดุชั้นทางเดิม หมายถึง วัสดุที่ได้จากการขุดรื้อ ขูดไสจากชั้นทางเดิมแล้วทำให้ร่วน ในกรณีที่วัสดุชั้นทางเดิมหลังจากขุดรื้อ ขูดไสและทำให้ร่วนแล้วมีขนาดคละ หรือคุณสมบัติอื่น ๆ ไม่เป็นไปตามรูปแบบและข้อกำหนด ให้แก้ไขปรับปรุงหรือนำวัสดุผสมเพิ่มมาผสมเพื่อให้ได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด วัสดุที่นำมาผสมเพิ่มจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม เข้ากันได้ดีกับวัสดุชั้นทางเดิมหรือวัสดุผสมเพิ่มชนิดอื่นที่นำมาใช้ เพื่อทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมมีความแข็งแรงเป็นไปตาม ข้อกำหนดในรูปแบบที่ผู้ออกแบบระบุไว้ วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงขนาดคละและเพิ่มปริมาณ หมายถึง วัสดุจากที่อื่นที่นำมาผสมเพิ่มกับวัสดุชั้นทางเดิม เพื่อปรับปรุงขนาดคละและเพิ่มปริมาณตามที่กำหนดไว้ในรูปแบบและข้อกำหนด เช่น หิน ทราย Soil Aggregate วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ หมายถึง วัสดุจากที่อื่นที่นำมาผสมเพิ่มกับวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อปรับปรุงคุณภาพต้องเป็นชนิดที่กรมทางหลวงกำหนดต่อไปนี้ หากเป็นชนิดนอกเหนือจากที่กำหนดไว้ จะต้องได้รับความเห็นชอบจากสำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง ก่อนนำไปใช้งานเป็นแต่ละกรณี

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องเป็นปูนใหม่ บรรจุอยู่ในไซโลหรือเป็นแบบบรรจุถุงก็ได้ ผู้รับจ้างจะต้องจัดทำสถานที่เก็บให้เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้หินปูนซีเมนต์ชื้นหรือเสื่อมคุณภาพ ผู้รับจ้างต้องระบุตราปูนซีเมนต์ที่ใช้ ซึ่งควรเป็นตราเดียวกันตลอดงาน หากในระหว่างการก่อสร้างผู้รับจ้างต้องการเปลี่ยนไปใช้ปูนซีเมนต์ตราอื่นนอกเหนือจากที่แจ้งไว้เดิม ให้ผู้รับจ้างเสนอรายละเอียดการออกแบบส่วนผสมใหม่ต่อนายช่างผู้ควบคุมงานเพื่อพิจารณาในกรณีที่ปูนซีเมนต์ที่ใช้งานนั้นเก็บไว้นานเป็นระยะเวลาเกินกว่า 3 เดือน หรือในกรณีนายช่างผู้ควบคุมงานพิจารณาแล้วเห็นว่า วิธีการเก็บรักษาไว้ไม่เหมาะสมอาจทำให้หินปูนซีเมนต์เสื่อมคุณภาพได้ ให้นายช่างผู้ควบคุมงานระงับการใช้งานทั้งหมดหรือบางส่วนไว้

หากประสงค์จะนำมาใช้งาน ให้นำปูนซีเมนต์นั้นไปตรวจสอบคุณภาพใหม่หรือให้ออกแบบส่วนผสมใหม่ก็ได้ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการนี้เป็นความรับผิดชอบของผู้รับจ้าง

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

เถ้าลอยที่นำมาใช้จะต้องมีคุณสมบัติสม่ำเสมอ ขนาดของเม็ดเถ้าลอยต้องผ่านตะแกรงขนาด 0.600 มิลลิเมตร (เบอร์ 30) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 และต้องผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 แหล่งเถ้าลอยต้องมีปริมาณมากพอที่จะสามารถนำมาใช้ได้อย่างต่อเนื่อง โดยได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวง หากในระหว่างการก่อสร้างเถ้าลอยที่ใช้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ผู้รับจ้างจะต้องเสนอต่อนายช่างผู้ควบคุมงานพิจารณาว่าจะให้ใช้งานตามที่ออกแบบไว้เดิมหรือต้องออกแบบส่วนผสมใหม่ในกรณีที่ผู้รับจ้างต้องการเปลี่ยนแหล่งเถ้าลอย จะต้องทำการออกแบบส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายในการนี้เป็นความรับผิดชอบของผู้รับจ้าง

แอสฟัลต์ที่นำมาใช้งาน อาจเป็นแอสฟัลต์ชนิดใด ๆ ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเฉพาะงาน ผู้รับจ้างต้องระบุแหล่งผลิตแอสฟัลต์และชนิดแอสฟัลต์ที่ใช้ตลอดระยะเวลาการก่อสร้างไว้ด้วย หากผู้รับจ้างต้องการเปลี่ยนแปลงแหล่งหรือชนิดแอสฟัลต์ จะต้องทำการออกแบบส่วนผสมใหม่โดยได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงหรือหากในระหว่างการก่อสร้าง เกิดการเปลี่ยนแปลงของวัสดุชั้นทางเดิมหรือแอสฟัลต์ที่ใช้ หรือเหตุอื่นที่มีผลทำให้คุณภาพของส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไปนายช่างผู้ควบคุมงานอาจจะให้ออกแบบส่วนผสมใหม่ก็ได้ ค่าใช้จ่ายในการนี้เป็นความรับผิดชอบของผู้รับจ้าง

วัสดุผสมเพิ่มรวม (Blended Stabilizing Agents) วัสดุผสมเพิ่ม อาจนำมาใช้ร่วมกันได้โดยต้องเลือกใช้และทดสอบออกแบบส่วนผสมกับชนิดวัสดุชั้นทางเดิมที่ต้องปรับปรุงและให้มีคุณภาพตามแบบและข้อกำหนด ทั้งที่ต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงเป็นแต่ละกรณี

สารผสมเพิ่ม สารผสมเพิ่มชนิดใดๆที่นำมาใช้งาน ผู้รับจ้างจะต้องเสนอชนิดของสารผสมเพิ่ม โดยต้องทดสอบและออกแบบส่วนผสมกับวัสดุชั้นทางเดิมที่ต้องปรับปรุง และส่วนผสมต้องมีคุณภาพตามข้อกำหนดในรูปแบบที่ผู้ออกแบบได้ระบุไว้ พร้อมเสนอเอกสาร ข้อมูล และรายละเอียดอื่นๆให้ครบถ้วนต่อกรมทางหลวง เพื่อพิจารณาเห็นชอบทั้งในด้านวิศวกรรมและด้านสิ่งแวดล้อมเป็นแต่ละกรณีน้ำที่นำมาใช้งานต้องสะอาดปราศจากสารไม่พึงประสงค์ต่าง ๆ เช่น เกลือ น้ำตาล น้ำมัน กรด ด่าง และอินทรียวัตถุหรือสารเคมีที่อาจกระทบต่อคุณภาพวัสดุที่ผสม โดยต้องได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานก่อนนำมาใช้งาน

2.2.4 การออกแบบปรับปรุงชั้นทางเดิม

- การออกแบบทั่วไป หมายถึง ข้อแนะนำต่างๆที่ให้ไว้แก่ผู้ออกแบบเพื่อใช้ประกอบการพิจารณาออกแบบโดยมีหัวข้อแนะนำต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
- ในงานใดๆอาจออกแบบให้ปรับปรุงชั้นทางเดิม โดยวิธีการปรับปรุงในที่หรือปรับปรุงที่โรงงานหรือทั้งสองวิธีก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม
- การปรับปรุงชั้นทางเดิมเป็นชั้นทางใหม่ อาจนำวัสดุชั้นทางเดิมใด ๆ ที่เหมาะสมมารวมกันเพื่อปรับปรุงให้เป็นชั้นทางใหม่ก็ได้
- ชั้นผิวทางเดิมที่เป็นแอสฟัลต์คอนกรีต ที่มีค่าเพนเนเตรชั่นของแอสฟัลต์ 30 ขึ้นไป ควรพิจารณานำมาหมุนเวียนใช้ในงานผิวทางหรืองานซ่อมบำรุงผิวทางให้เหมาะสม ทั้งนี้ไม่ควรนำมารวมกับวัสดุชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง
- ชั้นผิวทางเดิมที่เป็นผิวทางแอสฟัลต์อื่นและที่ไม่ใช่ผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต อาจนำไปปรับปรุงรวมกับชั้นทางอื่นก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม
- สำหรับการปรับปรุงชั้นทางเดิมในที่ ถ้าชั้นผิวทางแอสฟัลต์เดิมมีความหนามากเกินกว่าขีดความสามารถของเครื่องจักรขุดผสมที่จะดำเนินการได้ผลดี ให้ขุดผิวทางส่วนที่มีความหนาเกินนั้นออก หากไม่สามารถขูดผิวทางออกบางส่วนได้ ให้ขุดรื้อผิวทางแอสฟัลต์นั้นออก แล้วทดแทนด้วยวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของชั้นทางที่จะปรับปรุงนั้น

การออกแบบส่วนผสมในรูปแบบจะต้องแสดงรูปตัดโครงสร้างชั้นทางเดิม รูปตัดโครงสร้างชั้นทางใหม่ รายละเอียดวิธีการปรับปรุงและการใช้วัสดุต่างๆพร้อมทั้งข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและส่วนผสม ถ้าผู้ออกแบบมิได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุและส่วนผสมเป็น

อย่างอื่น ให้คุณสมบัติของวัสดุและส่วนผสมเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงสำหรับชั้นทางนั้น ๆ ก่อนการออกแบบส่วนผสม ให้ผู้รับจ้างต้องสำรวจตรวจสอบหาข้อมูลชั้นทางที่จะปรับปรุงโดยละเอียด เพื่อประโยชน์ในการออกแบบส่วนผสมได้อย่างถูกต้องเหมาะสมกับสภาพความเป็นจริงในสนาม และก่อนเริ่มงานเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 30 วัน ให้ผู้รับจ้างเสนอผลการออกแบบส่วนผสมพร้อมด้วยตัวอย่างวัสดุที่ใช้ พร้อมข้อมูลต่างๆต่อกรมทางหลวงหรือข้อมูลเพิ่มเติมอื่นตามกรมทางหลวงต้องการ เพื่อประกอบการพิจารณาให้ความเห็นชอบการออกแบบส่วนผสมนั้น ผู้รับจ้างอาจร้องขอให้กรมทางหลวงเป็นผู้ออกแบบส่วนผสมให้ก็ได้ ค่าใช้จ่ายในการนี้ผู้รับจ้างต้องเป็นผู้รับผิดชอบทั้งสิ้น กรณีผลการทดลองส่วนผสมในสนามหรือในห้องปฏิบัติการหรือจากแปลงทดสอบสนามในสนามหรือจากแปลงก่อสร้างใด ๆ ในสนาม ในแต่ละกรณีหรือหลายกรณีที่ไม่เป็นไปตามแบบหรือข้อกำหนดหรือแบบส่วนผสมตามที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงนายช่างผู้ควบคุมงานต้องพิจารณาให้แก้ไขปรับปรุงให้ถูกต้องตามแบบหรือข้อกำหนดหรือให้ออกแบบส่วนผสมใหม่ก็ได้ ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของนายช่างผู้ควบคุมงาน ค่าใช้จ่ายในการสำรวจ ตรวจสอบ การออกแบบส่วนผสม การแก้ไขปรับปรุงแบบส่วนผสม ค่าธรรมเนียมการตรวจสอบ รวมถึงผลความเสียหายใด ๆ ผู้รับจ้างต้องเป็นผู้รับผิดชอบทั้งสิ้น

2.3 มาตรฐานวิธีการทดลอง

2.3.1 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

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

วิธีการทดลองที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ อาศัยวิธีการและปรับปรุงจากการทดลองของเครื่องมือทดลองประกอบด้วย

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

152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) สูง177.8 มิลลิเมตร (7 นิ้ว) และจะต้องมีปลอกขนาดเดียวกันสูง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานทึบหรือเจาะรูพรุน ในการทดลองต้องใช้เหล็กโลหะรอง (Spacer Disc) ตามข้อ 2.1.2 รองด้านล่าง เพื่อให้ได้ตัวอย่างสูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) หรืออาจใช้แบบขนาดสูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) โดยไม่ต้องใช้แท่งโลหะรองแต่ต้องมีฐานทึบ หรือแบบขนาดสูงอื่นใดซึ่งเมื่อใช้แท่งโลหะรองแล้วได้ความสูงของตัวอย่างในแบบเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว)

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

ค้อน (Hammer) ทำด้วยโลหะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์ 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีมวลรวมทั้งด้ามถือ 4.537 กิโลกรัม (10.0 ปอนด์) ต้องมีปลอกที่ทำไว้อย่างเหมาะสม เป็นตัวบังคับให้ระยะตกเท่ากับ 457.2 มิลลิเมตร (18 นิ้ว) เหนือระดับดินที่ต้องการบดทับ จะต้องมีรูระบายอากาศอย่างน้อย 4 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9.5 มิลลิเมตร เจาะห่างจากปลายของปลอกทั้ง 2 ข้าง ประมาณ 19.0 มิลลิเมตร

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

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

เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110±5 องศาเซลเซียส สำหรับอบดินตัวอย่าง

เหล็กปาด (Straight Edge) เป็นเหล็กคล้ายไม้บรรทัด หนา และแข็ง เพียงพอในการตัดแต่งตัวอย่างที่ส่วนบนของแบบ มีความยาวไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตร แต่ไม่ยาวเกินไปจนเกะกะและหนาประมาณ 3.0 มิลลิเมตร

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

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

กระป๋องอบดิน สำหรับใส่ตัวอย่างดินเพื่ออบหาปริมาณน้ำในดิน

การเตรียมตัวอย่างได้แก่ ดินหรือหินคลุก หรือ Soil-Aggregate หรือวัสดุอื่นใดที่ต้องการทดลองให้ดำเนินการ ถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุด (Maximum size) มีขนาดใหญ่กว่า 19.0

มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้เตรียมตัวอย่างโดย นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง และทำ Quartering หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง เมื่อแห้งพอเหมาะแล้ว (มีน้ำประมาณร้อยละ 2-3) นำมาร่อนผ่านตะแกรงเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ทำการชั่งหามวลของวัสดุแต่ละขนาดที่เตรียมไว้ ก็จะทราบมวลของตัวอย่างแต่ละขนาดมีอยู่ขนาดละเท่าใด ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้ทิ้งไป แทนที่ของตัวอย่าง ด้วยตัวอย่างที่มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ด้วยมวลที่เท่ากับตัวอย่าง เช่น มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร อยู่ 2,650 กรัม ก็ให้ใช้ตัวอย่างขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตรถึง ขนาด 4.75 มิลลิเมตร เพิ่มเข้าไปอีก 2,650 กรัม ที่เหลือจะเป็นขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร ตามที่มีจริง ดังนี้ ตัวอย่างทั้งหมดที่มวล 9,000 กรัม มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร 2,650 กรัม มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร 4,850 กรัม มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร 1,500 กรัม จากวิธีการเตรียมตัวอย่างที่กล่าวมาแล้ว จะได้มวลของตัวอย่างที่เตรียมไว้ คือ มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 2,650+4,850 เท่ากับ7,500 กรัม และมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร เท่ากับ 1,500 กรัม คลุกตัวอย่างที่ได้ให้เข้ากัน ถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนที่ใหญ่ที่สุด มีขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง (มีน้ำประมาณร้อยละ 2-3) และทำ Quartering หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่างแล้วคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน ถ้าต้องการทดลองตามวิธี ค. หรือ ง. ดังกล่าวในขอบข่าย ให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง แล้วใช้ค้อนยางทุบให้ก้อนหลุดจากกัน และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) แล้วคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน

การทดลอง Compaction Test จะใช้แบบ (Mold) ขนาดใดก็ได้แล้วแต่ความต้องการตามวิธีต่างๆดังกล่าวในขอบข่ายและดำเนินการทดลอง ดังนี้

- นำตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้แล้วมาคลุกเคล้าจนเข้ากันได้ดี
- เติมน้ำปริมาณหนึ่ง โดยปกติมักเริ่มต้นที่ประมาณร้อยละ 4 ต่ำกว่าปริมาณน้ำที่ให้ความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content)
- คลุกเคล้าตัวอย่างที่เติมน้ำแล้วหรือนำเข้าเครื่องผสมจนเข้ากันดี
- แบ่งตัวอย่างใส่ลงในแบบซึ่งมีปลอกสวมเรียบร้อย โดยประมาณให้ดินแต่ละชั้น เมื่อบดทับแล้วมีความสูงประมาณ 1 ใน 4 ของ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว)
- ทำการบดทับโดยค้อน ดังนี้ ตามวิธี ก. และ ค. จำนวน 25 ครั้งและ ตามวิธี ข. และ ง. จำนวน 56 ครั้ง

- ดำเนินการบดทับจนได้ตัวอย่างที่ทำการบดทับแล้วเป็นชั้นๆ จำนวน 5 ชั้น มีความสูงประมาณ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว) (สูงกว่าแบบประมาณ 10 มิลลิเมตร)
- ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดแต่งหน้าให้เรียบเท่าระดับของตอนบนของแบบ (เหลือความสูงเท่า 116.4 มิลลิเมตร) กรณีมีหลุมบนหน้า ให้เติมดินตัวอย่างแล้วใช้ค้อนยางทุบให้นำไปชั่งจะได้มวลของดินตัวอย่างและมวลของแบบ หักมวลของแบบออกก็จะได้มวลของดินตัวอย่างเปียก (A)
- ในขณะเดียวกับที่ทำการบดทับตัวอย่างในแบบ ให้นำดินใส่กระป๋องอบดิน เพื่อนำไปทดลองหาปริมาณน้ำในดินด้วย มวลของดินที่นำไปหาปริมาณน้ำในดินให้ใช้ดังนี้
- ขนาดก้อนใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 300 กรัม และ ขนาดก้อนใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตรใช้ประมาณ 100 กรัม
- คำนวณหาค่าความแน่นเปียก ρ t (Wet Density) และความแน่นแห้งρ d (Dry Density) เมื่อทราบปริมาณน้ำในดิน w (Moisture Content)
- ดำเนินการโดยเพิ่มน้ำขึ้นอีกครั้งละ 2% จนกว่าจะได้ความแน่นลดลงจึงหยุดการทดลอง หรืออาจลดน้ำที่ผสม ในกรณีที่เมื่อเพิ่มน้ำแล้วได้ความแน่นลดลงเพื่อให้เขียน Curve ได้
- เขียน Curve ระหว่างความแน่นแห้ง ρ d และปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ w ก็จะทราบค่าความแน่นแห้งสูงสุด Max. ρ d (Maximum Dry Density) และปริมาณน้ำในดินที่ให้ความแน่นสูงสุด OMC. (Optimum Moisture Content)

การคำนวณ

1. คำนวณหาปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

$$W = 100$$

เมื่อ w = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง

M1 =มวลของดินเปียก มีหน่วยเป็นกรัม

M2 = มวลของดินอบแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม

2. คำนวณหาค่าความแน่นเปียก (Wet Density)

$\rho_t =$

เมื่อ ρ_t = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A = มวลของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็นกรัม

V = ปริมาตรของแบบ หรือปริมาตรของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

3.คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

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

เมื่อ ρ_d = ความแน่นแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร

ρ_t = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร

w = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

ในการทำ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐานให้รายงาน ดังนี้

1. ค่าความแน่นแห้งสูงสุด มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร (แบบสูงกว่ามาตรฐาน)
2. ค่าปริมาณน้ำในดินที่ให้ความแน่นแห้งสูงสุด เป็นร้อยละ

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

2.3.2 วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน

ขอบข่ายUnconfined Compressive Strength คือ ค่าแรงอัด (Compressive Load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งแท่งตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกหรือรูป Prismatic จะรับได้ ถ้าในกรณีที่ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ยังไม่ถึงค่าสูงสุดเมื่อความเครียด (Strain) ในแนวดิ่งเกินร้อยละ 20 ให้ใช้ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ที่ความเครียดร้อยละ 20 นั้นเป็นค่า Unconfined Compressive Strength การทดลองนี้ได้ปรับปรุงจาก AASHTO T 208-70 อธิบายถึงการหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดินในสภาพ Undisturbed และ Remolded อัตราการเพิ่มแรงอัดในระหว่างการทดลอง จะควบคุมโดยความเครียด (Strain) หรือควบคุมโดยความเค้น (Stress) ก็ได้เครื่องมือทดลองประกอบด้วย

เครื่องกด เป็นเครื่องใช้กดแท่งตัวอย่าง มีหลายแบบ เช่น Deadweight หรือ Hydraulic เป็นแรงกด หรืออาจใช้เครื่องมือกดชนิดอื่นๆ ที่สามารถควบคุมอัตราเร็วของแรงกด และมีกำลังกดเพียงพอ สำหรับดินที่มีค่า Unconfined Compressive Strength น้อยกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) ต้องใช้เครื่องกดที่สามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.001 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) และสำหรับดินที่มีค่า Unconfined Compressive Strength มากกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) เครื่องกดจะต้องอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.05 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.005 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

เครื่องดันตัวอย่างดิน ใช้ดันแท่งตัวอย่างดินออกจากท่อบาง (Thin Wall Tube)

Dial Gauge ใช้วัดได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร หรือ 0.001 นิ้ว สามารถอ่านระยะทางเคลื่อนที่ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 ของความยาวแท่งตัวอย่าง ที่จะใช้ทดลอง

Vernier Caliper ใช้วัดขนาดของแท่งตัวอย่าง โดยวัดได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตรหรือ 0.01 นิ้ว

นาฬิกาจับเวลา

เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110±5 องศาเซลเซียส

เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม ใช้สำหรับตัวอย่างดินที่มีมวลน้อยกว่า 100 กรัม ให้ใช้เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

เครื่องมือเบ็ดเตล็ด เครื่องมืออื่นๆที่ต้องใช้ คือ เครื่องมือตัดและตกแต่งตัวอย่างเครื่องทำตัวอย่าง Remolded และกระป๋องอบดิน

- การเตรียมตัวอย่างขนาดแท่งตัวอย่าง แท่งตัวอย่างควรจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 33 มิลลิเมตร(1.3 นิ้ว) ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของเม็ดวัสดุในตัวอย่างต้องไม่เกิน 1 ใน 10 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่าง และสำหรับแท่งตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 71 มิลลิเมตร (2.8 นิ้ว) ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของเม็ดวัสดุต้องไม่เกิน 1 ใน 6 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่าง ถ้าหาหลังจากเสร็จการทดลองแล้วพบว่ามีเม็ดวัสดุที่ใหญ่กว่าที่กำหนดไว้ก็ให้หมายเหตุไว้ในแบบฟอร์มอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างจะมีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 3 วัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างให้ได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร หรือ 0.01 นิ้ว โดยใช้ Vernier Caliper หรือเครื่องมือชนิดอื่นที่เหมาะสม
- ตัวอย่าง Undisturbed เตรียมตัวอย่าง Undisturbed จากแท่งตัวอย่างUndisturbed ขนาดใหญ่หรือจากดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างโดยใช้ท่อบางแท่งตัวอย่างที่ได้จากท่อบาง

อาจจะทดลองได้เลยโดยไม่ต้องตกแต่ง แต่ต้องตัดปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างให้เรียบและมีสัดส่วนดังที่ได้ระบุมาแล้ว ในการเตรียมตัวอย่างจะต้องระมัดระวังอย่าให้มีการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดหน้าตัดเกิดขึ้นในระหว่างการดันตัวอย่างดินออกจากท่อบาง ถ้าหากเห็นว่าจะเกิดการอัดตัวอย่างดินหรือจะทำให้ตัวอย่างดินถูกรบกวนก็ให้ตัดแบ่งท่อบางตามความยาวออกเป็นส่วนๆการเตรียมตัวอย่างทดลองถ้าหากเป็นไปได้ก็ควรเตรียมในห้องที่ควบคุมความชื้น เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แท่งตัวอย่างทดลองจะต้องมีหน้าตัดตั้งฉากกับแกนตามยาวของแท่งตัวอย่าง ในการตัดและแต่งปลายทั้งสองข้างของแท่งตัวอย่าง ถ้าหากมีเม็ดวัสดุที่ทำให้ผิวหน้าไม่เรียบ ก็ให้ปิดผิวหน้าด้วยปูนปลาสเตอร์ โดยให้มีความหนาน้อยที่สุดหรือใช้ Hydrostone หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติคล้ายกัน ให้ชั่งหามวลของแท่งตัวอย่างก่อนและหลังการทดลองหาปริมาณน้ำในดินของแท่งตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่างทั้งแท่งหรือส่วนที่เป็นตัวแทนของแท่งตัวอย่าง

- ตัวอย่าง Remolded นำตัวอย่างดิน Undisturbed เดิม มาทำดังนี้ อย่างทั่วถึง ในการทำต้องระวังอย่าให้มีฟองอากาศเข้าไปปนในดิน หลังจากนั้นก็อัดดินลงใน Mold ที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม และมีขนาดตามที่ได้ระบุไว้ เมื่อได้อัดดินใน Mold จนเติมแล้วให้แต่งปลายแท่งตัวอย่างจนเรียบได้หน้าตัดตั้งฉากกับแกนตามยาวของแท่งตัวอย่าง แล้วดันแท่งตัวอย่างมี Void Ratio และปริมาณน้ำในดินใกล้เคียงกับตัวอย่าง Undisturbed เดิมการทดลองโดยวิธีควบคุมความเครียด (Strain)วางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นกลมอันล่างของเครื่องกด แล้วเลื่อนจนแผ่นกลมอันบนของเครื่องกดแตะกับผิวบนของแท่งตัวอย่าง หมุนหน้าปัดของ Dial Gauge ที่ใช้อ่านระยะทางของการกดให้เข็มชี้ที่ศูนย์ กดแท่งตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคิดเป็นความเครียดในแนวดิ่ง 0.5 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที จนแรงกดและระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างทุก ๆ 30 วินาที ในการใช้อัตราเร็วของความเครียดค่าใดจะต้องประมาณว่าระยะเวลาตั้งแต่เริ่มให้แรงกดจนถึงแรงกดสูงสุด จะต้องไม่เกิน 10 นาที (*1) เพิ่มแรงกดต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงกดลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่า 20 เปอร์เซ็นต์ หาปริมาณน้ำในดินโดยนำแท่งตัวอย่างเข้าเตาอบ นอกจากกรณีที่ต้องเตรียมแท่งตัวอย่าง Remolded ก็ให้ใช้ส่วนของดินที่เป็นตัวแทนของแท่งตัวอย่างได้เขียนรูปสภาพแท่งตัวอย่างที่ทดลองเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยแตกร้าววัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน การทดลองโดยวิธีควบคุมความเค้น (Stress) ก่อนการทดลองให้ประมาณค่าแรงกดสูงของแท่งตัวอย่าง (*2) วางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นกลมแผ่นล่างของเครื่องกด

เลื่อนจนแผ่นกลมอันบน แตะกับผิวบนของแท่งตัวอย่างแล้วตั้งศูนย์บนหน้าปัดที่ใช้อ่านระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่าง ใช้แรงกดเริ่มแรกบนแท่งตัวอย่างเท่ากับ 1/15 ถึง 1/10 ของแรงกดสูงสุดที่ได้ประมาณไว้แล้วทิ้งไว้ครึ่งนาที แล้วอ่านระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างเพิ่มแรงกดต่อไป เท่ากับแรงกดแรก แล้วทิ้งไว้ครึ่งนาทีเหมือนครั้งแรก ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้แรงกดสูงสุด หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่าเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ในระหว่างการเพิ่มแรงกด ถ้าสังเกต ว่าจะต้องใส่แรงกดมากกว่า 15 ครั้ง หรือน้อยกว่า 10 ครั้ง เพื่อให้ได้แรงกดสูงสุดแล้ว จะต้องรีบเปลี่ยนแรงกดแต่ละครั้งให้มากขึ้น หรือน้อยลงทันที ในการหาปริมาณน้ำในดินอาจหาจากดินทั้งแท่งที่ทดลองเสร็จแล้ว หรือส่วนของดินที่เป็นตัวแทนแท่งตัวอย่างก็ได้เขียนรูปสภาพแท่งตัวอย่างที่ทดลองเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยแตกร้าวให้วัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน ดินที่อ่อนมากจะมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดมาก ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองโดยใช้อัตราเร็วของความเครียดสูง ในทางตรงกันข้าม ดินที่แข็งหรือแตกง่ายซึ่งมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดน้อย ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองด้วยอัตราเร็วของความเครียดที่ต่ำกว่า การประมาณค่านี้จะต้องมีประสบการณ์พอเพียง มิฉะนั้นจะต้องใช้เครื่องกดอย่างเล็ก (Penetrometer) กดลงบนส่วนของตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้ดู เพื่อหาค่านี้โดยประมาณ

- คำนวณหาความเครียดในแนวดิ่ง สำหรับแรงกดใดๆ (ได้โดยใช้สูตร

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L0}$$

เมื่อ ΔL = ระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างที่แรงกดใดๆ โดยอ่านจาก Dial Gauge

L0 = ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง

- คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยสำหรับแรงกดใดๆ(A)ได้โดยใช้สูตร

$$A = \frac{A0}{1-\epsilon}$$

เมื่อ A0 = พื้นที่หน้าตัดเดิมของแท่งตัวอย่าง

= ความเครียดตามแนวดิ่งที่แรงกดนั้นๆ

- คำนวณหาความเค้นสำหรับแรงกดใดๆ(σ_c)ได้โดยใช้สูตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

เมื่อ P = แรงกด

A = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงกดนั้นๆ

- เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_c และ โดยใช้ σ_c เป็นแกนตั้งและ เป็นแกนนอน จากกราฟหาค่าสูงสุดของ σ_c หรือค่า σ_c ที่ เท่ากับร้อยละ 20 ได้ในกรณีที่ต้องการจะใช้กราฟอธิบายคุณสมบัติของดิน ก็ให้แนบแผ่นกราฟนี้รวมไว้ในรายงาน ผลการทดลองด้วยการรายงาน ให้รายงานผลการทดลองดังต่อไปนี้ ค่า Unconfined Compressive Strength ชนิดและรูปร่างของแท่งตัวอย่าง เช่น Undisturbed, Compacted, Remolded,Cylindrical, Prismatic
- อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่าง
- ลักษณะดินโดยทั่วไป เช่น ชื่อของดิน, สัญลักษณ์ เป็นต้น
- Initial Density ปริมาณน้ำในดินและ Degree of Saturation (ถ้าตัวอย่างถูกทำให้อิ่มตัวในห้องปฏิบัติการให้หมายเหตุ Degree of Saturation อีกค่าหนึ่งไว้ด้วย)
- ค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดเป็นร้อยละ (อ่านจากกราฟ)
- ค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของความเครียดเป็นร้อยละต่อนาที โดยคิดตั้งแต่เริ่มกดจนถึงแรงกดสูงสุด
- ให้เขียนหมายเหตุในกรณีที่เกิดมีลักษณะผิดปกติในการทดลอง หรือแบบรายละเอียดอื่นๆที่คิดว่ามีความจำเป็นต้องใช้อธิบายผลทดลอง

ข้อควรระวัง ในการดันตัวอย่างดินออกจากท่อเพื่อใช้ทดลอง จะต้องดันไปตามทิศทางเดียวกันกับที่ตัวอย่างเคลื่อนที่เข้าไปในกระบอกในระหว่างเก็บตัวอย่าง เพื่อลดการรบกวนตัวอย่างดิน และในการทำตัวอย่าง Remolded ถ้าแท่งตังอย่างหลังจากทำ Remolded แล้วได้ความแน่นแตกต่างจากก่อนทำ Remolded ให้นำมาดำเนินการใหม่

2.4 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์

Lambe et al. (1959) อธิบายว่าซีเมนต์เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ TricalciumSilicate (C,S), Dicalcium Silicate (C,S), Tricalcium Aluminate (C,A), Tetracalciu AluminateFerrite (C,AF)เมื่อผสมกับน้ำและดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้สารประกอบCalcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Hydrate

Lime ที่แยกตัวออกมาขณะเกิดปฏิกิริยา สารประกอบ CSHและ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานเมื่อน้ำระเหยออกไป นอกจากนั้น Released Hydrate Lime ที่เกิดขึ้นในขบวนการดังกล่าวยังทำให้ความเป็นด่างเพิ่มขึ้น ทำให้ Colloid gel หรือ Cement Gel ที่ประกอบไปด้วย CSH และ CAH เกิดการรวมตัว แล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ในดินเม็ดหยาบ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การยึดเกาะกันของเม็ดจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่ว่า Cement paste จะไม่อุดเต็มช่องว่างอนุภาคของเม็ดดิน แรงเชื่อมยึดติดจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางด้าน MechanicalInterlock ของอนุภาคเม็ดดินที่มี CSH และ CAH เกาะอยู่ที่ผิวอนุภาคของเม็ดดิน สำหรับดินเม็ดละเอียด แรงยึดเกาะกันจะประกอบไปด้วยแรงทางด้าน MechanicalInterlock และ Chemical cementation การยึดเกาะทางด้าน Chemical cementation นั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ตามผิวของเม็ดดินโดยมีน้ำเป็นตัวกลาง การเกิดปฏิกิริยาทำให้ได้สารประกอบ CSH, CAH เพิ่มขึ้น และทำให้เม็ดดินเกิดการเชื่อมกัน

Davidson (1961) กล่าวว่า หลังการผสมซีเมนต์กับดินเหนียวชิ้น จะทำให้ค่าพลาสติก (plasticity) ลดลง เหตุผลน่าจะมาจากการแยกตัวของ Calcium ion ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กลไกที่เกิดขึ้นถ้าไม่มาจาก cation exchange ก็น่าจะมาจากการจับกลุ่มเพิ่มขึ้นของ Cation ในดินเหนียว กระบวนการทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าที่มีอยู่อย่างหนาแน่นบริเวณอนุภาคดินเหนียว ส่งผลให้อนุภาคของดินเหนียวรวมตัวกันและตกตะกอนเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นนี้ทำให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติคล้ายดินตะกอนคือมีค่าพลาสติก (plasticity) ต่ำ

Herzog (1963) กล่าวถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันว่าเป็นการเกิดสารประกอบ CSH, CAH ซึ่งเป็นปฏิกิริยาในช่วงแรก ส่วนปฏิกิริยาช่วงที่สองซึ่งต้องใช้เวลานาน เป็นปฏิกิริยาระหว่าง Calcium ion ที่เกิดจาก Released hydrated lime ของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica และ Ahumina ที่มีอยู่ในเม็ดดิน มีผลทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่นานขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวรู้จักกันว่าปฏิกิริยาพอสโซลานิค

Moh (1965) ได้ศึกษาเรื่องปฏิกิริยาของแร่ประกอบดินเหนียว กับซีเมนต์และสารเคมีผสมเพิ่มจำพวกโซเดียม และได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีดังต่อไปนี้

$$\text{Cement} + H_2O \rightarrow CSH + CAH + Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+}2(OH) \quad (2.2)$$

$$Ca^{2+}2(OH) \rightarrow CSH \quad (2.3)$$

$Ca^{2+}2(OH) +$ Al2O3(Soil Alumina $\rightarrow$ CAH (2.4)

Pendola et al.(1969) สรุปว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นั้น เป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีระหว่างซีเมนต์ น้ำและดินซึ่งประกอบด้วยกลไก 4 ชนิดคือ

Hydration of cement คือกระบวนการที่สำคัญ โดยขณะที่ซิเมนต์รวมตัวกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และก่อรูปร่างเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องมากบ้างน้อยบ้างตามการคละขนาดของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายที่กล่าวมาข้างต้นนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ถูกปรับปรุงแล้วยังแทรกตัวอยู่ระหว่างของเม็ดดินทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดิน รวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบๆ อีกด้วย

Cation exchange การลดลงของค่าพลาสติกของดินหลังจากการผสมซีเมนต์กับดินประเภทมีความเชื่อมแน่นที่มีความชื้น เชื่อว่าเกิดจากการเปลี่ยน Cat ion หรือการรวมตัวกันของ Cat ion บนผิดของเม็ดดิน ปฏิกิริยาที่ว่าจะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังการผสมซีเมนต์

Carbonation คือขบวนการเชื่อมแน่นจากปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับ Lime ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด Calcium carbonate ส่งผลให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มมากขึ้น

Pozzolanic reaction คือกระบวนการระหว่าง Free lime ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica หรือ Alumina ที่มีอยู่ในดิน ทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยานี้จะต้องอาศัยระยะเวลานานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุสูงขึ้น

Terrel et al. (1979) กล่าวถึงปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ว่า การผสมซีเมนต์กับดินเม็ดหยาบซีเมนต์เพส จะทำหน้าที่ยึดอนุภาคเม็ดดินเข้าด้วยกัน โดยทำการยึดเกาะที่ผิวระหว่างซีเมนต์เจลและผิวอนุภาค ส่วนดินเม็ดละเอียด แร่ดินเหนียวที่สลายออกมาในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า pH สูงจะทำปฏิกิริยากับ Free lime หรือ Hydrate lime ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิด CSH และ CAH

2.5 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์

2.5.1 ปริมาณซีเมนต์และประเภทของซีเมนต์

Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์โดยนำดินสามชนิดคือ Loamy sand,Medium clay และ Silty clay loam มาทดลองผสมซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 6 ถึง 30 โดยปริมาตรที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 1 ปี และผ่านสภาพภูมิอากาศ 2 แบบคือ Wet-dry และFreeze-thaw ตั้งแต่ 12 รอบ

ถึง 96 รอบ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินที่มีขนาดเม็ดเล็ก ดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่สูงจะมีกำลังอัดน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำ และมีความคงทนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้

นอกจากนั้น Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดินสองชนิดคือ Silty clayloam และ Sandy loam มาผสมกับซีเมนต์ประเภทที่1และประเภทที่ 3 พบว่าดินที่ผสมด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังที่สูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่ซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะไม่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินทุกชนิด เช่น ดิน Sandy loam ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังอัดเป็นสองเท่าของดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่ม 7 วันและเป็น 1.4 เท่า ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่สำหรับดิน Silty clay loam เมื่อผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพียงเล็กน้อยเท่านั้นคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินซีเมนต์ ถูกศึกษาอย่างจริงจังโดย Terashi et al. (1979) และต่อมาก็มีการศึกษาด้านนี้มากขึ้นเรื่อยๆ เช่น

Kawasaki et al. (1981), Nontananandh and Yupakorn (2002) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้สรุปว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์คือ ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์

Ruenkrairergsa (1982) อธิบายว่าปริมาณซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ อัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน พันธะเชื่อมประสานในดินเม็ดหยาบจะแข็งแรงกว่าในดินเม็ดละเอียด ดินที่มีดินเหนียวมากจะให้กำลังอัดต่ำ ดังนั้นปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจึงควรหาจากการทดลองในห้องทดลอง

Ade and Overton (1989) ได้ศึกษาผลของพันธะเชื่อมประสาน (cementation) ในดินเม็ดหยาบ ภายใต้ความหนาแน่นที่เท่ากัน ปริมาณน้ำที่ผสมเท่ากันและแรงดันรอบข้างต่ำ แต่แตกต่างกันที่ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม พบว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังและค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (internal friction angle) จะเพิ่มขึ้น

Clare and Pollard (1951) ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดิน 3 ชนิดในประเทศอังกฤษมาผสมกับซีเมนต์ พบว่าที่อายุบ่ม 24 ชั่วโมงดินซีเมนต์จะมีกำลังอัดสูงมากเมื่อผสมดินกับซีเมนต์ประเภท High-alumina ขณะที่ซีเมนต์ประเภทอื่นต้องมีอายุการบ่ม 5 วันและถ้าใช้ซีเมนต์ประเภท British rapid hardening ซึ่งเทียบได้กับซีเมนต์ประเภทที่สาม พบว่าที่อายุการบ่มเท่ากัน ค่ากำลังคราก (yield strength) ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งมาก

Massachusetts Institute of Technology (1954) ได้นำดินตะกอนปนทรายและดินเหนียว (clayey sandy silt) ในรัฐไอโอวา มาผสมกับซีเมนต์และพบว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่สามจะ

มีแรงอัดสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง 1.5 เท่า และ 1.3 เท่า ที่ระยะบ่ม 7 วันและ 28 วัน ตามลำดับ

Davidson and Bruns (1960) ได้รายงานผลเกี่ยวกับกำลังอัด โดยวิธีทดสอบ Freezethaw ของดินทราย ดินตะกอน และดินเหนียว บริเวณรัฐไอโอวา ประเทศสหรัฐอเมริกา และสรุปว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่สาม ในการก่อสร้างถนนจะประหยัดกว่าใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง เพราะว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งต้องใช้เวลาในการบ่มอย่างน้อย 7 วัน แต่ว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่สามจะใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่าทำให้ได้เปรียบเรื่องระยะเวลาในการก่อสร้าง

Horpibulsuk (2001), Miura et al. (2001) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์สามารถรวบรวมผสมไว้ในตัวแปรตัวเดียวได้ ตัวแปรนี้เรียกว่า Clay-water/cement Ratio

2.6 การบ่มดินซีเมนต์

Highway Research Board (1949) ได้รายงานเกี่ยวกับการรักษาความชื้นของดินผสมซีเมนต์ในสนามโดยการฉาบผิวทางใน 4 รัฐด้วย Bituminous seal 4 ชนิดคือ MC-2, RC-1, MC-3 และ Asphalt emulsion ว่าวัสดุฉาบผิวทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการเก็บรักษาความชื้นระหว่างการบ่ม 7 วัน ในสนามได้เป็นอย่างดี

Clare and Pollard (1951) สรุปถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังของดินซิเมนต์ว่าอุณหภูมิบรรยากาศ 25 องศาเซสเซียส และอุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซสเซียส กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วันจะสูงขึ้นร้อยละ 2 - 2.5 ต่ออุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซสเซียส การก่อสร้างที่ใช้ดินซีเมนต์ในพื้นที่ที่มีอากาศอบอุ่นจะให้กำลังอัดที่อายุ 3 เดือนแรกหลังการก่อสร้างสูงกว่าการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีอากาศหนาวกว่าร้อยละ 50 -100

Maner (1952) ได้ทดลองใช้วัสดุต่างๆ ได้แก่ Waterproof paper, Calcium chloride,RC-2 Asphalt, Tar และ Asphalt emulsion ในการบ่มพื้นทางดินซีเมนต์พบว่าวัสดุ BituminousAsphalt ทั้ง 3 ชนิด และ Waterproof paper ใช้งานได้ผลดี นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นในอากาศมีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณความชื้นในดินซีเมนต์

Leadabrand (1956) นำดิน 2 ชนิด คือ Clayey sandy soil และ Silty soil มาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ เพื่อหากำลังอัดที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 5 ปี พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะคล้ายกับกำลังอัดของคอนกรีตกล่าวคือกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุของดินซีเมนต์ และยังได้ทำการเจาะตัดดินซีเมนต์ในสนามจาก

โครงการก่อสร้างของรัฐต่าง ๆ 4 รัฐ ในประเทศสหรัฐอเมริกาโดยมีช่วงอายุตั้งแต่ 1 ปีถึง 20 ปีมาทดสอบหากำลังอัดพบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามจะสอดคล้องกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

Ng (1966) พบว่ากำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์จะแปรผันกับอุณหภูมิที่ใช้บ่มกล่าวอุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 70 °F เป็น 100 °F กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 20

Wang and Huston (1972) รายงานว่าการลดอุณหภูมิในการบ่มจะทำกำลังอัดลดลงแต่จะเพิ่มความเครียดที่จุดวิบัติ ไม่ว่าจะทดสอบแรงดึง หรือแรงอัด

Shacsel and Lee (1974) ทำการศึกษาเรื่องการบ่มดินซีเมนต์โดยใช้ตัวอย่าง ArtificialSoil ซึ่งได้จากการนำ Uniform sand จากเมือง Botany รัฐ New Southh Wales ประเทศออสเตรเลีย มาผสมกับ Comercial Air-floated China Clay (kaolin) ในอัตราส่วน 60 - 40 โดยน้ำหนัก และผสมซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0, 3 และ 8 ทำการบ่ม 2 ลักษณะ คือบ่มในอากาศที่อุณหภูมิคงที่ 20องศาเซสเซียสและบ่มในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิคงที่ 20องศาเซสเซียส โดยมีระยะบ่ม 0, 1, 3, 9, 23, 44 และ 81 วัน จากนั้นทดสอบหาค่าการหดตัว หรือค่าการขยายตัว ค่ากำลังอัด ค่ากำลังดึง และวัดการกระจายตัวของโพรง (poreSize distribution) ของดินซีเมนต์จากการจำลองแท่งตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือที่มี MercuryIntrusion porosimeter พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มจะทำให้กำลังอัด และกำลังดึงเพิ่มขึ้น การบ่มในอากาศจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าการบ่มแบบชื้น และยังเพิ่มขนาดโพรง (pore size) และปริมาตร (pore volume) เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นด้วย ส่วนการบ่มแบบชื้น เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น จำทำให้ขนาดโพรงลดลง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.7 กำลังของดินซีเมนต์

Wang and Huston (1972) ทำการทดสอบหากำลังดึง และกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งกับดินตะกอนที่ได้จาก Glacial deposit ใน Rhode island พบว่าการเสียรูปที่จุดวิบัติจากการทดสอบทั้งแบบรับแรงอัดและรับแรงดึง จะมีค่าคงที่เสมอ ถ้าหากค่าความหนาแน่นแห้ง ปริมาณความชื้น และสภาพการบ่มเหมือนกัน ค่ากำลังและค่าการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบแบบรังแรงดึงจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบรังแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดึง จะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 10 - 20 ของค่ากำลังรับแรงอัด ส่วนค่าการเสียรูปที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงดึง จะมีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 1.0 - 2.5 ของค่าการเสียรูปที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงอัดสำหรับทุกอายุการบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่ศึกษา และยังพบอีกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงอัดกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงดึง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังอัด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทำโครงงาน

3.1 บทนำ

การบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์ โดยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมในที่กลับมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) เป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายในกรมทางหลวงในปัจจุบัน การศึกษากำลังรับแรงอัดเป็นส่วนหนึ่ง และมีความสำคัญอย่างยิ่งในการบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์โดยวิธีนี้ เพราะมีผลกับการรับน้ำหนักของถนน อีกทั้งที่ผ่านมากำลังรับแรงอัดจะใช้อายุในการบ่มที่ 7 วัน ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะทำให้ต้องใช้เวลาในการบ่มนาน อาจจะทำให้มีผลกระทบ ในการปฏิบัติงานในสนามในการตัดสินใจที่จะดำเนินการบูรณะผิวทางในชั้นต่อไป การทำโครงงานครั้งนี้จึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัด กับอายุในการบ่มที่ 3 วันเพื่อนำค่าที่ได้ไปพยากรณ์หาค่ากำลังรับแรงอัดที่มีอายุบ่ม 7 วันตามมาตรฐานกำหนด

วิธีการดำเนินโครงงานจะทำการศึกษาถนนที่มีโครงสร้างชั้นพื้นทางเป็นหินคลุกและมีผิวทางแอสฟัลต์หนาไม่เกิน 10 เซนติเมตร เป็นถนนที่มีการบูรณะเป็นจำนวนมากในขณะนี้จำนวนสายทางที่ใช้ในการศึกษาโครงงานครั้งนี้มีจำนวน 4 สายทางโดยทำการเก็บตัวอย่างจากสายทางด้วยเครื่องจักรชุดขุดตัดในสนาม ให้ได้ความลึก 20 เซนติเมตร แล้วนำตัวอย่างนั้นมาออกแบบหาส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ได้กำลังรับแรงอัดที่ 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่อายุบ่ม 7 วันก่อนทำก้อนตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังแรงอัดตามระยะบ่มที่ 24, 72, 120, 168 และ 216 ชั่วโมง ในห้องปฏิบัติการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 แผนงาน

ดำเนินการโครงงานนี้โดยเก็บตัวอย่างจากสายทางด้วยเครื่องจักรขุดตัดให้ได้ความลึก 20 เซนติเมตร เป็นจำนวน 4 สายทางดังนี้

สายทางที่ 1 ทางหลวงหมายเลข 2 ตอนอ.ปากช่อง – อ. สีคิ้ว ระหว่าง กม. 182+000 – กม. 187+000 (ด้านขาล่อง)

สายทางที่ 2 ทางหลวงหมายเลข 205 ตอนบ.หนองบัวโคก - อ.โนนไทย ระหว่าง กม. 365+538 – กม. 368+960

สายทางที่ 3 ทางหลวงหมายเลข 2090 ตอน แยกทางหลวงหมายเลข 2 – ต่อเขตอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ระหว่าง กม. 2+000 – กม. 10+000

สายทางที่ 4 ทางหลวงหมายเลข 2247 ตอน ลำนารายณ์ – ปากช่อง ระหว่าง กม. 22+150 – กม. 22+800

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ทำการตากตัวอย่างที่เก็บมาจากสายทางให้แห้ง ก่อนจะแบ่งตัวอย่างด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่างให้ได้ปริมาณตามต้องการ แล้วชั่งตัวอย่างเตรียมไว้เพื่อทำการทดลองต่อไป

3.2.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างที่เก็บจากสายทางแต่ละสายจะต้องทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้น ได้แก่

- การทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้างตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.ท.204/2516 (เทียบเท่ากับมาตรฐาน ASTM T 27-70)
- การทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้างตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.ท.205/2517 (เทียบเท่ากับมาตรฐาน ASTM T 27-70)
- การทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.ท.108/2517 จากการทดลองจะได้ค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Max Dry Density) และค่าปริมาณน้ำที่ทำให้ความแน่นแห้งสูงสุด (Optimum Moisture Content)ในแต่ละสายทางทั้ง 4 สายทาง
- ออกแบบหาอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยนำวัสดุทางเดิมผสมปูนซีเมนต์ ตั้งแต่ 1, 2, 3, 4 เปอร์เซ็นต์และทำก้อนตัวอย่างเปอร์เซ็นต์ละ 5 ก้อนบ่มในถุงพลาสติกเป็นเวลา 7 วันก่อนทดสอบหากำลังรับแรงอัดให้นำก้อนตัวอย่างแช่น้ำ 2 ชั่วโมง เมื่อได้ค่ากำลังรับแรงอัดกับเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมแล้วเอาไปเขียนกราฟ โดยใช้เปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ที่มีกำลังรับแรงอัดที่ 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการทดลองจะได้อัตราส่วนผสมของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ของแต่ละสายทาง
- การทดลองหาค่า Unconfined Compaction Strength ของดิน ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.ท.105/2515 ทำการทดลองหลังจากได้อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แล้ว โดยที่ทั้ง 4 สายทางจะต้องทำก้อนตัวอย่างตามช่วงอายุการบ่มช่วงละ 7 ตัวอย่างแล้วนำมาหาเป็นค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย ของแต่ละช่วงอายุการบ่ม24, 72, 120, 168 และ 216 ชั่วโมงและนำค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยไปเขียนกราฟกับอายุของการบ่มจากการทดสอบทำให้สามารถศึกษาความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดกับอายุบ่มของวัสดุที่ใช้ในการบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์

รูปที่ 3.1 การตากตัวอย่าง

รูปที่ 3.2 การแบ่งตัวอย่าง

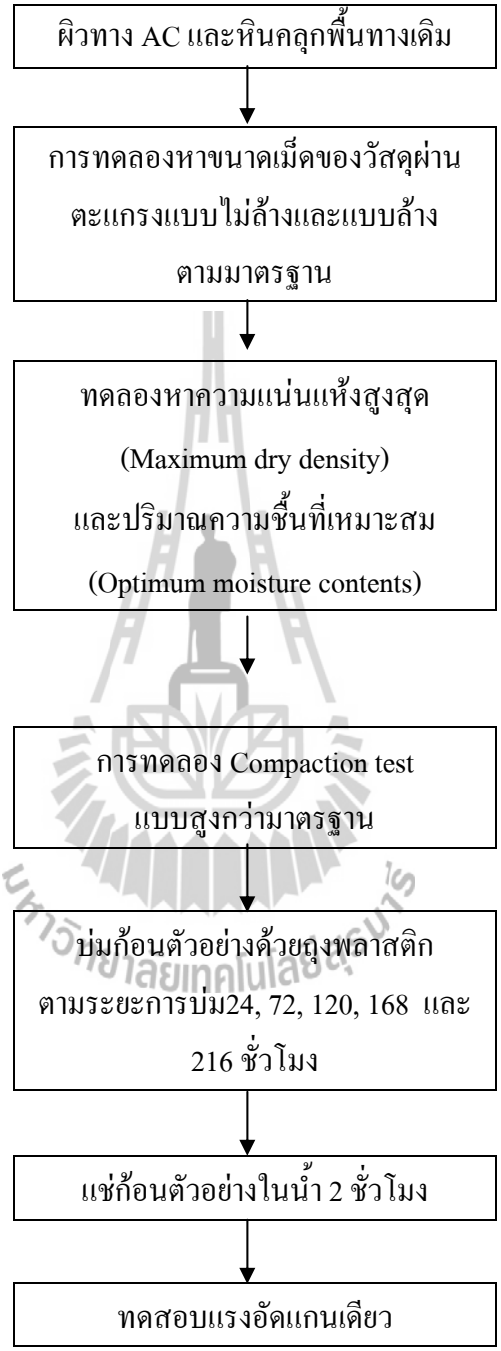
รูปที่ 3.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดลอง

รูปที่ 3.4 การบ่มก้อนตัวอย่าง

รูปที่ 3.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3 ขั้นตอนการทดลองในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.6แผนการดำเนินโครงงานในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 4
การศึกษาผลทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ตั้งแต่การเก็บตัวอย่างจากสายทางทั้ง 4 สาย การหาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุพื้นทางและผิวทางเดิม การออกแบบหาอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จนถึงการหาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับอายุในการบ่มของก้อนตัวอย่างและสร้างทฤษฎีกำลังอัด สมการทำนายกำลังรับแรงอัดในห้องปฏิบัติการและในสนาม พร้อมทั้งนำเสนอขั้นตอนการปรับปรุงเพื่อนำไปสู่การพัฒนาการบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์โดยวิธี Pavement In – Place Recycling

4.2 วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

วัสดุที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นหินคลุกพื้นทางและผิวทางแอสฟัลต์เดิมทั้ง 4 สายทาง ส่วนผสมเพิ่มที่นำมาใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 ใช้ตราอินทรีย์เพชรผู้วิจัยขอเสนอผลทดลองในห้องปฏิบัติการ ตามตารางและกราฟที่แสดงผล ตามมาตรฐานวิธีการทดลองของกรมทางหลวง ของแต่ละสายทางและสรุปผลทดลองไว้ตอนท้ายผลการทดลองทุก ๆ สายทางโดยเริ่มจากทางหลวงหมายเลข 2, 205, 2090 และ 2247 ตามลำดับ ได้ทดลองหาคุณสมบัติเบื้องต้น การทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้างตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.ท.204/2516 การทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้างตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.ท. 205/2517 การทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐานตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.ท. 108/2517 การออกแบบหาอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ และการทดลองหาค่า Unconfined Compaction Strength ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ 105/2515

ทางหลวงหมายเลข2 ตอน อ.ปากช่อง – อ.สีคิ้ว

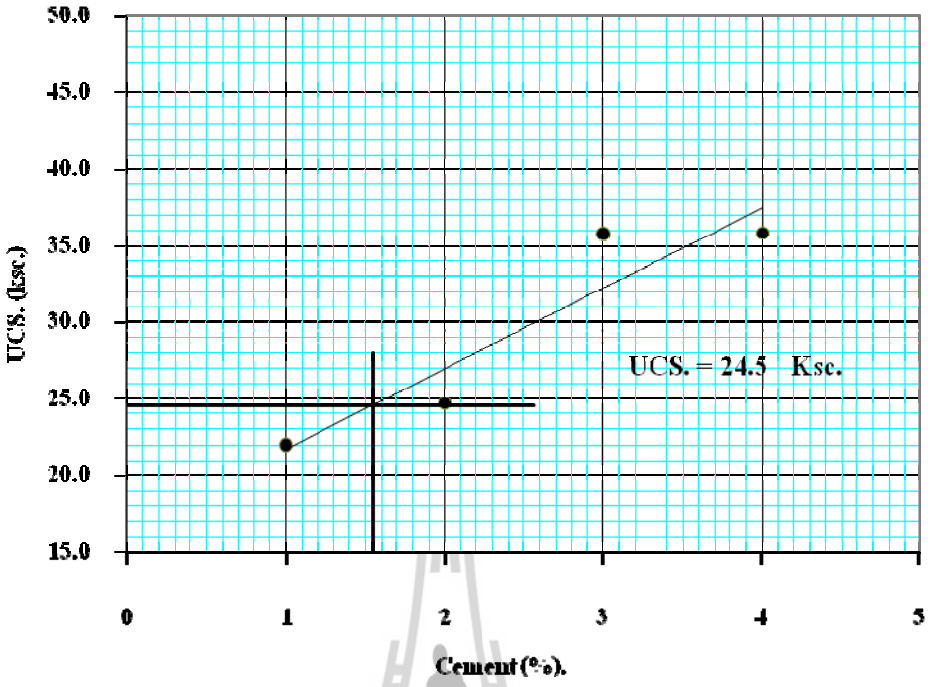
Location: Sta. 182+000 – Sta. 187+000 (ด้านขาล่อง)

ตารางที่ 4.1 JOB MIX DESIGN FOR PAVEMENT IN – PLACE RECYCLING HW 2

ITEM การทดลอง		RESULT OF SAMPLE
		Sta.
GRADATION OF EXTERACTED SAN	2”	100
	1”	91.4
	3/4”	85.5
	3/8”	73.1
	#4	48.6
	#10	35.4
	#40	17.0
	#200 (ไม่เกิน 25%)	9.3
PROCTO	Optimum Moisture Content (%)	5.1
	Maximum Dry Density (gm./ml)	2.240
UCS	Min % Portland Cement ที่ UCS 24.5 ksc.	1.55
	ค่า Unconfined Compressive Strength ตามข้อกำหนดไม่น้อยกว่า 24.5 ksc.	

ตารางที่ 4.2 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2

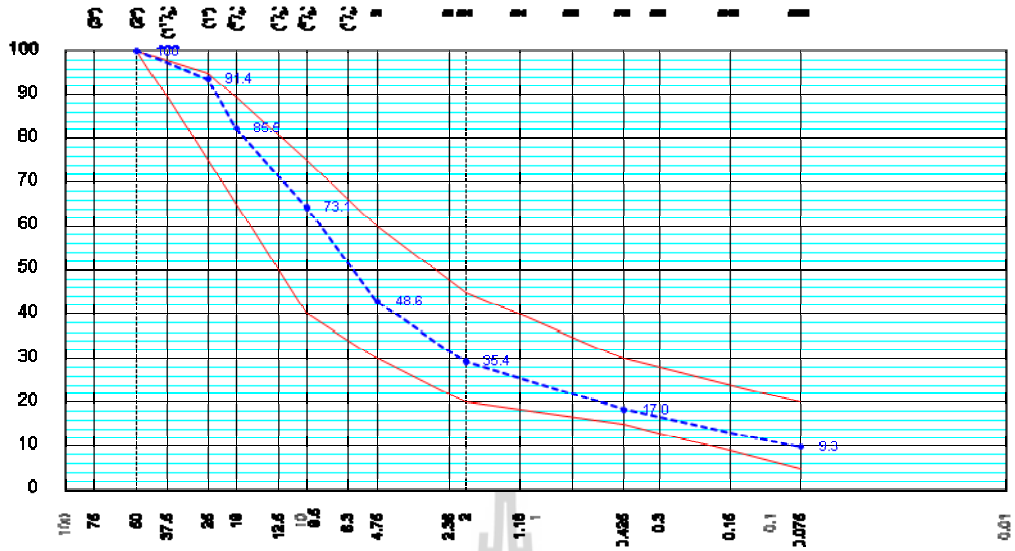
ค่า AVG. Unconfined Compressive Strength (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์)				
1.0	2.0	3.0	4.0	(%)
22.0	24.7	35.8	35.9	(Ksc.)



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 4.3 SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES HW 2

Sieve No.	Mass retained	Mass passing	% passing	Total % passing	
2”	-	7974		100	
1”	686	7288		91.4	75 - 95
3”/4	470	6818		85.5	
3”/8	989	5829		73.1	40 - 75
# 4	1954	3875		48.6	30 - 60
Sieve No.	Mass retained	Mass passing	% passing	Total % passing	
# 4	-	918.3	100.0	48.6	30 - 60
# 10	249.4	668.9	72.8	35.4	20 - 45
# 40	347.7	321.2	35.0	17.0	15 - 30
# 200	145.5	175.7	19.1	9.3	2 - 20
Pan		-	-	-	



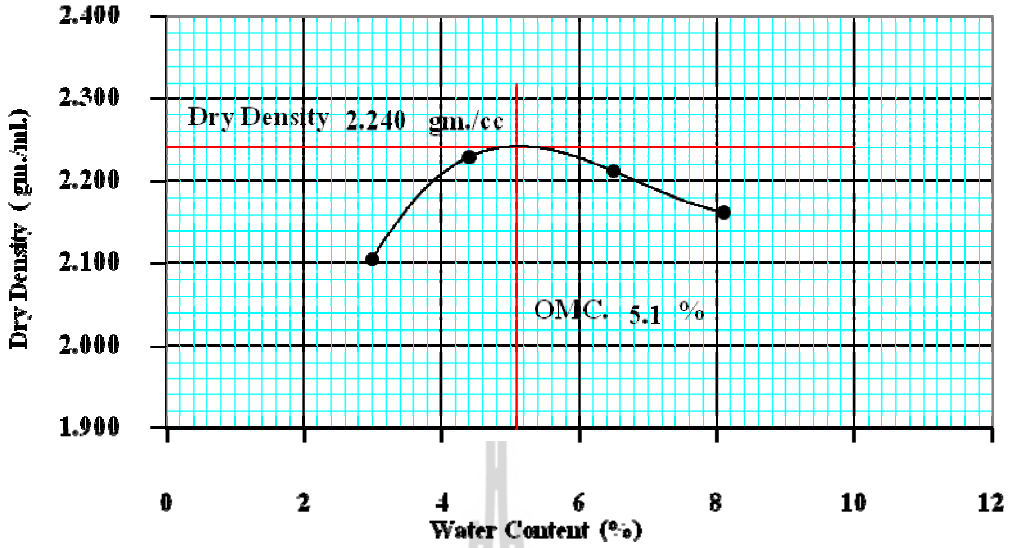
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของวัสดุพื้นทางเดิม

ตารางที่ 4.4 COMPACTION TEST HW 2

DENSITY

Trial (Water added)	%	2	4	6	8
Mass Mold + Soil	(Kg.)	5.613	5.765	5.793	5.776
Mass Mold	(Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550
Mass Soil	(Kg.)	2.063	2.215	2.243	2.226
Wet Density	(gm./ml.)	2.167	2.327	2.356	2.338
Dry Density	(gm./ml.)	2.104	2.229	2.212	2.163
WATER CONTENT					
Can No.	(gm.)	43	35	33	46
Mass Can+Wet Soil	(gm.)	385.1	358.3	303.2	400.2
Mass Can+Dry Soil	(gm.)	375.0	345.1	287.1	373.2
Mass Water	(gm.)	10.1	13.2	16.1	27.0
Mass Can	(gm.)	38.8	44.1	39.0	39.8
Mass Dry Soil	(gm.)	336.2	301.0	248.1	333.4
Water content	(%)	3.0	4.4	6.5	8.1

100 % Mod.. Comp=**2.24**0 gm./ml.95 % Mod.. Comp. = 2. 128 gm./ml. O.M.C =5.1%



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำกับความหนาแน่นของวัสดุพื้นทางเดิม

ตารางที่ 4.5 SUMMARY JOB MIX DESIGN PERCENT CEMENT HW 2

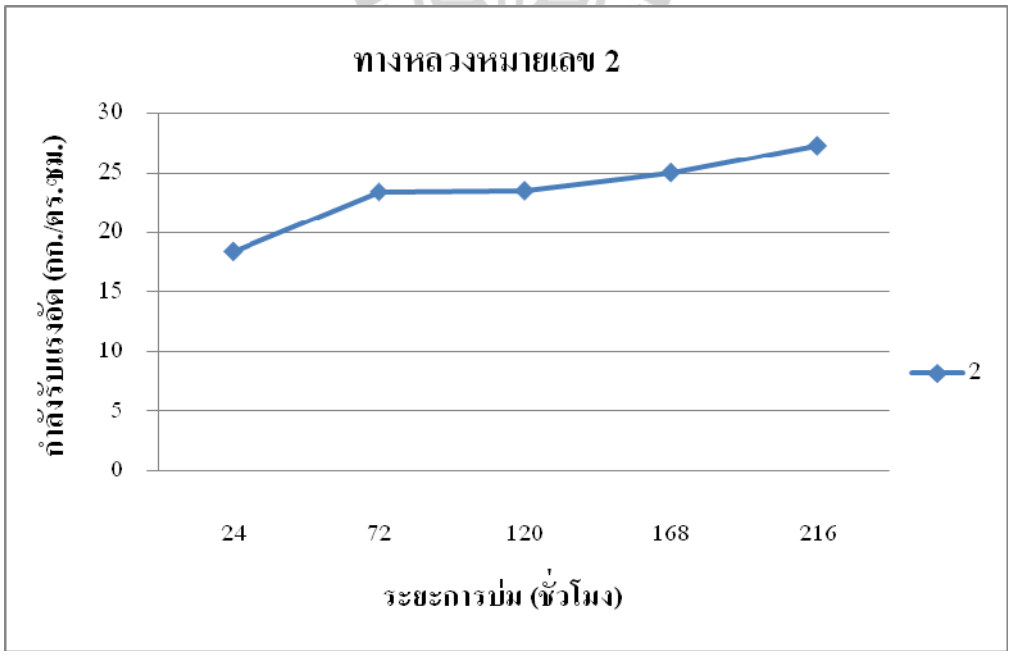
Age. hr.	Laboratory test		Percent Cement	Average UCS. Kg./cm.^{2}
	Opt. Moisture (%)	Dry Density (gm./ml.)		
168	5.2	2.221	1.0	22.0
168	5.6	2.225	2.0	24.5
168	7.3	2.187	3.0	24.7
168	6.6	2.194	4.0	35.8

ตารางที่ 4.5 เป็นสรุปผลทดลองในการออกแบบหาอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เริ่มจากร้อยละ 1 ถึง 4 ใช้อายุการบ่ม 168 ชั่วโมง ซึ่งรายละเอียดผลทดลองกำลังรับแรงอัด อยู่ในภาคผนวก ตารางที่ 4.25 – ตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.6 SUMMARY UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2

Age. hr.	Laboratory test		Percent Cement	Average UCS. Kg./cm.^{2}
	Opt. Moisture (%)	Dry Density (gm./ml.)		
24	5.2	2.206	1.55	18.4
72	5.0	2.211	1.55	23.4
120	5.7	2.184	1.55	23.5
168	5.0	2.200	1.55	25.0
216	4.3	2.222	1.55	27.3

ตารางที่ 4.6เป็นสรุปผลทดสอบกำลังรับแรงอัดในแต่ละช่วงอายุการบ่มโดยการใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามที่ได้ออกแบบไว้ที่เริ่มจากอายุการบ่มที่ 24, 72, 120,168และ 216 ชั่วโมงซึ่งรายละเอียดผลทดลองอยู่ในภาคผนวก ตารางที่ 4.29 – ตารางที่ 4.33



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดกับระยะการบ่ม

4.3 ผลการทดลองคุณสมบัติของวัสดุ ทางหลวงหมายเลข 2

ผลทดลองทางหลวงหมายเลข 2 ตอน อ.ปากช่อง– อ.สีคิ้ว ระหว่าง กม.182+000 – กม. 187+000(ด้านขาล่อง)ผลการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุตามมาตรฐานวิธีการทดลองผลอยู่ในเกรด B ตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุก ผลการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน มีค่าปริมาณน้ำในดินที่ทำให้เกิดความแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับร้อยละ 5.1 , ค่าความแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.240 กรัมต่อมิลลิเมตร ผลการออกแบบหาอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 1.55 ที่กำลังรับแรงอัด 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียวตามระยะการบ่มที่ 24, 72, 120, 168, และ216 ชั่วโมงได้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 18.4, 23.4, 23.5, 25.0 และ 27.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ทางหลวงหมายเลข205 ตอน บ.หนองบัวโคก – อ.โนนไทย

Location: Sta. 365+538 – Sta. 368+960

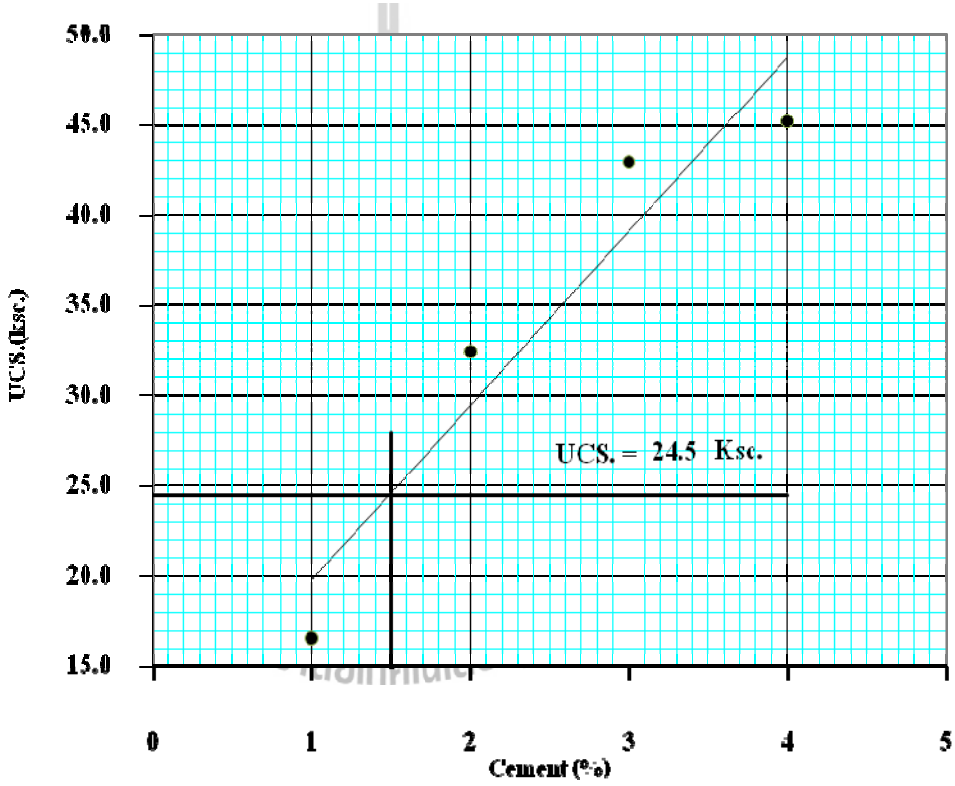
ตารางที่ 4.7 JOB MIX DESIGN FOR PAVEMENT IN – PLACE RECYCLING HW 205

ITEM การทดลอง		RESULT OF SAMPLE
		Sta.
GRADATION OF EXTERACTED SAN	2”	100
	1”	90.0
	3/4”	88.3
	3/8”	69.4
	#4	43.5
	#10	25.5
	#40	12.1
	#200 (ไม่เกิน 25%)	6.7
PROCTO	Optimum Moisture Content (%)	8.1
	Maximum Dry Density (gm./ml)	2.145
UCS	Min % Portland Cement ที่ UCS 24.5 ksc.	1.50
	ค่า Unconfined Compressive Strength ตามข้อกำหนดไม่น้อยกว่า 24.5 ksc.	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.8 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 205

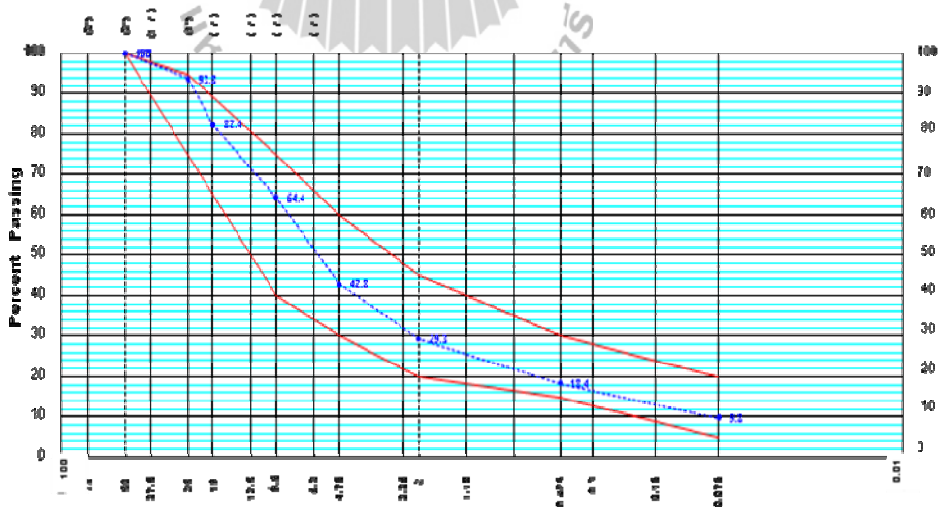
ค่า AVG. Unconfined Compressive Strength (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์)				
1.0	2.0	3.0	4.0	(%)
16.6	32.4	42.9	45.2	(Ksc.)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 4.9 SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES HW 205

Sieve No.	Mass retained	Mass passing	% passing	Total % passing	
2”	-	8770		100	
1”	877	7893		90.0	75 - 95
3”/4	149	7744		88.3	
3”/8	1658	6086		69.4	40 - 75
# 4	2271	3815		43.5	30 - 60
Sieve No.	Mass retained	Mass passing	% passing	Total % passing	
# 4	-	930.3	100.0	43.5	30 - 60
# 10	385.0	545.3	58.6	25.5	20 - 45
# 40	286.6	258.8	27.8	12.1	15 - 30
# 200	115.5	143.3	15.4	6.7	2 - 20
Pan		-	-	-	



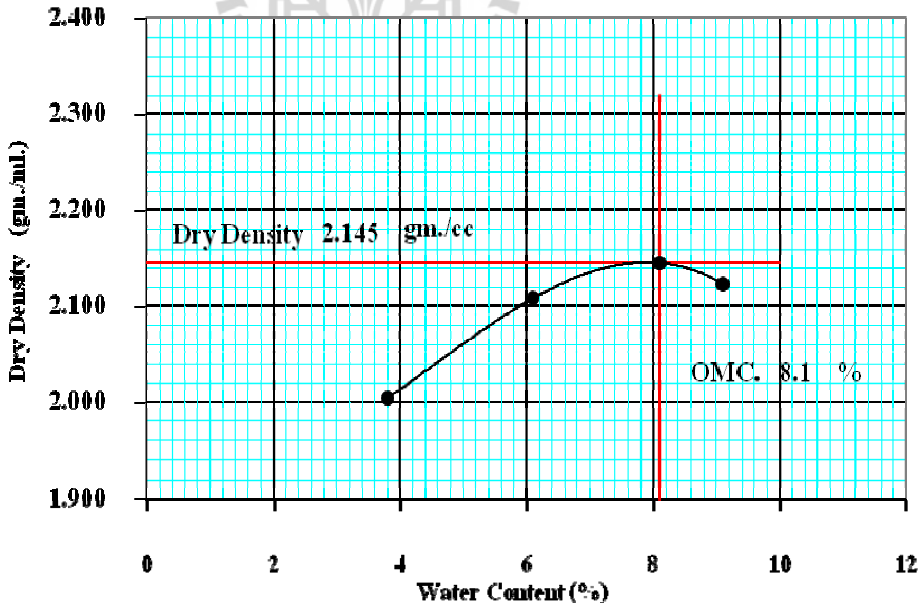
รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของวัสดุพื้นทางเดิม

ตารางที่ 4.10 COMPACTION TEST HW 205

DENSITY

Trial (Water added)	%	2	4	6	8
Mass Mold + Soil	(Kg.)	5.530	5.679	5.758	5.765
Mass Mold	(Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550
Mass Soil	(Kg.)	1.980	2.129	2.208	2.215
Wet Density	(gm./ml.)	2.080	2.237	2.319	2.327
Dry Density	(gm./ml.)	2.004	2.108	2.145	2.133
WATER CONTENT					
Can No.	(gm.)	33	38	49	27
Mass Can+Wet Soil	(gm.)	304.5	280.3	296.9	315.6
Mass Can+Dry Soil	(gm.)	294.8	266.5	277.0	292.8
Mass Water	(gm.)	9.7	13.8	19.9	22.8
Mass Can	(gm.)	38.9	40.7	31.1	42.1
Mass Dry Soil	(gm.)	255.9	225.8	245.9	250.7
Water content	(%)	3.8	6.1	8.1	9.1

100 % Mod.. Comp=**2.145** gm./ml.95 % Mod.. Comp= 2.038 gm./ml. O.M.C.=**8.1**%



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำกับความหนาแน่นของวัสดุพื้นทางเดิม

ตารางที่ 4.11 SUMMARY JOB MIX DESIGN PERCENT CEMENT HW 205

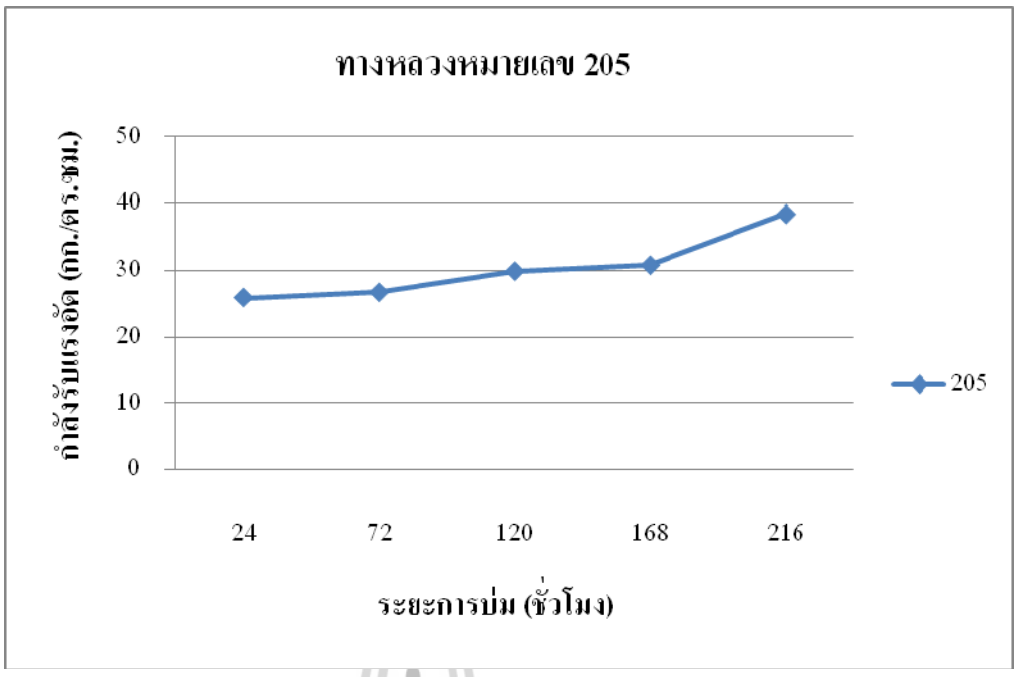
Age. hr.	Laboratory test		Percent Cement	Average UCS. Kg./cm.^{2}
	Opt. Moisture (%)	Dry Density (gm./ml.)		
168	5.2	2.221	1.0	22.0
168	5.6	2.225	2.0	24.5
168	7.3	2.187	3.0	24.7
168	6.6	2.194	4.0	35.8

ตารางที่ 4.11 เป็นสรุปผลทดลองในการออกแบบหาอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เริ่มจากร้อยละ 1 ถึง 4 ใช้อายุการบ่ม 168 ชั่วโมง ซึ่งรายละเอียดผลทดลองกำลังรับแรงอัด อยู่ในภาคผนวก ตารางที่ 4.34 – ตารางที่ 4.37

ตารางที่ 4.12 SUMMARY UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 205

Age. hr.	Laboratory test		Percent Cement	Average UCS. Kg./cm.^{2}
	Opt. Moisture (%)	Dry Density (gm./ml.)		
24	5.2	2.206	1.55	18.4
72	5.0	2.211	1.55	23.4
120	5.7	2.184	1.55	23.5
168	5.0	2.200	1.55	25.0
216	4.3	2.222	1.55	27.3

ตารางที่ 4.12 เป็นสรุปผลทดสอบกำลังรับแรงอัดในแต่ละช่วงอายุการบ่มโดยการใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามที่ได้ออกแบบไว้ที่เริ่มจากอายุการบ่มที่ 24, 72, 120,168และ 216ชั่วโมงซึ่งรายละเอียดผลทดลองอยู่ในภาคผนวก ตารางที่ 4.38 – ตารางที่ 4.42



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดกับระยะการบ่ม

4.4 ผลการทดลองคุณสมบัติของวัสดุ ทางหลวงหมายเลข 205

ผลทดลองทางหลวงหมายเลข 205ตอน บ.หนองบัวโคก– อ.โนนไทย ระหว่าง กม. 365+538 – กม.368+960ผลการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุตามมาตรฐานวิธีการทดลองผลอยู่ในเกรด B ตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุก ผลการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน มีค่าปริมาณน้ำในดินที่ทำให้เกิดความแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับร้อยละ 8.1 , ค่าความแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.145 กรัมต่อมิลลิเมตร ผลการออกแบบหาอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 1.94 เปอร์เซ็นต์ที่กำลังรับแรงอัดที่ 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียวตามระยะการบ่มที่ 24, 72, 120, 168 และ216 ชั่วโมงได้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 25.9, 29,9, 30.8, 33.6 และ38.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ทางหลวงหมายเลข2090 ตอน แยกทางหลวงหมายเลข 2 – ต่อเขตอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

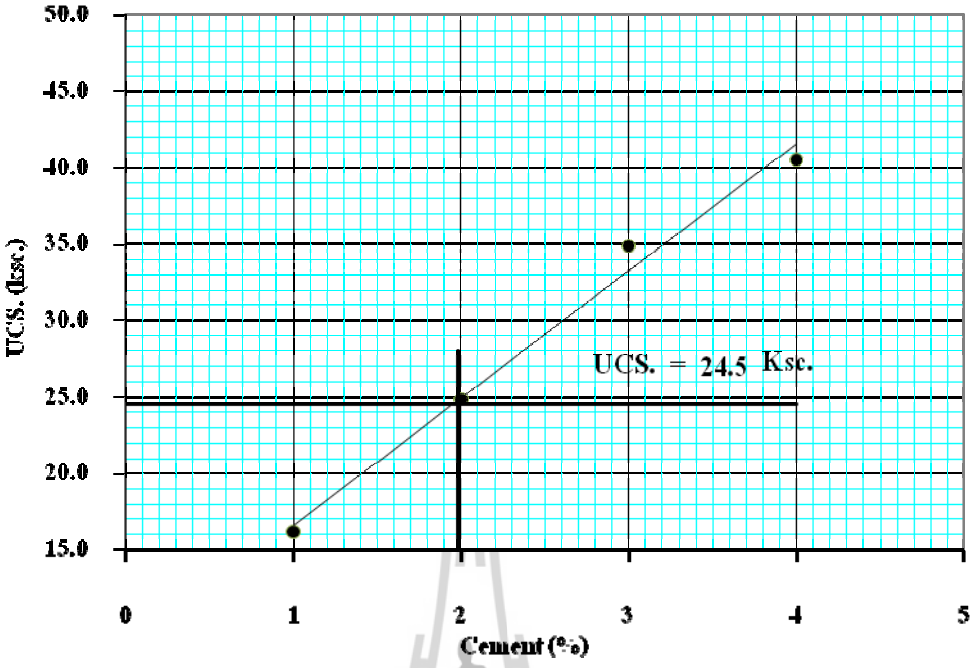
Location: Sta. 2+000 – Sta. 10+000

ตารางที่ 4.13 JOB MIX DESIGN FOR PAVEMENT IN – PLACE RECYCLING

ITEM การทดลอง		RESULT OF SAMPLE
		Sta.
GRADATION OF EXTERACTED SAN	2”	100
	1”	94.0
	3/4”	87.5
	3/8”	64.5
	#4	40.4
	#10	23.9
	#40	10.0
	#200 (ไม่เกิน 25%)	5.0
PROCTO	Optimum Moisture Content (%)	6.7
	Maximum Dry Density (gm./ml)	2.189
UCS	Min % Portland Cement ที่ UCS 24.5 ksc.	1.98
	ค่า Unconfined Compressive Strength ตามข้อกำหนดไม่น้อยกว่า 24.5 ksc.	

ตารางที่ 4.14 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW. 2090

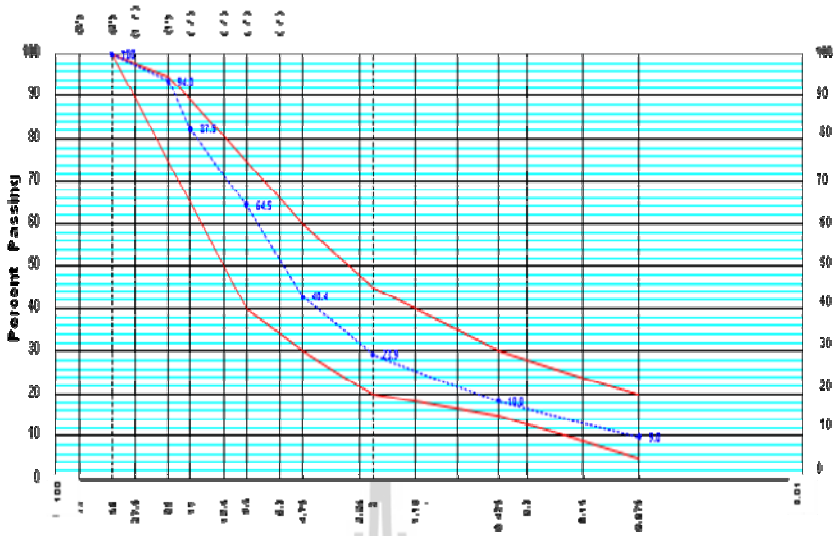
ค่า AVG. Unconfined Compressive Strength (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์)				
1.0	2.0	3.0	4.0	(%)
16.2	24.8	34.9	40.6	(Ksc.)



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 4.15 SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES HW 2090

Sieve No.	Mass retained	Mass passing	% passing	Total % passing	
2”	-	8770		100	
1”	877	7893		90.0	75 - 95
3”/4	149	7744		88.3	
3”/8	1658	6086		69.4	40 - 75
# 4	2271	3815		43.5	30 - 60
Sieve No.	Mass retained	Mass passing	% passing	Total % passing	
# 4	-	930.3	100.0	43.5	30 - 60
# 10	385.0	545.3	58.6	25.5	20 - 45
# 40	286.6	258.8	27.8	12.1	15 - 30
# 200	115.5	143.3	15.4	6.7	2 - 20
Pan		-	-	-	



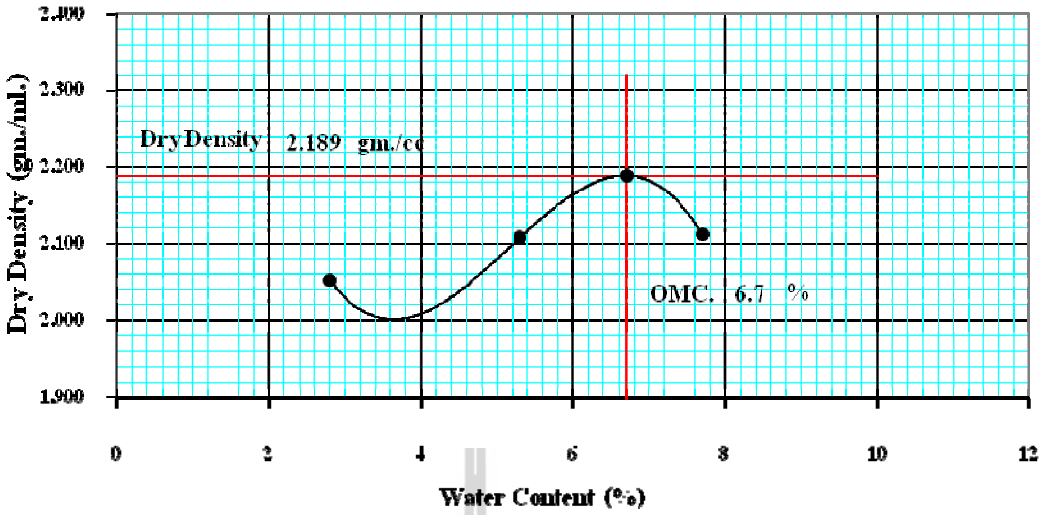
รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของวัสดุพื้นทางเดิม

ตารางที่ 4.16 COMPACTION TEST HW 2090

DENSITY

Trial (Water added)	%	2	4	6	8
Mass Mold + Soil	(Kg.)	5.558	5.663	5.774	5.716
Mass Mold	(Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550
Mass Soil	(Kg.)	2.008	2.113	2.224	2.166
Wet Density	(gm./ml.)	2.109	2.220	2.336	2.275
Dry Density	(gm./ml.)	2.052	2.108	2.189	2.112
WATER CONTENT					
Can No.	(gm.)	23	63	55	33
Mass Can+Wet Soil	(gm.)	305.5	287.9	311.4	370.7
Mass Can+Dry Soil	(gm.)	298.3	275.0	293.8	347.0
Mass Water	(gm.)	7.2	12.9	17.6	23.7
Mass Can	(gm.)	42.4	31.1	31.6	39.0
Mass Dry Soil	(gm.)	255.9	243.9	262.2	308.0
Water content	(%)	2.8	5.3	6.7	7.7

100 % Mod.. Comp=**2.**189 gm./ml.95 % Mod.. Comp= 2.080 gm./ml. O.M.C.=6.7%



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำกับความหนาแน่นของวัสดุพื้นทางเดิม

ตารางที่ 4.17 SUMMARY JOB MIX DESIGN PERCENT CEMENT HW 2090

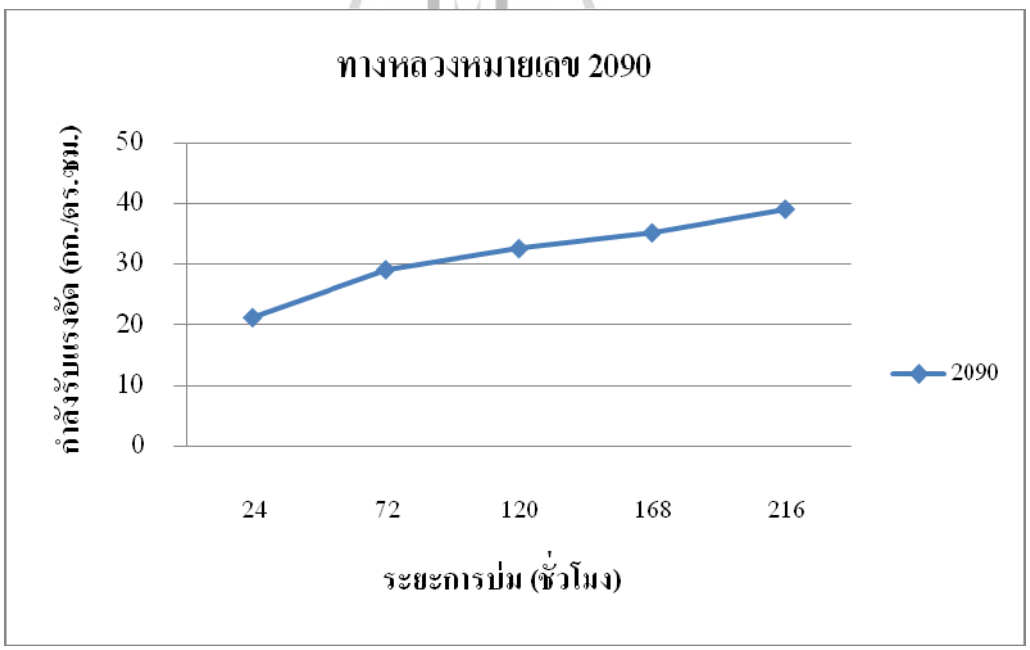
Age. hr.	Laboratory test		Percent Cement	Average UCS. Kg./cm.^{2}
	Opt. Moisture (%)	Dry Density (gm./ml.)		
168	5.2	2.221	1.0	22.0
168	5.6	2.225	2.0	24.5
168	7.3	2.187	3.0	24.7
168	6.6	2.194	4.0	35.8

ตารางที่ 4.17 เป็นสรุปผลทดลองในการออกแบบหาอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เริ่มจากร้อยละ 1 ถึง 4 ใช้อายุการบ่ม 168 ชั่วโมง ซึ่งรายละเอียดผลทดลองกำลังรับแรงอัด อยู่ในภาคผนวก ตารางที่ 4.43 – ตารางที่ 4.46

ตารางที่ 4.18 SUMMARY UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2090

Age. hr.	Laboratory test		Percent Cement	Average UCS. Kg./cm.^{2}
	Opt. Moisture (%)	Dry Density (gm./ml.)		
24	5.2	2.206	1.55	18.4
72	5.0	2.211	1.55	23.4
120	5.7	2.184	1.55	23.5
168	5.0	2.200	1.55	25.0
216	4.3	2.222	1.55	27.3

ตารางที่ 4.18 เป็นสรุปผลทดสอบกำลังรับแรงอัดในแต่ละช่วงอายุการบ่มโดยการใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามที่ได้ออกแบบไว้ที่เริ่มจากอายุการบ่มที่ 24, 72, 120,168และ 216ชั่วโมง ซึ่งรายละเอียดผลทดลองอยู่ในภาคผนวก ตารางที่ 4.47 – ตารางที่ 4.51



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดกับระยะการบ่ม

4.5 ผลการทดลองคุณสมบัติของวัสดุ ทางหลวงหมายเลข 2090

ผลทดลองทางหลวงหมายเลข 2090ตอน แยกทางหลวงหมายเลข 2– ต่อเขตอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ระหว่าง กม.2+000 – กม.10+000ผลการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุตามมาตรฐานวิธีการทดลองผลอยู่ในเกรด B ตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุก ผลการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน มีค่าปริมาณน้ำในดินที่ทำให้เกิดความแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับร้อยละ 6.7 ค่าความแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 2.189 กรัมต่อมิลลิเมตร ผลการออกแบบหาอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 1.98 ที่กำลังรับแรงอัดที่ 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียวตามระยะการบ่มที่ 24, 72, 120, 168 และ 216 ชั่วโมง ได้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 21.3, 29.2, 32.7, 35.3 และ 39.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ทางหลวงหมายเลข2247 ตอน ลำนารายณ์ – ปากช่อง

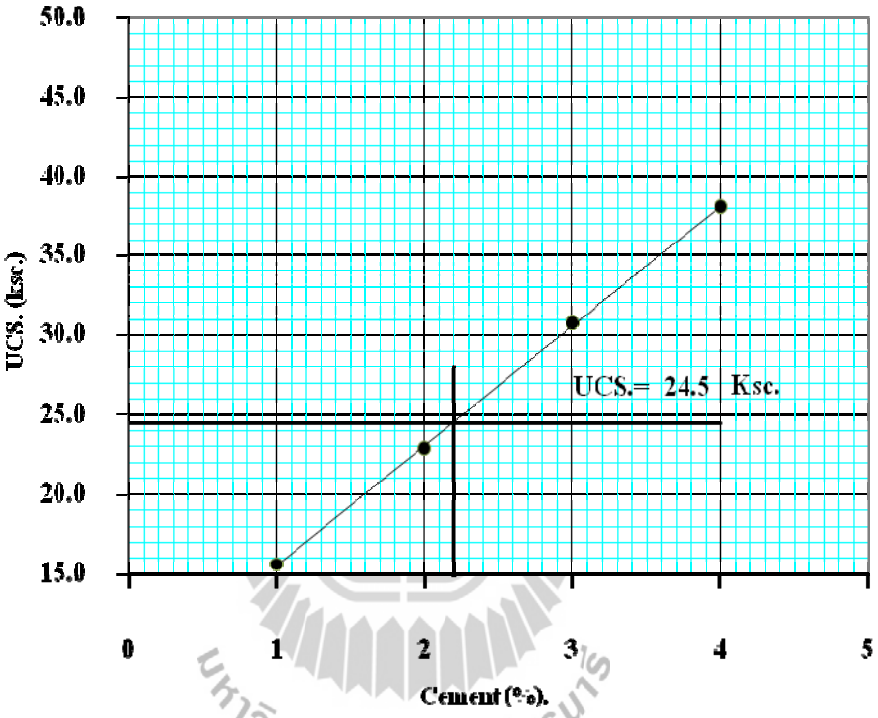
Location: Sta. 22+150 – Sta. 22+800

ตารางที่ 4.19 JOB MIX DESIGN FOR PAVEMENT IN – PLACE RECYCLING HW 2247

ITEM การทดลอง		RESULT OF SAMPLE
		Sta.
GRADATION OF EXTERACTED SAN	2”	100
	1”	93.0
	3/4”	84.4
	3/8”	71.4
	#4	52.7
	#10	35.4
	#40	16.3
	#200 (ไม่เกิน 25%)	9.3
PROCTO	Optimum Moisture Content (%)	6.4
	Maximum Dry Density (gm./ml)	2.290
UCS	Min % Portland Cement ที่ UCS 24.5 ksc.	2.20
	ค่า Unconfined Compressive Strength ตามข้อกำหนดไม่น้อยกว่า 24.5 ksc.	

ตารางที่ 4.20 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2247

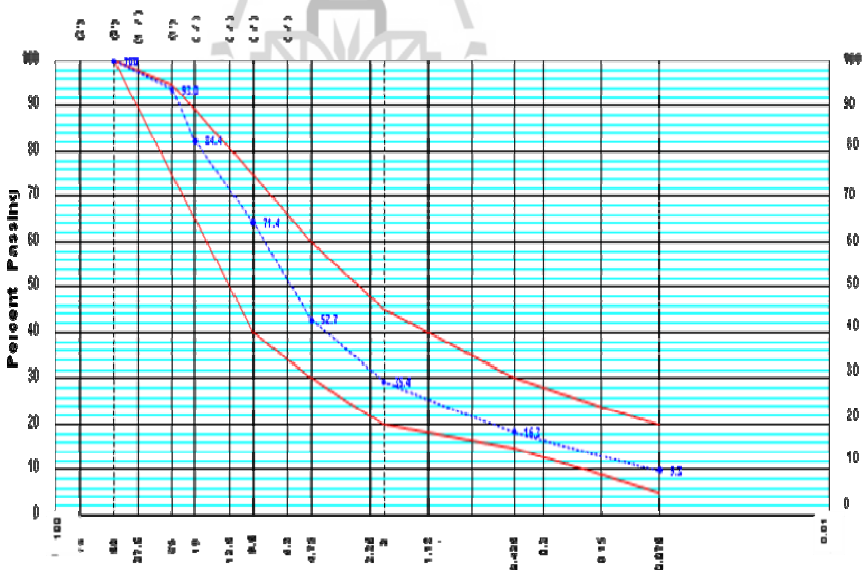
ค่า AVG. Unconfined Compressive Strength (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์)				
1.0	2.0	3.0	4.0	(%)
15.6	22.9	30.8	38.1	(Ksc.)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 4.21 SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES

Sieve No.	Mass retained	Mass passing	% passing	Total % passing	
2”	-	8770		100	
1”	614	8156		93.0	75 - 95
3”/4	754	7402		84.4	
3”/8	1140	6262		71.4	40 - 75
# 4	1640	4622		52.7	30 - 60
Sieve No.	Mass retained	Mass passing	% passing	Total % passing	
# 4	-	930.3	100.0	52.7	30 - 60
# 10	305.4	624.9	67.2	25.5	20 - 45
# 40	337.2	287.7	30.9	16.3	15 - 30
# 200	123.6	164.2	17.6	9.3	2 - 20
Pan		-	-	-	



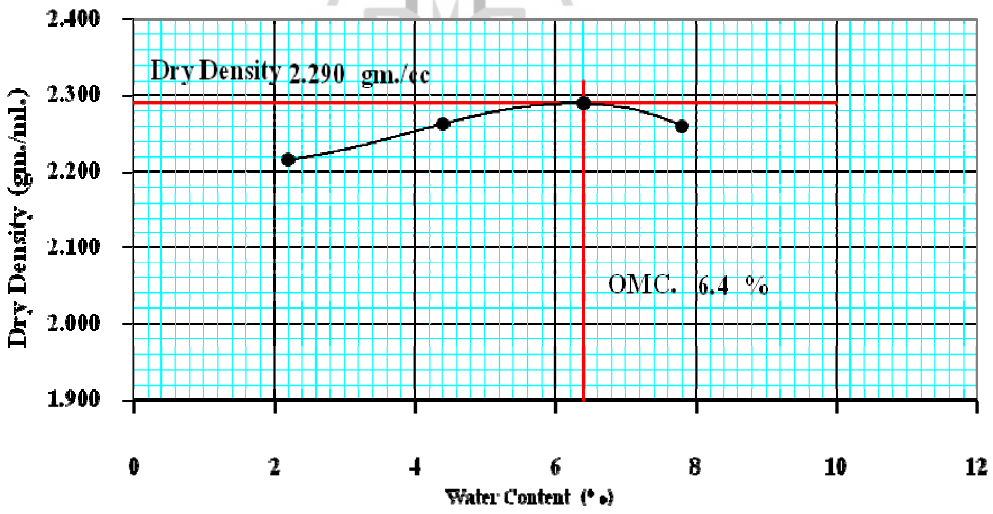
รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของวัสดุพื้นทางเดิม

ตารางที่ 4.22 COMPACTION TEST

DENSITY

Trial (Water added)	%	2	4	6	8
Mass Mold + Soil	(Kg.)	5.706	5.799	5.870	5.869
Mass Mold	(Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550
Mass Soil	(Kg.)	2.156	2.249	2.320	2.319
Wet Density	(gm./ml.)	2.265	2.363	2.437	2.436
Dry Density	(gm./ml.)	2.216	2.263	2.290	2.260
WATER CONTENT					
Can No.	(gm.)	95	41	68	93
Mass Can+Wet Soil	(gm.)	366.2	328.9	353.1	420.4
Mass Can+Dry Soil	(gm.)	359.2	316.8	334.4	393.0
Mass Water	(gm.)	7.0	12.1	18.7	27.4
Mass Can	(gm.)	42.5	40.8	42.2	42.2
Mass Dry Soil	(gm.)	316.7	276.0	292.2	350.8
Water content	(%)	2.2	4.4	6.4	7.8

100 % Mod.. Comp=**2.**290 gm./ml.95 % Mod.. Comp= 2.176 gm./ml. O.M.C =6.4 %



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำกับความหนาแน่นของวัสดุพื้นทางเดิม

ตารางที่ 4.23 SUMMARY JOB MIX DESIGN PERCENT CEMENT HW.2247

Age. hr.	Laboratory test		Percent Cement	Average UCS. Kg./cm.^{2}
	Opt. Moisture (%)	Dry Density (gm./ml.)		
168	5.2	2.221	1.0	22.0
168	5.6	2.225	2.0	24.5
168	7.3	2.187	3.0	24.7
168	6.6	2.194	4.0	35.8

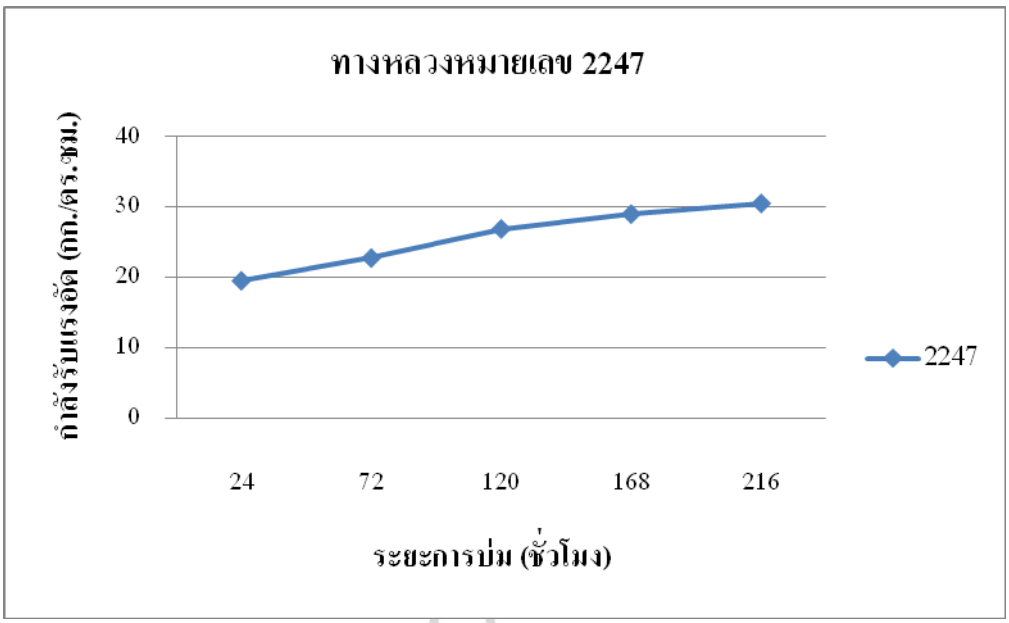
ตารางที่ 4.23 เป็นสรุปผลทดลองในการออกแบบหาอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เริ่มจากร้อยละ 1 ถึง 4 ใช้อายุการบ่ม 168 ชั่วโมงซึ่งรายละเอียดผลทดลองกำลังรับแรงอัด อยู่ในภาคผนวก ตารางที่ 4.52 – ตารางที่ 4.55

ตารางที่ 4.24 SUMMARY UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW.2247

Age. hr.	Laboratory test		Percent Cement	Average UCS. Kg./cm.^{2}
	Opt. Moisture (%)	Dry Density (gm./ml.)		
24	5.2	2.206	1.55	18.4
72	5.0	2.211	1.55	23.4
120	5.7	2.184	1.55	23.5
168	5.0	2.200	1.55	25.0
216	4.3	2.222	1.55	27.3

ตารางที่ 4.24 เป็นสรุปผลทดสอบกำลังรับแรงอัดในแต่ละช่วงอายุการบ่มโดยการใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามที่ได้ออกแบบไว้ที่เริ่มจากอายุการบ่มที่ 24, 72, 120,168และ 216ชั่วโมงซึ่งรายละเอียดผลทดลองอยู่ในภาคผนวก ตารางที่ 4.56 – ตารางที่ 4.60

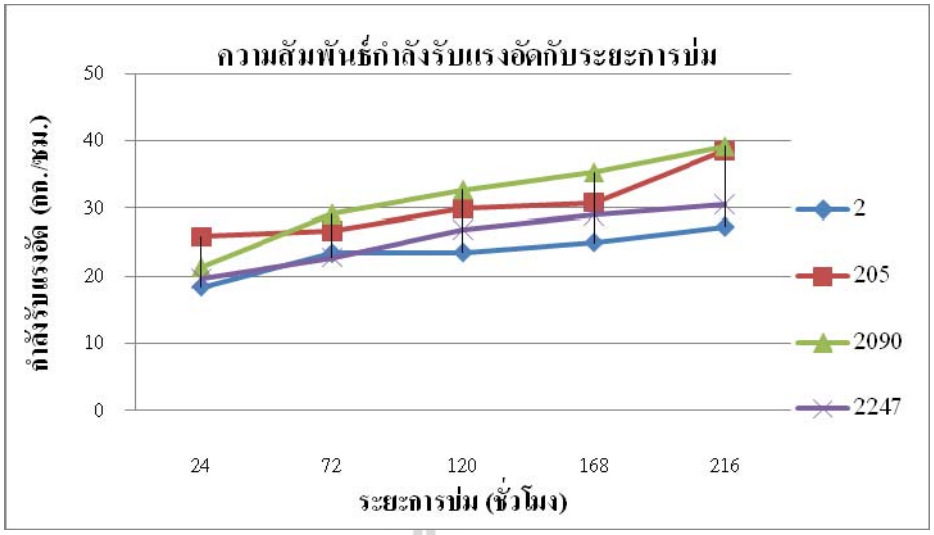
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



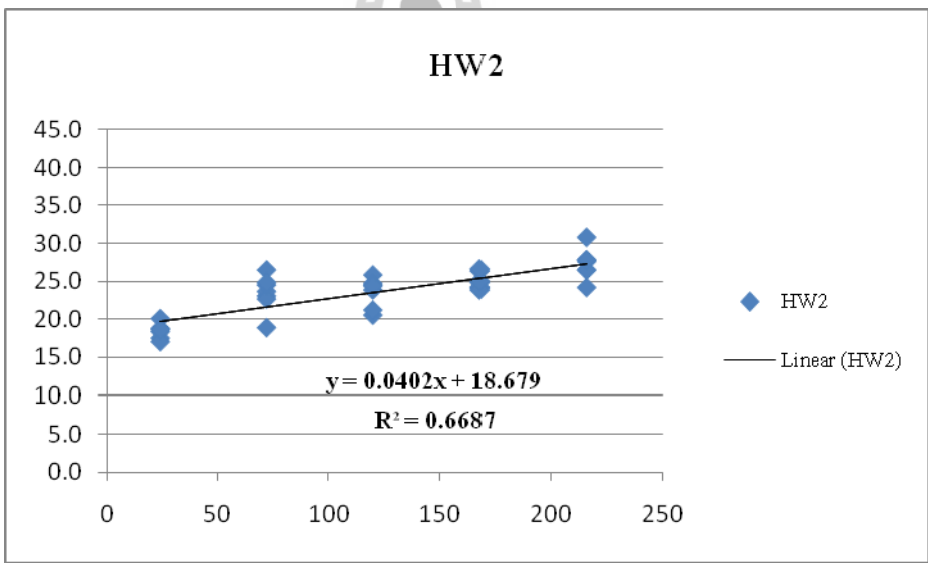
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยกับระยะการบ่ม

4.6 ผลการทดลองคุณสมบัติของวัสดุ ทางหลวงหมายเลข 2247

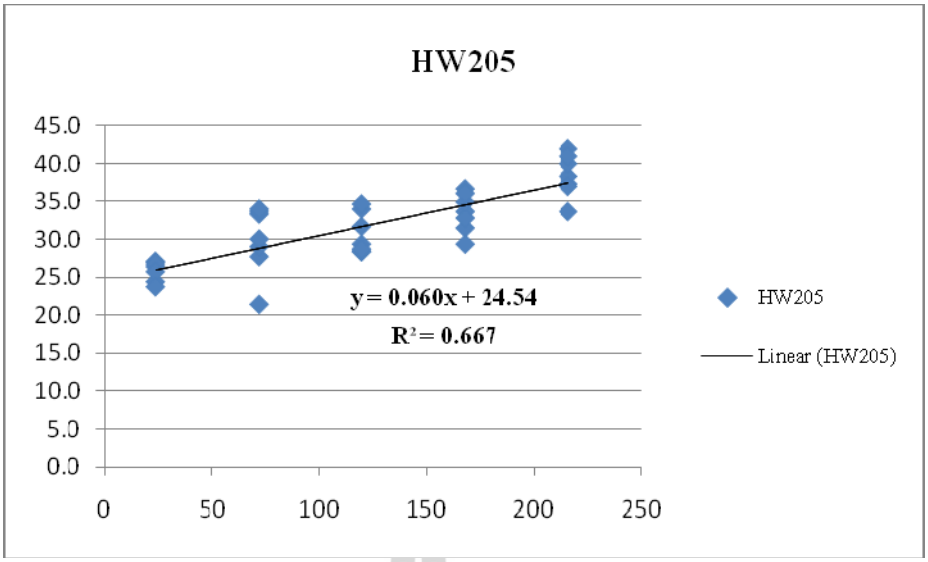
ผลทดลองทางหลวงหมายเลข 2247 ตอน อ.ลำนารายณ์ – อ. ปากช่อง ระหว่าง กม.22+150 – กม.22+800ผลการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุตามมาตรฐานวิธีการทดลองผลอยู่ในเกรด B ตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุก ผลการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน มีค่าปริมาณน้ำในดินที่ทำให้เกิดความแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับร้อยละ 6.4 ค่าความแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 2.290 กรัมต่อมิลลิเมตร ผลการออกแบบหาอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 2.2 ที่กำลังรับแรงอัดที่ 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียวตามระยะการบ่มที่ 24, 72, 120, 168 และ 216 ชั่วโมง ได้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัด 19.6, 22.8, 26.9,29.0 และ 30.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ



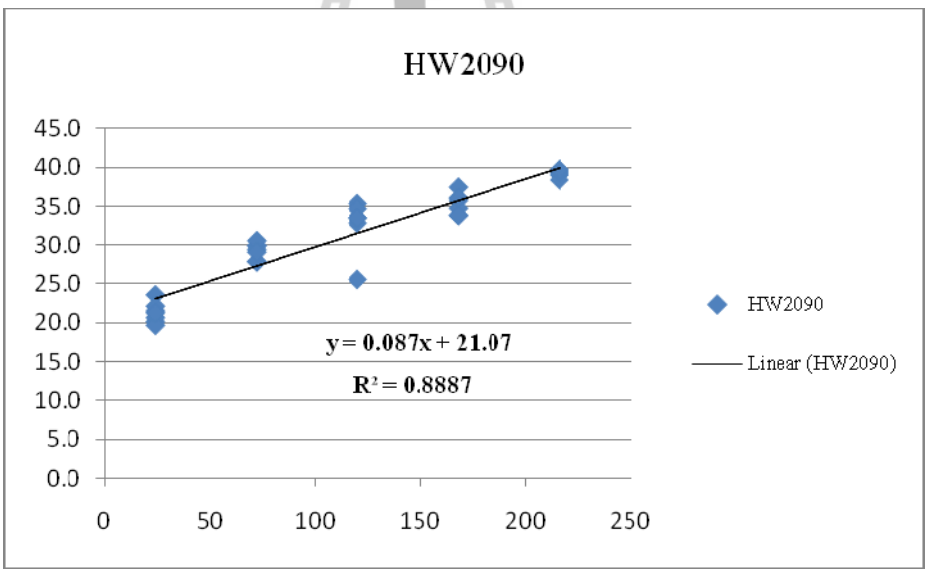
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยตามระยะการบ่มของ 4 สายทาง



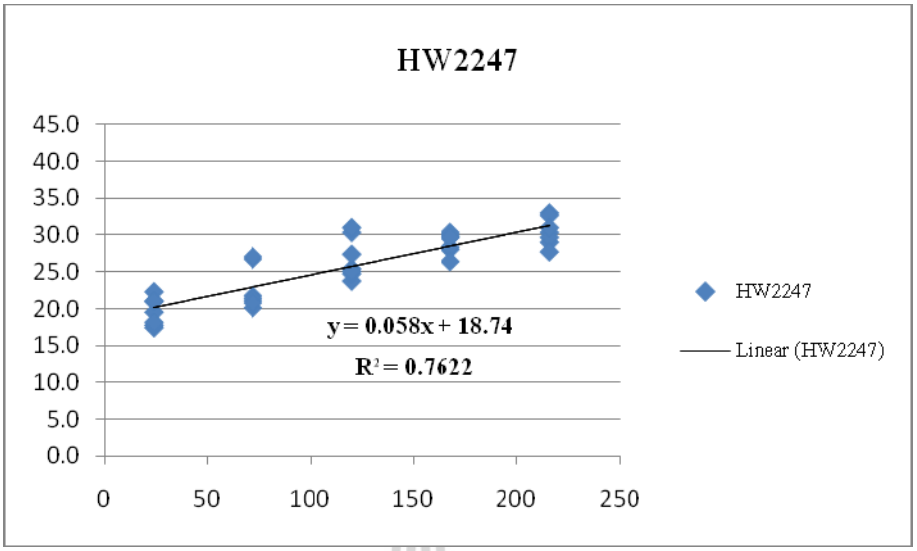
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดและสมการ



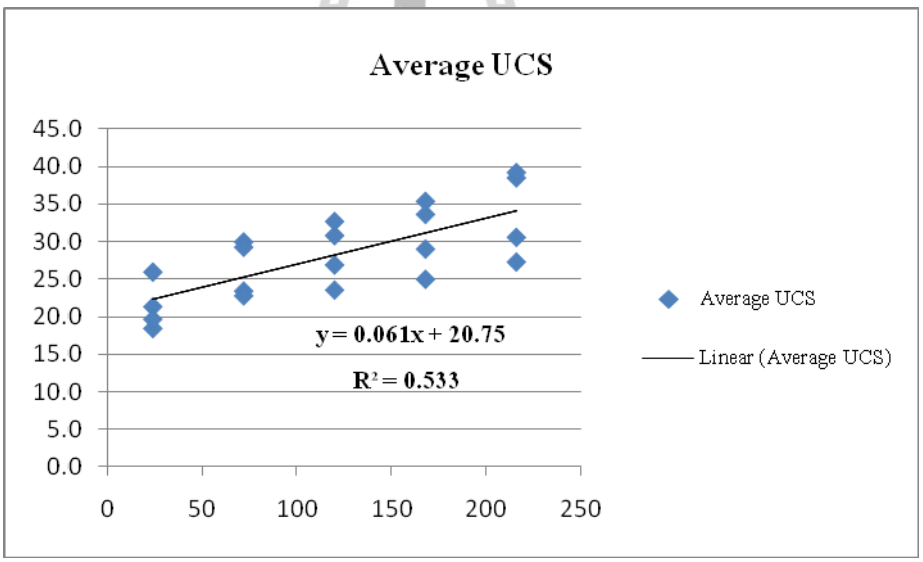
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดและสมการ



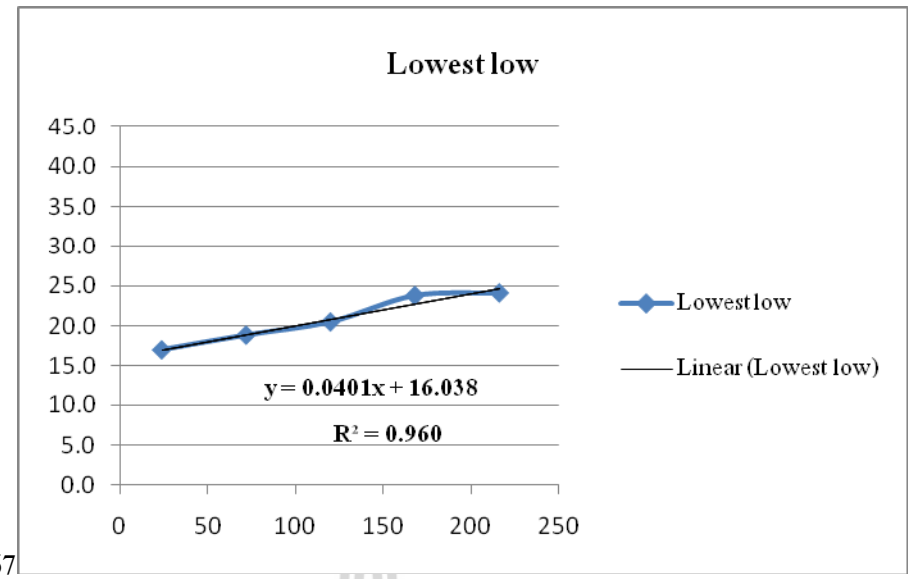
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดและสมการ



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดและสมการ



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและสมการ



67

รูปที่ 4.23 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดต่ำสุดและสมการ

4.7 ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

วัสดุแต่ละสายทางใช้อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ที่ต่างกันที่ทำให้ได้กำลังอัดเท่ากับ 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุบ่ม 7 วันตามมาตรฐานของกรมทางหลวง จากรูปที่ 4.17 กราฟแสดงกำลังอัดเฉลี่ยตามระยะการบ่มของแท่งตัวอย่างทั้ง 4 สายทาง จะเห็นว่ากำลังอัดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะการบ่มซึ่งกำลังอัดเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจำนวน 7 ตัวอย่างในแต่ละช่วงการบ่ม ลักษณะกราฟแต่ละเส้นมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและมีความลาดชัน เป็นการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามระยะการบ่มตามลำดับ แสดงว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะการบ่ม การพิจารณาเส้นกราฟทางสาย 205 และทางสาย 2090 เป็นกราฟเส้นตรงมีความลาดชันที่ดีค่ากำลังอัดอัดเพิ่มขึ้นตามระยะบ่ม และที่อายุบ่ม 72 ชั่วโมงมีค่าแรงอัดที่มากกว่า 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเป็นเส้นกราฟที่ดีเหมาะกับการนำไปใช้งาน ส่วนเส้นกราฟทางสาย 2 และทางสาย 2247 เป็นกราฟเส้นตรงมีความลาดชันน้อย มีค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 72 ชั่วโมงต่ำกว่า 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเป็นเส้นกราฟที่มีค่ากำลังอัดต่ำ เนื่องจาก ขนาดเม็ดของวัสดุมีเม็ดหยาบ และเม็ดละเอียดต่างกันทำให้การพัฒนากำลังอัดแต่ละสายทางไม่เท่ากัน ที่อายุบ่ม 168 ชั่วโมงของ 4 สายทางมีค่ากำลังอัดมากกว่า 24.5 กิโลกรัมต่อเซนติเมตร จากกราฟสามารถใช้สมการหาอัตราส่วนกำลังอัดที่อายุบ่ม 168 ชั่วโมงกับกำลังอัดที่อายุบ่ม 72 ชั่วโมงของแต่สายทาง มีดังนี้

ทางสาย 2 สมการ y = 0.040x+18.67 (25.39/21.55) อัตราส่วนเท่ากับ 1.18 เท่า

ทางสาย 205 สมการ y = 0.060x+24.54 (34.62/28.86) อัตราส่วนเท่ากับ 1.19 เท่า

ทางสาย 2090 สมการ y = 0.087x+21.07 (35.68/27.33)อัตราส่วนเท่ากับ 1.30เท่า

ทางสาย 2247สมการ y = 0.058x+18.74 (28.48/22.91) อัตราส่วนเท่ากับ 1.24 เท่า

กำลังอัดเฉลี่ย สมการ y = 0.061x+20.75 (30.99/25.14) อัตราส่วนเท่ากับ 1.23 เท่า

กำลังอัดต่ำสุด สมการ y = 0.040x+16.03 (22.75/18.91) อัตราส่วนเท่ากับ 1.20 เท่า

4.8 ผลการทดลองในสนาม

ได้ศึกษากำลังอัดในสนามจริงจำนวน 2 สายทาง เปรียบเทียบกับสมการกำลังอัดเฉลี่ยได้ดังนี้

1. ทางสาย 205 ตอนอ.โนนไทย – นครราชสีมา กม.377+350 – กม.3785+541 โดยใช้ตัวอย่างในแต่ละช่วงอายุบ่มเท่ากันกับในห้องปฏิบัติการ จำนวน 7 ตัวอย่าง ที่อายุบ่ม 72 ชั่วโมงได้ค่ากำลังอัด 17.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อายุบ่ม 168 ชั่วโมง ได้ค่ากำลังอัด 28.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีอัตราส่วนของกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุบ่ม 168 ชั่วโมงกับกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุบ่ม 72 ชั่วโมง (28.1/17.8) มีอัตราส่วนเท่ากับ 1.57 และมีค่าสูงกว่าค่าอัตราส่วนของสมการกำลังอัดเฉลี่ย เท่ากับร้อยละ 27.6
2. ทางสาย 202 ตอน แยกเข้าบัวใหญ่ – สี่แยกบ้านสีดา กม.52+370 – กม.54+460ที่อายุบ่ม 72 ชั่วโมงได้ค่ากำลังอัด 15.6กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและที่อายุบ่ม 168 ชั่วโมงได้ค่ากำลังอัด 27.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีอัตราส่วนกำลังอัดที่อายุบ่ม 168 ชั่วโมงกับอายุบ่ม 72 ชั่วโมง (27.3/15.6) มีอัตราส่วนเท่ากับ 1.75 และมีค่าสูงกว่าค่าอัตราส่วนของสมการกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 42.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ใช้ในงาน Pavement In – Place Recycling ที่อายุบ่ม 24,72,120,168 และ216 ชั่วโมงในห้องปฏิบัติการ ได้สมการทำนายกำลังอัด ในแต่ละสายทางดังนี้ ทางสาย2สมการy = 0.040x+18.67,ทางสาย 205 สมการ y = 0.060x+24.54ทางสาย 2090 สมการ y = 0.087x+21.07 และทางสาย 2247 สมการ y = 0.058x+18.74งานวิจัยได้หาสมการทำนายกำลังอัดเฉลี่ย y = 0.061x+20.75 และR^2 = 0.553 สมการทำนายกำลังอัดต่ำสุดในห้องปฏิบัติการ y = 0.040x+16.03และ R^2= 0.960 จากสมการทำนายกำลังอัดที่ได้จะพิจารณากำลังอัดที่อายุบ่ม 72 ชั่วโมงและ 168 ชั่วโมงโดยคิดเป็นอัตราส่วนต่อกันซึ่งอัตราส่วนของสมการกำลังอัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.23ผู้วิจัยได้นำสมการทำนายกำลังอัดเฉลี่ย y = 0.061x+20.75 และ R^2=0.533 ในห้องปฏิบัติการมาใช้กับค่ากำลังอัดในสนามจริง จำนวน 2 สายทาง ได้แก่ทางสาย 202 มีอัตราส่วนกำลังอัดที่อายุบ่ม 168 กับ 72 ชั่วโมง เท่ากับ 1.57 และ ทางสาย 205 มีอัตราส่วนกำลังอัดที่อายุบ่ม168 กับ 72 ชั่วโมง เท่ากับ 1.75

ค่า R^2 เป็นสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ดัง R^2= 0.533 ของสมการกำลังอัดเฉลี่ย แสดงว่ามีสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ 0.533 หรือร้อยละ 53.3 โดยค่า R^2 นี้อธิบายได้ว่า ผลของ y จะได้เป็นค่าหรืออิทธิพลจากตัวแปรร้อยละ x53.3 ส่วนที่เหลือร้อยละ 46.7 เป็นผลจากตัวแปรหรือปัจจัยอื่น ถ้าสมการมีค่า R^2ยิ่งสูงความแม่นยำของสมการที่นำไปใช้ทำนายผลลัพธ์ย่อมมีค่าสูงยิ่งขึ้น และค่า R^2= 0.960 ของสมการกำลังอัดต่ำสุด แสดงว่ามีสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ 0.960 หรือร้อยละ 96.0 ซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่า R^2= 0.533 ของสมการกำลังอัดเฉลี่ย

จากผลการทดสอบกำลังอัดในสนามทั้ง 2 สายทางมีค่าอัตรากำลังอัดส่วนสูงกว่าอัตราส่วนสมการกำลังอัดเฉลี่ยในห้องปฏิบัติการงานวิจัยนี้ให้ประโยชน์ในแง่ของวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลา และคืนสภาพถนนให้กลับมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิ์ภาพเร็วขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรนำสมการทำนายกำลังอัดต่ำสุด y = 0.040x+16.03 และมีค่า R^2=0.960 มาใช้ในการดำเนินงานสนามเพื่อพิจารณาแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดจะได้ปรับปรุงแก้ไขอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ทันกับเวลา

- ควรพิจารณาการบ่มในสนามให้เพิ่มมากขึ้นและมีความต่อเนื่องเพื่อพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง (2539) **มาตรฐานงานทางStandard for highway construction**เล่มที่ 1 พิมพ์ครั้งที่ 1 กรมทางหลวง

กรมทางหลวง (2543) **มาตรฐานวิธีการทดลองStandard testmethods**เล่มที่ 1 พิมพ์ครั้งที่ 1 กระทรวงคมนาคม

วันชัย ศิริเลิศวัฒนา (2549) ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของถนนที่ซ่อมแซมโดยเทคนิคการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ **วิทยานิพนธ์ปริญญาศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**

Davidsion, D.T.and Bruns, B.W. (1960).Comparision of Type I and Type III Portland Cement for Soil Stabilization. **Highway Research Board.** Bulletin 267.28-45

Davidson, D.T. (1961). Soil Stabilization with Portland Cement. **Highway Research Board.** Bulletin 292. 45-151.

Felt, E.J. (1955).Factor Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures. **Highway Research Board.** Bulletin 108. 138-163.

Herzog, A. and Mitchell, J.K. (1963). Reaction Accompanying the Stabilization of Clay with Cement.**Highway Research Record.**36:146-171.

Massachusetts Institute of Technology, (1954). Soil Stabilization for Highways. Massachusetts. **Massachusetts Department of Public Works and Joint Highway Research Project.** 81.

Moh, Z.C.(1965). Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals, **Highway Research Record.** 86: 39-61.

Ruenkrairergsa, T. (1982). Principle of Soil Stabilization. **Group Training in Road Construction.** Bangkok. Thailand. 17-26.

Wang, M.C. and Huston, M.T. (1972). Direct-Tensile Stress and Strain of Cement Stabilize Soil. **Highway Research Record.** 351: 19-24.

Wirtgen. (1992). Cold Recycling. **An Economic and Ecokogically Construction Process.** West Germany. Wirtgen.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก

ตารางUNCONFIED COMPRESSIVE STRENGTH

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.25 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2

CEMENT. 1.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	330	1782	81.7	21.8
2	310	1674	81.7	20.5
3	330	1782	81.7	21.8
4	380	2052	81.7	25.1
5	315	1701	81.7	20.8

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 22.0 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.775	5.752	5.777	5.788	5.782	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.225	2.202	2.227	2.238	2.232	
Wet Density (gm./ml.)	2.337	2.313	2.339	2.351	2.344	
Dry Density (gm./ml.)	2.217	2.201	2.232	2.239	2.218	2.221

WATER CONTENT

Can No.	29	12	27	54	82	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	288.6	282.8	323.7	320.4	317.5	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	275.9	271.1	310.8	307.1	302.7	
Water (gm.)	12.7	11.7	12.9	13.3	14.8	
Wt. Can (gm.)	41.2	42.4	41.3	41.6	42.5	
Wt. Dry Soil (gm.)	234.7	228.7	269.5	265.5	260.2	
Water Content (%)	5.4	5.1	4.8	5.0	5.7	5.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.26 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2

CEMENT. 2.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	245	1323	81.7	16.2
2	370	1998	81.7	24.4
3	405	2187	81.7	26.8
4	380	2052	81.7	25.1
5	470	2538	81.7	31.0

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 24.7 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.776	5.771	5.786	5.810	5.793	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.226	2.221	2.236	2.260	2.243	
Wet Density (gm./ml.)	2.338	2.333	2.349	2.374	2.356	
Dry Density (gm./ml.)	2.208	2.213	2.220	2.257	2.229	2.225

WATER CONTENT

Can No.	87	40	1	11	8	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	310.4	326.3	313.0	319.0	308.3	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	295.5	311.7	298.2	305.4	294.0	
Water (gm.)	14.9	14.6	14.8	13.6	14.3	
Wt. Can (gm.)	42.8	40.7	42.7	43.7	43.3	
Wt. Dry Soil (gm.)	252.7	271.0	255.5	261.7	250.7	
Water Content (%)	5.9	5.4	5.8	5.2	5.7	5.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.27 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2

CEMENT. 3.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	505	2727	81.7	33.4
2	605	3267	81.7	40.0
3	470	2538	81.7	31.0
4	590	3186	81.7	39.0
5	540	2916	81.7	35.7

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 35.8 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.782	5.779	5.783	5.791	5.783	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.232	2.229	2.233	2.241	2.233	
Wet Density (gm./ml.)	2.344	2.341	2.346	2.354	2.346	
Dry Density (gm./ml.)	2.187	2.182	2.178	2.200	2.188	2.187

WATER CONTENT

Can No.	50	63	83	93	22	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	301.7	250.4	281.0	276.6	251.7	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	284.3	235.5	264.2	261.3	237.5	
Water (gm.)	17.4	14.9	16.8	15.3	14.2	
Wt. Can (gm.)	42.6	31.1	46.1	42.1	40.9	
Wt. Dry Soil (gm.)	241.7	204.4	218.1	219.2	196.6	
Water Content (%)	7.2	7.3	7.7	7.0	7.2	7.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.28 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2

CEMENT. 4.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	550	2970	81.7	36.3
2	595	3213	81.7	39.3
3	480	2592	81.7	31.7
4	595	3213	81.7	39.3
5	495	2673	81.7	32.7

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 35.9 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.783	5.771	5.778	5.784	5.774	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.233	2.221	2.228	2.234	2.224	
Wet Density (gm./ml.)	2.345	2.333	2.340	2.347	2.336	
Dry Density (gm./ml.)	2.204	2.184	2.199	2.193	2.191	2.194

WATER CONTENT

Can No.	35	48	34	39	28	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	278.1	279.9	286.0	276.0	267.8	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	264.0	264.9	271.3	260.8	253.7	
Water (gm.)	14.1	15.0	14.7	15.2	14.1	
Wt. Can (gm.)	44.2	44.3	42.1	43.7	40.1	
Wt. Dry Soil (gm.)	219.8	220.6	229.2	217.1	213.6	
Water Content (%)	6.4	6.8	6.4	7.0	6.6	6.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตาราง 4.29 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2

CEMENT. 1.55 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	283	1528.2	81.7	18.7
2	303	1636.2	81.7	20.0
3	264	1425.6	81.7	17.4
4	283	1528.2	81.7	18.7
5	277	1495.8	81.7	18.3
6	257	1387.8	81.7	17.0
7	281	1517.4	81.7	18.6
			ทดสอบที่อายุครบ 24 ชั่วโมง	Average UCS = 18.4 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.796	5.761	5.753	5.771	5.737	5.727	5.774	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.246	2.211	2.203	2.221	2.187	2.177	2.224	
Wet Density (gm./ml.)	2.359	2.322	2.314	2.333	2.298	2.286	2.336	
Dry Density (gm./ml.)	2.251	2.205	2.189	2.224	2.184	2.167	2.223	2.206

WATER CONTENT

Can No.	9	25	47	73	31	95	35	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	316.6	311.2	285.6	309.2	290.3	307.2	330.6	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	304.1	297.6	272.6	296.2	278.0	293.4	316.7	
Water (gm.)	12.5	13.6	13.0	13.0	12.3	13.8	13.9	
Wt. Can (gm.)	43.6	41.9	44.1	31.3	42.1	42.6	44.2	
Wt. Dry Soil (gm.)	260.5	255.7	228.5	264.9	235.9	250.8	272.5	
Water Content (%)	4.8	5.3	5.7	4.9	5.2	5.5	5.1	5.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.30 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2

CEMENT. 1.55 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	285	1539.0	81.7	18.8
2	348	1879.2	81.7	23.0
3	357	1927.0	81.7	23.6
4	342	1846.8	81.7	22.6
5	400	2160.0	81.7	26.4
6	370	1998.0	81.7	24.5
7	375	2025.0	81.7	24.8
			ทดสอบที่อายุครบ 72 ชั่วโมง	Average UCS = 23.4 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.765	5.767	5.744	5.768	5.771	5.754	5.751	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.215	2.217	2.194	2.218	2.221	2.204	2.201	
Wet Density (gm./ml.)	2.326	2.328	2.305	2.329	2.333	2.315	2.312	
Dry Density (gm./ml.)	2.237	2.209	2.199	2.208	2.222	2.203	2.196	2.211

WATER CONTENT

Can No.	15	36	50	33	99	78	94	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	321.5	320.3	295.5	291.7	327.5	352.9	338.8	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	310.6	306.1	283.1	278.5	314.1	337.8	323.9	
Water (gm.)	10.9	14.2	12.4	13.2	13.4	15.1	14.9	
Wt. Can (gm.)	39.1	42.9	42.6	39.0	46.5	41.6	42.3	
Wt. Dry Soil (gm.)	271.5	263.2	258.5	239.5	267.6	296.5	281.6	
Water Content (%)	4.0	5.4	4.8	5.5	5.0	5.1	5.3	5.0

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.31 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2

CEMENT. 1.55 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	360	1944.0	81.7	23.8
2	390	2106.0	81.7	25.8
3	310	1674.0	81.7	20.5
4	370	1998.0	81.7	24.5
5	373	2014.2	81.7	24.7
6	368	1987.2	81.7	24.3
7	320	1728.0	81.7	21.2
			ทดสอบที่อายุครบ 120 ชั่วโมง	Average UCS = 23.5 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.765	5.743	5.721	5.759	5.749	5.742	5.754	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.215	2.193	2.171	2.209	2.199	2.192	2.204	
Wet Density (gm./ml.)	2.326	2.303	2.280	2.320	2.310	2.303	2.315	
Dry Density (gm./ml.)	2.205	2.181	2.145	2.193	2.175	2.189	2.201	2.184

WATER CONTENT

Can No.	41	44	18	46	93	7	22	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	316.3	314.4	283.4	304.4	321.8	327.1	317.4	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	301.9	300.1	269.1	290.0	305.6	313.0	303.8	
Water (gm.)	14.4	14.3	14.3	14.4	16.2	14.1	13.6	
Wt. Can (gm.)	39.9	45.0	42.5	42.0	44.4	42.0	41.4	
Wt. Dry Soil (gm.)	262.0	255.1	226.6	248.0	261.2	271.0	262.4	
Water Content (%)	5.5	5.6	6.3	5.8	6.2	5.2	5.2	5.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.32 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2

CEMENT. 1.55 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	375	2025.0	81.7	24.8
2	364	1965.6	81.7	24.1
3	398	2149.2	81.7	26.3
4	366	1976.4	81.7	24.2
5	360	1944.0	81.7	23.8
6	378	2041.2	81.7	25.0
7	402	2170.8	81.7	26.6
			ทดสอบที่อายุครบ 168 ชั่วโมง	Average UCS = 25.0 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.740	5.761	5.763	5.750	5.741	5.750	5.738	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.190	2.211	2.213	2.200	2.191	2.200	2.188	
Wet Density (gm./ml.)	2.301	2.322	2.325	2.311	2.301	2.310	2.298	
Dry Density (gm./ml.)	2.191	2.195	2.227	2.201	2.177	2.211	2.195	2.200

WATER CONTENT

Can No.	43	92	39	30	48	26	65	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	285.7	288.2	308.1	306.8	299.4	299.8	295.9	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	273.9	274.8	297.0	294.2	285.6	288.7	284.0	
Water (gm.)	11.8	13.4	11.1	12.6	13.8	11.1	11.9	
Wt. Can (gm.)	38.8	44.4	43.8	42.8	44.1	41.5	30.5	
Wt. Dry Soil (gm.)	235.1	230.4	253.3	251.4	241.5	247.2	253.5	
Water Content (%)	5.0	5.8	4.4	5.0	5.7	4.5	4.7	5.0

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.33 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2

CEMENT. 1.55 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	365	1971.0	81.7	24.1
2	400	2160.0	81.7	26.4
3	417	2251.8	81.7	27.6
4	400	2160.0	81.7	26.4
5	420	2268.0	81.7	27.8
6	420	2268.0	81.7	27.8
7	465	2511.0	81.7	30.7
			ทดสอบที่อายุครบ 216 ชั่วโมง	Average UCS = 27.3 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.770	5.765	5.746	5.755	5.764	5.762	5.732	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.220	2.215	2.196	2.205	2.214	2.212	2.182	
Wet Density (gm./ml.)	2.332	2.327	2.307	2.316	2.326	2.324	2.292	
Dry Density (gm./ml.)	2.223	2.246	2.197	2.229	2.234	2.232	2.193	2.222

WATER CONTENT

Can No.	96	6	84	14	38	21	89	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	312.4	305.5	281.2	305.9	316.1	295.6	332.1	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	299.8	296.4	269.9	296.0	305.3	285.5	319.6	
Water (gm.)	12.6	9.1	11.3	9.9	10.8	10.1	12.5	
Wt. Can (gm.)	42.1	43.2	43.8	42.4	41.0	40.1	42.2	
Wt. Dry Soil (gm.)	257.7	253.2	226.1	253.6	264.3	245.4	277.4	
Water Content (%)	4.9	3.6	5.0	3.9	4.1	4.1	4.5	4.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.34 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 205

CEMENT. 1.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	250	1350	81.7	16.5
2	235	1269	81.7	15.5
3	270	1458	81.7	17.8
4	240	1296	81.7	15.9
5	260	1404	81.7	17.2

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 16.6 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.		1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil	(Kg.)	5.769	5.753	5.761	5.755	5.769	
Wt. Mold	(Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil	(Kg.)	2.219	2.203	2.211	2.205	2.219	
Wet Density	(gm./ml.)	2.331	2.314	2.322	2.317	2.331	
Dry Density	(gm./ml.)	2.174	2.157	2.156	2.165	2.174	2.165

WATER CONTENT

Can No.		14	15	24	30	21	
Wt. Can + Wet Soil	(Kg.)	320.6	321.0	246.0	259.6	263.9	
Wt. Can + Dry Soil	(Kg.)	301.9	301.8	231.3	245.4	248.9	
Water	(gm.)	18.7	19.2	14.7	14.2	15.0	
Wt. Can	(gm.)	42.4	39.1	40.7	43.1	40.0	
Wt. Dry Soil	(gm.)	259.5	262.7	190.6	202.3	208.9	
Water Content	(%)	7.2	7.3	7.7	7.0	7.2	7.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.35 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 205

CEMENT. 2.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	530	2862	81.7	35.0
2	500	2700	81.7	33.0
3	510	2754	81.7	33.7
4	470	2538	81.7	31.0
5	445	2403	81.7	29.4

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 32.4 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.		1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil	(Kg.)	5.769	5.778	5.792	5.760	5.761	
Wt. Mold	(Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil	(Kg.)	2.219	2.228	2.242	2.210	2.211	
Wet Density	(gm./ml.)	2.331	2.340	2.355	2.322	2.322	
Dry Density	(gm./ml.)	2.162	2.161	2.199	2.176	2.164	2.172

WATER CONTENT

Can No.		43	1	27	89	33	
Wt. Can + Wet Soil	(Kg.)	273.4	264.0	255.5	282.5	281.0	
Wt. Can + Dry Soil	(Kg.)	256.4	247.1	241.3	267.4	264.5	
Water	(gm.)	17.0	16.9	14.2	15.1	16.5	
Wt. Can	(gm.)	38.9	42.9	44.4	42.1	38.9	
Wt. Dry Soil	(gm.)	217.5	204.2	199.9	225.3	255.6	
Water Content	(%)	7.8	8.3	7.1	6.7	7.3	7.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.36 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 205

CEMENT. 3.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	630	3402	81.7	41.6
2	660	3564	81.7	43.6
3	655	3637	81.7	43.3
4	675	3645	81.7	44.6
5	630	3402	81.7	41.6

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง | Average | 42.9 | Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.772	5.767	5.777	5.772	5.787	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.222	2.217	2.227	2.222	2.237	
Wet Density (gm./ml.)	2.334	2.328	2.339	2.334	2.350	
Dry Density (gm./ml.)	2.187	2.182	2.178	2.200	2.188	2.187

WATER CONTENT

Can No.	50	63	83	93	22	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	301.7	250.4	281.0	276.6	251.7	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	284.3	235.5	264.2	261.3	237.5	
Water (gm.)	17.4	14.9	16.8	15.3	14.2	
Wt. Can (gm.)	42.6	31.1	46.1	42.1	40.9	
Wt. Dry Soil (gm.)	241.7	204.4	218.1	219.2	196.6	
Water Content (%)	6.7	6.7	7.4	6.1	7.4	6.9

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.37 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 205

CEMENT. 4.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	U C S. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	638	3445	81.7	42.1
2	730	3942	81.7	48.2
3	672	3629	81.7	44.4
4	710	3834	81.7	46.9
5	673	3634	81.7	44.5

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 45.2 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.783	5.771	5.778	5.784	5.774	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.233	2.221	2.228	2.234	2.224	
Wet Density (gm./ml.)	2.345	2.333	2.340	2.347	2.336	
Dry Density (gm./ml.)	2.204	2.184	2.199	2.193	2.191	2.194

WATER CONTENT

Can No.	35	48	34	39	28	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	278.1	279.9	286.0	276.0	267.8	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	264.0	264.9	271.3	260.8	253.7	
Water (gm.)	14.1	15.0	14.7	15.2	14.1	
Wt. Can (gm.)	44.2	44.3	42.1	43.7	40.1	
Wt. Dry Soil (gm.)	219.8	220.6	229.2	217.1	213.6	
Water Content (%)	6.4	6.8	6.4	7.0	6.6	6.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.38 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 205

CEMENT. 1.50 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	370	1998.0	81.7	24.5
2	400	2160.0	81.7	26.4
3	410	2214.0	81.7	27.1
4	410	2214.0	81.7	27.1
5	405	2187.0	81.7	26.8
6	390	2106.0	81.7	25.8
7	360	1944.0	81.7	23.8
			ทดสอบที่อายุครบ 24 ชั่วโมง	Average UCS = 25.9 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.725	5.740	5.684	5.724	5.674	5.738	5.745	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.175	2.190	2.134	2.174	2.124	2.188	2.195	
Wet Density (gm./ml.)	2.284	2.300	2.242	2.283	2.231	2.298	2.306	
Dry Density (gm./ml.)	2.149	2.152	2.121	2.150	2.105	2.170	2.167	2.145

WATER CONTENT

Can No.	28	97	50	53	92	34	29	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	284.4	341.0	356.0	335.0	350.5	325.6	323.0	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	269.9	321.9	339.1	317.9	333.2	309.8	306.1	
Water (gm.)	14.5	19.1	16.9	17.1	17.3	15.8	16.9	
Wt. Can (gm.)	39.9	45.0	42.5	42.0	44.4	42.0	41.4	
Wt. Dry Soil (gm.)	230.0	276.9	296.6	275.9	288.8	267.8	264.7	
Water Content (%)	6.3	6.9	5.7	6.2	6.0	5.9	6.4	6.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.39 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 205

CEMENT. 1.50 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	505	2727.0	81.7	33.4
2	510	2754.0	81.7	33.7
3	325	1755.0	81.7	21.5
4	420	2268.0	81.7	27.8
5	440	2376.0	81.7	29.1
6	515	2781.0	81.7	34.0
7	455	2457.0	81.7	30.1
			ทดสอบที่อายุครบ 72 ชั่วโมง	Average UCS = 29.9 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.718	5.575	5.742	5.751	5.675	5.762	5.764	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.168	2.207	2.192	2.201	2.125	2.212	2.214	
Wet Density (gm./ml.)	2.277	2.319	2.303	2.312	2.232	2.324	2.325	
Dry Density (gm./ml.)	2.136	2.175	2.156	2.171	2.094	2.180	2.204	2.159

WATER CONTENT

Can No.	12	5	48	39	32	93	46	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	312.5	327.0	325.1	329.2	296.8	295.8	332.0	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	295.8	309.4	307.2	311.8	281.0	280.1	316.8	
Water (gm.)	16.7	17.6	17.9	17.4	15.8	15.7	15.2	
Wt. Can (gm.)	42.5	42.3	44.1	43.7	41.6	42.1	39.8	
Wt. Dry Soil (gm.)	253.3	267.1	263.1	268.1	239.4	238.0	277.0	
Water Content (%)	6.6	6.6	6.8	6.5	6.6	6.6	5.5	6.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.40 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 205

CEMENT. 1.50 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	515	2781.0	81.7	34.0
2	430	2322.0	81.7	28.4
3	430	2322.0	81.7	28.4
4	445	2403.0	81.7	29.4
5	435	2349.0	81.7	28.8
6	480	2592.0	81.7	31.7
7	525	2835.0	81.7	34.7
			ทดสอบที่อายุครบ 120 ชั่วโมง	Average UCS = 30.8 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.759	5.735	5.762	5.740	5.731	5.727	5.774	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.209	2.185	2.212	2.190	2.181	2.177	2.224	
Wet Density (gm./ml.)	2.321	2.295	2.323	2.300	2.291	2.287	2.336	
Dry Density (gm./ml.)	2.175	2.163	2.196	2.162	2.167	2.141	2.206	2.173

WATER CONTENT

Can No.	14	18	23	6	33	24	35	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	312.0	317.9	346.6	310.5	288.5	321.1	337.1	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	295.1	301.9	329.9	294.4	275.0	303.2	220.8	
Water (gm.)	16.9	16.0	16.7	16.1	13.5	17.9	16.3	
Wt. Can (gm.)	42.4	40.2	42.4	43.1	38.9	40.2	44.2	
Wt. Dry Soil (gm.)	252.7	261.7	287.5	251.3	236.1	263.0	276.6	
Water Content (%)	6.7	6.1	5.8	6.4	5.7	6.8	5.9	6.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.41 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 205

CEMENT. 1.50 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	477	2575.8	81.7	31.5
2	510	2754.0	81.7	33.7
3	497	2683.8	81.7	32.8
4	529	2856.6	81.7	35.0
5	445	2403.0	81.7	29.4
6	555	2997.0	81.7	36.7
7	546	2948.4	81.7	36.1
			ทดสอบที่อายุครบ 168 ชั่วโมง	Average UCS = 33.6 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.782	5.779	5.770	5.765	5.760	5.765	5.767	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.232	2.229	2.220	2.215	2.210	2.215	2.217	
Wet Density (gm./ml.)	2.344	2.341	2.332	2.327	2.321	2.327	2.328	
Dry Density (gm./ml.)	2.193	2.198	2.200	2.185	2.163	2.197	2.178	2.188

WATER CONTENT

Can No.	43	55	36	6	35	24	33	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	312.9	293.9	326.4	330.2	267.8	302.3	310.6	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	295.2	277.9	309.7	312.7	253.7	287.7	293.1	
Water (gm.)	17.7	16.0	16.7	17.5	14.1	14.6	17.5	
Wt. Can (gm.)	38.9	31.9	31.0	43.1	40.1	40.6	38.9	
Wt. Dry Soil (gm.)	256.3	246.0	278.7	217.1	269.6	247.1	254.2	
Water Content (%)	6.9	6.5	6.0	7.0	6.5	5.9	6.9	6.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.42 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 205

CEMENT. 1.50 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	565	3051.0	81.7	37.3
2	580	3132.0	81.7	38.3
3	635	3429.0	81.7	42.0
4	605	3267.0	81.7	40.0
5	560	3024.0	81.7	37.0
6	510	2754.0	81.7	33.7
7	620	3348.0	81.7	41.0
			ทดสอบที่อายุครบ 216 ชั่วโมง	Average UCS.= 38.5 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.821	5.774	5.751	5.746	5.757	5.743	5.760	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.271	2.224	2.201	2.196	2.207	2.193	2.210	
Wet Density (gm./ml.)	2.385	2.336	2.312	2.307	2.319	2.304	2.322	
Dry Density (gm./ml.)	2.244	2.185	2.187	2.158	2.177	2.143	2.178	2.182

WATER CONTENT

Can No.	23	18	46	32	48	14	39	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	334.7	327.8	301.8	307.6	326.9	315.4	335.9	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	317.4	309.2	287.7	290.4	309.6	296.3	317.8	
Water (gm.)	17.3	18.6	14.1	17.2	17.3	19.1	18.1	
Wt. Can (gm.)	42.3	40.1	39.7	41.6	44.0	42.3	43.7	
Wt. Dry Soil (gm.)	275.1	269.1	248.0	248.8	265.6	254.0	274.1	
Water Content (%)	6.3	6.9	5.7	6.9	6.5	7.5	6.6	6.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.43 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2090

CEMENT. 1.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	290	1566	81.7	19.2
2	235	1269	81.7	15.5
3	235	1269	81.7	15.5
4	185	999	81.7	12.2
5	280	1512	81.7	18.5

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 16.2 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.735	5.716	5.709	5.719	5.752	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.185	2.166	2.159	2.169	2.202	
Wet Density (gm./ml.)	2.295	2.275	2.267	2.278	2.313	
Dry Density (gm./ml.)	2.194	2.150	2.174	2.149	2.182	2.170

WATER CONTENT

Can No.	23	63	6	7	32	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	323.7	293.2	332.0	302.6	339.3	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	311.3	278.8	320.1	287.9	322.4	
Water (gm.)	12.4	14.4	11.9	14.7	16.9	
Wt. Can (gm.)	42.3	31.0	43.1	42.1	41.5	
Wt. Dry Soil (gm.)	269.0	247.8	277.0	245.8	280.9	
Water Content (%)	4.6	5.8	4.3	6.0	6.0	5.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.44 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2090

CEMENT. 2.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	450	2430	81.7	29.7
2	335	1809	81.7	22.1
3	400	2160	81.7	26.4
4	310	1674	81.7	20.5
5	385	2079	81.7	25.4

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 24.8 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.		1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil	(Kg.)	5.756	5.709	5.745	5.668	5.723	
Wt. Mold	(Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil	(Kg.)	2.206	2.159	2.195	2.118	2.173	
Wet Density	(gm./ml.)	2.318	2.267	2.305	2.224	2.283	
Dry Density	(gm./ml.)	2.201	2.141	2.208	2.134	2.174	2.172

WATER CONTENT

Can No.		34	18	15	53	48	
Wt. Can + Wet Soil	(Kg.)	345.4	327.4	327.8	357.2	324.4	
Wt. Can + Dry Soil	(Kg.)	330.1	311.4	315.6	344.4	311.0	
Water	(gm.)	15.3	16.0	12.2	12.8	13.4	
Wt. Can	(gm.)	41.9	40.0	39.0	41.9	44.0	
Wt. Dry Soil	(gm.)	288.2	271.4	276.6	302.5	267.0	
Water Content	(%)	5.3	5.9	4.4	4.2	5.0	5.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.45 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2090

CEMENT. 3.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	525	2835	81.7	34.7
2	540	2916	81.7	35.7
3	585	3159	81.7	38.6
4	485	2619	81.7	32.0
5	505	2727	81.7	33.4

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 34.9 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.758	5.764	5.787	5.763	5.730	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.208	2.214	2.237	2.213	2.180	
Wet Density (gm./ml.)	2.319	2.326	2.350	2.324	2.290	
Dry Density (gm./ml.)	2.194	2.211	2.242	2.218	2.181	2.209

WATER CONTENT

Can No.	24	50	30	65	92	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	315.0	351.0	363.3	334.8	350.9	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	300.2	335.7	348.6	320.9	336.3	
Water (gm.)	14.8	15.3	14.7	13.9	14.6	
Wt. Can (gm.)	40.5	42.4	42.7	30.8	44.3	
Wt. Dry Soil (gm.)	259.7	293.3	305.9	290.1	292.0	
Water Content (%)	5.7	5.2	4.8	4.8	5.0	5.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.46 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2090

CEMENT. 4.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	660	3564	81.7	43.6
2	635	3429	81.7	41.9
3	630	3402	81.7	41.6
4	550	2970	81.7	36.3
5	595	3213	81.7	39.3

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 40.6 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.740	5.720	5.738	5.706	5.715	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.190	2.170	2.188	2.156	2.165	
Wet Density (gm./ml.)	2.300	2.280	2.298	2.265	2.274	
Dry Density (gm./ml.)	2.172	2.163	2.189	2.145	2.145	2.163

WATER CONTENT

Can No.	28	97	93	39	14	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	335.7	361.2	360.7	345.0	296.5	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	319.2	345.0	345.5	329.0	282.1	
Water (gm.)	16.5	16.2	15.2	16.0	14.4	
Wt. Can (gm.)	39.7	44.8	42.0	43.6	42.2	
Wt. Dry Soil (gm.)	279.5	300.2	303.5	285.4	239.9	
Water Content (%)	5.9	5.4	5.0	5.6	6.0	5.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.47 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2090

CEMENT. 1.98 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	305	1647.0	81.7	20.2
2	313	1690.2	81.7	20.7
3	357	1927.8	81.7	23.6
4	326	1760.4	81.7	21.5
5	335	1809.0	81.7	22.1
6	298	1609.2	81.7	19.7
7	322	1738.8	81.7	21.3
			ทดสอบที่อายุครบ 24 ชั่วโมง	Average UCS = 21.3 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.754	5.746	5.776	5.771	5.756	5.761	5.764	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.204	2.196	2.226	2.221	2.206	2.211	2.214	
Wet Density (gm./ml.)	2.315	2.307	2.338	2.332	2.317	2.323	2.326	
Dry Density (gm./ml.)	2.168	2.170	2.206	2.215	2.186	2.183	2.194	2.189

WATER CONTENT

Can No.	25	15	35	47	31	23	50	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	304.6	290.0	302.1	292.1	281.8	314.6	288.8	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	287.9	275.1	287.5	279.6	268.2	298.2	274.9	
Water (gm.)	16.7	14.9	14.6	12.5	13.6	16.4	13.9	
Wt. Can (gm.)	41.8	39.1	44.2	44.0	42.0	42.4	42.5	
Wt. Dry Soil (gm.)	246.1	236.0	243.3	235.6	226.2	255.8	232.4	
Water Content (%)	6.8	6.3	6.0	5.3	6.0	6.4	6.0	6.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.48 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2090

CEMENT. 1.98 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	453	2446.2	81.7	29.9
2	421	2273.4	81.7	27.8
3	452	2440.8	81.7	29.9
4	445	2403.0	81.7	29.4
5	462	2494.8	81.7	30.5
6	422	2278.8	81.7	27.9
7	440	2376.0	81.7	29.1
			ทดสอบที่อายุครบ 72 ชั่วโมง	Average UCS = 29.2 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.765	5.768	5.794	5.772	5.762	5.767	5.773	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.215	2.218	2.244	2.222	2.212	2.217	2.223	
Wet Density (gm./ml.)	2.326	2.330	2.357	2.333	2.324	2.328	2.335	
Dry Density (gm./ml.)	2.174	2.198	2.217	2.189	2.184	2.170	2.180	2.187

WATER CONTENT

Can No.	4	73	36	39	7	89	21	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	278.8	285.3	289.5	307.2	287.3	297.6	316.3	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	263.3	270.9	274.9	290.9	272.6	280.2	298.0	
Water (gm.)	15.5	14.4	14.6	16.3	14.7	17.4	18.3	
Wt. Can (gm.)	42.2	31.0	42.8	43.8	42.2	42.2	40.0	
Wt. Dry Soil (gm.)	221.1	239.9	232.1	247.1	230.4	238.0	258.0	
Water Content (%)	7.0	6.0	6.3	6.6	6.4	7.3	7.1	6.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.49 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2090

CEMENT. 1.98 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	387	2089.8	81.7	25.6
2	534	2883.6	81.7	35.3
3	506	2732.4	81.7	33.4
4	496	2678.4	81.7	32.8
5	506	2732.4	81.7	33.4
6	524	2829.6	81.7	34.6
7	506	2732.4	81.7	33.4
			ทดสอบที่อายุครบ 120 ชั่วโมง	Average UCS = 32.7 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.770	5.776	5.769	5.754	5.761	5.758	5.770	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.220	2.226	2.219	2.204	2.211	2.208	2.220	
Wet Density (gm./ml.)	2.332	2.338	2.331	2.315	2.323	2.320	2.332	
Dry Density (gm./ml.)	2.179	2.183	2.172	2.164	2.177	2.174	2.169	2.174

WATER CONTENT

Can No.	14	43	26	99	84	22	33	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	291.1	311.8	288.0	304.0	313.3	279.5	272.8	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	274.8	293.7	271.2	287.2	296.4	264.5	256.5	
Water (gm.)	16.3	18.1	16.8	16.8	16.9	15.0	16.3	
Wt. Can (gm.)	42.4	38.7	41.4	46.5	43.7	40.9	39.0	
Wt. Dry Soil (gm.)	232.4	255.0	229.8	240.7	252.7	223.6	217.5	
Water Content (%)	7.0	7.1	7.3	7.0	6.7	6.7	7.5	7.0

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.50 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2090

CEMENT. 1.98 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	511	2759.4	81.7	33.8
2	540	2916.0	81.7	35.7
3	525	2835.0	81.7	34.7
4	545	2943.0	81.7	36.0
5	511	2759.4	81.7	33.8
6	566	3056.4	81.7	37.4
7	545	2943.0	81.7	36.0
			ทดสอบที่อายุครบ 168 ชั่วโมง	Average UCS = 35.3 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.723	5.771	5.736	5.764	5.714	5.765	5.769	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.173	2.221	2.186	2.214	2.164	2.215	2.219	
Wet Density (gm./ml.)	2.282	2.333	2.296	2.325	2.273	2.327	2.331	
Dry Density (gm./ml.)	2.141	2.195	2.130	2.167	2.128	2.187	2.189	2.162

WATER CONTENT

Can No.	18	48	30	78	92	96	9	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	318.1	298.3	303.4	284.2	283.5	307.9	313.2	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	300.9	283.2	284.5	267.7	268.3	291.9	296.7	
Water (gm.)	17.2	15.1	18.9	16.5	15.2	16.0	16.5	
Wt. Can (gm.)	40.2	44.0	42.8	41.2	44.4	41.9	43.5	
Wt. Dry Soil (gm.)	260.7	239.2	241.7	226.5	223.9	250.0	253.2	
Water Content (%)	6.6	6.3	7.8	7.3	6.8	6.4	6.5	6.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.51 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2090

CEMENT. 1.98 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	595	3213.0	81.7	39.3
2	590	3186.0	81.7	39.0
3	600	3240.0	81.7	39.7
4	590	3186.0	81.7	39.0
5	580	3132.0	81.7	38.3
6	595	3213.0	81.7	39.3
7	600	3240.0	81.7	39.7
			ทดสอบที่อายุครบ 216 ชั่วโมง	Average UCS.= 39.2 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.760	5.777	5.761	5.760	5.770	5.754	5.769	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.210	2.227	2.211	2.210	2.220	2.204	2.219	
Wet Density (gm./ml.)	2.322	2.339	2.322	2.322	2.332	2.315	2.331	
Dry Density (gm./ml.)	2.180	2.190	2.162	2.180	2.179	2.192	2.189	2.182

WATER CONTENT

Can No.	65	6	38	41	46	95	93	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	284.7	280.6	306.4	289.7	305.9	298.3	304.0	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	269.2	265.5	288.1	274.5	288.5	284.7	288.0	
Water (gm.)	15.5	15.1	18.3	15.2	17.4	13.6	16.0	
Wt. Can (gm.)	30.8	43.2	41.0	40.8	39.8	42.5	42.0	
Wt. Dry Soil (gm.)	238.4	222.3	247.1	233.7	248.7	242.2	246.0	
Water Content (%)	6.5	6.8	7.4	6.5	7.0	5.6	6.5	6.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.52 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2247

CEMENT. 1.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	245	1323.0	81.7	16.2
2	205	1107.0	81.7	13.5
3	238	1285.2	81.7	15.7
4	250	135.0	81.7	16.5
5	245	1323.0	81.7	16.2

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง | Average | 15.6 | Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.787	5.790	5.788	5.828	5.800	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.237	2.240	2.238	2.278	2.250	
Wet Density (gm./ml.)	2.349	2.353	2.351	2.392	2.364	
Dry Density (gm./ml.)	2.246	2.252	2.245	2.285	2.251	2.256

WATER CONTENT

Can No.	73	30	22	43	84	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	292.9	300.0	304.8	307.8	313.3	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	281.4	288.9	293.0	295.7	300.5	
Water (gm.)	11.5	11.1	11.8	12.1	12.8	
Wt. Can (gm.)	31.0	42.8	40.9	38.7	43.7	
Wt. Dry Soil (gm.)	250.4	246.1	252.1	257.0	256.8	
Water Content (%)	4.6	4.5	4.7	4.7	5.0	4.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.53 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2247

CEMENT. 2.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	384	2073.6	81.7	25.4
2	353	1906.2	81.7	23.3
3	353	1906.2	81.7	23.3
4	331	1787.4	81.7	21.9
5	314	1695.6	81.7	20.7

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 22.9 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.774	5.776	5.787	5.765	5.792	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.224	2.226	2.237	2.215	2.242	
Wet Density (gm./ml.)	2.336	2.338	2.350	2.327	2.355	
Dry Density (gm./ml.)	2.227	2.233	2.257	2.218	2.256	2.238

WATER CONTENT

Can No.	6	31	36	21	15	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	287.5	321.0	340.3	332.1	314.1	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	276.1	308.5	328.6	318.5	302.5	
Water (gm.)	11.4	12.5	11.7	13.6	11.6	
Wt. Can (gm.)	43.2	42.0	42.8	40.0	39.1	
Wt. Dry Soil (gm.)	232.9	266.5	285.8	278.5	263.4	
Water Content (%)	4.9	4.7	4.1	4.9	4.4	4.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.54 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2247

CEMENT. 3.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	398	2149.2	81.7	26.3
2	454	2451.6	81.7	30.0
3	500	2700.0	81.7	33.0
4	483	2608.2	81.7	31.9
5	494	2667.6	81.7	32.6
		ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง	Average	30.8 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.775	5.780	5.793	5.795	5.814	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.225	2.230	2.243	2.245	2.264	
Wet Density (gm./ml.)	2.337	2.343	2.356	2.358	2.378	
Dry Density (gm./ml.)	2.243	2.244	2.248	2.259	2.267	2.252

WATER CONTENT

Can No.	18	50	99	39	14	
Wt. Can + Wet Soil (Kg.)	308.7	327.1	311.1	324.0	310.6	
Wt. Can + Dry Soil (Kg.)	297.9	315.1	299.0	312.2	298.1	
Water (gm.)	10.8	12.0	12.1	11.8	12.5	
Wt. Can (gm.)	40.2	42.5	46.5	43.8	42.4	
Wt. Dry Soil (gm.)	257.7	272.6	252.5	268.4	255.7	
Water Content (%)	4.2	4.4	4.8	4.4	4.9	4.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.55 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2247

CEMENT. 4.0 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	UCS. (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	632	3412.8	81.7	41.7
2	625	3375.0	81.7	41.3
3	555	2997.0	81.7	36.7
4	511	2759.4	81.7	33.8
5	560	3024.0	81.7	37.0

ทดสอบที่อายุ 168 ชั่วโมง Average 38.1 Kg./Sq.cm.

DENSITY

Sample No.		1	2	3	4	5	
Wt. Mold + Soil	(Kg.)	5.791	5.813	5.782	5.788	5.784	
Wt. Mold	(Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil	(Kg.)	2.241	2.263	2.232	2.238	2.234	
Wet Density	(gm./ml.)	2.354	2.377	2.345	2.351	2.347	
Dry Density	(gm./ml.)	2.257	2.270	2.250	2.245	2.248	2.256

WATER CONTENT

Can No.		48	78	25	9	92	
Wt. Can + Wet Soil	(Kg.)	297.2	290.8	349.9	331.2	362.1	
Wt. Can + Dry Soil	(Kg.)	286.8	279.6	337.5	319.3	348.7	
Water	(gm.)	10.4	11.2	12.4	11.9	13.4	
Wt. Can	(gm.)	44.0	41.2	41.8	43.5	44.4	
Wt. Dry Soil	(gm.)	242.8	238.4	295.7	275.8	304.3	
Water Content	(%)	4.3	4.7	4.2	4.3	4.4	4.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.56 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2247

CEMENT. 2.20 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	264	1425.6	81.7	17.4
2	269	1452.6	81.7	17.8
3	318	1717.2	81.7	21.0
4	338	1825.2	81.7	22.3
5	296	1598.4	81.7	19.6
6	275	1485.0	81.7	18.2
7	319	1722.6	81.7	21.1
			ทดสอบที่อายุครบ 24 ชั่วโมง	Average UCS = 19.6 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.840	5.856	5.858	5.893	5.834	5.848	5.853	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.290	2.306	2.308	2.343	2.284	2.298	2.303	
Wet Density (gm./ml.)	2.405	2.422	2.424	2.461	2.399	2.413	2.419	
Dry Density (gm./ml.)	2.282	2.298	2.313	2.353	2.296	2.305	2.313	2.309

WATER CONTENT

Can No.	34	3	48	2	78	79	6	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	340.1	325.6	303.1	305.6	302.9	283.3	280.4	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	324.9	311.1	291.1	294.1	291.8	272.3	270.0	
Water (gm.)	15.2	14.5	12.0	11.5	11.1	11.0	10.4	
Wt. Can (gm.)	42.9	42.6	41.7	43.5	44.2	38.9	43.7	
Wt. Dry Soil (gm.)	282.0	268.5	249.3	250.6	247.6	233.4	226.3	
Water Content (%)	5.4	5.4	4.8	4.6	4.5	4.7	4.6	4.9

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.57 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2247

CEMENT. 2.20 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	330	1782.0	81.7	21.8
2	320	1728.0	81.7	21.2
3	305	1647.0	81.7	20.2
4	405	2187.0	81.7	26.8
5	410	2214.0	81.7	27.1
6	325	1755.0	81.7	21.5
7	315	1701.0	81.7	20.8
			ทดสอบที่อายุครบ 72 ชั่วโมง	Average UCS = 22.8 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.800	5.732	5.740	5.701	5.714	5.672	5.723	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.250	2.182	2.190	2.151	2.164	2.122	2.173	
Wet Density (gm./ml.)	2.363	2.292	2.301	2.259	2.273	2.229	2.283	
Dry Density (gm./ml.)	2.244	2.185	2.187	2.158	2.177	2.143	2.178	2.182

WATER CONTENT

Can No.	34	3	48	2	78	79	6	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	284.7	303.2	287.5	267.6	317.0	274.1	311.7	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	272.5	291.0	275.5	257.5	305.4	265.3	299.4	
Water (gm.)	12.2	12.2	12.0	10.1	11.6	8.8	12.3	
Wt. Can (gm.)	42.1	41.3	44.1	42.9	41.5	45.1	43.2	
Wt. Dry Soil (gm.)	230.4	249.7	231.4	214.6	263.9	220.2	256.2	
Water Content (%)	5.3	4.9	5.2	4.7	4.4	4.0	4.8	4.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.58 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2247

CEMENT. 2.20 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	385	2079.0	81.7	25.4
2	360	1944.0	81.7	23.8
3	460	2484.0	81.7	30.4
4	415	2241.0	81.7	27.4
5	375	2025.0	81.7	24.8
6	470	2538.0	81.7	31.1
7	380	2052.0	81.7	25.1
			ทดสอบที่อายุครบ 120 ชั่วโมง	Average UCS = 26.9 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.827	5.840	5.832	5.846	5.846	5.835	5.761	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.277	2.290	2.282	2.296	2.296	2.285	2.211	
Wet Density (gm./ml.)	2.392	2.406	2.397	2.412	2.411	2.401	2.323	
Dry Density (gm./ml.)	2.282	2.300	2.289	2.306	2.314	2.295	2.225	2.287

WATER CONTENT

Can No.	5	31	43	50	30	15	22	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	284.6	318.9	293.6	303.2	293.7	305.1	283.9	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	273.4	306.7	282.2	291.7	283.6	293.4	273.7	
Water (gm.)	11.2	12.2	11.4	11.5	10.1	11.7	10.2	
Wt. Can (gm.)	41.0	42.0	38.7	42.5	42.8	39.0	41.2	
Wt. Dry Soil (gm.)	232.4	264.7	243.5	249.2	240.8	254.4	232.5	
Water Content (%)	4.8	4.6	4.7	4.6	4.2	4.6	4.4	4.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.59 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2247

CEMENT. 2.20 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	455	2457.0	81.7	30.1
2	450	2430.0	81.7	29.7
3	460	2484.0	81.7	30.4
4	425	2295.0	81.7	28.1
5	430	2322.0	81.7	28.4
6	450	2430.0	81.7	29.7
7	400	2160.0	81.7	26.4
			ทดสอบที่อายุครบ 168 ชั่วโมง	Average UCS = 29.0 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.820	5.854	5.838	5.844	5.827	5.801	5.853	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.270	2.221	2.186	2.214	2.164	2.215	2.219	
Wet Density (gm./ml.)	2.385	2.420	2.403	2.409	2.392	2.365	2.419	
Dry Density (gm./ml.)	2.271	2.316	2.289	2.301	2.282	2.265	2.297	2.289

WATER CONTENT

Can No.	92	73	94	97	87	66	25	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	290.5	309.6	306.4	316.7	319.7	309.5	294.3	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	278.8	297.6	293.8	304.5	307.0	297.8	281.6	
Water (gm.)	11.7	12.0	12.6	12.2	12.7	11.7	12.7	
Wt. Can (gm.)	44.5	31.1	42.2	45.1	43.0	31.3	41.9	
Wt. Dry Soil (gm.)	234.3	266.5	251.6	259.4	264.0	266.5	239.7	
Water Content (%)	5.0	4.5	5.0	4.7	4.8	4.4	5.3	4.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.60 UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH HW 2247

CEMENT. 2.20 % Factor of Proving Ring. 5.4 Kg/Div

Sample No.	Ultimate Load		Adjust Area of Specimen (Sq.cm.)	Ultimate Compressive Strength (Kg./Sq.cm.)
	Dial Reading	(Kg.)		
1	460	2484.0	81.7	30.4
2	440	2376.0	81.7	29.1
3	450	2430.0	81.7	29.7
4	500	2700.0	81.7	33.0
5	495	2673.0	81.7	32.7
6	420	2268.0	81.7	27.8
7	470	2538.0	81.7	31.1
			ทดสอบที่อายุครบ 216 ชั่วโมง	Average UCS = 30.5 Ksc.

DENSITY

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	
Wt. Mold + Soil (Kg.)	5.849	5.842	5.888	5.844	5.795	5.811	5.802	
Wt. Mold (Kg.)	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	3.550	
Wt. Soil (Kg.)	2.299	2.292	2.338	2.294	2.245	2.261	2.252	
Wet Density (gm./ml.)	2.415	2.408	2.456	2.410	2.359	2.375	2.365	
Dry Density (gm./ml.)	2.304	2.302	2.346	2.308	2.257	2.277	2.244	2.291

WATER CONTENT

Can No.	23	18	46	32	48	14	39	
Wt. Can + Wet Soil (gm.)	347.9	315.3	318.9	306.9	318.4	298.7	285.6	
Wt. Can + Dry Soil (gm.)	333.9	303.2	306.4	295.7	306.6	288.1	273.2	
Water (gm.)	14.0	12.1	12.5	11.2	11.8	10.6	12.4	
Wt. Can (gm.)	42.3	40.1	39.7	41.6	44.0	42.3	43.7	
Wt. Dry Soil (gm.)	291.6	263.1	266.7	254.1	262.6	245.8	229.5	
Water Content (%)	4.8	4.6	4.7	4.4	4.5	4.3	5.4	4.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายวรรณพงศ์ คล่องแคล่ว เกิดเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2507 จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จากวิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยาสำเร็จการศึกษาปี พ.ศ. 2529 หลังจากนั้นได้ปฏิบัติงานช่างเขียนแบบที่กองช่าง สำนักงานเทศบาลเมืองสระบุรีเป็นระยะเวลา 4 ปี จากนั้นได้บรรจุเป็นข้าราชการในตำแหน่งนายช่างโยธา 2 ฝ่ายก่อสร้างทาง สำนักทางหลวงที่ 8 กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม เมื่อปี พ.ศ. 2534 และได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาวิชา อุตสาหกรรมก่อสร้าง และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปี พ.ศ. 2543

ปัจจุบันปฏิบัติงานในตำแหน่งนายช่างโยธาชำนาญงาน ส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำนักทางหลวงที่ 8 ระหว่างปฏิบัติงานมีความสนใจในงานด้านวิศวกรรมงานทางและงานบูรณะทางหลวงโดยวิธี Pavement in-place recyclingเป็นอย่างมากทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท เพื่อพัฒนาความรู้ความสามารถ และกรมทางหลวงได้สนับสนุนทุนการศึกษา จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขา วิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปี พ.ศ. 2552

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี