อิทธิพลของการกระจายตัวของขนาดคละที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

นายอธิคมาตร์ แสงแก้ว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

อิทธิพลของการกระจายตัวของขนาดคละที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

_____

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

_____

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)
กรรมการ

_____

(ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์)
กรรมการ

_____

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อธิคมาตร์ แสงแก้ว : อิทธิพลของการกระจายตัวของขนาดคละที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของผิวทางของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (INFLUENCE OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ON UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT STABILIZED WITH PORTLAND CEMENT) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัดของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่มีการกระจายตัวของขนาดคละ (Gradation) ต่างกัน ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วิธีการศึกษาประกอบด้วย การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า จากนั้นทำการแยกขนาดคละของตัวอย่างโดยการร่อนผ่านตะแกรง จากนั้นนำวัสดุที่ค้างตะแกรงแต่ละขนาดมาจัดเกรดตามมาตรฐานด้านงานทาง ซึ่งประกอบด้วย 5 เกรด คือ เกรด เกรด ข เกรด ค เกรด ง และ เกรด จ ตัวอย่างวัสดุถูกนำไปปรับปรุงคุณภาพโดยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ร้อยละ 2, 4, และ 6 โดยน้ำหนัก และผสมน้ำที่ความชื้นเหมาะสม (Optimum water content) เก็บตัวอย่างโดยวิธีการบดอัดตัวอย่างตามมาตรฐานวิธีทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) และการทดสอบหาค่าแรงอัด ของก้อนตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน และ28 วัน จากผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่เพิ่มขึ้น และมีความแตกต่างกัน ของแต่ละขนาดคละ ตัวอย่างวัสดุที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 2 ให้ค่ากำลังอัดต่ำสุดไม่เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง ส่วนตัวอย่างวัสดุผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 4 ให้ค่ากำลังอัดที่ผ่านข้อกำหนดงานชั้นโครงสร้างทางสำหรับถนนของกรมทางหลวงชนบท (กำลังอัดมากกว่า 17.24 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) คือ ตัวอย่างวัสดุเกรด ข เกรด ค และ เกรด ง (Gradation B, C, and D) และตัวอย่างวัสดุที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 6 ให้ค่ากำลังอัดที่ผ่านข้อกำหนดงานชั้นโครงสร้างทางสำหรับถนนของกรมทางหลวง (กำลังอัดมากกว่า 24.13 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ได้แก่ ตัวอย่างวัสดุเกรด ก เกรด ข เกรด ค และ เกรด ง ส่วน เกรด จ ไม่เหมาะแก่การนำมาใช้งานเนื่องจากให้กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ถึงแม้จะเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้น

สาขาวิชา <u>การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค</u> ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ปีการศึกษา 2561 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ATHIKAMART SANGKAEW : INFLUENCE OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ON UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT STABILIZED WITH PORTLAND CEMENT. ADVISORS : ASSOC. PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph. D.

The purpose of this project aimed to study unconfined compressive strength (UCS) of reclaimed asphalt pavement (RAP) with different particle size distribution stabilized with Portland cement. The processes of this study consisted of testing the engineering properties of RAP, rearranging the RAP particle size distribution to five gradations (A, B, C, D and E). Then, the samples were stabilized by mixing with Portland cement at 2%, 4% and 6% by weight and at its optimum water content. The mixtures were compacted under modified Proctor compaction test prior to UCS test according to the specification of the Department of Rural Roads in three different curing times (7, 14 and 28 days). The results showed the UCS increases with increasing Portland cement for all gradations. The samples with only 2% of Portland cement provided the lowest UCS, which are not suitable for being the pavement base material. The UCS of samples Grade B, C, and D at the mixture of 4% of Portland cement meet the standard requirement for the modified pavement base material of the Department of Rural Roads (UCS > 17.24 ksc). Moreover, the samples Grade A, B, C and D with 6% Portland cement also meet the standard requirement for modified pavement base material of Department of Highways (UCS > 24.13 ksc). However, grade E was not appropriate for the pavement base material since it provided very low UCS for Portland cement proportions.

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature_____

Academic Year 2018 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานนี้ สำเร็จได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ และ อาจารย์ ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์ ผู้ให้แนวคิด ให้โอกาส ให้คำแนะนำรวมทั้งช่วยแก้ปัญหา ตรวจทานเนื้อหาอย่างละเอียด รวดเร็วอันเป็นความกรุณาและคุณประโยชน์ต่อผู้จัดทำเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบโครงงาน ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ กรุณาให้ข้อคิดเห็นคำแนะนำ ทำให้โครงงานนี้ถูกต้อง ครอบคลุมสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.วชรภูมิ เบญจโอฬาร คณะอาจารย์ ผู้ประสาทวิชา และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและให้โอกาสที่ดีเสมอมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งให้ความสนใจติดตามผลคืบหน้าการจัดทำโครงงาน จนสำเร็จลุล่วงตามกำหนดเวลา

ขอบคุณเพื่อนพี่น้อง รุ่นที่ 16 ทุกท่านที่ช่วยเหลือกันฝ่าฟันมาจนถึงจุดหมายปลายทาง

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ขอบคุณญาติมิตร ที่สนับสนุนและให้กำลังใจในการเรียน ช่วยเหลือให้สามารถทำโครงงานนี้สำเร็จด้วยดี ใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

อธิคมาตร์ แสงแก้ว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ฉ

สารบัญรูปภาพ ..... ช

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 1

1.3 ขอบเขตการศึกษา 2

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 2

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 3

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ประวัติงานทาง 4

2.1.1 ประวัติทางหลวง 4

2.1.2 ถนนยุโรป 5

2.1.3 ถนนสหรัฐอเมริกา 7

2.1.4 ถนนในประเทศไทย 7

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Cement Portland) 8

2.3 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) 10

2.4 การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) (มทล.) 10

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 10

3 วิธีดำเนินการวิจัย 15

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย 15

3.2 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน 15

3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย 16

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.4 ทดลองกำลังอัดแกนเดียว 17
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล 20
4.1 คุณสมบัติของแอสฟัลต์ที่ศึกษา 20
4.2 ค่าความชื้นที่เหมาะสม Optimize Moisture Content (OMC) 22
4.3 ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) 27
5 สรุปและข้อเสนอแนะ 39
5.1 สรุปผลการศึกษา 39
5.2 ปัญหาและอุปสรรค 40
5.3 ข้อเสนอแนะ 40
เอกสารอ้างอิง 41
ภาคผนวก ก 43
ประวัติผู้เขียน 49

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ระยะเวลาทำการวิจัย 1 เมษายน 2561 ถึง 30 ตุลาคม 2561 (6 เดือน) 3

3.1 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม 15

3.2 จำนวนตัวอย่างขนาดคละปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลน 2 %, 4%และ 6% 17

4.1 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม 20

4.2 ปริมาณขนาดคละของวัสดุมวลรวม สำหรับทดสอบกำลังอัดแกนเดียว 21

4.3 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบ 21

4.4 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ RAP ของ GRADATION A 22

4.5 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ RAP ของ GRADATION B 23

4.6 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ RAP ของ GRADATION C 24

4.7 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ RAP ของ GRADATION D 25

4.8 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ RAP ของ GRADATION E 26

4.9 ผลการทดสอบกำลังอัด RAP ของ Gradation A ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ 27

4.10 ผลการทดสอบกำลังอัด RAP ของ Gradation B ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ 28

4.11 ผลการทดสอบกำลังอัด RAP ของ Gradation C ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ 30

4.12 ผลการทดสอบกำลังอัด RAP ของ Gradation D ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ 31

4.13 ผลการทดสอบกำลังอัด RAP ของ Gradation E ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ 32

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างทางในยุคโรมัน	5
2.2	โครงสร้างทางยุโรป	6
2.3	รถเทียมม้า	7
2.4	โครงสร้างทางสุโขทัย	8
3.1	Sieve Analysis	16
3.2	ขนาดคละที่ได้จากการ Sieve Analysis	16
3.3	เครื่องทดสอบกำลังอัดแกนเดียว	18
3.4	แผนดำเนินงานวิจัย	19
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับ RAP ของ Gradation A	23
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับ RAP ของ Gradation B	24
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับ RAP ของ Gradation C	25
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับ RAP ของ Gradation D	26
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับ RAP ของ Gradation E	27
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation A ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%,4%และ 6%	33
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation B ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%,4%และ 6%	34
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation C ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%,4%และ 6%	34
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation D ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%,4%และ 6%	35
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation E ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%,4%และ 6%	36
4.11	ดัชนีวัดการพัฒนากำลังอัดแกนเดียว การบ่ม 7 วัน ที่ OPC 2%,4%และ 6%	36
4.12	ดัชนีวัดการพัฒนากำลังอัดแกนเดียว การบ่ม 14 วัน ที่ OPC 2%,4%และ 6%	37
4.13	ดัชนีวัดการพัฒนากำลังอัดแกนเดียว การบ่ม 28 วัน ที่ OPC 2%,4%และ 6%	38
ก.1	ตัวอย่างแอสฟัลต์เก่า Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	44

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.2 RAP มา ร่อนผ่านตะแกรง 44
ก.3 RAP ที่จัดเตรียมให้เป็น Gradation ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 45
ก.4 นำ Gradation ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำก้อนตัวอย่าง
UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (UCS) 45
ก.5 การดันก้อนตัวอย่าง UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (UCS)
ออกจาก Mold 46
ก.6 บ่มก้อนตัวอย่าง UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (UCS) 46
ก.7 ทดสอบกำลังอัดก้อน UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (UCS) 47
ก.8 ก้อนตัวอย่าง UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (UCS)
ที่ทำการทดสอบแล้ว 47
ก.9 ก้อนตัวอย่าง Gradation ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ 48

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นที่นิยมก่อสร้างทั้งภาครัฐและเอกชนมีการซ่อมแซมปรับปรุงจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องบำรุงรักษาเพื่อให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด ในแต่ละปีมีการเพิ่มขึ้นของขยะผิวทางแอสฟัลต์จากการซ่อมแซมถนนเป็นจำนวนมากจึงจำเป็นหาวิธีต่างๆ เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการซ่อมถนน การซ่อมแซมถนนผิวทางแอสฟัลต์หรือการรื้อเพื่อทำผิวทางใหม่ทำโดยการรื้อผิวทางเก่าหรือชำรุดจนถึงชั้นวัสดุชั้นพื้นทางเก่าออกก่อนจะซ่อมแซมโดยแทนที่ชั้นพื้นทางด้วยวัสดุใหม่ทั้งหมด วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์เก่านากลับมาใช้ใหม่บางส่วนโดยทำการบดอัดผสมกับชั้นพื้นทางเดิมเพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติมซีเมนต์เพื่อเพิ่มกำลัง วิธีการนี้เรียกว่า “การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) ผิวทางแอสฟัลต์ที่ถูกรื้อถอนออกจากหน้างานบางส่วนถูกนำกลับไปใช้ในการผลิตผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ได้ แต่ส่วนที่เหลือจะนำไปกองไว้ในสถานที่เก็บเป็นขยะที่ไม่ได้ใช้งาน

ผิวทางแอสฟัลต์จากการซ่อมถนนลาดยางดังกล่าวสามารถนากลับมาใช้ใหม่ในงานวิศวกรรมได้ โดยเรียกว่า “Reclaimed asphalt pavement” หรือ RAP การนำ RAP มาใช้ในงานวิศวกรรมโดยตรงอาจประสบปัญหาการใช้เนื่องจาก RAP บดอัดได้ไม่ดีและมีกำลังอัดต่ำแม้จะปรับปรุงด้วยซีเมนต์แล้วก็ตาม เนื่องจากขนาดคละไม่ดีและยางแอสฟัลต์ที่มีอยู่ในส่วนผสม อย่างไรก็ตามข้อดีของ RAP คือ มีวัสดุคัดเลือกชั้นดี เช่น หินคลุก เป็นส่วนผสมหลัก เมื่อนำมาปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์ โดยเปรียบเทียบ RAP ที่คละขนาดกัน ดังนั้น การศึกษาผลของขนาดคละกัน RAP ต่อการบดอัด ตลอดจนผลของปริมาณซีเมนต์ต่อกาลังอัดแกนเดียว เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมของวัสดุผสมและกลไกลการพัฒนากำลังอัดและความสัมพันธ์ทางสถิติที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบใช้งานวัสดุรีไซเคิลชนิดนี้ และยังเข้าใจพฤติกรรม RAPที่จะนำไปพัฒนาเพื่อหาจุดคุ้มค่าที่สุดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษากำลังอัดของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่การกระจายตัวของขนาดคละ (Gradation) ต่างกันตามมาตรฐานงานทาง ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) จากถนนทางหลวง สายมิตรภาพ หมายเลข2ช่วง อ.สีดา จ.นครราชสีมาถึง อ.พล จ.ขอนแก่น กิโลเมตร ที่ 230+500 ถึง 260+000

1.3.2 คอนกรีตปอร์ตแลนประเภท 1(Ordinary Portland Cement Type I, OPC ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15

1.3.3 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength) ตามมาตรฐาน AASHTO T.207 และ T.208

1.3.4 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ ตามข้อกำหนดของวิศวกรรมงานทาง

1.3.4.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve Analysis)

1.3.4.2 การหาขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits)

1.3.4.3 การหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Los Angeles Abrasion Test)

1.3.4.4 การบดอัด (Compaction)

1.3.5 ตัวอย่างควบคุม (Quality Control Sample, QC Sample)

อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผิวทางเก่าต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ต่อน้ำ (RAP:OPC:W) ร้อยละ โดยน้ำหนักของ RAP

มีค่าเท่ากับ ก. 100% RAP + 2.0% OPC + Water

ข. 100% RAP + 4.0% OPC + Water

ค. 100% RAP + 6.0% OPC + Water

1.3.6 บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 7,14และ28 วัน

1.3.7 วิเคราะห์กำลังอัด RAP ขนาดคละผสมคอนกรีตปอร์ตแลนด์ประเภท 1

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ทราบกำลังอัดของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่มีการกระจายตัวของขนาดคละแตกต่างกันตามมาตรฐานงานทาง ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1.4.2 ทราบความสัมพันธ์ทางด้านสถิติของกำลังอัดและการกระจายตัวของขนาดคละ ของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ตาราง 1.1 ระยะเวลาทำการวิจัย 1 เมษายน 2561 ถึง 30 ตุลาคม 2561 (6 เดือน)

ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย	พ.ค	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค
1.การหาอัตราส่วนผสม-ของขนาดคละแอสฟัลต์เก่าผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์						
2. การทดสอบกำลังอัดและศึกษาโครงสร้างทางของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์						
3. การวิเคราะห์กำลังอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ขนาดคละ						
4. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง						
5. จัดรูปเล่มและนำเสนองานวิจัย						

ระยะเวลางานวิจัยเป็นส่วนที่ต้องกำหนดเป้าหมายในการทำงานวิจัยเพื่อให้เป็นไปตามแผนที่วางไว้ต้องพยายามดำเนินการตามขั้นตอนที่วางเอาไว้ให้ได้มากที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

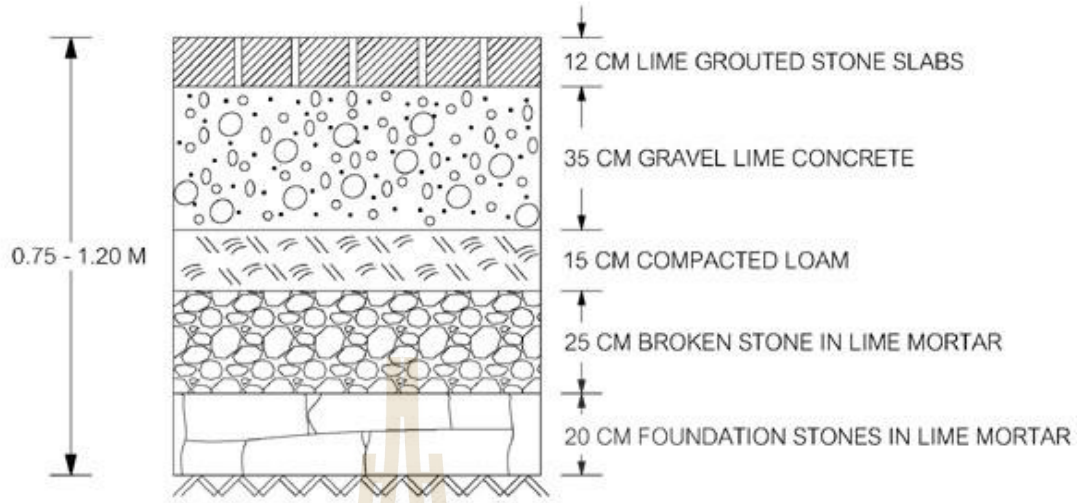
บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มนุษย์มีวิวัฒนาการ การเดินทางโดยเริ่มจากการเดินเท้าเพื่อการค้าขายการติดต่อสื่อสาร รวมถึงการทำสงคราม เมื่อมนุษย์เริ่มมีความฉลาดขึ้นได้นำสัตว์มาเลี้ยงเพื่อเป็นพาหนะช่วยในการเดินทางขนย้ายสิ่งของได้มากและรวดเร็ว ซึ่งสัตว์ที่เดินทางที่เร็วขึ้นจึงได้เกิดแนวความคิดพัฒนาปรับปรุงเส้นทางเพื่อความสะดวกสบายมากขึ้น รูปแบบการขนส่งที่โบราณที่สุด เริ่มจากการใช้ขาต่อมาก็เริ่มฝึกฝนสัตว์เพื่อใช้โดยสารหรือบรรทุกสิ่งของ สัตว์ที่เป็นพาหนะสำคัญได้แก่ ม้า อูฐ เกวียน แล้วได้เริ่มพัฒนารถม้าขึ้นพร้อมกับแนวคิดพัฒนาเส้นทางให้รวดเร็วขึ้นโดยการปรับปรุงเส้นทางเดิมและตัดเส้นทางใหม่พัฒนาจากใช้แรงงานสัตว์มาใช้เครื่องยนต์ จากถนนดินมาเป็นถนนลูกรัง หินคลุก แอสฟัลต์คอนกรีต และถนนคอนกรีต ซึ่งปัจจุบันถือว่าการก่อสร้างถนนได้มีการพัฒนาไปอย่างมากและมีคนพยายามศึกษาค้นคว้าวัสดุที่สึกหรอจากการใช้งานนำมาปรับปรุงเพื่อให้ใช้งานได้ต่อไป จึงทำการศึกษาแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์มาทำการปรับปรุงโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ศึกษาแนวคิด ทฤษฎี วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 ประวัติงานทาง

2.1.1 ประวัติทางหลวง

ยุคก่อนคริสต์ศักราช ประมาณ 3,500 ปี มีการก่อสร้างถนนด้วยหินสายแรกของโลกพบใน Mesopotamai (ดินแดนระหว่างแม่น้ำแม่น้ำไทกริสกับยูเฟรทีส ปัจจุบันคือดินแดนส่วนใหญ่ของประเทศอิรัก)และ1,900 ปี ถนนในยุคโรมันสร้างถนนเชื่อม อาณาจักรต่างๆ ถนนสายแรกคือ Appian Way จากโรม ไปถึงเมือง บรินดิซิใน อิตาลี ซึ่งโครงสร้างทาง ดังรูปที่ 2.1

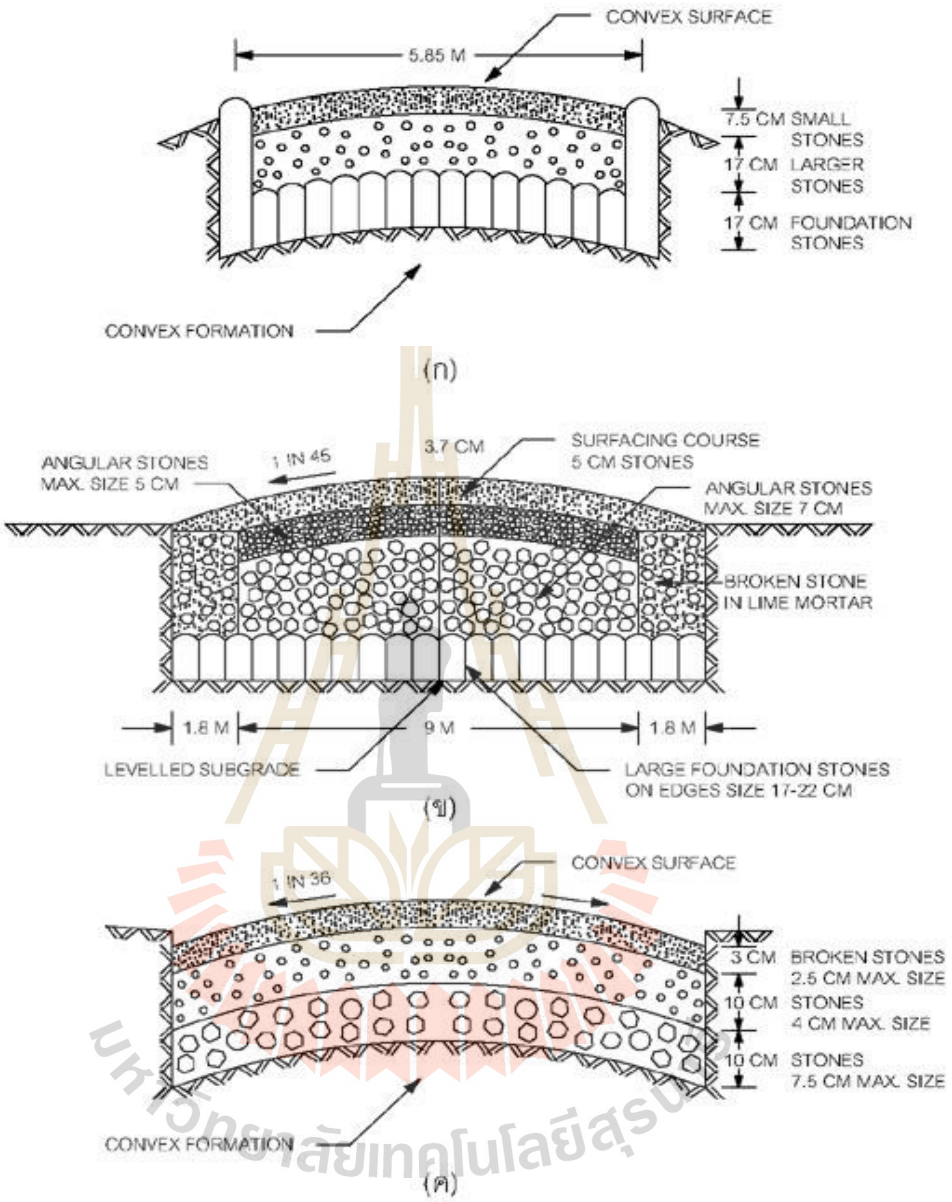


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางในยุคโรมัน
ที่มา : จิรพัฒน์ โชติกไกร(2531)

2.1.2 ถนนยุโรป

ประเทศฝรั่งเศสในศตวรรษที่ 18 (ค.ศ.1716-1796) Pierre Tresaguet ได้สร้างถนนที่คำนึงถึงความชื้นที่มีผลต่อกำลังของถนนโดยให้มีการระบายน้ำออกจากถนนและมีการบำรุงซ่อมแซมให้ถนนใช้งานได้ทุกฤดูการซึ่งโครงสร้างถนน ดังรูปที่ 2.2(ก) ประเทศสหราชอาณาจักร (ค.ศ. 1757-1834) Thomas Telford ได้สร้างถนนโดยการเรียงหินโดยใช้แรงงานคนในการก่อสร้าง ดังรูปที่ 2.2 (ข) John L.McAdam ได้พัฒนาถนนให้แข็งแรงโดยเรียงหินเป็นชั้นดังรูปที่ 1.2 (ค) ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า Macadam Road และใช้ได้ดีในปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางของยุโรป

ก. โครงสร้างทางของ Tresaguet

ข. โครงสร้างทางของ Telford

ค. โครงสร้างทางของ McAdam

ที่มา : จิรพัฒน์ โชติกไกร(2531)

2.1.3 ถนนในสหรัฐอเมริกา

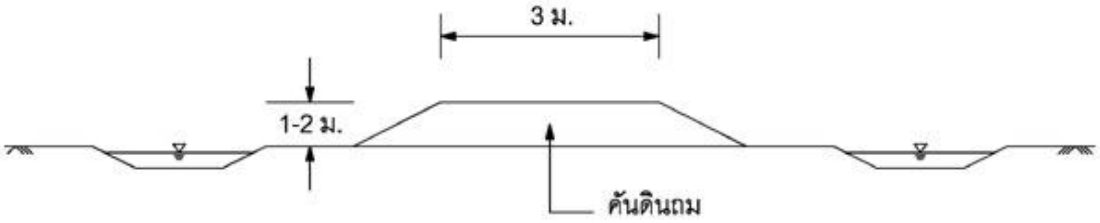
ในสมัยแรกได้สร้างถนนที่เรียกว่า Turn Pike เป็นถนนที่เก็บค่าผ่านทางสายแรกเชื่อมระหว่างรัฐเวอจิเนียร์กับรัฐฟิลาเดเฟียโดยใช้รถเทียมม้าวิ่งเริ่มสร้างกันจริงจังเมื่อ ศตวรรษที่ 20 (ค.ศ.1920) ได้สร้างถนนให้รถยนต์วิ่งจึงต้องมีการพัฒนาให้ดี ตั้งแต่ยุคนั้นเป็นต้นมาจึงมีการพัฒนาให้มีมาตรฐานสูงขึ้นเรื่อยๆให้เหมาะสมกับน้ำหนักของยานพาฒนะ มีการศึกษาค้นคว้าในด้านวิชาการให้ได้ถนนที่การรับน้ำหนักที่สูง มีความทนทาน ค่าก่อสร้างไม่แพง การบำรุงรักษาต่ำดังรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 รถเทียมม้า
ที่มา : กรมทางหลวง (2545)

2.1.4 ถนนในประเทศไทย

พ.ศ.1880-1890 ได้สร้างถนนเป็นทางเกวียนที่ใช้โค กระบือ ลากจูงสินค้า ขนคนจากไร่นากลับบ้านพระยา ลิไททรงสร้างถนนดินคันทางนอกเมืองครั้งแรก ได้ตั้งชื่อว่า ถนน พระร่วง ลักษะเป็นคันดินสูงประมาณ 1-2 เมตรกว้างประมาณ 3 เมตร จากสวรรคโลกไปสุโขทัยและไปกำแพงเพชร จากสุโขทัย ไปศรีสัชนาลัยและได้มีการพัฒนาถนนมาอย่างต่อเนื่องซึ่งถนนปัจจุบันเป็นถนนที่คุณภาพดีซึ่งได้แก่ถนนคอนกรีตและถนนแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางสมัยสุโขทัย
ที่มา : จิรพัฒน์ โชติกไกร(2531)

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ (Cement Portland) (http://www.scgbuildingmaterials.com)

คือ ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งที่ นิยมใช้แพร่หลายทั่วโลกในงานก่อสร้างปัจจุบัน เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตคอนกรีต ปูนมอร์ตาร์ และปูนสูตรพิเศษประเภทต่างๆ มีส่วนผสมหลัก คือ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย รวมถึงการเพิ่มสารอื่นๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ เช่น ยิปซัม สารปอซโซลาน สารลดน้ำ เป็นต้น การผลิตเริ่มต้นด้วยการบดวัตถุดิบให้เป็นผงละเอียด และนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงจนได้เม็ดปูนซีเมนต์ซึ่งจะถูกนำไปบดเป็นปูนซีเมนต์ผงเพื่อบรรจุในถุงหรือขนส่งทางยานพาหนะต่อไป

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกคิดค้นและผลิตโดยชาวอังกฤษชื่อ Joseph Aspdin โดยชื่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีที่มาจากสีของปูนซีเมนต์ที่ได้เหมือนกับสีของหินปูนบนเกาะปอร์ตแลนด์ ทั้งนี้ มาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของไทย คือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือ มอก.15 เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ ซึ่งทั้งหมดได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

ประเภท 1 (Type 1) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบพื้นฐานที่ใช้กับงานก่อสร้างทั่วไป เช่น ใช้ทำคานคอนกรีต เสาอาคารทั่วไป ถนน สะพาน ฯลฯ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่พบเห็นในท้องตลาด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร (เม็ดเดียว) ตราพญานาคเศียรเดียวสีเขียว ตราทีพีไอ (สีแดง)

ประเภท 2 (Type 2) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีความทนทานต่อซัลเฟตปานกลาง ใช้กับงานโครงสร้าง ขนาดใหญ่ในบริเวณที่โดนน้ำเค็มในระดับไม้สูงนัก เช่น งานตอม่อสะพานเทียบเรือ เขื่อน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ที่พบเห็นในท้องตลาด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร

ประเภท 3 (Type 3) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูงเร็ว (High Early

Strength Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีเนื้อปูนละเอียดเป็นพิเศษ มีผลทำให้ปูนแข็งตัวและรับแรง ได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่น มักใช้กับงานที่ต้องการความเร่งด่วนหรือต้องการถอด รื้อแบบเร็วกว่าปกติ เช่น งานทำเสาเข็ม พื้นสำเร็จรูป เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่พบเห็นในท้องตลาด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคเศียรเดียวสีแดง ตราทีพีไอ (สีดำ)

ประเภท 4 (Type 4) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement)เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่ค่อยใช้กันแพร่หลายนัก มักใช้กับงานเฉพาะด้านที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ เช่น การทำเขื่อนกั้นน้ำ ซึ่งต้องควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำในช่วงที่ปูนกำลังแข็งตัวไม่ให้มีมากจนเกินไป เพราะอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวหรือ เสียหายต่อตัวเขื่อนได้ จึงต้องใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเกิดความร้อนต่ำ

ประเภท 5 (Type 5) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตสูง (Sulfate Resistance Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่มีความต้านทานต่อซัลเฟตสูงเหมาะสำหรับใช้กับงานก่อ สร้างในบริเวณที่มีซัลเฟตสูง เช่น งานตอม่อหรือเสาในบริเวณที่อยู่ใกล้ชายทะเล ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่พบเห็นในท้องตลาด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม ตราช้างพื้น สีฟ้า ตราทีพีไอ (สีฟ้า)

นอกจากนี้ ยังมีปูนซีเมนต์ผสมหรือปูนซีเมนต์ซิลิกาซึ่งได้จากการนำเอาทรายหรือหินปูนบดละเอียดผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดาในอัตราส่วนประมาณ 1 : 4 บรรจุขายเป็นปูน อีกประเภทหนึ่งซึ่งมีคุณภาพและราคาต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา มีคุณสมบัติแข็งตัวช้า จึง เหมาะสำหรับงานปูนก่อ ปูนฉาบ ปูนตกแต่ง และงานคอนกรีตที่ไม่ต้องรับแรงมาก อย่างไรก็ตาม ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ก็ยังคงมีผู้นำมาใช้กับงานโครงสร้างทั่วไป เช่น การทำเสาและคาน เนื่องจากมีราคาถูก แต่ก็สามารถใช้ได้กับโครงสร้างขนาดเล็กเท่านั้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ที่พบเห็นในท้องตลาด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเสือ ตรางูเห่า ตรานกอินทรี และตราทีพีไอ (สีเขียว)

นอกจากปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ ที่ได้กล่าวถึงไปแล้วข้างต้น ยังมีปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่พบ เห็นในงานก่อสร้างอยู่เสมอได้แก่ปูนซีเมนต์ขาวซึ่งก็คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดหนึ่งเพียงแต่มีลักษณะ เป็นสีขาวและมีคุณสมบัติในการแข็งตัวค่อนข้างช้า เน้นการใช้สอยในแง่ของการตกแต่งมากกว่าการใช้ ทำเสาหรือคานเพื่อรับน้ำหนัก มักใช้ในงานเกี่ยวกับการทำหินขัด ทรายล้าง งานติดตั้งสุขภัณฑ์และ งานยาแนวรอยต่อของกระเบื้อง หรือใช้ในงานที่ต้องการผสมสีต่างๆ เพื่อความสวยงาม ปูนซีเมนต์ ชนิดนี้ที่พบเห็นในท้องตลาด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ขาวตราช้างเผือก ปูนซีเมนต์ขาวตราเสือ

2.3 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)

แอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง วัสดุทำผิวทางหรือพื้นทางบดอัดแน่น ซึ่งได้จากการผสมกันระหว่างวัสดุมวลรวม (Aggregate) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) ตามอัตราส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้ โดยในการผสมกันนี้จะต้องให้ความร้อนทั้งวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์จนได้อุณหภูมิตามที่กำหนดเสียก่อนเมื่อผสมเข้ากันดีแล้ว จึงนำไปใช้งานพร้อมบดอัดให้แน่นและเรียบขณะที่ยังร้อนอยู่ ตาม มทช.230–2545 : มาตรฐานงานแอสฟัลต์คอนกรีต(กรมทางหลวงชนบท) แอสฟัลต์มีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด มีอำนาจ การยึดสูงหรือเป็นกึ่งของแข็งสีดำ หรือสีน้ำตาลแก่แกมดำ เป็นของ ผสมระหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และสารอินทรีย์อื่นๆได้มาจากขบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม โดย แอสฟัลต์จะเป็นส่วนของน้ำมันดิบที่หนักที่สุด และจะถูกนำไปผ่าน ขบวนการผลิตแอสฟัลต์ต่อไป เพื่อให้ได้แอสฟัลต์ที่มี คุณสมบัติต่างๆ ตามต้องการผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงจะแอสฟัลต์คอนกรีตอ่อนตัวในขณะที่อุณหภูมิต่ำแอสฟัลต์คอนกรีตจะแตกเปาะ อีกทั้งปริมาณการจราจรและน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดปัญหาการชำรุดเสียหายเร็วกว่าปกติ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมและบำรุงรักษาสูงมากขึ้น ซึ่งลักษณะความเสียหายที่พบมีดังนี้

2.4 การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) (มทล.)

Pavement Recycling หมายถึง การนำวัสดุจากชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำมาใช้งานใหม่ โดยให้มีคุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด ในการนี้อาจจะเพิ่มวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงขนาดคละและเพิ่มปริมาณ เช่น หิน ทราย วัสดุมวลรวม ฯลฯ และวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และสารผสมเพิ่มอื่นใด ทั้งนี้ในการปรับปรุงอาจจะกระทำได้ทั้งในที่ (In-Place) หรือที่โรงงาน (Central Plant) หรือทั้งในที่และที่โรงงานด้วย ขึ้นอยู่กับการกำหนดไว้ในรูปแบบ โดยจะต้องก่อสร้างให้ถูกต้องตามขั้นตอนและปิดทับด้วยผิวทางใหม่ การปรับปรุงชั้นทางอาจจะทำการปรับปรุงเพียงชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พนมและคณะ (2547) ได้ทำาการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางที่เป็นหินคลุก หินคลุกผสมวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า และวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าด้วยปูนซีเมนต์ ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ได้ดำเนินการวิจัย 3 กรณีศึกษาคือ 1) นำเอาหินคลุกผสมปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ปริมาณระหว่างร้อยละ 1 ถึง 5 2) วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมหินคลุก ในอัตราส่วน 1:1 ผสมปูนซีเมนต์ปริมาณระหว่างร้อยละ 1 ถึง 5 3) ใช้วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมปูนซีเมนต์ปริมาณระหว่างร้อยละ 4 ถึง 12 เมื่อได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมแล้ว คณะผู้ดำเนินการวิจัยได้น้าไปใช้ในการซ่อมถนนจริง ในทางหลวงหมายเลข 2175 ที่กม. 11+875 และกม.20+610 จ้านวน 3 แปลง แต่ละแปลงมี 3 แปลงเล็กตามชนิดของพื้นทาง ตรวจสอบการยุบตัวของผิวทางทุก 7 วันเป็นเวลา 9 สัปดาห์ มีผลการยุบตัวของทั้งสามกรณีศึกษาของพื้นทางเป็นที่ยอมรับได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบราคาต่อหน่วยแล้ว ปรากฏว่าพื้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมที่มีราคาต่ำที่สุดจึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุผสมทำพื้นทางในการซ่อมบำรุงทาง

ณัฐวุฒิและคณะ (2552) ได้ทำการศึกษา การปรับปรุงผิวแอสฟัลต์ที่ถูกขุดรื้อจากชั้นทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่ ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ได้ดำเนินการวิจัย 5 กรณีศึกษาคือ 1) นำเอาหินคลุกผสมปูนซีเมนต์ปริมาณระหว่างร้อยละ 1 ถึง 5 2) วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมหินคลุก ในอัตราส่วน 1:3 ผสมปูนซีเมนต์ปริมาณระหว่างร้อยละ 1 ถึง 5 3) วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมหินคลุก ในอัตราส่วน 1:1 ผสมปูนซีเมนต์ปริมาณระหว่างร้อยละ 1 ถึง 5 4) วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมหินคลุก ในอัตราส่วน 3:1 ผสมปูนซีเมนต์ปริมาณระหว่าง 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ 5) วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ผสมปูนซีเมนต์ปริมาณระหว่างร้อยละ 4 ถึง 12 การวิจัยนี้เป็นการทดสอบหากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ที่อายุบ่ม 7 วัน ไม่น้อยกว่า 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามมาตรฐานการก่อสร้างชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง ผลการวิจัยปรากฏว่าหินคลุกเก่าผสมกับผิวแอสฟัลต์เก่าในอัตราส่วน 3:1 ใช้ปูนซีเมนต์ผสมในปริมาณ 2.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยกว่าในทุกอัตราส่วน

อนิรุทธิ์ สุขแสน (2556) ได้ศึกษา สุขแสนกำลังอัดแกนเดียวของดินผสมผิวทางแอสฟัลต์ที่นำกลับใช้ใหม่และปรับปรุงด้วยซีเมนต์ งานวิจัยนี้ เสนออิทธิพลของปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ต่อพฤติกรรมการบดอัด กำลังอัดแกนเดียว (q_u) ของดินผสมผิวทางแอสฟัลต์ที่ นำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed asphalt pavement, RAP) ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ การบดอัดและการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำเหมาะสมสำหรับการบดอัดมีแนวโน้มลดลงจนถึงจุดเหมาะสมที่ดินต่อ RAP เท่ากับ 50/50 เมื่อปริมาณ RAP มากกว่าจุดเหมาะสม หน่วยน้ำหนักแห้งจะลดลงตามปริมาณ RAP ที่เพิ่มขึ้น ปริมาณ RAP ในวัสดุผสมมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียด ตลอดจนกำลังประลัยภายใต้การทดสอบการรับแรงอัดแกนเดียว การลดลงของกำลังอัดและความแกร่งของวัสดุผสมสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณ RAP สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณซีเมนต์นั้น กับซีเมนต์เชื่อม

ประสานลดลง Asphalt fixation point เป็นจุดจำกัดของปริมาณแอสฟัลต์ ซึ่งแบ่งระหว่างโซน Inert และโซน Deterioration Asphalt fixation point สำหรับการศึกษานี้ คือ ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากับร้อยละ 3.5 (หรืออัตราส่วนดินต่อ RAP เท่ากับ 50/50)

D.J. Lyons. (1967) ได้ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผสมยางพาราธรรมชาติกับวัสดุแอสฟัลต์ พบว่ากรณีใช้น้ำยางพาราควรทำการผสมที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 140 – 170 องศาเซลเซียส โดยจะขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุแอสฟัลต์ที่นำมาใช้ สำหรับการเก็บรักษาส่วนผสมของแอสฟัลต์ที่ผสมยางธรรมชาตินั้น ควรหลีกเลี่ยงการจัดเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน เนื่องจากจะทำให้ส่วนผสมเกิดการแยกตัวและสูญเสียคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดเก็บไว้ในที่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส

วิสุทธิ์ ศุกลรัตน์. (2543) ได้รายงานว่าสถาบันวิจัยยางอินเดียได้เริ่มทดลองใช้น้ำยางสดผสมแอสฟัลต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ราดถนนระหว่างเมืองทรีวานดรัมและโคตายัมโดยราดถนนเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตรเปรียบเทียบกับถนนราดแอสฟัลต์ธรรมดาปรากฏว่าถนนราดแอสฟัลต์ต้องซ่อมผิวถนนใหม่ในอีก 5 ปีต่อมาและในปีที่ 10 ก็ซ่อมครั้งที่ 2 ในขณะที่ถนนที่ราดด้วยแอสฟัลต์ผสมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ยังมีสภาพดีจนถึงปีที่ 14 และได้มีการขยายผลไปทั่วประเทศ ซึ่งจากข้อมูลหลายการทดลองสรุปได้ว่าการผสมยางธรรมชาติยืดอายุถนนได้อย่างน้อยร้อยละ 50 โดยค่าใช้จ่ายในการราดผิวถนนเพิ่มขึ้นร้อยละ 16 เมื่อผสมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 2 กับแอสฟัลต์

Alonso et al. (1999) ได้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยขณะที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายด่าง พบว่า ส่วนมากอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical) ขนาดต่างๆ กัน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายด่าง อนุภาคของเถ้าลอยได้ถูกกัดกร่อนที่บริเวณผิวของทรงกลมก่อนที่จะขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยาทั้งภายใน และภายนอกอนุภาคทรงกลม จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) แสดงถึงส่วนของอนุภาคที่ทำปฏิกิริยาซึ่งมีลักษณะเป็นเฟสที่เกิดขึ้นใหม่บนอนุภาคของเถ้าลอย นอกจากนั้นก็ยังสังเกตเห็นอนุภาคบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ เถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง ขนาดอนุภาคของเถ้าลอย ระยะเวลาการบ่มและการผสม จากการทดลอง พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมก้อนจีโอโพลิเมอร์ และนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ทำให้จีโอโพลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นผืนผนึกติดกันคล้ายกับเนื้อของแก้ว

สิทธิชัย และคณะ (2548) ได้ศึกษาการใช้ยางธรรมชาติเพื่อพัฒนางานคอนกรีต โดยศึกษาหาเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการผสมน้ำยางพาราในคอนกรีต ซึ่งได้ศึกษาความสามารถเทได้

(Workability) ของน้ำยางพาราที่ผสมกับคอนกรีต หลังจากนั้นนำมาหล่อแบบแล้วหาค่ากำลังอัด (compressive strength) และค่ากำลังดัด (Flexural strength) สัดส่วนของน้ำ ยางพาราต่อคอนกรีต (P/C) ที่ศึกษาได้แก่ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 ตามลำดับ และส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ คือ ซีเมนต์:ทราย:หิน (1:2:4) โดยน้ำหนัก วิธีการผสมน้ำยางพารากับคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วน้ำยางพารากับคอนกรีตจะเข้ากันได้ยากจึงต้องมีการผสมสารลดแรงตึงผิว สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic surfactants) คือ Lutensol XL 80 (C10–guerbet alcohol alkoxylate) ในสัดส่วนร้อยละ 4 ของน้ำหนักของซีเมนต์ เมื่อผสมคอนกรีตตามสูตร แล้วนำมาทดสอบค่าการยุบตัว (Slump test) จากนั้นหล่อเข้าแบบมาตรฐาน (รูปลูกบาศก์ และรูปคาน) แล้วทำการบ่มชื้นเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นทำการบ่มแห้งในอากาศเป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับแล้วทดสอบค่ากำลังอัดและค่ากำลังดัด ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตผสมน้ำยางพาราจะมีกำลังอัดลดลงประมาณร้อยละ 60 และเมื่อปริมาณน้ำยางพาราเพิ่มขึ้นการรับกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง สำหรับค่ากำลังดัดพบว่า ลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่อสัดส่วนน้ำยางพาราต่อซีเมนต์ (P/C) ที่เพิ่มขึ้นและเมื่อศึกษาระยะเวลาการบ่มแห้งในอากาศเพิ่มเป็น 14 และ 28 วัน ที่สัดส่วนน้ำยางพาราต่อซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 0.15 และ 0.20 พบว่าคอนกรีตผสมน้ำยางพาราจะมีค่ากำลังดัดของสูงกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากอนุภาคเนื้อยางเกาะตัวกันเป็นชั้นฟิล์ม (Film) ที่แข็งแรงขึ้น

ดังนั้นการใช้งานคอนกรีตผสมน้ำยางพารา ยังไม่เหมาะกับงานโครงสร้างที่ต้องรับแรงอัดมาก แต่อาจเหมาะกับงานซ่อมแซม หรือเหมาะกับงานคอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนังที่ไม่รับแรงอัดมาก ซึ่งการยืดเหนี่ยวของน้ำยางพาราจะมีประโยชน์ในการเป็นตัวประสานกับคอนกรีตเดิม อย่างไรก็ตาม การขจัดฟองอากาศและการก่อตัวช้าในคอนกรีตยังเป็นปัญหาสำคัญที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาให้คอนกรีตมีกำลังอัดและการก่อตัวใกล้เคียงคอนกรีตปกติเพื่อให้สามารถนำมาใช้ในงานโครงสร้างอื่นได้ต่อไป

Tuntiworawit, N. (2003) ได้ศึกษาลักษณะสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตซีเมนต์ธรรมดากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมน้ำยางพาราเข้มข้น (NRA) ในปริมาณร้อยละ 1 – 14 และนำไปผสมกับวัสดุมวลรวมเพื่อนำไปทดสอบ เช่น แรงดึงทางอ้อม, โมดูลัสคืนตัว, ความล้า, การยุบตัวถาวรและการหลุดออก จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุ NRA มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาพบว่าปริมาณน้ำยางข้นที่เหมาะสมในการผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์คือร้อยละ 9 กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมมาคม เสนอโดยสถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ผสมยางพาราโดยใช้อัตราส่วนการผสมที่ร้อยละ 5 ,7 และ 9 หาค่า Penetration การทดสอบจุดอ่อนตัว (Softening point) การทดสอบความหนืด

Rotational Viscosity Test และการทดสอบ Thin Film Oven Test (RTFO) การทดสอบจุดวาบไฟ (Flash Point) ผลการทดสอบพบว่าแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่อัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมคือร้อยละ 5

จิระยุทธ สืบสุข.และคณะ (2016)งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงดินเกือบตกชั้นคุณภาพด้วยการผสมผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล (Recycled asphalt pavement, RAP) และซีเมนต์ ดินที่ถูกปรับปรุงนี้ถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ การศึกษาทำโดยทดสอบ การรับแรงอัดแกนเดียวและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมภายใต้สัดส่วนผสมต่าง ๆ จากผลการทดสอบพบว่า ปริมาณ RAP เพิ่มขึ้นแล้วกำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าดินผสม RAP จะถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ แต่การลดลงอย่างมากของกำลังอัดแกนเดียวสามารถพบได้อย่างชัดเจนกับตัวอย่างที่มีปริมาณ RAP มากกว่าร้อยละ 50 ยาง แอสฟัลต์ใน RAP ขัดขวางผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในการเกาะยึดกับมวลดิน

ชยกฤต เพชรช่วย (2553) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) มาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ โดยใช้ Alkaline activator และเถ้าลอยในการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวปนตะกอนทราย (Silty clay) ผลการทดลองพบว่าค่า Maximum soaked strength ของตัวอย่าง Clay-FA Geopolymer อัตราส่วนของ Na_2SiO_3/น้ำ เท่ากับ 0.6 อัตราการเพิ่มเถ้าลอยที่ใช้ผสมร้อยละ 15 และบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดและสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงประเทศไทย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

เก็บตัวอย่างวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม ได้แก่การทดสอบขนาดของเม็ดวัสดุ (Sieve Analysis) การทดสอบการบดอัด (Compaction) เพื่อหาค่าความหนาแน่นสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม การทดสอบหาค่าขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) หาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Los Angeles Abrasion Test) และการทดสอบค่าแคลิฟอร์เนีย แบริ่งเรโช (California Bearing Ratio, CBR) เตรียมตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วนผสมต่างๆ แล้วนำไปบ่มที่ระยะเวลาและอุณหภูมิตามที่กำหนด เพื่อเตรียมทดสอบค่ากำลังอัด (Compressive Strength) แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลการทดสอบ

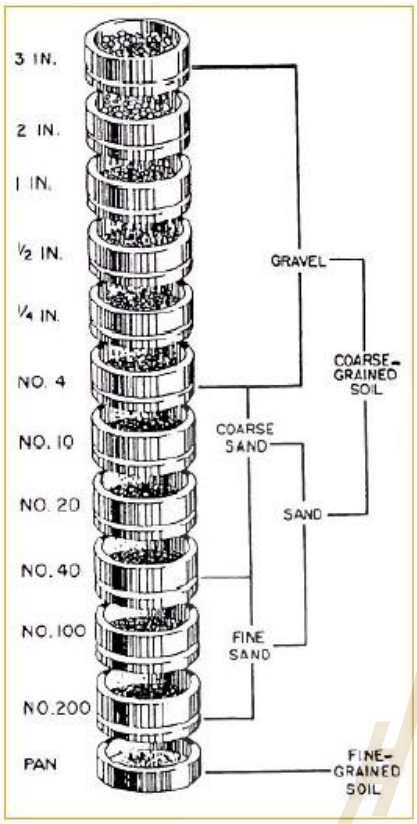
3.2 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน

คุณสมบัติพื้นฐานทางด้านวิศวกรรม ตามมาตรฐานการทดลองวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.205/2517 ขนาดคละที่นำมาใช้ ตามตารางที่ 3.1 ดำเนินการตามมาตรฐานการทดสอบดังนี้ หาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ลักษณะของ Sieve Analysis ตามรูปที่ 3.1 และหลังจากผ่าน Sieve แล้วจะแยกขนาดตามตารางที่ 3.2

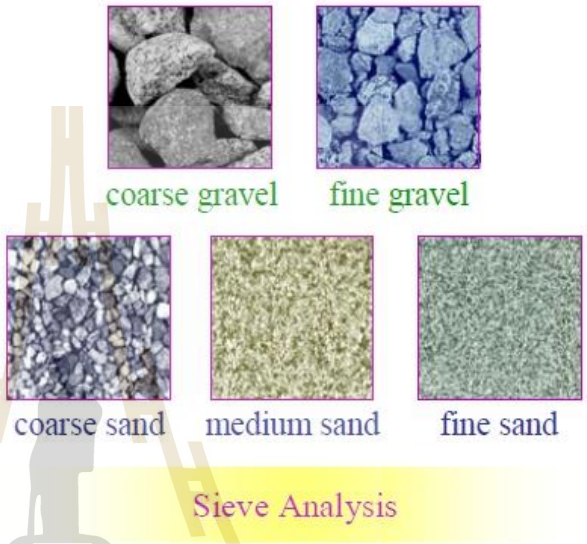
ตาราง 3.1 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร		ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล				
		A	B	C	D	E
50	(2")	100	100	-	-	-
25.0	(1")	-	-	100	100	100
9.5	(3/8")	30-65	40-75	50-85	60-100	-
2.00	(เบอร์ 10)	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
0.425	(เบอร์ 40)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
0.075	(เบอร์ 200)	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20

(ที่มา: กรมทางหลวง 2532)



รูปที่ 3.1 Sieve Analysis
ที่มา : ชูศักดิ์ คีรีรัตน์ 2554



รูปที่ 3.2 ขนาดคละที่ได้จาก Sieve Analysis
ที่มา : ชูศักดิ์ คีรีรัตน์ 2554

การทดลองค่า Liquid Limit ตามวิธีทดลองที่ ทล.-ท. 102/2515 "วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit(L.L.) ของดิน" ไม่เกินร้อยล่ะ 35

การทดลองค่า Plasticity Index ทดลองตามวิธี ทล.-ท. 103/2515 วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit และ Plasticity Limit ไมเกินร้อยล่ะ 11

การทดลองหาค่า CBR ทดลองตามวิธี ทล.-ท. 109/2517 วิธีการทดลองหาค่า CBR ไม่น้อยกว่าร้อยล่ะ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 "วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงมากกว่ามาตรฐาน"

3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

นำแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามาหาขนาดคละโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง แล้วเตรียมขนาดคละของมวลรวมตาม ตาราง 3.1 เพื่อนำมาสร้างตัวอย่างในการทดลองโดยการปรับด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ทดลองหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามมาตรฐานการทดลองวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.105/2515 ของดิน ดำเนินการตามมาตรฐาน

การทดสอบ “การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน” ตามมาตรฐานการทดลองวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108/2517สร้างตัวอย่างทดสอบโดย นำขนาดคละ A B C D E ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 %, 4% และ 6% โดยมวล โดยการบ่มก้อนตัวอย่าง 7 วัน จะได้ตัวอย่างตามตารางที่ 3.2 นำตัวอย่างที่ได้นำไปทดสอบหากำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่มีขนาดคละกัน หาความสัมพันธ์ของส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนและขนาดคละกับกำลังอัดก้อนตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างขนาดคละปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลน 2 %, 4% และ 6%

ขนาดคละ	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	จำนวนตัวอย่าง
A	2%,4%,6 %	3,3,3
B	2%,4%,6 %	3,3,3
C	2%,4%,6 %	3,3,3
D	2%,4%,6 %	3,3,3
E	2%,4%,6 %	3,3,3

3.4 ทดลองกำลังอัดแกนเดียว

กำลังอัดแกนเดียวของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าปรับปรุงด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดำเนินการตามมาตรฐานการทดสอบดังนี้ ตามมาตรฐาน ซึ่งแท่งตัวอย่างทดสอบจะถูกบดอัดในแบบวิธีการทดลองที่ ทล.- ท.108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ภายหลังการบ่มในถุงพลาสติกเพื่อมิให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงนาน 7 วัน นำแท่งตัวอย่างทดสอบออกจากถุงพลาสติก แช่น้ำไว้นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำแท่งตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การทำสอบตัวอย่างดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

อนิรุทธิ์ สุขแสน (2556)

ค่ากำลังแกนเดียว หาได้จากสมการที่ 3.1

สมการ

$$Y = ((2.897X)+2.844)*2.205 \quad lb/mm \qquad .....(3.1)$$

X = ค่าที่อ่านได้จาก dial gauge

Y = Ultimate Load lbs.

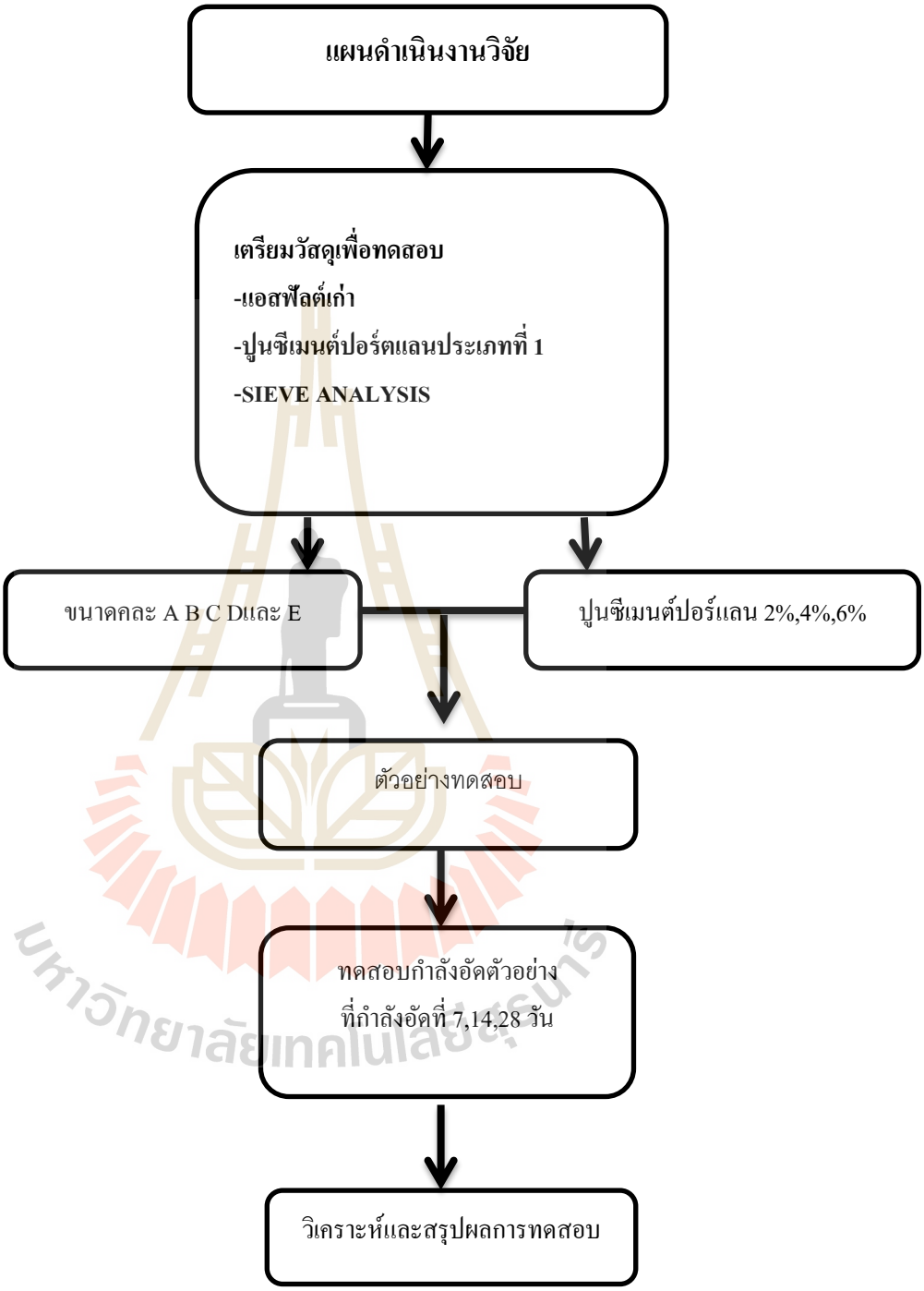
H = ความสูง Mold mm.

A = พื้นที่หน้าตัด Mold mm^2

Uc = Y/H Ultimate load (lb/mm^2) และ(kg/cm^2)

$Avg.U_C$ = ค่าเฉลี่ย Uc

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.4 แผนดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติของแอสฟัลต์เก่าที่ศึกษา

แอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ได้จากการกัดไสผิวทางเก่า มาเก็บกอง นำมาปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 โดยนำแอสฟัลต์คอนกรีต ที่นำมาจากทางหลวงหมายเลข 2 ถนน มิตรภาพ ช่วง กม.230+000 กม.-.260+000 กม. มาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 mm.(2”), 25mm(1”), 9.5 mm(3/8”), 2 mm.(#10), 0.425(#40), 0.075(#200) แล้วนำมาจัดสัดส่วน ตามขนาด GRADATION A, B, C, D, E ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ 2%, 4%, 6% เพื่อศึกษาการกระจายตัวของขนาดคละที่ผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของ แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า แสดงในตาราง 4.1 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม GRADATION ต่างๆ และกำหนด ปริมาณ GRADATION เพื่อทำการก้อนตัวอย่างกำลังอัด ดังตารางที่ 4.2

ตาราง 4.1 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตระแกรงโดยมวล				
	A	B	C	D	E
50 (2")	100	100	-	-	
25 (1")	-	-	100	100	100
9.5 (3/8)	30-65	40-75	50-58	60-100	-
2.0 (เบอร์ 10)	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
0.425 (เบอร์ 40)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
0.075 (เบอร์ 200)	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตาราง 4.2 ปริมาณขนาดคละของวัสดุมวลรวม สำหรับทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตระแกรงโดยมวล				
	A	B	C	D	E
50 (2")	100	100	-	-	
25 (1")			100	100	100
9.5 (3/8)	45	60	55	80	-
2.0 (เบอร์ 10)	30	32	35	55	70
0.425 (เบอร์ 40)	15	23	20	35	35
0.075 (เบอร์ 200)	5	13	10	10	13

นำวัสดุมวลรวมตาม GRADATOIN A ,B ,C, D, E มาผสมกับปูน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แล้วเก็บก้อนตัวอย่างเพื่อทดสอบที่ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน อย่างละ 3 ก้อน ซึ่งรวมทั้งหมด 135 ก้อน ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

ทดสอบตัวอย่างที่(วัน)	จำนวนก้อนตัวอย่าง				
	A	B	C	D	E
Cement 2% Cur.7 Day	3	3	3	3	3
Cement 2% Cur.14 Day	3	3	3	3	3
Cement 2% Cur.28 Day	3	3	3	3	3
Cement 4% Cur.7 Day	3	3	3	3	3
Cement 4% Cur.14 Day	3	3	3	3	3
Cement 4% Cur.28 Day	3	3	3	3	3
Cement 6% Cur.7 Day	3	3	3	3	3
Cement 6% Cur.14 Day	3	3	3	3	3
Cement 6% Cur.28 Day	3	3	3	3	3
Total	27	27	27	27	27
	135				

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2 ค่าความชื้นที่เหมาะสม Optimize Moisture Content (OMC)

ค่าความชื้นที่เหมาะสม Optimize Moisture Content (OMC)และความหนาแน่นสูงสุด (p_{dmax}) ของ RAP ใน Gradation A ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 -4.8 และรูปที่ 4.1 – 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับ RAP ของ GRADATION A ,B ,C ,D ,E ได้ค่าดังนี้ 7.8%, 9.6%, 9.9%, 10.5% และ10.8%

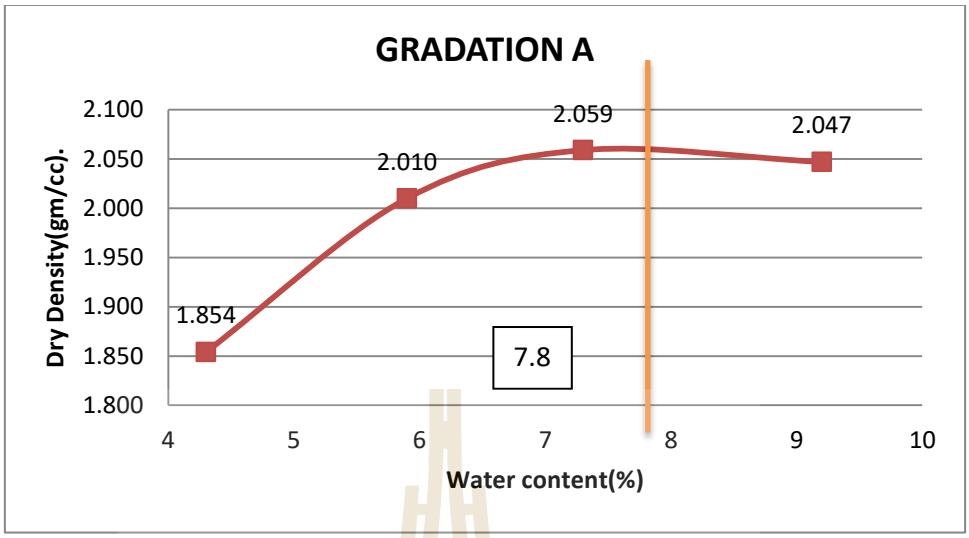
ตาราง 4.4 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ RAP ของ GRADATION A

Density	**Gradation A**					
Trial (Water added)	%	4	6	8	10	12
Wt.Moltd+Soil	gm.	6351	6546	6626	6652	6640
Wt.Mold	gm.	4417	4417	4417	4417	4417
Wt.Soil	gm.	1934	2129	2209	2235	2223
Wet Density	gm./ml.	2.064	2.272	2.358	2.385	2.372
Dry Density	gm./ml.	1.854	2.01	2.059	2.047	1.99

Water Content

Wt.Can+Wet.Soil)	(gm.)	154	172	160	170	163
Wt.Can+Dry.Soil	(gm.)	149	164	151	158	149
Wt.water	(gm.)	5	8	9	12	14
Wt.Can	(gm.)	34	29	28	28	29
Wt.Dry Soil	(gm.)	115	135	123	130	120
Water Content	%	4.3	5.9	7.3	9.2	11.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

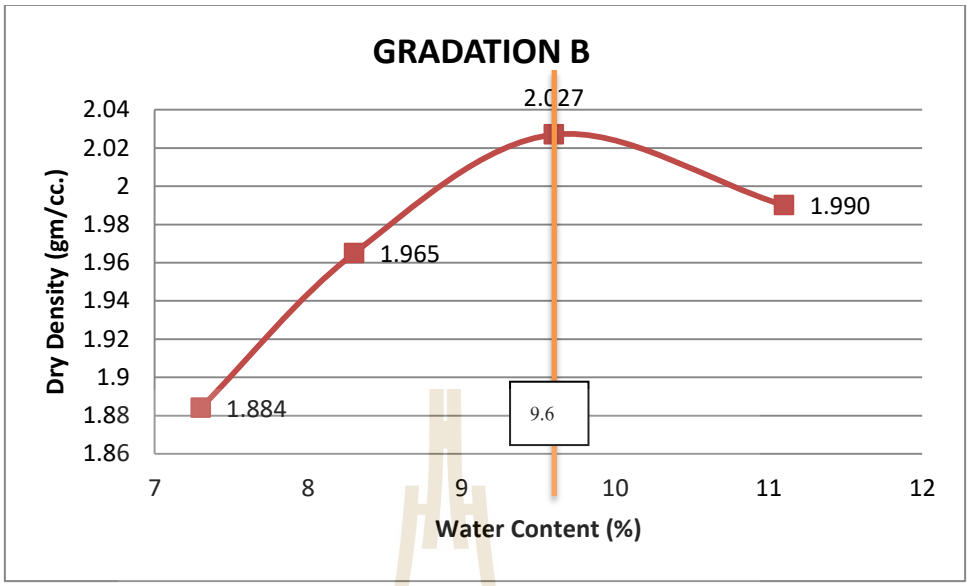


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง
และปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับ RAP ของ Gradation A

ตาราง 4.5 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ RAP ของ GRADATION B

Density Gradation		**B**				
Trial (Water added)	%	4	6	8	10	12
Wt.Moltd+Soil	gm.	6401	6535	6639	6628	
Wt.Mold	gm.	4417	4417	4417	4417	
Wt.Soil	gm.	1.984	2.118	2.222	2.211	
Wet Density	gm./cc.	2.117	2.26	2.371	2.36	
Dry Density	gm./cc.	1.849	1.956	2.040	1.990	
Water Content						
Wt.Can+Wet.Soil)	(gm.)	152	168	192	185	
Wt.Can+Dry.Soil	(gm.)	143	157	178	169	
Wt.water	(gm.)	9	11	14	16	
Wt.Can	(gm.)	20	25	20	25	
Wt.Dry Soil	(gm.)	123	132	158	144	
Water Content	%	7.3	8.3	8.9	11.1	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



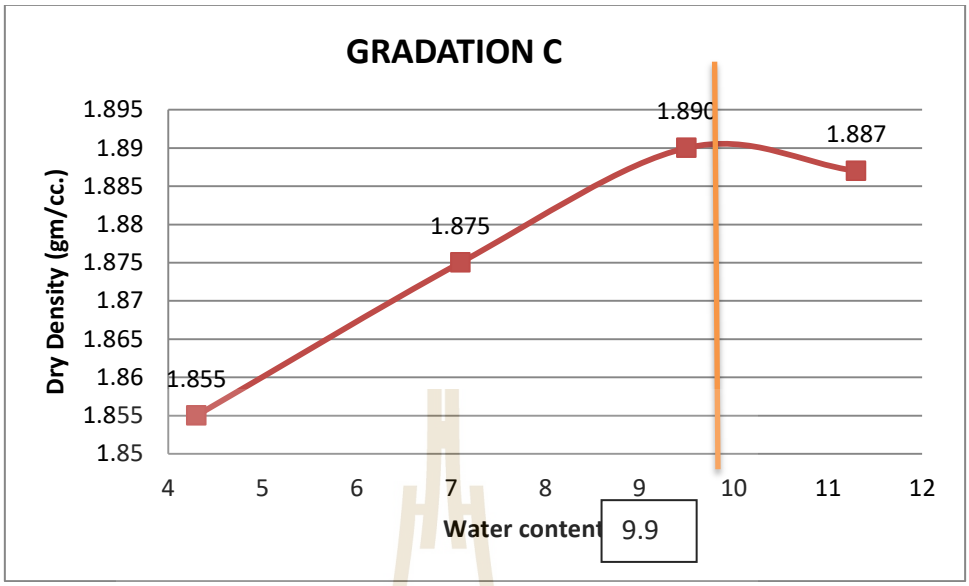
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและ
ปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับ RAP ของ Gradation B

ตาราง 4.6 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ RAP ของGRADATION C

Density Gradation		**C**				
Trial (Water added)	%	4	6	8	10	12
Wt.Moltd+Soil	gm.	6352	6425	6487	6517	
Wt.Mold	gm.	4417	4417	4417	4417	
Wt.Soil	gm.	1.935	2.008	2.07	2.1	
Wet Density	gm./ml	2.065	2.143	2.209	2.241	
Dry Density	gm./ml	1.855	1.875	1.890	1.887	

Water Content

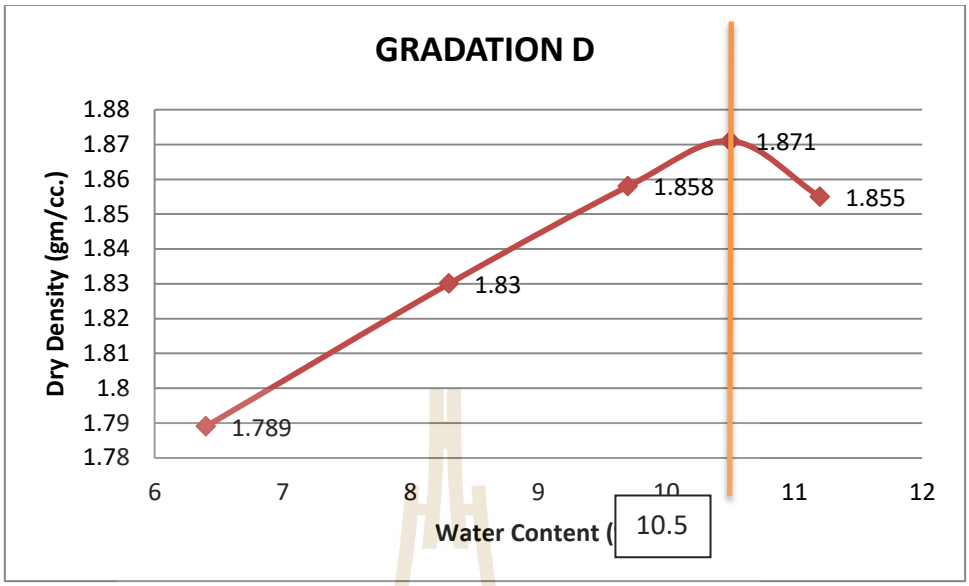
Wt.Can+Wet.Soil)	(gm.)	166	160	181	192	
Wt.Can+Dry.Soil	(gm.)	160	151	167	175	
Wt.water	(gm.)	6	9	14	17	
Wt.Can	(gm.)	20	25	20	25	
Wt.Dry Soil	(gm.)	140	126	147	150	
Water Content	%	4.3	7.1	9.5	11.3	



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและ
ปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับ RAP ของ Gradation C

ตาราง 4.7 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ RAP ของ GRADATION D

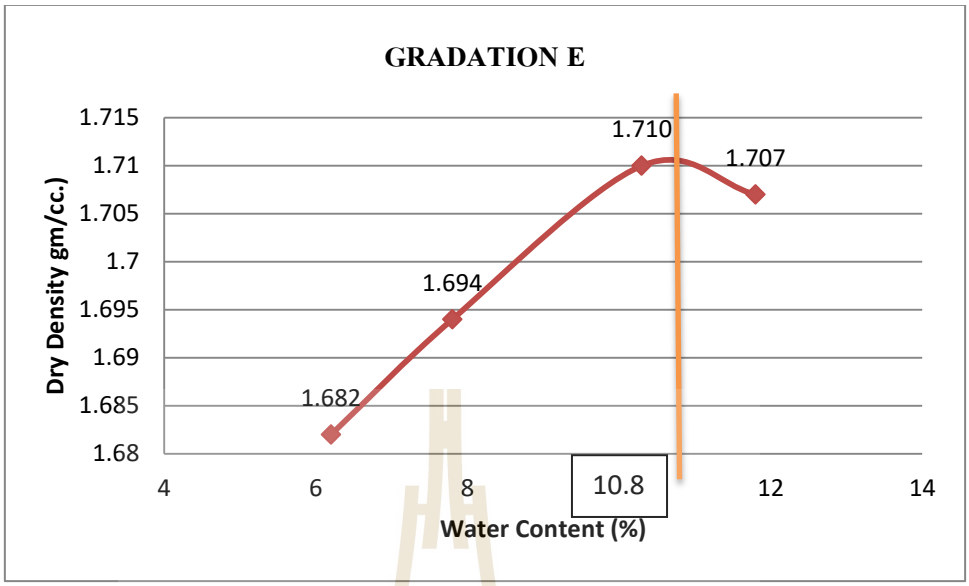
Density Gradation		**D**				
Trial (Water added)	%	6	8	10	12	14
Wt.Moltd+Soil	gm.	6321	6388	6447	6485	6480
Wt.Mold	gm.	4417	4417	4417	4417	4417
Wt.Soil	gm.	1.904	1.971	2.03	2.068	2.063
Wet Density	gm./ml	2.032	2.104	2.166	2.207	2.202
Dry Density	gm./ml	1.789	1.82	1.851	1.871	1.855
Water Content						
Wt.Can+Wet.Soil)	(gm.)	169	189	160	188	183
Wt.Can+Dry.Soil	(gm.)	160	176	148	172	167
Wt.water	(gm.)	9	13	12	16	16
Wt.Can	(gm.)	19	19	24	20	24
Wt.Dry Soil	(gm.)	141	157	124	152	143
Water Content	%	6.4	8.3	9.7	10.5	11.2



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและ
ปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับ RAP ของ GRADATION D

ตาราง 4.8 ปริมาณความชื้นเหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ RAP ของGRADATION E

Density Gradation		**E**				
Trial (Water added)	%	6	8	10	12	14
Wt.Moltd+Soil	gm.	6203	6243	6303	6325	
Wt.Mold	gm.	4417	4417	4417	4417	
Wt.Soil	gm.	1.786	1.826	1.886	1.908	
Wet Density	gm./ml	1.906	1.949	2.013	2.036	
Dry Density	gm./ml	1.682	1.694	1.710	1.707	
Water Content						
Wt.Can+Wet.Soil)	(gm.)	161	171	174	171	
Wt.Can+Dry.Soil	(gm.)	153	160	160	155	
Wt.water	(gm.)	8	11	14	16	
Wt.Can	(gm.)	24	19	24	19	
Wt.Dry Soil	(gm.)	129	141	136	136	
Water Content	%	6.2	7.8	10.3	11.8	



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง
และปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับ RAP ของ GRADATION E

4.3 ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.105/2515 "วิธีการทดลองหา Unconfined Compressive Strength ของ RAP ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบ กำลังอัด ตามตารางที่ 4.9 –ตารางที่ 4.13 จากผลการทดสอบสามารถเขียนกราฟได้ตามรูปที่ 4.6 ถึง รูปที่ 4.10 ค่า

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบกำลังอัด RAP ของ Gradation A ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

Compressive Strength

Proving Ring NO…125-10-029-0001-45…k. Factor Y = ((2.897x)+2.844)*2.205 lb./mm. X 10-2

No.	Gradation	%Cement	Curing Days	D.mm	dimensions		Dial Reading	Ultimate load lbs.	U_C lb/mm^2	U_C Kg/cm^2	Avg.U_C Kg/cm^2
					H.mm	A.mm^2					
1	A	2%	7	101	118	8011.85	210	1347.73	0.17	7.63	7.91
2	A	2%	7	101	118	8011.85	225	1443.55	0.18	8.17	
3	A	2%	7	101	118	8011.85	218	1398.83	0.17	7.92	
4	A	2%	14	101	118	8011.85	302	1935.41	0.24	10.96	9.86
5	A	2%	14	101	118	8011.85	235	1507.42	0.19	8.53	
6	A	2%	14	101	118	8011.85	278	1782.10	0.22	10.09	
7	A	2%	28	101	118	8011.85	360	2305.91	0.29	13.05	13.69
8	A	2%	28	101	118	8011.85	385	2465.61	0.31	13.96	

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

Compressive Strength

Proving Ring NO…125-10-029-0001-45....k. Factor Y = ((2.897x)+2.844)*2.205 lb./mm. X 10-2

No.	Gradation	%Cement	Curing Days	D.mm	dimensions		Dial Reading	Ultimate load lbs.	U_C lb/mm^2	U_C Kg/cm^2	Avg.U_C Kg/cm^2
					H.mm	A.mm^2					
9	A	2%	28	101	118	8011.85	388	2484.77	0.31	14.07	
10	A	4%	7	101	118	8011.85	410	2625.30	0.33	14.86	12.81
11	A	4%	7	101	118	8011.85	300	1922.64	0.24	10.88	
12	A	4%	7	101	118	8011.85	350	2242.03	0.28	12.69	
13	A	4%	14	101	118	8011.85	425	2721.12	0.34	15.41	17.58
14	A	4%	14	101	118	8011.85	505	3232.15	0.40	18.30	
15	A	4%	14	101	118	8011.85	525	3359.91	0.42	19.02	
16	A	4%	28	101	118	8011.85	640	4094.52	0.51	23.18	22.94
17	A	4%	28	101	118	8011.85	635	4062.58	0.51	23.00	
18	A	4%	28	101	118	8011.85	625	3998.70	0.50	22.64	
19	A	6%	7	101	118	8011.85	735	4701.37	0.59	26.62	26.80
20	A	6%	7	101	118	8011.85	740	4733.31	0.59	26.80	
21	A	6%	7	101	118	8011.85	745	4765.25	0.59	26.98	
22	A	6%	14	101	118	8011.85	806	5154.91	0.64	29.18	29.16
23	A	6%	14	101	118	8011.85	800	5116.58	0.64	28.97	
24	A	6%	14	101	118	8011.85	810	5180.46	0.65	29.33	
25	A	6%	28	101	118	8011.85	920	5883.13	0.73	33.31	33.89
26	A	6%	28	101	118	8011.85	915	5851.19	0.73	33.13	
27	A	6%	28	101	118	8011.85	973	6221.68	0.78	35.22	

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบกำลังอัด RAP ของ Gradation B ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

Compressive Strength

Proving Ring NO…125-10-029-0001-45....k. Factor Y = ((2.897x)+2.844)*2.205 lb./mm. X 10-2

No.	Gradation	%Cement	Curing Days	D.mm	dimensions		Dial Reading	Ultimate load lbs.	U_C lb/mm^2	U_C Kg/cm^2	U_C Kg/cm^2
					H.mm	A.mm^2					
1	B	2%	7 วัน	101	118	8011.85	320	2050.39	0.26	11.61	10.58
2	B	2%	7 วัน	101	118	8011.85	250	1603.24	0.20	9.08	
3	B	2%	7 วัน	101	118	8011.85	305	1954.58	0.24	11.07	
4	B	2%	14 วัน	101	118	8011.85	345	2210.09	0.28	12.51	12.80
5	B	2%	14 วัน	101	118	8011.85	352	2254.81	0.28	12.77	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

Compressive Strength

Proving Ring NO…125-10-029-0001-45....k. Factor Y = ((2.897x)+2.844)*2.205 lb./mm. X 10-2

No.	Gradation	%Cement	Curing Days	D.mm	dimensions		Dial Reading	Ultimate load lbs.	U_C lb/mm^2	U_C Kg/cm^2	U_C Kg/cm^2
					H.mm	A.mm^2					
6	B	2%	14 วัน	101	118	8011.85	362	2318.69	0.29	13.13	
7	B	2%	28 วัน	101	118	8011.85	395	2529.49	0.32	14.32	
8	B	2%	28 วัน	101	118	8011.85	365	2337.85	0.29	13.24	13.84
9	B	2%	28 วัน	101	118	8011.85	385	2465.61	0.31	13.96	
10	B	4%	7 วัน	101	118	8011.85	540	3455.73	0.43	19.56	
11	B	4%	7 วัน	101	118	8011.85	510	3902.88	0.49	22.10	19.08
12	B	4%	7 วัน	101	118	8011.85	530	4030.64	0.50	22.82	
13	B	4%	14 วัน	101	118	8011.85	632	4682.20	0.58	26.51	
14	B	4%	14 วัน	101	118	8011.85	630	4669.43	0.58	26.44	22.90
15	B	4%	14 วัน	101	118	8011.85	635	4701.37	0.59	26.62	
16	B	4%	28 วัน	101	118	8011.85	790	5052.70	0.63	28.61	
17	B	4%	28 วัน	101	118	8011.85	793	5071.86	0.63	28.71	28.22
18	B	4%	28 วัน	101	118	8011.85	755	4829.12	0.60	27.34	
19	B	6%	7 วัน	101	118	8011.85	770	4924.94	0.61	27.88	
20	B	6%	7 วัน	101	118	8011.85	740	4733.31	0.59	26.80	26.07
21	B	6%	7 วัน	101	118	8011.85	650	4158.40	0.52	23.54	
22	B	6%	14 วัน	101	118	8011.85	815	5212.40	0.65	29.51	
23	B	6%	14 วัน	101	118	8011.85	845	5404.03	0.67	30.59	30.23
24	B	6%	14 วัน	101	118	8011.85	845	5404.03	0.67	30.59	
25	B	6%	28 วัน	101	118	8011.85	930	5947.00	0.74	33.67	
26	B	6%	28 วัน	101	118	8011.85	950	6074.76	0.76	34.39	34.09
27	B	6%	28 วัน	101	118	8011.85	945	6042.82	0.75	34.21	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบกำลังอัด RAP ของ Gradation C ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

Compressive Strength

Proving Ring NO…125-10-029-0001-45....k. Factor Y = ((2.897x)+2.844)*2.205 lb./mm. X 10-2

No.	Gradation	%Cement	Curing Days	D.mm	dimensions		Dial Reading	Ultimate load lbs.	U_C lb./mm^2	U_C Kg/cm^2	Avg.U_C. Kg/cm^2
					H.mm	A.mm^2					
1	C	2%	7 วัน	101	118	8011.85	134	862.25	0.11	4.88	4.39
2	C	2%	7 วัน	101	118	8011.85	111	715.33	0.09	4.05	
3	C	2%	7 วัน	101	118	8011.85	116	747.27	0.09	4.23	
4	C	2%	14 วัน	101	118	8011.85	187	1200.81	0.15	6.80	6.75
5	C	2%	14 วัน	101	118	8011.85	195	1251.91	0.16	7.09	
6	C	2%	14 วัน	101	118	8011.85	175	1124.15	0.14	6.36	
7	C	2%	28 วัน	101	118	8011.85	248	1590.47	0.20	9.00	9.70
8	C	2%	28 วัน	101	118	8011.85	288	1845.98	0.23	10.45	
9	C	2%	28 วัน	101	118	8011.85	266	1705.45	0.21	9.66	
10	C	4%	7 วัน	101	118	8011.85	470	3008.58	0.38	17.03	17.85
11	C	4%	7 วัน	101	118	8011.85	521	3334.36	0.42	18.88	
12	C	4%	7 วัน	101	118	8011.85	487	3117.17	0.39	17.65	
13	C	4%	14 วัน	101	118	8011.85	591	3781.51	0.47	21.41	21.14
14	C	4%	14 วัน	101	118	8011.85	572	3660.14	0.46	20.72	
15	C	4%	14 วัน	101	118	8011.85	588	3762.35	0.47	21.30	
16	C	4%	28 วัน	101	118	8011.85	745	4765.25	0.59	26.98	27.42
17	C	4%	28 วัน	101	118	8011.85	760	4861.06	0.61	27.52	
18	C	4%	28 วัน	101	118	8011.85	767	4905.78	0.61	27.77	
19	C	6%	7 วัน	101	118	8011.85	884	5653.16	0.71	32.01	32.21
20	C	6%	7 วัน	101	118	8011.85	890	5691.49	0.71	32.22	
21	C	6%	7 วัน	101	118	8011.85	895	5723.43	0.71	32.40	
22	C	6%	14 วัน	101	118	8011.85	1050	6713.55	0.84	38.01	39.38
23	C	6%	14 วัน	101	118	8011.85	1130	7224.58	0.90	40.90	
24	C	6%	14 วัน	101	118	8011.85	1084	6930.74	0.87	39.24	
25	C	6%	28 วัน	101	118	8011.85	1155	7384.28	0.92	41.81	41.03
26	C	6%	28 วัน	101	118	8011.85	1070	6841.31	0.85	38.73	
27	C	6%	28 วัน	101	118	8011.85	1176	7518.42	0.94	42.57	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบกำลังอัด RAP ของ Gradation D ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

Compressive Strength

Proving Ring NO…125-10-029-0001-45....k. Factor Y = ((2.897x)+2.844)*2.205 lb./mm. X 10-2

No.	Gradation	%Cement	Curing Days	D.mm	dimensions		Dial Reading	Ultimate load lbs.	U_C lb/mm^2	U_C Kg/cm^2	Avg.U_C Kg/cm^2
					H.mm	A.mm^2					
1	D	2%	7 วัน	101	118	8011.85	160	1028.33	0.13	5.29	5.79
2	D	2%	7 วัน	101	118	8011.85	190	1219.97	0.15	6.28	
3	D	2%	7 วัน	101	118	8011.85	175	1124.15	0.14	5.79	
4	D	2%	14 วัน	101	118	8011.85	212	1360.50	0.17	7.00	7.67
5	D	2%	14 วัน	101	118	8011.85	250	1603.24	0.20	8.25	
6	D	2%	14 วัน	101	118	8011.85	235	1507.42	0.19	7.76	
7	D	2%	28 วัน	101	118	8011.85	330	2114.27	0.26	10.88	10.83
8	D	2%	28 วัน	101	118	8011.85	345	2210.09	0.28	11.37	
9	D	2%	28 วัน	101	118	8011.85	310	1986.52	0.25	10.22	
10	D	4%	7 วัน	101	118	8011.85	625	3998.70	0.50	20.58	22.17
11	D	4%	7 วัน	101	118	8011.85	715	4573.61	0.57	23.54	
12	D	4%	7 วัน	101	118	8011.85	680	4350.03	0.54	22.39	
13	D	4%	14 วัน	101	118	8011.85	710	4541.67	0.57	23.38	25.57
14	D	4%	14 วัน	101	118	8011.85	840	5372.09	0.67	27.65	
15	D	4%	14 วัน	101	118	8011.85	780	4988.82	0.62	25.68	
16	D	4%	28 วัน	101	118	8011.85	930	5947.00	0.74	30.61	30.17
17	D	4%	28 วัน	101	118	8011.85	905	5787.31	0.72	29.79	
18	D	4%	28 วัน	101	118	8011.85	915	5851.19	0.73	30.11	
19	D	6%	7 วัน	101	118	8011.85	1140	7288.46	0.91	37.51	39.21
20	D	6%	7 วัน	101	118	8011.85	1290	8246.64	1.03	42.44	
21	D	6%	7 วัน	101	118	8011.85	1145	7320.40	0.91	37.68	
22	D	6%	14 วัน	101	118	8011.85	1258	8042.23	1.00	41.39	44.44
23	D	6%	14 วัน	101	118	8011.85	1450	9268.70	1.16	47.70	
24	D	6%	14 วัน	101	118	8011.85	1344	8591.59	1.07	44.22	
25	D	6%	28 วัน	101	118	8011.85	1460	9332.58	1.16	48.03	48.80
26	D	6%	28 วัน	101	118	8011.85	1500	9588.10	1.20	49.35	
27	D	6%	28 วัน	101	118	8011.85	1490	9524.22	1.19	49.02	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบกำลังอัด RAP ของ Gradation E ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์

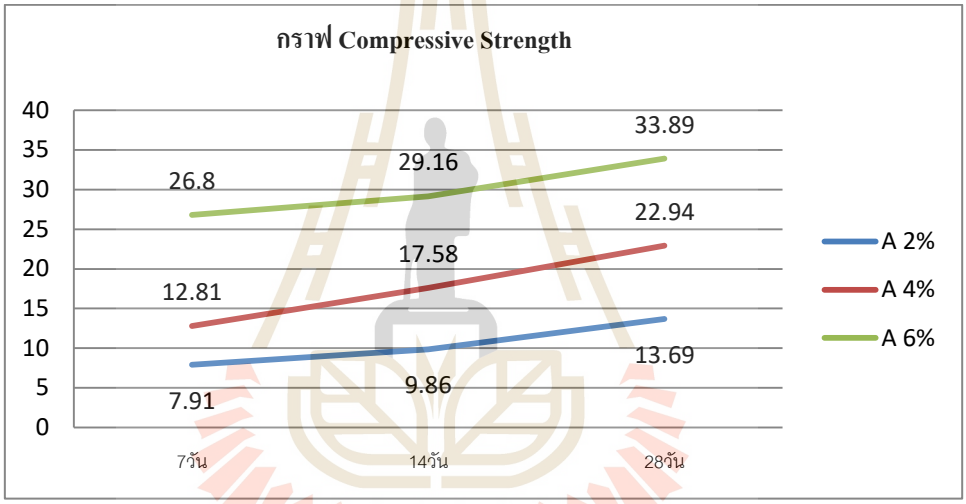
Compressive Strength

Proving Ring NO…125-10-029-0001-45....k. Factor Y = ((2.897x)+2.844)*2.205 lb./mm. X 10-2

No.	Gradation	%Cement	Curing Days	D.mm	dimensions		Dial Reading	Ultimate load lbs.	U_C lb/mm^2	U_C Kg/cm^2	U_C Kg/cm^2
					H.mm	A.mm^2					
1	E	2%	7	101	118	8011.85	70	453.42	0.06	2.57	
2	E	2%	7	101	118	8011.85	80	517.30	0.06	2.93	2.76
3	E	2%	7	101	118	8011.85	76	491.75	0.06	2.78	
4	E	2%	14	101	118	8011.85	112	721.71	0.09	4.09	
5	E	2%	14	101	118	8011.85	115	740.88	0.09	4.19	4.18
6	E	2%	14	101	118	8011.85	117	753.65	0.09	4.27	
7	E	2%	28	101	118	8011.85	250	1603.24	0.20	9.08	
8	E	2%	28	101	118	8011.85	245	1571.30	0.20	8.90	8.94
9	E	2%	28	101	118	8011.85	244	1564.91	0.20	8.86	
10	E	4%	7	101	118	8011.85	150	964.45	0.12	5.46	
11	E	4%	7	101	118	8011.85	140	900.57	0.11	5.10	5.40
12	E	4%	7	101	118	8011.85	155	996.39	0.12	5.64	
13	E	4%	14	101	118	8011.85	245	1571.30	0.20	8.90	
14	E	4%	14	101	118	8011.85	276	1769.33	0.22	10.02	9.03
15	E	4%	14	101	118	8011.85	225	1443.55	0.18	8.17	
16	E	4%	28	101	118	8011.85	363	2325.07	0.29	13.16	
17	E	4%	28	101	118	8011.85	359	2299.52	0.29	13.02	12.90
18	E	4%	28	101	118	8011.85	345	2210.09	0.28	12.51	
19	E	6%	7	101	118	8011.85	262	1679.90	0.21	9.51	
20	E	6%	7	101	118	8011.85	270	1731.00	0.22	9.80	9.66
21	E	6%	7	101	118	8011.85	266	1705.45	0.21	9.66	
22	E	6%	14	101	118	8011.85	420	2689.18	0.34	15.22	
23	E	6%	14	101	118	8011.85	412	2638.08	0.33	14.94	15.33
24	E	6%	14	101	118	8011.85	437	2797.78	0.35	15.84	
25	E	6%	28	101	118	8011.85	620	3966.76	0.50	22.46	
26	E	6%	28	101	118	8011.85	690	4413.91	0.55	24.99	23.66
27	E	6%	28	101	118	8011.85	650	4158.40	0.52	23.54	

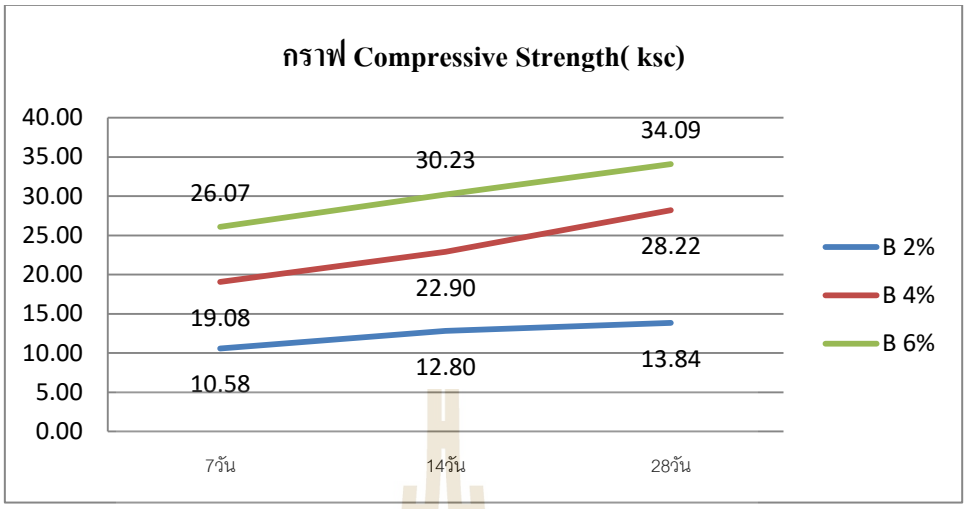
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากกราฟ รูปที่ 4.6แสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation A ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%, 4% และ 6% ของปริมาณน้ำที่เหมาะสมทำการบดอัดตัวอย่างตามมาตรฐาน วิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “ วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ด้วยการทดลองหาค่าแรงอัดตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 105/2515 “วิธีการทดลองหาค่ากาลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ของวัสดุ” ที่อายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ได้กำลังอัด 7.91, 9.86 และ 13.69 ksc.ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 % ได้ค่า 12.81, 17.58 และ 22.94 ksc. ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 4 % ได้ 26.8 , 29.16 และ 33.89 ksc. ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 6 % ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย



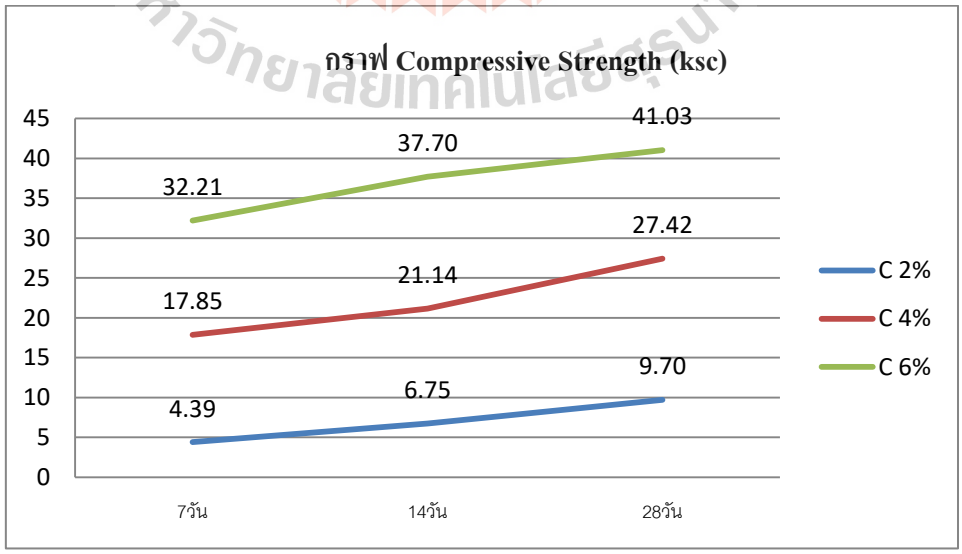
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation A ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%,4%และ 6%

จากกราฟ รูปที่ 4.7แสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation B ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%, 4% และ 6% ของปริมาณน้ำที่เหมาะสมทำการบดอัดตัวอย่างตามมาตรฐาน วิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “ วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ด้วยการทดลองหาค่าแรงอัดตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 105/2515 “วิธีการทดลองหาค่ากาลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ของวัสดุ” ที่อายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ได้กำลังอัด 10.58 ,12.80 และ 13.84 ksc.ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 % ได้ค่า 19.08, 22.09 และ 28.22 ksc. ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 4 % ได้ 26.07, 30.13 และ 34.09 ksc. ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 6 %



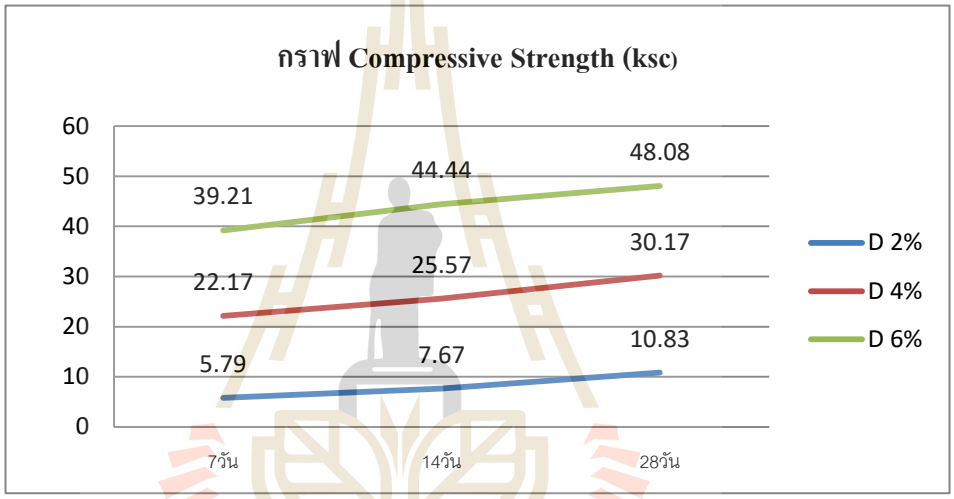
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation B ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%,4%และ 6%

จากกราฟ รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation C ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%, 4% และ 6% ของปริมาณน้ำที่เหมาะสมทำการบดอัดตัวอย่างตามมาตรฐาน วิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “ วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ด้วยการทดลองหาค่าแรงอัดตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 105/2515 “วิธีการทดลองหาค่ากาลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ของวัสดุ” ที่อายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ได้กำลังอัด 4.39, 6.75 และ 9.70 ksc.ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 % ได้ค่า และ17.85, 21.14 และ 27.42 ksc. ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 4 % ได้ 32.21, 37.70 และ 41.03 ksc. ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 6 %



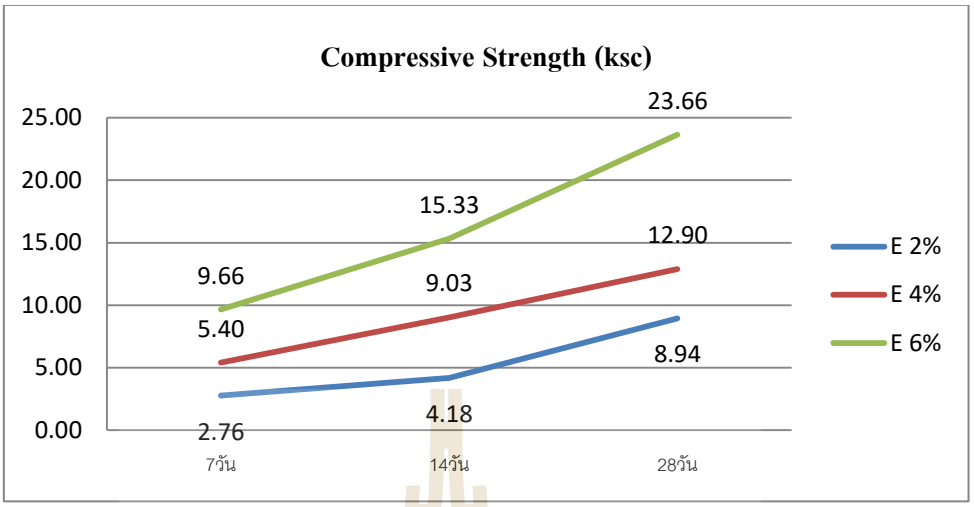
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation C ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%,4%และ 6%

จากกราฟ รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation D ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%, 4% และ 6% ของปริมาณน้ำที่เหมาะสมทำการบดอัดตัวอย่างตามมาตรฐาน วิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “ วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ด้วยการทดลองหาค่าแรงอัดตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 105/2515 “วิธีการทดลองหาค่ากาลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ของวัสดุ” ที่อายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน และ28 วัน ได้กำลังอัด 5.79, 7.67 และ 10.83 ksc.ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 % ได้ค่า 22.17, 25.57และ30.17 ksc. ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 4 % ได้ 39.21, 44.44 และ 48.08 ksc. ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอแลนด์ 6%

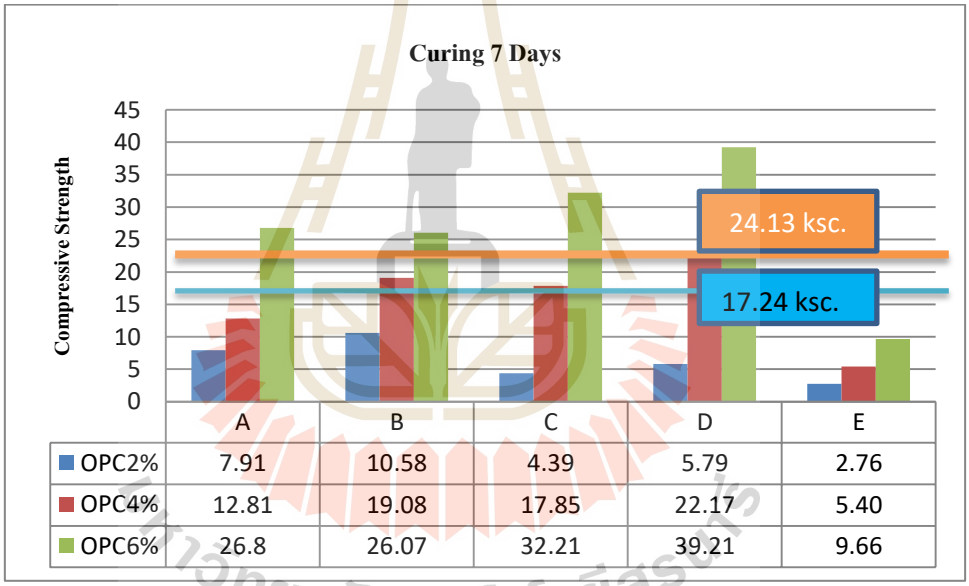


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation D ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%,4%และ 6%

จากกราฟ รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation D ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%, 4% และ 6% ของปริมาณน้ำที่เหมาะสมทำการบดอัดตัวอย่างตามมาตรฐาน วิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 “ วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ด้วยการทดลองหาค่าแรงอัดตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 105/2515 “วิธีการทดลองหาค่ากาลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ของวัสดุ” ที่อายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน และ28 วัน ได้กำลังอัด 2.76, 4.18 และ 8.94 ksc.ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 % ได้ค่า 5.40, 9.03 และ12.90 ksc. ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 4 % ได้ 9.66, 15.33 และ 23.66 ksc. ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 6 %



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ กำลังอัด Gradation E ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ 2%,4%และ 6%



	A	B	C	D	E
OPC2%	7.91	10.58	4.39	5.79	2.76
OPC4%	12.81	19.08	17.85	22.17	5.40
OPC6%	26.8	26.07	32.21	39.21	9.66

รูปที่ 4.11 ดัชนีวัดการพัฒนากำลังอัดแกนเดียว การบ่ม 7 วัน ที่ OPC 2%,4%และ 6%

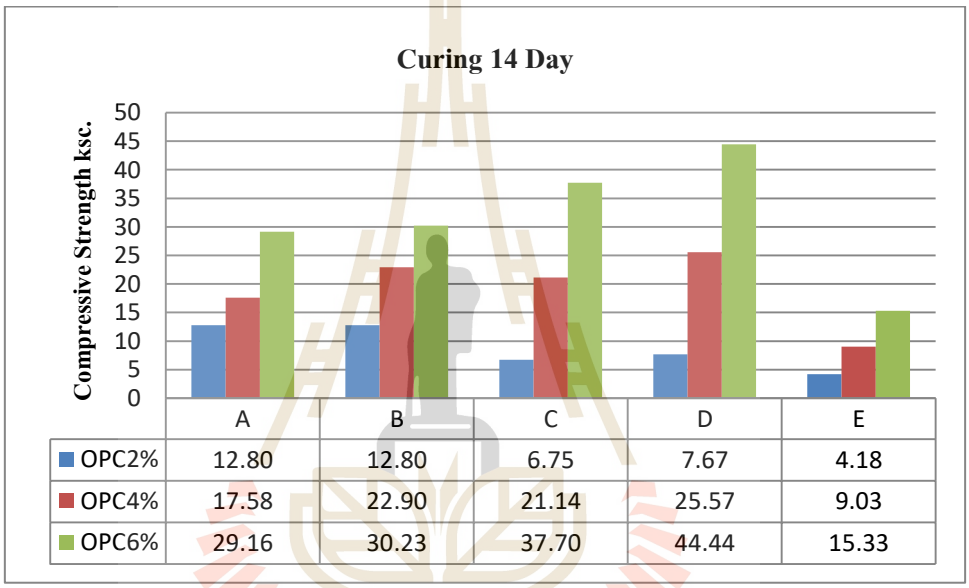
(OPC : Ordinary Portland Cement)

รูปที่ 4.11 แสดงการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของ Gradation ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2% ที่อายุการบ่ม 7 วัน เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ Gradation A, B, C, D และ E สามารถรับกำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 7.91, 10.58, 4.38, 5.79 และ 2.76 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ สรุปได้ ว่าที่ การบ่ม 14 วัน กำลังอัดแกนเดียว Gradation B > A > D > C > E ตามลำดับ

เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เป็น 4 % ที่อายุการบ่ม 7 วัน เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ Gradation A, B, C, D และ E สามารถรับกำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 12.81,

19.08, 17.85, 22.17 และ 5.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ สรุปได้ ว่าที่ การบ่ม 7 วัน กำลังอัดแกนเดียว Gradation D > B> C > A > E ตามลำดับ

เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เป็น 6 % ที่อายุการบ่ม 7 วัน เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ Gradation A, B, C, D และ E สามารถรับกำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 26.8, 26.7, 32.21, 39.21 และ 9.66 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ สรุปได้ ว่าที่ การบ่ม 14 วัน กำลังอัดแกนเดียว Gradation D > C > A > B > E ตามลำดับ



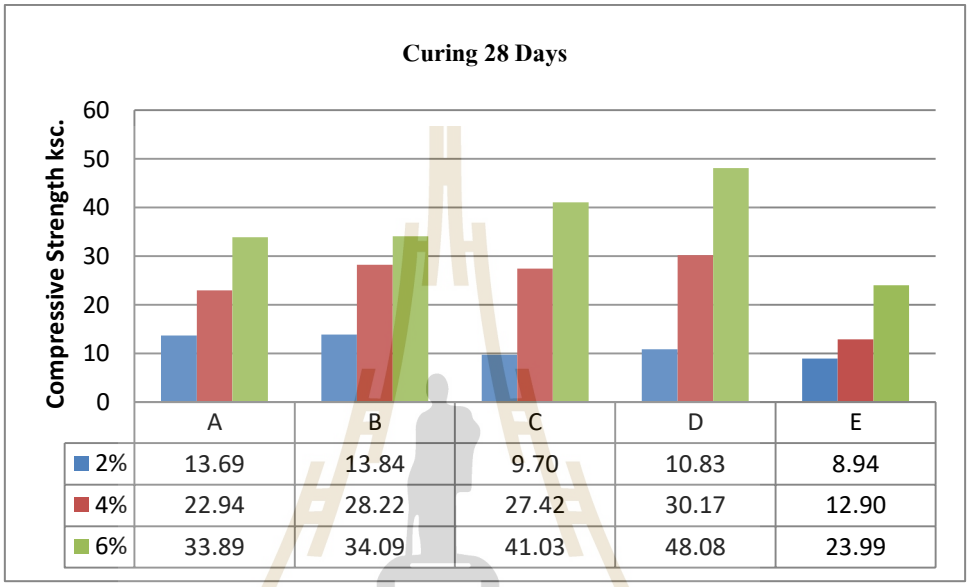
	A	B	C	D	E
OPC2%	12.80	12.80	6.75	7.67	4.18
OPC4%	17.58	22.90	21.14	25.57	9.03
OPC6%	29.16	30.23	37.70	44.44	15.33

รูปที่ 4.12 ดัชนีวัดการพัฒนากำลังอัดแกนเดียว การบ่ม 14 วัน ที่ OPC 2%, 4% และ 6% (OPC : Ordinary Portland Cement)

รูปที่ 4.12 แสดงการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของ Gradation ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2% ที่อายุการบ่ม 14 วัน เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ Gradation A, B, C, D และ E สามารถรับกำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 12.8, 12.80, 6.75, 6.76 และ 4.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตามลำดับ สรุปได้ ว่าที่ การบ่ม 14 วัน กำลังอัดแกนเดียว Gradation A = B > D > C > E ตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เป็น 4 % ที่อายุการบ่ม 14 วัน เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ Gradation A, B, C, D และ E สามารถรับกำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 17.58, 22.90, 21.14, 25.57 และ 9.03 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ สรุปได้ ว่าที่ การบ่ม 14 วัน กำลังอัดแกนเดียว Gradation B > D > C > A > E ตามลำดับ

เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เป็น 6 % ที่อายุการบ่ม 14 วัน เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ Gradation A, B, C, D และ E สามารถรับกำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 29.16, 30.23, 37.70, 44.44 และ15.33 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ สรุปได้ ว่าที่ การบ่ม 14 วัน กำลังอัดแกนเดียว Gradation D > C > B > A > E ตามลำดับ



	A	B	C	D	E
2%	13.69	13.84	9.70	10.83	8.94
4%	22.94	28.22	27.42	30.17	12.90
6%	33.89	34.09	41.03	48.08	23.99

รูปที่ 4.13 ดัชนีวัดการพัฒนากำลังอัดแกนเดียว การบ่ม 28 วัน ที่ OPC 2%,4%และ 6% (OPC : Ordinary Portland Cement)

รูปที่ 4.13 แสดงการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของ Gradation ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2 % ที่อายุการบ่ม 28 วัน เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ Gradation A, B, C, D และ E สามารถรับกำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 13.69, 13.84, 9.70, 10.83 และ 8.94 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ สรุปได้ ว่าที่ การบ่ม 28 วัน กำลังอัดแกนเดียว Gradation B > A > D > C > E ตามลำดับเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เป็น 4 % ที่อายุการบ่ม 28 วัน เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ Gradation A, B, C, D และ E สามารถรับกำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 22.94, 28.22, 27.42, 30.17 และ12.90 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ สรุปได้ ว่าที่ การบ่ม 28 วัน กำลังอัดแกนเดียว Gradation D > B > C > A > E ตามลำดับเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เป็น 6 % ที่อายุการบ่ม 28 วัน เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ Gradation A, B, C, D และ E สามารถรับกำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 33.89, 34.09, 41.03, 48.08 และ 23.99 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ สรุปได้ ว่าที่ การบ่ม 28 วัน กำลังอัดแกนเดียว Gradation D > C > B > A > E ตามลำดับ

บทที่ 5
สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษานี้พฤติกรรมกำลังอัดแกนเดียว ของ RAP ที่มี Gradation ต่างกัน โดยการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ที่ 2% ,4%และ 6% ค่ากำลังอัดของตัวอย่าง RAP-OPC เพิ่มขึ้นตามปริมาณ OPC ที่เพิ่มขึ้น ข้อกำหนดของกรมทางหลวง สำหรับปรับปรุงชั้นโครงสร้างทาง (17.24 ksc) และสำหรับปรับปรุงชั้น ชั้นพื้นทางกรมทางหลวง (24.13 ksc) ที่การบ่ม 7วัน ซึ่งผลที่ได้ของ RAP ผสม OPC 2 % Gradation A 7.91 ksc., B 10.58 ksc, C 4.39 ksc, D 5.79 ksc และE 2.76 ksc .ทุก Gradation ไม่ผ่านข้อกำหนดชั้นรองพื้นทาง RAP ผสม OPC 4% Gradation B 19.08 ksc., C 17.85 ksc. และ D 22.17 ksc. ผ่านข้อกำหนดชั้นรองพื้นทาง ส่วน Gradation A 12.81 และE 5.4 ksc. ไม่ผ่านข้อกำหนดชั้นรองพื้นทาง RAP ผสม OPC 6 % Gradation A 26.8 ksc. ,B 26.07 ksc., C 32.21 ksc. และ D 39.21 ksc. ผ่านข้อกำหนดชั้นพื้นทาง ส่วน Gradation E 9.66 ksc.ไม่ผ่านกำหนดชั้นรองพื้นทาง

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกำลังอัด ที่ การบ่ม 7 วัน, 14 และ 28 วัน กำลังอัดที่ได้แตกต่างกันการเปรียบเทียบRAP ของแต่ละ Gradation สามารถแสดงค่ากำลังอัดที่ 7 วัน ได้ดังนี้

1. ที่ OPC 2 % Gradation B > A > D > C > E
2. ที่ OPC 4 % Gradation D > B > C > A > E
3. ที่ OPC 6 % Gradation D > C > B > A > E

การเปรียบเทียบRAP ของแต่ละ Gradation สามารถแสดงค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ได้ดังนี้

1. ที่ OPC 2 % Gradation B = A > D > C > E
2. ที่ OPC 4 % Gradation D > B > C > A > E
3. ที่ OPC 6 % Gradation D > C > B > A > E

การเปรียบเทียบRAP ของแต่ละ Gradation สามารถแสดงค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ได้ดังนี้

1. ที่ OPC 2 % Gradation B > A > D > C > E
2. ที่ OPC 4 % Gradation D > B > C > A > E
3. ที่ OPC 6 % Gradation D > C > B > A > E

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สามารถสรุปหลักๆของกำลังอัดได้ดังนี้

1. Gradation AและB จะให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นคงที่ ตามปริมาณ OPC ที่เพิ่มขึ้น Gradation C และD จะให้กำลังอัดที่ต่ำ ค่อนข้างมากเมื่อใช้สัดส่วน OPC น้อย และจะให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นค่อนข้างมากเมื่อเมื่อเพิ่มปริมาณ OPC ส่วน Gradation E ถึงแม้จะเพิ่มปริมาณ OPC แต่กำลังอัดที่ได้ยังถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ Gradation อื่นๆ
2. Gradation ที่มีปริมาณมวลหยาบขนาดใหญ่มากกว่าจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าปริมาณมวลหยาบน้อย ในช่วงการบ่ม 7 วัน
3. Gradation ที่มีปริมาณมวลหยาบขนาดใหญ่น้อยกว่า จะให้ค่ากำลังอัดสูงมากกว่าปริมาณ มวลหยาบมากกว่า เมื่อปริมาณ OPC เพิ่มขึ้น ยกเว้น Gradation E เนื่องจากมีมวลระเอียดมากเกินไป ถ้าจะนำ Gradation E เติมมวลรวมให้ได้ Gradation ที่เหมาะสม

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

การวิจัยมีหลายอย่างที่เป็นอุปสรรคในการดำเนินการ RAP ที่นำมาทำการร่อนผ่านตะแกรงนั้นค่อนข้างค่อนข้างยาก เนื่องจากยังมีติดยางมะตอย อาจจะทำให้วัสดุไม่ตรงตาม Gradation บางส่วน อาจจะต้องทำการอบแห้งหรือต้องคั่วให้แห้งค่อยเอามาร่อนผ่านตะแกรง ในการจดบันทึกค่าต่างๆและการจัดเตรียมวัสดุควรระมัดระวังเป็นพิเศษอาจต้องเสียเวลาในการต้องกลับมาทำซ้ำถ้าขาดความระมัดระวัง

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษา สามารถนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกวิธีซ่อมบำรุงถนนลาดยางที่ชำรุดโดยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) หรือชั้นต่างๆของงานทางที่เหมาะสมซึ่งค่าที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการนำ RAP ที่มี Gradation ต่างกัน ไปใช้งานที่เหมาะสม การที่จะนำ RAP ไปใช้งานควรหาตรวจสอบว่า RAP เป็น Gradation ไหน หรือใกล้เคียงกับ Gradation ไหนแล้วนำมาปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสัดส่วนที่เหมาะสมกับงานชั้นทางนั้นๆ จะทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทั้งทางด้านงบประมาณและคุณภาพของงาน

ค่ากำลังอัด RAP ที่ การบ่ม 14 วันและ 28 วัน ควรเอามาพิจารณาในการนำ RAP มาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงถนนด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม. (2539). **มาตรฐานงานทาง. กรุงเทพฯ** : สานักวิเคราะห์วิจัย และพัฒนางานทาง กรมทางหลวง.

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม. (2543**). มาตรฐานวิธีการทดลอง.** กรุงเทพฯ : สานักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง.

กรมทางหลวงชนบท. (2558). **การปฏิบัติงานควบคุมคุณภาพการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.**กรมทางหลวงชนบท.

กรมทางหลวงชนบท.(2558)**. คู่มือการควบคุมงานก่อสร้าง บำรุงรักษาและอำนวยความปลอดภัยทางหลวงชนบท.** กรมทางหลวงชนบท.

กรมโยธาธิการและผังเมือง(2557). **มาตรฐานงานทาง**. กรมโยธาธิการและผังเมือง

กรมทางหลวง.**คู่มือการควบคุมงานก่อสร้างทางหลวงเล่ม 2 การควบคุมงานก่อสร้างทาง.** กรมทางหลวง

จิระยุทธ สืบสุขและคณะ. (2016).**กำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรังเกือบตกชั้นคุณภาพปรับปรุงด้วยผิวทำแอสฟัลต์รีไซเคิลและซีเมนต์.**ศูนย์วิจัยเพื่อความก้าวหน้าด้านวิศวกรรมโยธาและวัสดุก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ทรงพล บุญมาดี. (2529). **ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธงชัย รุ่งเรือง. (2556). **การปรับปรุงคุณภาพวัสดุหินคลุกซีเมนต์ชั้นพื้นทางเดิมผสมผิวแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมด้วยปูนซีเมนต์.** โครงงานมหาบัณฑิต การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สานักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2556.

พนมและคณะ. (2547). **ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางที่เป็นหินคลุก หินคลุกผสมวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าและวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าด้วยปูนซีเมนต์** สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สานักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2556.

วรากร ไม้เรียงและ**คณะ. ปฐพีกลศาสตร์. (ทฤษฎีและปฏิบัติการ) (Soil Mechanic Theory and Experiments).** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุรฉัตร สัมพันธารักษ์. (2540). **วิศวกรรมปฐพี.** วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์

อาวุธ โพธิ์อุดม. (2553). **การศึกษาประเมินความแข็งแรงของวัสดุผิวทางเดิมปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บดอัดแน่น.** สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขนปีการศึกษา 2553

อนิรุทธิ์ สุขแสน. (2556). **กำลังอัดแกนเดียวของดินผสมผิวทางแอสฟัลต์ที่นำกลับใช้ใหม่และปรับปรุงด้วยซีเมนต์.** โครงงานมหาบัณฑิต การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สานักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2556.

Czernin, W. (1962). **Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers.** New York Chemical Publishing. 36-50.

Davidson, D.T. and Bruns, B.W. (1960). **Comparison of Type I and Type III Portland Cement for Soil Stabilization**. Highway Research Board. Bulletin 267. 28-45.62 52

Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S. (2003). Assessment of strength development in cement admixed clays. **Geotechnique**. 53(4): 439-444.

Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. and Koga, H. (2002). **Improvement of soft marine clays by deep mixing technique.** Proceeding of 12th International Conference Offshore and Polar Engineering. Kitakyushu. Japan. 584-591.

Horpibulsuk, S. and Miura, N. (2006). **Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils: laboratory and field study.** Soil and foundations. Vol.46, No.3, Japanese Geotechnical Society. 351-366.

Lambe, T.W., Michaels, A.S. and Moh, Z.C. (1959). **Improvement of Soil Cement with Alkali Metal Compounds.** Highway Research Board. Bulletin 241. 67-103.

ภาคผนวก ก
รูปภาพแสดงการทดสอบงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ ก.1 ตัวอย่างแอสฟัลต์เก่า Reclaimed Asphalt Pavement **(RAP)**

รูปที่ ก.2 RAP มา ร่อนผ่านตะแกรง

รูปที่ ก.3 RAP ที่จัดเตรียมให้เป็น Gradation ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

รูปที่ ก.4 นำ Gradation ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำก้อนตัวอย่าง UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (UCS)

รูปที่ ก.5 การดันก้อนตัวอย่าง UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (UCS) ออกจาก Mold

รูปที่ ก.6 บ่มก้อนตัวอย่าง UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (UCS)

รูปที่ ก.7 ทดสอบกำลังอัดก้อน UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (UCS)

รูปที่ ก.8 ก้อนตัวอย่าง UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH (UCS) ที่ทำการทดสอบแล้ว

รูปที่ ก.9 ก้อนตัวอย่าง Gradation ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายอธิคมาตร์ แสงแก้ว เกิดวันที่ 25 กรกฎาคม 2521 ที่อยู่ปัจจุบันอยู่บ้านเลขที่ 42 หมู่ 14 ต.หนองแวงโสกพระ อ.พล จ.ขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเมืองพลพิทยาคม อ.พล จ.ขอนแก่น พ.ศ. 2539 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี ปี พ.ศ. 2544 หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาตรี เริ่มทำงานเป็นวิศวกรสนามที่บริษัทเอกชน ตังแต่ปี พ.ศ. 2545-2548 ซึ่งลักษณะงาน เป็นงานอาคาร โรงงาน อาคารบ้านพักอาศัย ถังเก็บน้ำใต้ดิน ได้ย้ายไปทำงานที่ กรุงเทพและปริมณฑล ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 – 2553 เป็นพนักงานบริษัท เอกเชน ในตำแหน่งวิศวกรโครงการของบริษัทรับเหมาเกี่ยวกับ หมู่บ้านจัดสรร ซึ่งรับก่อสร้างอาคารบ้านพักอาศัย ระบบบำบัดน้ำเสียสโมสรสระว่ายน้ำ ระบบระบายน้ำ หลังจากนั้นเข้ามาอยู่บริษัทลงทุนเกี่ยวกับโซล่าเซลล์ ตั้งแต่ 2554-2558 ตำแหน่งวิศวกรโครงการซึ่งทำงานเกี่ยวกับระบบ โครงสร้างรับแผงโซล่าเซลล์และสาธารณูปโภคที่ใช้ในโครงการ ได้แก่งานถนน ระบบระบายน้ำ อาคารบ้านพักพนักงาน โครงสร้างถังประปา ระบบถังเก็บน้ำใต้ดิน บนดิน หลังจากนั้น ได้ลาออกจากบริษัท มาจัดตั้งบริษัท รับเหมาก่อสร้าง งานอาคารบ้านพักอาศัย ที่จังหวัดขอนแก่นและจังหวัดใกล้เคียงจนถึงปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี