



การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานท้องถิ่นด้วยวัสดุเชิงประกอบสำหรับเป็น  
ผิวทางถนนชุมชนตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประยูร ยงค์อำนวยการ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ยอดสุดใจ  
ดร. รัตนกร ระวังกุล  
ดร. ณัฐนันท์ สุขทด  
วีรพล นามบุญเรือง  
และคณะ

งานวิจัยนี้ได้ผ่านการพิจารณาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.)  
และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานงบประมาณ ปีงบประมาณ 2555

มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

พ.ศ. 2555

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานท้องถิ่นด้วยวัสดุเชิงประกอบสำหรับเป็น  
ผิวทางถนนชุมชนตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง

THE DEVELOPMENT OF RURAL INFRASTRUCTURE BY  
COMPOSITE MATERIALS FOR USING AN ACCESS ROAD  
PAVEMENT ON SUFFICIENCY ECONOMY THEORY

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประยูร ยงค์อำนวย  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ยอดสุดใจ  
ดร. รัตนกร ระวังกุล  
ดร. ฉัฐนันท์ สุขอด  
วีรพล นามบุญเรือง  
และคณะ

งานวิจัยนี้ได้ผ่านการพิจารณาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.)  
และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานงบประมาณ ปีงบประมาณ 2555

มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

พ.ศ. 2555



## ใบรับรองงานวิจัย

### สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

เรื่อง การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานท้องถิ่นด้วยวัสดุเชิงประกอบสำหรับเป็นผิวทางถนนชุมชน  
ตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง

The Development of Rural Infrastructure by Composite Materials for Using an Access  
Road Pavement on Sufficiency Economy Theory

หัวหน้าโครงการวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประยูร ยงศ์อำนาจ ., M.Ed  
(มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง)

ผู้ร่วมวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ยอดสุดใจ ., D.Eng  
(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ร่วมวิจัย อาจารย์ ดร. รัตนากร ระวังกุล ., Ph.D  
(มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์)

ผู้ร่วมวิจัย อาจารย์ ดร. ณัฐนันท์ ศุกดล ., Ph.D  
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

ผู้ร่วมวิจัย อาจารย์ วีรพล นามบุญเรือง ., M.Eng ., Ph.D(candidate)  
(มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง)

และคณะ

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชฎาพร โพธิ์สุวรรณ )

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

งานวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานท้องถิ่นด้วยวัสดุเชิงประกอบสำหรับเป็นผิวทางถนนชุมชนตามหลัก  
ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง

THE DEVELOPMENT OF RURAL INFRASTRUCTURE BY COMPOSITE MATERIALS  
FOR USING AN ACCESS ROAD PAVEMENT ON SUFFICIENCY ECONOMY THEORY

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประยูร ยงค์อำนวย  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ขอดสุคติ

ดร. รัตนากร ระวิงกุล

ดร. ณัฐนันท์ สุขคณ

วีรพล นามบุญเรือง

และคณะ

เสนอ

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

พ.ศ. 2555

## บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานโครงการนี้คือการพัฒนาบล็อกผิวถนนเพื่อเน้นการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานท้องถิ่น (Local Infrastructure) โดยใช้วัสดุท้องถิ่น (Local Materials) ที่มีอยู่เช่น ดินท้องถิ่นเฉพาะ หินฝุ่น และปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งสำหรับปูนซีเมนต์จะใช้ในปริมาณที่น้อยที่สุด เพื่อพัฒนาเป็นบล็อกผิวทางวัสดุเชิงประกอบสำหรับปูผิวทางถนนท้องถิ่นซึ่งมีราคาที่ถูกและแข็งแรงเพียงพอสำหรับรับน้ำหนักบรรทุกผลผลิตทางเกษตรกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยวิธีการทดสอบจะหาอัตราส่วนระหว่าง ปูนซีเมนต์ และหินฝุ่นราชบุรี ที่ให้ความแข็งแรงมากที่สุดและใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยที่สุด รวมถึงคุณสมบัติด้านอื่น เช่น ด้านน้ำหนัก (measurement of weight) ด้านการดูดซับน้ำ (water absorption) การต้านทานการขัดสี (abrasive resistance) รวมถึงด้านการชะล้าง (erosion on rinsing) โดยทำการเปรียบเทียบกับอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆกัน (SCB) สุดท้ายบล็อกปูผิวถนน ที่ให้ค่ากำลังสูงสุดจะถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐานผิวทางจราจรคอนกรีต ของกรมโยธาธิการ ซึ่งผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนที่ให้ผลค่ากำลังการต้านทานแรงกดและแรงดัดที่สูงที่สุดคือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 หินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 20 ให้ความต้านทานกำลังอัดสูงสุด ที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 123.69 ksc อย่างไรก็ดีเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของกรมโยธาธิการ พบว่า ค่ายังต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด แต่อย่างไรก็ดี จุดประสงค์ของงานนี้คือการก่อสร้างผิวทางถนนในท้องถิ่น ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่า ถนนทางหลวง เหลือถึงร้อยละ 90 และเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางด้านราคาของวัสดุพบว่า ราคาของบล็อกผิวถนนคิดเป็นร้อยละ 12.8 ของราคาของคอนกรีตผิวทาง ซึ่งกรมโยธาธิการกำหนดไว้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบที่กล่าวมาทั้งหมดจึงสามารถกล่าวได้ว่า วัสดุผิวทางเชิงประกอบที่ประดิษฐ์ขึ้น มีความเป็นไปได้ที่จะถ่ายทอดสู่ชุมชนในการก่อสร้างจริง

## **Abstract**

The purpose of this work is to develop the composite materials for using an access road pavement in Ratchaburi province, Western of Thailand. The materials used in this work are all easily finding in Ratchaburi such as local Ratchaburi soil and limestone dust. Those materials are mixed with the Portland cement type 1. The appropriate formulation is determined with the least amount of Portland cement content. This is to develop as the low cost concrete pavement mixed with limestone dust and also strong enough for using as road pavement in the local area.

There are several important properties both chemical and physical as well as mechanical properties such as the compressive and flexural strength, measurement of weight, water absorption, abrasive resistance, and erosion on rinsing are implemented to ensure that the developed material is strong enough to use in the real construction field. All results will be compared with the control soil cement brick(SCB). The result show that the strongest formulation is of with 5% of Portland cement type 1 and 20% of limestone dust which is giving the compressive and flexural strength value as 123.69 and 9.39 Ksc, respectively at cured time of 28 days. However, comparing with the standard NO DHS 309/2544 of the Department of Public work and Town & Country Planning shows that the maximum compressive strength of the developed concrete pavement is lower than the minimum standard. However, the purpose of this work is to use as the local road pavement which mostly are used for the lightweight agricultural vehicle which average weights are approximately only 10% of highway vehicle weights. Also, consideration in the material cost factor, it shows that total costs of the developed concrete pavement is only 12.8% of the normal concrete pavement.

Finally, when considers in total factors shown in this work, it can conclude that the developed concrete pavement can be possibly applied as the local pavement road in the local area of Thailand.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่บูรณาการการวิจัยด้านวิศวกรรมศาสตร์อีกงานหนึ่งที่ผนวกด้านเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการวิจัยดังกล่าวได้เน้นถึงการนำประโยชน์จากวัสดุท้องถิ่นมาทำการศึกษาด้านวิศวกรรมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยผลสำเร็จครั้งนี้ได้ทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านผลสัมฤทธิ์งานวิจัยให้กับท้องถิ่นดังเป็นไปตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายที่วางไว้ด้วยดี และท้ายที่สุด ประโยชน์ที่อันจะก่อเกิดแก่ประเทศชาติต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประยูร ยงศ์อำนาจ  
สาขาโยธาและสถาปัตยกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง  
(ในฐานะตัวแทนคณะทีมงานวิจัยฯ)

## สารบัญ

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| บทคัดย่อ                                                             | 1  |
| กิตติกรรมประกาศ                                                      | 3  |
| สารบัญ                                                               | 4  |
| สารบัญรูปภาพ                                                         | 6  |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ                                            | 9  |
| บทที่ 1                                                              | 10 |
| 1.1 คำนำ                                                             | 10 |
| 1.2 วัตถุประสงค์                                                     | 11 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย                                            | 11 |
| บทที่ 2                                                              | 13 |
| 2.1 สมบัติทางกายภาพของดินและโครงสร้างของดิน                          | 13 |
| 2.2 เนื้อดิน                                                         | 13 |
| 2.3 อนุภาคของดิน                                                     | 13 |
| 2.4 สมบัติทางประการของกลุ่มขนาดต่าง ๆ ของอนุภาคดิน                   | 14 |
| 2.5 ประเภทของเนื้อดินโดยทั่ว ๆ ไป                                    | 15 |
| 2.6 การวิเคราะห์หาประเภทของเนื้อดิน                                  | 16 |
| 2.7 การใช้ไคอะแกรมสามเหลี่ยม                                         | 18 |
| 2.8 ความพรุนของดิน                                                   | 19 |
| 2.9 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์                          | 20 |
| 2.10 หลักการทำงานของถนนประเภทผิวเกร็ง                                | 23 |
| 2.11 หน่วยแรงที่เกิดในถนนคอนกรีต                                     | 23 |
| 2.12 ทฤษฎีการออกแบบถนนคอนกรีต                                        | 24 |
| 2.13 Radius of Relative Stiffness                                    | 24 |
| 2.14 Westergaard Solution และหน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักของล้อยานพาหนะ | 25 |
| 2.15 หน่วยแรงอื่นๆ ที่เกิดในถนนคอนกรีต                               | 27 |
| 2.16 Curling Stress และ Wrapping Stress                              | 27 |
| 2.17 Friction Stress                                                 | 28 |
| 2.18 Infiltration Stress                                             | 29 |
| 2.19 รายงานการวิจัยทางด้านวิศวกรรมชิ้นส่วนประกอบ                     | 30 |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| บทที่ 3                                                                                       | 33 |
| 3.1 ด้านวัสดุวิศวกรรมขั้นสูง (Advance Materials Engineering, AME)                             | 33 |
| Reserch chart                                                                                 | 35 |
| บทที่ 4                                                                                       | 36 |
| ผลและการวิจารณ์                                                                               | 36 |
| 4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)                                            | 36 |
| 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ (Physical properties of products)                          | 38 |
| 4.3 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ (mechanical properties)                                              | 46 |
| 4.4 การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์                                                                 | 52 |
| 4.6 การก่อสร้างทางด้านเทคโนโลยีบนต้นแบบสำหรับชุมชน                                            | 53 |
| บทที่ 5 สรุปผล                                                                                | 54 |
| 5.1 คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของวัสดุดิบ (Chemical and physical properties of raw materials) | 54 |
| 5.2 คุณสมบัติด้านกายภาพของผลิตภัณฑ์ (Physical properties of products)                         | 55 |
| 5.3 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ ( Mechanical properties)                                             | 56 |
| 5.4 การประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ (An economically assessment)                                    | 58 |
| 5.5 การประเมินด้านสังคม (The social assessment)                                               | 59 |
| บทสรุปโดยรวม                                                                                  | 60 |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง                                                                          | 61 |
| ภาคผนวก                                                                                       | 62 |
| ภาคผนวก ก                                                                                     | 63 |
| ภาคผนวก ข                                                                                     | 66 |
| ภาคผนวก ค                                                                                     | 70 |
| ประวัติคณะผู้วิจัย                                                                            | 73 |
| ประวัติคณะผู้วิจัย                                                                            | 75 |

## สารบัญรูปภาพ

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 1 แสดงพื้นที่ศึกษาและถ่ายทอดเทคโนโลยีงานวิจัย                                                                                                                    | 12 |
| รูปที่ 2 แสดงขนาดของอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว                                                                                                                    | 15 |
| รูปที่ 3 แสดงตารางมาตรฐานสำหรับใช้ประเมินประเภทของเนื้อดิน ที่มา: (บุญชม เปียแดง และคณะ, 2526)                                                                          | 19 |
| รูปที่ 4 โครงสร้างชั้นทางคอนกรีต และการกระจายน้ำหนักจากล้อยานพาหนะ                                                                                                      | 23 |
| รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งของ Radius of Relative Stiffness                                                                                                                    | 25 |
| รูปที่ 6 แรงดันน้ำหนักของดินเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการแอ่นตัว                                                                                                              | 25 |
| รูปที่ 7 ตำแหน่งของน้ำหนักล้อที่กระทำบนแผ่นคอนกรีต                                                                                                                      | 26 |
| รูปที่ 8 การเกิดแรงห่อตัวในแผ่นคอนกรีต                                                                                                                                  | 27 |
| รูปที่ 9 แผนภูมิที่ใช้กำหนดค่า สัมประสิทธิ์ $C_x$ และ $C_y$                                                                                                             | 28 |
| รูปที่ 10 แรงเกิดจากการยึดและหดตัวของแผ่นคอนกรีต                                                                                                                        | 29 |
| รูปที่ 11 แรงดันของดินคันทางแปรเปลี่ยนตามความยาวของแผ่นคอนกรีต                                                                                                          | 29 |
| รูปที่ 12 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง                                                                                                                                     | 35 |
| รูปที่ 13 แสดงอาณาเขตกว้างของดินท้องถนนราชบุรี                                                                                                                          | 38 |
| รูปที่ 14 แสดงผลการวัดน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ที่ w/p 0.2275, 0.2588, 0.2900, 0.3213, 0.3525 และ 0.3838 . | 40 |
| รูปที่ 15 แสดงผลการวัดน้ำหนักของบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ที่ w/p 0.1475 0.1788 0.2100 0.2413 0.2725 และ 0.3038   | 40 |
| รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ค่าการวัดขนาดของอิฐดินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1. (ควบคุม) ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                          | 41 |
| รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ค่าการวัดขนาดของบล็อกผิวถนนเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                                     | 42 |
| รูปที่ 18 แสดงค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                                                            | 44 |
| รูปที่ 19 แสดงค่าหน่วยน้ำหนักของบล็อกผิวถนนเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                                         | 44 |
| รูปที่ 20 ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                                                                | 45 |

|                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 21 ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกผิวถนนเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                                                                       | 46 |
| รูปที่ 22 ค่ากำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                                                                                              | 48 |
| รูปที่ 23 ค่ากำลังอัดของบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                                                                                   | 48 |
| รูปที่ 24 ค่ากำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                                                                                              | 49 |
| รูปที่ 25 ค่ากำลังอัดของบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                                                                                   | 50 |
| รูปที่ 26 แสดงการก่อสร้างต้นแบบ (Prototype) สำหรับการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน                                                                                                                     | 53 |
| ตาราง 1 เกณฑ์ในการจัดกลุ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคดิน                                                                                                                                        | 14 |
| ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์                                                                                                                                               | 21 |
| ตารางที่ 3 คุณสมบัติของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์                                                                                                                                            | 21 |
| ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบทางด้านเคมีของดินท้องถิ่นราชบุรีและหินฝุ่นท้องถิ่น                                                                                                                       | 37 |
| ตาราง 5 แสดงค่าผลการทดสอบแรงต้านทานการขัดสี(abrasive resistance)ของบล็อกปูผิวถนนเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุ 28 วัน                                                                        | 51 |
| ตาราง 6 แสดงผลการทดสอบค่าการชะล้าง(erosion on rinsing ) ของบล็อกปูผิวถนนเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุ 28 วัน                                                                                | 52 |
| ตาราง 7 เปรียบเทียบราคาค่าวัสดุ ระหว่างผิวทางคอนกรีตและผิวทางวัสดุเชิงประกอบ หนา                                                                                                                  | 53 |
| ตารางภาคผนวก ก 1 แสดงผลทดสอบกำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                              | 63 |
| ตารางภาคผนวก ก 2 แสดงผลทดสอบกำลังอัดในรูปของโมดูลัสการแตกหักของวัสดุอิฐดินซีเมนต์ควบคุม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน | 63 |
| ตารางภาคผนวก ก 3 แสดงผลทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุอิฐดินซีเมนต์ควบคุม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน                  | 64 |

- ตารางภาคผนวก ก 4 แสดงผลทดสอบวิธีการวัดขนาดของวัสดุอิฐดินซีเมนต์ควบลุม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน 64
- ตารางภาคผนวก ก 5 แสดงผลทดสอบวิธีการวัดน้ำหนักของวัสดุอิฐดินซีเมนต์ควบลุม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน 64
- ตารางภาคผนวก ก 6 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุของอิฐดินซีเมนต์ควบลุม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน 65
- ตารางภาคผนวก ข 1 แสดงผลทดสอบกำลังอัดของบล็อกผิวทางเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน 66
- ตารางภาคผนวก ข 2 แสดงผลทดสอบกำลังดัดในรูปของโมดูลัสการแตกหักของบล็อกผิวทางเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน 66
- ตารางภาคผนวก ข 3 แสดงผลทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของบล็อกผิวทางเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน 67
- ตารางภาคผนวก ข 4 แสดงผลทดสอบค่าขนาดของบล็อกผิวทางเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน 67
- ตารางภาคผนวก ข 5 แสดงผลทดสอบวิธีการวัดน้ำหนักของบล็อกผิวทางเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน 68
- ตารางภาคผนวก ข 6 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุของบล็อกผิวทางเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน 68
- ตารางภาคผนวก ข 7 ภาพแสดงเครื่องมือทดสอบความต้านทานต่อการขัดสี 69

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

|                      |   |                                  |
|----------------------|---|----------------------------------|
| SCB                  | = | อิฐดินซีเมนต์ควมคุม              |
| CPL                  | = | บล็อกผิวทางผสมหินฝุ่น            |
| Compressive Strength | = | กำลังอัด                         |
| Flexural Strength    | = | กำลังดัด                         |
| Soil Cement Bricks   | = | อิฐดินซีเมนต์                    |
| Pozzolanic Reaction  | = | ปฏิกิริยาปอซโซลาน                |
| Hydration Reaction   | = | ปฏิกิริยาไฮเดรชัน                |
| XRF                  | = | X-Ray Fluorescence               |
| Abrasive resistance  | = | ความต้านทานต่อการขัดสี           |
| Erosion on Rinsing   | = | การสึกกร่อนเนื่องจากการไหลของน้ำ |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 คำนำ

การพัฒนาท้องถิ่นตามหลักหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงในองค์พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวนั้นเป็นทฤษฎีของการปฏิบัติได้จริงเห็นผลและยอมรับในระดับนานาชาติ ซึ่งเป็นการพิสูจน์ถึงอัจฉริยภาพของพระองค์ท่าน เช่นเดียวกันการพัฒนาประเทศส่วนใหญ่เน้นการพัฒนาทางด้านมิติที่ใหญ่ (Large Scale) ที่ใหญ่นั้นคือการมองในภาพรวม ซึ่งบางมิติของการพัฒนาประเทศจำเป็นต้องมองมิติด้านชุมชน วิถีชีวิต และการใช้ทรัพยากรท้องถิ่นได้อย่างมีคุณภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมนั้นหมายถึงคุณภาพชีวิตของชุมชนท้องถิ่นเป็นสุขและสอดคล้องกับวิถีของการดำเนินชีวิตอย่างยั่งยืน

โครงสร้างพื้นฐานท้องถิ่น (Infrastructure), นั้นมีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาในมิติที่ใหญ่และมิติเน้นพื้นที่เป้าหมาย (Local Concentration), ซึ่งจำเป็นต้องพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานให้เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของชุมชนอื่นเพื่อใช้ในการประกอบอาชีพเช่น ถนนภายในหมู่บ้าน สำหรับขนส่งผลผลิตทางการเกษตร อ่างเก็บน้ำชุมชนสำหรับการทำกิจกรรมและอื่นๆ เป็นต้น จากแนวคิดดังกล่าวจึงมาเป็นจุดเริ่มของงานวิจัยนี้เพื่อเน้นการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานท้องถิ่น (Local Infrastructure), โดยใช้วัสดุท้องถิ่น (Local Materials), ที่มีอยู่เช่น ดินท้องถิ่นเฉพาะ หินฝุ่น และปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งสำหรับปูนซีเมนต์จะใช้ในปริมาณที่น้อยที่สุด เพื่อพัฒนาเป็นบล็อกผิวทางวัสดุเชิงประกอบสำหรับปูผิวทางถนนท้องถิ่นซึ่งมีราคาที่ถูกลงและแข็งแรงเพียงพอสำหรับรับน้ำหนักบรรทุกทุกผลผลิตทางเกษตรกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปัจจุบันท้องถิ่นดังกล่าวยังใช้เป็นถนนแบบคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งมีราคาที่แพงและส่งผลกระทบต่อปริมาณของวัสดุที่ส่งสำหรับการพัฒนาท้องถิ่นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาด้านสิ่งแวดล้อม (Environment), ถนนคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีการทำลายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมของประเทศชาติค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับบล็อกผิวทางวัสดุเชิงประกอบ (Composite Pavement Block), ของงานวิจัยนี้ ซึ่งเน้นการใช้ทรัพยากรของท้องถิ่นจำพวกดิน (Local Soil), เป็นส่วนประกอบหลัก อีกทั้งส่งผลให้ท้องถิ่นมีงานทำและสามารถผลิตใช้เองได้ในท้องถิ่นด้วยเทคโนโลยีอย่างง่ายและไม่ซับซ้อน และยังส่งผลให้ประชาชนในท้องถิ่นนั้น มีความสามัคคีกลมเกลียวช่วยเหลือซึ่งกันและกัน

ในชุมชนเพื่อจะพัฒนาชุมชนของตัวเองตามหลักและวิถีแห่งความพอเพียงที่จะทำให้ก้าวสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านเคมีและฟิสิกส์ของดินท้องถิ่นราชบุรีและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1
- 1.2 เพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพของหินฝุ่นท้องถิ่นราชบุรี(Local Limestone Dust)
- 1.3 ทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัด (Compressive strength) กำลังดัด (Flexural strength) และ การทนการขัดสี (Abrasive Resistance Test) ของบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบ(Composite Soil Block) ที่อายุ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน เปรียบเทียบกับมาตรฐานผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กของกรมโยธาธิการและผังเมือง
- 1.4 ทดสอบด้านการชะล้างผิวถนนของบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบ(Composite Soil Block) โดยการจำลองฝนการทดสอบเป็นตลอดระยะเวลาอายุ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน
- 1.5 ทดสอบหาอัตราการดูดซึมน้ำและ ให้น้ำหนักของบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน
- 1.6 หาอัตราส่วนที่เหมาะสมของบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบ
- 1.7 ก่อสร้างถนนชุมชนต้นแบบด้วยบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบ(Composite Soil Block) สำหรับมอบให้ชุมชนเพื่อเป็นแนวทางการใช้เทคโนโลยีอย่างง่าย
- 1.8 วิเคราะห์และเปรียบเทียบต้นทุนของการสร้างถนนด้วยบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบกับถนนที่สร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปในท้องถิ่น

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ดินท้องถิ่นราชบุรีจากแหล่งท่าหลวง อำเภอปากท่อ และ หินฝุ่นจากอำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี
- 1.3.2 การทดสอบคุณสมบัติด้านเคมีของดินท้องถิ่น(Ratchaburi local soil), หินฝุ่นท้องถิ่นราชบุรี (Local Limestone Dust)
- 1.3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมจะใช้มาตรฐานการทดสอบของอเมริกา(ASTM)ขนาดของบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบ(Composite Soil Block) จะหล่อด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกสี่ขนาดกว้าง 115 มิลลิเมตร ยาว 225 มิลลิเมตร และหนา 60 มิลลิเมตร

1.3.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับมาตรฐานผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กของกรมโยธาธิการและผังเมือง

1.3.5 การสร้างถนนต้นแบบด้วยบล็อกหินวัสดุเชิงประกอบขนาดความกว้าง 3.00 เมตร เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีและมอบแก่ชุมชนให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นเป็นผู้พิจารณาสถานที่หรืออื่นๆ อันที่จะเป็นประโยชน์ต่อท้องถิ่น



รูปที่ 1 แสดงพื้นที่ศึกษาและถ่ายทอดเทคโนโลยีงานวิจัย

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

#### 2.1 สมบัติทางกายภาพของดินและโครงสร้างของดิน

สมบัติทางกายภาพของดิน ได้แก่ เนื้อดิน โครงสร้างของดิน ความหนาแน่น ความพรุน อุณหภูมิ และสีของดิน เป็นต้น ซึ่งเป็นปัจจัยร่วมที่สำคัญกับธาตุอาหารในดิน เพื่อเพิ่มผลผลิตของพืช มนุษย์รู้จักปรับปรุงเปลี่ยนแปลงสภาพที่ไม่เหมาะสมทางกายภาพให้สามารถเพิ่มผลผลิตมานานแล้ว เช่นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดิน โดยวิธีการไถพรวน ทำการปรับปรุงดินเหนียวให้สามารถถ่ายเทอากาศและระบายน้ำได้ดีด้วยเกลบ ในทางวิศวกรรมมนุษย์ได้อาศัยสมบัติทางกายภาพมาใช้ในการสร้างถนน หรือสร้างอาคาร โดยการเลือกดินที่เหมาะสม ซึ่งใช้ดินที่ไม่หดรัดหรือขยายตัวมากเกินไป ถ้าจำเป็นต้องใช้ต้องมีการดองเสาะซึมเพื่อป้องกันการเสียหาย

#### 2.2 เนื้อดิน

คำว่า เนื้อดิน หมายถึง ความหยาบ ความละเอียดของดิน ในส่วนของเนื้อดินนั้นเราพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นอนินทรีย์สารเท่านั้น ซึ่งมีประมาณไม่เกิน 96 เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบที่เป็นของแข็ง ส่วนที่ควบคุมเนื้อดินก็คือสัดส่วนระหว่างอนุภาคทราย (sand) ดินทรายแป้ง (silt) และดินเหนียว (clay) นิยมพิจารณาอนุภาคอนินทรีย์สารที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 2 มิลลิเมตร เนื้อดินไม่มีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช เนื้อดินมีผลทางอ้อมเนื่องจากเป็นตัวควบคุมสมบัติอื่นๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่นการดูดน้ำ การดูดซับไอออน และการแลกเปลี่ยนก๊าซ เป็นต้น

#### 2.3 อนุภาคของดิน

อนุภาคของดิน คือ ชิ้นส่วนของหินและแร่ ที่สลายตัวหรือผุกร่อนเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย ทั้งทางด้านกายภาพและทางด้านเคมี พวกที่ขนาดเล็ก โดยวัดเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลไม่เกิน 2 มิลลิเมตร เรียกว่า ดินผง (fine earth) อนุภาคของดินแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1. กลุ่มขนาดทราย (sand separate)

2. กลุ่มขนาดทรายแป้ง (silt separate)

3. กลุ่มขนาดดินเหนียว (clay separate)

เกณฑ์ในการจัดกลุ่มขนาดของอนุภาคดินที่นิยมแพร่หลายมีอยู่ด้วยกัน 3 ระบบ คือ ระบบของสหรัฐอเมริกา ระบบสากล และระบบของยุโรป มีรายละเอียดดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 1.

ตาราง 1 เกณฑ์ในการจัดกลุ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดิน

| อนุภาคดิน                          | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดิน วัดเป็นมิลลิเมตร |                |                  |
|------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------|------------------|
|                                    | ระบบสหรัฐอเมริกา                                   | ระบบสากล       | ระบบใหม่ของยุโรป |
| ดินทรายหยาบมาก (very coarse sand)  | 1.00 – 2.00                                        | -              | 1.00 - 2.00      |
| ดินทรายหยาบ (coarse sand)          | 0.50 – 1.00                                        | 0.20 – 2.00    | 0.50 - 1.00      |
| ดินทราย (medium sand)              | 0.25 - 0.50                                        | -              | 0.20 - 0.50      |
| ดินทรายละเอียด (fine sand)         | 0.10 - 0.25                                        | 0.02 – 0.20    | 0.10 - 0.20      |
| ดินทรายละเอียดมาก (very fine sand) | 0.05 - 0.10                                        | -              | 0.05 - 0.10      |
| ดินทรายแป้งหยาบ (coarse silt)      | -                                                  | -              | 0.02 - 0.05      |
| ดินทรายแป้ง (silt)                 | 0.002 - 0.05                                       | 0.002 - 0.02   | -                |
| ดินทรายแป้งละเอียด (fine silt)     | -                                                  | -              | 0.002 - 0.02     |
| ดินเหนียว (Clay)                   | เล็กกว่า 0.002                                     | เล็กกว่า 0.002 | เล็กกว่า 0.002   |

ที่มา: (บุญชุม เปี้ยแดง และคณะ, 2526)

## 2.4 สมบัติทางประการของกลุ่มขนาดต่าง ๆ ของอนุภาคดิน

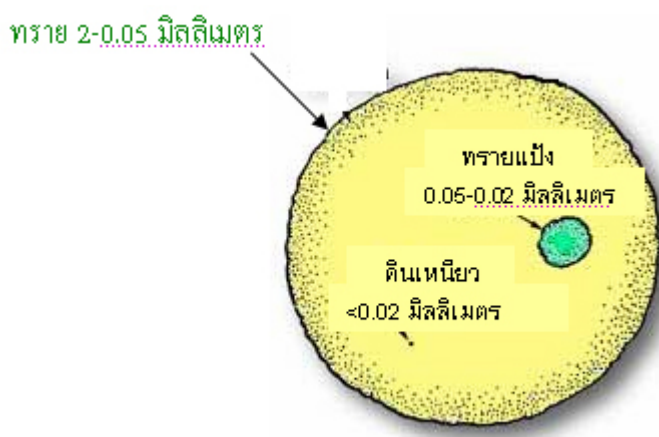
ดินผงจะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง เล็กและใหญ่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าจนถึงต้องใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนส่องดูจึงจะเห็นได้ จึงมีการแบ่งขนาดของอนุภาคดินออกเป็นกลุ่มขนาดต่างๆ ได้ 3 กลุ่มดังต่อไปนี้คือ

2.4.1 กลุ่มขนาดทราย (sand separate) รูปที่ 2. สามารถมองเห็นด้วยตา อนุภาคไม่เกาะติดกับอนุภาคอื่น ๆ สากมือ ไม่เหนียว ปั้นเป็นรูปต่าง ๆ ไม่ได้ และไม่พองตัวหรือหดตัว ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ และ เฟลด์สปาร์ เป็นส่วนใหญ่

2.4.2 กลุ่มขนาดทรายแป้ง (silt separate) รูปที่ 2. สามารถมองเห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา มีลักษณะอ่อนนุ่มคล้ายแป้งผัดหน้า มีความเหนียวเล็กน้อย ยึดติดกับอนุภาคอื่นได้เล็กน้อย ปั้นเป็น

รูปต่างๆ ได้ซึ่งประกอบด้วยแร่ ควอตซ์ และ เฟลด์สปาร์ เป็นส่วนใหญ่ และมีแร่ดินเหนียวปริมาณเล็กน้อย

2.4.3 กลุ่มขนาดดินเหนียว (clay separate) รูปที่ 2. สามารถมองเห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนมีลักษณะเหนียวเหนอะหนะสามารถปั้นรูปต่าง ๆ ได้ดีเมื่อชุ่ม แฉงเมื่อแห้ง พองตัวและหดตัวได้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 2 แสดงขนาดของอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว  
ที่มา: (Anon, 2002)

## 2.5 ประเภทของเนื้อดินโดยทั่ว ๆ ไป

ประเภทของเนื้อดิน โดยคิดจากเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวซึ่งเป็นส่วนประกอบของเนื้อดินมารวมกันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้คือ

2.5.1 ดินเนื้อหยาบ (coarse textured soils) เป็นดินที่มีปริมาณอนุภาคทราย มากกว่าอนุภาคทรายแป้งและดินเหนียว ดินชนิดนี้ไถพรวนได้ง่าย ไม่เหนียวเหนอะหนะ และไม่จับกันเป็นก้อน เรียกดินชนิดนี้ว่าดินเบา (light soil) เนื้อดินในกลุ่มนี้ได้แก่ ทราย และทรายร่วน

2.5.2 ดินเนื้อปานกลาง (medium - texture soils) เป็นดินที่มีปริมาณอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวไม่แตกต่างกันมากนัก ดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ดินร่วนปนทราย ดินร่วน ดินร่วนปนดินทรายแป้ง ดินร่วนเหนียว ดินร่วนปนดินทรายแป้ง ดินร่วนปนดินทรายแป้ง และดินทรายแป้ง

2.5.3 ดินเนื้อละเอียด (fine - texture soils) หรือดินเหนียว เป็นดินที่มีปริมาณอนุภาคดินเหนียว มากกว่าอนุภาคทรายและดินทรายแป้งมีความเหนียวมากเมื่อได้รับความชื้น เนื้อดินละเอียด ปกติ

จับกันเป็นก้อน เมื่อแห้งจะแข็ง เวลาไถพรวนต้องใช้แรงมาก เราเรียกดินชนิดนี้ว่าดินหนัก (heavy soil) อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนดินทรายแป้ง และดินเหนียว

## 2.6 การวิเคราะห์หาประเภทของเนื้อดิน

การวิเคราะห์เพื่อใช้หาประเภทของเนื้อดิน สามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีสัมผัส และวิธีวิเคราะห์เชิงกล วิธีสัมผัสนิยมใช้ในภาคสนามเนื่องจากมีความสะดวกในการประเมิน แต่ต้องอาศัยความชำนาญ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 2.6.1 การทดสอบโดยวิธีสัมผัส (feel method)

การใช้ความรู้สึกลักษณะของเนื้อดินโดยการสัมผัส ผู้ที่สามารถจะบอกได้อย่างถูกต้อง ผู้บอกต้องอาศัยประสบการณ์อย่างมาก เพราะเมื่ออยู่ใกล้ช่วงเปลี่ยนแปลงของชั้นเนื้อดินมักจะผิดพลาดได้ง่ายเอิบ เจียวรัตน์ (2526) สรุปการบอกลักษณะของเนื้อดินโดยวิธีสัมผัสง่าย ๆ ดังต่อไปนี้

2.6.1.1 ทราย (sand) เมื่อสัมผัสจะรู้สึกมือมาก เวลาสังเกตจะเห็นว่าไม่เกาะติดกันจะเห็นอยู่เป็นเม็ด ๆ เมื่อแห้ง ถ้าเป็นก้อนพอจับขึ้นมาจะแตกออกจากกัน ถ้าดินชื้นใส่ลงในฝ่ามือและกำให้แน่น เสร็จแล้วปล่อยมือออกดินจะแตกออกจากกัน ไม่จับกันเป็นก้อน หรือจับก็หลวมมาก เนื้อดินลักษณะนี้ไม่ค่อยพบมากนัก

2.6.1.2 ทรายปนดินร่วน (loamy sand) สัมผัสจะรู้สึกมือเช่นเดียวกับทรายแต่น้อยกว่า เมื่อทำให้ชื้นแล้วใส่ลงในฝ่ามือเสร็จแล้วกำให้แน่น เมื่อปล่อยมือออกดินจะคงสภาพเป็นก้อนหลวม ๆ แต่พอสัมผัสจะแตกออกจากกัน

2.6.1.3 ดินร่วนปนทราย (sandy loam) เมื่อจับจะรู้สึกมือแต่มีความนิ่มกว่าทรายปนดินร่วน ดินเมื่อแห้งจะจับกันเป็นก้อน ๆ แต่พอใช้แรงกดเบา ๆ จะแตกออกจากกัน เมื่อทำให้ดินชื้นแล้วใส่ลงในฝ่ามือแล้วกำให้แน่น เสร็จแล้วปล่อยมือ ดินจะยังคงสภาพเป็นก้อนอยู่ หรือถ้าใช้หัวแม่มือและนิ้วชี้กดลงบนดินชื้นจะเกิดเป็นแผ่นแต่พอขยับมือเล็กน้อยก็จะแยกออกจากกัน

2.6.1.4 ดินร่วน (loam) เมื่อสัมผัสจะรู้สึกลักษณะดินชื้นจะนุ่มมือแต่ยังรู้สึกมืออยู่บ้างเล็กน้อย เป็นลักษณะของทรายละเอียด เมื่อแห้งจะจับกันเป็นก้อนแข็งพอประมาณต้องใช้แรงกดมากขึ้นจึงจะทำให้ดินแตกออกจากกันหรือถ้าทำให้ดินชื้นเมื่อใส่ลงในฝ่ามือกำให้แน่นแล้วปล่อยมือดินจะจับกันเป็นก้อนไม่แตกออกจากกัน

2.6.1.5 ดินร่วนปนทรายแป้ง (silt loam) เมื่อสัมผัสจะรู้สึกลักษณะดินชื้นจะอ่อนนุ่มมือ และลื่นคล้ายกับแป้งดินสอพองเวลาแห้งจะจับกันเป็นก้อน เวลาจับขึ้นมาจะไม่แตกออกจากกัน จะต้องใช้

แรงบีบหรือกดค่อนข้างมากจึงจะแตกเวลาดินเปียกหรือชื้น พอจะทำให้เป็นแผ่น ๆ ได้โดยใช้หัวแม่มือกับนิ้วชี้ แต่จะแตกออกจากกันได้ง่ายมาก

2.6.1.6 ดินร่วนเหนียว (clay loam) เมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็ง เมื่อดินชื้นหรือเปียก จะทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ ได้แต่เมื่อเวลาจับปลายข้างใดข้างหนึ่งไว้มันจะหักออกจากกันได้ง่าย หรือสามารถจะปั้นเป็นลูกกระสุนได้เวลาคลึงให้เป็นก้อนจะไม่ค่อยแน่นนักไม่สามมือ

2.6.1.7 ดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) เมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็ง เช่นเดียวกับพวกดินร่วนเหนียว แต่เมื่อขึ้นสัมผัสจะรู้สึกเหนียวและสามมือ และทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ ได้ สามารถปั้นให้เป็นลูกกลม ๆ

2.6.1.8 ดินเหนียวปนทราย (sandy loam) เมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมาก เมื่อเปียกหรือชื้นจะทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ ได้จะเหนียวและสามมือดินแผ่นบาง ๆ ที่ทำขึ้นเมื่อเวลาจับปลายข้างใดข้างหนึ่งยกขึ้นจะไม่หักออกจากกันและสามารถจะคลึงให้เป็นก้อนกลม ๆ คล้ายลูกกระสุนได้ง่ายและแน่น

2.6.1.9 ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay loam) เมื่อสัมผัสจะรู้สึกดินชื้นจะมีลักษณะคล้ายกับพวกดินร่วนเหนียว แต่มีความรู้สึกที่นุ่มมือ และลื่นมือกว่าพวกดินร่วนเหนียว ทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ ได้เช่นเดียวกัน และเมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็ง

2.6.1.10 ดินเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay) เมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมาก เมื่อเปียกจะเหนียวจัด แต่เมื่อสัมผัสจะรู้สึกนุ่มมือ สามารถทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ ได้ และไม่หักออกจากกันเมื่อจับปลายข้างใดข้างหนึ่งชูขึ้น

2.6.1.11 ดินเหนียว (clay) เมื่อแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมากจะยึดหยุ่นและเหนียวมากเมื่อเปียก เมื่อดินชื้นเวลาบีบด้วยหัวแม่มือกับนิ้วชี้ จะทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ และยาวได้ และไม่หักออกจากกัน สามารถจะปั้นให้เป็นก้อนกลม ๆ และแน่นได้ง่ายเมื่อดินชื้น สำหรับชั้นของเนื้อดินที่เรียกว่า ทรายแป้ง นั้น จะลื่นและนุ่มมือ แต่จะไม่เหนียวนัก มักจะไม่พบในดินตามปกติ

## 2.6.2 การวิเคราะห์เชิงกล (mechanical analysis)

หรือวิธีการแจกแจงขนาดของอนุภาค เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ใช้อุปกรณ์และสารเคมี สามารถแยกอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ได้อย่างถูกต้องโดยอาศัยหลักการว่า วัตถุที่มีขนาดแตกต่างกันจะตกตะกอนที่เวลาต่างกัน สามารถตรวจสอบเนื้อดินได้โดยอาศัยโคอะแกรมสามเหลี่ยม การวิเคราะห์เชิงกลมี 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 2.6.2.1 แยกอินทรีย์สารจากส่วนอื่นๆ โดยใช้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

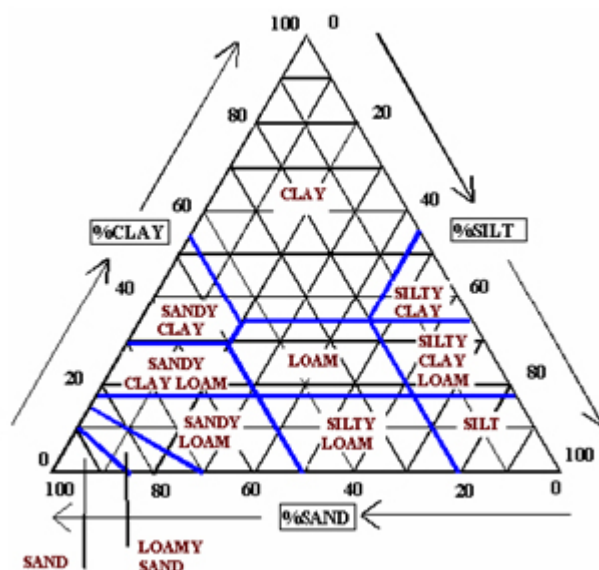
2.6.2.2 ทำให้อนุภาคนินทรีย์ทุกอนุภาคให้อยู่ในสภาพเดี่ยวๆ (dispersing agent) โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือแคลกอน (calgon)

2.6.2.3 แยกส่วนดินผง ขนาดใหญ่กว่าขนาด 2 มิลลิเมตรออกไปโดยใช้วิธีร่อนด้วย ตะแกรงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร

2.6.2.4 หาปริมาณอนุภาคในกลุ่มขนาดต่างๆในดินผงซึ่งทำได้ 2 วิธีคือโดยวิธีร่อนด้วย ตะแกรงและวิธีการตกตะกอน ซึ่งวิธีการหาปริมาณของอนุภาคในกลุ่มขนาดต่างๆโดยวิธี ตกตะกอน แบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ วิธีไปเปต (pipette method) วิธีไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer method) และวิธี แบ่งส่วนสารแขวนลอย (decapitation method) ในห้องปฏิบัติการของประเทศไทย นิยมใช้วิธีไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer method) ซึ่งมีขั้นตอนทำดังต่อไปนี้โดยนำตัวอย่างดินมาจัด อินทรีย์วัตถุ ด้วย ไฮโครเจนเปอร์ออกไซด์ ร่อนดินในน้ำผ่านตะแกรง 2 มิลลิเมตร ล้างดินด้วยน้ำทำ ให้ดินแห้ง ชั่งตัวอย่างดินที่ได้ แล้วนำไปทำเป็นสารแขวนลอยในน้ำด้วยการใส่สารส่งเสริมการ กระจายของอนุภาคดิน (dispersion agent) เช่นสารละลายแคลกอน (calgon solution) 5 เปอร์เซ็นต์ ปั่นสารแขวนลอยด้วยเครื่องปั่น ถ่ายของผสมลงใน กระบอกตวงแบบตกตะกอน (sedimentation cylinder) ให้หมดแล้วหย่อนไฮโดรมิเตอร์ ลงไปโดยตั้งเวลาอ่านที่ 40 วินาที และ 2 ชั่วโมง อ่าน อุณหภูมิ ค่าที่อ่านได้ที่ 40 วินาทีเป็นปริมาณของกลุ่มทรายแป้ง และ ดินเหนียว และ แคลกอน รวมกัน ส่วน 2 ชั่วโมงเป็นปริมาณของกลุ่มขนาดของดินเหนียวและ แคลกอน นำเอาผลการทดลอง ไปหาเปอร์เซ็นต์ของ ทราย ทรายแป้งและดินเหนียว จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปหาประเภทของเนื้อดิน โดยอาศัยไคอะแกรมสามเหลี่ยม

## 2.7 การใช้ไคอะแกรมสามเหลี่ยม

ไคอะแกรมสามเหลี่ยมเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า แต่ละด้านแบ่งออกเป็นหน่วยร้อยละของแต่ละ กลุ่มขนาดดินเหนียว ดินทรายแป้ง และ ดินทราย เมื่อหาเปอร์เซ็นต์ ดินเหนียว ดินทรายแป้ง และ ทราย ได้จากวิธีไฮโดรมิเตอร์แล้วให้นำมาลากเส้นทั้ง 3 ในไคอะแกรมสามเหลี่ยมตัดกันที่บริเวณใด ให้เรียกว่าดินประเภทนั้น รูปที่ 3. การใช้ไคอะแกรมสามเหลี่ยม โดยนำเอาดินที่จะศึกษามาหา เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียวได้ 70 เปอร์เซ็นต์ ดินทรายแป้งได้ 20 เปอร์เซ็นต์ และ ดินทราย ได้ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำเอา 3 เส้นมาลากไปพบกันในไคอะแกรมสามเหลี่ยมจะตกอยู่ในส่วนที่เรียกว่าดิน เหนียว สรุปได้ว่าดินที่ศึกษาเป็นดินประเภท ดินเหนียว เป็นต้น



รูปที่ 3 แสดงตารางมาตรฐานสำหรับใช้ประเมินประเภทของเนื้อดิน

ที่มา: (บุญชุม เปียแดง และคณะ, 2526)

## 2.8 ความพรุนของดิน

ความพรุนของดิน คือช่องว่างในดิน ช่องว่างในดินประกอบด้วยช่องว่างขนาดใหญ่ (macropore) น้ำและอากาศสามารถเคลื่อนที่ได้ดี และช่องว่างขนาดเล็ก (micropore) ซึ่งเป็นส่วนที่เก็บความชื้นไว้ น้ำจะไหลผ่านได้ยาก ในดินประเภทดินทรายซึ่งเป็นเนื้อดินหยาบ จะมีช่องว่างขนาดใหญ่มีจำนวนมาก โดยมีช่องว่างอยู่ระหว่าง 35 – 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดินเหนียวซึ่งมีเนื้อดินละเอียด โดยมีช่องว่างขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งมีช่องว่างอยู่ระหว่าง 40 – 60 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของดินที่อัดตัวแน่นจะมีช่องว่างทั้งหมดอยู่เพียง 25 – 30 เปอร์เซ็นต์

## สรุปสาระสำคัญ

ดิน (Soil) เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นด้วยสิ่งต่าง ๆ หลายอย่าง เช่น กรวด, ทราย, ดินเหนียว, อินทรียสาร เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของ หินต้นกำเนิด, การกัดกร่อนผุพัง, การพัดพา และการตกตะกอนทับถม เพื่อที่จะจัดหมวดหมู่ของดินที่มีคุณสมบัติเฉพาะคล้ายกันเข้าอยู่ในพวกเดียวกัน ตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน การจำแนกประเภทของดินจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากมีผู้เกี่ยวข้องกับดินอยู่หลายสาขาด้วยกัน การจำแนกประเภทดินจึงแตกต่างกันออกไป แล้วแต่วัตถุประสงค์ในการใช้งานในแต่ละสาขา เช่น ทางด้านเกษตรศาสตร์ จะจำแนกดินตามความอุดมสมบูรณ์ของธาตุสารที่พืชจะนำไปใช้ประโยชน์ ทางด้านธรณีวิทยาอาศัยลักษณะหินต้นกำเนิด

และการกักร่อนผุพัง เป็นปัจจัยในการจำแนก สำหรับทางวิศวกรรมโยธา พิจารณาคุณสมบัติทางฟิสิกส์และกลศาสตร์ของดินเป็นหลัก เช่น ขนาดของเม็ดดิน, แรงยึดเกาะของมวลดิน เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับประโยชน์ใช้สอยทางวิศวกรรมแต่ละหมวดหมู่ของดินที่จัดเข้าไว้ จะมีอักษรย่อเฉพาะซึ่งจะเป็นที่เข้าใจได้โดยง่ายในหมู่วิศวกร หรือบุคคลที่เกี่ยวข้องในวงการวิศวกรรมโยธา การจำแนกดินมีหลายระบบ ขึ้นอยู่กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและประโยชน์ใช้สอย เช่น งานด้านถนนใช้ระบบ AASHTO Classification ซึ่งจัดแบ่งดินตามความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุก่อสร้างถนน, งานสนามบินใช้ระบบของ FAA Classification และระบบ Unified Soil Classification เป็นต้น

## 2.9 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

### 2.9.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบออกไซด์หลัก (Major Oxide) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (Minor Oxide) ซึ่งได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ออกไซด์ของอัลคาไล ( $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$ ) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) และมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจะจัดอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่สำคัญมี 4 อย่างดังนี้

- ก. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , ( $\text{C}_3\text{S}$ )
- ข. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , ( $\text{C}_2\text{S}$ )
- ค. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) องค์ประกอบทางเคมีคือ  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , ( $\text{C}_3\text{A}$ )
- ง. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite) องค์ประกอบทางเคมีคือ  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , ( $\text{C}_4\text{AF}$ )

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

| องค์ประกอบทางเคมี                | สัญลักษณ์      | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|----------------------------------|----------------|------------------|
| CaO                              | C              | 60 - 67          |
| SiO <sub>2</sub>                 | S              | 17 - 25          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | A              | 3 - 8            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | F              | 0.5 - 6          |
| MgO                              | M              | 0.1 - 4          |
| Na <sub>2</sub> O                | N              | 0.1 - 1.8        |
| K <sub>2</sub> O                 | K              | 0.1 - 1.8        |
| SO <sub>3</sub>                  | S <sup>-</sup> | 0.5 - 3.         |
| สารประกอบอื่นๆ                   | -              | 0.5 - 3.         |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา | LOI            | 0.1 - 3          |

ที่มา: (ชลประทานซีเมนต์, 2538)

### 2.9.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์คือ C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF เนื่องจากมีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ ดังแสดงใน ตารางที่2.

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

| คุณสมบัติ                    | สารประกอบ        |                  |                  |                   |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
|                              | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
| อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน  | เร็ว (ชม.)       | ช้า (วัน)        | ทันทีทันใด       | เร็วมาก(นาที)     |
| การพัฒนากำลัง                | เร็ว (วัน)       | ช้า (สัปดาห์)    | เร็วมาก(วัน)     | เร็วมาก(1วัน)     |
| กำลังประลัย                  | สูง              | สูง              | ต่ำ              | ต่ำ               |
| ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน | ปานกลาง          | ต่ำ              | สูง              | ปานกลาง           |

ที่มา: ชลประทานซีเมนต์ (2538)

### 2.9.2.1 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต $C_3A$

มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อน ทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้เฟสก่อตัวทันทีที่ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าสูงมากคือ กว่า 800 จูล/กรัม การพัฒนากำลังของ  $C_3A$  จะเร็วมากแต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำมากเมื่อเทียบกับ  $C_3S$  หรือ  $C_2S$

### 2.9.2.2 ไตรแคลเซียมซัลเฟต $C_3S$

มีมากในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสีเทาแก่ที่อุณหภูมิในเตาเผา 1250 องศาเซลเซียส  $C_3S$  สามารถสลายตัวได้ซึ่งการสลายตัวนี้ค่อนข้างช้า และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส  $C_3S$  จะมีเสถียรภาพและจะไม่เปลี่ยนสภาพ เมื่อผสม  $C_3S$  กับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวและให้กำลังค่อนข้างดีที่ 7 วันแรก

### 2.9.2.3 ไดแคลเซียมซัลเฟต $C_2S$

มีมากในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35  $C_2S$  บริสุทธิ์มีอยู่ 4 รูปแบบคือ  $\sim C_2S$  ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิในเตาเผา 1450 องศาเซลเซียส และเมื่อเย็นลงจะกลายเป็น  $\sim C_2S$  ซึ่งกลายเป็น  $BC_2S$  ซึ่งอุณหภูมิต่ำลงจะกลายเป็น  $C_2S$  ที่อุณหภูมิปกติ แต่เนื่องจาก  $C_2S$  อยู่ในสภาพที่ไม่บริสุทธิ์ สารแปลกปลอมอื่นและอัตราการลดลงของอุณหภูมิทำให้แปลงสภาพจาก  $BC_2S$  เป็น  $C_2S$  ไม่เกิดขึ้น ดังนั้น  $BC_2S$  จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิปกติ  $C_2S$  มีลักษณะเป็นเม็ดกลมและแสดงลักษณะทวินนิ่ง (Twining) เมื่อผสมกับน้ำสามารถทำปฏิกิริยาเกิดความร้อนขึ้น ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_2S$  ค่อนข้างต่ำมีค่าประมาณ 250 จูล/กรัม และการพัฒนากำลังของ  $C_2S$  ค่อนข้างช้าและช้ากว่า  $C_3S$  มากคือเริ่มให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป

### 2.9.2.4 เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ $C_4AF$

มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 ถึง 10 และอยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและทำให้เฟสก่อตัวอย่างรวดเร็ว ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าปานกลางประมาณ 420 จูล/กรัม โดย  $C_4AF$  พัฒนากำลังได้เร็วมากเช่นเดียวกับ  $C_3A$  แต่กำลังอัดประลัยค่อนข้างต่ำและต่ำกว่า  $C_3A$  เล็กน้อย

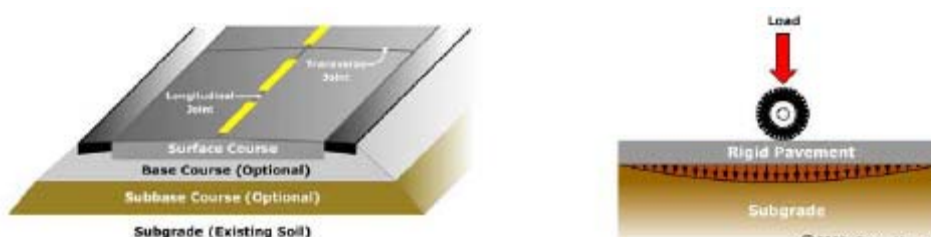
## สรุปสาระสำคัญ

ปูนซีเมนต์แลนด์ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มีเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) และโคโลไมต์ ( $MgCO_3$ ) เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่ใช้กันทั่วไปปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (greenish gray) และมัน น้ำหนักประมาณ 92

ปอนด์/ฟุต<sup>3</sup> เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียมซิลิกอน อลูมิเนียม และ เหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเมต ในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก จำนวนสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป เช่น ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัว อาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้จากการปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำ เป็นต้น

## 2.10 หลักการทำงานของถนนประเภทผิวแข็ง

ถนนคอนกรีตจัดเป็นถนนประเภททางผิวแข็ง(Rigid pavement) เนื่องจากโครงสร้างผิวทางคอนกรีตมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น(Modulus of Elasticity) สูง ส่งผลให้มีการแอ่นตัวน้อยมากเมื่อน้ำหนักกระทำบนผิวทาง โครงสร้างถนนคอนกรีตประกอบด้วย ชั้นผิวทางคอนกรีตวางอยู่บนชั้นดินเดิม (Subgrade) ดังแสดงในรูปที่4. ผิวคอนกรีตจะรับน้ำหนักเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง เช่นเดียวกับแผ่นพื้น(Plate) เนื่องจากความแข็งแกร่งของผิวทางคอนกรีต ทำให้โครงสร้างทางสามารถกระจายน้ำหนักจากล้อยานพาหนะลงสู่ดินชั้นทางเป็นเนื้อที่กว้างมีผลให้หน่วยแรง (Stress) ที่เกิดขึ้นในดินชั้นทางมีค่าต่ำ ในกรณีที่มีปัญหาเรื่องน้ำท่วม การระบายน้ำหรือดินชั้นทางมีคุณภาพไม่ดีพอ อาจเพิ่มชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางได้ ลักษณะเฉพาะของถนนคอนกรีตที่สำคัญคือจะมีรอยต่อ(Joint)ระหว่างแผ่นคอนกรีตทั้งตามขวางและตามยาวของถนนเพื่อช่วยให้แผ่นคอนกรีตสามารถหดและขยายตัวได้



รูปที่ 4 โครงสร้างชั้นทางคอนกรีต และการกระจายน้ำหนักจากล้อยานพาหนะ

## 2.11 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในถนนคอนกรีต

แผ่นคอนกรีตที่ใช้เป็นผิวทางมีความหนาไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นดินที่รองรับ แต่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงมาก ดังนั้นการรับน้ำหนักของล้อยานพาหนะจึงมาจากตัวแผ่นคอนกรีตเกือบทั้งหมด การคำนวณหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางคอนกรีต จึงเน้นพิจารณาในตัว

แผ่นคอนกรีตปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดหน่วยแรงในตัวแผ่นคอนกรีต ได้แก่ น้ำหนักจากล้อ ยานพาหนะ, การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, แรงเสียดระหว่างคอนกรีตกับผิวดิน, แรงเกิดในร่องรอยต่อ ค่าหน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้นในแผ่นคอนกรีต จากปัจจัยต่างๆส่วนใหญ่แล้วจะต้องนำมารวมกัน ผลรวมที่ได้จะต้องไม่มากเกินไปกว่าหน่วยแรงที่ผิวทางคอนกรีตจะรับได้

## 2.12 ทฤษฎีการออกแบบถนนคอนกรีต

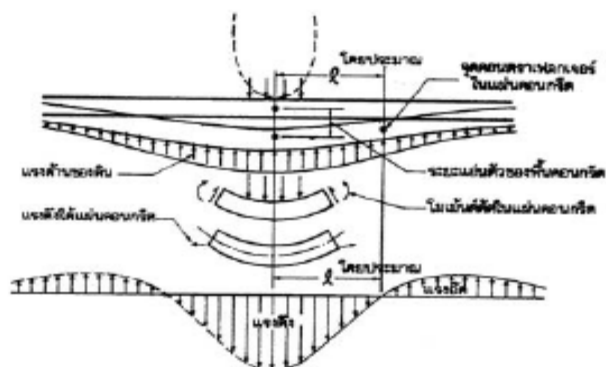
ทฤษฎีการออกแบบถนนคอนกรีตแตกต่างกับถนนลาดยาง ในขณะที่ถนนลาดยาง การกระจายน้ำหนักจะแผ่ขยายลดหลั่นลงไปในแต่ละชั้นของโครงสร้างชั้นทาง แต่สำหรับถนนคอนกรีตแล้ว ผิวคอนกรีตจะทำหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างรับน้ำหนักเช่นเดียวกับระบบแผ่นพื้น(Plate) ที่วางตัวอยู่บนฐานรากที่ยึดหยุ่น ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็นการออกแบบโครงสร้างบนสปริงรวมหรือการออกแบบทฤษฎียึดหยุ่นของฐานราก Timmoshenko ได้แยกวิเคราะห์การแอ่นตัวของ Plate เป็น 3 ประเภท คือ (1) Plate บาง Deflection น้อย, (2) Plate บาง Deflection มาก, และ (3) Plate หนา ด้วยเหตุที่การแอ่นตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความหนา หลักการวิเคราะห์จึงจัดอยู่ในประเภทที่ (1)

## 2.13 Radius of Relative Stiffness

แผ่นคอนกรีตเมื่อรับน้ำหนักจากล้อของยานพาหนะก็จะเกิดการแอ่นตัว ความสามารถในการต้านทานต่อการแอ่นตัวขึ้นอยู่กับความแข็งแรง (Stiffness) ของแผ่นคอนกรีต และแรงต้านทานของดินที่รองรับได้ผิวทางคอนกรีต โดยการตั้งสมมติฐาน ไม่มีการเสีรูปร่างที่ระนาบกลางแผ่นพื้น ระนาบกลางนี้ยังคงสภาพไปตามการแอ่นตัว ระนาบอื่นๆแต่ละระนาบยังคงตั้งฉากกับระนาบกลางทั้งในเริ่มแรกและเมื่อมีการแอ่นตัว และไม่คิดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นทางขวางของระนาบ ผลการวิเคราะห์ได้สมการดังนี้

$$\ell = 4 \sqrt{\frac{E_c h^3}{12(1-\nu^2)K}}$$

|       |       |                                |
|-------|-------|--------------------------------|
| เมื่อ | $E_c$ | = Elastic Modulus of Concrete  |
|       | $h$   | = Concrete Thickness           |
|       | $\nu$ | = Poisson Ratio of Concrete    |
|       | $K$   | = Modulus of Subgrade Reaction |



รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งของ Radius of Relative Stiffness

#### 2.14 Westergaard Solution และหน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักของล้อยานพาหนะ

Westergaard 1920 ริเริ่มการวิเคราะห์หาหน่วยแรงในแผ่นคอนกรีต โดยตั้งสมมุติฐานไว้ว่า

2.14.1 แผ่นคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน

2.14.2 แรงต้านของดินใต้แผ่นคอนกรีตเป็นแรงตั้งฉากและเป็นสัดส่วนกับการแอ่นตัวของแผ่นคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 5.

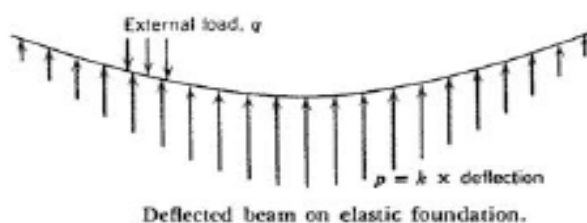
2.14.3 แรงต้านของดินใต้แผ่นคอนกรีตต่อพื้นที่ (Modulus of Subgrade Reaction;  $K$ ) มีค่าคงที่สม่ำเสมอ

2.14.4 ความหนาของแผ่นคอนกรีต มีความหนาสม่ำเสมอ

2.14.5 น้ำหนักกระทำเป็นแรงแผ่กระจายสม่ำเสมอบนพื้นที่วงกลม ถ้าเป็นที่มุมหรือที่ขอบ จะกระจายเป็น

วงกลม สัมผัสกับขอบแผ่นคอนกรีต

2.14.6 ถ้าน้ำหนักกระทำที่ Interior edge จะกระจายเป็นครึ่งวงกลม โดยมีเส้นผ่าขอบขนานตามขอบของแผ่นคอนกรีต



รูปที่ 6 แรงต้านน้ำหนักของดินเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการแอ่นตัว

จากการวิเคราะห์เพิ่มเติมถัดมาในปี 1927 และปี 1948 ได้คำนวณหน่วยแรงบนแผ่นคอนกรีตได้ดังนี้

A). หน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นได้แผ่นคอนกรีต เนื่องจากน้ำหนักกระทำกลางแผ่นคอนกรีต

$$\sigma_t = \frac{0.31625P_i}{h^2} \left[ 4 \log_{10} \left( \frac{\ell}{b} \right) + 1.0693 \right]$$

โดยที่  $\sigma_t$  = Tensile Stress due to Load

$P_i$  = Load P Increased by Impact Factor

$h$  = Slab Thickness

$a$  = Radius of the Load Contact Area

$\ell$  = Radius of Relative Stiffness

$b$  = Radius of Equivalent Distribution of Pressure at the Bottom of Slab

$$= \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h \quad \text{เมื่อ } a < 1.72$$

$$= a \quad \text{เมื่อ } a > 1.724h$$

B). หน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นได้แผ่นคอนกรีต เนื่องจากน้ำหนักกระทำภายในแผ่นคอนกรีตที่วางขนานตามขอบ

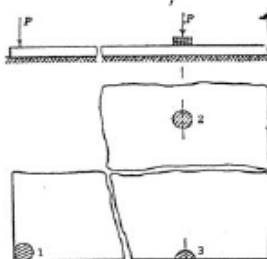
$$\sigma_t = \frac{0.57185P_i}{h^2} \left[ 4 \log_{10} \left( \frac{\ell}{b} \right) + 0.3593 \right]$$

โดยที่  $P_i$  = Load P' (Half the Load P) Acting on a Semicircle, Increased by Impact Factor

C). หน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแผ่นคอนกรีต เนื่องจากน้ำหนักกระทำที่มุมแผ่นพื้น

$$\sigma_t = \frac{3P_i}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right)^{0.6} \right]$$

และต่อมา Pickett 1951 ได้วิเคราะห์เป็นสูตรสำหรับ Protected Corners

$$\sigma_t = \frac{3.36P_i}{h^2} \left[ 1 - \frac{\sqrt{a/\ell}}{0.925 + 0.22(a/\ell)} \right]$$


รูปที่ 7 ตำแหน่งของน้ำหนักล้อที่กระทำบนแผ่นคอนกรีต

## 2.15 หน่วยแรงอื่นๆ ที่เกิดในถนนคอนกรีต

นอกเหนือจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวแผ่นคอนกรีตที่เกิดจากน้ำหนักล้อยานพาหนะ (Externally applied loads stresses) แล้ว ยังมีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยอื่นๆ ผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยอื่นๆ เหล่านี้หากเกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กันและมีผลมากเพียงพอ ต้องนำมาคิดคำนวณในการวิเคราะห์ออกแบบด้วยเช่น

1. Curling stresses
2. Wrapping stresses
3. Friction stresses
4. Infiltration stresses

## 2.16 Curling Stress และ Wrapping Stress

Curling stress เป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิตามความหนาของแผ่นคอนกรีตที่ไม่เท่ากัน เมื่อแผ่นคอนกรีตมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวคอนกรีตและใต้แผ่นคอนกรีตแล้วการขยายตัวและหดตัวไม่เท่ากันทำให้แผ่นคอนกรีตจะเกิดการห่อตัว เช่นเมื่อเวลากลางวัน ผิวบนคอนกรีตมีอุณหภูมิสูงกว่าผิวล่าง แผ่นคอนกรีตจะเกิดการแอ่นตัวขึ้น จากการศึกษาของ Bradbury, R.d. ในปี ค.ศ.1938 โดยอาศัยทฤษฎีของ เวสเตอร์การ์ด ได้กำหนดสมการสำหรับคำนวณหาค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดจากการห่อตัวของแผ่นคอนกรีตดังนี้

หน่วยแรงที่เกิดกลางแผ่นคอนกรีต

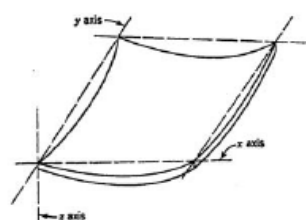
$$\sigma_x = \left( \frac{E \epsilon_t \Delta_t}{2} \right) \left[ \frac{(C_x + \nu C_y)}{1 - \nu^2} \right]$$

$$\sigma_y = \left( \frac{E \epsilon_t \Delta_t}{2} \right) \left[ \frac{(C_y + \nu C_x)}{1 - \nu^2} \right]$$

หน่วยแรงที่เกิดบริเวณขอบแผ่นคอนกรีต

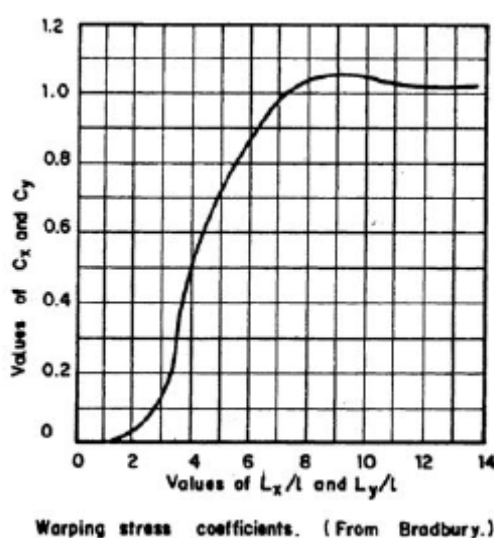
$$\sigma_x = \frac{C_x E \epsilon_t \Delta_t}{2}$$

$$\sigma_y = \frac{C_y E \epsilon_t \Delta_t}{2}$$



รูปที่ 8 การเกิดแรงห่อตัวในแผ่นคอนกรีต

- เมื่อ  $E$  = โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต  
 $U$  = อัตราส่วนบัวของของคอนกรีต  
 $E_t$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัวและการหดตัวของคอนกรีต  
 $\Delta_t$  = ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวบนและผิวล่างของคอนกรีต  
 $C_x$  = สัมประสิทธิ์ในทิศทางด้านกว้าง(หาจากรูปที่ 6)  
 $C_y$  = สัมประสิทธิ์ในทิศทางด้านตั้งฉากกับด้านกว้าง(หาจากรูปที่ 6)  
 $L_x$  = ความกว้างของแผ่นคอนกรีต  
 $L_y$  = ความยาวของแผ่นคอนกรีต



Warping stress coefficients. (From Bradbury.)

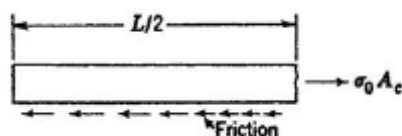
รูปที่ 9 แผนภูมิที่ใช้กำหนดค่า สัมประสิทธิ์  $C_x$  และ  $C_y$

## 2.17 Friction Stress

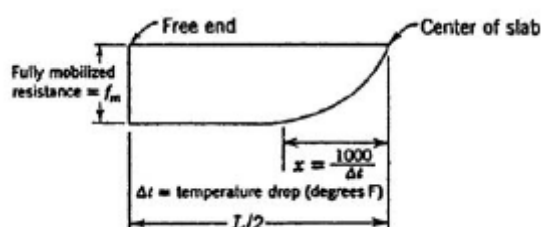
Friction Stress เป็นหน่วยแรงที่เกิดจากการยึดหดตัวของแผ่นคอนกรีต เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การเคลื่อนตัวนี้จะถูกยึดด้วยแรงเสียดระหว่างแผ่นคอนกรีตกับดินที่รองรับ ถ้าแผ่นคอนกรีตยาวมากโดยไม่มีรอยต่อ อาจมีผลทำให้เกิดการแตกร้าวได้ โดยทั่วไปแล้วแผ่นคอนกรีตยาวไม่เกิน 18 เมตร (60 ฟุต) จะไม่มีผลทำให้เกิด Friction Stress จนเกิดรอยแตกร้าวได้

$$\sigma_c = \frac{W L f}{200 h}$$

- เมื่อ  $\sigma_c$  = แรงต่อหน่วยพื้นที่ กก./ตร.ซม.  
 $W$  = น้ำหนักแผ่นคอนกรีต กก./ตร.ม.  
 $L$  = ความยาวของแผ่นคอนกรีต ม.  
 $f$  = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างแผ่นคอนกรีตกับดิน =  $1 - 2 \approx 1.5$   
 $h$  = ความหนาของแผ่นคอนกรีต ซม.



รูปที่ 10 แรงเกิดจากการยึดและหดตัวของแผ่นคอนกรีต



รูปที่ 11 แรงต้านของดินคันทางแปรเปลี่ยนตามความยาวของแผ่นคอนกรีต

## 2.18 Infiltration Stress

เมื่อมีวัสดุแปลกปลอมเช่นเศษหิน กรวด แทรกตัวลงในระหว่างรอยต่อ ในบริเวณที่วัสดุอุดรอยต่อหลุดหายไปในช่วงการหดตัว เมื่อแผ่นคอนกรีตเกิดการขยายตัวหรือมีการผสมผสานของน้ำหนักรอยต่อจะอัดเศษวัสดุเหล่านี้ ทำให้เกิดการบั่นกระแทะ หรือในกรณีที่เกิดการอัดทะลัก เศษหินกรวดที่อยู่ใต้แผ่นคอนกรีตมีโอกาสดูดขึ้นมาแทรกอยู่ในรอยต่อ ก็จะเกิดการบั่นกระแทะได้เช่นเดียวกัน

### สรุปสาระสำคัญ

ปัจจัยการออกแบบ (Design Factors) การออกแบบความหนาของถนนคอนกรีตถูกกำหนดโดยปัจจัย 4 ประการดังนี้

กำลังแบกทานของดินคันทาง (Bearing Capacity of Subgrade) จากข้อมูลทางธรณีวิทยา สำหรับงานก่อสร้างทางหลวงของประเทศไทย ดินคันทางเดิม (Subgrade) ตามธรรมชาติจะมีค่า CBR เฉลี่ยเท่ากับ 2% ซึ่งเทียบเป็นค่า K ได้เท่ากับ 70 pci (ในการออกแบบถนนคอนกรีตจะใช้ค่า K เท่ากับ 125 pci โดยคำนึงถึงผลจากความหนาของ Sand Cushion และชั้นรองพื้นทางด้วย)

กำลังรับแรงคดของคอนกรีต (Flexural Strength) หรือ โมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการต้านทานแรงคดของคอนกรีต ซึ่งได้จากการทดลองในลักษณะ Beam Test เช่น Third Point Loading หรือ Center Point Loading แต่การทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสแตกร้าว นั้นค่อนข้างยุ่งยากและไม่สะดวก ในทางปฏิบัติสำหรับการควบคุมงานถนนคอนกรีตทาง Iowa State Highway Commission (1971) ได้แนะนำให้ใช้ค่าเท่ากับ  $0.137 \cdot f_c$  ของ Cylinder Strength ซึ่งจะมีค่าเท่ากับการทดสอบ Third Point Loading

อายุบริการออกแบบ (Design Period) อายุบริการออกแบบของถนนคอนกรีตโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับปริมาณการจราจร ถ้าเป็นถนนที่มีปริมาณการจราจรน้อยหรือเป็นถนนที่ไม่ได้เปิดเป็นทางคมนาคมหลัก มักจะออกแบบให้มีอายุการใช้งานประมาณ 40 ปี แต่ถ้าถนนมีปริมาณการจราจรสูงและมีรถบรรทุกหนักผ่านมากก็มักจะออกแบบให้มีอายุการใช้งานประมาณ 20 – 30

## 2.19 รายงานการวิจัยทางด้านวิศวกรรมชิ้นส่วนประกอบ

บัญชา ชื่นจิต, (2542) ศึกษาการผลิตอิฐปูพื้นจากดินลูกรังสุรินทร์ ซีเมนต์ ทราย และหินเกร็ด ส่วนผสมได้จากการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงจากสัดส่วนของโครงสร้างมาตรฐานของคอนกรีต 1 : 3 : 5 จากนั้นจึงเพิ่มปริมาณส่วนผสมของดินลูกรังสุรินทร์เข้าไปในสัดส่วน 1,3 และ 6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และจากสัดส่วนของโครงสร้างมาตรฐานของคอนกรีต 1: 2 : 4 จากนั้นจึงเพิ่มปริมาณส่วนผสมของดินลูกรังสุรินทร์เข้าไปในสัดส่วน 1,3 และ 6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ออกมาสามารถนำมาผลิตอิฐปูพื้นได้ทั้งหมด แต่พบได้ว่าสัดส่วนของโครงสร้างที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานในการผลิตอิฐปูพื้นฐานมากที่สุดคือ 3 : 1 : 3 : 5 (ดินลูกรังสุรินทร์ (3) ซีเมนต์ (1) ทราย (3) และหินเกร็ด (5) ) ทั้งนี้เนื่องจากมีความแข็งแรงเมื่อนำมาใช้งานได้โดยไม่แตกเสียหาย ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับสัดส่วนโครงสร้างที่ 3 : 1 : 3 : 5 มีปริมาณการใช้ดินลูกรังสุรินทร์ที่ปริมาณมากพอสมควร อันจะทำให้ลดต้นทุนในการผลิต และยังเป็นการใช้วัตถุดิบภายในท้องถิ่น, เรวัชชัย รอดเจริญ, (2550) ศึกษาพฤติกรรมของดินลูกรังทรายที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ซีเมนต์นำผลจากตัวอย่างของดินไปหาความหนาแน่นสูงสุดแล้วนำไปผสมกับทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60 และ 80 ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณทรายเพิ่มขึ้นจะทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้น โดยพบว่าปริมาณทรายร้อยละ 20 จะเหมาะสมสำหรับปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังหลังจากดินลูกรังผสมกับทรายในอัตราส่วนร้อยละ 20 แล้ว ดินดังกล่าวจะถูกนำมาปรับปรุงคุณภาพให้มีกำลังรับแรงอัด UCS มากกว่า 17.5 กก/ซม เพื่อใช้ในงานก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ โดยนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดย น้ำหนักทั้งหมด

ของตัวอย่าง และบ่มด้วยอากาศ 7 วัน จากการศึกษาพบว่า อัตรา ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 สามารถรับแรงอัด USC มากกว่า 17.5 กก/ตร.ซม และสามารถสรุป ได้ว่า การนำดินลูกรังทราย ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ จะใช้ปูนซีเมนต์น้อยกว่า การนำดินลูกรังผสมซีเมนต์ เพียงอย่างเดียว, Davidson et al.,(1992) และ Reinhold (1995)., ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมอัลตราติกของดินที่ผสม ซีเมนต์โดยการนำดินเหนียวมาผสมซีเมนต์และทราย พบว่าดินที่มีอัตราส่วน 75:25(ทราย:ดินเหนียว) จะให้ค่ากำลังสูงสุดและปริมาณดินที่เหมาะสมคือร้อยละ 25

Terrel et al.,(1979) ได้กล่าวว่าดินที่มีอินทรีย์วัตถุปะปนอยู่จะมีค่า Ph ต่ำกว่า 12.10 (Sherwood, 1968) จะทำให้หน่วยปฏิกิริยาไฮดรเจนและกำลังจะลดลงเนื่องจาก Organic จะดูดซับ Calcium ions ไว้จากปฏิกิริยาไฮดรเจนเป็นผลทำให้ pHของดินลดลงและไปยับยั้งกระบวนการ แข็งตัวของดินผสมซีเมนต์ นอกจากนี้ N.G (1966) ได้ศึกษาค่า Activity ของดินจะแปรผันตรงกับ ความต้องการซีเมนต์ กล่าวคือดินที่มี Activity สูงๆ จะมีการใช้ปริมาณซีเมนต์ในปริมาณที่สูงกว่า ดินที่มีค่า Activity ต่ำกว่าในระดับในระดับของกำลังที่ต้องการเดียวกัน

K. Freidin and E. Erell , (1995) ได้ทำการศึกษาอิฐดินที่ผสมด้วยเถ้าลอยถ่านหินและ Slag ที่ทำการบ่มในสภาวะปกติ (Open Air) โดยศึกษาทางด้านกำลังอัด โครงสร้างอนุภาค (Microstructure) ด้านคุณสมบัติของวัสดุ โดยศึกษาปริมาณน้ำแก้ว (Water glass) จากการศึกษาพบ กำลังอัดมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อผสมเถ้าลอยถ่านหินและ Slag การดูดซึมน้ำแบบอ้อมมีแนวโน้มที่สูงทั้ง ที่ผสมเถ้าถ่านหินและ Slag การเกิดปฏิกิริยาของโครงสร้างอนุภาคมีการพัฒนาทางด้าน C-S ซึ่ง ส่งผลให้กำลังของอิฐเพิ่มขึ้น., S.Kumar ,(2000) ได้ศึกษาเถ้าลอย(Fly ash) ปูนขาว (Lime) และยิป ซัม สำหรับเป็นวัสดุประสานมวลละเอียดเพื่อศึกษาเป็นอิฐแนวทางเลือกใหม่ โดยพิจารณา ด้าน กำลังอัด การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความคงทนโดยในจำลองสภาวะสิ่งแวดล้อมของซัลเฟต โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการอัตราส่วนของโซเดียม ซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 14.79 กรัม ต่อน้ำ 1.00 ลิตร เทียบกับให้สารละลายกระทำกับตัวอย่างทดสอบ 10,000 ppm. บ่มที่ 72 วัน จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยที่มากกว่าร้อยละ 40 แนวโน้ม ของกำลังอัดจะลดลง หน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น ทางด้านความ คงทนการลดลงของกำลังอัดที่ผ่านการบ่มด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 72 วัน พบว่าอิฐ ที่มีการผสมเถ้าลอยจะไม่สามารถใช้กับการถูกสถานะของซัลเฟตกระทำได้ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติ อิฐดังกล่าวก็ยังเพียงพอสำหรับเป็นวัสดุก่อสร้างบ้านต้นทุนต่ำในอินเดียได้

Giuseppe Cultrone and Eduardo Sebastian ,(2009) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอย (Fly ash) ผสม กับดินเหนียวเพื่อปรับปรุงคุณภาพอิฐดินเหนียวแบบตัน จากการศึกษาพบว่าขนาดของเถ้าลอย นำไปสู่การลดลงของความหนาแน่นของอิฐ ซึ่งมีอิทธิพลถึงการปรับปรุงด้านความคงทน และ

เสื่อมสภาพที่น้อยอันเกิดจากผลึกเกลือในโพรง การเพิ่มเกลือในส่วนผสมอิฐดินเหนียวสามารถลดจำนวนของโพรงขนาดเล็กในอิฐได้ นั่นหมายถึงโพรงที่เกิดกับวัสดุที่มากนั้นก็จะมีโอกาสที่จะทำให้เกลือนั้นเข้าทำลายและให้เกิดความเสียหายได้ง่าย., Ismail Demir , M.Serhat Baspinar and Mehmet Orhan , (2005) ได้ศึกษาการนำส่วนที่เหลือจากการผลิตในส่วนของเยื่อกระดาษและเส้นใย Cellulose ขนาด 5 และ 20 ไมครอน เพื่อทำผลิตภัณฑ์อิฐดินเหนียว โดยทำการศึกษา กำลังอัด กำลังดัด , Plasticity , การดูดซึมน้ำ หน่วยน้ำหนัก และ ความพรุน (Porosity) จากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเดียวกันกับปริมาณของผงเยื่อกระดาษ การเพิ่มเส้นใย Cellulose สามารถลดการหดตัวและเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณผงเยื่อกระดาษร้อยละ 5 และที่ ร้อยละ 10 ไม่พบความเป็นไปได้ในการเพิ่มปริมาณของเยื่อกระดาษเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการหดตัว กำลังดัดมีแนวโน้มที่ดีตามอายุ แต่กำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของผงเยื่อกระดาษ อย่างไรก็ตาม ค่าของกำลังอัดก็มากกว่ามาตรฐาน TS705

Jose Luis Reyes Ariza , Alejandro Manzano-Ramirez , Yuri Vorobiev and Jose de Jesus Perez Bueno ,(2009) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและความร้อนของอิฐดินเหนียวผสมยิปซัม โดยทำการทดสอบกำลังอัด(Compressive Strength) โมดูลัสการแตกหัก (Modulus of Rupture ., Flexural Test) ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) และ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) เปรียบเทียบอิฐดินโพลิเมอร์และอิฐซีเมนต์ จากการทดสอบพบว่าคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ของอิฐดินเหนียวผสมยิปซัมมีค่าต่ำกว่าอิฐดินโพลิเมอร์และอิฐซีเมนต์ , ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) มีค่าน้อยกว่าอิฐซีเมนต์ แต่ขณะเดียวกันก็มีความสอดคล้องกันกับอิฐดินโพลิเมอร์

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

แนวคิดในงานวิจัยได้นำดินท้องถิ่นจากแหล่งราชบุรี ผสมกับหินฝุ่นราชบุรีและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อผลิตเป็นบล็อกผิวทางวัสดุเชิงประกอบสำหรับปูผิวทางถนนท้องถิ่น โดยทำการศึกษาคุณสมบัติด้านเคมีและฟิสิกส์ (Chemical and physical properties), คุณสมบัติด้านกลศาสตร์ (The mechanics investigations) ซึ่งประกอบด้วย ด้านกำลังอัดและดัด (Compressive and flexural strength properties) [17,20] โดยใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด 115\*225\*60 มม. ด้านคุณสมบัติด้านกายภาพของอิฐประกอบด้วย การดูดซึมน้ำ (Water absorption), หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) การทนการขัดสี (Abrasive Resistance Test) การชะล้างผิวถนน และคุณสมบัติทางด้านขนาดและน้ำหนัก (Measurement size and weight) ของผลิตภัณฑ์ ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ที่ร้อยละ 5 และหินฝุ่นราชบุรี 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด (w/p) 0.1475 0.1788 0.2100 0.2413 0.2725 และ 0.3038 เปรียบเทียบกับอิฐดินผสมปูนซีเมนต์ควมคุม (SCB) ที่ร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด (w/p) ที่ 0.2275, 0.2588, 0.2900, 0.3213, 0.3525 และ 0.3838 รวมถึงการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ด้านราคาของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถพิจารณาตามขั้นตอนการวิจัยจาก รูปที่ 12

#### 3.1 ด้านวัสดุวิศวกรรมขั้นสูง (Advance Materials Engineering, AME)

3.1.1 ทดสอบคุณสมบัติด้านเคมีของดินท้องถิ่นและหินฝุ่นราชบุรี โดยใช้มาตรฐานการทดสอบของสหรัฐอเมริกา (ASTM Standards) และ การทดสอบ-วิเคราะห์ ด้วยเครื่องมือขั้นสูงโดย XRF (X-Ray Fluorescence)

3.1.2 ทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพของดินท้องถิ่นราชบุรี โดยวิเคราะห์ทดสอบโดยการ ใช้ SEM (Scanning Electron Microscope)

3.1.3 ทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัด (Compressive strength) [17] และ กำลังดัด (Flexural strength) [20] ของบล็อกผิวทางวัสดุเชิงประกอบ เปรียบเทียบกับมาตรฐานผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กของกรมโยธาธิการและผังเมือง ที่อายุ 3, 7, 14, 28, และ 60 โดยมาตรฐาน ASTM C67.

3.1.4 ทดสอบด้านการชะล้างผิวดินของบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบ(Composite Soil Block) โดยการจำลองฝนการทดสอบเป็นตลอดระยะเวลาอายุ 3, 7, 14, 28, และ 60 วัน โดยวิธี Erosion on raining simulation.

3.1.5 ทดสอบหาอัตราการดูดซึมน้ำ (Water absorption), วิธีการการวัดค่าของขนาดและน้ำหนัก(Measure of size and weight) และ หน่วยน้ำหนัก(Unit weight) ของบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบ(Composite Soil Block) โดยมาตรฐาน ASTM C67.

3.1.6 ทดสอบความต้านทานต่อการขัดสีโดยใช้มาตรฐานการทดสอบของสหรัฐอเมริกา (ASTM Standards) โดยมาตรฐาน ASTM C 944.

3.1.7 หาอัตราส่วนที่เหมาะสม(Optimize),ของบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบ(Composite Soil Block)

3.1.8 สร้างแบบตัวอย่างสำหรับมอบให้ชุมชนเพื่อเป็นแนวทางการใช้เทคโนโลยีอย่างง่าย

3.1.9 วิเคราะห์และเปรียบเทียบต้นทุนของบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบกับถนนที่สร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปในท้องถิ่น

### 3.2 มิติด้านสังคมและการมีส่วนร่วม (Socials and Participation, S&P)

3.2.1 ระดมความคิดเห็นเกี่ยวกับวิถีและแนวทางการใช้ชีวิตแบบเศรษฐกิจพอเพียงในชุมชน

3.2.2 ระดมความคิดเห็นและแนวทางการสร้างแบบตัวอย่างต้นทุนต่ำตามหลักเศรษฐกิจพอเพียงในชุมชนเพื่อหาความเหมาะสม-รูปแบบและความต้องการตามแนววิถีของชุมชนจังหวัดราชบุรี

3.2.3 มอบแบบตัวอย่างที่สร้างตามหลักเศรษฐกิจพอเพียงและวิถีของชุมชนในท้องถิ่นกับท้องถิ่นที่ศึกษาถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับชุมชนในรูปแบบของการจัดสัมมนาวิชาการ-ข้อมูลงานวิจัยตลอดจนให้คำปรึกษาโดยผ่านองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นที่ผ่านการอบรมเทคโนโลยี

### Reserch chart



รูปที่ 12 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลและการวิจารณ์

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านต่างๆ ของบล็อกผิวทางวัสดุเชิงประกอบซึ่งเป็นส่วนผสมจาก ดินท้องถิ่นราชบุรี หินฝุ่นราชบุรีและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยปริมาณส่วนผสมที่คงที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 และหินฝุ่นราชบุรีร้อยละ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด 0.1475 0.1788 0.2100 0.2413 0.2725 และ 0.3038 เปรียบเทียบกับอิฐดินผสมปูนซีเมนต์ควม(SCB) ที่ร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด (w/p) ที่ 0.2275, 0.2588, 0.2900, 0.3213, 0.3525 และ 0.3838 สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

##### 4.1.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบ (Chemical properties of raw materials)

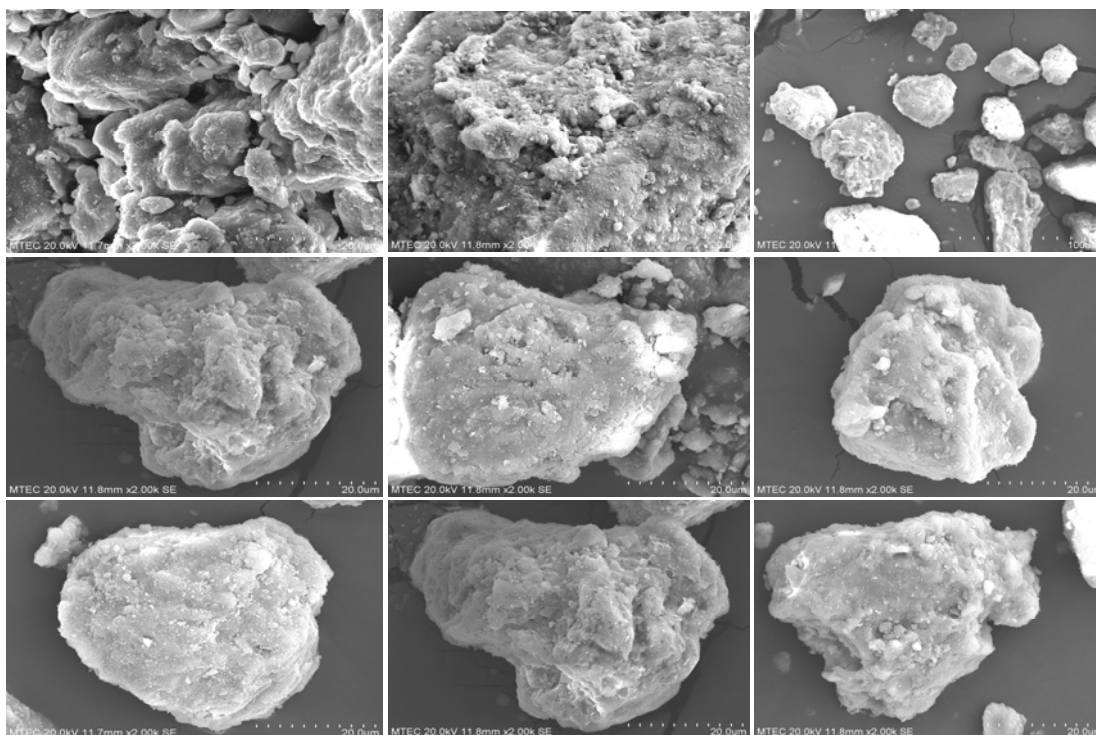
จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) นั้น เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของออกไซด์หลักที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยา อาทิเช่น ซิลิกอนไดออกไซด์( $\text{SiO}_2$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และอลูมินา( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ของหินฝุ่น จากแหล่งจังหวัดราชบุรี มีค่าร้อยละ 57.08 และดินท้องถิ่นจากจังหวัดราชบุรีมีค่าร้อยละ 81.91 และค่าสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ที่ร้อยละ 41.31 และ 2.39 ตามลำดับ ดังแสดงใน ตารางที่ 4

| Oxides                         | Concentrations |                      |
|--------------------------------|----------------|----------------------|
|                                | Local Soil     | Local Limestone dust |
| MgO                            | 1.25           | 0.58                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25.23          | 2.48                 |
| SiO <sub>2</sub>               | 38.47          | 4.75                 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.17           | N/D                  |
| SO <sub>3</sub>                | 6.04           | N/D                  |
| Cl                             | 0.04           | N/D                  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.87           | 0.06                 |
| CaO                            | 18.21          | 49.85                |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.2            | 0.12                 |
| MnO                            | 0.07           | N/D                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.85           | 0.79                 |
| NiO                            | 0.01           | N/D                  |
| CuO                            | 0.01           | N/D                  |
| Rb <sub>2</sub> O              | <0.01          | N/D                  |
| SrO                            | 0.05           | N/D                  |
| BaO                            | 0.07           | N/D                  |
| LOI                            | 2.39           | 41.37                |

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบทางด้านเคมีของดินท้องถิ่นราชบุรีและหินฝุ่นท้องถิ่น

#### 4.1.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์รูปร่างและขนาดอนุภาค (Shape and particle size analysis)

จากภาพถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM) ของดินท้องถิ่นราชบุรี ดังรูปที่ 13. พบว่ามีลักษณะและรูปร่างที่ค่อนข้างเป็นเหลี่ยมมุมเนื้อแน่นมากและผิวขรุขระ จากการพิจารณาอนุภาคของดินเหนียวท้องถิ่นราชบุรีซึ่งมีขนาดเฉลี่ย 56.47 ไมโครเมตร



รูปที่ 13 แสดงอนุภาคขยายของดินท้องถิ่นราชบุรี

## 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ (Physical properties of products)

4.2.1 การทดสอบน้ำหนัก (Measurement of Weight) ของอิฐดินซีเมนต์ควมและบล็อกผิวทางวัสดุเชิงประกอบ

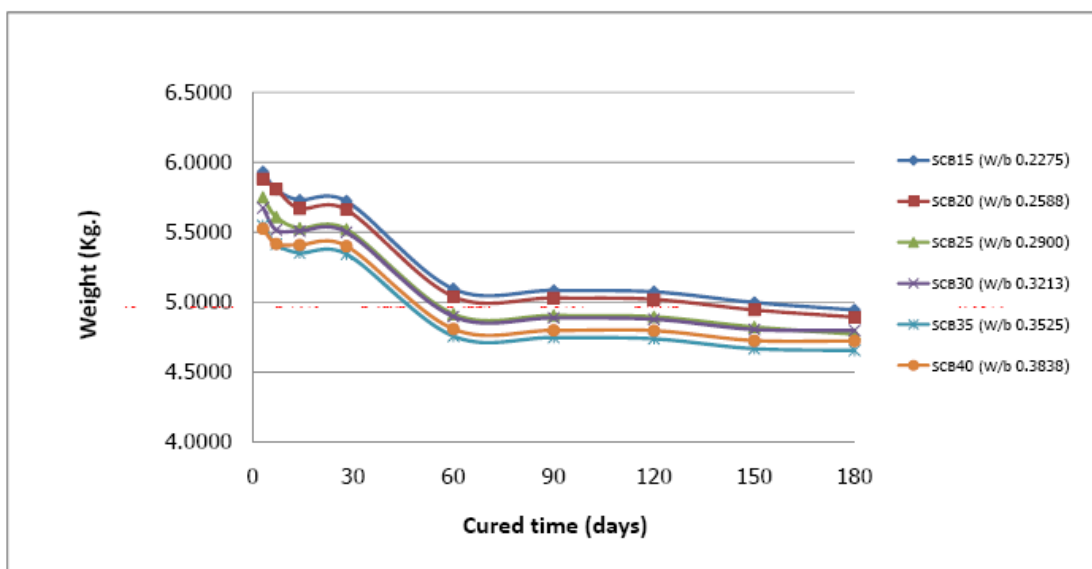
a. ผลของซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยดินราชบุรีและหินปูนราชบุรีที่มีผลน้ำหนักของผลิตภัณฑ์

จากการทดสอบค่าน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควม(SCB) ที่ร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด (w/p) ที่ 0.2275, 0.2588, 0.2900, 0.3213, 0.3525 และ 0.3838 เปรียบเทียบกับอิฐดินซีเมนต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ร้อยละ 5 และหินปูนราชบุรีที่ร้อยละ 10, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด (w/p) 0.1475, 0.1788, 0.2100, 0.2413, 0.2725 และ 0.3038 ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควมมีค่าสูงสุด เมื่อมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 15 (SCB15) โดยมีค่าเท่ากับ 5.7205 Kg. สำหรับบล็อกผิวทางวัสดุเชิงประกอบมีค่าสูงสุดที่ปริมาณหินปูน ร้อยละ 50 ที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 5.8875 Kg. ดังแสดงในรูปที่ 14-15 และ ตารางผนวกที่ ก5.

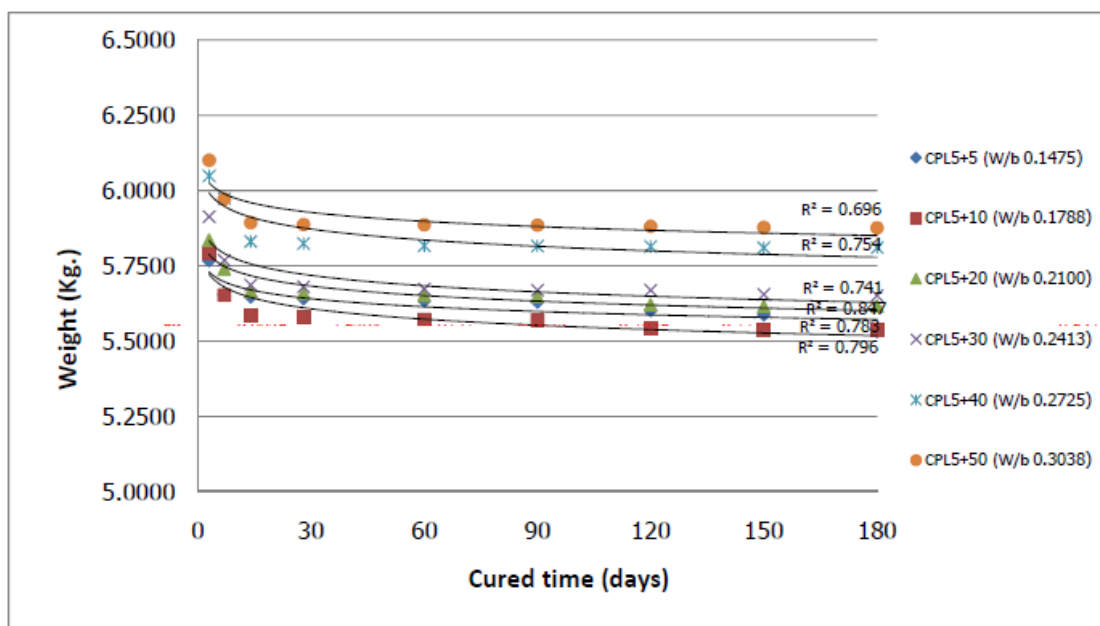
จะเห็นได้ว่าอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ซึ่งมีส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และดินเป็นองค์ประกอบหลักมีแนวโน้มค่าน้ำหนักที่ลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ (มีปริมาณการลดลงของดิน) ดังนั้นปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการลดลงของน้ำหนักของผลิตภัณฑ์คือปริมาณของดิน สำหรับบล็อกผิวทางวัสดุเชิงประกอบพบว่ามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณหินฝุ่น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์ถึงขนาดอนุภาคระหว่างดินท้องถิ่นกับหินฝุ่นท้องถิ่นแล้ว พบว่าหินฝุ่นมีค่าหนาแน่นของมวลสารมากกว่า ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการลดลงของปริมาณดินและการเพิ่มขึ้นหินฝุ่นท้องถิ่นท้องถิ่นมีผลทำให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์ของงานนี้คือการทำบล็อกปูพื้นถนน ซึ่งน้ำหนักไม่มีผลต่อการใช้งาน ทำให้โอกาสการนำไปใช้งานมีโอกาสเป็นไปได้สูงทั้งนี้อาจจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

b. อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่มีต่อค่าน้ำหนักของบล็อกผิวทางวัสดุ เชิงประกอบ ณ อัตราส่วนหินฝุ่น ต่างๆ

พิจารณากราฟรูปที่ 14. แสดงความสัมพันธ์ของผลการทดสอบค่าน้ำหนัก ของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน โดยจะทำการพิจารณาถึงผลของการเพิ่มอายุการบ่มที่มีต่อค่าน้ำหนัก พบว่าทุกปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ มีปริมาณน้ำหนักลดลงตามอายุการบ่ม โดยมีน้ำหนักสูงสุดที่อายุการบ่ม 3 วัน เช่นเมื่อพิจารณา SCB15 เปรียบเทียบที่อายุการบ่ม 3 และ 180 วัน พบว่า ค่าน้ำหนักลดลงถึง 16.18 % เมื่อพิจารณาผลการทดสอบน้ำหนักของบล็อกปูผิวทางดังแสดงในรูปที่ 15 พบว่าน้ำหนักของอิฐลดลงตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดย บล็อก CLP5+50 ซึ่งให้ค่าน้ำหนักสูงสุด มีค่าน้ำหนักลดลง 3.67% เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนัก อายุบ่ม 3 และ 180 วัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงมีค่าน้อยกว่าอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ซึ่งปัจจัยการลดลงของน้ำหนักเนื่องจากการบ่มนั้นน่าจะเกิดจากการสูญเสียปริมาณน้ำในส่วนผสมของอิฐกล่าวคือ ปริมาณน้ำบางส่วนไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ (Hydration reaction) ในช่วงอายุ 28 วัน และ การทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ที่อายุหลัง 28 วัน. และกล่าวได้ว่ายิ่งปริมาณซีเมนต์สูงเท่าไร อัตราการสูญเสียน้ำยิ่งมากขึ้นเท่านั้นเป็นผลให้น้ำหนักของวัสดุยิ่งลดลงเมื่ออายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น



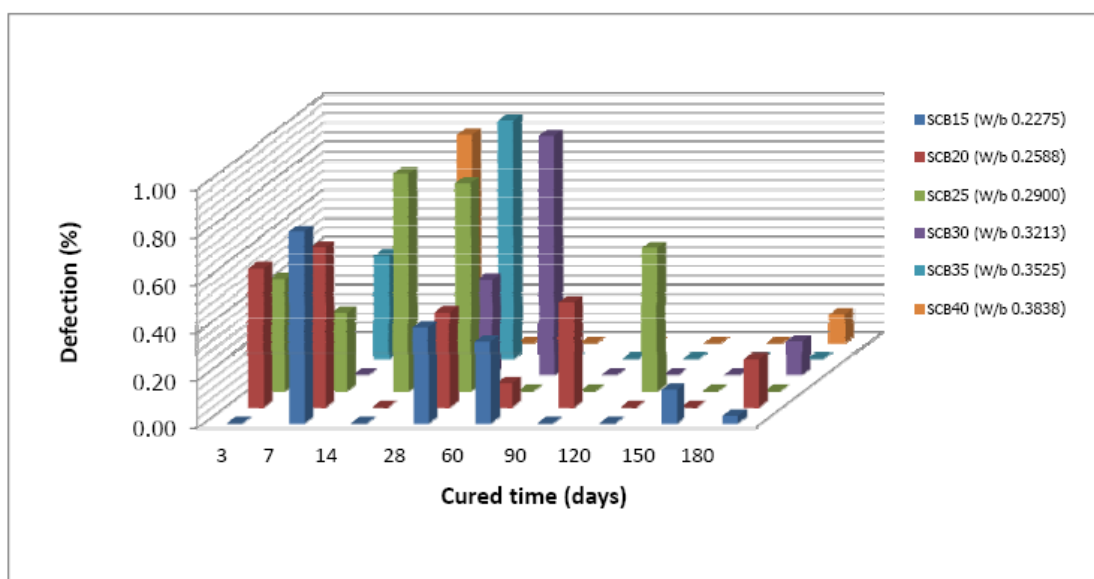
รูปที่ 14 แสดงผลการวัดน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควมคุมที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ที่ w/p 0.2275, 0.2588, 0.2900, 0.3213, 0.3525 และ 0.3838 .



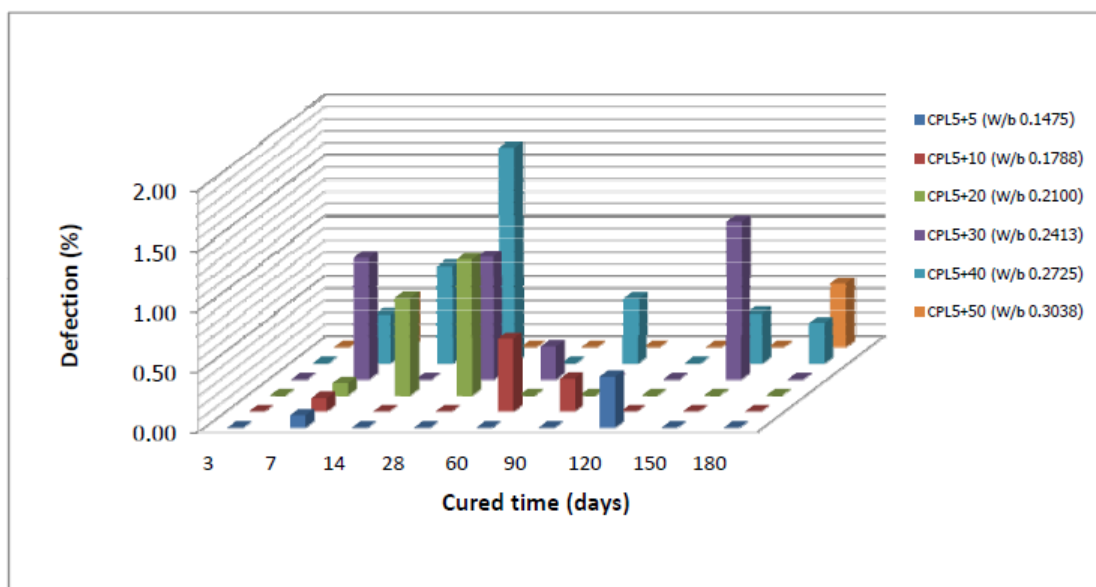
รูปที่ 15 แสดงผลการวัดน้ำหนักของบล็อกดินวัสดุเชิงประกอบที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ที่ w/p 0.1475 0.1788 0.2100 0.2413 0.2725 และ 0.3038

#### 4.2.2 คุณสมบัติด้านการกระจายการวัดขนาด (Distributions of measuring size) ของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม และบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี

จากการทดสอบค่าการกระจายการวัดขนาดซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการคลาดเคลื่อนของการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการผลิตของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมและบล็อกปูผิวทาง ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 5 และหินฝุ่นราชบุรีร้อยละ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด (w/p) 0.1475 0.1788 0.2100 0.2413 0.2725 และ 0.3038 ซึ่งแสดงในรูปที่ 16-17 พบว่าค่าการวัดขนาดของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ซึ่งมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 30 (SCB30) และ SCB 35 มีค่าการคลาดเคลื่อนมากที่สุดร้อยละ 1.00 สำหรับบล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรีร้อยละ 30 (CLP5+30) มีค่าการกระจายการคลาดเคลื่อนมากที่สุดร้อยละ 2.61 ซึ่งการกระจายค่าความคลาดเคลื่อนของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมมีลักษณะการกระจายที่สม่ำเสมอว่าบล็อกปูผิวถนน อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวก็สามารถที่จะปรับปรุงในส่วนของกระบวนการผลิตให้มีความมั่นคงมากขึ้นก็จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนนั้นลดลง



รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ค่าการวัดขนาดของอิฐดินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1. (ควบคุม) ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน



รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ค่าการวัดขนาดของบล็อกผิวถนนเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

#### 4.2.3 คุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม และบล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่ปริมาณส่วนผสมต่างๆ

##### a. ผลของซีเมนต์ที่ถูกละแทนที่ด้วยหินฝุ่นราชบุรีที่มีต่อคุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนัก

จากการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม เปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 5 และถูกละแทนที่ด้วยหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมมีค่าน้อยกว่าบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ซึ่งค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมที่มีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 15 (SCB15) มีค่า  $1,897.83 \text{ Kg.m}^{-3}$  สำหรับบล็อกปูผิวทางผสม หินฝุ่นราชบุรีร้อยละ 10 (CPL5+10) มีค่าหน่วยน้ำหนักที่  $1,853.30 \text{ Kg.m}^{-3}$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณ ส่วนผสมดินราชบุรีเท่ากัน บล็อกปูถนนให้ค่าหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าอิฐดินปูนซีเมนต์ควบคุม 2.37% อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมของ หินฝุ่นแทนที่ดินราชบุรี ปรากฏว่าค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยที่ อายุบ่ม 3 วัน ของCPL5+50 มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ  $1,952.29 \text{ Kg.m}^{-3}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก CPL5+5 คิดเป็น 5.8%

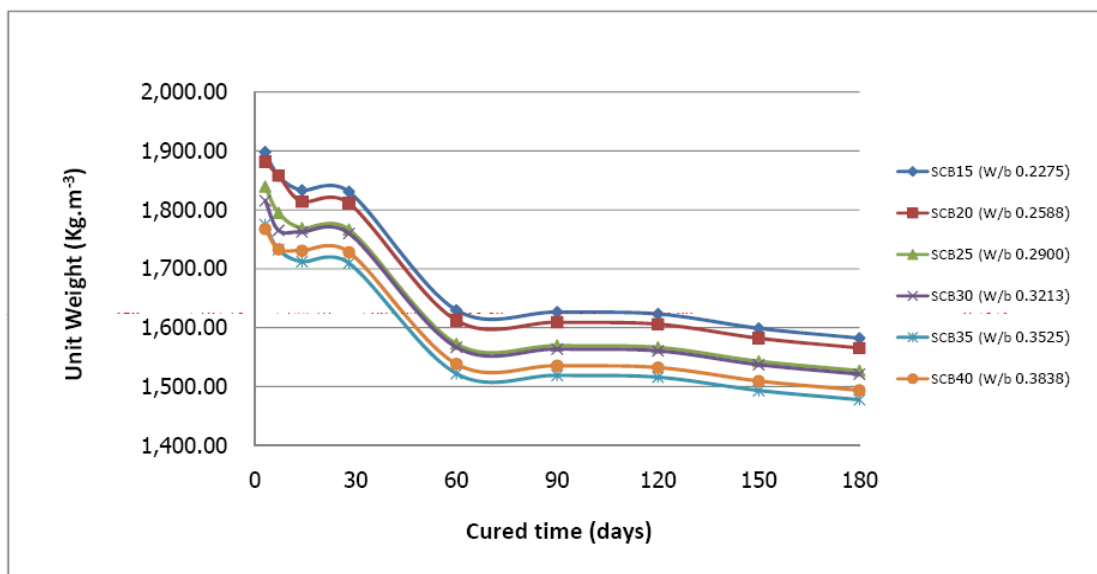
เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมซึ่งมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 40 (SCB40) มีค่า  $1,767.51 \text{ Kg.m}^{-3}$  ซึ่งลดลง 7.35% เมื่อเปรียบเทียบกับ SCB15 จากกราฟรูปที่ 12-13 จะเห็นได้ว่าอิฐดินซีเมนต์ควบคุม (SCB) ซึ่งมีส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และดินเป็นองค์ประกอบหลักมีค่าหน่วยน้ำหนักที่ลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ทุกสัดส่วนการผสม เมื่อเปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทางที่ ร้อยละ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 พบว่ามีค่าหน่วย

น้ำหนักที่ต่ำกว่า ซึ่งจะเห็นว่าบล็อกปูผิวทาง จะมีค่าหน่วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปริมาณหินฝุ่นที่มากขึ้นทุกสัดส่วนการผสม ซึ่งมีแนวโน้มที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับค่าน้ำหนัก

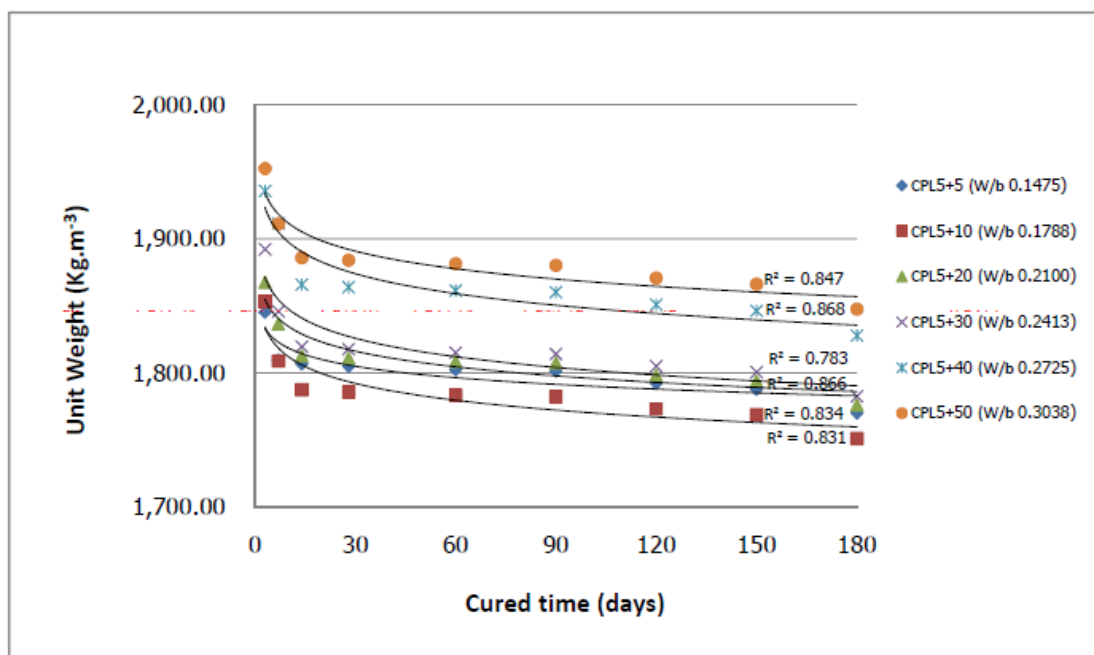
b. อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่มีต่อค่าหน่วยน้ำหนัก ณ อัตราส่วนต่างๆ

พิจารณารูปที่ 18. และ 19. แสดงความสัมพันธ์ของผลการทดสอบค่าน้ำหนัก ของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ที่อัตราส่วนซีเมนต์ร้อยละ 25 (SCB25), เปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทางปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คงที่ร้อยละ 5 และหินฝุ่นร้อยละ 20 ที่มีอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุผงเฉลี่ย 0.21 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าแรงต้านกำลังอัดมากที่สุด ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุดที่อายุการบ่ม 3 วัน โดย SCB มีค่า  $1839.45 \text{ Kg.m}^{-3}$ , CPL5+20 มีค่า  $1867.51 \text{ Kg.m}^{-3}$ . ซึ่งคิดเป็นเป็นร้อยละ 101.53 เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐดินซีเมนต์ควบคุม

อย่างไรก็ตามค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ทุกอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มที่ลดลงตามอายุการบ่มที่มากขึ้น ซึ่งปัจจัยการลดลงของหน่วยน้ำหนักน่าจะเกิดจากการสูญเสียปริมาณน้ำในส่วนผสมของอิฐกล่าวคือ ปริมาณน้ำบางส่วนไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ (Hydration reaction) ในช่วงอายุ 28 วัน และ ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ระหว่าง C-H และ  $\text{SiO}_2$  ที่อายุหลัง 28 วัน อีกทั้งบางส่วนได้ระเหยไปในช่วงการบ่ม จึงน่าจะเป็นสาเหตุของการลดลงของหน่วยน้ำหนักตามอายุการบ่มที่มากขึ้น เช่นเดียวกัน บล็อกปูผิวทาง มีค่าของหน่วยน้ำหนักลดลงตามปริมาณการบ่มที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ดี อัตราการลดลงมีค่าต่ำกว่าอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ซึ่งเห็นได้ชัดจากรูปที่ 19 ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ และ  $\text{SiO}_2$  ที่น้อยกว่า จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์ น้อยกว่า เป็นผลให้การสูญเสียน้ำลดลง



รูปที่ 18 แสดงค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ที่อายุการป่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

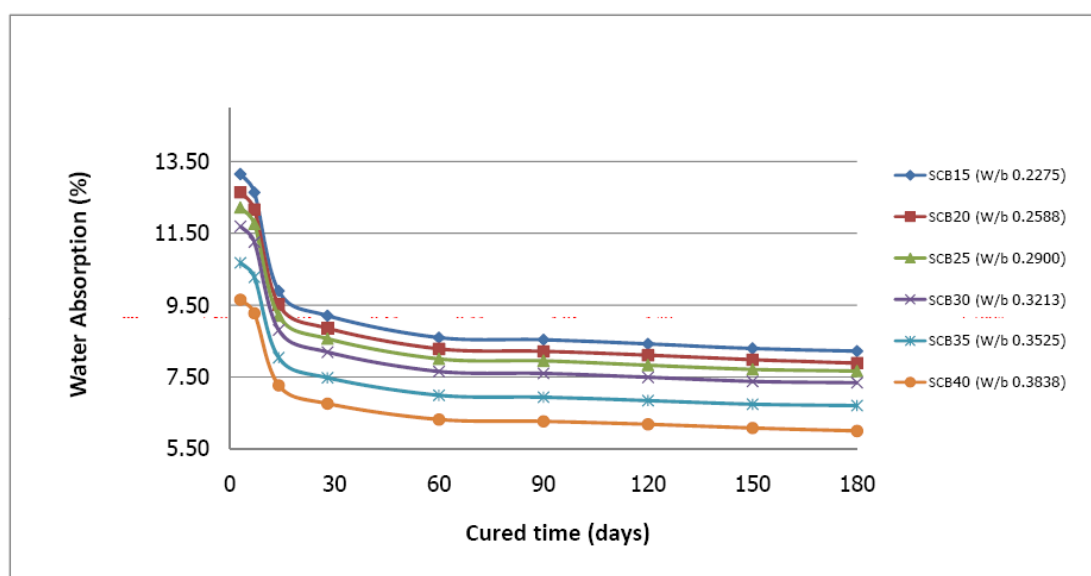


รูปที่ 19 แสดงค่าหน่วยน้ำหนักของบล็อกผิวถนนเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุการป่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

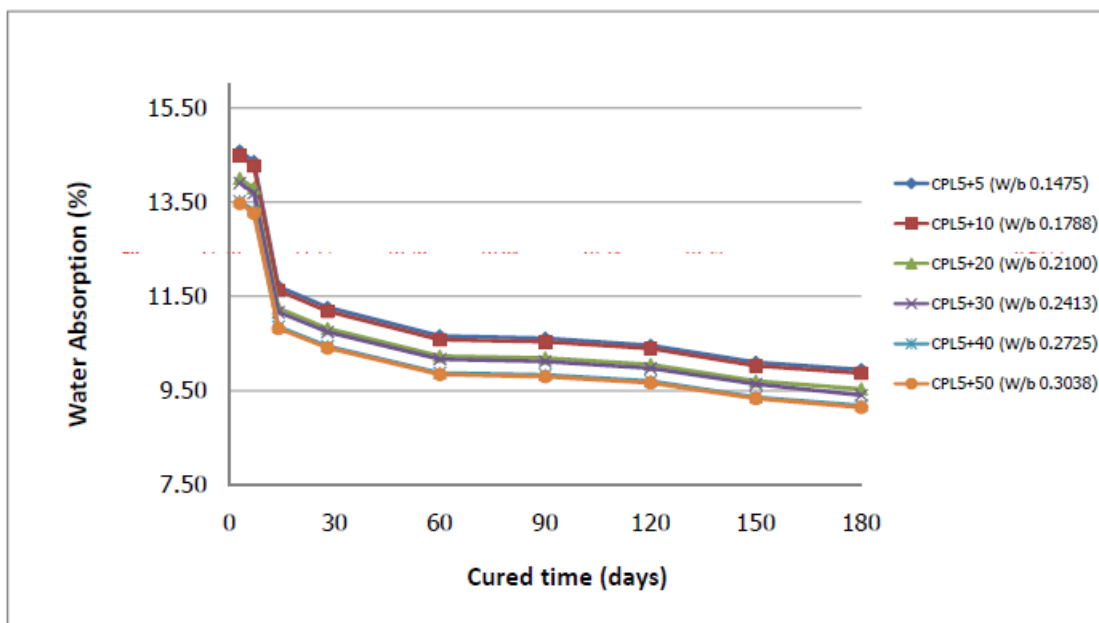
#### 4.2.4 คุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของอิฐดินซีเมนต์ควม และบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี

##### a. ผลของดินราชบุรีที่ถูกแทนที่ด้วยหินฝุ่นราชบุรีที่มีต่อค่าการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์

พิจารณาผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์ควม(SCB) เปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าค่าดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์ควม สูงสุด เมื่อมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 15 (SCB15) มีค่าร้อยละ 9.21 และจะมีค่าลดลงตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของซีเมนต์ โดยค่าดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์ควมซึ่งมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 40 (SCB40) มีค่าร้อยละ 9.65 ขณะที่บล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 5 (CPL5+5) มีค่าดูดซึมน้ำที่ร้อยละ 14.59 ซึ่งจะมีค่าลดลงตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของหินฝุ่น บล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 30 (CPL5+30) มีค่าร้อยละ 13.90 ดังแสดงในกราฟรูปที่ 20 และ 21 และค่าจริงของเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำแสดงใน ตารางผนวกที่ 6, และ ๖. ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลของการแทนที่ดินราชบุรีด้วยหินฝุ่นราชบุรี จะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มที่ต่ำลง



รูปที่ 20 ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์ควม ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน



รูปที่ 21 ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกผิวถนนเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

#### 4.3 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ (mechanical properties)

4.3.1. กำลังต้านแรงอัด (Compressive strength) ของอิฐดินซีเมนต์ควม และบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี

a. ผลของดินซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยหินฝุ่นราชบุรีที่มีต่อกำลังอัด

จากการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของอิฐดินซีเมนต์ควมเปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทางปูนซีเมนต์คงที่ร้อยละ 5 และหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ดังแสดงในรูปที่ 22-23 พบว่ากำลังต้านแรงอัดของอิฐดินซีเมนต์ควมซึ่งมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 15 (SCB15) มีค่า  $103.61 \text{ Kg.cm}^{-2}$ , กำลังอัดของบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 10 (CPL5+10) มีค่า  $80.48 \text{ Kg.cm}^{-2}$  ขณะที่กำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์ควมซึ่งมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 35 (SCB35) มีค่า  $189.45 \text{ Kg.cm}^{-2}$ , บล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 30 (CPL5+30) มีค่า  $115.73 \text{ Kg.cm}^{-2}$  จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณดินราชบุรีเท่ากันโดยน้ำหนัก อิฐดินซีเมนต์ควมจะแสดงค่าแรงอัดที่สูงกว่าบล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงกว่า

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าซีเมนต์มีสมบัติในการทำให้เกิดความแข็งแรงของวัสดุ ดังนั้นจากกราฟรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าอิฐดินซีเมนต์ควมซึ่งมีส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และดินเป็นองค์ประกอบหลักมีค่ากำลังต้านแรงอัดที่สูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ทุกสัดส่วน

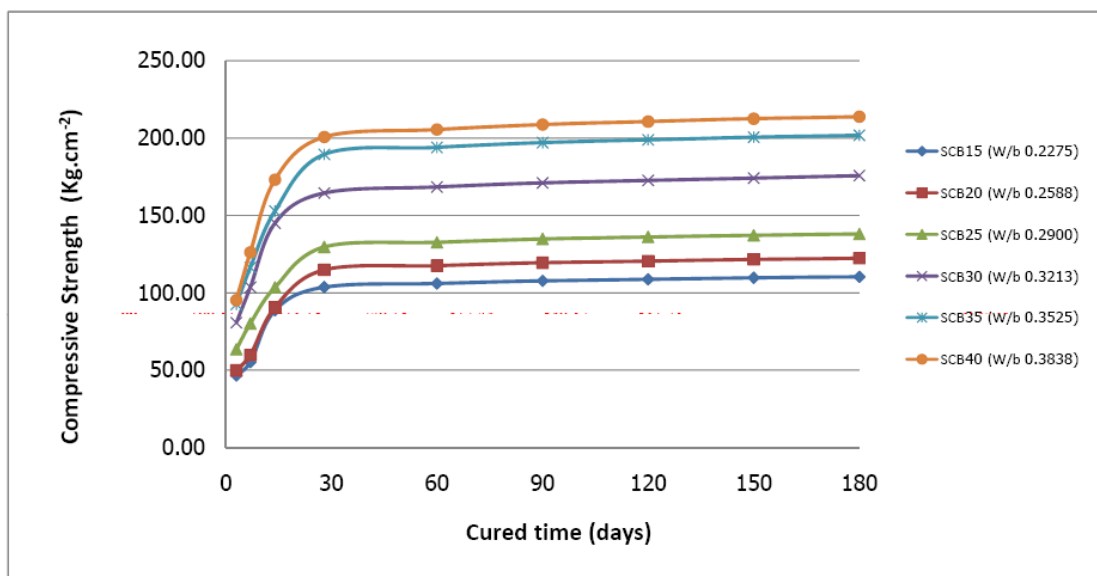
การผสม เมื่อเปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่ร้อยละ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 พบว่ามีค่ากำลังอัดสูงกว่า โดยบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี มีค่ากำลังต้านแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณหินฝุ่นราชบุรีจนถึง ร้อยละ 20 ซึ่งค่ากำลังอัดคือ  $123.69 \text{ Kg.cm}^{-2}$  ที่อายุการบ่ม 28 วัน หลังจากนั้นจะลดลงตามปริมาณหินฝุ่นที่เพิ่มขึ้น

บล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นที่มีส่วนผสมหลักคือ ดินท้องถิ่นราชบุรี, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 5 และ หินฝุ่นราชบุรี อัตราส่วนต่าง ๆ ตั้งแต่ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 จุดประสงค์ของงานชิ้นนี้คือการผลิตบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี เพื่อการใช้งานในชุมชนและการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่รวมถึงการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล.ม. 309/2544 กำหนดให้ความต้านแรงอัดของผิวทางคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า  $325 \text{ Kg.cm}^{-2}$  สำหรับเฉลี่ยจากวัสดุ 3 ก้อน ซึ่งพบว่าบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่พัฒนาขึ้นที่ อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 5 กับหินฝุ่นราชบุรีร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานดังกล่าว โดยคิดเป็นร้อยละ 38.05 ของค่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการกำหนดไว้ว่าถนนคอนกรีตต้องรับน้ำหนักรถได้มากกว่า 21 ตัน(ประกาศกรมโยธาธิการเรื่อง มาตรฐานและลักษณะของทางหลวงและงานทาง รวมทั้งกำหนดเขตทางหลวง ที่จอดรถ ระยะแนวต้นไม้และเสาพาดสายเกี่ยวกับทางหลวงชนบท และทางหลวงเทศบาล พ.ศ. ๒๕๔๓) ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับถนนของท้องถิ่นซึ่งมีเพียงรถขนาดเล็ก อาทิเช่น รถไถนาเดินตามหรือรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กซึ่งมีน้ำหนักมากที่สุดไม่เกิน 2 ตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 9.5 ของน้ำหนักบรรทุกของถนนหลวง ดังนั้นเราอาจกล่าวได้ว่า บล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี มีค่ากำลังอัดเพียงพอที่จะใช้ในชุมชนท้องถิ่น

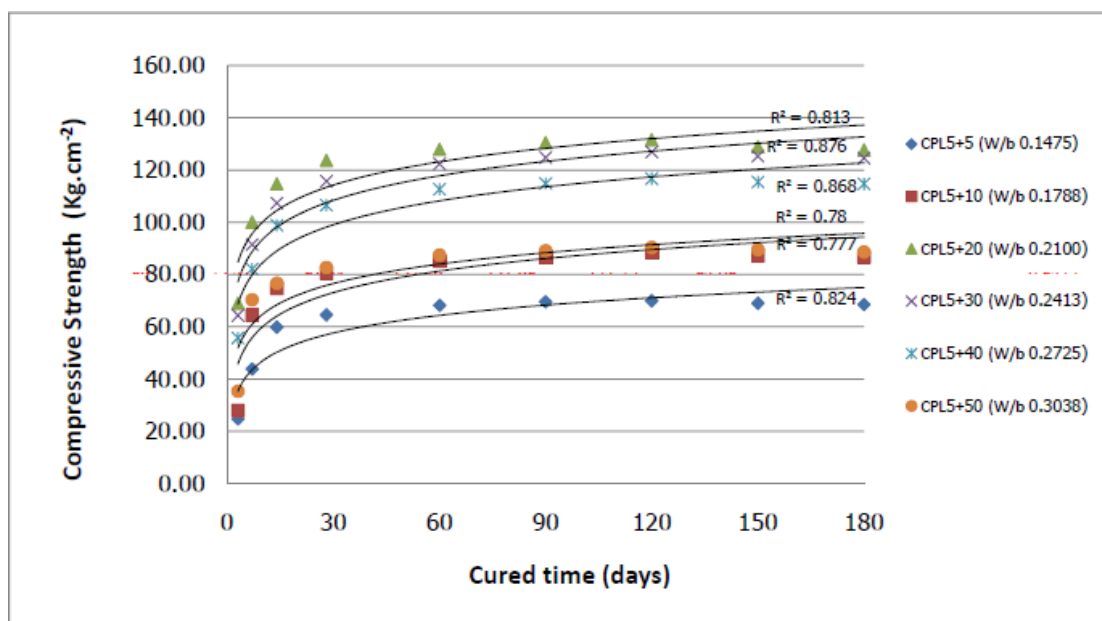
#### b. อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่มีต่อแรงต้านกำลังอัด

รูปที่ 22-23 แสดงความสัมพันธ์ของผลการทดสอบค่ากำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมเปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 5 อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุผงเฉลี่ย 0.21 ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน โดยจะทำการพิจารณาถึงผลของการเพิ่มอายุการบ่มที่มีต่อค่ากำลังอัด พบว่าอิฐดินซีเมนต์ควบคุม มีค่าแรงต้านกำลังอัดเพิ่มขึ้น เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น ทุกอัตราส่วน

เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี พบว่าค่ากำลังอัดก็ยังมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้นโดยเป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 28 วัน หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนเกือบคงที่เมื่อระยะเวลาบ่มประมาณ 180 วัน



รูปที่ 22 ค่ากำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์ควม ที่อายุการป่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน



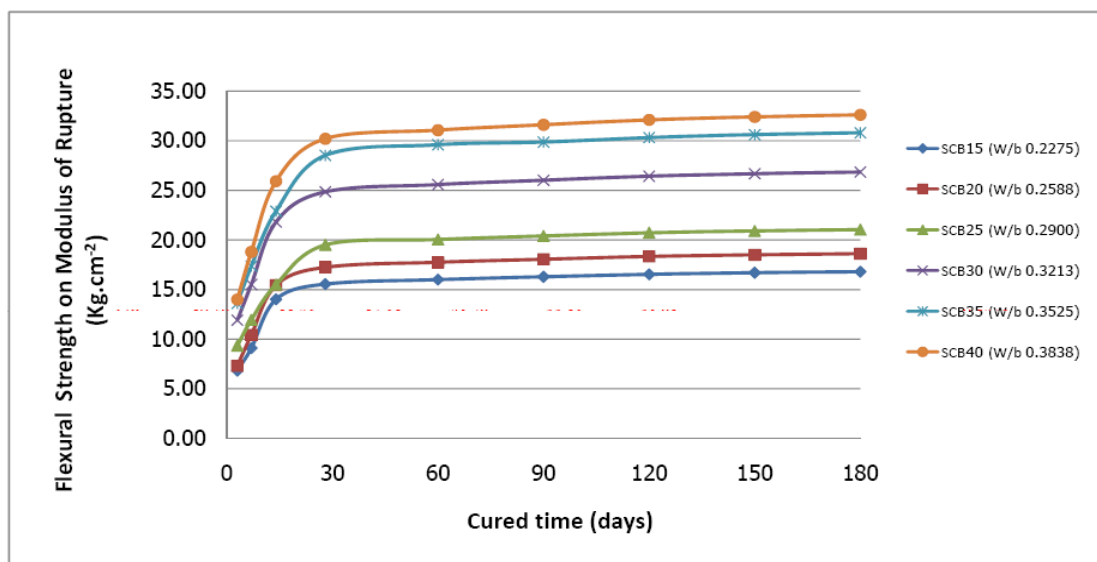
รูปที่ 23 ค่ากำลังอัดของบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุการป่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

#### 4.3.2 กำลังดัด(Flexural Strength on Modulus of Rupture) ของอิฐดินซีเมนต์ควม และ บล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี

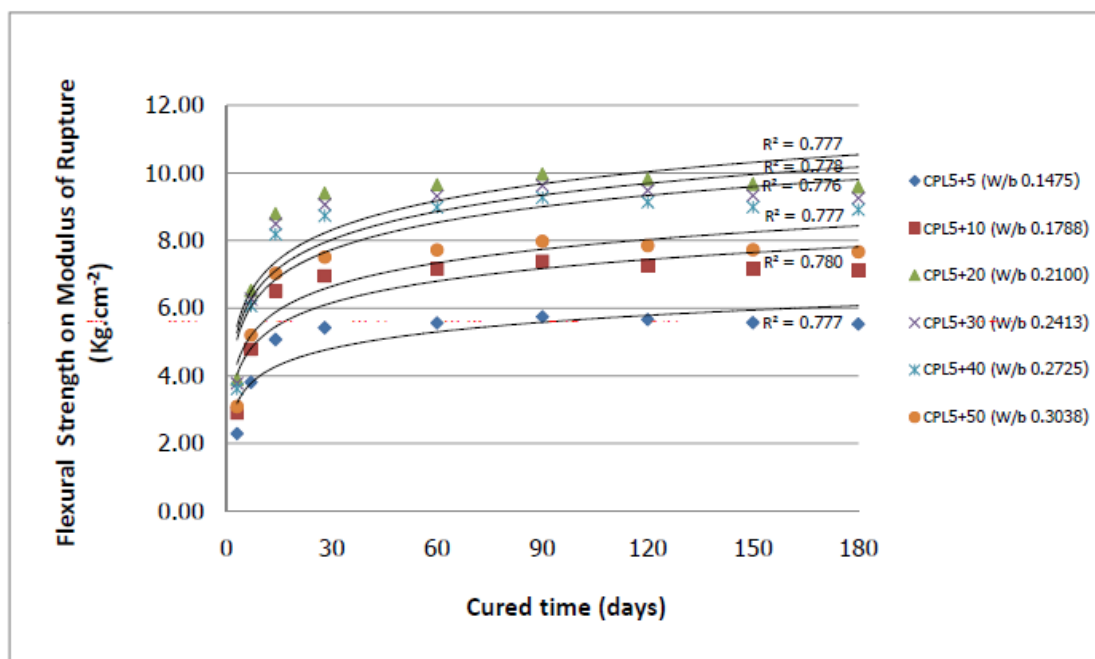
##### a. ผลของซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยหินฝุ่นราชบุรี ที่มีต่อค่ากำลังดัด

จากการทดสอบกำลังต้านแรงดัดในรูปของโมดูลัสการแตกหักของวัสดุภายใต้แรงดัดสูงสุดของอิฐดินซีเมนต์ควมเปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 5 และถูกแทนที่ด้วยผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 24 และ 25 พบว่ากำลังต้านแรงดัดของอิฐดินซีเมนต์ควมซึ่งมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 15 (SCB15) มีค่า  $15.55 \text{ Kg.cm}^{-2}$ , กำลังดัดของบล็อกปูผิวทาง ปูนซีเมนต์คงที่ร้อยละ 5 และหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 10(CPL5+10) มีค่า  $6.96 \text{ Kg.cm}^{-2}$  ขณะที่กำลังดัดของอิฐดินซีเมนต์ควมซึ่งมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 35 (SCB35) มีค่า  $28.53 \text{ Kg.cm}^{-2}$  ขณะที่บล็อกปูผิวทาง ปูนซีเมนต์คงที่ร้อยละ 5 และหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 30(CPL5+30) มีค่า  $9.07 \text{ Kg.cm}^{-2}$  หรือกำลังดัดของบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี มีค่าร้อยละ 44.75 ของอิฐดินซีเมนต์ควม (SCB15)

จากกราฟรูปที่ 25 จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสการแตกหักของบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมหินฝุ่นราชบุรีตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 20 และพบว่าลดลงเมื่อปริมาณหินฝุ่นราชบุรีเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐดินซีเมนต์ควม ซึ่งสอดคล้องกันกับค่าแรงต้านกำลังอัดที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 24 ค่ากำลังดัดของอิฐดินซีเมนต์ควม ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน



รูปที่ 25 ค่ากำลังดัดของบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

#### 4.3.3 ผลของบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรีต่อค่าความต้านทานต่อการขัดสี (abrasive resistant test)

การทดสอบความต้านทานต่อการขัดสีของบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน ที่ ร้อยละ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ที่อายุบ่ม 28 วัน โดยใช้มาตรฐานการทดสอบคอนกรีต ASTM C944 / C944M - 99(2005)e1 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method ผลการทดสอบถูกแสดงในตาราง ที่ 5 ซึ่งพบว่าอัตราการสึกหรอต่ำสุดโดยดูจากเวลาการทดสอบมากที่สุดคือ ที่ 60 นาที บล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 20 (CPL5+20) ค่าคือ 2.72 มม.และอัตราส่วนที่เกิดการสึกหรอมากที่สุดเกิดขึ้นของบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรีที่ ร้อยละ 30 ค่าที่ทดสอบได้คือ 3.1 มม. ซึ่งผลจากการทดสอบนี้สอดคล้องโดยตรงกับค่าความต้านทานกำลังอัดแรงกำลังดัด อัตราส่วนที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือ บล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ CPL5+20

ตาราง 5 แสดงค่าผลการทดสอบแรงต้านทานการขัดสี(abrasive resistance)ของบล็อกรูปร่าง  
เชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุ 28 วัน

| เวลา<br>(นาทีก) | ความลึกของการสึกหรอ(มม) |         |         |         |         |         |
|-----------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 | CPL5+5                  | CPL5+10 | CPL5+20 | CPL5+30 | CPL5+40 | CPL5+50 |
| 5               | 0.2                     | 0.11    | 0.09    | 0.1     | 0.25    | 0.31    |
| 10              | 0.26                    | 0.15    | 0.14    | 0.15    | 0.25    | 0.34    |
| 15              | 0.34                    | 0.2     | 0.15    | 0.17    | 0.4     | 0.45    |
| 20              | 0.56                    | 0.64    | 0.4     | 0.5     | 0.64    | 0.7     |
| 25              | 1.05                    | 0.85    | 0.78    | 0.8     | 0.94    | 1.02    |
| 30              | 1.32                    | 1.2     | 1.1     | 1.2     | 1.4     | 1.54    |
| 35              | 1.59                    | 1.5     | 1.42    | 1.5     | 1.64    | 1.7     |
| 40              | 1.81                    | 1.74    | 1.6     | 1.7     | 2       | 2.07    |
| 45              | 2.01                    | 1.95    | 1.8     | 1.94    | 2.2     | 2.26    |
| 50              | 2.35                    | 2.3     | 2       | 2.1     | 2.34    | 2.45    |
| 55              | 2.66                    | 2.55    | 2.45    | 2.54    | 2.7     | 2.8     |
| 60              | 2.9                     | 2.8     | 2.72    | 2.9     | 3       | 3.1     |

#### 4.3.4 ผลของบล็อกรูปร่างผสมหินฝุ่นราชบุรีต่อการชะล้างผิวถนน (erosion on rinsing test)

การทดสอบนี้จำลองการสึกหรอเนื่องจากฝน โดยจำลองโดยการฉีดน้ำบนผิวของวัสดุเป็น  
เวลาต่อเนื่องติดต่อกัน และทำการวัดมวลของวัสดุที่สูญเสียไปเนื่องจากน้ำ ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60  
วันดังแสดงในตารางที่ 6 ผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนของบล็อกรูปร่างผสมหินฝุ่นราชบุรี ให้  
ค่าน้ำหนักที่สูญเสียไปเนื่องจากการกัดเซาะของน้ำต่ำสุด ที่ หินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 20 ซึ่งที่เวลา 60  
วัน ค่าร้อยละการสูญเสีย คือ 0.22 โดยแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนัก มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาที่เพิ่ม  
มากขึ้น ทุกอัตราส่วนของ หินฝุ่นราชบุรี และอัตราส่วนที่ทำให้การสึกหรอเนื่องจากน้ำมากที่สุดที่  
อัตราส่วนหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 50 ที่เวลา 60 วัน อย่างไรก็ตามผลการทดสอบชิ้นนี้สอดคล้องกับค่า  
กำลังของวัสดุ อัตราส่วนที่ทำให้กำลังอัดสูงสุด จะให้ค่าการสึกหรอที่ต่ำสุด รวมถึงความต้านทานต่อ  
การขัดสีที่สูงสุด

ตาราง 6 แสดงผลการทดสอบค่าการชะล้าง(erosion on rinsing ) ของบล็อกปูผิวถนนเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุ 28 วัน

| จำนวน<br>(วัน) | น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง(%) |         |         |         |         |         |
|----------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                | CPL5+5                   | CPL5+10 | CPL5+20 | CPL5+30 | CPL5+40 | CPL5+50 |
| 3              | 0.1                      | 0.06    | 0.05    | 0.08    | 0.04    | 0.11    |
| 7              | 0.14                     | 0.9     | 0.1     | 0.14    | 0.1     | 0.14    |
| 14             | 0.2                      | 0.17    | 0.16    | 0.21    | 0.34    | 0.24    |
| 28             | 0.27                     | 0.24    | 0.2     | 0.23    | 0.39    | 0.34    |
| 60             | 0.34                     | 0.28    | 0.22    | 0.3     | 0.4     | 0.44    |

จากผลการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า บล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี มีความเป็นไปได้ที่จะนำเทคโนโลยีถ่ายทอดสู่ชุมชน โดยค่าอัตราส่วนที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดคือบล็อกปูผิวทางผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 คงที่ร้อยละ 5 และหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 20(CPL5+20) ที่อัตราส่วน w/p เท่ากับ 0.21

#### 4.4 การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์

จุดประสงค์ของงานชิ้นนี้คือการประคณั้ผิวทางวัสดุเชิงประกอบ ที่ใช้วัสดุในท้องถิ่น รวมถึงราคาถูก ลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ และประชาชนในชุมชนสามารถเข้ามามีส่วนร่วมในการพัฒนา จากการเปรียบเทียบราคาของวัสดุเชิงประกอบ บล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่ปูนซีเมนต์ 5% และ หินฝุ่นราชบุรี 20% เปรียบเทียบกับผิวทางคอนกรีตตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการ 2554 พบว่าราคาของผิวคอนกรีตหนา 15 ซม.ต่อตารางเมตร คิดเป็นราคา 390.8 บาทและราคาของบล็อกปูผิวทาง CPL5+20 คิดเป็น 55 บาท/ตร.ม. ดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 12.8% ของราคาผิวทางคอนกรีตตามมาตรฐานกรมโยธาธิการ จากราคาดังกล่าวจะเห็นได้ว่าบล็อกปูผิวทางท้องถิ่นสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายต้นทุนการผลิตได้อย่างมาก ยกตัวอย่างเช่นถ้ามีการสร้างถนนหมู่บ้านเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตร ถนนกว้าง 4 เมตร ถ้าใช้ผิวทางคอนกรีต จะมีค่าใช้จ่ายค่าวัสดุถึง 1,563,200 บาท ในทางกลับกัน ถ้าใช้บล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี จะเสียค่าวัสดุเพียง 187,584 บาท เท่านั้น

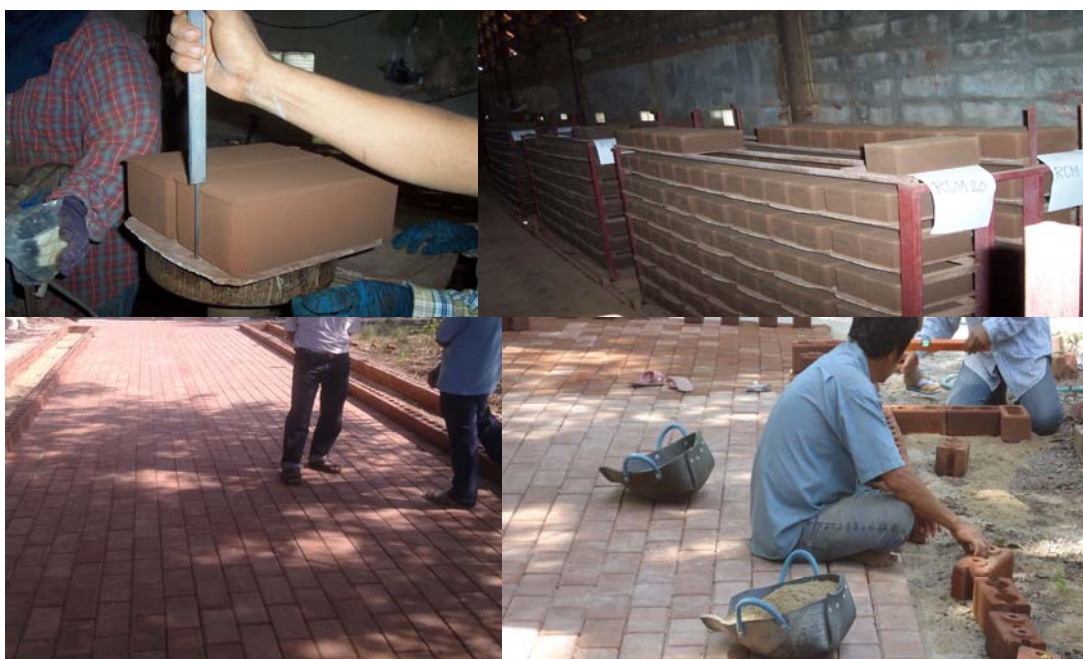
ตาราง 7 เปรียบเทียบราคาค่าวัสดุ ระหว่างผิวทางคอนกรีตและผิวทางวัสดุเชิงประกอบ หน้า 15 ซม.

| วัสดุ                                   | ราคา/ ตร.ม. |
|-----------------------------------------|-------------|
| ผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 15 ซม        | 390.8       |
| ผิวทางวัสดุเชิงประกอบ(CPL5+20) w/p=0.21 | 55          |

#### 4.6 การก่อสร้างทางด้านเทคโนโลยีถนนต้นแบบสำหรับชุมชน

ในการก่อสร้างถนนต้นแบบ (Prototype) นั้นในการศึกษาครั้งนี้ได้นำร่องการก่อสร้างโดยชุมชนเองโดยการได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากคณะผู้ทำการวิจัยซึ่งในการก่อสร้างดังกล่าวจะใช้สัดส่วนที่เหมาะสม (An optimization) ในการผลิตชิ้นส่วนประกอบ (Composite segmental) เพื่อใช้ในการสร้างต้นแบบ

จากการศึกษาทางด้านวิศวกรรมและการรวมถึงการนำเทคโนโลยีถ่ายทอดลงสู่ชุมชนแล้วนั้นพบว่าเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมและง่ายต่อการที่ชุมชนจะสามารถนำไปบูรณาการเองได้ด้วยบริบทของชุมชนเอง ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าวัสดุเชิงประกอบผิวทางนี้สามารถที่จะเป็นแนวทางในด้านความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในชุมชนได้อย่างแท้จริง ดังแสดงในรูปที่ 26.



รูปที่ 26 แสดงการก่อสร้างต้นแบบ (Prototype) สำหรับการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน

## บทที่ 5 สรุปผล

ในการศึกษาได้นำหินปูนแหล่งราชบุรี ดินท้องถิ่นราชบุรี และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เพื่อพัฒนาเป็นบล็อกผิวทางเชิงประกอบผสมหินปูนราชบุรี(CPL) โดยทำการศึกษาคุณสมบัติด้านเคมีและฟิสิกส์(Chemical and physical properties), คุณสมบัติด้านกลศาสตร์(The mechanics investigations) ซึ่งประกอบด้วย ด้านกำลังอัดและดัด (Compressive and flexural strength properties) ด้านคุณสมบัติด้านกายภาพของอิฐประกอบด้วย การดูดซึมน้ำ(Water absorption), หน่วยน้ำหนัก(Unit weight) และคุณสมบัติทางด้านขนาดและน้ำหนัก (Measurement size and weight) ของผลิตภัณฑ์ และรวมถึงคุณสมบัติการชะล้าง(erosion on rinsing test) และความต้านต่อการขัดสี (Abrasive Resistance Test), ที่อายุ 3, 7, 14, 28 , 60 , 90 , 120, 150 และ 180 วัน ที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ที่ร้อยละ 10 และหินปูนราชบุรี 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด (w/p) 0.1475 0.1788 0.2100 0.2413 0.2725 และ 0.3038 เปรียบเทียบกับอิฐดินผสมปูนซีเมนต์ควบคุม(SCB) ที่ร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงทั้งหมด (w/p) ที่ 0.2275, 0.2588, 0.2900, 0.3213, 0.3525 และ 0.3838 ส่วนในด้านการนำไปใช้ คุณสมบัติทางด้านกำลังถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐานผิวทางคอนกรีต กรมโยธาธิการและการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ด้านราคาของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

### 5.1 คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของวัสดุดิบ (Chemical and physical properties of raw materials)

จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) นั้น เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของออกไซด์หลักที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาอาซิเช่น ซิลิกอนไดออกไซด์( $\text{SiO}_2$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และอลูมินา( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ของหินปูน จากแหล่งจังหวัดราชบุรี มีค่าร้อยละ 57.08 และดินท้องถิ่นจากจังหวัดราชบุรีมีค่าร้อยละ 81.91 และค่าสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ที่ร้อยละ 41.31 และ 2.39 ตามลำดับ

## 5.2 คุณสมบัติด้านกายภาพของผลิตภัณฑ์ (Physical properties of products)

5.2.1 คุณสมบัติด้านน้ำหนัก(weight)ของอิฐดินซีเมนต์ควม และบล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรีที่ปริมาณส่วนผสมต่างๆ

การทดสอบน้ำหนัก (Measurement of Weight) ของอิฐดินซีเมนต์ควมและบล็อกปูผิวทาง วัสดุเชิงประกอบ พบว่าน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควมมีค่าสูงสุด เมื่อมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 15 (SCB15) โดยมีค่าเท่ากับ 5.7205 Kg. สำหรับบล็อกปูผิวทางวัสดุเชิงประกอบมีค่าสูงสุดที่ปริมาณหินฝุ่น ร้อยละ 50 ที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 5.8875 Kg. จะเห็นได้ว่าอิฐดินซีเมนต์ควม มีแนวโน้มค่าน้ำหนักที่ลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ (มีปริมาณการลดลงของดิน) สำหรับบล็อกปูผิวทางวัสดุเชิงประกอบพบว่ามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณหินฝุ่น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์ถึงขนาดอนุภาคระหว่างดินท้องถิ่นกับหินฝุ่นท้องถิ่นแล้ว พบว่าหินฝุ่นมีค่าหนาแน่นของมวลสารมากกว่า ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการลดลงของปริมาณดินและการเพิ่มขึ้นหินฝุ่นท้องถิ่นท้องถิ่นมีผลทำให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5.2.2 คุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนัก(unit weight)ของอิฐดินซีเมนต์ควม และบล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรีที่ปริมาณส่วนผสมต่างๆ

จากการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควม เปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 5 และถูกแทนที่ด้วยหินฝุ่นราชบุรี พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควมมีค่าน้อยกว่าบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณส่วนผสมดินราชบุรีเท่ากัน บล็อกปูถนนให้ค่า หน่วยน้ำหนักน้อยกว่าอิฐดินปูนซีเมนต์ควม อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมของหินฝุ่นแทนที่ดินราชบุรี ปรากฏว่าค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าอิฐดินซีเมนต์ควม (SCB) ซึ่งมีส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และดินเป็นองค์ประกอบหลักมีค่าหน่วยน้ำหนักที่ลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ทุกสัดส่วนการผสม เมื่อเปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทางที่ ร้อยละ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 พบว่ามีค่าหน่วยน้ำหนักที่ต่ำกว่า ซึ่งจะเห็นว่าบล็อกปูผิวทาง จะมีค่าหน่วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปริมาณหินฝุ่นที่มากขึ้นทุกสัดส่วนการผสม ซึ่งมีแนวโน้มที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับค่าน้ำหนัก[1,2]

เมื่อพิจารณาตามอายุการบ่มพบว่าค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ควม ทุกอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มที่ลดลงตามอายุการบ่มที่มากขึ้น ซึ่งปัจจัยการลดลงของหน่วยน้ำหนักน่าจะเกิดจากการสูญเสียปริมาณน้ำในส่วนผสมของอิฐกล่าวคือ ปริมาณน้ำบางส่วนไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ (Hydration reaction) อีกทั้งบางส่วนได้ระเหยไปในระหว่างการบ่ม จึงน่าจะเป็นสาเหตุของการลดลงของหน่วยน้ำหนักตามอายุการบ่มที่มากขึ้น เช่นเดียวกัน บล็อกปูผิวทาง มีค่าของหน่วยน้ำหนัก

ลดลงตามปริมาณการบ่มที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการลดลงมีค่าต่ำกว่าอิฐดินซีเมนต์ควบคุม ทั้งนี้ อาจจะอธิบายได้ว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ และ  $\text{SiO}_2$  ที่น้อยกว่า จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ น้อยกว่า เป็นผลให้การสูญเสีย น้ำลดลง

5.2.3 ด้านการกระจายการวัดขนาด (Distribution of Measuring Size) ของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม(SCB) และบล็อกปูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี

อิฐดินซีเมนต์ควบคุม ซึ่งมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 30 (SCB30) และ SCB 35 มีค่าการคลาดเคลื่อนมากที่สุดร้อยละ 1.00 สำหรับบล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรีร้อยละ 30(CLP5+30) มีค่าการกระจายการคลาดเคลื่อนมากที่สุดร้อยละ 2.61 ซึ่งการกระจายค่าความคลาดเคลื่อนของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมมีลักษณะการกระจายที่สม่ำเสมอว่าบล็อกปูผิวถนน อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวก็สามารถที่จะปรับปรุงในส่วนของกระบวนการผลิตให้มีความมั่นคงมากขึ้นก็จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนนั้นลดลง

5.2.3 คุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม(SCB) และบล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี(CPL)

การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม(SCB) เปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าค่าดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมสูงสุด เมื่อมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 15 (SCB15) มีค่าร้อยละ 9.21 และจะมีค่าลดลงตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของซีเมนต์ โดยค่าดูดซึมน้ำของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมซึ่งมีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ร้อยละ 40 (SCB40) มีค่าร้อยละ 9.65 ขณะที่บล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 5 (CPL5+5) มีค่าดูดซึมน้ำที่ร้อยละ 14.59 ซึ่งจะมีค่าลดลงตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของหินฝุ่น บล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 30 (CPL5+30) มีค่าร้อยละ 13. ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลของการแทนที่ดินราชบุรีด้วยหินฝุ่นราชบุรี จะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มที่ต่ำลง

### 5.3 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ ( Mechanical properties)

5.3.1. กำลังต้านแรงอัด (Compressive strength) ของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม และบล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี

จากการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของอิฐดินซีเมนต์ควบคุมเปรียบเทียบกับบล็อกปูผิวทาง ปูนซีเมนต์ทั้งที่ร้อยละ 5 และหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ที่ปริมาณดินราชบุรีเท่ากันโดยน้ำหนัก อิฐดินซีเมนต์ควบคุมจะแสดงค่าแรงอัดที่สูงกว่าบล็อกปูผิวทาง ผสมหินฝุ่นราชบุรี ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงกว่า

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าซีเมนต์มีสมบัติในการทำให้เกิดความแข็งแรงของวัสดุ จะเห็นได้ว่าอิฐดินซีเมนต์ควมซึ่งมีส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และดินเป็นองค์ประกอบหลักมีค่ากำลังต้านแรงอัดที่สูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ทุกสัดส่วนการ โดยบล็อกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หินฝุ่นราชบุรี มีค่ากำลังต้านแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณหินฝุ่นราชบุรีจนถึง ร้อยละ 20 ซึ่งค่ากำลังอัดคือ  $123.69 \text{ Kg.cm}^{-2}$  ที่อายุการบ่ม 28 วันหลังจากนั้นจะลดลงตามปริมาณหินฝุ่นที่เพิ่มขึ้น

บล็อกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หินฝุ่นราชบุรี ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นที่มีส่วนผสมหลักคือ ดินท้องถิ่นราชบุรี, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งที่ร้อยละ 5 และ หินฝุ่นราชบุรี อัตราส่วนต่าง ๆ ตั้งแต่ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 จุดประสงค์ของงานชิ้นนี้คือการผลิตบล็อกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หินฝุ่นราชบุรี เพื่อการใช้งานในชุมชนและการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่รวมถึงการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม มาตรฐานของกรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล.ม. 309/2544 (REF) กำหนดให้ความต้านแรงอัดของผิวทางคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า  $325 \text{ Kg.cm}^{-2}$  สำหรับเฉลี่ยจากวัสดุ 3 ก้อน ซึ่งพบว่าบล็อกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หินฝุ่นราชบุรี ที่พัฒนาขึ้นที่ อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งที่ร้อยละ 5 กับหินฝุ่นราชบุรีร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานดังกล่าว โดยคิดเป็นร้อยละ 38.05 ของค่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตาม มาตรฐานของกรมโยธาธิการกำหนดไว้ว่าถนนคอนกรีตต้องรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่า 21 ตัน(REF) ประกาศกรมโยธาธิการเรื่อง มาตรฐานและลักษณะของทางหลวงและงานทาง รวมทั้งกำหนดเขตทางหลวง ที่จอดรถ ระยะแนวต้นไม้และเสาพาดสายเกี่ยวกับทางหลวงชนบท และทางหลวงเทศบาล พ.ศ. ๒๕๔๓ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับถนนของท้องถิ่นซึ่งมีเพียงรถขนาดเล็ก เช่น รถไถนาเดินตามหรือรถขนาดเล็กซึ่งมีน้ำหนักมากที่สุดไม่เกิน 2 ตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 9.5 ของน้ำหนักบรรทุกของถนนหลวง ดังนั้นเราอาจกล่าวได้ว่า บล็อกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หินฝุ่นราชบุรี มีค่ากำลังอัดเพียงพอที่จะใช้ในชุมชนท้องถิ่น

### 5.3.2 กำลังดัด(Flexural Strength on Modulus of Rupture) ของอิฐดินซีเมนต์ควม และ บล็อกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หินฝุ่นราชบุรี

จากการทดสอบกำลังต้านแรงดัดในรูปของโมดูลัสการแตกหักของวัสดุภายใต้แรงดัดสูงสุดของอิฐดินซีเมนต์ควมเปรียบเทียบกับบล็อกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่ากำลังต้านแรงดัดของอิฐดินซีเมนต์ควมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

ขณะที่ค่าโมดูลัสการแตกหักของบล็อกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หินฝุ่นราชบุรี มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมหินฝุ่นราชบุรีตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึง และสูงสุดที่ร้อยละ 20 และพบว่าลดลงเมื่อปริมาณหินฝุ่นราชบุรีเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐดินซีเมนต์ควม ซึ่งสอดคล้องกันกับค่าแรงต้านกำลังอัดที่กล่าวมาข้างต้น

### 5.3.3 ผลของบล็อกรูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรีต่อค่าความต้านทานต่อการขัดสี (abrasive resistant test)

การทดสอบความต้านทานต่อการขัดสีของบล็อกรูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี โดยใช้มาตรฐานการทดสอบคอนกรีต ASTM C944 / C944M - 99(2005)e1 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method พบว่าอัตราการสึกหรอต่ำสุดที่การทดสอบ 60 นาที แสดงที่บล็อกรูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 20 (CPL5+20) ค่าคือ 2.72 มม.และอัตราส่วนที่เกิดการสึกหรอมากที่สุดเกิดขึ้นที่ บล็อกรูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 30 ค่าที่ทดสอบได้คือ 3.1 มม. ซึ่งผลจากการทดสอบนี้สอดคล้องโดยตรงกับค่าความต้านทานกำลังอัดแรงกำลังคัด อัตราส่วนที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือ บล็อกรูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ CPL5+20

### 5.3.4 ผลของบล็อกรูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรีต่อการชะล้างผิวถนน (erosion rinsing test)

การทดสอบนี้จำลองการสึกหรอเนื่องจากฝน โดยจำลองโดยการฉีดน้ำบนผิวของวัสดุเป็นเวลาต่อเนื่องติดต่อกัน และทำการวัดมวลของวัสดุที่สูญเสียไปเนื่องจากน้ำ ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 วัน ผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนของบล็อกรูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรี ให้ค่าน้ำหนักที่สูญเสียไปเนื่องจากการกัดเซาะของน้ำต่ำสุด ที่ หินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 20 ซึ่งที่เวลา 60 วัน ค่าร้อยละการสูญเสีย คือ 0.22 โดยแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนัก มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาที่เพิ่มมากขึ้น ทุกอัตราส่วนของ หินฝุ่นราชบุรี และอัตราส่วนที่ทำให้การสึกหรอเนื่องจากน้ำมากที่สุดที่ อัตราส่วนหินฝุ่นราชบุรี ร้อยละ 50 ที่เวลา 60 วัน อย่างไรก็ตามผลการทดสอบชิ้นนี้สอดคล้องกับค่ากำลังของวัสดุ อัตราส่วนที่ให้กำลังอัดสูงสุด จะให้ค่าการสึกหรอที่ต่ำสุด รวมถึงความต้านทานต่อการขัดสีที่สูงสุด

## 5.4 การประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ (An economically assessment)

การเปรียบเทียบราคาวัสดุบล็อกรูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรีและคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานราคาก่อสร้างของกรมโยธาธิการ 2554 พบว่าบล็อกรูผิวทางผสมหินฝุ่นราชบุรีที่ให้กำลังอัดสูงสุด ที่ปูนซีเมนต์ 5% และ หินฝุ่นราชบุรี 20% เปรียบเทียบกับราคาผิวทางคอนกรีต ตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการ 2554 พบว่าราคาของผิวคอนกรีตหนา 15 ซม.ต่อตารางเมตร คิดเป็นราคา 390.8 บาท ส่วนราคาของบล็อกรูผิวทาง CPL5+20 คิดเป็นเงิน 55 บาท/ตร.ม.

### 5.5 การประเมินด้านสังคม (The social assessment)

ประชาชนในท้องถิ่นให้ความสำคัญต่อการถ่ายทอดผลผลิตการวิจัยของนักวิจัยมหาวิทยาลัยท้องถิ่นด้านนวัตกรรมและเทคโนโลยีที่ให้ความสำคัญกับการกระจายความรู้ไปสู่ชุมชนในพื้นที่บริการวิชาการของมหาวิทยาลัยท้องถิ่น ถึงร้อยละ 98.62 และ ให้ความสำคัญเห็นต่อผลผลิตการวิจัยของนักวิจัยมหาวิทยาลัยท้องถิ่นด้านนวัตกรรมและเทคโนโลยีที่ให้ความสำคัญกับการเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากการประเมินจากแบบสอบถามพบว่า โดยภาพรวมแล้วชุมชนท้องถิ่นมากกว่าร้อยละ 90 ให้ความสำคัญต่อนวัตกรรมงานวิจัยที่มาจากมหาวิทยาลัยท้องถิ่นรวมถึงมากกว่าร้อยละ 85 ยังให้ความสำคัญด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับรูปแบบงานวิจัยที่เกิดขึ้นที่มีผลต่อการนำไปใช้งานในชุมชน

### 5.6 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน

จากการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ทำการพัฒนาสำหรับเป็นผิวทางมีความเหมาะสมสำหรับที่จะเป็นเทคโนโลยีต้นแบบที่จะเป็นทางเลือกสำหรับชุมชนท้องถิ่นที่สามารถผลิตและด้วยเทคโนโลยีที่ง่ายและไม่ซับซ้อนยังสามารถที่จะสร้างก่อสร้างด้วยชุมชนเองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทสรุปโดยรวม

จากจุดประสงค์ของงานชิ้นนี้เพื่อพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้างผิวทางถนนในชุมชนแทนที่ผิวทางคอนกรีต ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า การสร้างถนนคอนกรีตต้องใช้งบประมาณในการก่อสร้าง ดังนั้นการหาวัสดุอื่นที่มีในท้องถิ่นเพื่อทดแทน จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ดังนั้นงานชิ้นนี้จึงทำการพัฒนาโดยการนำเอาดินท้องถิ่น และ หินฝุ่นของจังหวัดราชบุรี มาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อผลิตเป็นผิวทาง วัสดุเชิงประกอบ โดยการดำเนินการทดสอบหาอัตราส่วนที่ให้ความแข็งแรงมากที่สุด รวมถึงคุณสมบัติด้านอื่นเช่น ด้านน้ำหนัก(measurement of weight) ด้านการดูดซับน้ำ (water absorption) การต้านทานการขัดสี (abrasive resistance) รวมถึงด้านการชะล้าง(erosion on raining) โดยทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานผิวทางจราจรคอนกรีต ของกรมโยธาธิการ ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังการต้านทานแรงกด ต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด แต่อย่างไรก็ดี จุดประสงค์ของงานนี้คือการก่อสร้างผิวทางถนนในท้องถิ่น ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่า ถนนทางหลวง เฉลี่ยถึง 90% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าวัสดุผิวทางเชิงประกอบที่ประดิษฐ์ขึ้น สามารถนำไปใช้ในการก่อสร้างได้

### ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

ในครั้งนีทางคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมวัสดุเชิงประกอบเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้งานในอนาคตสำหรับชุมชนซึ่งเป็นเพียงต้นแบบทางเลือกสำหรับงานถนนท้องถิ่นสำหรับการขนส่งผลผลิตทางการเกษตรซึ่งมีน้ำหนักของรถบรรทุกที่น้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกในการขนส่งทางหลวงปกติ ดังนั้นเทคโนโลยีนี้จึงน่าจะมีความเหมาะสมกับถนนในรูปแบบการประยุกต์วัสดุท้องถิ่นที่มีอยู่เพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างมีคุณค่า และนำมาใช้ประโยชน์กับท้องถิ่นซึ่งสอดคล้องกับแนวปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ซึ่งเป็นแนวทางหลักของงานวิจัยนี้เพื่อสอดคล้องกับแนวทางดังกล่าว

ในการศึกษาดังกล่าวก็ยังไม่ครอบคลุมถึงปัจจัยหลายๆอย่างที่将会งานวิจัยครอบคลุมถึงปัจจัยเหล่านั้นดังอาจจะเกิดจากปัญหาด้านงบประมาณที่จำกัดเป็นหลัก อย่างไรก็ตามในอนาคตข้างหน้าควรจะต้องมีการนำวัสดุท้องถิ่นประเภทอื่นมาศึกษาร่วมด้วย เช่น วัสดุจากใยธรรมชาติ หรือ วัสดุจากพอกโซโซลานที่มีคุณสมบัติการเพิ่มกำลังของชิ้นส่วนวัสดุ เป็นต้น

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- [1] W. Namboonruang, R. Rawangkul, W. Yodsudjai and J. Khedari. Investigation of Properties of Low Thermal Conductivity Pozzolanic Soil Bricks Towards Sustainable Development. Adv Mater Res 2011; 261-263 :.469-479.
- [2] W. Namboonruang, R. Rawangkul, W. Yodsudjai and N. Suphadon. 1 Year Long Term on Strength Properties of Pozzolanic Local Soil Bricks. Adv Mater Res 2012;399-401: 1381-1385.
- [3] J.E.Oti , J.M.Kinuthia and J.Bai. Engineering properties of unfired clay bricks. Eng Geol 2009;107:130-139.
- [4] American Standard Testing and Materials(ASTM) Standard D3282–09, Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes, ASTM, West Conshohocken,PA, USA,1996-2011.
- [5] Specification for structural clay load-bearing tile.TIS:102-2517,1974, Bureau of Thai Industrial Standard, Bangkok.
- [6] Specification for interlocking block (load-bearing type).TCPS:602-2547,2004, Bureau of Thai Industrial Standard, Bangkok.
- [7] American Standard Testing and Materials(ASTM) Standard C67, Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, ASTM, West Conshohocken, PA,USA,1996-2011.
- [8] American Standard Testing and Materials(ASTM) Standard D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM,West Conshohocken, PA,USA,1996-2011.
- [9] American Standard Testing and Materials(ASTM) Standard C293, Standard Test Methods for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), ASTM,West Conshohocken, PA,USA,1996-2011.
- [10] American Standard Testing and Materials(ASTM) Standard C90-96: Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Unit, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 1996-2011.
- [11] S.Kumar. Fly ash-lime-phosphogypsum cementitious binder:A new trend in bricks. Mater and Struct 2000:59-64.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## แสดงคุณสมบัติของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม

ตารางภาคผนวก ก 1 แสดงผลทดสอบกำลังอัดของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

| Compressive Strength of Soil Cement Brick (SCB) for control |                    |                    |                    |                    |                    |                    |        |
|-------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|
| Age                                                         | SCB15 (W/b 0.2275) | SCB20 (W/b 0.2588) | SCB25 (W/b 0.2900) | SCB30 (W/b 0.3213) | SCB35 (W/b 0.3525) | SCB40 (W/b 0.3838) | Remark |
| 3                                                           | 46.59              | 49.87              | 63.55              | 80.70              | 92.58              | 95.29              |        |
| 7                                                           | 55.22              | 59.80              | 80.18              | 103.61             | 116.44             | 126.14             |        |
| 14                                                          | 88.70              | 90.54              | 103.52             | 145.01             | 152.79             | 173.13             |        |
| 28                                                          | 103.61             | 114.83             | 129.57             | 164.48             | 189.45             | 200.72             |        |
| 60                                                          | 106.06             | 117.55             | 132.64             | 168.38             | 193.94             | 205.48             |        |
| 90                                                          | 107.75             | 119.43             | 134.76             | 171.07             | 197.03             | 208.75             |        |
| 120                                                         | 108.73             | 120.51             | 135.98             | 172.62             | 198.82             | 210.65             |        |
| 150                                                         | 109.69             | 121.57             | 137.18             | 174.14             | 200.57             | 212.51             |        |
| 180                                                         | 110.36             | 122.31             | 138.01             | 175.72             | 201.79             | 213.81             |        |
| W/b                                                         | 0.2275             | 0.2588             | 0.2900             | 0.3213             | 0.3525             | 0.3838             |        |

ตารางภาคผนวก ก 2 แสดงผลทดสอบกำลังดัดในรูปของโมดูลัสการแตกหักของวัสดุอิฐดินซีเมนต์ควบคุม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

| Flexural Strength of Soil Cement Brick (SCB) for control |                    |                    |                    |                    |                    |                    |         |
|----------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
| Age                                                      | SCB15 (W/b 0.2275) | SCB20 (W/b 0.2588) | SCB25 (W/b 0.2900) | SCB30 (W/b 0.3213) | SCB35 (W/b 0.3525) | SCB40 (W/b 0.3838) | Remarks |
| 3                                                        | 6.82               | 7.31               | 9.33               | 11.90              | 13.60              | 13.99              |         |
| 7                                                        | 9.08               | 10.42              | 11.94              | 15.50              | 17.35              | 18.79              |         |
| 14                                                       | 14.01              | 15.44              | 15.49              | 21.81              | 22.90              | 25.92              |         |
| 28                                                       | 15.55              | 17.24              | 19.49              | 24.86              | 28.53              | 30.20              |         |
| 60                                                       | 16.00              | 17.74              | 20.04              | 25.57              | 29.60              | 31.07              |         |
| 90                                                       | 16.28              | 18.05              | 20.39              | 26.02              | 29.86              | 31.61              |         |
| 120                                                      | 16.53              | 18.33              | 20.71              | 26.42              | 30.32              | 32.10              |         |
| 150                                                      | 16.69              | 18.50              | 20.91              | 26.68              | 30.61              | 32.40              |         |
| 180                                                      | 16.79              | 18.62              | 21.04              | 26.84              | 30.80              | 32.61              |         |
| W/P                                                      | 0.2275             | 0.2588             | 0.2900             | 0.3213             | 0.3525             | 0.3838             |         |

ตารางภาคผนวก ก 3 แสดงผลทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุอิฐดินซีเมนต์ควม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

| Unit Weight of Soil Cement Brick (SCB) for control |                    |                    |                    |                    |                    |                    |         |
|----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
| Age                                                | SCB15 (W/b 0.2275) | SCB20 (W/b 0.2588) | SCB25 (W/b 0.2900) | SCB30 (W/b 0.3213) | SCB35 (W/b 0.3525) | SCB40 (W/b 0.3838) | Remarks |
| 3                                                  | 1,897.83           | 1,881.63           | 1,839.45           | 1,815.42           | 1,774.98           | 1,767.51           |         |
| 7                                                  | 1,857.77           | 1,858.08           | 1,794.49           | 1,765.06           | 1,732.46           | 1,733.13           |         |
| 14                                                 | 1,833.30           | 1,813.82           | 1,768.93           | 1,762.44           | 1,712.06           | 1,730.54           |         |
| 28                                                 | 1,830.55           | 1,811.10           | 1,766.28           | 1,759.80           | 1,709.50           | 1,727.95           |         |
| 60                                                 | 1,629.74           | 1,612.42           | 1,572.52           | 1,566.75           | 1,521.96           | 1,538.40           |         |
| 90                                                 | 1,626.47           | 1,609.19           | 1,569.36           | 1,563.61           | 1,518.91           | 1,535.31           |         |
| 120                                                | 1,623.20           | 1,605.95           | 1,566.21           | 1,560.46           | 1,515.86           | 1,532.22           |         |
| 150                                                | 1,598.91           | 1,581.92           | 1,542.77           | 1,537.10           | 1,493.17           | 1,509.29           |         |
| 180                                                | 1,582.11           | 1,565.30           | 1,526.56           | 1,520.96           | 1,477.49           | 1,493.44           |         |
| W/P                                                | 0.2275             | 0.2588             | 0.2900             | 0.3213             | 0.3525             | 0.3838             |         |

ตารางภาคผนวก ก 4 แสดงผลทดสอบวิธีการวัดขนาดของวัสดุอิฐดินซีเมนต์ควม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

| Measurement of Size of Soil Cement Brick (SCB) for control |                    |                    |                    |                    |                    |                    |         |
|------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
| Age                                                        | SCB15 (W/b 0.2275) | SCB20 (W/b 0.2588) | SCB25 (W/b 0.2900) | SCB30 (W/b 0.3213) | SCB35 (W/b 0.3525) | SCB40 (W/b 0.3838) | Remarks |
| 3                                                          | 0.00               | 0.58               | 0.47               | 0.00               | 0.00               | 0.00               |         |
| 7                                                          | 0.80               | 0.67               | 0.33               | 0.00               | 0.43               | 0.00               |         |
| 14                                                         | 0.00               | 0.00               | 0.91               | 0.00               | 0.00               | 0.87               |         |
| 28                                                         | 0.40               | 0.40               | 0.87               | 0.40               | 1.00               | 0.00               |         |
| 60                                                         | 0.34               | 0.10               | 0.00               | 1.00               | 0.00               | 0.00               |         |
| 90                                                         | 0.00               | 0.44               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.00               |         |
| 120                                                        | 0.00               | 0.00               | 0.60               | 0.00               | 0.00               | 0.00               |         |
| 150                                                        | 0.14               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.00               |         |
| 180                                                        | 0.03               | 0.20               | 0.00               | 0.14               | 0.00               | 0.12               |         |
| W/P                                                        | 0.2275             | 0.2588             | 0.2900             | 0.3213             | 0.3525             | 0.3838             |         |

ตารางภาคผนวก ก 5 แสดงผลทดสอบวิธีการวัดน้ำหนักของวัสดุอิฐดินซีเมนต์ควม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

| Measurement of Weight of Soil Cement Brick (SCB) for control |                    |                    |                    |                    |                    |                    |         |
|--------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
| Age                                                          | SCB15 (W/b 0.2275) | SCB20 (W/b 0.2588) | SCB25 (W/b 0.2900) | SCB30 (W/b 0.3213) | SCB35 (W/b 0.3525) | SCB40 (W/b 0.3838) | Remarks |
| 3                                                            | 5.9308             | 5.8801             | 5.7483             | 5.6732             | 5.5468             | 5.5235             |         |
| 7                                                            | 5.8056             | 5.8065             | 5.6078             | 5.5158             | 5.4139             | 5.4160             |         |
| 14                                                           | 5.7291             | 5.6682             | 5.5279             | 5.5077             | 5.3502             | 5.4080             |         |
| 28                                                           | 5.7205             | 5.6597             | 5.5196             | 5.4994             | 5.3422             | 5.3999             |         |
| 60                                                           | 5.0929             | 5.0388             | 4.9141             | 4.8961             | 4.7561             | 4.8075             |         |
| 90                                                           | 5.0827             | 5.0287             | 4.9043             | 4.8863             | 4.7466             | 4.7978             |         |
| 120                                                          | 5.0725             | 5.0186             | 4.8944             | 4.8765             | 4.7371             | 4.7957             |         |
| 150                                                          | 4.9966             | 4.9435             | 4.8212             | 4.8034             | 4.6661             | 4.7239             |         |
| 180                                                          | 4.9441             | 4.8915             | 4.7705             | 4.7972             | 4.6540             | 4.7215             |         |
| W/P                                                          | 0.2275             | 0.2588             | 0.2900             | 0.3213             | 0.3525             | 0.3838             |         |

ตารางภาคผนวก ก 6 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุของอิฐดินซีเมนต์ควบคุม(SCB) ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

| Water Absorption of Soil Cement Brick (SCB) for control |                    |                    |                    |                    |                    |                    |        |
|---------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|
| Age                                                     | SCB15 (W/b 0.2275) | SCB20 (W/b 0.2588) | SCB25 (W/b 0.2900) | SCB30 (W/b 0.3213) | SCB35 (W/b 0.3525) | SCB40 (W/b 0.3838) | Remark |
| 3                                                       | 13.15              | 12.65              | 12.22              | 11.70              | 10.68              | 9.65               |        |
| 7                                                       | 12.64              | 12.16              | 11.76              | 11.26              | 10.28              | 9.28               |        |
| 14                                                      | 9.90               | 9.52               | 9.21               | 8.81               | 8.04               | 7.27               |        |
| 28                                                      | 9.21               | 8.86               | 8.57               | 8.19               | 7.48               | 6.76               |        |
| 60                                                      | 8.60               | 8.28               | 8.00               | 7.66               | 6.99               | 6.32               |        |
| 90                                                      | 8.54               | 8.22               | 7.95               | 7.60               | 6.94               | 6.27               |        |
| 120                                                     | 8.42               | 8.11               | 7.83               | 7.49               | 6.84               | 6.18               |        |
| 150                                                     | 8.29               | 7.98               | 7.71               | 7.38               | 6.74               | 6.08               |        |
| 180                                                     | 8.22               | 7.89               | 7.67               | 7.34               | 6.71               | 6.00               |        |
| W/P                                                     | 0.2275             | 0.2588             | 0.2900             | 0.3213             | 0.3525             | 0.3838             |        |

## ภาคผนวก ข

## แสดงคุณสมบัติของบล็อกผิวทางเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี

ตารางภาคผนวก ข 1 แสดงผลทดสอบกำลังอัดของบล็อกผิวทางเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

| Compressive Strength of Composite Pavement-Limestone Dust (CPL) |                     |                      |                      |                      |                      |                      |         |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|
| Age                                                             | CPL5+5 (W/b 0.1475) | CPL5+10 (W/b 0.1788) | CPL5+20 (W/b 0.2100) | CPL5+30 (W/b 0.2413) | CPL5+40 (W/b 0.2725) | CPL5+50 (W/b 0.3038) | Remarks |
| 3                                                               | 24.65               | 27.89                | 68.87                | 64.37                | 55.75                | 35.31                |         |
| 7                                                               | 43.80               | 64.37                | 100.04               | 91.42                | 82.14                | 70.32                |         |
| 14                                                              | 59.85               | 74.65                | 114.75               | 107.35               | 98.84                | 76.71                |         |
| 28                                                              | 64.52               | 80.48                | 123.69               | 115.73               | 106.56               | 82.69                |         |
| 60                                                              | 68.23               | 85.10                | 127.97               | 122.39               | 112.69               | 87.44                |         |
| 90                                                              | 69.56               | 86.77                | 130.53               | 124.78               | 114.88               | 89.15                |         |
| 120                                                             | 69.91               | 88.33                | 131.60               | 126.98               | 116.76               | 90.42                |         |
| 150                                                             | 68.96               | 87.18                | 128.90               | 125.36               | 115.43               | 89.58                |         |
| 180                                                             | 68.55               | 86.65                | 127.62               | 124.61               | 114.73               | 88.67                |         |
| W/P                                                             | 0.1475              | 0.1788               | 0.2100               | 0.2413               | 0.2725               | 0.3038               |         |

ตารางภาคผนวก ข 2 แสดงผลทดสอบกำลังดัดในรูปของโมดูลัสการแตกหักของบล็อกผิวทางเชิงประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน

| Flexural Strength (MOR) of Composite Pavement-Limestone Dust (CPL) |                     |                      |                      |                      |                      |                      |        |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------|
| Age                                                                | CPL5+5 (W/b 0.1475) | CPL5+10 (W/b 0.1788) | CPL5+20 (W/b 0.2100) | CPL5+30 (W/b 0.2413) | CPL5+40 (W/b 0.2725) | CPL5+50 (W/b 0.3038) | Remark |
| 3                                                                  | 2.29                | 2.90                 | 3.89                 | 3.78                 | 3.61                 | 3.09                 |        |
| 7                                                                  | 3.81                | 4.79                 | 6.53                 | 6.27                 | 6.07                 | 5.20                 |        |
| 14                                                                 | 5.07                | 6.52                 | 8.79                 | 8.49                 | 8.18                 | 7.03                 |        |
| 28                                                                 | 5.42                | 6.96                 | 9.39                 | 9.07                 | 8.74                 | 7.51                 |        |
| 60                                                                 | 5.56                | 7.15                 | 9.66                 | 9.31                 | 8.98                 | 7.72                 |        |
| 90                                                                 | 5.75                | 7.39                 | 9.97                 | 9.63                 | 9.28                 | 7.98                 |        |
| 120                                                                | 5.67                | 7.28                 | 9.82                 | 9.48                 | 9.13                 | 7.85                 |        |
| 150                                                                | 5.58                | 7.16                 | 9.67                 | 9.33                 | 8.99                 | 7.73                 |        |
| 180                                                                | 5.53                | 7.11                 | 9.59                 | 9.26                 | 8.92                 | 7.67                 |        |
| W/P                                                                | 0.1475              | 0.1788               | 0.2100               | 0.2413               | 0.2725               | 0.3038               |        |

ตารางภาคผนวก ข 3 แสดงผลทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของบล็อกรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ประกอบผสมหินฝุ่น  
 ราชบุรี ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150  
 และ 180 วัน

| Unit Weight of Composite Pavement-Limestone Dust (CPL) |                     |                      |                      |                      |                      |                      |         |
|--------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|
| Age                                                    | CPL5+5 (W/b 0.1475) | CPL5+10 (W/b 0.1788) | CPL5+20 (W/b 0.2100) | CPL5+30 (W/b 0.2413) | CPL5+40 (W/b 0.2725) | CPL5+50 (W/b 0.3038) | Remarks |
| 3                                                      | 1,845.33            | 1,853.30             | 1,867.51             | 1,892.23             | 1,935.61             | 1,952.29             |         |
| 7                                                      | 1,809.60            | 1,808.90             | 1,836.60             | 1,845.97             | 1,911.39             | 1,911.07             |         |
| 14                                                     | 1,806.90            | 1,787.60             | 1,813.00             | 1,819.69             | 1,865.87             | 1,885.90             |         |
| 28                                                     | 1,805.09            | 1,785.82             | 1,811.18             | 1,817.87             | 1,864.00             | 1,884.02             |         |
| 60                                                     | 1,802.56            | 1,783.31             | 1,808.65             | 1,815.32             | 1,861.39             | 1,881.38             |         |
| 90                                                     | 1,801.48            | 1,782.23             | 1,807.57             | 1,814.23             | 1,860.27             | 1,880.24             |         |
| 120                                                    | 1,792.44            | 1,773.30             | 1,798.50             | 1,805.13             | 1,850.94             | 1,870.81             |         |
| 150                                                    | 1,788.07            | 1,768.97             | 1,794.11             | 1,800.72             | 1,846.42             | 1,866.24             |         |
| 180                                                    | 1,770.19            | 1,751.29             | 1,776.17             | 1,782.72             | 1,827.97             | 1,847.59             |         |
| W/P                                                    | 0.1475              | 0.1788               | 0.2100               | 0.2413               | 0.2725               | 0.3038               |         |

ตารางภาคผนวก ข 4 แสดงผลทดสอบค่าขนาดของบล็อกรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ประกอบผสมหินฝุ่นราชบุรี ณ  
 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150 และ 180  
 วัน

| Measurement of Size of Composite Pavement-Limestone Dust (CPL) |                     |                      |                      |                      |                      |                      |        |
|----------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------|
| Age                                                            | CPL5+5 (W/b 0.1475) | CPL5+10 (W/b 0.1788) | CPL5+20 (W/b 0.2100) | CPL5+30 (W/b 0.2413) | CPL5+40 (W/b 0.2725) | CPL5+50 (W/b 0.3038) | Remark |
| 3                                                              | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |        |
| 7                                                              | 0.10                | 0.11                 | 0.10                 | 1.00                 | 0.40                 | 0.40                 |        |
| 14                                                             | 0.00                | 0.00                 | 0.80                 | 0.00                 | 0.80                 | 0.00                 |        |
| 28                                                             | 0.00                | 0.00                 | 1.12                 | 1.01                 | 1.78                 | 0.00                 |        |
| 60                                                             | 0.00                | 0.60                 | 0.00                 | 0.27                 | 0.00                 | 0.00                 |        |
| 90                                                             | 0.00                | 0.27                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.53                 | 0.00                 |        |
| 120                                                            | 0.42                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |        |
| 150                                                            | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 1.30                 | 0.41                 | 0.00                 |        |
| 180                                                            | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.33                 | 0.52                 |        |
| W/P                                                            | 0.1475              | 0.1788               | 0.2100               | 0.2413               | 0.2725               | 0.3038               |        |

ตารางภาคผนวก ข 5 แสดงผลทดสอบวิธีการวัดน้ำหนักของบล็อกรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าของบล็อกรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ประกอบผสมหินฝุ่น  
 ราชบุรี ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150  
 และ 180 วัน

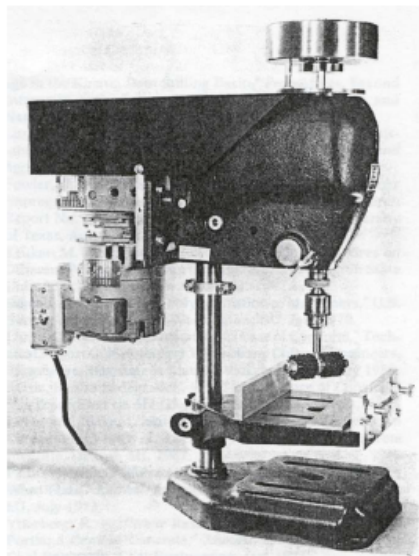
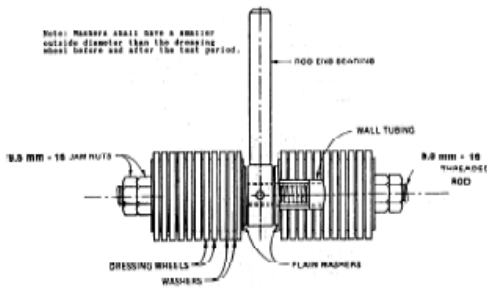
| Measurement of Weight of Composite Pavement-Limestone Dust (CPL) |                     |                      |                      |                      |                      |                      |        |
|------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------|
| Age                                                              | CPL5+5 (W/b 0.1475) | CPL5+10 (W/b 0.1788) | CPL5+20 (W/b 0.2100) | CPL5+30 (W/b 0.2413) | CPL5+40 (W/b 0.2725) | CPL5+50 (W/b 0.3038) | Remark |
| 3                                                                | 5.7672              | 5.7916               | 5.8359               | 5.9132               | 6.0488               | 6.1009               |        |
| 7                                                                | 5.6550              | 5.6528               | 5.7394               | 5.7686               | 5.9731               | 5.9721               |        |
| 14                                                               | 5.6466              | 5.5863               | 5.6656               | 5.6865               | 5.8309               | 5.8934               |        |
| 28                                                               | 5.6409              | 5.5807               | 5.6600               | 5.6809               | 5.8250               | 5.8875               |        |
| 60                                                               | 5.6330              | 5.5729               | 5.6520               | 5.6729               | 5.8168               | 5.8868               |        |
| 90                                                               | 5.6296              | 5.5695               | 5.6486               | 5.6694               | 5.8162               | 5.8852               |        |
| 120                                                              | 5.6014              | 5.5416               | 5.6203               | 5.6692               | 5.8142               | 5.8815               |        |
| 150                                                              | 5.5877              | 5.5374               | 5.6159               | 5.6554               | 5.8105               | 5.8778               |        |
| 180                                                              | 5.5318              | 5.5379               | 5.6162               | 5.6508               | 5.8102               | 5.8763               |        |
| W/P                                                              | 0.1475              | 0.1788               | 0.2100               | 0.2413               | 0.2725               | 0.3038               |        |

ตารางภาคผนวก ข 6 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุของบล็อกรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ประกอบผสมหิน  
 ฝุ่นราชบุรี ณ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงละเอียดทั้งหมดต่างๆ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120,  
 150 และ 180 วัน

| Water Absorption of Composite Pavement-Limestone Dust (CPL) |                     |                      |                      |                      |                      |                      |         |
|-------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|
| Age                                                         | CPL5+5 (W/b 0.1475) | CPL5+10 (W/b 0.1788) | CPL5+20 (W/b 0.2100) | CPL5+30 (W/b 0.2413) | CPL5+40 (W/b 0.2725) | CPL5+50 (W/b 0.3038) | Remarks |
| 3                                                           | 14.59               | 14.48                | 14.01                | 13.90                | 13.52                | 13.47                |         |
| 7                                                           | 14.36               | 14.27                | 13.80                | 13.70                | 13.31                | 13.27                |         |
| 14                                                          | 11.71               | 11.63                | 11.25                | 11.17                | 10.86                | 10.82                |         |
| 28                                                          | 11.27               | 11.18                | 10.82                | 10.74                | 10.44                | 10.41                |         |
| 60                                                          | 10.66               | 10.58                | 10.23                | 10.17                | 9.87                 | 9.84                 |         |
| 90                                                          | 10.61               | 10.54                | 10.20                | 10.12                | 9.84                 | 9.80                 |         |
| 120                                                         | 10.46               | 10.39                | 10.05                | 9.98                 | 9.70                 | 9.66                 |         |
| 150                                                         | 10.10               | 10.03                | 9.70                 | 9.64                 | 9.36                 | 9.33                 |         |
| 180                                                         | 9.95                | 9.87                 | 9.53                 | 9.40                 | 9.18                 | 9.15                 |         |
| W/P                                                         | 0.1475              | 0.1788               | 0.2100               | 0.2413               | 0.2725               | 0.3038               |         |

ตารางภาคผนวก ข 7 ภาพแสดงเครื่องมือทดสอบความต้านทานต่อการขัดสี

**Appendix U.3.9 – ASTM C944**

| Generic Name of Test                                                                                                                                                                                   | Rolling Dressing Wheels : Abrasion Test                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|-----------|-----------------|------------|-----------------|------------------|-----------------|------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|--------------|-----------------|------------------|-----------------|--|
| Principle of Test                                                                                                                                                                                      | Loaded dressing wheels orbiting on surface.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| Historic Development of Test                                                                                                                                                                           | ASTM C944-95 Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating Cutter Method is essentially the follow on of a US Corps of Engineers test, CRD-C52-54 US Corps of Engineers Method of Test for Resistance of Concrete or Mortar Surfaces to Abrasion. The only difference appears to be an increase in load from 10lbs (4.4 kg) to 10kg. Note that CRD-C52-54 was in all probability a derivative of Smith's rotating cutter test - which evidently predates 1958. |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| Apparatus and Abrasives                                                                                                                                                                                | The apparatus illustrated in figure U.3.9.1 consists of a rotating cutter mounted in a modified drill press or similar device. The rotating cutter consists of 24 No. 1 Desmond Huntington dressing wheels mounted on a common axle. A continuous load of 98N is placed directly on the spindle that turns the cutter. [ASTM C944]                                                                                                                                                                  |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| <div><div></div><div></div></div> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| <p><b>Figure U.3.9.1</b> Rotating-cutter drill press [ASTM C944]</p>                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| Test Method                                                                                                                                                                                            | The spindle holding the rotating cutter is rotated on the concrete specimen at 200 rpm under a constant load of 98N for 2 minutes. The surface is then cleaned by blowing the dust off the test specimen. The minimum test schedule requires three 2-minute tests on three separate areas of the test specimen. [ASTM C944]. Some authors (Dahir 1981) have used a constant spray of water to simulate the effect of rain-water on .                                                                |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| Abrasion Wear                                                                                                                                                                                          | The abrasion wear is determined by measuring loss of surface in grams or the depth of wear in millimetres. [ASTM C944]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| References                                                                                                                                                                                             | <table><tr><th>Author</th><th>Comment</th></tr><tr><td>ASTM C944</td><td>Source document</td></tr><tr><td>Liu (1991)</td><td>Source document</td></tr><tr><td>Alexander (1984)</td><td>Source document</td></tr><tr><td>Shi (1997)</td><td>Source document</td></tr></table>                                                                                                                                                                                                                        | Author | Comment | ASTM C944 | Source document | Liu (1991) | Source document | Alexander (1984) | Source document | Shi (1997) | Source document | <table><tr><th>Author</th><th>Comment</th></tr><tr><td>Dahir (1981)</td><td>Source document</td></tr><tr><td>Robertson (1991)</td><td>Source document</td></tr></table> | Author | Comment | Dahir (1981) | Source document | Robertson (1991) | Source document |  |
| Author                                                                                                                                                                                                 | Comment                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| ASTM C944                                                                                                                                                                                              | Source document                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| Liu (1991)                                                                                                                                                                                             | Source document                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| Alexander (1984)                                                                                                                                                                                       | Source document                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| Shi (1997)                                                                                                                                                                                             | Source document                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| Author                                                                                                                                                                                                 | Comment                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| Dahir (1981)                                                                                                                                                                                           | Source document                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |
| Robertson (1991)                                                                                                                                                                                       | Source document                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |         |           |                 |            |                 |                  |                 |            |                 |                                                                                                                                                                         |        |         |              |                 |                  |                 |  |

ภาคผนวก ค

ประวัตินักวิจัย

## BIO-DATA:

### Mr. Weerapol Namboonruang., M.Eng

---

**Sex:** Male **Race:** Thai **Nationality:** Thai **Age:** 36 **Date of Birth:** 6 August 1975 **Weight:** 61 Kgs. **Hight:** 168 Cms. **Identity Card No:** 3-4099-008-145-42 **Issue :** at Sriracha District , Chonburi Province. **Address:** 93/1 moo.5 Tambon nongkham, Sriracha District, Chonburi Province 20230, Thailand. **Cell phone:**+6608-610-196-93 **E-mail :** bannork\_civil@hotmail.com



#### An education background

- |                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>October ,09,1999</b>                | -Department of Civil Engineering , Faculty of Engineering, RIT, Thailand. (Bachelor of Engineering)                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>April , 27,2007</b>                 | -Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand. (Master of Engineering)                                                                                                                                                                                                              |
| <b>June , 04,2008 – in the present</b> | -Doctor of Engineering (Civil Engineering) Student., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.<br>-Doctor of Philosophy (Sustainable energy and environment Technology and Management) Candidate, Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment, RMUTR, Thailand. |

#### An experiences background

- |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1999 - 2000</b> | -As an engineer in <i>THE BEST – PAC CONCRETE Co., Ltd</i> , worked about controlled reinforce concrete bridge jobs in <i>LAO</i> country.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>2000 - 2001</b> | -As an design engineer in <i>PONGVINAI ENGINEERING CO.,Ltd</i> , worked about controlled and designed on civil engineering and construction system in <i>TPI</i> factory, Rayong province.                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>2001 - 2003</b> | -As an inspector engineer in <i>UNITED TELECOM SALES AND SERVICESS Co., Ltd (UTEL)</i> , worked about controlled on high steel tower structure of the mobile station, <i>DTAC</i> project.                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>2003 - 2008</b> | -As technical research engineer in <i>ASIA CEMENT PUBLIC COMPANY LIMITED.</i> , responsibility research on pozzolanic materials for use in cement process and pozzolanic concrete research.<br>-An advisor concrete engineer in <i>IMMS Co.,Ltd.</i> , used an interlocking of aggregate transfer loadson plain concrete pavement, Department of Rural Road, Thailand.<br>-An advisor engineer in <i>SFB Co.,Ltd.</i> responsibility for refractory materials inspection. |

**2008- In the present** - Permanently lecturer in Civil Technology programme, Department of Civil and Architecture, Faculty of Science and Technology, Muban Chombueng Rajabhat University, MCRU, Thailand.

### **An interesting research.**

- [1] Cement and pozzolanics materials bases research.
- [2] Waste materials development for improve on innovative products for Rural Infrastructure Engineering, (RIE)
- [3] Low thermal energy composite building materials (Base on local soil, local industries waste products, natural fibers)

### **The research scholarships.**

- [1] The Bureau of the budget thailand research scholarship, under considered by National research council of Thailand., 2009.
- [2] The Bureau of the budget thailand research scholarship, under considered by National research council of Thailand., 2010.
- [3] The Bureau of the budget thailand research scholarship, under considered by National research council of Thailand., 2011.

### **Selected publications.**

- [1] **W. Namboonruang**, and W. Mairaing., “ The Study Effect of Concrete Ingredient on Quality and Cost of RMC in the North Eastern of Thailand”, 12<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering, NCCE., Phitsanulok, Thailand, May 2007, Vols.4 (INF), pp. 1-6.
- [2] **W. Namboonruang** and W. Mairaing., “ The Effect on Quality and Cost of Ready Mixed Concrete in the North Eastern of Thailand ”. National Graduate Research Conference, Suratthani, Thailand, May 2007, pp. 164-169.
- [3] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul, W. Yodsudjai and J. Khedari., “ Properties of High Volume Fly Ash Clay Bricks for Sustainable Development ”, The 5<sup>th</sup> GMSARN International Conference, 17-19 November 2010, Luang Phabang City, Lao PDR, ENV-15.
- [4] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul, W. Yodsudjai and J. Khedari., “ The Study Effect of Ingredient on Quality and Properties of Pozzolanics Clay Bricks for Sustainable Development ”, 2<sup>nd</sup> Rajamangala University of Technology International Conference, 24 - 26 November 2010, Convention Center Chulabhorn Research Institute, Bangkok, Thailand, pp. 116-121.
- [5] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul and W. Yodsudjai. “A Study Effect Behavior and Improvement on Properties of Pozzolanics Clay Bricks for Sustainable Development ”, Journal of Science and Technology, Mahasarakham University, Specials Issue, Thailand 2010, pp. 7-13.
- [6] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul, W. Yodsudjai and J. Khedari., “ Investigation of Properties of Low Thermal Conductivity Pozzolanics Soil Bricks Towards Sustainable Development ”, Journal of Advanced Materials Research, ISSN: 1022-6680. Vols. 261-263 (2011) pp.469-479, Trans Tech Publications, Switzerland, (*Impact factor, 0.107, calc. of the journal, 2 years.*)
- [7] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul, W. Yodsudjai and N. Suphadon, “1 Year Long Term on Strength Properties of Pozzolanics Local Soil Bricks ”, Journal of Advanced Materials Research, ISSN: 1022-6680, Vols.399-401(2012) pp 1381-1385, Trans Tech Publications, Switzerland, (*Impact factor, 0.107, calc. of the journal, 2 years.*)

[8] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul and W. Yodsudjai., “ Strength Properties of Low Thermal Conductivity Fly Ash Bricks: Compressive and Flexural Strength Aspects”, Journal of Applied Mechanics and Materials, ISSN: 1660-9336,Vols. 117-119(2012), pp.1352-1357,Trans Tech Publications, Switzerland. (*Impact factor, 0.054, calc. of the journal, 2 years.*)

[9] **W. Namboonruang**, N. Suphadon and P. Yong-amnuai ., “An Application of Aerial Photographs with Geographic Coordinates to a Rural Digital Map”, Journal of Advanced Materials Research, ISSN: 1022-6680, Vols.450-451 (2012), pp.1103-1107 ,Trans Tech Publications, Switzerland, (*Impact factor, 0.107, calc. of the journal, 2 years.*)

[10] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul, W. Yodsudjai, N. Suphadon and P. Yong-amnuai ., “Study the properties of Mae-Khong Alluvial Gravel Concrete for Producing the Non-bearing Thin Wall Concrete”, Journal of Advanced Materials Research, ISSN: 1022-6680, Vols.476-478(2012), pp.1652-1656 ,Trans Tech Publications, Switzerland, (*Impact factor, 0.107, calc. of the journal, 2 years.*)

[11] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul, W. Yodsudjai and N. Suphadon ., “A Perspective on Properties of Low Thermal Lime - Hull Ash Adobe” , Journal of Advanced Science Letters, ISSN: 1966-7317,Vol. (2012) , American Scientific Publishers, United States of America, USA, *Journal impact factors: 1.253 (Accepted).*

[12] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul, W. Yodsudjai and N. Suphadon., “Study the properties of the refractory materials mixed by silica for the local agro-industry using thermal energy ”, Journal of Biobased Materials and Bioenergy, ISSN: 1556-6560, Vols.476-478 (2012), American Scientific Publishers, United States of America, USA, *Journal impact factors: 1.402 (Submitted).*

[13] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul, and W. Yodsudjai “ A Perspective Study on Strength Properties – Low Thermal Conductivity and Leachability of Pozzolanic Soil Bricks Towards to Environmentally Friendly”, Journal of Biobased Materials and Bioenergy, ISSN: 1556-6560, Vols.(2012), American Scientific Publishers, United States of America, USA, *Journal impact factors: 1.402 (Submitted).*

[14] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul, and W. Yodsudjai “Characterization and thermal conductivity of fly ash local soil based brick ”, Journal of Biobased Materials and Bioenergy, ISSN: 1556-6560, Vols.(2012), American Scientific Publishers, United States of America, USA, *Journal impact factors: 1.402 (In progress on submission).*

[15] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul, W. Yodsudjai and N. Suphadon., “ Thermal Conductivity and Strength Properties of Soil-Base Lime Adobe Stabilized with Pottery Burnt Hull Ash”, Journal of Advanced Materials Research, ISSN: 1022-6680, Vols.(2012),Trans Tech Publications, Switzerland,, (*Impact factor, 0.107, calc. of the journal, 2 years.*), (*Submitted*)

[16] **W. Namboonruang**, R. Rawangkul, W. Yodsudjai, N. Suphadon and P. Yong-amnuai.,“ Characterization of Low Thermal Lime-Hull Ash Building Adobe” International Journal of Key Engineering Materials, ISSN: 1013-9826, Vol.(2012), Trans Tech Publications, Switzerland, (*Journal Impact factor, 0.144, 2 years.*), (*Accepted*)

### **Book publication.**

[1] **Weerapol Namboonruang**, Rattanakorn Rawangkul and Wanchai Yodsudjai “ CEMENT AND FUNDAMENTAL DESIGN OF CONCRETE MIX ” 1<sup>st</sup> ed, Bangkok: DEE DEE BOOK CO., LTD., 2011.

## BIO-DATA:

### **Assist. Prof. Dr. Wanchai Yodsudjai., D.Eng**

---

#### **ประวัติคณะผู้วิจัย**

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ผศ.ดร วันชัย ยอดสุดใจ

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Assist.Prof. Dr. Wanchai Yodsudjai

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์  
อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail : fengwcy@ku.ac.th

#### **ประวัติการศึกษา**

-B.Eng in Civil Engineering From Kasetsart University ., Thailand

-M.Eng in Civil Engineering From Tokyo Institute of Technology., Japan

-D.Eng in Civil Engineering From Tokyo Institute of Technology., Japan

#### **ผลงานวิจัย**

[1] Otsuki, N., Miyazato S., and Yodsudjai, W., Influence of Recycled Aggregate on ITZ, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, vol.15, No.5, pp.443-451

[2] Otsuki, N., Yodsudjai, W., Nishida, T., and Yamane, H., Developed Method for Measuring Flexural Strength and Modulus of Elasticity of Micro-Regions in recycled and Normal Aggregate Concrete, Magazine of Concrete Research, Thomas Telford Ltd, Vol.55, No.5, pp.439-448

[3] Otsuki, N., Yodsudjai, W., Nishida, T., and Yamane, H., New Test Methods for Measuring Strength and Chloride Ion Diffusion Coefficient of Minute Regions in Concrete, ACI Materials Journal, vol. 101, No. 2, pp. 146-153

[4] Yodsudjai, W., Development of Test Method for Measuring Chloride Ion Diffusion Coefficient of Minute Regions in Concrete, Proceeding of the 9th National Convention on Civil Engineering, Petchaburi, Thailand, 2004, vol. 1, pp. MAT-167-171

- [5] Yodsudjai, W., Otsuki, N., Nishida, T. and Yamane, H., Quantitative Evaluation of Strength and Chloride Ion Diffusivity of Minute Regions in Concrete Using Newly Developed Methods, Proceeding of the 1st International Conference of Asian Concrete Federation, Chiangmai, Thailand, 2004, pp. 875-884
- [6] Yodsudjai, W., Otsuki, N. and Castillo, M. C. L., Influence of Exposure Temperature on Chloride Ion Diffusivity in the Minute Region of the Cement Mortar Matrix, Proceeding of the 2nd National Convention on Concrete, Chiangmai, Thailand, 2004, pp. 23-26
- [7] วันชัย ยอดสุดใจ ประเสริฐ สุวรรณวิทยา และ ญัฐพล ทองขาว, การศึกษาการใช้สารละลายแทนน้ำทะเลสำหรับวิธี electrodeposition เพื่อซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน, เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 1, ระยอง, 2548, REP 1-REP 4
- [8] วันชัย ยอดสุดใจ, การศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตที่แตกร้าวเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและได้ซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมแซมแล้ว, เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ระยอง, 2548, REP 5-REP 10
- [9] Yodsudjai, W., Interfacial Transition Zone in Concrete, The 1st National Concrete and Geopolymer Conference, Khon Kaen, Thailand, 2005, pp. 60-66
- [10] ญัฐพล ทองขาว และ วันชัย ยอดสุดใจ, การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อลดการเกิดสนิมโดยวิธี Electrodeposition, โยธาสาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, ปีที่ 17, ฉบับที่ 4, น. 49-51
- [11] วันชัย ยอดสุดใจ, การซ่อมแซมคอนกรีตที่เสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากคลอไรด์ด้วยการถ่ายประจุไฟฟ้า (Cathodic Protection), โยธาสาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, ปีที่ 17, ฉบับที่ 4, น. 50-51
- [12] วันชัย ยอดสุดใจ, การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal), โยธาสาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, ปีที่ 17, ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน-ธันวาคม 2548 น. 49-51
- [13] Yodsudjai, W., Otsuki, N. and Nishida, T., Feasibility study on soil improvement using electrochemical technique, the Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD 2006), Khon Kaen, Thailand, 2006, CDROM
- [14] Otsuki, N., Yodsudjai, W. and Nishida, T., Feasibility study on soil improvement using electrochemical technique, Journal of Construction and Building Materials, ELSEVIER, Accepted for publication (Feb 09, 2006)

## BIO-DATA:

### Dr. Rattanakorn Rawangkul., Ph.D

---

#### ประวัติคณะผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ดร. รัตนากร ระวังกุล

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Dr. Rattakorn Rawangkul

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำวิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม, RMUTR

สถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

รัตนโกสินทร์, RMUTR , E-mail : rrawagnkul@yahoo.com

#### ประวัติการศึกษา

-B.Eng in Chemical Engineering From Prince of Songkla University, Thailand

-M.Eng in Energy Technology From KMUTT, Thailand

-Ph.D in Energy Technology From KMUTT, Thailand

#### ผลงานวิจัย

[1] Rawangkul, R., Khedari, J., Hirunlabh, J., and Zeghmami, B., 2009, "Characteristics and performance analysis of a natural desiccant prepared from coconut coir" **Science asia**.

[2] Rawangkul, R., Khedari, J., Hirunlabh, J., and Zeghmami, B., 2008, "Performance analysis of a new sustainable evaporative cooling pad made from coconut coir", **International Journal of sustainable engineering**, Volume 2, Issue 2, June, pages 117-131.

[3] Rawangkul, R., Khedari, J., Hirunlabh, J., and Zeghmami, B., "New alternative using natural materials as desiccant" **The 3<sup>rd</sup> International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics**, Hammamet, Tunisia, 17-19 December, 2006.

- [4] Rawankul, R., Khedari, J., Hirunlabh, J., Zeghmami, B., and Elegant, L., “Heat and mass transfer of coconut coir pad in evaporative cooling system” **The 4<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT)**, Cairo, Egypt, 19-23 September 2005, Paper No.RR3, pp.1-5, 2005.
- [5] Rawankul, R., Khedari, J., Hirunlabh, J., and Daguenet, M., “Comparison of moisture adsorption properties of coconut coir and silica gel” **1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Energy and Green Architecture (SEGA)**, Bangkok, Thailand, GA 220-215, 2003.
- [6] J. Khedari, R. Rawankul, W. Chimchavee and J. Hirunlabh., “Feasibility study of using agriculture waste as desiccant for air conditioning system”., **Renewable Energy**, Vol. 28,1617-1628, 2003
- [7] รัตนากร ระวังกุล, โจเซฟ เคดารี, จงจิตร หิรัญลาก และนิคม แหยมสัก, การศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้แทนสารดูดความชื้นเพื่อใช้ในระบบปรับอากาศวัฏจักรเปิด, การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 40 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิศวกรรม วันที่ 4-7 กุมภาพันธ์ 2545, หน้า 182-189.
- [8] จงจิตร หิรัญลาก, โจเซฟ เคดารี, รัตนากร ระวังกุล, วันชัย นิมนวิ, และ สโรชา เจริญวัย, โครงการวิจัย “การพัฒนาต้นแบบของเบดบรรจุเส้นใยธรรมชาติเพื่อควบคุมความชื้นในโรงเรือน (ระยะที่ 1-2) Development of a Prototype of Natural Fiber Bed for Moisture Control in Rural Applications (Phase 1-2), พันทมนวคเงินอุดหนุนประจำปี 2546-2547

## BIO-DATA:

### **Dr. Nutthanun Suphadon., Ph.D**

---

#### **ประวัติคณะผู้วิจัย**

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ดร. ณัฐนันท์ สุขดล

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Dr. Nutthanun Suphadon

ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิจัย MTEC

หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก

-Science Building 3, Faculty of science Mahidol University, Phuttamonthon 4 Rd, Salaya, Nakornpathom 73170, Thailand, E-mail: Nutthans@mtec.or.th

สถานที่อยู่ติดต่อได้ Science Building 3, Faculty of science Mahidol University, Phuttamonthon 4 Rd, Salaya, Nakornpathom 73170, Thailand, E-mail: Nutthans@mtec.or.th

#### **ประวัติการศึกษา**

-Bachelor degree in Civil Engineering (2000), Kasetsart University, Thailand

-Master degree in Material research (2006), Queen Mary University of London, U.K.

-Doctorate degree in Material Engineering (2010), Queen Mary University of London, U.K.

#### **Publications:**

- Suphadon et al., Title “Viscoelastic Behavior of Rubber Under a Complex Loading”, Journal of Applied polymer science, Vol. 113, Pages 693–699 (2009)
- Suphadon, N and Busfield, J J C., Title “Elastic behaviour of rubber cylinders under combined torsion and tension loading”, Plastics, Rubber and Composites, Vol 38, No8 , Pages 337-342 (2009)
- Suphadon et al., Title “The visco-elastc properties of elastomers at large pre-strains”, Constitutive Models for Rubber VI, Taylor & Francis Group, London (2009)

- Suphadon et al., Title “The Viscoelastic Behavior of Rubber under a Complex Loading. II. The Effect Large Strains and the Incorporation of Carbon Black”, Journal of Applied polymer science, Vol. 117, Pages 1290-1297 (2010)
- Suphadon et al., Title “The viscoelastic behaviour of rubber under a small simple shear oscillation superimposed on a large pure shear”, Polymer testing, Vol 29, Pages 440-444 (2010)

#### **Conferences:**

- “Viscoelastic behaviour of rubber in complex loading”, Rubber mini expo, American rubber society, 14-19 October 2008, Kentucky, USA (speaker).
- “Strain dependence of the visco-elastic behaviour”, Institute of Materials, Minerals and Mining (IOM<sup>3</sup>), 30 October 2008, London.(speaker)
- “Dynamic behaviour of pre-strained elastomer”, Tire tech conference, 16-19 February 2009, Hamburg, Germany (speaker).
- “The visco-elastic behaviour of elastomers at large pre-strains”, ECCMR, September 2009, Dresden, Germany (speaker).

#### **Seminar (speaker)**

- Dynamic properties of rubber and preliminary design of rubber component organized by the research and development center for Thai rubber industry at Mahidol University (Salaya) on 9 July 2010.

## BIO-DATA:

### Mr. Sarawut Yodmune., M.Eng

---

#### ประวัติคณะผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายสรวิทย์ ยอดมณี

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Sarawut Yodmune

-คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail : sarawut\_ku@hotmail.com

#### ประวัติการศึกษา

-B.Eng in Civil Engineering From Kasetsart University ., Thailand

-M.Eng Eng in Civil Engineering From Kasetsart University ., Thailand

-D.Eng in Civil Engineering Candidate ., From Kasetsart University ,Thailand

#### ผลงานวิจัย

[1] S. Yodmune, and W. Yodsudjai “Study on Corrosion of Steel Bar in FlyAsh-Based Geopolymer Concrete” International Conference on Pozzolan,Concrete and Geopolymer. 24-25 May 2006, at Erawan Room, the SofitelRaja Orchid, Khon Kaen, Thailand

[2] S. Yodmune and W. Yodsudjai, 2007. Optimum  $\text{Na}_2\text{SiO}_2/\text{NaOH}$  Ratio ForGeopolymer Concrete. The 12th National Convention on Civil Engineering.Phitsanulok, Thailand.

[3] S. Yodmune and W. Yodsudjai, 2007. Optimum  $\text{Na}_2\text{SiO}_2/\text{NaOH}$  Ratio ForGeopolymer Concrete. The 1st National Graduate Research Conference,August 1-2 Bangkok University Rangsit Campus.

[4] S. Yodmune and W. Yodsudjai, 2007. “Effect of Reinforced Corrosion onBond Strength in Geopolymer Concrete” Annual Concrete Conference. 24-26October 2007, Chon Buri, Thailand.

## BIO-DATA:

**Assist. Prof. Prayoon Yong-amnuai, M.Ed**

---

### ประวัติคณะผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ผศ. ประยูร ยงศ์อำนาจ

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Assist. Prof. Prayoon Yong-amnuai

-ภาควิชาโยธาและสถาปัตยกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง จ. ราชบุรี

สถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก ภาควิชาโยธาและสถาปัตยกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

### ผลงานวิชาการ

[1] W. Namboonruang, N. Suphadon and **P. Yong-amnuai** ., “An Application of Aerial Photographs with Geographic Coordinates to a Rural Digital Map”, Journal of Advanced Materials Research, ISSN: 1022-6680, Vols.450-451 (2012), pp.1103-1107 ,Trans Tech Publications, Switzerland, (*Impact factor, 0.107, calc. of the journal, 2 years.*)

[2] W. Namboonruang, R. Rawangkul, W. Yodsudjai, N. Suphadon and **P. Yong-amnuai** ., “Study the properties of Mae-Khong Alluvial Gravel Concrete for Producing the Non-bearing Thin Wall Concrete”, Journal of Advanced Materials Research, ISSN: 1022-6680, Vols.476-478(2012), pp.1652-1656 ,Trans Tech Publications, Switzerland, (*Impact factor, 0.107, calc. of the journal, 2 years.*).

[3] W. Namboonruang, R. Rawangkul, W. Yodsudjai, N. Suphadon and **P. Yong-amnuai**., “Characterization of Low Thermal Lime-Hull Ash Building Adobe” International Journal of Key Engineering Materials, ISSN: 1013-9826, Vol.(2012), Trans Tech Publications, Switzerland, (*Journal Impact factor, 0.144, 2 years.*), (*Accepted*)