

หน่วยนำหลัก กำลังอัด และการดูดซึม น้ำของบดอัดดินแสงเทียม  
ที่ใช้เศษดินแสงเป็นมวลรวมหยาบ

นายวงศ์พัทธ์ พิบูลสุภประดิษฐ์



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2557

# หน่วยนำหลัก กำลังอัด และการดูดซึม น้ำของบดอัดดินแลงเทียม ที่ใช้เศษดินแลงเป็นมวลรวมหยาบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)  
ประธานกรรมการ

---

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

---

(ผศ.ดร.รัฐพล ภูบุบผาพันธ์)  
กรรมการ

---

(อ.ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงษ์)  
กรรมการ

---

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

วงศพัทธ์ พิบูลศุภประดิษฐ์ : หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และการดูดซึมน้ำของบล็อกศิลาแลง  
 เทียมที่ใช้เศษศิลาแลงเป็นมวลรวมหยาบ (UNIT WEIGHT, COMPRESSIVE  
 STRENGTH AND WATER ABSORPTION OF ARTIFICIAL LATERITE BLOCK  
 USING LATERITE SCRAP AS COARSE AGGREGATES)  
 อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ดร.ศุขสันต์ หอพิบูลสุข

ศิลาแลงหรือแลงเป็นวัสดุธรรมชาติที่เกิดขึ้นบริเวณมรสุมเขตร้อน อิฐหินศิลาแลงมีการใช้  
 งานก่อสร้างและตกแต่งกันอย่างแพร่หลายภายในประเทศ เช่น การจัดแต่งสวนและบ้านเรือน การ  
 ใช้เป็นทางเดินและกำแพง และการใช้ซ่อมแซมโบราณสถานต่างๆ เป็นต้น แหล่งผลิตบล็อกศิลา  
 แลงในประเทศไทยอยู่ในจังหวัดปราจีนบุรีและจังหวัดชัยภูมิ บล็อกศิลาแลงที่ได้มีเนื้อทรายเป็นสี  
 ส้มและมีความแข็งแรงสม่ำเสมอ หินศิลาแลงจะขาดแคลนในไม่ช้าเนื่องจากความต้องการทางตลาด  
 ที่มีแนวโน้มสูงขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้จะพัฒนาบล็อกหินศิลาแลง  
 เทียมต้นทุนต่ำที่มีคุณสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับบล็อกศิลาแลงธรรมชาติ โดยใช้เศษศิลาแลงที่เหลือ  
 จากกระบวนการตัดเป็นก้อนบล็อกศิลาแลงธรรมชาติเป็นมวลรวม และใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ  
 เป็นวัสดุเชื่อมประสานหลัก การใช้เศษศิลาแลงและเถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้แทนที่  
 ปูนซีเมนต์ช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนการผลิต อัตราส่วนผสมระหว่าง  
 วัสดุเชื่อมประสานต่อเศษศิลาแลงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 1 ต่อ 8 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่  
 นิยมใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อก ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเท่ากับ 100:0, 90:10,  
 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0  
 ของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำประปาและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 โม  
 ลาร์ ผลการศึกษาพบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาทางเคมีและช่วยเพิ่ม  
 กำลังอัดให้แก่บล็อกศิลาแลงเทียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วนของเหลวต่อปูนซีเมนต์สูง บล็อก  
 ศิลาแลงเทียมมีหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกับบล็อกศิลาแลงธรรมชาติ โดยแทบไม่แปรผันตามปริมาณ  
 การแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ ขณะที่ การดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณการ  
 แทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ส่วนผสมที่เหมาะสมคืออัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบกับ  
 ปูนซีเมนต์เท่ากับ 80:20 และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 ต้นทุนการผลิต  
 บล็อกศิลาแลงเทียมต่อหน่วยที่ใช้ส่วนผสมดังกล่าวต่ำกว่าราคาของศิลาแลงธรรมชาติถึง 3.56 บาท  
 ต่อหน่วย

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

WONGSAPAT PIBOOLSUPAPRADIT : UNIT WEIGHT, COMPRESSIVE  
STRENGTH AND WATER ABSORPTION OF ARTIFICIAL LATERITE  
BLOCK USING LATERITE SCRAP AS COARSE AGGREGATES.

ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

Laterite or Lang is a natural material in the tropical monsoon. The laterite is widely used in construction and decoration in Thailand such as decoration of garden and residence, construction of footpaths and wall and repair of historical sites. Laterite blocks are mainly manufactured at Prachin Buri and Chaiyaphum. The manufactured laterite block has orange sand texture and uniform strength. This laterite block is being scarce due to a large market demand. This research aims to investigate the possibility to develop a low-cost artificial laterite block, which has mechanical properties similar to natural laterite bricks, using scraps left over from cutting natural laterite bricks as aggregates and cement and rice husk ash as a binder. The usage of laterite scraps and rice husk ash, a waste material to replace Portland cement, reduces environmental problems and manufacturing cost. The cement to laterite scrap ratio studied is fixed at 1:8 by weight, which is widely used for manufacturing concrete block. The cement to Rich Husk Ash (RHA) ratios were varied at 100: 0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 and 50:50 by weight and the liquid to binder (cement and RHA) ratios are 1.0, 1.5 and 2.0. The liquid used in the research is water and sodium hydroxide solution at a concentration of 5 molar. The studied results show that the sodium hydroxide solution accelerates the chemical reaction and hence the strength improvement, especially at a high liquid to cement ratio. The unit weight of the artificial laterite blocks is similar to that of natural laterite blocks, regardless of RHA replacement ratio. The water absorption of the artificial laterite blocks significantly increases with increasing RHA replacement ratio. The optimal ingredient in term of mechanical properties and economic perspective is found to be RHA:cement ratio of 80:20 and liquid to binder of 1.0. This ingredient saves on the manufacturing unit cost of an artificial laterite block up to 3.56 baht.

School of Civil Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co-Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการศึกษานี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษา และ อาจารย์ ดร.ชนากร ภูเงินขำ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำในการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ แนะนำแนวทางการทำงานเพิ่มเติมโดยให้ความเอาใจใส่ด้วยความเมตตากรุณาอีกทั้งยังถ่ายทอดความรู้แก่ศิษย์ได้เป็นอย่างดีและยังปลูกฝังให้ผู้ศึกษามีความอดทนมีวินัยหมั่นค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติมผู้ศึกษาจึงขอขอบพระคุณท่าน ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ อาจารย์ ดร.ชนากร ภูเงินขำ ไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ศึกษาซึ่งเป็นความรู้และประสบการณ์อันมีค่าที่เป็นประโยชน์ในการทำงานของผู้ศึกษาเป็นอย่างยิ่งผู้ศึกษาขอระลึกถึงพระคุณบิดาและมารดาที่ได้อบรมสั่งสอนให้รักการศึกษาและหมั่นหาความรู้เพิ่มเติมผู้ศึกษาขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องห้องทดสอบพร้อมทั้งเครื่องมือทดสอบในการทำการศึกษารั้งนี้ท้ายที่สุดขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือในการทำการศึกษาและให้กำลังใจมาโดยตลอดจนสามารถทำการศึกษารั้งนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

วงศพัทธ์ พิบูลสุขประดิษฐ์

## สารบัญ

|                                                            | หน้า |
|------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                       | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                    | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                       | ค    |
| สารบัญ.....                                                | ง    |
| สารบัญตาราง.....                                           | ฉ    |
| สารบัญรูปภาพ.....                                          | ช    |
| บทที่                                                      |      |
| 1 บทนำ.....                                                | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....                         | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....                                      | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                                 | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                         | 3    |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                       | 4    |
| 2.1 บทนำ.....                                              | 4    |
| 2.2 แก้วเกลบ.....                                          | 4    |
| 2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ.....                              | 5    |
| 2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี.....                                | 6    |
| 2.3 หินศิลาแลง.....                                        | 7    |
| 2.3.1 ลักษณะทางกายภาพ.....                                 | 7    |
| 2.3.2 ลักษณะทางเคมี.....                                   | 8    |
| 2.4 คุณสมบัติของคอนกรีต.....                               | 9    |
| 2.4.1 ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต.....                        | 9    |
| 2.4.2 สารเคมีช่วยในการผสม.....                             | 10   |
| 2.5 มาตรฐานการรับน้ำหนักของคอนกรีตบดล็อกไม่รับน้ำหนัก..... | 10   |
| 2.6 จีโอโพลิเมอร์.....                                     | 10   |
| 2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                           | 11   |

|       |                                                   |    |
|-------|---------------------------------------------------|----|
| 3     | วิธีดำเนินการศึกษา.....                           | 15 |
| 3.1   | วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....                        | 15 |
| 3.2   | อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....         | 17 |
| 3.3   | วิธีเตรียมการก่อนการทดสอบ.....                    | 19 |
| 3.4   | สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....                    | 23 |
| 3.5   | วิธีการศึกษาคุณสมบัติของศิลาแลงเทียม.....         | 23 |
| 3.5.1 | กำลังรับแรงอัดและหน่วยน้ำหนัก.....                | 23 |
| 3.5.2 | ขนาดโพรงและการดูดซับน้ำ.....                      | 25 |
| 4     | ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปราย.....            | 27 |
| 4.1   | กำลังอัดของศิลาแลงเทียม.....                      | 27 |
| 4.2   | หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียม.....                  | 31 |
| 4.3   | ขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียม.....       | 33 |
| 4.4   | การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตศิลาแลงเทียม.....        | 38 |
| 5     | สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....                          | 40 |
| 5.1   | สรุปผล.....                                       | 40 |
| 5.2   | ข้อเสนอแนะ.....                                   | 41 |
|       | เอกสารอ้างอิง.....                                | 42 |
|       | ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติของศิลาแลงเทียม..... | 44 |
|       | ประวัติผู้เขียน.....                              | 53 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                                                                                                                              | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ.....                                                                                                                                                                    | 7    |
| 2.2 ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก.58/2533).....                                                                                                                                                  | 10   |
| 3.1 อัตราส่วนผสมของแท่งตัวอย่างศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้น้ำเป็นของเหลวในส่วนผสม.....                                                             | 21   |
| 3.2 อัตราส่วนผสมของแท่งตัวอย่างศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลวในส่วนผสม.....                      | 22   |
| 4.1 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตศิลาแลงเทียมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร.....                                                                                                                                                    | 39   |
| 4.2 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตศิลาแลงเทียมต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง.....                                                                                                                                                    | 39   |
| ก.1 กำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้น้ำเป็นของเหลวในส่วนผสม ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน.....                                           | 45   |
| ก.2 กำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลวในส่วนผสมที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน.....     | 46   |
| ก.3 หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้น้ำเป็นของเหลวในส่วนผสม ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน.....                                       | 47   |
| ก.4 หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลวในส่วนผสมที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน..... | 48   |
| ก.5 ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้น้ำเป็นของเหลวในส่วนผสม ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน.....                                           | 49   |
| ก.6 ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลวในส่วนผสมที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน.....     | 50   |

- ก.7 การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์  
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้น้ำเป็นของเหลวในส่วนผสม  
ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน.....51
- ก.8 การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์  
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
เท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลวในส่วนผสมที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน.....52



## สารบัญรูปภาพ

| รูปที่                                                                           | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 ลักษณะของหินศิลาแลง.....                                                     | 2    |
| 2.1 เถ้าแกลบ.....                                                                | 5    |
| 2.2 รูปเศษศิลาแลงที่เหลือจากการตัดก้อน.....                                      | 7    |
| 3.1 ตัวอย่างเถ้าแกลบก้อนผสม.....                                                 | 15   |
| 3.2 ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง.....                                 | 16   |
| 3.3 ศิลาแลงร้อนผ่านตะแกรง 1.5 นิ้ว ค้างตะแกรง 4 มิลลิเมตร.....                   | 16   |
| 3.4 ศิลาแลงร้อนผ่านตะแกรง 4 มิลลิเมตร ค้างตะแกรงเบอร์ # 30.....                  | 16   |
| 3.5 เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์.....                                                  | 17   |
| 3.6 เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compression Machines).....                             | 17   |
| 3.7 แบบหล่อตัวอย่างศิลาแลงขนาด 0.20x0.40x0.10 ลูกบาศก์เมตร.....                  | 18   |
| 3.8 ชุดทดสอบขนาดผลของมวลรวมละเอียด.....                                          | 18   |
| 3.9 เครื่องมือและอุปกรณ์ผสมคอนกรีต.....                                          | 18   |
| 3.10 เครื่องชั่งที่สามารถชั่งน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่า 10 กิโลกรัม.....              | 19   |
| 3.11 เครื่องมือวัดขนาดแท่งตัวอย่างศิลาแลง.....                                   | 19   |
| 3.12 แท่งศิลาแลงขนาด 0.20x0.40x0.10 ลูกบาศก์เมตร.....                            | 20   |
| 3.13 ก้อนตัวอย่างศิลาแลงขนาด 0.1x0.1x0.1 ลูกบาศก์เมตร.....                       | 20   |
| 3.14 ก้อนตัวอย่างศิลาแลง.....                                                    | 24   |
| 3.15 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างศิลาแลง.....                                          | 24   |
| 3.16 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างศิลาแลงเทียม.....                          | 24   |
| 3.17 การอบตัวอย่างศิลาแลงเทียมที่ $100 \pm 5$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....           | 26   |
| 3.18 การบ่มน้ำตัวอย่างศิลาแลงเทียมเป็นเวลา 48 ชั่วโมง.....                       | 26   |
| 3.19 การชั่งน้ำหนักศิลาแลงเทียมในน้ำ.....                                        | 26   |
| 4.1 กำลังแรงอัดของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0.....  | 29   |
| 4.2 กำลังแรงอัดของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.5.....  | 29   |
| 4.3 กำลังแรงอัดของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.0.....  | 30   |
| 4.4 หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0..... | 32   |
| 4.5 หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.5..... | 32   |

|      |                                                                              |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.6  | หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.0..... | 33 |
| 4.7  | ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0.....     | 34 |
| 4.8  | ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.5.....     | 35 |
| 4.9  | ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.0.....     | 35 |
| 4.10 | การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0..... | 36 |
| 4.11 | การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.5..... | 36 |
| 4.12 | การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.0..... | 37 |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ศิลาแลงหรือแลง (Laterite) เป็นวัสดุธรรมชาติที่เกิดขึ้นบริเวณมรสุมเขตร้อนซึ่งคนในภูมิภาคเอเชียและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์เป็นเวลานานแล้วมนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์รู้จักนำศิลาแลงมาบดผสมกับยางไม้ใช้เป็นสีในการวาดภาพตามถ้ำและหน้าผาหิน นอกจากนี้คนในภูมิภาคนี้ได้นำศิลาแลงมาใช้ในการก่อสร้างวัดและปราสาทหินดังที่พบเห็นในประเทศไทยกัมพูชาและลาว มีอายุย้อนหลังไปตั้งแต่ 700 – 1,000 ปีที่ผ่านมา แต่อย่างไรก็ตามศิลาแลงเพิ่งเป็นที่รู้จักในแวดวงวิทยาศาสตร์ตะวันตกเมื่อประมาณ 200 ปี ที่ผ่านมานี้เองโดยบุชานัน (Buchanan, 1807) ได้สังเกตเห็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นศิลาแลงบริเวณภูเขาของประเทศอินเดียและคาบสมุทรมาลายูแล้วนำไปเผยแพร่ในหมู่นักวิชาการตะวันตก

ศิลาแลงครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ของพื้นผิวโลกและเกิดขึ้นในประเทศแถบเส้นศูนย์สูตรในทวีปเอเชียจะพบศิลาแลงตั้งแต่ประเทศอินเดียมาทางตะวันออกเฉียงใต้จนถึงประเทศฟิลิปปินส์และตอนเหนือของออสเตรเลีย ในทวีปแอฟริกาพบศิลาแลงกระจายอยู่ทั่วประเทศไนจีเรียไปจนถึงแองโกลา ส่วนในทวีปอเมริกาพบมากอยู่ในประเทศเม็กซิโกและบราซิล

เนื่องจากศิลาแลงเกิดอยู่ในพื้นที่จำกัด การศึกษาวิจัยจึงไม่แพร่หลายและเป็นของแปลกใหม่สำหรับประเทศทางแถบขั้วโลกและยุโรป ซึ่งรู้จักศิลาแลงในชื่อ “หินสีแดงอิฐ” (brick - red rock) มีความแข็งคล้ายอิฐ (ภาษาอังกฤษจึงเรียกศิลาแลงว่า “laterite” มาจากรากศัพท์ภาษาละติน later แปลว่า “อิฐ”) ส่วนในแอฟริกาและออสเตรเลียเดิมทีคิดว่าศิลาแลงเป็นหินที่เกิดอยู่ในทะเลทราย (สิน สีนสกุล, 2541)

ปัจจุบันอิฐหินศิลาแลงมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายภายในประเทศ ในด้านการก่อสร้างด้านธุรกิจการจัดแต่งสวน ตกแต่งบ้านเรือน เป็นหินปูทางเดิน ก่อกำแพง และใช้ซ่อมแซมโบราณสถานต่าง ๆ ให้มีลักษณะใกล้เคียงกับของเดิม อิฐบล็อกศิลาแลงที่ขายอยู่ในท้องตลาดปัจจุบันมีแหล่งขุดตัดส่วนใหญ่อยู่ในจังหวัดปราจีนบุรี และจังหวัดชัยภูมิ ซึ่งถือว่าเป็นศิลาแลงที่มีสีเนื้อดินทรายเป็นสีส้มและมีความแข็งแรงแตกต่างกันไม่มากดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ลักษณะของหินศิลาแลง

ปัจจุบันแหล่งขุดตัดหินศิลาแลงมีสถานะขาดแคลนและจะหมดในไม่ช้าเนื่องจากความต้องการทางตลาดที่มีแนวโน้มสูงขึ้น ขนาดจำหน่ายทั่วไปคือ 40x20x8 เซนติเมตร ปัจจุบันต้นทุนการผลิตประมาณ 10 บาทต่อก้อน และราคาจำหน่ายประมาณ 25-30 บาทต่อก้อน อิฐหินศิลาแลงจะมีขนาดรูปร่างไม่แน่นอน เพราะผลิตจากการตัดซอยหิน ทำให้อิฐหินศิลาแลงยากต่อการนำมาใช้งานก่อสร้าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาอิฐหินศิลาแลงเทียมต้นทุนต่ำให้มีคุณสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับอิฐหินศิลาแลงธรรมชาติเพื่อใช้ทดแทนอิฐหินศิลาแลง ซึ่งอิฐหินศิลาแลงเทียมจะพัฒนาขึ้นโดยใช้เศษอิฐที่เหลือจากการกระบวนการตัดเป็นก้อนเศษอิฐหินศิลาแลงธรรมชาติเป็นมวลรวมและใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบเป็นวัสดุเชื่อมประสานหลัก โดยการใช้เถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ในการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และการใช้เศษศิลาแลงเป็นการเพิ่มมูลค่าแก่เศษศิลาแลง และช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและเพิ่มทางเลือกในการใช้วัสดุทดแทนอิฐหินศิลาแลงธรรมชาติ

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าแกลบในการผลิตศิลาแลงเทียม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมในการผลิตศิลาแลงเทียม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาชนิดของเหลวที่ใช้ในการส่วนผสม ได้แก่ น้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเหมาะสมในการผลิตศิลาแลงเทียม
- 1.2.4 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเทียบกับศิลาแลงที่ตัดจากธรรมชาติกับศิลาแลงเทียมที่ผลิตจากปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบเมื่อใช้เศษศิลาแลงที่เหลือจากการตัดก้อนเป็นมวลรวม

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาสัดส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าแกลบเพื่อใช้เป็นวัสดุประสาน เศษศิลาแลงเพื่อใช้เป็นมวลรวม และน้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อใช้เป็นของเหลวในส่วนผสมในการผลิตศิลาแลงเทียม อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อเศษศิลาแลงในงานวิจัยนี้เท่ากับ 1:8 และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 ของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำประปาและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์

ตัวอย่างศิลาแลงเทียมที่ใช้ทดสอบกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 0.10x0.10x0.10 ลูกบาศก์เมตร โดยการห่อด้วยพลาสติกใสจนกระทั่งครบอายุการทดสอบเท่ากับ 7 และ 28 วัน สำหรับการทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 0.10x0.10x0.10 ลูกบาศก์เมตร เช่นเดียวกันกับการทดสอบกำลังอัด กระบวนการทดสอบการดูดซึมน้ำดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 (2006) ผลทดสอบที่ได้รับทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์หาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้เป็นอิฐไม่รับน้ำหนัก (กำลังอัดไม่น้อยกว่า 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตอิฐหินศิลาแลงเทียมกับกับต้นทุนศิลาแลงธรรมชาติ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าแกลบในการผลิตศิลาแลงเทียม
- 1.4.2 ทราบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมในการผลิตศิลาแลงเทียม
- 1.4.3 ทราบชนิดของเหลวที่ใช้ในส่วนผสม ได้แก่ น้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเหมาะสมในการผลิตศิลาแลงเทียม
- 1.4.4 ทราบข้อมูลเบื้องต้นในการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเทียบกับศิลาแลงที่ตัดจากรธรรมชาติกับศิลาแลงเทียมที่ผลิตจากปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบเมื่อใช้เศษศิลาแลงที่เหลือจากการตัดก้อนเป็นมวลรวม
- 1.4.5 ได้แผ่นศิลาแลงเทียมที่ราคาค่ากว่าศิลาแลงธรรมชาติและคุณภาพใกล้เคียงกัน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงคุณสมบัติทางเคมีของแก้วเคลือบ หินฝุ่น ปฏิริยาไฮดรเจนและปฏิริยาปอซโซลาน ระยะก่อตัวคอนกรีตความร้อนจากปฏิริยาไฮดรเจนของปูนซีเมนต์อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมาตรฐานการรับแรงอัดของคอนกรีต รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ซีเมนต์เคลือบ

นอกจากนี้สารปอซโซลานที่มีอยู่มากในประเทศไทยได้แก่ เถ้าเคลือบ เถ้าเคลือบที่ผ่านการเผาที่สมบูรณ์มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณสารที่ไม่ได้เผาไหม้และคาร์บอนต่ำการเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 700 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ซิลิกาที่ไม่เป็นผลึกและว่องไวต่อการทำปฏิริยา เมื่อบดให้ละเอียดและมีขนาดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถนำมาใช้เป็นสารปอซโซลานเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ เนื่องจากเคลือบมีคุณสมบัติในการให้ความร้อนจึงนิยมใช้เป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นการผลิตเถ้าเคลือบจึงสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีอยู่ในตัวการใช้ดินขาวเผาจะต้องใช้พลังงานเพิ่มเติมในการเผาการพัฒนาวัสดุประสานจากเถ้าเคลือบจึงเป็นเรื่องที่ควรศึกษาเป็นอย่างยิ่งเพื่อจำกัดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเป็นการลดการใช้พลังงานและลดการใช้สารที่ได้จากเกษตรกรรม อุตสาหกรรม และจากธรรมชาติให้มากที่สุด

#### 2.2 เถ้าเคลือบ

ส่วนประกอบหลักของเถ้าเคลือบ (รูปที่ 2.1) คือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) สามารถนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี และการเผาที่อุณหภูมิสูง ซิลิกาในเถ้าเคลือบมีทั้งที่เป็นซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) ซิลิกาผลึกสามารถแบ่งย่อยเป็นหลายชนิดตามความแตกต่างของรูปร่าง ลักษณะผลึกและความหนาแน่นของซิลิกา รูปร่างของผลึกมีหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยมลูกบาศก์และเส้นยาว และซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีรูปร่างไม่เป็นผลึก (Non-crystalline Silica)



รูปที่ 2.1 ถ่านแกลบ

## 2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

### 2.2.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของถ่านแกลบขึ้นอยู่กับวิธีการเผา ถ่านแกลบที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีสิ่งที่เผาไหม้ไม่หมดและคาร์บอนปนอยู่มากและจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ความถ่วงจำเพาะถ่านแกลบที่เผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์มีค่าระหว่าง 1.9-2.3 และยังขึ้นกับอุณหภูมิในการเผา ถ่านแกลบเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 5000 มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.06 และความถ่วงจำเพาะจะเพิ่มเป็น 2.20 และ 2.30 ที่อุณหภูมิการเผาเท่ากับ 800 และ 10000 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของความถ่วงจำเพาะเนื่องจากปริมาณคาร์บอนลดลง ความละเอียดของถ่านแกลบการวัดขนาดของอนุภาคของถ่านแกลบนิยมใช้พื้นที่ผิวจำเพาะ ความละเอียดของถ่านแกลบนอกจากขึ้นอยู่กับเวลาและวิธีการบดแล้วยังขึ้นอยู่กับวิธีการเผาถ่าน เช่น เผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส ให้ถ่านแกลบที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้พื้นที่ผิวจะลดลงอย่างมากจากการเป็นผลึกและการทำลายโครงสร้างเซลล์ที่มีรูพรุน ถ่านแกลบเทาขาวที่เผาที่อุณหภูมิพอเหมาะจะละเอียดกว่าถ่านแกลบดำโรงสี ในการบด 1 ชั่วโมงเท่ากัน พบว่าถ่านแกลบเทาขาวมีความละเอียด 14,300 ตารางเซนติเมตร/กรัม ส่วนถ่านแกลบดำมีความละเอียด 9,500 ตารางเซนติเมตร/กรัม การวัดพื้นที่ผิวนิยมใช้วิธีของเบลนหรือวิธี BET ซึ่งให้ค่าต่างกัน ความละเอียดของถ่านแกลบวัดโดยวิธีของเบลน อยู่ระหว่าง 7,000-14,000 ตารางเซนติเมตร/กรัม และระหว่าง 20-150 ตารางเมตร/กรัม เมื่อวัดโดยวิธี BET ดังนั้นการวัดความละเอียดโดยพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านแกลบจึงต้องระบุวิธีการวัดให้ชัดเจน ถ่านแกลบส่วนใหญ่ที่ใช้กันมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 5-20 ไมครอน แต่

ทั้งนี้ขนาดเฉลี่ยใหญ่ประมาณ 25 ไมครอน และขนาดเฉลี่ยเล็กที่ประมาณ 1 ไมครอนก็มีการใช้กันอยู่

#### 2.2.1.2 ความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบ

ความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบสามารถวัดได้โดยการทดสอบค่าดัชนีตามกำลังมาตรฐาน ASTM C311 (2013) โดยการใช้ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ค่าดัชนีกำลังคือค่ากำลังที่ทดสอบได้เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน หากค่าดัชนีกำลังมีค่าสูงแสดงถึงความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีของเถ้าแกลบ

#### 2.2.1.3 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตสด

การที่เถ้าแกลบมีรูพรุนสูงมากจะรูปร่างที่ไม่แน่นอนทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบต้องการน้ำที่ไส้ผสมเพิ่มขึ้น การที่เถ้าแกลบต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลง เพื่อแก้ปัญหานี้เถ้าแกลบมาคให้ละเอียดขึ้นซึ่งจะทำลายรูพรุนของเถ้าแกลบได้และใช้สารลดน้ำเข้าช่วยเพื่อให้คอนกรีตยังมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่าเดิมและมีความสามารถในการเทตามต้องการ เวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะนานกว่าซีเมนต์เพสต์ ระยะเวลาการก่อตัวต้นจะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่ระยะเวลาการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก เถ้าแกลบทำให้การเยื่อน้ำของคอนกรีตลดลงเนื่องจากเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวสูง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เถ้าแกลบผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลานอื่น เช่น เถ้าถ่านหิน ซึ่งทำให้วัสดุประสานมีคุณสมบัติดีขึ้น

#### 2.2.1.4 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ไม่มากจะทำให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นกำลังรับแรงอยู่ในเกณฑ์ดี การผสมเถ้าแกลบทำให้การหดตัวแห้งเพิ่มขึ้น แต่การทนการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีของคอนกรีตดีขึ้น คุณสมบัติด้านอื่นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังรับแรงของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ

### 2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบมี  $\text{SiO}_2$  สูงมาถึงประมาณร้อยละ 90 ทำนองเดียวกัน บุนดัต และ พิชัย บุนดัต และ เชิดพงษ์ และสาโรจน์ และคณะ พบว่าเถ้าแกลบที่เผาในประเทศไทยมี  $\text{SiO}_2$  อยู่ร้อยละ 92.28, 95.36 และ 91.84 ตามลำดับ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition หรือ LOI) ซึ่งตามปกติมี LOI อยู่ประมาณร้อยละ 2-5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเถ้าแกลบมีผลต่อค่า LOI เพราะการเผาไหม้ที่ไม่

สมมุติจะทำให้เถ้าแกลบมี LOI สูงขึ้น LOI ที่อยู่ในเถ้าแกลบส่วนใหญ่จะเป็นธาตุถ่านคุดน้ำสูง และถ้ามีจำนวนมากจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

| ออกไซด์/<br>ร้อยละ | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | SO <sub>3</sub> | Other | LOI |
|--------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|-------|-----|
| ปูนซีเมนต์         | 20.0             | 5.0                            | 3.0                            | 60.0 | 1.1 | 2.4             | 1.5   | 2.0 |
| เถ้าแกลบ           | 90.0             | 0.5                            | 2.0                            | 0.5  | 0.2 | 1.5             | -     | 4.7 |

## 2.3 หินศิลาแลง

หินศิลาแลง (รูปที่ 2.2) ที่สามารถนำมาทำศิลาแลงเทียมได้แก่ เศษศิลาแลงที่เหลือจากการตัดก้อน



รูปที่ 2.2 รูปเศษศิลาแลงที่เหลือจากการตัดก้อน

### 2.3.1 ลักษณะทางกายภาพ

ความแข็ง (Hardness) ศิลาแลงธรรมชาติเมื่ออยู่ใต้ผิวดินจะมีความแข็งน้อย สามารถตัดให้เป็นก้อนเป็นบล็อกได้ โดยใช้เครื่องมือที่ทำด้วยเหล็กแต่เมื่อสัมผัสกับอากาศจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสูญเสียความชื้นในดินเหนียวที่เป็นส่วนประกอบของศิลาแลง นอกจากนั้นการสัมผัสกับอากาศและการเปลี่ยนแปลงของอากาศระหว่างฝนตกกับแดดออกทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี

ส่วนมากเป็นการออกซิไดส์มีการเพิ่มปริมาณของเหล็กออกไซด์แทรกซึมเข้าไปตามช่องว่างของตะกอน ดังนั้นสีลาแสงจึงเป็นวัสดุที่สามารถแข็งตัวในระดับพื้นที่ต่างกันและมีศักยภาพที่จะเป็นของแข็ง

สี (Color) สีลาแสงจะมีโทนสีแดง แดงปนเหลือง แดงอมส้ม น้ำตาลแดง และสีอิฐ เป็นต้น สีของสีลาแสงส่วนมากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กและแมงกานีสตามระยะเวลาที่เกิดการผุกร่อนทางเคมีรวมทั้งปริมาณของธาตุอื่นที่ประกอบอยู่ในสีลาแสง เช่น อะลูมิเนียมปกติจะมีสีขาวแต่จะเปลี่ยนเป็นสีแดงคล้ำเมื่อผสมกับเหล็กซิลิกาจะมีสีแดงแบบสนิมเหล็กเมื่อผสมกับไฮดรอกไซด์ของเหล็กดินคาโอไลน์เมื่อถูกเคลือบด้วยเหล็กก็จะมีสีแดงวัสดุหลายชนิดเหล่านี้เมื่อรวมกันเป็นสีลาแสงจึงทำให้สีลาแสงมีสีแดงหลากหลายและสีของสีลาแสงอาจเปลี่ยนไปตามระยะเวลาที่เกิดขึ้นด้วย

โครงสร้าง (Structure) ของสีลาแสง หมายถึงรูปแบบหรือรูปร่างของส่วนประกอบต่าง ๆ ที่จับตัวกันเป็นสีลาแสงและบ่งถึงกระบวนการกำเนิดของสีลาแสง ณ บริเวณนั้นๆ ด้วยโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวกันจับตัวกันแน่นเป็นแผ่นแข็งเป็นลักษณะของสีลาแสงที่เนื้อหินเดิมถูกแทนที่ด้วยออกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียมและแมงกานีสที่เกิดจากการผุกร่อน จึงเรียกว่าออกไซด์ทุติยภูมิ โครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องกันมีเศษหินหรือกรวดปะปนอยู่ในชั้นสีลาแสง อาจจับตัวกันแน่นเป็นแผ่นหรือจับตัวกันหลวมๆ มีลักษณะร่วน

ความหนาแน่น (Density) ความหนาแน่นของสีลาแสงขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมี กล่าวคือถ้ามีเหล็กมากก็จะมี ความหนาแน่นมากและจะมีความหนาแน่นน้อยเมื่อมีอะลูมิเนียมมาก

### 2.3.2 ลักษณะทางเคมี

เหล็กแร่เหล็กออกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบหลักของสีลาแสง ได้แก่แร่ฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) นอกนั้นอาจมีแร่เหล็กชนิดอื่นบ้าง เช่น อิลเมนไนต์ ( $\text{FeTiO}_3$ ) เกอไทต์หรือไลโมนไนต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) เป็นต้นแร่เหล็กในสีลาแสงส่วนมากเป็นแร่ทุติยภูมิ คือแร่เหล็กที่เปลี่ยนสภาพมาจากแร่ต้นกำเนิด โดยอยู่ในสภาพของสารละลายเหล็กออกไซด์ที่แทรกซึมเข้าไปตามรอยแตกและตามช่องว่างของเม็ดตะกอน

อะลูมิเนียมเป็นธาตุอีกชนิดหนึ่งที่เป็นส่วนประกอบหลักของสีลาแสง โดยจะอยู่ในรูปของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เกิดจากการสลายตัวผุกร่อนของแร่ดินพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต ส่วนมากเป็นแร่บ็อกไซต์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) และอาจมีแร่กิบไซต์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) เกิดร่วมกับอะลูมิเนียมในสีลาแสงเกิดจากการสลายตัวผุกร่อนของอะลูมิเนียมที่มีอยู่ในหินหรือในตะกอนแล้วถูกชะล้างออกไปในรูปสารละลายที่ตกตะกอนสะสมตัวเป็นชั้นอยู่ใต้ผิวดิน

แมงกานีสในสีลาแสงส่วนมากจะมีลักษณะเป็นเม็ดเป็นแท่งสั้น ๆ เป็นสาย หรืออาจเป็นก้อนก็ได้โดยเป็นสารละลายที่ถูกชะล้างลงมาตกตะกอนทับถมกัน เช่นเดียวกับเหล็ก และอลูมิเนียม ในบางพื้นที่แมงกานีสอาจตกผลึกเป็นชั้นหนามีปริมาณสำรองพอเพียงในการทำเหมืองได้

## 2.4 คุณสมบัติของคอนกรีต

### 2.4.1 ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มวัสดุปอชโซลานในวัสดุประสานจะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณของวัสดุปอชโซลานที่เข้ามาแทนที่ เป็นผลมาจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง รวมถึงปริมาณของสารลดน้ำพิเศษ (Super plasticizer) ที่มีมากเกินไปความต้องการจึงส่งผลกระทบต่อดังกล่าว (Books, etal, 2000) เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตค่อนข้างมีความสำคัญในงานคอนกรีต ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตจะบ่งบอกพฤติกรรมของคอนกรีต หลังจากการก่อตัวระยะปลายแล้ว คอนกรีตจึงเริ่มพัฒนาความสามารถในการรับน้ำหนัก เพราะฉะนั้น ระยะเวลาก่อตัวทั้งต้นและปลายจึงมีความสำคัญในเรื่องของเวลาทำงานในคอนกรีตทั่วไป (Pinto, 1999)

### 2.4.2 ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งปล่อยออกมาตลอดเวลาของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยองค์ประกอบทางเคมี ความละเอียด และปริมาณของวัสดุมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงต้นจะมีการคายความร้อนอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วง 7 วันแรก (Neville, 1995)

### 2.4.3 อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

โดยทั่วไปคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างมักคำนึงถึงกำลังอัดของคอนกรีตเป็นหลัก แต่ความเป็นจริงแล้วคอนกรีตต้องมีความสามารถทนต่อสภาพอากาศการกัดกร่อนทางเคมี และสิ่งแวดล้อมในบริเวณนั้นได้ คุณสมบัติส่วนหนึ่งของคอนกรีตประเมินได้จากการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตไม่ใช่วัสดุที่ทึบน้ำ แต่สามารถซึมผ่านได้ในอัตราที่ช้า เมื่อน้ำไม่สามารถซึมผ่านได้หรือซึมผ่านได้ในอัตราที่ช้าลง สารละลายต่างๆก็สร้างความเสียหายให้คอนกรีตได้น้อยลง ในทางตรงข้ามเมื่อคอนกรีตมีอัตราการซึมผ่านของน้ำค่อนข้างสูงแสดงว่าสารละลายต่างๆสามารถแทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ง่าย เช่นสารละลายซัลเฟตซึมเข้าในเนื้อคอนกรีตทำให้เกิดการขยายตัวทำให้เกิดการแตกร้าว ดังนั้นอัตราการซึมผ่านของคอนกรีตบอกได้ถึงอายุใช้งานของคอนกรีตเพราะอัตราการซึมผ่านของน้ำมีหน่วยเป็น เมตร/วินาที

#### 2.4.4 สารเคมีช่วยในการผสม

การเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่าง สารละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเร่งปฏิกิริยาคด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีความรับแรงได้ สามารถใช้วัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์สารปอซโซลานที่นิยมใช้กัน

#### 2.5 มาตรฐานการรับน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58/2533 ให้ความหมายของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (Hallow non-load-bearing concrete masonry unit) ว่าหมายถึง คอนกรีตบล็อกที่ทำจากปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ น้ำ และวัสดุผสมชนิดต่างๆ และจะมีสารอื่นๆ ผสมอยู่ด้วยหรือไม่ก็ได้ ใช้เป็นวัสดุสำหรับก่อผนังหรือกำแพงที่ออกแบบไม่รับน้ำหนักบรรทุกใดๆ นอกจากน้ำหนักตัวเอง โดยกำหนดความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ทั้งค่าเฉลี่ยและค่าแต่ละก้อน ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก.58/2533)

| ความต้านทานแรงอัดต่ำสุด (ksc) (เฉลี่ยจากพื้นที่รวม) |                                |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------|
| เฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อก 5 ก้อน                        | เฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อกแต่ละก้อน |
| 25                                                  | 20                             |

#### 2.6 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุสารผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัญฐานซึ่งพบครั้งแรกโดย ดร. Glukhovsky นักวิทยาศาสตร์จากประเทศโซเวียตใน ค.ศ. 1950 ซึ่งสารผสมอลูมิโนซิลิเกตมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเป็นสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อนินทรีย์ นิยามของจีโอโพลิเมอร์กำหนดขึ้นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์จากประเทศฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1970 จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัญฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลหรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{KOH}$ ) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นี้จะ

แตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ จะทำให้เราได้วัสดุประสานที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ทั้งหมดเลยทีเดียว และในอนาคตข้างหน้าคาดการณ์ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ

จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน การเกิดปฏิกิริยามีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของซิลิเกต (Si) อะลูมินา (Al) และออกซิเจน (O) โดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย เห็นได้ว่าการเกิดปฏิกิริยา Geopolymerization จะมีวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งพบได้มากในวัสดุปอซโซลานที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน อาทิเช่น เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash, RHA) หรือดินขาวเผา (Metakaolin) ดังนั้นวัสดุเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับจีโอโพลิเมอร์ได้

## 2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชุมพล จันทรสม (2528) ได้ทำ การศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบ และเถ้าลอยโดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาก่อตัว การคายน้ำ กำลังรับแรงดึง การต้านทานสารเคมี การขยายตัวและการหดตัวของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบและเถ้าลอยในอัตราส่วนที่ต่างกัน จากการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสม ถ้ามีเถ้าแกลบมากจะทำให้กำลังสูงในช่วงแรกแต่ส่วนผสมต้องการน้ำ มากขึ้น ส่วนผสมที่มีเถ้าลอยมากจะมีกำลังสูงในช่วงปลายและคอนกรีตมีความสามารถทำงานได้มากขึ้นโดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำ ส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอยต้องเพิ่มน้ำ สำหรับความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาก่อตัว การคายน้ำ จะลดลง เพิ่มการต้านทานสิ่งแวดล้อมที่เป็นกรด

สหลาภ หอมวุฒิวงศ์ (2543) ได้ทำ การศึกษา สมบัติด้านการรับกำลังอัด และค่าการซึมของน้ำ ผ่านคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะและกาญจนบุรี , เถ้าปาล์ม น้ำ มันและเถ้าแกลบ- เปลือกไม้โดยบดวัสดุปอซโซลานค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำ หนัก และนา ไปใช้แทนที่ปูน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0-70 โดยน้ำ หนักของวัสดุประสาน ผสมคอนกรีตให้มีค่ายุบตัวอยู่ในช่วง 50–100 มิลลิเมตร โดยการปรับปริมาณน้ำคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานร้อยละ 55 และ 70 ได้ผสมสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1 ของวัสดุ

ประสาน ทดสอบที่อายุ 7, 28, 90, 180 และ 365 วัน จากการศึกษาพบว่า ถ้าผ่านหินแม่เมาะให้ผลทดสอบที่ดี ใช้แทน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในปริมาณสูง คอนกรีตที่ผสมถ้าผ่านหินจากจังหวัดกาญจนบุรีแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 ให้ผลด้านกำลังอัดและการซึมผ่านน้ำเทียบเท่าหรือต่ำกว่าคอนกรีตปกติเล็กน้อย ถ้าปาล์มน้ำ มันบดละเอียดและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดสามารถพัฒนาทั้งกำลังรับแรงอัดและการลดค่าการซึมของน้ำ ผ่านคอนกรีตได้ดี

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2537) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) จาก 0.45 จนถึง 0.65 หล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน แล้วนำไปแช่ในน้ำ และในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1.5 และ 3.0 โดยน้ำหนัก จากนั้นทดสอบหาค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน 60 วัน 120 วัน และได้ตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตด้วยจากการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีกำลังลดลงไม่มากนัก ส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าทั้งความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและค่า W/C ถ้ายิ่งค่าสูงจะมีผลทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงด้วย

อาภา สรณเสาวภาคย์ (2544) ได้ทำ การศึกษา ความต้านทานการกัดกร่อนของสารซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าลอยจากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะหรือเถ้าแกลบบดละเอียดจากการเผาเถ้าในที่โล่ง ในอัตราส่วน 80 : 20 และ 60 : 40 นำ ตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 จากการศึกษพบว่า ยิ่ง ใช้เถ้าลอยมากก็จะลดการขยายตัวของคอนกรีตได้มาก มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบมีการขยายตัวลดลงมาก โดยเฉพาะส่วนผสมที่มีเถ้าแกลบร้อยละ 40 เกิดการหดตัวเล็กน้อยแทนที่จะขยายตัวและมีน้ำ หนักเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

สมศักดิ์ พิณชมพู (2544) ได้ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของสารซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบ โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอย หรือเถ้าแกลบเท่ากับ 80 : 20 และ 60 : 40 แล้วแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปรับสภาพ ให้มีความเป็นกรดที่ระดับ pH 3 และ pH 7 และนำ ตัวอย่างมอร์ต้าร์มา หาค่า กำลังรับแรงอัด การเปลี่ยนแปลงความยาวและน้ำ หนักของมอร์ต้าร์ จากการศึกษพบว่า มอร์ต้าร์ที่ทำ จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบมีการขยายตัวน้อยที่สุด ส่วนผสมที่ใช้ เถ้าแกลบร้อยละ 20 ที่สภาวะ pH 3 มีการสูญเสีย น้ำ หนักบางส่วนจากการกัดกร่อนที่บริเวณผิวของแท่งมอร์ต้าร์

ณัฐพงศ์ มกระชัย และคณะ (2550) ได้ ศึกษาการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เป็นวัสดุพอลิโกลานในการต้านทานการขยายตัวเนื่องจากเมกนีเซียมซัลเฟต และการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริก โดยใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มาบดละเอียดและใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แล้วนำ ตัวอย่างคอนกรีตแช่สารละลายเมกนีเซียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และสารละลายกรดซัลฟูริกที่ ความเข้มข้นร้อยละ 0.02 จากการศึกษา พบว่าการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นส่วนผสมในมอร์ตาร์ไม่เกินร้อยละ 30 สามารถลดการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตได้แต่กำลังอัด ที่ได้ต่ำ และพบว่าการขยายตัวที่อายุ 360 วัน มีค่าต่ำ กว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน คอนกรีตมีแนวโน้มการขยายตัวลดลงเมื่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มีความละเอียดมากขึ้น

นันทชัย ชูศิลป์ และคณะ (2552) ได้ศึกษาผลกระทบของค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของเถ้าขานอ้อยต่อกำลังอัดและการต้านทานต่อซัลเฟตในมอร์ตาร์ โดยใช้เถ้าขานอ้อยที่มีค่า LOI 5, 10, 15 และ 20% แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขานอ้อยในปริมาณ 10-20% (ค่า LOI 5-20%) เกิดการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อยเมื่อแช่ในสารละลายเมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% ที่อายุ 360 วัน และพบว่าค่า LOI ที่ไม่เกิน 10% ของเถ้าขานอ้อยเหมาะแก่การทำ เป็นวัสดุพอลิโกลาน

Chatveera, B. and Lertwattanaruk, P. (2008) ได้ศึกษาผลกระทบของซัลเฟตที่มีต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ โดยนำเถ้าแกลบมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานที่ 0.55 และ 0.65 แล้วนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมและเมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 5% พบว่าการใช้อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุที่ประสานน้อยลงมีผลดีต่อการต้านทานสารซัลเฟต และ การใช้เถ้าแกลบมา สามารถต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานซัลเฟตลดลงมากเมื่อแช่เมกนีเซียมซัลเฟต อัตราส่วนน้ำ ต่อประสานน้อยลงมีผลดีต่อการต้านทานซัลเฟต และ การใช้เถ้าแกลบ สามารถต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานซัลเฟตจะลดลงมากเมื่อแช่ในสารละลายเมกนีเซียมซัลเฟต

ณัฏกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญ์ จินดาประเสริฐ (2548) ได้ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และผลของความละเอียดของเถ้าลอยแม่เมาะต่อกำลังอัดของซีโอโพล์เมอร์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( ความบริสุทธิ์ 98 % ละลายในน้ำกลั่น ) ผสมที่ความเข้มข้น 10, 15 และ 20 โมลาร์ตามลำดับสารละลายโซเดียมซิลิเกตซึ่งมีองค์ประกอบของ  $\text{Na}_2\text{O}$  15.32%, 32.87% และ น้ำ 51.81% โดยมวลใช้ทรายแม่น้ำในสภาวะอิ่มตัว

ผิวแห้งที่โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.8 ใช้แท่งทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มม. อัตราส่วนของทราย : กล้วย เท่ากับ 2.75 ความสามารถในการไหล (Flow) ที่  $110 \pm 5\%$  จากการทดสอบพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ ความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น โดยจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อความละเอียดของกล้วยมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษารุ่นนี้เพื่อศึกษาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าแกลบ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานชนิดของเหลวที่ใช้ในการส่วนผสม ได้แก่ น้ำและสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเหมาะสมในการผลิตศิลาแลงเทียม อีกทั้งเพื่อศึกษาเปรียบเทียบ ต้นทุนการผลิตเทียบกับศิลาแลงที่ตัดจากธรรมชาติกับศิลาแลงเทียมที่ผลิตจากปูนซีเมนต์และ เถ้าแกลบเมื่อใช้เศษศิลาแลงที่เหลือจากการตัดก้อนเป็นมวลรวม

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เถ้าแกลบได้จากจังหวัดปราจีนบุรี ดังแสดงในรูปที่ 3.1
- 3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2
- 3.1.3 หินศิลาแลงที่สามารถนำมาทำศิลาแลงเทียมได้แก่ เศษศิลาแลงที่เหลือจากการตัด ก้อน โดยทำการแยกขนาดของศิลาแลงเป็น 2 ขนาดคือ ร่อนผ่านตะแกรง 1.5 นิ้ว และค้ำตะแกรงขนาด 4 มิลลิเมตรนำมาใช้ 70 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ ขนาดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4 มิลลิเมตร และค้ำตะแกรงเบอร์ #30 และนำมาใช้ 30 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4
- 3.1.4 น้ำประปา
- 3.1.5 เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายเกล็ด โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 5 โมลาร์



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเถ้าแกลบก่อนผสม



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง



รูปที่ 3.3 สีลาแสงร่อนผ่านตะแกรง 1.5 นิ้ว ค้างตะแกรง 4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 สีลาแสงร่อนผ่านตะแกรง 4 มิลลิเมตร ค้างตะแกรงเบอร์ # 30



รูปที่ 3.5 เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องทดสอบกำลังอัดของแท่งศิลาแลง (Compression Machines) ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compression Machines)

3.2.2 แบบหล่อตัวอย่างศิลาแลงทรงลูกบาศก์ขนาด 0.20x0.40x0.10 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบหล่อตัวอย่างศิลาแลงขนาด 0.20x0.40x0.10 ลูกบาศก์เมตร

3.2.3 ชุดทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียดและหยาบด้วยตะแกรงร่อน ดังแสดงในรูป 3.8



รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด

3.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ผสมศิลาแลง ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องมือและอุปกรณ์ผสมคอนกรีต

3.2.5 เครื่องชั่งที่สามารถชั่งน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่า 10 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องชั่งที่สามารถชั่งน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่า 10 กิโลกรัม

3.2.6 เครื่องมือวัดขนาดแท่งตัวอย่างศิลาแลง (Venire) ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องมือวัดขนาดแท่งตัวอย่างศิลาแลง (Venire)

### 3.3 วิธีการเตรียมก่อนการทดสอบ

3.3.1 เตรียมวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทดลองในอัตราส่วนผสมต่างๆ โดยน้ำหนักและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องใช้ในการทดลองทำการคัดแยกหินศิลาแลงร้อนผ่านตะแกรง 1.5 นิ้ว ค้างตะแกรง 4 มิลลิเมตร ใช้ 70 เปอร์เซ็นต์ และขนาดร้อนผ่านตะแกรง 4 มิลลิเมตร ค้างตะแกรงเบอร์ 30 ใช้ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยนำส่วนที่มีขนาดโตเกิน 1 นิ้ว และผงฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ทิ้งไปไม่นำมาเป็นส่วนผสมในการทดลอง

3.3.2 ทำการหล่อแท่งศิลาแลงตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมต่างๆ กัน โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งกับเถ้าแกลบเท่ากับ 100:00, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 ตามลำดับ อัตราส่วนน้ำ หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (5โมลาร์) ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อหินศิลาแลงเท่ากับ 1:8 ทุกอัตราส่วนผสม และทำการหล่อตัวอย่างทดสอบเป็นแท่งศิลาแลงทรงลูกบาศก์ขนาด 0.20x0.40x0.10 ลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 3.12) แล้วทำการแกะแบบหล่อและทำการตัดตัวอย่างให้ได้ขนาด 0.1x0.1x0.1 ลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 3.13) รวมจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 288 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็นสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน จำนวน 108 ตัวอย่าง และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน จำนวน 108 ตัวอย่าง สำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 7 วัน จำนวน 36ตัวอย่าง และทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน จำนวน 36 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.12 แท่งศิลาแลงขนาด 0.20x0.40x0.10 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 3.13 ก่อนตัวอย่างศิลาแลงขนาด 0.1x0.1x0.1 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของแท่งตัวอย่างศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้ากลบ  
ในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้น้ำเป็นของเหลวใน  
ส่วนผสม

| ตัวอย่าง<br>ชุดที่ | อัตราส่วน<br>ซีเมนต์:<br>กลบ | น้ำ/<br>ซีเมนต์ | หินศิลา<br>แลง<br>(กก.) | ปูนซีเมนต์<br>(กก.) | เถ้ากลบ<br>(กก.) | น้ำ<br>(กก.) | จำนวน<br>ตัวอย่าง |
|--------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------|---------------------|------------------|--------------|-------------------|
| 1                  | 100 : 0                      | 1.0             | 16.0                    | 2.0                 | 0                | 1.0          | 8                 |
| 2                  | 90 : 10                      | 1.0             | 16.0                    | 1.8                 | 0.2              | 1.0          | 8                 |
| 3                  | 80 : 20                      | 1.0             | 16.0                    | 1.6                 | 0.4              | 1.0          | 8                 |
| 4                  | 70 : 30                      | 1.0             | 16.0                    | 1.4                 | 0.6              | 1.0          | 8                 |
| 5                  | 60 : 40                      | 1.0             | 16.0                    | 1.2                 | 0.8              | 1.0          | 8                 |
| 6                  | 50 : 50                      | 1.0             | 16.0                    | 1.0                 | 1.0              | 1.0          | 8                 |
| 7                  | 100 : 0                      | 1.5             | 16.0                    | 2.0                 | 0                | 1.5          | 8                 |
| 8                  | 90 : 10                      | 1.5             | 16.0                    | 1.8                 | 0.2              | 1.5          | 8                 |
| 9                  | 80 : 20                      | 1.5             | 16.0                    | 1.6                 | 0.4              | 1.5          | 8                 |
| 10                 | 70 : 30                      | 1.5             | 16.0                    | 1.4                 | 0.6              | 1.5          | 8                 |
| 11                 | 60 : 40                      | 1.5             | 16.0                    | 1.2                 | 0.8              | 1.5          | 8                 |
| 12                 | 50 : 50                      | 1.5             | 16.0                    | 1.0                 | 1.0              | 1.5          | 8                 |
| 13                 | 100 : 0                      | 2.0             | 16.0                    | 2.0                 | 0                | 2.0          | 8                 |
| 14                 | 90 : 10                      | 2.0             | 16.0                    | 1.8                 | 0.2              | 2.0          | 8                 |
| 15                 | 80 : 20                      | 2.0             | 16.0                    | 1.6                 | 0.4              | 2.0          | 8                 |
| 16                 | 70 : 30                      | 2.0             | 16.0                    | 1.4                 | 0.6              | 2.0          | 8                 |
| 17                 | 60 : 40                      | 2.0             | 16.0                    | 1.2                 | 0.8              | 2.0          | 8                 |
| 18                 | 50 : 50                      | 2.0             | 16.0                    | 1.0                 | 1.0              | 2.0          | 8                 |

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของแท่งตัวอย่างศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้ากลบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลวในส่วนผสม

| ตัวอย่าง<br>ชุดที่ | อัตราส่วน<br>ซีเมนต์:<br>กลบ | น้ำ/<br>ซีเมนต์ | หินศิลา<br>แลง<br>(กก.) | ปูนซีเมนต์<br>(กก.) | เถ้ากลบ<br>(กก.) | NaOH<br>(กก.) | จำนวน<br>ตัวอย่าง |
|--------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------|---------------------|------------------|---------------|-------------------|
| 1                  | 100 : 0                      | 1.0             | 16.0                    | 2.0                 | 0                | 1.0           | 8                 |
| 2                  | 90 : 10                      | 1.0             | 16.0                    | 1.8                 | 0.2              | 1.0           | 8                 |
| 3                  | 80 : 20                      | 1.0             | 16.0                    | 1.6                 | 0.4              | 1.0           | 8                 |
| 4                  | 70 : 30                      | 1.0             | 16.0                    | 1.4                 | 0.6              | 1.0           | 8                 |
| 5                  | 60 : 40                      | 1.0             | 16.0                    | 1.2                 | 0.8              | 1.0           | 8                 |
| 6                  | 50 : 50                      | 1.0             | 16.0                    | 1.0                 | 1.0              | 1.0           | 8                 |
| 7                  | 100 : 0                      | 1.5             | 16.0                    | 2.0                 | 0                | 1.5           | 8                 |
| 8                  | 90 : 10                      | 1.5             | 16.0                    | 1.8                 | 0.2              | 1.5           | 8                 |
| 9                  | 80 : 20                      | 1.5             | 16.0                    | 1.6                 | 0.4              | 1.5           | 8                 |
| 10                 | 70 : 30                      | 1.5             | 16.0                    | 1.4                 | 0.6              | 1.5           | 8                 |
| 11                 | 60 : 40                      | 1.5             | 16.0                    | 1.2                 | 0.8              | 1.5           | 8                 |
| 12                 | 50 : 50                      | 1.5             | 16.0                    | 1.0                 | 1.0              | 1.5           | 8                 |
| 13                 | 100 : 0                      | 2.0             | 16.0                    | 2.0                 | 0                | 2.0           | 8                 |
| 14                 | 90 : 10                      | 2.0             | 16.0                    | 1.8                 | 0.2              | 2.0           | 8                 |
| 15                 | 80 : 20                      | 2.0             | 16.0                    | 1.6                 | 0.4              | 2.0           | 8                 |
| 16                 | 70 : 30                      | 2.0             | 16.0                    | 1.4                 | 0.6              | 2.0           | 8                 |
| 17                 | 60 : 40                      | 2.0             | 16.0                    | 1.2                 | 0.8              | 2.0           | 8                 |
| 18                 | 50 : 50                      | 2.0             | 16.0                    | 1.0                 | 1.0              | 2.0           | 8                 |

### 3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

งานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ของส่วนผสม ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$\text{XXLBYYRHA-ZZ}$$

(3.1)

|       |     |         |                                                                              |
|-------|-----|---------|------------------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | XX  | หมายถึง | อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่ใช้ในการทดสอบ                               |
|       | LB  | หมายถึง | อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน                                               |
|       | YY  | หมายถึง | ร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้ากลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์<br>โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน |
|       | RHA | หมายถึง | เถ้ากลบ                                                                      |
|       | ZZ  | หมายถึง | ของเหลวที่ใช้ในส่วนผสม ได้แก่ น้ำหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์               |

ตัวอย่างในการอ่านสัญลักษณ์ เช่น 1.0LB10RHA-NaOH หมายถึงศิลาแลงเทียมที่มีการผลิตจากการแทนที่เถ้ากลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลวในส่วนผสม

### 3.5 วิธีการศึกษาคุณสมบัติของศิลาแลงเทียม

#### 3.5.1 กำลังรับแรงอัดและหน่วยน้ำหนัก

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียม เริ่มต้นด้วยการนำส่วนผสมที่ออกแบบไว้มาเทในแบบหล่อขนาด 0.20x0.40x0.10 ลูกบาศก์เมตร และบดอัดด้วยก้อนบดอัดจำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง จนครบ 48 ชั่วโมง แล้วทำการแกะแบบหล่อ แล้วทำการตัดตัวอย่างให้ได้ขนาด 0.10x0.10x0.10 ลูกบาศก์เมตร แทั้งตัวอย่างศิลาแลงถูกบ่มในอากาศจนครบอายุ 7 และ 28 วัน (รูปที่ 3.14) แล้วนำไปวัดขนาดและชั่งน้ำหนักเพื่อกำหนดหาหน่วยน้ำหนักของแท่งตัวอย่างศิลาแลง (รูปที่ 3.15) หลังจากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดของศิลาแลงด้วยเครื่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.14 ก้อนตัวอย่างศิลาแลง



รูปที่ 3.15 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างศิลาแลง



รูปที่ 3.16 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างศิลาแลงเทียม

### 3.5.2 ขนาดโพรงและการดูดซับน้ำ

การทดสอบขนาดโพรงและการดูดซับน้ำดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 (2006) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบขนาดโพรงและการดูดซับน้ำเริ่มต้นด้วยการนำส่วนผสมที่ออกแบบไว้มาเทในแบบหล่อขนาด 0.20x0.40x0.10 ลูกบาศก์เมตรและบดอัดด้วยก้อนบดอัดจำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง จนครบ 48 ชั่วโมง เช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัด แล้วทำการแกะแบบหล่อแล้วทำการตัดตัวอย่างให้ได้ขนาด 0.10x0.10x0.10 ลูกบาศก์เมตร แบ่งตัวอย่างศิลาแลงถูกบ่มในอากาศจนครบอายุ 7 และ 28 วัน (รูปที่ 3.14) โดยใช้แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 0.10x0.10x0.10 ลูกบาศก์เมตร สำหรับขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นด้วยบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องทดลองจนครบอายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน ซึ่งหลังจากครบอายุการบ่มทำการวัดและชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบแล้วนำแท่งศิลาแลงเทียมนอกจากเตาอบนำไปแช่น้ำอีก 48 ชั่วโมง (รูปที่ 3.18) ต่อจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 3.19) เพื่อหาค่าการดูดซึมน้ำ การคำนวณหาขนาดโพรงและการดูดซับน้ำของศิลาแลงเทียมสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ 3.2 และ 3.3

$$Porosity(\%) = \left( \frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{sat} - W_{air}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

$$Absorption(\%) = \left( \frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{sat}} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

|       |            |                                                                                       |
|-------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | Porosity   | หมายถึง ขนาดโพรง (เปอร์เซ็นต์)                                                        |
|       | Absorption | หมายถึง การดูดซับน้ำ (เปอร์เซ็นต์)                                                    |
|       | $W_{sat}$  | หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างหลังการแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (กรัม)                        |
|       | $W_{dry}$  | หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างหลังอบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (กรัม) |
|       | $W_{air}$  | หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างในขณะที่ชั่งในน้ำ (กรัม)                                       |



รูปที่ 3.17 การอบตัวอย่างศิลาแสงเทียมที่  $100 \pm 5$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.18 การบ่มน้ำตัวอย่างศิลาแสงเทียมเป็นเวลา 48 ชั่วโมง



รูปที่ 3.19 การชั่งน้ำหนักศิลาแสงเทียมในน้ำ

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปราย

บทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างศิลาแลงเทียมในห้องปฏิบัติการ และวิเคราะห์สัดส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และอัตราส่วนของเหลวต่อปูนซีเมนต์ที่มีความเหมาะสมในการผลิตศิลาแลงเทียม ของเหลวในงานวิจัยนี้ได้แก่ น้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ท้ายสุดงานวิจัยนี้นำเสนอผลเปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิตศิลาแลงเทียมกับหินศิลาแลงธรรมชาติ

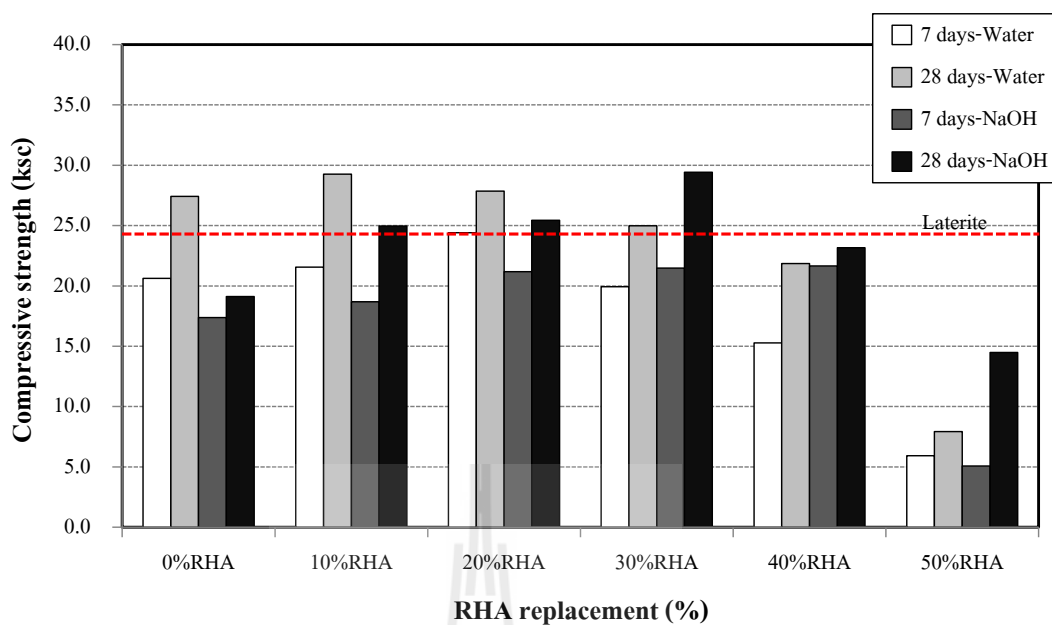
#### 4.1 กำลังอัดของศิลาแลงเทียม

รูปที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงผลการทดสอบกำลังของศิลาแลงเทียมที่มีการแปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดของเหลว และอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอายุบ่มส่งผลต่อกำลังอัดของศิลาแลงเทียมอย่างเห็นได้ชัด ในกรณีของอายุบ่ม 7 วัน กำลังอัดของตัวอย่างศิลาแลงเทียม 1.0LB0RHA-Water, 1.0LB10RHA-Water, 1.0LB20RHA-Water, 1.0LB30RHA-Water, 1.0LB40RHA-Water และ 1.0LB50RHA-Water มีค่าเท่ากับ 20.6, 21.6, 24.4, 19.9 และ 15.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขณะที่ กำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่อายุการบ่ม 7 วัน ของ 1.0LB0RHA-NaOH, 1.0LB10RHA-NaOH, 1.0LB20RHA-NaOH, 1.0LB30RHA-NaOH, 1.0LB40RHA-NaOH และ 1.0LB50RHA-NaOH มีค่าเท่ากับ 17.4, 18.7, 21.2, 21.5, 21.7 และ 5.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่ากำลังอัดของศิลาแลงที่อายุการบ่ม 7 วัน มีแนวโน้มพัฒนาตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น จนถึงปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบที่มีความเหมาะสมทั้งในส่วนผสมที่ใช้น้ำหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 5 โมลาร์ หลังจากนั้น กำลังอัดของศิลาแลงเทียมมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 20 สำหรับการใช้น้ำเป็นของเหลว และเท่ากับร้อยละ 40 สำหรับการใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นของเหลว สำหรับทุกอัตราส่วนของเหลวต่อสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์ + เถ้าแกลบ)

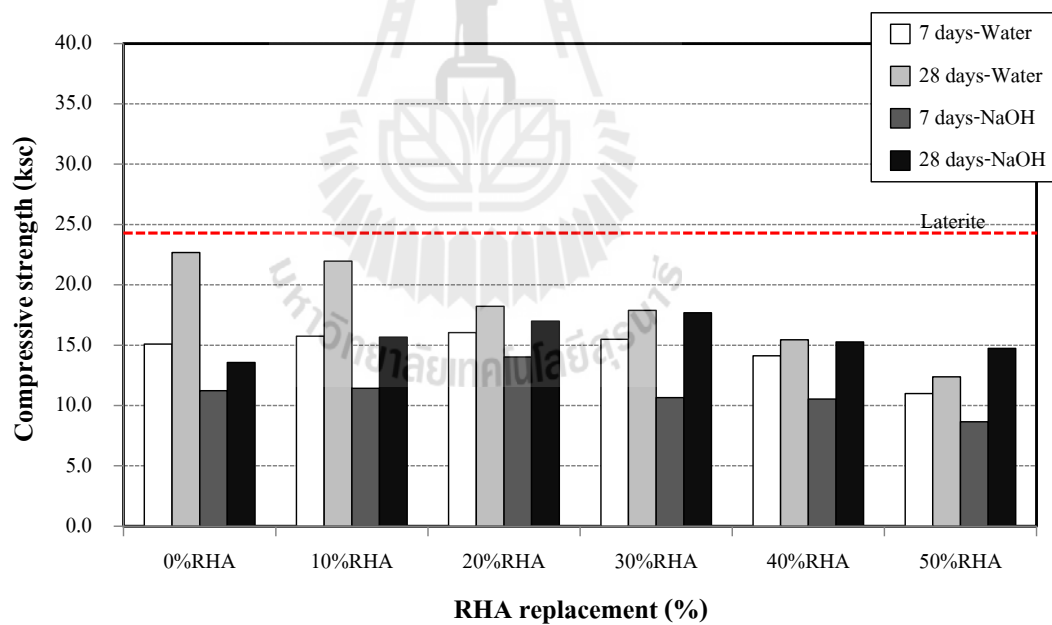
ศิลาแลงเทียมที่ใช้น้ำเป็นของเหลวที่อายุบ่ม 28 วัน มีกำลังอัดสูงกว่าศิลาแลงที่ใช้น้ำเป็นของเหลวที่อายุบ่ม 7 วัน อย่างไรก็ตามปัจจัยของปริมาณเถ้าแกลบต่อการพัฒนา กำลังอัดของตัวอย่างศิลาแลงที่ใช้น้ำเป็นของเหลวที่อายุบ่ม 28 วัน มีความแตกต่างกันจากที่อายุบ่ม 7 วัน กำลังอัดของตัวอย่างศิลาแลงเทียม 1.0LB0RHA-Water, 1.0LB10RHA-Water, 1.0LB20RHA-Water,

1.0LB30RHA-Water, 1.0LB40RHA-Water และ 1.0LB50RHA-Water มีค่าเท่ากับ 27.4, 29.3, 27.9, 25.0, 21.9 และ 7.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะเห็นได้ว่าปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน สูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 และมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าแกลบ ขณะที่กำลังอัดสูงสุดที่อายุบ่ม 7 วัน เกิดที่ปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 การที่ปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์เปลี่ยนแปลงจากร้อยละ 20 (7 วัน) เป็นร้อยละ 10 (28 วัน) อาจเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีความสมบูรณ์มากขึ้น เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีบทบาทมากกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน

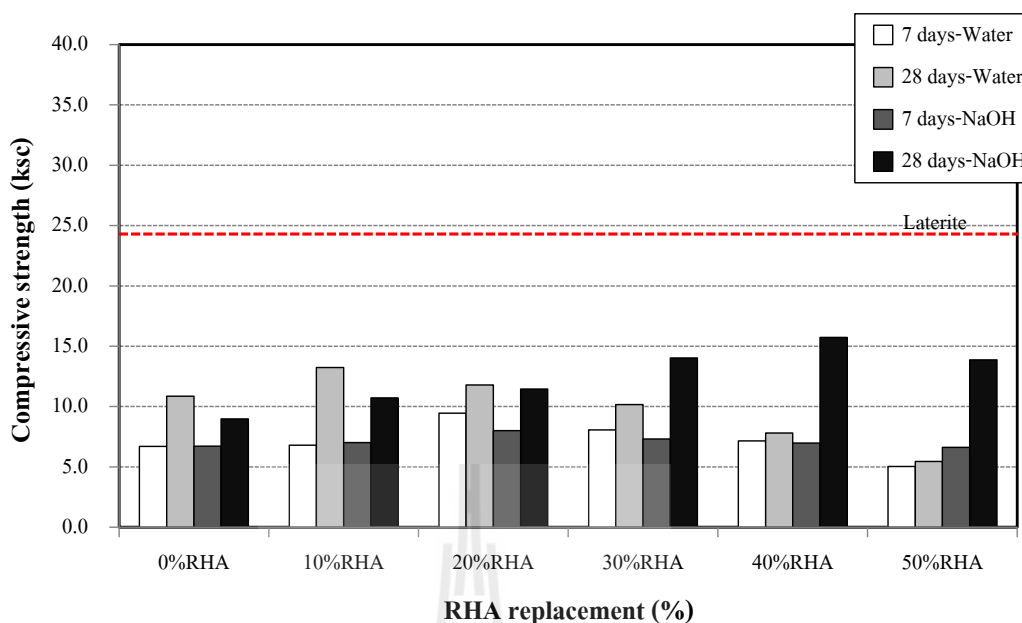
ส่วนการพัฒนากำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นของเหลวที่อายุการบ่ม 28 วัน มีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับการพัฒนากำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นของเหลวที่อายุการบ่ม 7 วัน กล่าวคือปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 30 ยกตัวอย่างเช่น กำลังอัดที่ 28 วัน ของ 1.0LB0RHA-NaOH, 1.0LB10RHA-NaOH, 1.0LB20RHA-NaOH, 1.0LB30RHA-NaOH, 1.0LB40RHA-NaOH และ 1.0LB50RHA-NaOH มีค่าเท่ากับ 19.1, 25.0, 25.4, 29.4, 23.2 และ 14.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่ใช้เถ้าแกลบในปริมาณสูง (ปูนซีเมนต์ในปริมาณต่ำ) ซึ่งเป็นสภาวะที่ปริมาณซิลิกาและอะลูมินาในเถ้าแกลบมีมากเกินไปความต้องการของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เพื่อเกิดเป็นผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน (Cementitious products, CSH และ CAH) ในสภาวะดังกล่าวสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถละลายซิลิกาและอะลูมินาออกมาจากเถ้าแกลบเพื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นสารประกอบโซเดียมออลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตร่วมกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมออลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้น ผลทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าเราสามารถเถ้าแกลบได้ถึงร้อยละ 30 ในการผลิตศิลาแลงเทียมซึ่งมีการพัฒนากำลังอัดที่ 28 วัน ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำเป็นของเหลว ซึ่งสามารถใช้เถ้าแกลบได้เพียงร้อยละ 10



รูปที่ 4.1 กำลังแรงอัดของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0



รูปที่ 4.2 กำลังแรงอัดของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.5



รูปที่ 4.3 กำลังแรงอัดของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.0

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่มีการแปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น กำลังอัดของศิลาแลงเทียมมีแนวโน้มลดลง เช่น กำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่อายุการบ่ม 28 วัน ของ 1.0LB30RHA-Water, 1.5LB30RHA-Water และ 2.0LB30RHA-Water มีค่าเท่ากับ 25.0, 17.9 และ 10.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ กำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่อายุการบ่ม 28 วัน ของ 1.0LB30RHA-NaOH, 1.5LB30RHA-NaOH และ 2.0LB30RHA-NaOH มีค่าเท่ากับ 29.4, 17.7 และ 14.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การลดลงของกำลังอัดของศิลาแลงเทียมตามอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของของเหลวเพิ่มปริมาณโพรงทั้งหมดรวมทั้งเพิ่มปริมาณโพรงขนาดใหญ่ (Sathonsaowaphak, 2009) ซึ่งเป็นพฤติกรรมเดียวกันกับการลดลงของกำลังอัดคอนกรีตตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

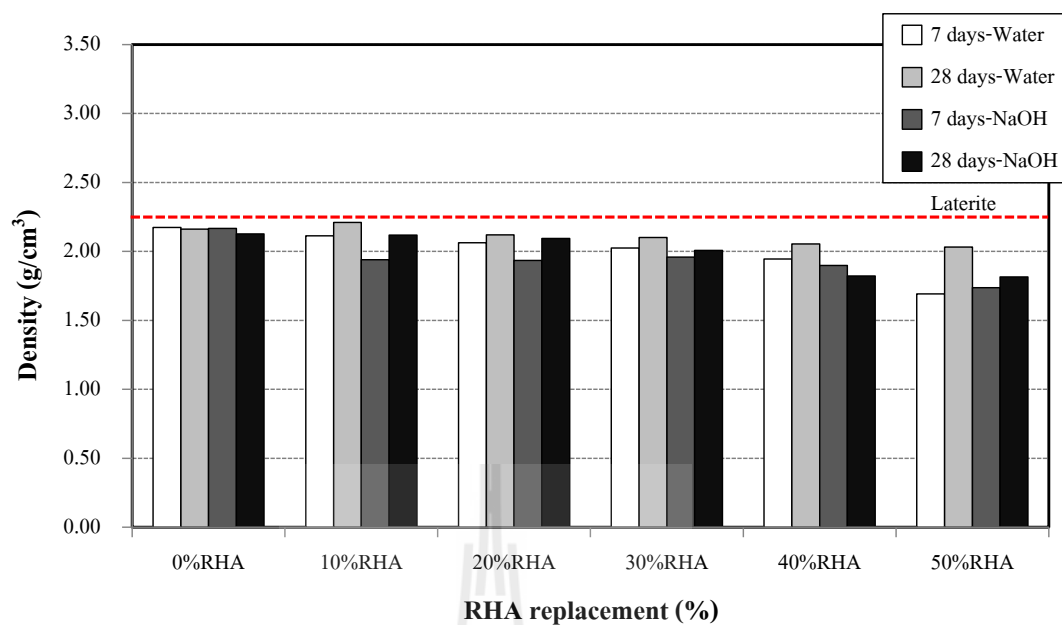
ที่ค่าอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานสูง (ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณต่ำ) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีอิทธิพลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ดังจะเห็นได้จากความแตกต่างของกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ของตัวอย่างหินศิลาแลงเทียมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำเป็นของเหลว โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณการแทนที่เถ้าเกลบในปูนซีเมนต์เกินกว่าร้อยละ 30 ที่สภาวะดังกล่าววัสดุเชื่อมประสานที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์มีปริมาณต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชื่อมประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าเกลบ

เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของศิลาแลงที่มีการขายตามท้องตลาดทั่วไป (กำลังอัดมีค่าประมาณ 23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) หินศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.0 และปริมาณการแทนที่เถ้ากลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่เกินร้อยละ 30 มีกำลังอัดสูงกว่า 23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับทั้งการใช้น้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นของเหลว นอกจากเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุดแล้ว การใช้เถ้ากลบและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตศิลาแลงเทียม ช่วยลดต้นทุนในการผลิต และลดปัญหาโลกร้อนจากการผลิตปูนซีเมนต์

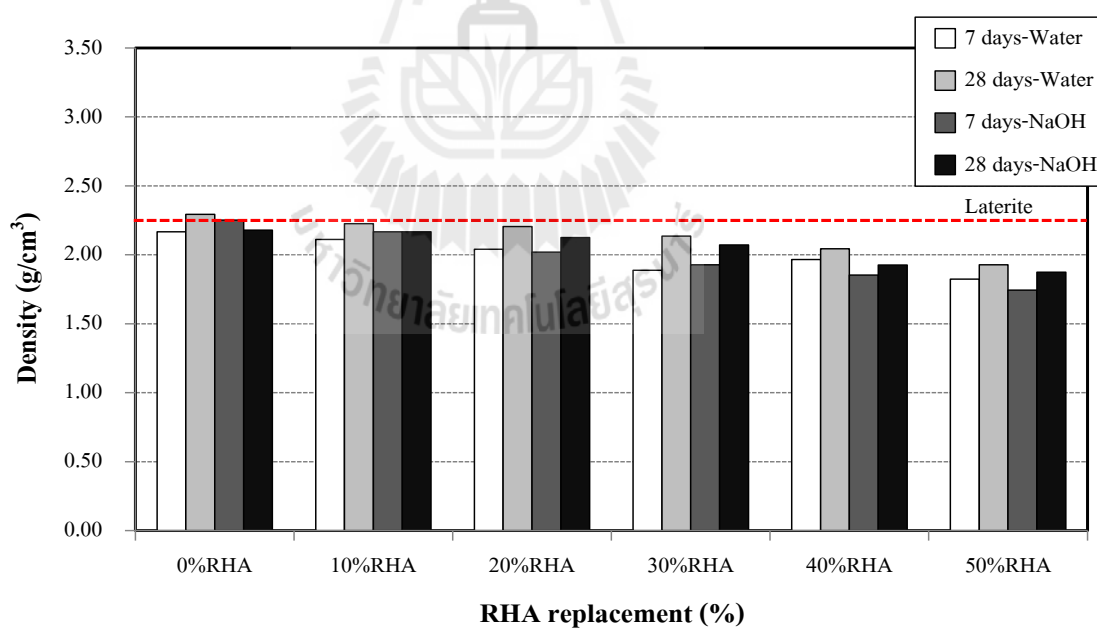
#### 4.2 หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียม

รูปที่ 4.4 ถึง 4.6 แสดงผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่มีการแปรผันปริมาณการแทนที่เถ้ากลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดของเหลว และอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน จะเห็นได้ว่าการแทนที่เถ้ากลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมนี้อาจลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเถ้ากลบมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเศษหินศิลาแลง หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่อายุบ่ม 7 วัน ของตัวอย่าง 1.0LB0RHA-Water, 1.0LB10RHA-Water, 1.0LB20RHA-Water, 1.0LB30RHA-Water, 1.0LB40RHA-Water และ 1.0LB50RHA-Water มีค่าเท่ากับ 2.17, 2.11, 2.06, 2.03, 1.94 และ 1.69 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ขณะที่ หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่อายุบ่ม 7 วัน ของตัวอย่าง 1.0LB0RHA-NaOH, 1.0LB10RHA-NaOH, 1.0LB20RHA-NaOH, 1.0LB30RHA-NaOH, 1.0LB40RHA-NaOH และ 1.0LB50RHA-NaOH มีค่าเท่ากับ 2.17, 1.94, 1.93, 1.96, 1.90 และ 1.74 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างที่ใช้น้ำหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นของเหลวมีหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกันมาก

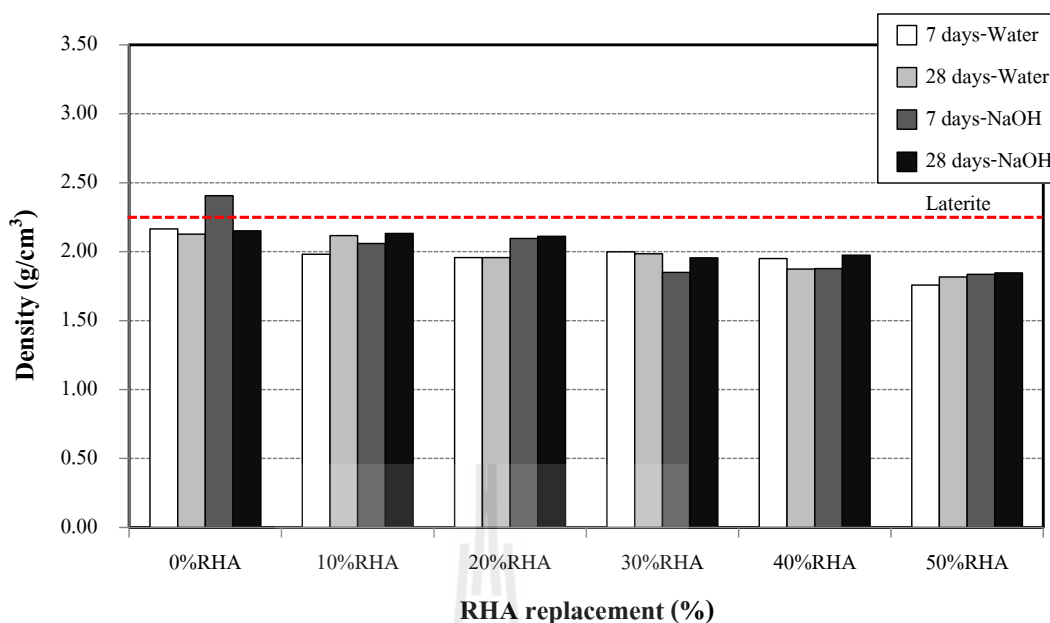
ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่มีการแปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน แสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน ดังเช่น หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่อายุการบ่ม 28 วัน ของ 1.0LB30RHA-Water, 1.5LB30RHA-Water และ 2.0LB30RHA-Water มีค่าเท่ากับ 2.10, 2.14 และ 1.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ขณะที่ หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่อายุการบ่ม 28 วัน ของ 1.0LB30RHA-NaOH, 1.5LB30RHA-NaOH และ 2.0LB30RHA-NaOH มีค่าเท่ากับ 2.01, 2.07 และ 1.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0



รูปที่ 4.5 หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.5



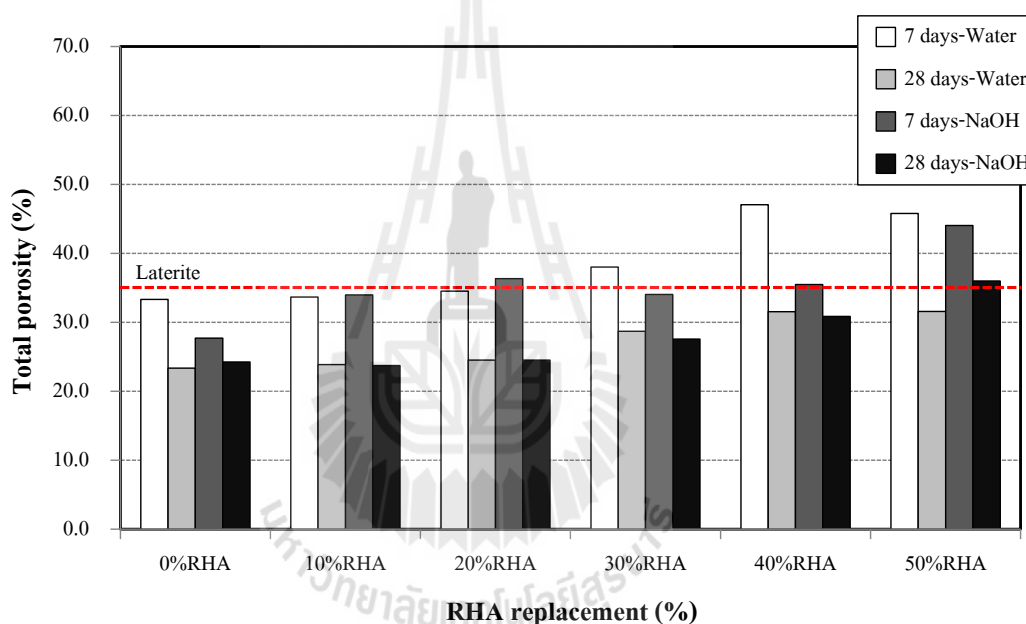
รูปที่ 4.6 หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.0

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับหน่วยน้ำหนักของศิลาแลงที่มีการขายตามท้องตลาดทั่วไป (หน่วยน้ำหนักมีค่าประมาณ 2.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ผลการทดสอบข้างต้นพบว่าหน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมจากงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าหน่วยน้ำหนักของศิลาแลงที่มีการขายตามท้องตลาดทั่วไป ดังนั้น การผลิตหินศิลาแลงเทียมสามารถใช้เป็นหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจเมื่อพิจารณาค่าหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของศิลาแลงเทียม

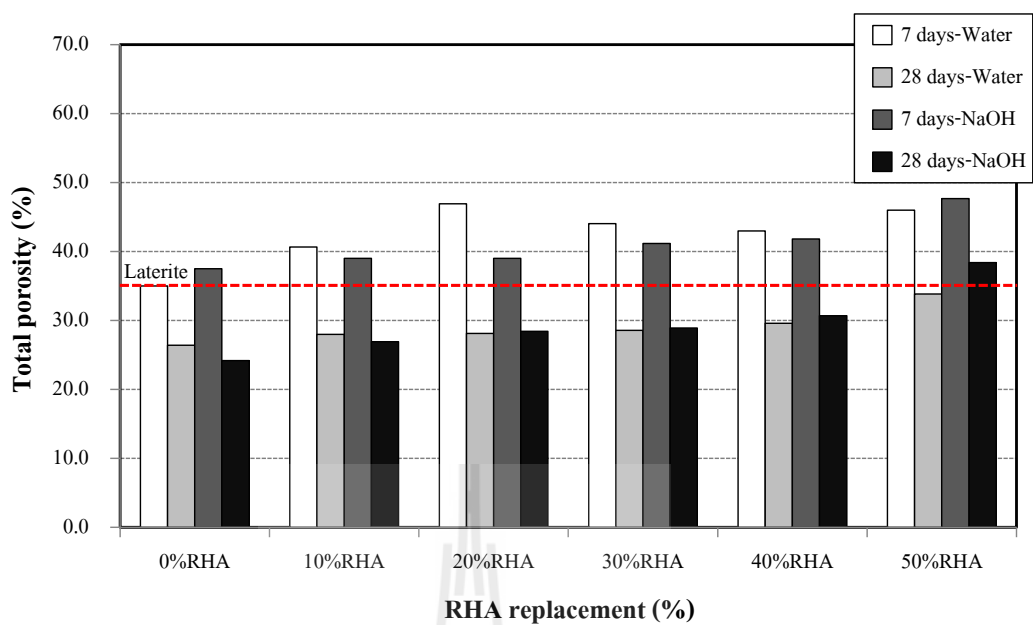
#### 4.3 ขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียม

รูปที่ 4.7 ถึง 4.9 แสดงผลการทดสอบขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่มีการแปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดของเหลว และอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน และ รูปที่ 4.10 ถึง 4.12 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่มีการแปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดของเหลว และอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน การแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีผลให้ขนาดโพรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ดังเช่น ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่อายุการบ่ม 7 วัน ของ 1.0LB0RHA-Water, 1.0LB10RHA-Water, 1.0LB20RHA-Water, 1.0LB30RHA-Water, 1.0LB40RHA-Water และ 1.0LB50RHA-Water มีค่าเท่ากับร้อยละ 33.3, 33.7, 34.5, 38.0, 47.1 และ 45.8 ตามลำดับ ขณะที่ ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่อายุการบ่ม 7 วัน ของ 1.0LB0RHA-NaOH,

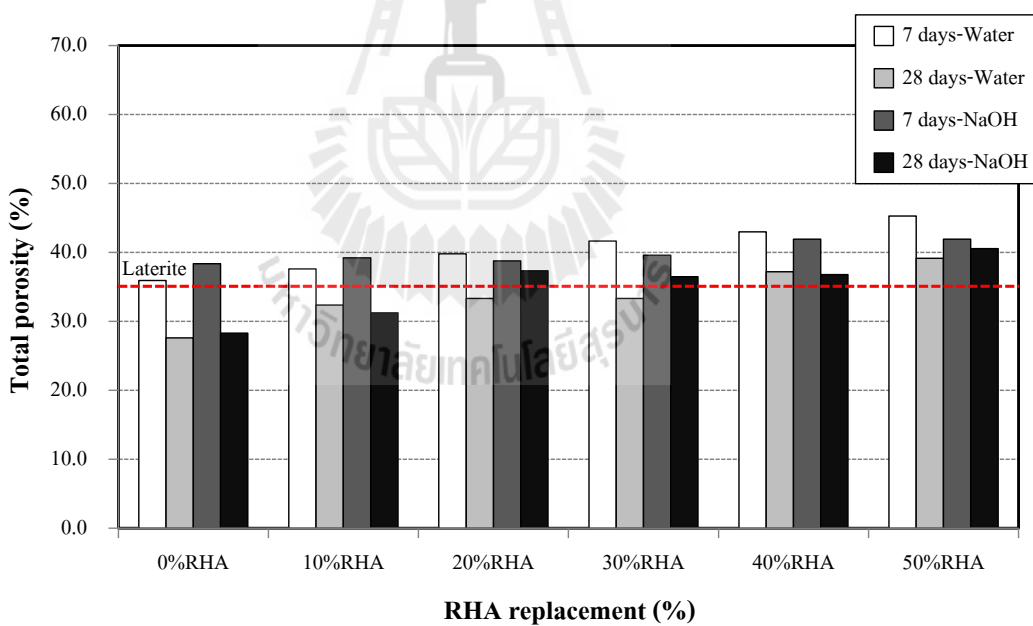
1.0LB10RHA-NaOH, 1.0LB20RHA-NaOH, 1.0LB30RHA-NaOH, 1.0LB40RHA-NaOH และ 1.0LB50RHA-NaOH มีค่าเท่ากับร้อยละ 27.7, 34.0, 36.4, 34.1, 35.5 และ 44.0 ส่วนค่าการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่อายุการบ่ม 7 วัน ของ 1.0LB0RHA-Water, 1.0LB10RHA-Water, 1.0LB20RHA-Water, 1.0LB30RHA-Water, 1.0LB40RHA-Water และ 1.0LB50RHA-Water มีค่าเท่ากับร้อยละ 19.8, 17.4, 18.4, 18.3, 20.1 และ 22.2 ขณะที่ การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่อายุการบ่ม 7 วัน ของ 1.0LB0RHA-NaOH, 1.0LB10RHA-NaOH, 1.0LB20RHA-NaOH, 1.0LB30RHA-NaOH, 1.0LB40RHA-NaOH และ 1.0LB50RHA-NaOH มีค่าเท่ากับร้อยละ 14.7, 15.5, 16.5, 16.5, 17.1 และ 22.6



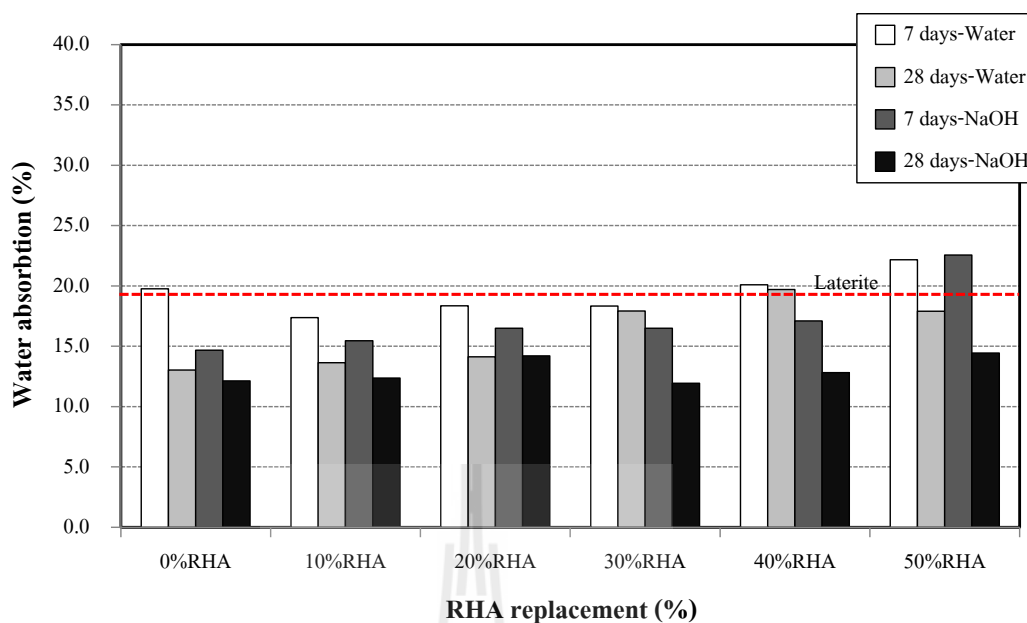
รูปที่ 4.7 ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0



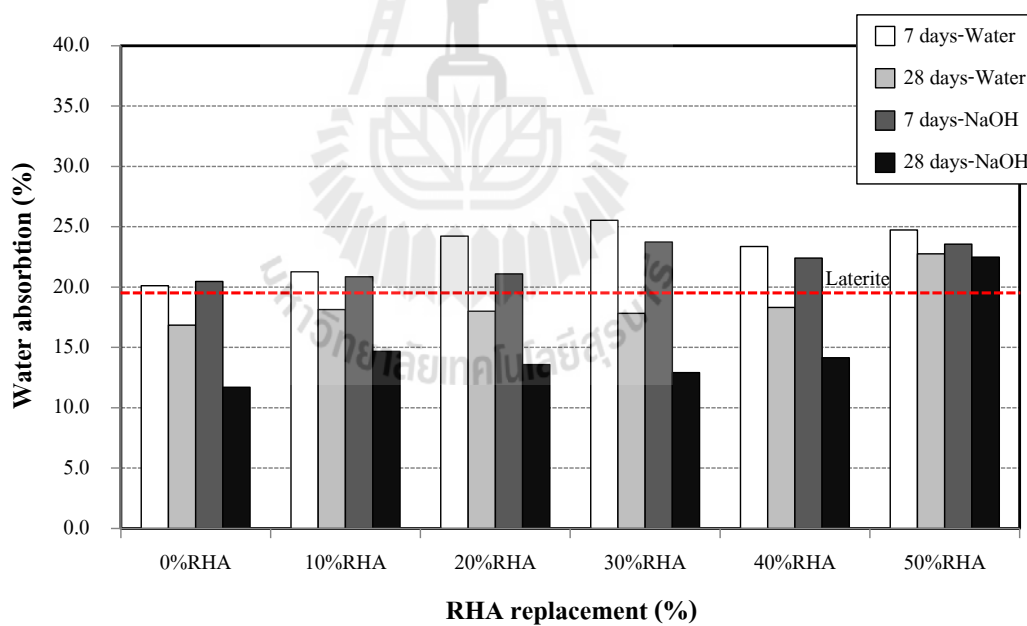
รูปที่ 4.8 ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.5



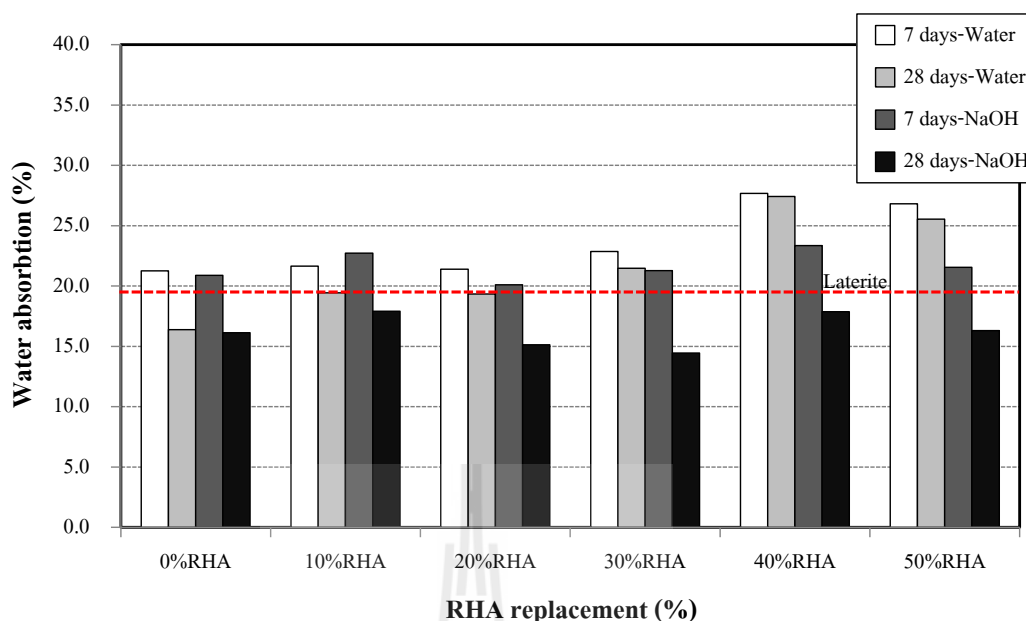
รูปที่ 4.9 ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.0



รูปที่ 4.10 การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0



รูปที่ 4.11 การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.5



รูปที่ 4.12 การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.0

ขนาดโพรงของตัวอย่างศิลาแลงเทียม 1.0LB0RHA-Water, 1.0LB10RHA-Water, 1.0LB20RHA-Water, 1.0LB30RHA-Water, 1.0LB40RHA-Water และ 1.0LB50RHA-Water ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 23.4, 23.9, 24.5, 28.7, 31.5 และ 31.6 ตามลำดับ ขณะที่ขนาดโพรงของตัวอย่างศิลาแลงเทียม 1.0LB0RHA-NaOH, 1.0LB10RHA-NaOH, 1.0LB20RHA-NaOH, 1.0LB30RHA-NaOH, 1.0LB40RHA-NaOH และ 1.0LB50RHA-NaOH ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 24.2, 23.8, 24.5, 27.6, 30.9 และ 36.0 ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของตัวอย่างศิลาแลงเทียม 1.0LB0RHA-Water, 1.0LB10RHA-Water, 1.0LB20RHA-Water, 1.0LB30RHA-Water, 1.0LB40RHA-Water และ 1.0LB50RHA-Water มีค่าเท่ากับร้อยละ 13.0, 13.6, 14.1, 17.9, 19.7 และ 17.9 และการดูดซึมน้ำของตัวอย่างศิลาแลงเทียม 1.0LB0RHA-NaOH, 1.0LB10RHA-NaOH, 1.0LB20RHA-NaOH, 1.0LB30RHA-NaOH, 1.0LB40RHA-NaOH และ 1.0LB50RHA-NaOH มีค่าเท่ากับร้อยละ 12.1, 12.4, 14.2, 11.9, 12.8 และ 14.4 จะเห็นได้ว่า ที่อายุบ่ม 7 วัน ขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าแกลบ แต่ขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นมากภายในระบบทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานมากขึ้น ส่งผลให้มีขนาดโพรงมีขนาดเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์อาจเนื่องจากความพรุนของ

ถ้าเกลบ ส่วนของเหลว (น้ำหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์) เทบไม่มีอิทธิพลต่อขนาดโพรง และการดูดซึมน้ำ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่มีการแปรผัน อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน พบว่าอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานส่งผลต่อขนาดโพรง และการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียม ดังเช่น ขนาดโพรงของตัวอย่างศิลาแลงเทียม 1.0LB30RHA-Water, 1.5LB30RHA-Water และ 2.0LB30RHA-Water อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 28.7, 28.6 และ 33.3 ขณะที่ ขนาดโพรงของตัวอย่างศิลาแลงเทียมที่ 1.0LB30RHA-NaOH, 1.5LB30RHA-NaOH และ 2.0LB30RHA-NaOH ที่อายุการบ่ม 28 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 27.6, 28.9 และ 36.5 และเช่นเดียวกันกับการดูดซึมน้ำของตัวอย่างศิลาแลง 1.0LB30RHA-Water, 1.5LB30RHA-Water และ 2.0LB30RHA-Water อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 17.9, 17.8 และ 21.4 ขณะที่ การดูดซึมน้ำของตัวอย่างศิลาแลงเทียม 1.0LB30RHA-NaOH, 1.5LB30RHA-NaOH และ 2.0LB30RHA-NaOH อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.9, 12.9 และ 14.4 จะเห็นได้ว่าขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมมีแนวโน้มตามอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของส่วนผสมที่เป็นของเหลวทำให้เกิดโพรงที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่มีแนวโน้มลดลง

#### 4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตศิลาแลงเทียม

งานวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้กล่าวคือถ้าเกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการผลิตศิลาแลงเทียมได้ ซึ่งนอกจากจะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้แล้วยังช่วยลดต้นทุนการผลิตศิลาแลงเทียม ผลการทดลองปรากฏว่าส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งให้กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ใกล้เคียงกับค่าของหินศิลาแลงธรรมชาติมากที่สุด คือส่วนผสมที่ใช้น้ำเป็นของเหลวเมื่อใช้อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อถ้าเกลบเท่ากับ 80:20 และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 มีคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของศิลาแลงเทียมเท่ากับ 24.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมเท่ากับ 2.06 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมเท่ากับร้อยละ 34.5 และการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมเท่ากับร้อยละ 18.4 โดยมีราคาต่อก้อนเท่ากับ 6.44 บาท เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับศิลาแลงธรรมชาติมีคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 23.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2.25 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ขนาดโพรงเท่ากับร้อยละ 36.4 และการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 18.8 โดยมีราคาต่อก้อนเท่ากับ 10.00 บาท ขณะที่ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลว ได้แก่เมื่อใช้อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อถ้าเกลบเท่ากับ

60:40 และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 มีคุณสมบัติด้านค่ากำลังรับแรงอัดของศิลาแลงเทียมเท่ากับ 21.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมเท่ากับ 1.90 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมเท่ากับร้อยละ 35.5 และการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมเท่ากับร้อยละ 17.1 โดยมีราคาต่อก้อนเท่ากับ 19.68 บาท จากผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตศิลาแลงเทียมข้างต้นจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเท่ากับ 80:20 และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 มีต้นทุนต่อหน่วยต่ำที่สุด และมีคุณสมบัติด้านต่างๆที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับราคาศิลาแลงธรรมชาติ

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตศิลาแลงเทียมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

| รายการเปรียบเทียบ<br>1 ลูกบาศก์เมตร | กิโลกรัมละ<br>(บาท) | ศิลาแลง<br>ธรรมชาติ | ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้า<br>แกลบ |                     | ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ<br>และโซดาไฟ |                    |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------------|--------------------|
|                                     |                     |                     | 1.0LB20RHA-Water             |                     | 1.0LB40RHA-NaOH                       |                    |
|                                     |                     |                     | จำนวน<br>(กก)                | จำนวน<br>เงิน (บาท) | จำนวน (กก)                            | จำนวนเงิน<br>(บาท) |
| 1.ปูนซีเมนต์                        | 2.40                |                     | 200                          | 480                 | 150                                   | 360                |
| 2.หินศิลาแลง                        | 0.15                |                     | 2000                         | 300                 | 2000                                  | 300                |
| 3.เถ้าแกลบ                          | 0.50                |                     | 50                           | 25                  | 100                                   | 50                 |
| 4.โซดาไฟ                            | 35.00               |                     |                              |                     | 50                                    | 1750               |
| รวมเป็นเงิน                         |                     | 1250                |                              | 805                 |                                       | 2460               |

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตศิลาแลงเทียมต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง

| รายการเปรียบเทียบ<br>ต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง | ขนาด<br>(ลูกบาศก์<br>เซนติเมตร) | กำลังอัด<br>(ksc) | หน่วย<br>น้ำหนัก<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | ขนาด<br>โพรง<br>(%) | การดูด<br>ซึมน้ำ<br>(%) | น้ำหนัก<br>ต่อก้อน | ต้นทุนการผลิต<br>(บาท) |
|-----------------------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|
| Laterite Block                          | 40*20*10                        | 23.4              | 2.25                                     | 36.4                | 18.8                    | 18.0               | 10.00                  |
| 1.0LB20RHA-Water                        | 40*20*10                        | 24.4              | 2.06                                     | 34.5                | 18.4                    | 16.5               | 6.44                   |
| 1.0LB40RHA-NaOH                         | 40*20*10                        | 21.7              | 1.90                                     | 35.5                | 17.1                    | 15.2               | 19.68                  |

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการผลิตศิลาแลงเทียม ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ในทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ส่วนผสมที่เตรียมในงานวิจัยนี้คือระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ) และศิลาแลงในปริมาณ 1:8 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน 3 ค่าได้แก่ 1.0, 1.5 และ 2.0 และอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบ 6 ค่า ได้แก่ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- 5.1.1 ส่วนผสมที่เหมาะสมของหินศิลาแลงเทียมที่ใช้น้ำเป็นของเหลว ที่อายุบ่ม 7 วัน (เพื่อให้ร้านค้าจัดจำหน่ายได้รวดเร็ว) และให้คุณสมบัติใกล้เคียงกับหินศิลาแลงธรรมชาติคืออัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเท่ากับ 80:20 และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 ซึ่งจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดของศิลาแลงเทียมเท่ากับ 24.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมเท่ากับ 2.06 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมเท่ากับร้อยละ 34.5 และการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมเท่ากับร้อยละ 18.4 ขณะที่ส่วนผสมที่มีความเหมาะสมเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นของเหลว ได้แก่ อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเท่ากับ 60:40 และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดของศิลาแลงเทียมเท่ากับ 21.7 หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมเท่ากับ 1.90 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมเท่ากับร้อยละ 35.5 และการดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมเท่ากับร้อยละ 17.1 เมื่อพิจารณากับกำลังรับแรงอัดของศิลาแลงเทียมที่อายุบ่ม 7 วัน มีกำลังรับแรงอัดของศิลาแลงเทียมเท่ากับ 23.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2.25 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ขนาดโพรงเท่ากับร้อยละ 36.4 และการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 18.8
- 5.1.2 การใช้เถ้าแกลบมาใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตศิลาแลงเทียมสามารถลดต้นทุนในการผลิต จะเห็นได้ว่าต้นทุนในการผลิตศิลาแลงเทียมจากการใช้น้ำเป็นของเหลวและเมื่อใช้อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเท่ากับ 80:20 และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 จะมีต้นทุนการผลิตต่อ 1 ก้อน

ตัวอย่างเท่ากับ 6.44 บาท ซึ่งถูกกว่าราคาค้นทุนการผลิตของศิลาแลงธรรมชาติ ซึ่งมี  
ต้นทุนการผลิตต่อ 1 ก้อนตัวอย่างเท่ากับ 10.00 บาท

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 แม้ว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ ที่ใช้เป็นของเหลวในการผลิต  
ศิลาแลงเทียมรวมกับเถ้าแกลบ ปูนซีเมนต์ จะช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ผล  
การศึกษาพบว่าการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมการผลิตศิลา  
แลงเทียมจะทำให้ต้นทุนสูงขึ้นและไม่คุ้มค่ากับการลงทุน
- 5.2.2 แม้ว่าเถ้าแกลบเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ไม่มีราคา แต่ถ้าหากโรงงานผลิตศิลาแลงเทียมอยู่  
ห่างจากแหล่งวัสดุมากๆ อาจทำให้เสียค่าขนส่งมากจนเกินไปจนอาจทำให้มีต้นทุน  
ในการผลิตสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว



## เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2530). **มาตรฐานอุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มาตรฐานเลขที่ มอก.58/2533**. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1295
- ชุมพล จันทรสม. (2528). **การศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซี แล้เกลบและซี แล้ลอย**. วิทยานิพนธ์ มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ณัฐพงศ์ มกระธัช และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2550). **การศึกษาการใช้เถ้าแกลบ –เปลือกไม้เป็นวัสดุ ปอชโซ ลานเพื่อต้านทานการกัดกร่อนจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและกรดซัลฟูริก**. รายงานการ วิจัย. สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ถนัดกิจ ชาริรัตน์. (2548). **การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์ แห่งชาติ ครั้งที่ 21 เอกสาร ประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 3. พ.ศ. 2540, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. สมาคมคอนกรีตไทย.**
- นันทชัย ชูศิลป์ อรรถเดช ฤกษ์พิบูลย์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์ กุล. (2552). **ความทนทานของ คอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียด**. รายงานโครงการ ปรินญาตรี. สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิมิตรยงสกุล. (2540). **ผลกระทบของซีเถ้าแกลบต่อคอนกรีตคุณภาพสูง, วิศวกรรมสถาน แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า MAT5-1 ถึง MAT5-9**
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2555). **ปูนซีเมนต์ปอชโซลานและคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 7. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (ส.ค.ท.). กรุงเทพฯ, 381
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิ ทร. (2528). **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมซีเถ้าลอยแม่ เมาะ**.ขอนแก่น: สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สทลภ หอมวุฒิวงศ์. (2543). **การเปลี่ยนแปลงปริมาตรและการต้านทานสารเคมีของมอร์ต้าที่ทำ จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยคัดขนาด**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขา วิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สมศักดิ์ พื้นชมภู. (2545). **การศึกษาความต้านทานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยและ**

ผสมเถ้าแกลบต่อการกักร่อนของสารซัลเฟตในสภาวะกรด. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต.  
สาขาวิศวกรรม

สิน สินสกุล ผู้เชี่ยวชาญด้านธรณีวิทยา สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษา สสวท.  
WEBMASTER เมื่อ JULY 7, 2013. หัวข้อ สารระนำรู้การศึกษาวิทยาศาสตร์  
<http://secondsci.ipstdevsite.com/?p=713>

อภา ศนเสาวภาคย์. (2544). การศึกษาความต้านทานการกักร่อนของสารซัลเฟตของ  
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรม  
โครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. โครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ASTM C311-11b. (2012). **Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for using Portland-cement concrete.**

ASTM C 642 -06 : American society for testing and material. (1995). **ASTM C 642 -06 : Historical Standard: ASTM C642 -06 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.** Annual book of ASTM standards, Vol. 04.02, Philadelphia.

Buchanan, F. (1807) โดย สิน สินสกุล ผู้เชี่ยวชาญด้านธรณีวิทยา สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษา  
สสวท. [http://secondsci.ipst.ac.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=45:2010-10-18-08-52-00&catid=19:2009-05-04-05-01-56&Itemid=34](http://secondsci.ipst.ac.th/index.php?option=com_content&view=article&id=45:2010-10-18-08-52-00&catid=19:2009-05-04-05-01-56&Itemid=34).

Brooks, J.J., Johari, MAM, and Mazloom, M. (2000). **Effect of admixtures on the setting time of high-strength concrete.** Cement concrete Composites 22 : 293-301.

Chatveera, B. and P. Lertwattanaruk. (2008). **Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash.** [www. sciencedirect. com]. 4 September 2010

Neville, A.M. (1995). **Properties of Concrete**, 4th ed (pp. 86). Addison Wesley Longman ,  
England,

Pinto, R.C.A., Hover, KC. (1999). **Application of maturity approach to setting times.** ACI Mater 96 (6) : 686-691.

Sathonsaowaphak A., Chindaprasirt P., Primraksa K., (2009). **Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar.** Journal of Hazardous Materials., 168(1) : 44-50



ตารางที่ ก.1 กำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์  
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้น้ำเป็นของเหลวในส่วนผสม  
ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน

| ตัวอย่างชุดที่ | อัตราส่วน<br>ซีเมนต์:แกลบ | น้ำ/ซีเมนต์ | กำลังอัดของศิลาแลงเทียม<br>(กก/ตร.ซม.) |        |
|----------------|---------------------------|-------------|----------------------------------------|--------|
|                |                           |             | 7 วัน                                  | 28 วัน |
| 1              | 100 : 0                   | 1.0         | 20.6                                   | 27.4   |
| 2              | 90 : 10                   | 1.0         | 21.6                                   | 29.3   |
| 3              | 80 : 20                   | 1.0         | 24.4                                   | 27.9   |
| 4              | 70 : 30                   | 1.0         | 19.9                                   | 25.0   |
| 5              | 60 : 40                   | 1.0         | 15.3                                   | 21.9   |
| 6              | 50 : 50                   | 1.0         | 5.9                                    | 7.9    |
| 7              | 100 : 0                   | 1.5         | 15.1                                   | 22.7   |
| 8              | 90 : 10                   | 1.5         | 15.8                                   | 22.0   |
| 9              | 80 : 20                   | 1.5         | 16.0                                   | 18.2   |
| 10             | 70 : 30                   | 1.5         | 15.5                                   | 17.9   |
| 11             | 60 : 40                   | 1.5         | 14.1                                   | 15.4   |
| 12             | 50 : 50                   | 1.5         | 11.0                                   | 12.4   |
| 13             | 100 : 0                   | 2.0         | 6.7                                    | 10.9   |
| 14             | 90 : 10                   | 2.0         | 6.8                                    | 13.2   |
| 15             | 80 : 20                   | 2.0         | 9.5                                    | 11.8   |
| 16             | 70 : 30                   | 2.0         | 8.1                                    | 10.2   |
| 17             | 60 : 40                   | 2.0         | 7.1                                    | 7.8    |
| 18             | 50 : 50                   | 2.0         | 5.0                                    | 5.5    |

ตารางที่ ก.2 กำลังอัดของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลวในส่วนผสมที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน

| ตัวอย่างชุดที่ | อัตราส่วน<br>ซีเมนต์:แกลบ | น้ำ/ซีเมนต์ | กำลังอัดของศิลาแลงเทียม<br>(กก/ตร.ซม.) |        |
|----------------|---------------------------|-------------|----------------------------------------|--------|
|                |                           |             | 7 วัน                                  | 28 วัน |
| 1              | 100 : 0                   | 1.0         | 17.4                                   | 19.1   |
| 2              | 90 : 10                   | 1.0         | 18.7                                   | 25.0   |
| 3              | 80 : 20                   | 1.0         | 21.2                                   | 25.4   |
| 4              | 70 : 30                   | 1.0         | 21.5                                   | 29.4   |
| 5              | 60 : 40                   | 1.0         | 21.7                                   | 23.2   |
| 6              | 50 : 50                   | 1.0         | 5.1                                    | 14.5   |
| 7              | 100 : 0                   | 1.5         | 11.2                                   | 13.6   |
| 8              | 90 : 10                   | 1.5         | 11.4                                   | 15.7   |
| 9              | 80 : 20                   | 1.5         | 14.0                                   | 17.0   |
| 10             | 70 : 30                   | 1.5         | 10.7                                   | 17.7   |
| 11             | 60 : 40                   | 1.5         | 10.5                                   | 15.3   |
| 12             | 50 : 50                   | 1.5         | 8.7                                    | 14.7   |
| 13             | 100 : 0                   | 2.0         | 6.7                                    | 9.0    |
| 14             | 90 : 10                   | 2.0         | 7.0                                    | 10.7   |
| 15             | 80 : 20                   | 2.0         | 8.0                                    | 11.5   |
| 16             | 70 : 30                   | 2.0         | 7.3                                    | 14.0   |
| 17             | 60 : 40                   | 2.0         | 7.0                                    | 15.7   |
| 18             | 50 : 50                   | 2.0         | 6.6                                    | 13.9   |

ตารางที่ ก.3 หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้ากลบในปูนซีเมนต์  
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้น้ำเป็นของเหลวในส่วนผสม ที่อายุการ  
บ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน

| ตัวอย่างชุดที่ | อัตราส่วน<br>ซีเมนต์:เถ้ากลบ | น้ำ/ซีเมนต์ | หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียม<br>(กก/ตร.ชม.) |        |
|----------------|------------------------------|-------------|--------------------------------------------|--------|
|                |                              |             | 7 วัน                                      | 28 วัน |
| 1              | 100 : 0                      | 1.0         | 2.17                                       | 2.16   |
| 2              | 90 : 10                      | 1.0         | 2.11                                       | 2.21   |
| 3              | 80 : 20                      | 1.0         | 2.06                                       | 2.12   |
| 4              | 70 : 30                      | 1.0         | 2.03                                       | 2.10   |
| 5              | 60 : 40                      | 1.0         | 1.94                                       | 2.06   |
| 6              | 50 : 50                      | 1.0         | 1.69                                       | 2.03   |
| 7              | 100 : 0                      | 1.5         | 2.17                                       | 2.29   |
| 8              | 90 : 10                      | 1.5         | 2.11                                       | 2.23   |
| 9              | 80 : 20                      | 1.5         | 2.04                                       | 2.21   |
| 10             | 70 : 30                      | 1.5         | 1.89                                       | 2.14   |
| 11             | 60 : 40                      | 1.5         | 1.97                                       | 2.04   |
| 12             | 50 : 50                      | 1.5         | 1.82                                       | 1.93   |
| 13             | 100 : 0                      | 2.0         | 2.17                                       | 2.13   |
| 14             | 90 : 10                      | 2.0         | 1.98                                       | 2.12   |
| 15             | 80 : 20                      | 2.0         | 1.96                                       | 1.96   |
| 16             | 70 : 30                      | 2.0         | 2.00                                       | 1.98   |
| 17             | 60 : 40                      | 2.0         | 1.95                                       | 1.87   |
| 18             | 50 : 50                      | 2.0         | 1.76                                       | 1.82   |

ตารางที่ ก.4 หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้ากลบในปูนซีเมนต์  
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
เท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลวในส่วนผสมที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน

| ตัวอย่างชุดที่ | อัตราส่วน<br>ซีเมนต์:เถ้ากลบ | น้ำ/ซีเมนต์ | หน่วยน้ำหนักของศิลาแลงเทียม<br>(กก/ตร.ชม.) |        |
|----------------|------------------------------|-------------|--------------------------------------------|--------|
|                |                              |             | 7 วัน                                      | 28 วัน |
| 1              | 100 : 0                      | 1.0         | 2.17                                       | 2.13   |
| 2              | 90 : 10                      | 1.0         | 1.94                                       | 2.12   |
| 3              | 80 : 20                      | 1.0         | 1.93                                       | 2.09   |
| 4              | 70 : 30                      | 1.0         | 1.96                                       | 2.01   |
| 5              | 60 : 40                      | 1.0         | 1.90                                       | 1.82   |
| 6              | 50 : 50                      | 1.0         | 1.74                                       | 1.82   |
| 7              | 100 : 0                      | 1.5         | 2.25                                       | 2.18   |
| 8              | 90 : 10                      | 1.5         | 2.17                                       | 2.17   |
| 9              | 80 : 20                      | 1.5         | 2.02                                       | 2.13   |
| 10             | 70 : 30                      | 1.5         | 1.93                                       | 2.07   |
| 11             | 60 : 40                      | 1.5         | 1.85                                       | 1.93   |
| 12             | 50 : 50                      | 1.5         | 1.74                                       | 1.87   |
| 13             | 100 : 0                      | 2.0         | 2.41                                       | 2.15   |
| 14             | 90 : 10                      | 2.0         | 2.06                                       | 2.13   |
| 15             | 80 : 20                      | 2.0         | 2.09                                       | 2.11   |
| 16             | 70 : 30                      | 2.0         | 1.85                                       | 1.95   |
| 17             | 60 : 40                      | 2.0         | 1.88                                       | 1.97   |
| 18             | 50 : 50                      | 2.0         | 1.83                                       | 1.85   |

ตารางที่ ก.5 ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้ากลบในปูนซีเมนต์  
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้น้ำเป็นของเหลวในส่วนผสม ที่อายุการ  
บ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน

| ตัวอย่างชุดที่ | อัตราส่วน<br>ซีเมนต์:เถ้ากลบ | น้ำ/ซีเมนต์ | ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียม<br>(เปอร์เซ็นต์) |        |
|----------------|------------------------------|-------------|------------------------------------------|--------|
|                |                              |             | 7 วัน                                    | 28 วัน |
| 1              | 100 : 0                      | 1.0         | 33.3                                     | 23.4   |
| 2              | 90 : 10                      | 1.0         | 33.7                                     | 23.9   |
| 3              | 80 : 20                      | 1.0         | 34.5                                     | 24.5   |
| 4              | 70 : 30                      | 1.0         | 38.0                                     | 28.7   |
| 5              | 60 : 40                      | 1.0         | 47.1                                     | 31.5   |
| 6              | 50 : 50                      | 1.0         | 45.8                                     | 31.6   |
| 7              | 100 : 0                      | 1.5         | 35.0                                     | 26.4   |
| 8              | 90 : 10                      | 1.5         | 40.7                                     | 28.0   |
| 9              | 80 : 20                      | 1.5         | 46.9                                     | 28.1   |
| 10             | 70 : 30                      | 1.5         | 44.0                                     | 28.6   |
| 11             | 60 : 40                      | 1.5         | 43.0                                     | 29.6   |
| 12             | 50 : 50                      | 1.5         | 46.0                                     | 33.9   |
| 13             | 100 : 0                      | 2.0         | 35.9                                     | 27.6   |
| 14             | 90 : 10                      | 2.0         | 37.6                                     | 32.4   |
| 15             | 80 : 20                      | 2.0         | 39.8                                     | 33.3   |
| 16             | 70 : 30                      | 2.0         | 41.7                                     | 33.3   |
| 17             | 60 : 40                      | 2.0         | 43.0                                     | 37.2   |
| 18             | 50 : 50                      | 2.0         | 45.3                                     | 39.2   |

ตารางที่ ก.6 ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลวในส่วนผสมที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน

| ตัวอย่างชุดที่ | อัตราส่วน<br>ซีเมนต์:แกลบ | น้ำ/ซีเมนต์ | ขนาดโพรงของศิลาแลงเทียม<br>(เปอร์เซ็นต์) |        |
|----------------|---------------------------|-------------|------------------------------------------|--------|
|                |                           |             | 7 วัน                                    | 28 วัน |
| 1              | 100 : 0                   | 1.0         | 27.7                                     | 24.2   |
| 2              | 90 : 10                   | 1.0         | 34.0                                     | 23.8   |
| 3              | 80 : 20                   | 1.0         | 36.4                                     | 24.5   |
| 4              | 70 : 30                   | 1.0         | 34.1                                     | 27.6   |
| 5              | 60 : 40                   | 1.0         | 35.5                                     | 30.9   |
| 6              | 50 : 50                   | 1.0         | 44.0                                     | 36.0   |
| 7              | 100 : 0                   | 1.5         | 37.5                                     | 24.2   |
| 8              | 90 : 10                   | 1.5         | 39.0                                     | 26.9   |
| 9              | 80 : 20                   | 1.5         | 39.0                                     | 28.4   |
| 10             | 70 : 30                   | 1.5         | 41.2                                     | 28.9   |
| 11             | 60 : 40                   | 1.5         | 41.8                                     | 30.7   |
| 12             | 50 : 50                   | 1.5         | 47.7                                     | 38.4   |
| 13             | 100 : 0                   | 2.0         | 38.4                                     | 28.3   |
| 14             | 90 : 10                   | 2.0         | 39.2                                     | 31.3   |
| 15             | 80 : 20                   | 2.0         | 38.8                                     | 37.3   |
| 16             | 70 : 30                   | 2.0         | 39.6                                     | 36.5   |
| 17             | 60 : 40                   | 2.0         | 41.9                                     | 36.8   |
| 18             | 50 : 50                   | 2.0         | 41.9                                     | 40.5   |

ตารางที่ ก.7 การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์  
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้น้ำเป็นของเหลวในส่วนผสม  
ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน

| ตัวอย่างชุดที่ | อัตราส่วน<br>ซีเมนต์:แกลบ | น้ำ/ซีเมนต์ | การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียม<br>(เปอร์เซ็นต์) |        |
|----------------|---------------------------|-------------|----------------------------------------------|--------|
|                |                           |             | 7 วัน                                        | 28 วัน |
| 1              | 100 : 0                   | 1.0         | 19.77                                        | 13.02  |
| 2              | 90 : 10                   | 1.0         | 17.37                                        | 13.64  |
| 3              | 80 : 20                   | 1.0         | 18.36                                        | 14.13  |
| 4              | 70 : 30                   | 1.0         | 18.32                                        | 17.92  |
| 5              | 60 : 40                   | 1.0         | 20.10                                        | 19.71  |
| 6              | 50 : 50                   | 1.0         | 22.17                                        | 17.91  |
| 7              | 100 : 0                   | 1.5         | 20.11                                        | 16.84  |
| 8              | 90 : 10                   | 1.5         | 21.26                                        | 18.13  |
| 9              | 80 : 20                   | 1.5         | 24.21                                        | 18.00  |
| 10             | 70 : 30                   | 1.5         | 25.53                                        | 17.82  |
| 11             | 60 : 40                   | 1.5         | 23.35                                        | 18.32  |
| 12             | 50 : 50                   | 1.5         | 24.73                                        | 22.75  |
| 13             | 100 : 0                   | 2.0         | 21.26                                        | 16.38  |
| 14             | 90 : 10                   | 2.0         | 21.64                                        | 19.43  |
| 15             | 80 : 20                   | 2.0         | 21.39                                        | 19.34  |
| 16             | 70 : 30                   | 2.0         | 22.86                                        | 21.47  |
| 17             | 60 : 40                   | 2.0         | 27.68                                        | 27.43  |
| 18             | 50 : 50                   | 2.0         | 26.82                                        | 25.54  |

ตารางที่ ก.8 การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียมที่แปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์  
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
เท่ากับ 5 โมลาร์ เป็นของเหลวในส่วนผสมที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน

| ตัวอย่างชุดที่ | อัตราส่วน<br>ซีเมนต์:แกลบ | น้ำ/ซีเมนต์ | การดูดซึมน้ำของศิลาแลงเทียม<br>(เปอร์เซ็นต์) |        |
|----------------|---------------------------|-------------|----------------------------------------------|--------|
|                |                           |             | 7 วัน                                        | 28 วัน |
| 1              | 100 : 0                   | 1.0         | 14.7                                         | 12.1   |
| 2              | 90 : 10                   | 1.0         | 15.5                                         | 12.4   |
| 3              | 80 : 20                   | 1.0         | 16.5                                         | 14.2   |
| 4              | 70 : 30                   | 1.0         | 16.5                                         | 11.9   |
| 5              | 60 : 40                   | 1.0         | 17.1                                         | 12.8   |
| 6              | 50 : 50                   | 1.0         | 22.6                                         | 14.4   |
| 7              | 100 : 0                   | 1.5         | 20.5                                         | 11.7   |
| 8              | 90 : 10                   | 1.5         | 20.9                                         | 14.7   |
| 9              | 80 : 20                   | 1.5         | 21.1                                         | 13.6   |
| 10             | 70 : 30                   | 1.5         | 23.7                                         | 12.9   |
| 11             | 60 : 40                   | 1.5         | 22.4                                         | 14.1   |
| 12             | 50 : 50                   | 1.5         | 23.6                                         | 22.5   |
| 13             | 100 : 0                   | 2.0         | 20.9                                         | 16.1   |
| 14             | 90 : 10                   | 2.0         | 22.7                                         | 17.9   |
| 15             | 80 : 20                   | 2.0         | 20.1                                         | 15.1   |
| 16             | 70 : 30                   | 2.0         | 21.3                                         | 14.4   |
| 17             | 60 : 40                   | 2.0         | 23.4                                         | 17.9   |
| 18             | 50 : 50                   | 2.0         | 21.5                                         | 16.3   |

## ประวัติผู้เขียน

นายวงศพัทธ์ พิบูลสุภประดิษฐ์ เกิดเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2524 ที่อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี สถานที่อยู่ปัจจุบัน 507 หมู่ที่ 2 ตำบลท่าตูม อำเภอศรีมหาโพธิ์ จังหวัดปราจีนบุรี สถานที่ทำงานปัจจุบัน ร้านคลินิกแอร์ 304 ตำบลท่าตูม อำเภอศรีมหาโพธิ์ จังหวัดปราจีนบุรี ด้านการศึกษาจบการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง วิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ และระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา

