การพัฒนาหินทรายที่ใช้เถ้าลอย

นายพศวีร์ ศรีวัฒนปิยังกูร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

DEVELOPMENT OF LIGTH WEIGHT

IMITATION SANDSTONE

Posavee Sriwattanapiyoungkul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for

the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

การพัฒนาหินทรายเทียมที่ใช้เถ้าลอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.มงคล จิรวัชรเดช)
กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พศวีร์ ศรีวัฒนปียังกูร : การพัฒนาหินทรายเทียมที่ใช้เถ้าลอย (DEVELOPMENT OF IMITATION SANDSTONE USING FLY ASH) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ, 140 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคุณสมบัติพื้นฐานของหินทรายเทียมให้มีคุณสมบัติเทียบเท่าหินทรายธรรมชาติ ศึกษาและทดลองหาอัตราส่วนผสมควบคุมที่เหมาะสม โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่อทรายละเอียดที่อัตราส่วน 1 : 2, 1 : 2.5, 1 : 3, 1 : 3.5 และ 1 : 4 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) ที่ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 โดยน้ำหนัก เลือกใช้อัตราส่วนผสมควบคุมที่ดีที่สุด 1 อัตราส่วน เพื่อใช้เป็นอัตราส่วนผสมหินทรายเทียม โดยผสมร่วมกับสารปอซโซลานบางส่วนด้วยเถ้าลอยแม่เมาะที่ร้อยละ 5 , 15, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) ที่ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับอัตราส่วนผสมควบคุม หล่อตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์มอร์ต้าร์มาตรฐาน ขนาด 50 x 50 x 50 มม บ่มตัวอย่างทดสอบที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ด้วยวิธีการบ่มชื้นภายใต้อุณหภูมิห้องทดลอง ทำการทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความทนทานต่อการสึกกร่อน และวิเคราะห์ราคาต่อหน่วย ของหินทรายเทียมทุกอัตราส่วนผสมตามลำดับ

จากผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนที่ดีสุดของหินทรายเทียมเท่ากับอัตราส่วน 1 : 3 (อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่อทรายละเอียด) อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่เหมาะสม (w/c) เท่ากับ 1.20 ผสมร่วมเถ้าลอยบางส่วนที่ร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนัก และผลการทดสอบค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของหินทรายเทียม พบว่า ค่ากำลังอัดพบอยู่ระหว่าง 157.5 ถึง 163.0 ksc ค่าการดูดซึมน้ำพบอยู่ระหว่าง 15.5 ถึง 22.3 % ค่าความหนาแน่นแห้งพบอยู่ระหว่าง 1,261 ถึง 2,069 kg/m^3 ค่าความทนทานต่อการสึกกร่อนพบอยู่ระหว่าง 22.1 ถึง 39.3 % ซึ่งเป็นค่าการสึกกร่อนที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ที่อายุทดสอบ 28 วัน และราคาคิดต่อหน่วยอยู่ระหว่าง 5,087 ถึง 5,687 บาทต่อ ลบ.ม. จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติกับหินทรายธรรมชาติ หินทรายเทียมจากงานวิจัยมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับหินทรายธรรมชาติ และสามารถนำไปใช้งานในทางปฏิบัติได้

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ปีการศึกษา 2559 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

POSAVEE SRIWATTANAPIYOUNGKUL : DEVELOPMENT OF IMITATION SANDSTONE USING FLY ASH. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. THEERAWAT SINSIRI, Ph.D., 140 PP.

IMITATION SANDSTONE / WHITE PORTLAND CEMENT / COMPRESSIVE STRENGHT / WATER ABSORPTION / ABRASION RESISTANT

This research aims to develop the basic properties of imitation sandstone to be equivalent to natural sandstone, study and test to determine the optimal control composition ratio by using the ratios of white Portland cement to fine sand at 1:2, 1:2.5, 1:3, 1:3.5, and 1:4, the ratios of water to cement by weight (w/c) at 1.00, 1.20, 1.30, and 1.40. The best control composition ratio was selected to use as an imitation sandstone ratio by mixing with some pozzolans with 5%, 15%, 30%, and 40% Maemoh fly ash by weight. The water to cement ratios (w/c) were 1.00, 1.20, 1.30, and 1.40 by weight, similar to the control composition ratio. Standard cubic mortar test samples were casted at 50 x 50 x 50 mm and were wet cured for 3, 7, 14, 28, 60, and 90 days under laboratory temperature. The compressive strength, density, water absorption, and abrasion resistance were tested and the unit price of imitation sandstone at all composition ratios was analyzed.

The results showed that the best ratio of imitation sandstone was 1:3 (white Portland cement to fine sand ratio). The optimal water to cement ratio (w/c) was 1.20 with some fly ash at 15% and 30% by weight. The results of the engineering properties testing of imitation sandstone found that the compressive strength was between 157.5 and 163.0 ksc, the water absorption ranged from 15.5 to 22.3%, the dry

density was 1,261 to 2,069 kg/m^3, the abrasion resistance was found to be between 22.1 to 39.3%, which was the strength that passed the standard after curing for 28 days, and the unit price was between 5,087 and 5,687 baht/m^3. Comparing properties with natural sandstone, imitation sandstone from the research had similar properties to natural sandstone and can be used practically.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Civil Engineering Student's Signature

Academic Year 2016 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลกรต่างๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธ์ชัย แสงอาทิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้โอกาสทางการศึกษา แก้ปัญหา คำสอนในการค้นหาความสามารถของตนเองทำให้ผู้วิจัยมีความมั่นคงมุ่งมั่นต่อการเรียนตลอดเส้นทางที่มาเรียนในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการและหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวัชรเดช กรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาในการเขียนและตรวจทานวิทยานิพนธ์ จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์สมทรง อรรคไกรสีห์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่คอยให้คำปรึกษา มุมมองการวิเคราะห์และโอกาสทางการศึกษามาตลอด

อาจารย์ประมวล โฮมละคร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือในด้านความรู้ทางวิชาการทำหินทรายเทียม และเนื้อหาข้อมูลวิจัยที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัย

เจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านจัดทำเอกสารเตรียมสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับ บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

พศวีร์ ศรีวัฒนปิยังกูร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... ข

กิตติกรรมประกาศ..... ง

สารบัญ..... จ

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญรูป..... ฐ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 3

1.3 ขอบเขตการวิจัย..... 3

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 หินทราย (Sand Stone)..... 5

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายธรรมชาติ..... 6

2.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของหินทรายธรรมชาติ..... 7

2.1.3 คุณลักษณะของหินทรายธรรมชาติมาใช้ประโยชน์..... 7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.4 ประโยชน์ของหินทรายธรรมชาติ..... 9
2.2 หินทรายเทียม (Imitation SandStone) 9
2.2.1 คุณลักษณะของหินทรายเทียมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน..... 9
2.3 กระบวนการผลิตหินทรายเทียม..... 10
2.3.1 ลักษณะรูปแบบ..... 10
2.3.2 วิธีปั้นรูปแบบ..... 10
2.3.3 วัตถุดิบและส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์หล่อหินทราย.....11
2.3.4 ขั้นตอนการผลิต.....11
2.3.5 ปัจจัยที่มีผลในการผลิตหินทรายเทียม.....14
2.3.6 การทำหินทรายให้ดูเก่า.....14
2.4 คุณลักษณะของหินทรายเทียมตามมาตรฐานผลิภัณฑ์ชุมชน.....15
2.4.1 ลักษณะทั่วไป.....15
2.4.2 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน.....15
2.4.3 การทดสอบ.....16
2.5 ปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ (White Portland Cement)..... 17
2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์..... 19
2.5.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน 21
2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 22
2.6 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials)..... 23
2.6.1 การนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 24
2.6.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน 28
2.7 คอนกรีตมวลเบา(light weight concrete).....29

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.1 ประวัติการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาในงานโครงสร้าง……..…29

2.7.2 การจำแนกชนิดของคอนกรีตมวลเบา……..…….. 31

2.7.3 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา……..…….. 34

2.8 เถ้าลอย (Fly Ash)…….... 35

2.8.1 องค์ประกอบทางเคมี……... 36

2.8.2 ความละเอียดของเถ้าลอย…….. 37

2.8.3 ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย…….. 37

2.8.4 ประโยชน์ของเถ้าลอยในงานคอนกรีต……..... 38

2.9 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) หรือทรายก่อสร้าง (Sand)……..... 39

2.9.1 ชนิดของทราย..... 40

2.9.2 ขนาดของทราย.....41

2.9.3 การใช้ประโยชน์จากทราย.....41

2.10 สรุปปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……..……..43

3 วิธีการดำเนินงานวิจัย…….. 53

3.1 แผนการทดสอบ…… 53

3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ…….…… 53

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย..... 53

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย……..…… 54

3.3 การเตรียมวัสดุและหล่อก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ……..…… 54

3.3.1 การเตรียมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว (White Portland Cement)…….. 54

3.3.2 การเตรียมเถ้าลอย (Fly Ash)…..…… 54

3.3.3 ทรายละเอียด (Sand or Fine Aggregate)…..……. 54

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.4 ขั้นตอนผสมหินทรายเทียมและการหล่อก้อนตัวอย่าง..... 55
3.4 สัญลักษณ์แสดงสัดส่วนผสมของหินทรายเทียม..... 56
3.4.1 จำนวนตัวอย่างหินทรายเทียมควบคุม (Imitation Sandstone Mortar Control)57
3.4.2 จำนวนตัวอย่างหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ขาว.....58
3.4.3 จำนวนตัวอย่างหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ขาว และสารเพิ่มฟองโฟม.....58
3.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย 59
3.5.1 การทดสอบคุณสมบัติของทราย..... 59
3.5.2 การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว..... 60
3.5.3 การทดสอบคุณสมบัติของสารปอซโซลาน..... 61
3.6 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัย 62
3.6.1 การทดสอบหาระยะการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว..... 62
3.6.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว และสารปอซโซลาน..... 61
3.6.3 การทดสอบหาค่าการกระจายตัวของอนุภาค..... 62
3.6.4 การทดสอบวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี 63
3.6.5 การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) 64
3.7 การทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของหินทรายเทียม 65
3.7.1 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์หินทรายเทียม..... 65
3.7.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียม..... 66
3.7.3 การทดสอบหาค่าความหนาแน่น..... 66
3.7.4 การทดสอบความทนทานต่อการขัดสีความสึกกร่อนของหินทรายเทียม.... 67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7.5 การใช้กรด (HCl) กัดผิวชิ้นงาน..... 68

4 ผลการศึกษาและวิจารย์ผล..... 70

4.1 บทนำ..... 70

4.2 คุณสมบัติของมวลรวมละเอียด (ทราย) ที่ใช้ในงานวิจัย..... 70

4.3 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุยึดประสานที่ใช้ในงานวิจัย..... 71

4.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ..... 71

4.3.2 องค์ประกอบทางเคมี..... 72

4.3.3 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค..... 73

4.4 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายเทียม..... 74

4.5 กำลังอัด..... 75

4.5.1 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม..... 75

4.5.2 การเปรียบเทียบกำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์..... 78

4.5.3 กำลังอัดของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย..... 82

4.5.4 การเปรียบเทียบกำลังอัดของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ขาวปอตแลนด์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์..... 86

4.6 ความหนาแน่น..... 91

4.6.1 ความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมควบคุม..... 91

4.6.2 ความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย..... 92

4.7 การดูดซึมน้ำ..... 95

4.7.1 การดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมควบคุม..... 95

4.7.2 การดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย..... 95

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7.3 การดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมแทนปูนซีเมนต์ขาวปอตแลนด์ด้วยเถ้าลอย 30% และสารเพิ่มฟอง..... 96

4.8 ความทนทานต่อการสึกกร่อน 97

4.8.1 การสึกกร่อนของหินทรายเทียมควบคุม..... 97

4.8.2 การสึกกร่อนของหินทรายเทียม..... 98

4.9 โครงสร้างทางจุลภาค 99

4.9.1 ลักษณะโครงสร้างภายในของหินทรายเทียมควบคุม..... 99

4.9.2 ลักษณะโครงสร้างภายในของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย..... 101

4.10 การแต่งผิวชิ้นงานหินทรายเทียมด้วยกรดเกลือ (HCl) ชนิดเจือจาง..... 102

4.11 การวิเคราะห์ราคา..... 103

5 สรุปผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล..... 104

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 104

5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายเทียม..... 104

5.1.2 กำลังอัด 105

5.1.3 ความหนาแน่น 105

5.1.4 การดูดซึมน้ำ..... 105

5.1.5 ความทนทานต่อการสึกกร่อน 105

5.1.6 โครงสร้างทางจุลภาค 106

5.1.7 ข้อเปรียบเทียบระหว่างหินทรายธรรมชาติกับหินทรายเทียม..... 106

5.1.8 การวิเคราะห์ราคา 107

5.1.9 สรุป 107

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 107

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง..... 109

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุวิจัย..... 112

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียม..... 121

ภาคผนวก ค ผลการทดสอบความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความทนทานต่อการสึกกร่อนของหินทรายเทียม..... 125

ภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้รับการนำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่..... 134

ประวัติผู้เขียน..... 140

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายธรรมชาติ 6

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายลวดลายสีไม้และลายสีรุ้ง 6

2.3 คุณสมบัติทางเคมีของหินทรายธรรมชาติ 7

2.4 เกณฑ์ตัดสินของหินทรายเทียมตามมาตรฐานผลิภัณฑ์ชุมชน (มผช.194/2546)..... 16

2.5 ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ..... 20

2.6 ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์..... 20

2.7 ลักษณะทางเคมีในปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์(มาตรฐานอุตสาหกรรม;มอก 133-2556).20

2.8 ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)..... 25

2.9 (ต่อ)ข้อกำหนดทางกายภาพของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)..26

2.10 ข้อกำหนดทางกายภาพของวัสดุปอซโซลาน(เพิ่มเติม)มาตรฐาน ASTM C618 (2008)...27

2.11 ชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบา แบ่งตาม มอก. 1505-2541..... 33

2.12 อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนขาวปอตแลนด์..... 44

2.13 ออกไซค์หลักปูนซีเมนขาวปอตแลนด์..... 44

2.14 ความแข็งแรงของซีเมนต์ขาวร้อยละที่แตกต่างกันจองสารเติมแต่ง..... 49

3.1 สัญลักษณ์, อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างหินทรายเทียมควบคุม.....57

3.2 สัญลักษณ์, อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย.....58

3.3 สัญลักษณ์, อัตราส่วนผสมตัวอย่างหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มฟองโฟม....59

4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะ โมดูลัสความละเอียด หน่วยน้ำหนักและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (ทราย) 71

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.2 ค่าความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย หน่วยน้ำหนัก และพื้นที่ผิวจำเพาะ ……..71

4.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวและเถ้าลอยแม่เมาะ.....72

4.4 ความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมควบคุม..... 92

4.5 ความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ขาว..... 93

4.6 ความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ขาว(ต่อ)... 94

4.7 ราคาของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย..... 103

5.1.7 ข้อเปรียบเทียบระหว่างหินทรายธรรมชาติกับหินทรายเทียม..... 106

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 หินทราย (Sandstone) ตามธรรมชาติ 5

2.2 ปราสาท Palazzo Vecchio โบราณสถานเมืองฟลอเรนซ์ ประเทศอิตาลี.....8

2.3 ปราสาทหินพนมรุ้งจังหวัดบุรีรัมย์ และประสาทหินพิมายจังหวัดนครราชสีมา.....8

2.4 หินทรายเทียม(ปุราณ,2014) และ(บ้านหนองโสน จังหวัดนครราชสีมา,2552).....10

2.5 แสดงเครื่องมือในการสร้างแบบดินเหนียว (ประมวล,2548).....11

2.6 การปั้นแบบด้วยดินเหนียว และแกะลายเพื่อเป็นแม่แบบ.....12

2.7 การทำบล๊อกตัวแบบโดยใช้ยางพาราหรือยางซิลิโคนทำบล๊อกแบบหล่อ.....12

2.8 การเทส่วนผสมปูนซีเมนต์ขาว ทรายสีเหลือง สีฝุ่น และน้ำ ลงในบล๊อกแบบหล่อ.....13

2.9 การแกะแบบหล่อชิ้นงาน และกัดกรดเกลือ (HCI Acid)เจือจาง.....13

2.10 การทำชิ้นงานหล่อหินทรายให้ดูเก่า (กระทรวงวัฒนธรรม, 2546).....15

2.11 งานคอนกรีต ปูนปั้น และผนังวัดร่องขุน (อภิณห์พร อิงค์พรสิน,2558).....19

2.12 Monosulphate and Ettringite 23

2.13 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคเถ้าลอย 35

2.14 ขนาดอนุภาคเม็ดทรายละเอียดตามธรรมชาติกับอนุภาคโดยการถ่ายภาพ SEM 42

2.15 กำลังอัดของปูนซีเมนต์ขาวลดลงเมื่อปริมาณหินปูนเพิ่มขึ้น และการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น45

2.16 กำลังอัดของปูนซีเมนต์ขาวเพิ่มเมื่อปริมาณ PVA เพิ่มขึ้น และการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น....45

2.17 กำลังอัดของปูนซีเมนต์ขาวเพิ่มเมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น และการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น...45

2.18 อินฟราเรดแสดงให้เห็นว่าแสงสีทางซ้ายที่เป็นคอนกรีตเย็นกว่าถนนลาดยางที่สีเข้ม.....47

2.19 X-ray การเลี้ยวเบนแสงของ WPC และ WPC+FA เพิ่ม 10% ปฏิกริยาที่ 28 วัน.....48

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.1 แบบหล่ออาคริลิค ขนาด 50x50x50 mm 55

3.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทราย..... 59

3.3 การทดสอบการหาขนาดคละของทราย..... 60

3.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์..... 61

3.5 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอย.....61

3.6 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยวิธีเข็มไวแคตตามมาตรฐาน ASTM C 191.....62

3.7 ชุดทดสอบหาความละเอียดของวัสดุประสานด้วยวิธีของเบลน (Blaine fineness)..... 63

3.8 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analysis)..... 63

3.9 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence Analysis (XRF))..... 64

3.10 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)..... 65

3.11 การทดสอบขัดสีด้วยเครื่องทดสอบ LOS ANGELES (ASTM C131or C535)..... 68

3.12 กัดผิวชิ้นงานด้วยกรดเกลือ(hydrochloric acid ;HCL) เจือจาง..... 69

4.1 แสดงการกระจายตัวของวัสดุยึดประสานที่ใช้ในงานวิจัย..... 71

4.2 ภาพถ่ายขนาด 2500 เท่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว.....73

4.3 ภาพถ่ายขนาด 2000 เท่าของเถ้าลอยแม่เมาะ..... 73

4.4 แสดงลักษณะของตัวอย่างหินทรายเทียม.....74

4.5 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c เท่ากับ 1.00.....76

4.6 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c เท่ากับ 1.20..... 76

4.7 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c เท่ากับ 1.30..... 77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.8 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c เท่ากับ 1.40……..78

4.9 ตัวอย่างกำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมอัตราส่วน 1 ต่อ 3 ……..78

4.10 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2……..79

4.11 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2.5……..79

4.12 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3……..80

4.13 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3.5……..81

4.14 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 4……..81

4.15 กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.00……..83

4.16 กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.20……..84

4.17 กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.30……..85

4.18 กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.40……..86

4.19 กำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 5 %.... 87

4.20 การทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมมวลเบาอัตราส่วน 1 ต่อ 3……87

4.21 กำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 15 %...88

4.22 กำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 30 %...89

4.23 กำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 40 %...90

4.24 กำลังอัดอัตราส่วน 1 ต่อ 3 เถ้าลอยแทนที่ **30 %**สารเพิ่มฟอง 1%,3% และ5%.....91

4.25 ขนาด และหน่วยน้ำหนักหินทรายเทียมทุกอัตราส่วนผสม..... 93

4.26 กราฟการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c = 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40…….95

4.27 กราฟการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียม ที่ w/c = 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40..... 96

4.28 กราฟการดูดซึม และการสึกกร่อนหินทรายเทียม w/c = 1.30 สารเพิ่มฟอง 1,3และ5%..97

4.29 กราฟค่าการสึกกร่อนของหินทรายเทียมควบคุมที่ w/c = 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40..... 98

4.30 กราฟค่าการสึกกร่อนของหินทรายเทียมควบคุมที่ w/c = 1.00, 1.20**,** 1.30 และ 1.40..... 99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.31 (a) ถึง (e) ภาพ SEM ของหินทรายเทียมควบคุม อายุ 28 วัน.....100
4.32 (a) ถึง (d) ภาพ SEM ของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย อายุ 28 วัน.....101
4.33 การแต่งผิวชิ้นงานหินทรายเทียมด้วยกรดเกลือ (HCI)ชนิดเจือจาง.....102

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
มผช.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน
ลบ.ม.	ลูกบากศ์เมตร
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
A	กำลังอัดซีเมนต์เพสต์ผสมแทนที่ด้วยวัสดุทดสอบร้อยละ 20
B	กำลังอัดซีเมนต์เพสต์
C-A-H	Calcium Aluminate Hydrate
C-S-H	Calcium Silicate Hydrate
cm^2/g	ตารางเซนติเมตรต่อกรัม
FA	Fly Ash
g/cm^3	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
HCI	Hydrochloric acid
kg	กิโลกรัม
ksc	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
kg/m^3	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
LOI	Loss On Ignition
μm	ไมโครเมตรหรือไมครอน
S	Sand
SEM	Scanning Electron Microscope
TIS	Thailand Industrials Standard
W/C	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
WPC	White Portland Cement
SFA	Synthetic foaming agent

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

100WPC-200S	ส่วนผสมควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 100% ต่อทรายละเอียด 200 %
100WPC-250S	ส่วนผสมควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 100% ต่อทรายละเอียด 250 %
100WPC-300S	ส่วนผสมควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 100% ต่อทรายละเอียด 300 %
100WPC-350S	ส่วนผสมควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 100% ต่อทรายละเอียด 350 %
100WPC-400S	ส่วนผสมควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 100% ต่อทรายละเอียด 400 %
95WPC-300S-5FA	ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 95% ต่อทรายละเอียด 300%ต่อเถ้าลอย 5%
85WPC-300S-15FA	ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 85%ต่อทรายละเอียด 300%ต่อเถ้าลอย 15%
70WPC-300S-30FA	ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 70%ต่อทรายละเอียด 300%ต่อเถ้าลอย30%
60WPC-300S-40FA	ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 60%ต่อทรายละเอียด 300%ต่อเถ้าลอย40%
70WPC-300S-30FA-1SFA	ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 70%ต่อทรายละเอียด 300%ต่อเถ้าลอย 30% สารเพิ่มฟองโฟม 1%
70WPC-300S-30FA-3SFA	ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 70%ต่อทรายละเอียด 300%ต่อเถ้าลอย 30% สารเพิ่มฟองโฟม 3%
70WPC-300S-30FA-5SFA	ส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาว 70%ต่อทรายละเอียด 300%ต่อเถ้าลอย 30% สารเพิ่มฟองโฟม 5%
XRF	X-Ray Fluorescence

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

หินทราย (Sandstone) เป็นแร่หินชนิดหนึ่งที่ตกผลึกจับตัวเป็นเวลาหลายสิบปี ประกอบ ด้วยเม็ดทราย ส่วนมากเป็นทรายของควอร์ตซ์ (Quartz) แต่เป็นทรายของแมกนีไทต์ (Magnetite) หรือ แคลไซต์ (Calcite) ทรายเหล่านี้เชื่อมติดกันโดยกระบวนการทางธรรมชาติ วัตถุธาตุที่เชื่อมนั้นเป็นแร่ธาตุ (Minerals) บางชนิด ส่วนมากเป็นซิลิกา (Silica) หรือคาร์บอนเนตของปูน (Carbonate Lime) หินทรายมีสีต่างๆ กัน ตั้งแต่สีขาวจนถึงสีเทาแก่ สีน้ำตาล น้ำตาลปนแดง เขียว ลักษณะต่างๆนี้มีซิลิกา (Silica) เข้ามาประกอบทำให้ดูดุจแก้วในบางครั้ง ด้วยความโดดเด่นมนุษย์ได้นำเอาหินทรายมาจัดวาง ก่อสร้างเป็นที่อยู่อาศัย และสถานบูชาสิ่งศักดิ์สิทธิ์ที่ต่างๆ

ซึ่งในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 6-11 การทำหินทรายประดับในยุคแรกๆ มักจะทำขึ้นจากปูนไลม์ปลาสเตอร์ (Lime Plaster) มีหน้าที่ประสานและเคลือบหล่อผิวนอกสุด โดยจะหล่อขึ้นเป็นชั้นๆ ซึ่งในแต่ละชั้นจะประกอบด้วย แผ่นมอร์ต้าร์โคลนแห้ง (Mud Mortar Layer) และประกบด้วยแผ่นหินบะซอลล์ ส่วนมากนำไประดับตกแต่ง วิหาร สถูป หรือเจดีย์โบราณ (Singh, M., S. Vinodh Kumar and S. A. Waghmare , 2015) ต่อมาในสมัยพุทธศตวรรษที่ 16 รัชสมัยของพระเจ้าชัยวรมันได้มีการสร้างศาสนสถานเพื่อบูชาเทพเจ้า ปราสาทหินเขาพนมรุ้ง (อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดบุรีรัมย์) ปราสาทหินพิมาย (อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา) ปราสาทหินนครวัดของกัมพูชา นอกจากนั้นยังนำหินทรายมาแกะสลักเป็นลวดลายเพื่อตกแต่งอาคาร แกะสลักเป็นเทวรูปต่างๆ ซึ่งมีลวดลายที่แตกต่างกันและเหมาะสมกับพื้นที่ เช่น หินทรายแกะสลักนารายณ์บรรทมศิลป์ (เหนือซุ้มประตูทางเข้าปราสาทหิน) ลายลูกปัด (ลูกกรงหิน, ลูกกรงหินแก้ว) หรือลวดลายพุ่มประดับซุ้มต่างๆ ย่อฐานสิบสองของปราสาท ซึ่งเกิดจากฝีมือช่างที่ชำนาญในการแกะสลักและการตกแต่ง นอกจากสถาปัตยกรรมแล้ว ยังเป็นศิลปกรรมที่งดงามเป็นแบบอย่างให้อนุชนรุ่นหลังได้คัดลอกศึกษา เลียนแบบมาถึงปัจจุบัน ซึ่งในปี พ.ศ. 2520 ได้มีการคิดค้นหาวัตถุที่ใกล้เคียงเพื่อจำลองแบบลวดลายมาตกแต่งปราสาทหินในงานบูรณะสถานเขาพนมรุ้งได้บูรณะแล้วเสร็จสมบูรณ์โดยคณะครู–อาจารย์ได้นำนักศึกษาที่ไปทัศนศึกษาค้นคว้าร่องรอยของประวัติศาสตร์ ในช่วงเริ่มแรกนั้นได้นำเอาก้อนหินทรายแดงมาฝึกหัด ทับ ตัด แต่ง แกะสลัก จำลองตามแบบของจริงของปราสาท

ในช่วงนั้นยังขาดทักษะ ประสบการณ์ และ เวลามีจำกัด ดังนั้นจึงคิดหาวิธีการใหม่ขึ้นมา โดยการนำทรายละเอียดซึ่งเป็นทรายแม่น้ำ มาผสมกับปูนพลาสเตอร์ ($CaSO_4$) หล่อเป็นแท่งตามแบบและขนาดที่ต้องการเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบจากนั้นได้นำชิ้นงานมาฝึกหัดแกะสลักชิ้นงานตัวอย่างสามารถแกะเป็นลวดลายต่างๆได้ตามต้องการถือว่าประสบผลสำเร็จระดับหนึ่งแต่วัสดุดังกล่าวยังขาดความแข็งแกร่ง และต่อมาในปี พ.ศ. 2529 – พ.ศ. 2532 ได้พัฒนารูปแบบพัฒนาหาวัสดุใหม่มา ทดแทนปูนพลาสเตอร์ โดยการนำเอาปูนซีเมนต์มาเป็นตัวเชื่อมประสาน และได้ทดลองนำทรายละเอียดมาผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อหล่อชิ้นตัวอย่าง และนำเอาชิ้นตัวอย่างที่หล่อไว้มาทำการแกะสลักอีก ช่างแกะสลักพบอุปสรรคหลายอย่าง เช่น ความเปราะแตกหักง่าย ความยืดหยุ่นของปูนซีเมนต์มีน้อย ทำให้ไม่สามารถแกะสลักได้ตามความต้องการ การคิดค้นหาวัสดุใหม่ก็ยังดำเนินการต่อไปไม่หยุดยั้ง แหล่งท่องเที่ยวและจำหน่ายผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เป็นศูนย์กลางประติมากรรมหินทราย แหล่งใหญ่ที่สุดของประเทศไทย (OTOP) ซึ่งอยู่ในเขตภาคอีสานตอนล่าง ประจำอยู่ที่จังหวัดนครราชสีมา คือบ้านหนองโสน ตำบลท่าอ่าง อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา ห่างจากตัวจังหวัด 20 กิโลเมตร ถนนสายนครราชสีมา – โชคชัย แหล่งดังกล่าวนับว่าเป็นจุด พัฒนารูปแบบศิลปะหินทรายประดิษฐ์ ขึ้นเป็นรูปแบบต่างๆซึ่งผลิตตามความต้องการของลูกค้าเป็นหลัก ปัจจุบันเกือบทุกหลังคาเรือนผลิตหนทราย มีร้านค้าถึง 232 ร้าน และร้านที่ผลิตบล็อกประสานอีก 10 ร้าน ปัจจุบันบ้านหนองโสนกลายเป็นตลาดหินทรายประดิษฐ์ขนาดใหญ่เฉพาะทางซึ่งในปัจจุบัน ธุรกิจหินทรายประดิษฐ์ ของจังหวัดนครราชสีมามีความเติบโตมาก เป็นที่รู้จักกันทั้งในประเทศและต่างประเทศ เช่น ประเทศญี่ปุ่น ประเทศทางแถบยุโรป และประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีความต้องการมาก (อุษา โพธิกนิษฐ์)

ในปัจจุบันหินทรายได้เข้ามามีผลในงานก่อสร้างมากขึ้นทั้งในงานสถาปัตยกรรมภายนอกและภายใน และมีปัญหาในเรื่องน้ำหนักที่มาก สีที่ไม่สม่ำเสมอ คราบตะกอนที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ไปได้ประมาณ 2-3 ปี การขนส่งที่มีระยะทางที่ไม่สะดวก รูปร่างลักษณะที่กำหนดได้ยาก ใช้เวลาในการจัดสร้างนาน ทรัพยากรถูกทำลายมากขึ้น จากสิ่งที่ปรากฏดังกล่าวประกอบกับหินทรายประดิษฐ์ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการวิจัยและศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการใช้วัสดุผสมเสริมกำลังในงานหินทรายประดิษฐ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิ์ภาพของหินทรายประดิษฐ์ให้ได้คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดีขึ้น น้ำหนักมวลมีค่าที่ไม่สูง การดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์ต่ำและมีค่าความแกร่งที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมหินทรายเทียมที่ใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ขาว การผสม การผลิต การตกแต่งผิวหน้าโดยใช้กรดเกลือ (HCL Acid) ต่อกำลังอัด น้ำหนัก ความคงทนที่สามารถนำไปใช้ในงานต่างๆของชุมชน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาโครงการวิจัยได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัย ประกอบด้วยดังนี้

1.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว (ตราช้าง)

1.3.2 ทราย เป็นทรายแม่น้ำภายในจังหวัดนครราชสีมา ขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33

1.3.3 น้ำ ใช้น้ำประปาภายในจังหวัดนครราชสีมา

1.3.4 เถ้าลอยแม่เมาะ (Fly Ash) เป็นเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตามมาตรฐาน ASTM C 618

1.3.5 ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 1.0, 1.2, 1.3 และ 1.4 โดยน้ำหนัก

1.3.6 ศึกษาอัตราส่วนผสมหินทรายเทียมควบคุมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่อทรายละเอียด ที่อัตราส่วน 1 : 2, 1 : 2.5, 1 : 3, 1:3.5 และ 1 : 4 โดยน้ำหนัก

1.3.7 ศึกษาอัตราส่วนผสมหินทรายเทียมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวต่อทรายละเอียด อัตราส่วน 1 : 3 โดยน้ำหนักและวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (เถ้าลอย) แทนที่ปูนซีเมนต์ ในส่วนผสมที่ร้อยละ 0, 5, 15, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

1.3.8 ทำการหล่อตัวอย่างทดสอบมอร์ตาขนาดมาตรฐาน ขนาด 5 x 5 x 5 ซม บ่มตัวอย่างด้วยวิธีบ่มชื้นใช้แผ่นฟิล์มพลาสติกใสคลุมให้มิดชิด ภายใต้อุณหภูมิห้องทดลองเป็นระยะเวลา 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109

1.3.9 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของหินทรายเทียม

1.3.10 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้เป็นวัสดุหลักของหินทรายเทียม

1.3.11 ทดสอบคุณสมบัติทางกลของหินทรายเทียม โดยการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C190

1.3.12 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายเทียม เช่น ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความทนทานต่อการแช่กรดเกลือ (HCI) และความทนทานต่อการสึกกร่อน ของตัวอย่างทดสอบที่อายุ 28 วัน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C90, ASTM C131 และ ASTM C535

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงวิธีการในการทดสอบ

1.4.2 จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ และวางแผนดำเนินการทดสอบ

1.4.3 ทดลองหาสัดส่วนผสม และดำเนินการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ผสม

1.4.4 ทำการหล่อก้อนตัวอย่างทดสอบ และดำเนินการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

1.4.5 วิเคราะห์ผล และสรุปผลการทดสอบ

1.4.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงคุณสมบัติด้านกำลังอัด ความคงทน และน้ำหนัก ของหินทรายเทียมที่ใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ขาว

1.5.2 พัฒนาหินทรายเทียมให้มีความประหยัด ลดต้นทุน เพิ่มความคงทน และมีน้ำหนักลดลง สามารถนำไปใช้ในงานได้จุดประสงค์ โดยใช้วัสดุภายในประเทศ มาเป็นวัสดุผสมให้เกิดมูลค่า

1.5.3 สามารถปรับปรุงการผสม การผลิตหินทรายเทียม ลดปริมาณการใช้หินทรายจากธรรมชาติ การขนส่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้ทราบข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาการทำหินทรายเทียม จึงได้ทำการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องระหว่างหินทรายธรรมชาติกับการหล่อหินทรายเทียมที่วิจัย เพื่อพัฒนาหินทรายเทียมให้มีคุณสมบัติดีขึ้น และนำสารปอซโซลานธรรมชาติ พร้อมกับเสริมเทคโนโลยีมวลเบาเข้ามาปรับปรุงคุณสมบัติ ดังนี้

2.1 หินทราย

หินทราย (Sand Stone) คือหินที่ประกอบด้วยเม็ดทราย เกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมต่างๆกัน ประกอบด้วยเม็ดแร่ที่มีขนาดต่างส่วนใหญ่เป็นแร่ควอร์ตซ์ อาจมีแร่อื่นเศษหิน เศษดินปนอยู่ด้วย มีสารประกอบเป็นวัตถุเชื่อมประสาน เช่นแคลเซียมคาร์บอนเนต เหล็กออกไซด์ หรือซิลิกา ทำให้เนื้อแน่นติดกัน และเนื้อหินเนียนละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน อาจมีสีเดียวหรือมีลวดลายเป็นสีต่างๆกัน (มาตราฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 194/2546) หินทรายมีลักษณะ เนื้อหยาบ จับดูระคายมือ เพราะประกอบด้วยเม็ดทรายขนาดแตกต่างกัน (1/16 – 2 มม.) ส่วนใหญ่เป็นแร่ควอร์ตซ์ แมกเนไทต์ ไมกา วัตถุประสารส่วนมากเป็นพวกซิลิกา (ควอร์ตซ์หรือเชิร์ต) แคลไซต์ โดโลไมต์เหล็กออกไซด์ มีแร่อื่นปนสามารถขูดเหล็กเป็นรอยได้ มีสีต่าง ๆ เช่น แดง น้ำตาล เขียว เหลืองอ่อน (Nitinuch Science, 2557) ดังรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 หินทรายธรรมชาติ (ชุมชนหนองน้ำใส ตำบลสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา,2556)

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

โดยปกติแล้วหินทรายตามธรรมชาติจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ หินทรายตามธรรมชาติ (Sandstone) และหินทรายธรรมชาติมีลวดลาย (Teakwood and Rainbow Sandstone) ซึ่งทั้ง 2 แบบ มีความแข็ง, เนื้อแน่น, เม็ดละเอียด และความเป็นเนื้อเดียวกันคล้ายๆหินตามธรรมชาติทั่วไป จะแตกต่างกันที่คุณสมบัติทางกายภาพของหินทราย แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายธรรมชาติ (Maneralzone, 2015)

Physical	Description
Color	Minor color tonal variations exist but within the tolerance limit.
Hardness	6.5 to 7 on Moh's Scale
Density	2.3 to 2.4 Kg/cm^3
Compressive Strength	90 to 140 N/mm^2
Modulus of Rupture	16-40 N/mm^2
Water Absorption	1.0 - 1.2 %
Porosity	Low to very low.
Weather Impact	Resistant

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายลวดลายสีไม้และลายสีรุ้ง (Maneralzone, 2015)

Physical	Description
Color	Minor color tonal variations exist but within the tolerance limit.
Hardness	6 to 6.5 on Moh's Scale
Density	2.07 to 2.11 Kg/cm^3
Compressive Strength	41 to 63 N/mm^2
Modulus of Rupture	7-11 N/mm^2
Water Absorption	8.0 - 11 %
Porosity	Comparatively Porous
Weather Impact	Resistant

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.1.2 คุณสมบัติทางเคมี

สารประกอบหลักจะเป็นซิลิกา (SiO_2) องค์ประกอบทางเคมีย่อยอื่นๆ จะแตกต่างจากต้นกำเนิดสู่ต้นกำเนิด คุณสมบัติทางเคมีของหินทรายธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 2.3

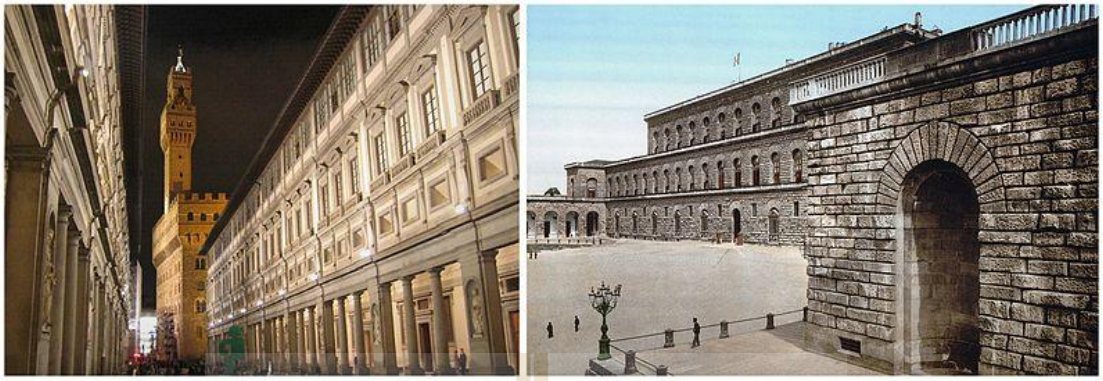
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของหินทรายธรรมชาติ (Maneralzone, 2015)

Chemical Composition	(wt %)
SiO_2	95-97%
Iron (Fe_2O_3)	0.5%-1.5%
Alumina (Al_2O_3)	1 to 1.5%
Soda (Na_2O) & Potash (Kro)	Less then 1%
Lime (CaO)	Less then 0.5%
Magnesia (MgO)	Less then 0.5%
Loss On Ignition (LOI)	Less then 0.5%

คุณสมบัติทนทานต่อความเป็นกรด, ด่างและอุณหภูมิ คงทนต่อสารละลายประเภทกรดและด่างได้ประมาณ 97%

2.1.3 คุณลักษณะของหินทรายธรรมชาติมาใช้ประโยชน์

หินทราย (Sandstone) เกิดจากทรายธรรมชาติทั่วๆไปทับถมกันเป็นเวลานานหลายร้อยล้านปี และเมื่อมีวัสดุสมาน อันเกิดจากธรรมชาติทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนหิน จึงเรียกว่า “หินทราย” โดยเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จากนั้นมนุษย์เป็นผู้กระทำขึ้นมีก็แต่เพียงตกแต่ง, ตัดเพื่อให้ดู มีคุณค่า และสวยงามยิ่งขึ้นเป็นเนื้อหินมีลักษณะ เนื้อหยาบ จับดูระคายมือ ส่วนใหญ่เป็นแร่ควอร์ตซ์ มีสีต่าง ๆ เช่น แดง น้ำตาล เทา เขียว เหลืองอ่อนสมัยโบราณมักนำมาใช้เป็นเครื่องมือ วัสดุในการก่อสร้าง ในยุคที่ยังไม่มีคอนกรีตนำมาก่อสร้างเป็นอาคาร โบรถ์ วิหาร โรงเรียน หลักฐานส่วนใหญ่มักพบได้ในสถาบันการศึกษาเก่าแก่ในต่างประเทศหลายแห่งทั่วโลก และมักจะตกแต่งด้วยหินทราย เช่น วังของขุนนางชั้นสูงในเมืองฟลอเรนซ์ ของราชอาณาจักรอิตาลี ฟลอเรนซ์ตั้งอยู่บนฝั่งแม่น้ำอาร์โน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปราสาท Palazzo Vecchio โบราณสถานเมืองฟลอเรนซ์ ประเทศอิตาลี (ออนไลน์,2015)

เช่นเดียวกันกับโบราณสถานหลายแห่งในประเทศไทยสร้างด้วยหินทรายด้วยลักษณะเด่นของหินทรายธรรมชาติที่มีลักษณะสีสันหลายสี มีความแข็งแกร่งทนทานเหมาะสำหรับเป็นส่วนประกอบในการก่อสร้าง ใช้ทำแผ่นอิฐ ปูพื้น บุผนัง ตกแต่งอาคาร สำนักงาน บ้านเรือนต่างๆ ให้เกิดความสวยงามรูปแบบแปลกใหม่ และยังให้คุณค่า มีควมคงทน เพราะเป็นหินที่เกิดจากธรรมชาติพร้อมทั้งยังแกะสลักเป็นรูปต่างๆได้ อาทิ ปราสาทหินพนมรุ้ง ปราสาทหินพิมาย อาจเพราะคุณสมบัติของหินทรายแตกออกตามแนวชั้นหินและแนวแตกได้ง่าย และเกิดความเรียบกว่าหินอื่นๆขณะที่แตก อีกทั้งยังนำมาแกะสลักตกแต่งด้วยเครื่องมือโบราณได้ง่ายอีกด้วย ดังรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 ปราสาทหินพนมรุ้งจังหวัดบุรีรัมย์ และประสาทหินพิมายจังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย (ออนไลน์,2015)

2.1.4 ประโยชน์ของหินทรายธรรมชาติ

1) ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นกระจก, แก้วและเครื่องแก้วประดับ

2) บดผสมในคอนกรีต งานซ่อมแซมเขื่อน ท่าเทียบเรือ และในยางมะตอย

3) ใช้เป็นหินตกแต่ง หินทรายผิวหยาบถูกใช้เป็นเตาผิง งานผนัง และปูพื้นทางเดิน

4) ใช้เป็นที่เป็นกั้น, นาฬิกา, ทับ, และรองพื้นทางรถไฟ ฯลฯ

5) ใช้รองรับผนังอิฐก่อแบกภาระฐานรากและกำแพงหินประดับ (Maneralzone, 2015)

6) ทำแผ่นหินทราย และกระเบื้องหินทรายที่ใช้ในการหุ้ม

7) งานแกะสลักเสาซุ้ม,สวนน้ำพุ, ผลิตภัณฑ์,สวนหิน, งานศิลปะและงานฝีมือ

2.2 หินทรายเทียม

หินทรายเทียม (Imitation SandStone) หรือหินทรายประดิษฐ์ มาตราฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เลขที่ 194/2546 ให้ความหมายไว้ว่าคือหินประดิษฐ์ขึ้นให้มีลักษณะผิวคล้ายหินทรายธรรมชาติโดยการหล่อ เช่นการใช้ทรายและปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม อาจมีการพ่นทรายเคลือบผิวบนวัสดุหรือชิ้นงานอื่น เช่น ไฟเบอร์ดินเผา หรือกรรมวิธีอื่น ๆ โดยหินทรายเทียมสร้างขึ้นจากส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาว ทรายละเอียด น้ำสะอาด ในอัตราส่วนประมาณ 1 ต่อ 2-4 เทในแบบเมื่อถอดจะมีผิวคล้ายล้อหินทรายธรรมชาติ บ้างทำเป็นผลิตภัณฑ์ประดับตกแต่งอาคารบ้าน และสวนหรือพระพุทธรูปหินทราย ชุดโต๊ะหินทราย ปะติมากรรมสำหรับตกแต่งทางศิลปทางประเพณีวัฒนธรรม

ผลิตภัณฑ์หินทราย หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยหินทรายธรรมชาติหรือหินทรายเทียม นำมาแกะสลัก หล่อให้เป็นรูปทรงต่างๆ ตามต้องการ อาจพ่นบนชิ้นงานหรือกรรมวิธีอื่น และอาจประกอบด้วยวัสดุอื่นตามความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์เพื่อความสวยงาม คงทน และอาจทำสีต่าง ๆ หรือรมดำด้วยก็ได้ ใช้ (มาตราฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน194/2546)

2.2.1 คุณลักษณะของหินทรายเทียมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

หินทรายเทียม (Imitation SandStone) ต้องมีรูปแบบ รูปทรงและสัดส่วนที่เหมาะสม ประณีต สวยงาม ไม่มีรอยแตก ร้าว หรือรอยตำหนิที่มีผลต่อการใช้งาน ลักษณะผิวต้องคล้ายหินทรายธรรมชาติ และไม่ปรากฏรอยพิมพ์หรือรอยต่อให้เห็นอย่างชัดเจน เนื้อทรายที่ผิวต้องติดแน่น ไม่หลุดออกง่าย หรือหากมีรอยต่อต้องประณีต ติดแน่น คงทนกลมกลืนเหมาะสมกับชิ้นงาน และบริเวณรอยต่อต้องไม่มีรอยเปรอะเปื้อนของสารที่ใช้ยึดติดชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน

รูปที่ 2.4 หินทรายเทียม(ปุราณ,2014) และ(บ้านหนองโสน จังหวัดนครราชสีมา,2552)

2.3 กระบวนการผลิตหินทรายเทียม

รูปแบบการผลิต กระบวนการออกแบบรูปแบบหินทรายประดิษฐ์นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีช่างผู้ชำนาญการ ทั้งด้านความคิด ความเข้าใจ และปฏิบัติได้ถูกต้อง แต่การเกิดช่างในหมู่บ้านจะเป็นช่างลักษณะ ครูพักลักจำ ซึ่งเริ่มจากการศึกษารูปแบบของจริง จึงคิดเลียนแบบ แล้วลงมือปฏิบัติ เช่น การปั้นแบบ การแกะสลัก จนเกิดความชำนาญ ช่างเหล่านี้จะมีความเพียรพยายามสูง กล่าวคือ ทำด้วยใจรัก อยากเป็นช่างเหมือนรุ่นพ่อ รุ่นปู่

2.3.1 ลักษณะรูปแบบ

แรกเริ่มจะเป็นการศึกษาจากต้นแบบที่มีอยู่ ต่อมาลอกเลียนแบบตามที่เห็นด้วยดินเหนียว ต้นแบบอาจผิดเพี้ยนบ้าง เมื่อปั้นต้นแบบได้แล้วก็แต่งผิวด้วยการขัดเกลาให้ลวดลายชัดเจน การปั้นจะใช้รูปแบบหลักๆ เช่น นางอัปสร เทวรบาล พิธีกรรมต่างๆ การแสดงรูปแบบล่าสัตว์ การออกศึก ประเพณี ชีวิตความเป็นอยู่ของชาวบ้านตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน สิ่งสำคัญหลักๆ คือจะต้องมีความเข้าใจอย่างลึกซึ้งในรูปแบบรวมถึงพรสวรรค์ของแต่ละคน ช่างที่มีทักษะมีความชำนาญในการปั้นอีกกลุ่มหนึ่ง คือ ช่างที่ได้ศึกษาสัดส่วนของมนุษย์และสัตว์ต่างๆ(Anatomy) กล่าวคือได้เรียนรู้หลักและวิธีการปั้น การแกะสลัก ตามสาขาวิชาศิลปกรรมด้านจิตรกรรม และปฏิมากรรม ช่างกลุ่มนี้จะมีความรู้และมีทักษะความชำนาญ สามารถ ปฏิบัติการปั้นและการแกะสลักได้เร็ว มีความประณีตถูกต้องทั้งขนาดและสัดส่วน (พิบูลย์ คลังเวียงนา)

2.3.2 วิธีปั้นรูปแบบ

เมื่อช่างมีความชำนาญสามารถออกแบบ(Design) รูปแบบภาพร่าง(Sketch)ในรูปรูแบบเกี่ยวกับคนหรือสัตว์ ธรรมชาติก็สามารถทำตามสัดส่วนของรูปนั้นๆลงบนดินเหนียวต้นแบบ

ได้ด้วยเครื่องมือสร้างต้นแบบเหล็กขูดขนาดต่างๆ,เกรียงไม้โป๊วสี, มีด,แปรงหางม้า พู่กัน,คีมผูกลวด,ค้อนไม้ ดังรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.5 แสดงเครื่องมือในการสร้าแบบดินเหนียว (ประมวล,2548)

2.3.3 วัตถุดิบและส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์หล่อหินทราย

1) ปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ขาว	1	ส่วน
2) ทรายละเอียดที่มีสีเหลือง	2.5-3	ส่วน
3) กรดเกลือสำหรับกัดสีผิวเจือจางน้ำ	1 ต่อ 6-10	ส่วน

2.3.4 ขั้นตอนการผลิต

1) ปั้นแบบด้วยดินเหนียวลวดลายส่วนใหญ่มักใช้รูปแบบตามศาสนสถานประเพณีต่างๆ ปล่อยแบบให้แห้งเมื่อแห้งแข็งตัวให้นำยางพารามาทาลงบนตัวแบบเป็นชั้นสลับกับผ้าขาวตาข่ายโดยประมาณ 20 รอบ ตากไว้ในที่ร่มที่มีอากาศปลอดโปรง อย่างน้อย 24-28 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.6

รูปที่ 2.6 การปั้นแบบด้วยดินเหนียว และแกะลายเพื่อเป็นแม่แบบ

2) เมื่อบล็อกแห้งสนิท นำปูนปลาสเตอร์ที่ผสมน้ำตามอัตราส่วนมาทาโอบรอบทับตัวแบบโดยให้ความหนาไม้น้อยกว่า 3 – 5 นิ้ว แล้วแต่ขนาดบล๊อกใหญ่หรือเล็ก ดังรูปที่ 2.7

รูปที่ 2.7 การทำบล๊อกตัวแบบโดยใช้ยางพาราหรือยางซิลิโคนทำบล๊อกแบบหล่อ

3) ขั้นตอนการผสมผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวต่อทรายละเอียด ในอัตราส่วน 1 : 2.5 โดยปริมาตร หรือจากการศึกษาทดลองหาส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวต่อทรายละเอียดปูนซีเมนต์ขาว 1 ส่วน ต้องใช้ทรายร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ส่วนปริมาณน้ำจะใช้ประมาณ 600 – 800 กรัม เพราะส่วนผสมในการทำหินต้องการปริมาณน้ำมาก ทั้งนี้เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่เหลว สามารถไหลเข้าแบบที่เป็นลวดลายต่างๆ ได้เต็มที่ผสมเข้ากันดีแล้ว เทลงแบบแล้วปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.8

รูปที่ 2.8 การเทส่วนผสมปูนซีเมนต์ขาว ทรายสีเหลือง สีฝุ่น และน้ำ ลงในบล๊อกแบบหล่อ

4) เมื่อปูนที่เทลงหลังจากหล่อชิ้นงานแล้ว 24 – 28 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบได้ จากนั้นนำชิ้นงานไปตากผึ่งลมในร่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แต่ในการศึกษาการพัฒนาหินทรายนี้ได้นำตัวอย่างชิ้นงานไปบ่มต่อในน้ำสะอาด 7 วัน และนำตัวอย่างชิ้นงานไปผึ่งไว้ในอุณหภูมิห้องอีก 1 วัน จึงนำไปทดสอบและทำการกัดด้วยกรดเกลือ (HCI Acid)เจือจาง ที่ผิวหินทราย ดังรูปที่ 2.9

รูปที่ 2.9 การแกะแบบหล่อชิ้นงาน และกัดกรดเกลือ (HCI Acid)เจือจาง

2.3.5 ข้อควรระวังในการกัดกรดผิวชิ้นงาน

1 อย่าเทน้ำลงไปผสมกรด จะเกิดปฏิกิริยาลุกเป็นไฟ

2 ต้องสวมถุงมือสวมหน้ากากปิดจมูกปิดปากชนิดหนาให้มิดชิดขณะปฏิบัติงาน

3 ขณะปฏิบัติงานกัดกรดผิวชิ้นงาน ผู้ปฏิบัติต้องอยู่เหนือลมเสมอ

4 ถ้ากรดถูกผิวหนังให้ล้างด้วยสบู่และน้ำสะอาดทันที

5 ถ้ากรดเข้าตาต้องรีบล้างด้วยน้ำสะอาดและรีบไปหาหมอทันที

6 ขวดเปล่าหรือภาชนะบรรจุกรดเกลือต้องเก็บไว้ในที่ปลอดภัย

2.3.5 ปัจจัยที่มีผลในการผลิตหินทรายเทียม

1) ฝีมือช่างออกแบบชิ้นงานต้องคมละเอียด สมส่วน สมจริง ต้นทุนวัสดุ แหล่งวัสดุ การผสม การจัดเตรียมวัสดุเพราะ

2) วัตถุดิบ เช่น ทรายสีเหลือง เมื่อล้างด้วยกรดเกลือ (HCI Acid) จะทำให้งานมีผิวเนื้อทรายลอยหน้า สีเนื้อทรายผิวเนียนเรียบ และสวยงาม

3) ต้นทุนวัสดุ แหล่งวัสดุ การผสม การจัดเตรียมวัสดุก่อการหล่อหากขั้นตอนที่ไม่คงที่จะเกิดตำหนิที่ตัวชิ้นงาน

2.3.6 การทำหินทรายให้ดูเก่า

เมื่อเสร็จขั้นตอนการหล่อแบบแกะแบบออกนำชิ้นงานมาสร้างและขัดจนเห็นเม็ดทรายเหมือนดังงานแกะสลักหินทรายแล้ว ก็เชื่อว่าเสร็จพร้อมจำหน่ายได้ แต่ถ้าต้องการตกแต่งสีสันให้มองดูเป็นของเก่าตามความนิยมของลูกค้าทั่วไป ดังรูปที่ 2.10 ก็สามารถทำโดยซึ่งมีวิธีทำ ดังนี้

1) ถ้าต้องการให้ชิ้นงานมีสีดำแทรกระหว่างเม็ดทรายที่ผิวของงาน ทำได้โดยเตรียม น้ำดำ หรือเรียกว่าน้ำสลิป ซึ่งทำจากการนำดินเหนียวสีดำที่ได้จากท้องนามาหมักเป็นโคลนกรอง จนได้น้ำเหลวสีดำข้น ลักษณะคล้ายแป้ง นำน้ำคำนี้มาทาปนชิ้นงานทิ้งไว้ให้แห้งแล้วนำความสะอาดสีดำจะเกาะติดอยู่ระหว่างเม็ดทราย ทำให้มองดูเป็นของเก่ามากยิ่งขึ้น

2) ถ้าต้องการให้ชิ้นงานมีสีแดง ก็ทำลักษณะคล้ายกันคือนำดินลูกรังมาร่อนเพื่อให้ได้ ฝุ่นดินลูกรังเป็นผงละเอียดมาหมักในน้ำ นำน้ำเหลวๆ ของฝุ่นลูกรังไปทาบนชิ้นงานทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วทำความสะอาดชิ้นงานก็จะมีสีแดงเนื่องจากผงละลายของแร่เหล็กแกะติดอยู่หรือถ้าต้องการสีผสมระหว่างสีทั้งสองก็นำเอาน้ำของดินทั้งสองอย่างมาผสมกันแล้วทาตามกรรมวิธีดังกล่าว

รูปที่ 2.10 การทำชิ้นงานหล่อหินทรายให้ดูเก่า (กระทรวงวัฒนธรรม, 2546)

2.4 คุณลักษณะของหินทรายเทียมตามมาตรฐานผลิภัณฑ์ชุมชน

มาตรฐานผลิภัณฑ์ชุมชน (มผช.194/2546) เป็นมาตราฐานผลิตภัณฑ์หินทรายที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้หินทรายธรรมชาติและหินทรายเทียมเป็นวัสดุหลัก ไม่ครอบคลุมถึงวัสดุก่อสร้างที่ต้องรับน้ำหนักที่ทำจากหินทราย เช่น เสาหินทราย

2.4.1 ลักษณะทั่วไป

ต้องมีรูปแบบ รูปทรงและสัดส่วนที่เหมาะสม ประณีต สวยงาม ไม่มีรอยแตก ร้าว หรือรอยตำหนิที่มีผลต่อการใช้งาน กรณีที่เป็นผลิตภัณฑ์หินทรายเทียม(Imitation SandStone) ลักษณะผิวต้องคล้ายหินทรายธรรมชาติ(Sandstone) และไม่ปรากฏรอยพิมพ์ หรือรอยต่อให้เห็นอย่างชัดเจน เนื้อทรายที่ผิวต้องติดแน่นไม่หลุดออกง่าย หรือถ้ามีการประกอบของหินทราย 2 ชิ้น หรือมากกว่านั้นจะต้องมีความประณีตเมื่อประกอบต้องติดแน่น มีความคงทน และในบริเวณรอยต่อจะต้องไม่มีรอยเปรอะเปื้อนของสารที่ใช้ยึดติดชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน หากมีวัสดุอื่นมาประกอบต้องมีความประณีต เรียบร้อย ติดแน่น คงทน กลมกลืนกัน และเหมาะสมกับชิ้นงาน และต้องได้คะแนนเฉลี่ยของแต่ละลักษณะจากผู้ตรวจสอบทุกคนไม่น้อยกว่า 3 คะแนน และไม่มีลักษณะใดได้ 1 คะแนน จากผู้ตรวจสอบทุกตามมาตราฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 194/2546

2.4.2 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบการใช้งาน การบรรจุ และเครื่องหมายและฉลาก ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 ตัวอย่าง เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามดังนี้

1) สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

2) การบรรจุ ให้บรรจุผลิตภัณฑ์หินทรายในภาชนะบรรจุที่สะอาด เรียบร้อย และสามารถป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์หินทรายได้

3) ที่ฉลาก หรือภาชนะที่บรรจุผลิตภัณฑ์หินทรายทุกหน่วย อย่างน้อยต้องมีเลขอักษรหรือเครื่องหมายรายละเอียดให้เห็นชัดเจนได้ง่าย มีชื่อเรียกผลิตภัณฑ์ ชนิด ขนาด หรือมิติ วัน เดือน ปีที่ทำ ข้อแนะนำในการใช้และการดูแลรักษา ชื่อผู้ทำ หรือสถานที่ทำ พร้อมสถานที่ตั้ง เครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียนในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

2.4.3 การทดสอบ

ให้แต่งตั้งคณะผู้ตรวจสอบ ประกอบด้วยผู้ที่มีความชำนาญในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์หินทรายอย่างน้อย 5 คน แต่ละคนจะแยกกันตรวจและให้คะแนนโดยอิสระหลักเกณฑ์การให้คะแนน ให้เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์ตัดสินของหินทรายเทียมตามมาตรฐานผลิภัณฑ์ชุมชน (มผช.194/2546)

ลักษณะที่ตรวจสอบ	เกณฑ์ที่กำหนด	ระดับการตัดสิน (คะแนน)			
		ดีมาก	ดี	พอใช้	ต้องปรับปรุง
ลักษณะทั่วไป	ต้องมีรูปแบบ รูปทรงและสัดส่วนที่เหมาะสม ประณีต สวยงาม ไม่มีรอยแตก ร้าว หรือรอยตำหนิที่มีผลต่อการใช้งาน กรณีที่เป็ผลิตภัณฑ์หินทรายเทียม ลักษณะผิวต้องคล้ายหินทรายธรรมชาติ และไม่ปรากฏรอยพิมพ์หรือรอยต่อให้เห็นอย่างชัดเจน เนื้อทรายที่ผิวต้องติดแน่นไม่หลุดออกง่าย	4	3	2	1
การประกอบ (ถ้ามี)	ต้องประณีต ติดแน่น คงทน และบริเวณรอยต่อต้องไม่มีรอยเปรอะเปื้อนของสารที่ใช้ยึดติดชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน	4	3	2	1
การประกอบด้วยวัสดุอื่น (ถ้ามี)	ต้องประณีต เรียบร้อย ติดแน่น คงทน กลมกลืน และเหมาะสมกับชิ้นงาน	4	3	2	1

หมายเหตุ: 1. การทดสอบการใช้งาน การบรรจุ และเครื่องหมายและฉลาก ให้ตรวจพินิจ

2.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) คือ สารซีเมนต์ที่ได้จากการผสมกันของสารจำพวกแคลเซียม กับวัสดุจำพวกหินปูน ดินเหนียว ซิลิกาและอะลูมินา หรือสารจำพวกออกไซด์ของเหล็ก นำไปเผาในอุณหภูมิที่เหมาะจนเกิดปฏิกิริยาเป็นเนื้อเดียวกัน บดให้ละเอียด ส่วนประกอบทางเคมี คือ ไฮดรอลิกแคลเซียมซิลิเกต (Hydraulic calcium silicates)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภทตามลักษณะการใช้งาน ดังนี้

ประเภทที่ 1 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement หรือ Standard Portland Cement) ปูนชนิดนี้เป็นชนิดมาตรฐานสำหรับงานก่อสร้างปกติทั่ว ๆ ไป ที่ใช่งานโครงสร้างหลักทั่วไป เช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพาน ถนน สนามบิน และอื่น ๆ

ประเภทที่ 2 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้ในงานป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตระดับปานกลาง ในงานโครงสร้างทั่วไป หรือส่วนของโครงสร้างที่สัมผัสกับดิน หรือน้ำใต้ดิน ซึ่งมีปริมาณซัลเฟตมากกว่าปกติแต่ไม่รุนแรงมาก บริเวณที่โดนน้ำเค็มเป็นครั้งคราว เช่น งานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีต, กำแพงกันดิน

ประเภทที่ 3 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็วหรือให้กำลังเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนชนิดนี้จะให้กำลังเร็วในช่วงอายุต้น เนื้อปูนมีความละเอียดมาก มีคุณสมบัติทางเคมีทางกายภาพคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานต้องถอดแบบในระยะเวลาสั้น หรือโครงสร้างที่ใช้งานเร็ว เช่น ถนนที่มีการจราจรคับคั่ง, ลานบิน เป็นต้น

ประเภทที่ 4 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษที่มีอัตราความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำ และพัฒนากำลังจะช้ากว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น เหมาะกับงานโครงสร้างขนาดใหญ่ งานที่ใช้คอนกรีตหลา เช่น ก่อสร้างเขื่อน

ประเภทที่ 5 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง ประกอบด้วย C_3S, C_2S, C_3A และ C_4AF ในปริมาณที่ต่างกัน มีระยะเวลาของการแข็งตัวช้ากว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ใช้สำหรับการก่อสร้างในบริเวณใกล้ทะเล หรือโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณที่มีดินเค็ม

1) ปูนซีเมนต์ผสม ปูนซีเมนต์ผสมหรือปูนซีเมนต์ซิลิกา (mixed cement หรือ silica cement) ได้จากการบดปูนเม็ดกับวัสดุเฉื่อยจำพวกทรายซึ่งประกอบด้วยซิลิกาหรือบดร่วมกับหินปูนที่เฉื่อย

ต่อการทำปฏิกิริยาปริมาณวัสดุเฉื่อยที่ใช้ประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนัก ทำให้ปูนซีเมนต์มีราคาถูกลง ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น การเยิ้มน้ำต่ำและการหดตัวเมื่อตากแห้งน้อยลง จึงช่วยลดการแตกร้าวที่ผิว เหมาะสำหรับใช้ในงานปูนก่อหรือปูนฉาบเพราะจะได้มีเวลาในการทำงานนานขึ้น แต่ข้อควรระวังสำหรับปูนซีเมนต์ประเภทนี้คือมีกำลังต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอายุต้นๆ ไม่ควรใช้ในการก่อสร้างองค์อาคารหลัก เช่น เสา คาน พื้น หรือฐานรากของอาคาร นอกจากนี้อายุการใช้งานของอาคารจะน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนดข้าว(white portland cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งซึ่งมีสีขาว คุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.133-2556 ได้จากการบดปูนเม็ดขาวกับแคลเซียมซัลเฟตรูปใดรูปหนึ่ง และอาจเติมหินปูน สารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์ด้วยก็ได้สีเทาในปูนซีเมนต์เกิดจากสารออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ดังนั้นการผลิตปูนซีเมนต์ขาว (white cement) จึงทำการลดปริมาณสารดังกล่าวให้ต่ำลง ซึ่งอาจใช้ดินขาวจีน (China clay) กับดินสอพองหรือหินปูนที่ไม่มีออกไซด์ของธาตุเหล็กเป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยทั่วไปแล้วจะกำหนดให้ออกไซด์ของเหล็กในปูนซีเมนต์ขาวต่ำกว่าร้อยละ 0.5 ซึ่งทำให้มีปริมาณของสารเฟอร์ไรด์ในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 0.5 เท่านั้น ดังนั้นปูนซีเมนต์ขาวจึงมีส่วนประกอบของ C_2S,C_3S,C_3A สูง และแทบจะไม่มี C_4AF หรือมีในอัตราที่ต่ำมากการเกิดความร้อนจากปฏิกริยาไฮเดรชั่นของปูนประเภทนี้ก็สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์เทาและปูนซีเมนต์ขาว ล้วนมีส่วนผสมหลักแทบไม่แตกต่างกันนั่นคือ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย เพียงแต่ปูนซีเมนต์ขาวจะคัดสรรวัตถุดิบเฉพาะ โดยการควบคุมปริมาณของเหล็กออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ในวัตถุดิบให้มีน้อยที่สุด เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีสีขาวมากที่สุด ส่วนกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ขาวจะแตกต่างและมีขั้นตอนมากกว่าปูนซีเมนต์เทา เช่น การเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า ไปจนถึงขั้นตอนการลดอุณหภูมิลงที่ช่วยควบคุมความคงที่ของสีปูน เป็นต้นนอกจากนี้ในการเผาจะใช้น้ำมันเพราะถ่านหินจะมีออกไซด์ของธาตุเหล็กและแมงกานีสปนอยู่สูง การใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงจึงทำให้ต้นทุนการผลิตปูนซีเมนต์ขาวมีราคาที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา จึงส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์ขาวสูงกว่าการผลิตปูนซีเมนต์เทาไปโดยปริยาย ด้านกำลังอัดปูนซีเมนต์ขาวนั้นไม่ได้ด้อยกว่าปูนซีเมนต์เทาแม้แต่น้อย และออกจะแข็งแกร่งมากกว่าด้วยซ้ำ หากแต่งบประมาณในการก่อสร้างที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาวจะสูงกว่าหลายเท่าตัวนั่นเอง อย่างไรก็ดี บางกรณีมีการใช้ปูนซีเมนต์ขาวในงานฉาบผนังขาวโชว์พื้นผิว หรือแม้แต่งานหล่อคอนกรีตที่ต้องการโชว์สีธรรมชาติของปูนซีเมนต์ขาว เช่น ผนังคอนกรีตขาว, แผ่นผนัง Precast, งานปั้นปูน ฯลฯ หากจะนำไปใช้ทำโครงสร้างได้แต่ไม่เหมาะด้วยต้นทุนที่สูง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการ

ความสวยงามหรืองานด้านสถาปัตยกรรมที่ต้องการความสวยงาม ควบคู่กับความแข็งแรง ทนทาน สามารถใช้สีผสมเป็นสีที่ต้องการได้ เช่น ใช้ทำหินขัด หินล้าง เป็นต้น

รูปที่ 2.11 งานคอนกรีต ปูนปั้น และผนังวัดร่องขุน (อภิณห์พร อิงค์พรสิน,2558)

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน(portland pozzolanic cement) ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุปอซโซลาน (pozzolanic material) วัสดุปอซโซลานได้แก่ ดินเหนียวเผา เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (fly ash) ซิลิกาฟูม (silica fume) และเถ้าแกลบบดละเอียด เป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาที่ละเอียด ตัวสาร ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) และน้ำที่อุณหภูมิปกติจะได้สารที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน ซิลิกาในวัสดุปอซโซลาน ต้องอยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous) คือไม่เป็นผลึก เพราะถ้าเป็นผลึกซิลิกาจะเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมลงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่วนมากแล้วจะทำให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา(alkali-silica reaction) และกำลังระยะแรกลดลง แต่เพิ่มความต้านทานสารละลายซัลเฟต ปริมาณใช้อยู่ระหว่างร้อยละ 15 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การใช้วัสดุนี้จะเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมแล้วยังทำให้ปูนซีเมนต์ราคาถูกลงด้วย (ชัชวาล, 2551)

2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ออกไซด์หลัก (Major Oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3), และเฟอร์ริกออกไซด์

(Fe_2O_3) ซึ่งรวมกันเป็นร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์ และออกไซด์รอง (Minor Oxides) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O และ K_2O), และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่น เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2), ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) และยิปซั่ม เมื่อออกไซด์หลักรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ดจะเกิดเป็น

สารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S), ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ดังในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ (ปริญญาและชัย, 2549)

ชื่อสารประกอบ	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
tricalcium silicate, C3S	45	44	53	28	38
decalcium silicate, C2S	27	31	19	49	43
tricalcium aluminate, C3A	11	5	11	4	4
tetracalciumalumino ferrite ,C4AF	8	13	9	12	9
Free CaO	0.5	0.4	0.7	0.2	0.5
CaSO4	3.1	2.8	4.0	3.2	2.7

ตารางที่ 2.6 ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์(Nichola J.Coleman &Qiu Li, 2013)

Major Oxide Compositions	CaO	SiO_2	Al_2O_3	SO_3	MgO	P_2O_3	Fe_2O_3	SrO	Ca_2SiO_3	Ca_2SiO_4	$Ca_2Al_2O_6$	$Ca_2(Al/Fe)O_3$
(%) mass	69.2	25.0	1.76	2.0	0.49	0.43	0.33	0.14	65	22	4.1	1.0

เมื่อเม็ดปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้สารประกอบเกิดขึ้นใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต(C-A-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$), แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตหรือ เอททริงไกต์ (Ettringite) และสารประกอบอื่นอีกไม่มาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.7 ลักษณะทางเคมีในปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์(มาตรฐานอุตสาหกรรม;มอก 133-2556)

รายการ	ลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
1	แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ไม่มากกว่า ร้อยละ (เศษส่วนโดยมวล)	5
2	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO3) 1) ไม่มากกว่า ร้อยละ (เศษส่วนโดยมวล)	
	2.1 เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต 2) (3CaO.Al2O3) ไม่มากกว่า 8.0 %	3.5
	2.2 เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต 2) มากกว่า 8.0 % เศษส่วนโดยมวล	4.5
3	การสูญเสียมวลเนื่องจากการเผา ไม่มากกว่า ร้อยละ (เศษส่วนโดยมวล)	3.0
4	กากที่ไม่ละลายในกรดด่าง ไม่มากกว่า ร้อยละ (เศษส่วนโดยมวล)	0.75
5	ไอร์ออน (III) ออกไซด์ (Fe2O3) ไม่มากกว่า ร้อยละ (เศษส่วนโดยมวล)	0.4
6	ด่าง(Na2O+0.658 K2O) ไม่มากกว่า ร้อยละ (เศษส่วนโดยมวล)	0.6

2.4.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (พิณชุกรณ์, 2546)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ผลที่ได้ก็จะแตกต่างกันในช่วงแรกของปฏิกิริยาตามชนิดของสารประกอบของปูนซีเมนต์ดังนี้

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสาน ดังสมการ

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \text{ ---> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

หรือ

$$2C_3S + 6H_2O \text{ ---> } C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2 \quad (2.2)$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \text{ ---> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2.3)$$

หรือ

$$2C_2S + 4H_2O \text{ ---> } C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2 \quad (2.4)$$

C-S-H ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันไป โดยจะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ C-S-H ที่ได้จะทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นวุ้น (Gel) มีสมบัติเป็นตัวประสานเหนียวคล้ายกาว ก่อแข็งตัว และเกาะยึดแน่นกับวัสดุผสม สำหรับ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จาก

ปฏิกิริยาจะทำ ให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนและการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ และ $Ca(OH)_2$ อาจทำปฏิกิริยาต่อกับวัสดุที่มีธาตุซิลิกาและอะลูมิเนียมผสมอยู่ เช่น วัสดุปอซโซลาน

2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \text{ ---> } 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \quad (2.5)$$

หรือ $$C_3A + 6H_2O \text{ ---> } 3C_3AH_6 \quad (2.6)$$

เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วจนเกินไป จึงใส่ยิปซัม ($CaSO_4.2H_2O$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะไปทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรตบนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการ

$$3C_3AH_6 + 3(CaSO_4.2H_2O) + 13H_2O \text{ ---> } 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O \text{ (Ettringite)} \quad (2.7)$$

เราจะเรียก แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ว่า Ettringite โดยชั้นของ Ettringite จะหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแคลเซียมซิลิเกตเป็นส่วนใหญ่ แต่ไม่ได้ไปหยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite ก็จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาณของของแข็ง ซึ่งแรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A ขึ้นมาอีก แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาก็จะเกิด Ettringite ใหม่เข้ามาแทนที่โดยจะไปหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A อีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่งอิออนซัลเฟตมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite ก็จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงในรูปที่ 2.2

รูปที่ 2.12 Monosulphate and Ettringite (ปริญญาและชัย, 2549)

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิบซัม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายเข็มของซัลโฟอะลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ ดังสมการ

$$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + CaSO_4.2H_2O + Ca(OH)_2 \text{ ---> } 3CaO(Al_2O_3.Fe_2O_3).3CaSO_4 \quad (2.8)$$

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (ปริญญาและชัย, 2549)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ปัจจัยดังกล่าว คือ

1) อายุของเพสต์ ยกเว้นช่วงที่ไม่มีปฏิกิริยา (Dormant Period) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดมากที่สุดในช่วงแรก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป จนถึงช่วงสิ้นสุดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2) องค์ประกอบของซีเมนต์ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน

3) ความละเอียดของซีเมนต์ พบว่าซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำได้มากเป็นผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยพบว่าในช่วงต้นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะยังไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่พบว่าในช่วงหลังถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง จะทำให้ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและดีกรีการเกิดปฏิกิริยาลดลง

5) อุณหภูมิ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์

2.6 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) เป็นสารซีเมนต์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างมาตั้งแต่สมัยโบราณ โดยชาวอียิปต์ใช้มอร์ต้าร์ (Mortar) ซึ่งทำจากยิปซัมที่ผ่านการเผาจะรวมตัวกับน้ำและก่อตัวแต่ไม่สามารถแข็งตัวในน้ำได้เพื่อก่อสร้างสิ่งต่างๆ รวมทั้งใช้เป็นวัสดุประสานระหว่างหินในการก่อสร้างปิรามิดแห่งเคออปส์ (Pyramid of Cheops) เมื่อประมาณ 3,000 ปีก่อนคริสตศักราช

ต่อมาชาวโรมันเรียนรู้การใช้ปูนขาวจากชาวกรีก และชาวอียิปต์ ในสมัยเดียวกันกับชาวโรมันก็เริ่มใช้เช่นเดียวกัน การแข็งตัวของปูนขาวเกิดจากการรวมตัวกับน้ำและการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เนื่องจากปูนขาวต้องการคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นปูนขาวจึงไม่สามารถแข็งตัวได้ในน้ำ ต่อมาชาวกรีก และชาวโรมันจึงใช้เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) บดละเอียดผสมกับปูนขาว และทรายทำเป็นมอร์ต้าร์ หรือเพสต์ (Paste) มีความแข็งแรงขึ้นการแข็งตัว ทนทานต่อการละลายของน้ำได้ดีในเถ้าภูเขาไฟมีธาตุซิลิกาและอลูมินาที่พร้อมจะทำปฏิกิริยากับปูนขาว ปฏิกิริยานี้มีชื่อเรียกว่า “ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzonic reaction)” เนื่องจากเถ้าภูเขาไฟที่ดีที่สุดมาจากหมู่บ้านปอซซุโอลิ (Pozzuoli) ใกล้กับภูเขาไฟวิซูเวียส (Vesuvius) ซึ่งเคยระเบิดพ่นลาวา (Lava) และเถ้าถ่านออกมาอย่างมากมายในอดีต ดังนั้นคำว่า “ปอซโซลาน” ต่อมาหมายถึงวัสดุที่ละเอียดคล้ายเถ้าภูเขาไฟเมื่อใช้ผสมกับปูนขาวและน้ำทำให้ได้สารซีเมนต์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน

มาตรฐาน ASTM C 618 (2001) ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีธาตุซิลิกา (SiO_2) หรือซิลิกาและอลูมินา (Al_2O_3 และ SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานอยู่ในรูปของผงละเอียดและมีความชื้นเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณภูมิปกติ และเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานคล้ายปูนซีเมนต์” สิ่งสำคัญประการหนึ่งของวัสดุปอซโซลานคือ ต้องมีความละเอียดสูงจึงจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ดีและรวดเร็ว ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), ไอร์ออนออกไซด์ (Fe_2O_3) ไม่น้อยกว่าร้อยละ	>70.0	>70.0	70-50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, ไม่เกินร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ	10.0	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า NA_2O, ไม่เกินร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ: 1. สารปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ

2. สามารถใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งานหรือผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้

ประเภทของวัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม

1) วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) เช่น ไดอะตอมมาเชียสเอิร์ธ (Diatomaceous earth) เถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ และดินขาว (Metakaolin)

2) วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ได้จากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1) ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ (อนนท์, 2545)

2) ชั้นคุณภาพ F (Class F) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 และคุณสมบัติอื่นตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ถึง 2.4 เถ้าลอยชั้นชั้นนี้มีปริมาณ CaO ต่ำมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ซ เนื่องจากถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงมี SiO_2 สูง วิธีการเก็บตัวอย่างและการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 311 (2007) (อนนท์, 2545)

ตารางที่ 2.9 ข้อกำหนดทางกายภาพของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ความละเอียด :			
- ปริมาณที่ค้างแร่งเบอร์ 325[A] ร่อนโดยใช้น้ำ, ไม่เกินร้อยละดัชนีกำลังเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	34	34	34
- ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75[B]	75[B]	75[B]
- ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75[B]	75[B]	75[B]
- ความต้องการน้ำ, สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม	115	115	115
ความคงตัว (Soundness)[C]			
- การขยาย หดตัวออโตเคลฟ,ไม่เกินร้อยละข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ[D]	0.8	0.8	0.8
- ความหนาแน่น, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5
- ร้อยละที่ค้างแร่งเบอร์ 325, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5

หมายเหตุ : (A) ระวังไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้างบนแร่ง

(B) เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน หรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด

(C) ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ชิ้นส่วนทดสอบการขยายตัวออโตเคลฟควรมีสารปอซโซลานอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์

(D) ความหนาแน่น และความละเอียดของตัวอย่างต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ย

3) ชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) ชื่อเรียกอีกว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว ในลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ,SiO_2 ,Al_2O_3 ที่ต่ำ (อนนท์, 2545)

นอกจากนี้เถ้าลอย Class C ยังมีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง เนื่องจากมีปริมาณ CaO สูง เถ้าลอยแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าลอย CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง (ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร, 2548) แต่ในปัจจุบันเถ้าลอยแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลง โดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10 (ปริญญาและชัย, 2547)

ตารางที่ 2.10 ข้อกำหนดทางกายภาพของวัสดุปอซโซลาน(เพิ่มเติม)มาตรฐาน ASTM C618 (2008)

ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
แฟคเตอร์ผลคูณ (Multiple factor) ของ LOI กับปริมาณที่ค้างแร่งเบอร์ 325 เมื่อร่อนโดยใช้น้ำ ไม่เกินร้อยละ		255	
การหดตัวแห้งที่ 28 วัน ที่เพิ่มขึ้นของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ต้าร์ควบคุม ไม่เกินร้อยละ	0.3	0.3	0.3
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ เมื่อใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศที่ทำให้มีปริมาตรอากาศร้อยละ 18 จะต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้าหรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง ไม่เกินร้อยละ	20	20	20
ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลท์ของมวลรวม การขยายตัวที่ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลท์ต่ำ ไม่เกินร้อยละ	100	100	100
ประสิทธิภาพในการช่วยต้านทานสารซัลเฟต - วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ ● สภาวะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ ● สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ - วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ ● เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตในสภาวะซัลเฟต 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ	 0.10 0.05 100	 0.10 0.05 100	 0.10 0.05 100

ปัจจุบันได้มีการนำเอาปอซโซลานจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพาน เพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟต และช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างด่างกับซิลิกา นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้ในการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย

2.6.1 การนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (สมชัย, 2542)

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ คือ ผลผลิตส่วนหนึ่งที่ได้จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งถูกปล่อยให้เป็นอิสระในระหว่างการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ตามทฤษฎีพื้นฐานปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบซิลิกาในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระเพื่อที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์ สำหรับปฏิกิริยานี้ซิลิกาต้องอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ถ้าอยู่ในรูปผลึกจะมีผลต่อปฏิกิริยาช้ามาก ดังนั้นอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดจึงขึ้นอยู่กับความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลาน โดยทั่วไปอัตราส่วนของวัสดุปอซโซลานที่ใช้จะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-50 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ทั้งหมด

การประยุกต์ใช้วัสดุปอซโซลานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัด โดยอนุภาคของวัสดุปอซโซลานซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์ เมื่อแพร่กระจายเข้าไปในเพสต์แล้วจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิค ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แทรกตามอนุภาคของเม็ดปูนซีเมนต์ ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้เพสต์มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มากขึ้นและเพิ่มความหนาแน่นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต นอกเหนือจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคแล้วยังเกิดการแทรกซึมของสารปอซโซลานที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนด้วย

2.6.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน(Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องจากปฏิกิริยา ไฮเดรชัน โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน, เถ้าแกลบ, ซิลิกาฟูม และซีโอไลต์ เป็นต้น ผลที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียม ไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลังแก่คอนกรีตเช่นเดียวกับที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันดังกล่าวข้างต้น ในส่วนของปฏิกิริยาปอซโซลานมีสมการเคมีดังสมการ (2.9) และ (2.10)

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \longrightarrow xCaO.ySiO_2.zH_2O \qquad (2.9)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_2 + H_2O \longrightarrow xCaO.yAl_2O_3.zH_2O \qquad (2.10)$$

ค่า x, y และ z ในสมการที่ (2.9) และ (2.10) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน สารประกอบ C-S-H และ

C-A-H นอกจากจะช่วยเพิ่มกำลังให้กับคอนกรีตแล้ว ยังช่วยให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

2.7 คอนกรีตมวลเบา

การใช้คอนกรีตมวลรวมเบาสามารถลดต้นทุนในงานก่อสร้างได้ ไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตบล็อกมวลเบา (light weight concrete block) หรือคอนกรีตมวลเบาในงานโครงสร้าง (structural lightweight concrete) ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาในงานโครงสร้างอาจมีราคาต่อลูกบาศก์ที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไป แต่อาจทำให้โครงสร้างมีราคาน้อยกว่า โดยสามารถลดน้ำหนักบรรทุกตายตัวและประหยัดราคาค่าก่อสร้างฐานรากของอาคาร ซึ่งเป็นเหตุผลพื้นฐานสำหรับการพิจารณาการใช้คอนกรีตมวลเบาในงานก่อสร้าง ส่วนในเรื่องของศักยภาพในการทำงานนั้นจะขึ้นอยู่กับการเอาใจใส่ดูแลอย่างถูกต้องและเหมาะสม ระหว่างราคาของคอนกรีตต่อปริมาตร หน่วยน้ำหนักและคุณสมบัติของโครงสร้างเอง คอนกรีตทั่วไปอาจจะมีราคาต่อปริมาตรค่อนข้างต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาแต่จะส่งผลให้ขนาดหน้าตัดของโครงสร้างใหญ่ขึ้น เพราะฉะนั้นอาจมีความต้องการสิ่งที่นอกเหนือจากคอนกรีต และเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต ปกติคอนกรีตมวลเบาอาจจะมีราคาต่อลูกบาศก์สูงแต่จะมีน้ำหนักเบา จึงสามารถลดน้ำหนักบรรทุกตายตัว ลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ลดปริมาณการใช้เหล็กเสริม ราคาค่าแรง และไม้แบบ ซึ่งเป็นการลดราคาค่าก่อสร้างได้

2.7.1 ประวัติการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาในงานโครงสร้าง

ก่อน ค.ศ.1917, Hayde ได้พัฒนาเตาเผา (rotary kiln) เพื่อเผาหินชนวนและดินเหนียว จึงทำให้มีการพัฒนาวัสดุมวลรวมเบา (light weight aggregate) เพื่อใช้เป็นมวลรวมในการทำคอนกรีตกำลังสูงขึ้นและมีน้ำหนักเบา ในขณะเดียวกัน Straub เป็นผู้บุกเบิกในการใช้เถ้าหินโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมในการผลิตจนกระทั่งถึงปัจจุบัน ทำให้การค้าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเถ้าตะกรันได้เริ่มต้นขึ้นในปี ค.ศ.1928 และต่อมาในปี ค.ศ.1948 ก็ได้มีการผลิตโครงสร้างคอนกรีตที่มีคุณภาพชิ้นแรกที่ทำมาจากหินชนวนมวลเบา ที่ได้จากแผ่นหินชนวนจาก Eastern Pennsylvania และอีกทั้งยังมีบันทึกว่ามีการใช้หิน Pumice ในทวีปยุโรปมาเป็นเวลานานนับศตวรรษ รวมถึงในอเมริกาตะวันตก ซึ่งในแถบนั้นมีหิน Pumice จำนวนค่อนข้างมาก และหาง่าย

ก่อนหน้านั้นได้มีการใช้คอนกรีตเสริมเหล็กมวลเบาในการก่อสร้างเรือบรรทุกท้องแบนโดยบริษัท Emergency Fleet Building Corp. เพื่อใช้ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 โดยมีการออกแบบคอนกรีตด้วยการใช้หินชนวนเผาเป็นมวลรวม ต้องการให้มีกำลังอัด 350 ksc และมีหน่วยน้ำหนัก 1,760 kg/m^3 หรือน้อยกว่า และในระหว่างปี ค.ศ.1920s ก็ได้มีการก่อสร้างอาคารคอนกรีตมวลเบา

The Park Plazo Hotel ในเมือง Kansas อีกทั้งยังมีการก่อสร้างทางด่วนยกระดับ San Francisco-Oakland Bay Bridge ซึ่งเป็นแนวทางที่สำคัญในการออกแบบสะพานที่ประหยัด และระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีการสร้างเรือคอนกรีตมวลเบา 105 (105 lightweight concrete ships) เนื่องจากในขณะนั้นมีการอนุรักษ์เหล็กแผ่นเพื่อเอาไว้ใช้ในส่วนอื่น

ภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 มีตัวแทนบริษัทการเคหะแห่งชาติ (national housing agency) ได้ทำการสำรวจศักยภาพการใช้คอนกรีตมวลเบาในการสร้างที่อยู่อาศัย ซึ่งเป็นแนวทางในการศึกษาในวงกว้างของคอนกรีตที่ทำจากวัสดุมวลรวมเบา โดยได้รับการสนับสนุนจากการเคหะและสถาบันการเงินในการสร้างบ้าน (housing and home finance agency) ในขณะเดียวกัน ในปี ค.ศ. 1950s ก็ได้มีการศึกษาและดำเนินการในห้องปฏิบัติการของสถาบัน National Bureau of Standards และ The U.S. Bureau of Reclamation โดยการทำงานของ Richart and Jensen, Washa, Wendt และคณะ เพื่อพิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมเบาหลายชนิด และทำการศึกษาเกี่ยวกับศักยภาพของโครงสร้างคอนกรีตที่ทำจากคอนกรีตมวลเบาอย่างถี่ถ้วน จึงทำให้เกิดความเข้าใจใหม่ ๆ เกี่ยวกับโครงสร้างคอนกรีตที่เบา ไม่ว่าจะเป็นคอสะพาน หรือ ผลิตภัณฑ์แผ่นพื้นสำเร็จ

การก่อสร้างต่อเติมห้างสรรพสินค้า 4 ชั้น ในเมือง Cleveland ประสบปัญหาในการออกแบบ แต่ก็หาทางออกได้โดยการใช้คอนกรีตมวลเบา เนื่องจากสามารถลดน้ำหนักบรรทุกตายตัว (dead load) ได้โดยไม่จำเป็นต้องดัดแปลงฐานราก และในระหว่างปี 1950s หลากหลายโครงสร้างในประวัติศาสตร์ได้มีการออกแบบให้มีการยกระดับฐานรากขึ้น โดยการใช้คอนกรีตมวลเบาเพื่อลดน้ำหนักบรรทุกตายตัว เช่น การสร้างอาคาร 42 ชั้น Prudential Life ในเมืองชิคาโก โดยทำเป็นพื้นคอนกรีตมวลเบา หรือไม่ว่าจะเป็น โรงแรม Statler Hilton ในเมือง Dallas ก็ออกแบบโดยการใช้เฟรมคอนกรีตมวลเบาและแผ่นพื้นแบบบาง

ตัวอย่างในการประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างเหล่านี้เป็นการกระตุ้นให้มีการค้นคว้าวิจัยอย่างจริงจัง เกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาในหลายองค์กรจากนานาประเทศ โดยได้มีการเร่งให้มีการก่อสร้างโรงงานผลิตมวลรวมเบา ซึ่งในปัจจุบันมวลรวมที่มีน้ำหนักเบาและคุณภาพของโครงสร้างคอนกรีต ได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการก่อสร้างอาคารทั้งในสหรัฐอเมริกา แคนาดา และอื่น ๆ อีกหลายประเทศ ส่งผลให้การก่อสร้างโครงสร้างหลักในเขตพื้นที่เมืองหลวงของสหรัฐอเมริกา และแคนาดา มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงปี ค.ศ. 1960s และในอนาคตเทคโนโลยีในการผลิตใหม่ ๆ จะเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตมวลรวมที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งการผลิตมวลรวมโดยการใช้ระบบใหม่นั้น จะต้องมีการทดสอบและรับรองเพื่อให้เกิดการยอมรับในการประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างคอนกรีตต่อไป (ACI 213 R-87, 1999)

2.7.2 การจำแนกชนิดของคอนกรีตมวลเบา

1. การจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนัก สามารถแยกได้ดังนี้

1.1) คอนกรีตมวลเบาชนิดทำเป็นฉนวน (insulating lightweight concrete) มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 315 ถึง 1,100 kg/m^3 และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ระหว่าง 7 ถึง 70 ksc

1.2) คอนกรีตมวลเบาชนิดทำเป็นโครงสร้าง (structural lightweight concrete) มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1,400 ถึง 1,800 kg/m^3 และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 170 ksc

1.3) คอนกรีตชนิดกึ่งมวลเบา (semi - lightweight concrete) มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1,800 ถึง 2,050 kg/m^3 และมีค่ากำลังอัดไม่ต่ำกว่า 220 ksc โดยส่วนใหญ่จะนำมาทำเป็นคอนกรีตบล็อกสำหรับกำแพงรั้ว และใช้เป็นวัสดุทนไฟ

2. คอนกรีตมวลเบาที่ใช้วัสดุผสมเบา วัสดุมวลรวมเบาที่ใช้ทั่วไปเป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบามีลักษณะที่สำคัญ คือ มีความพรุนสูง ทำให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าต่ำ วัสดุผสมนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ วัสดุผสมที่ได้จากธรรมชาติ และวัสดุที่ทำเทียมขึ้น

2.1) วัสดุผสมที่ได้จากธรรมชาติ (natural aggregates) ได้แก่ หินพรุน (pumice) และหินละลายชนิดเบา (scoria) ได้จากวัสดุทับถมจากลาวาภูเขาไฟ โดยนำมาผ่านกระบวนการบดและจัดขนาด โครงสร้างภายในของหินพรุนมีโพรงยาวจำนวนมาก และมีสีขาวเทาแกมน้ำเงิน โดยมีสารเจือปนเป็นรอยด่างสีน้ำตาลไม่เปราะง่าย ดูดซึมน้ำได้มากและมีการหดตัวมาก มีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 470 ถึง 870 kg/m^3 คอนกรีตเบาที่ทำจากหินพรุนนี้จะมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 710 ถึง 1,420 kg/m^3 มีค่ากำลังอัดต่ำประมาณ 50 ksc ส่วนหินละลายชนิดเบานั้นคล้ายคลึงกับหินพรุน แต่เป็นลาวาที่มีโครงสร้างภายในใหญ่กว่า และมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอมากกว่า และเมื่อนำมาทำเป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบาจะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับหินพรุน

2.2) วัสดุผสมที่ทำเทียมขึ้น (artificial aggregates) เป็นวัสดุที่ได้จากปฏิบัติการทางความร้อนของวัสดุต่าง ๆ เช่น เวอร์มิคิวไลท์ (vermiculite) ซึ่งเป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (ไมกา) ที่มีน้ำประกอบอยู่ หรือเป็นพวก ดิน ดินดาน และหินชนวนเผา ซึ่งมีชื่อเรียกทางการค้าต่าง ๆ เช่น เฮย์ไดท์ (haydite) เลไลท์ (lelite) โซไลท์ (solite) และทัฟฟ์-ไลท์ (tuff – lite) หรืออาจจะเป็นการนำหินเพอร์ไลท์ (perlite) มาผ่านกระบวนการเผาที่อุณภูมิสูงเพื่อให้เกิดการขยายตัว

3. คอนกรีตมวลเบาที่ใช้สารเคมี ทำโดยใช้ผงด่างโลหะ (alkaline metal) ผสม เช่น ผงอลูมิเนียม (aluminum powder) ซึ่งเป็นสารผสมเพิ่มชนิดทำให้เกิดก๊าซ (gas-forming admixture) ใช้ผงอลูมิเนียมประมาณ 0.005 ถึง 0.02% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ผงอลูมิเนียมที่ผสมลงไปทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลจากการทำปฏิกิริยากับอัลคาไลไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ ไฮโดรเจนกลายเป็นฟองอากาศเล็ก ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 ถึง 1 mm อยู่ในเนื้อคอนกรีตทำให้

คอนกรีตพองตัวฟูขึ้น มีปริมาตรเพิ่มขึ้นกว่าเดิมหลายเท่า และเมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะกลายเป็นคอนกรีตที่มีรูเล็ก ๆ อยู่ข้างในมากมาย คอนกรีตที่ได้เรียกว่า โฟมคอนกรีต (aerated or foam concrete) โฟมคอนกรีตอาจผลิตโดยไม่มีทรายผสมอยู่ก็ได้ โฟมคอนกรีตที่ไม่มีทรายผสมจะเบากว่าน้ำถึงสามเท่า คือ มีหน่วยน้ำหนักเพียง 200 ถึง 300 kg/m^3 ประโยชน์ใช้ทำฉนวนกันความร้อน แต่หากมีทรายผสมด้วยจะหนัก 500 ถึง 1,100 kg/m^3 นอกจากนี้อาจมีการใช้ผงสังกะสี (zinc powder) หรือไฮโดรเจนเพอออกไซด์ (hydrogen peroxide) ก็ได้ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

ปัจจุบันได้มีการทำชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ (autoclave aerated concrete) สำหรับงานก่อสร้างภายในประเทศไทยเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมประเภทนี้ จึงมีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมขึ้น โดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือ มอก. (Thai Industrial Standard, TIS) โดยได้มีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2411 (พ.ศ.2541) ออกตามความในมาตรา 15 แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2511 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ โดยรัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม ออกประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มาตรฐานเลขที่ มอก. 1505-2541 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดรายละเอียดของชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ซึ่งเป็นวัสดุก่อผนังมวลเบาโดยมีฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอภายในเนื้อคอนกรีต และอบด้วยไอน้ำโดยกำหนดชั้นคุณภาพและชนิด ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน วัสดุและการทำ คุณลักษณะที่ต้องการ การบรรจุ เครื่องหมายและฉลาก การเก็บคอนกรีตมวลเบา การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน แต่การทดสอบมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ครอบคลุมเฉพาะผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต และอบในเตาอบไอน้ำ และไม่เสริมเหล็ก เพียงเท่านั้น

ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ตามความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ เรียกว่า “คอนกรีตมวลเบา” หมายถึง คอนกรีตที่มีมวลเบากว่าคอนกรีตทั่วไปที่มีขนาดเดียวกัน โดยมีฟองอากาศเล็ก ๆ แทรกกระจายในเนื้อคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ ทำให้แข็งด้วยการอบไอน้ำ และไม่เสริมเหล็ก เหมาะสำหรับใช้ก่อผนังด้วยวิธีก่อ

คอนกรีตมวลเบาตาม มอก. 1505-2541 สามารถแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบาตามความต้านแรงอัดออกเป็น 4 ชั้นคุณภาพ และแบ่งตามความหนาแน่นเชิงปริมาตร ออกเป็น 7 ชนิด โดยชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบามีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงในตารางที่ 2.11 (มอก. 1505-2541)

ตารางที่ 2.11 ชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบา แบ่งตาม มอก. 1505-2541

ชั้นคุณภาพ	ความต้านทานแรงอัด (N/mm^2)		ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรเฉลี่ย (kg/m^3)
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด		
2	2.5	2.0	0.4	310 ถึง 400
			0.5	410 ถึง 500
4	5.0	4.0	0.6	510 ถึง 600
			0.7	610 ถึง 700
			0.8	710 ถึง 800
6	7.5	6.0	0.7	610 ถึง 700
			0.8	710 ถึง 800
8	10.0	8.0	0.8	710 ถึง 800
			0.9	810 ถึง 900
			1.0	910 ถึง 1,000

จากข้อมูลตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 แสดงให้เห็นว่ามีการรับรองมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเฉพาะที่เป็นคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ส่วนคอนกรีตมวลเบา หรือคอนกรีตบล็อกมวลเบาชนิดอื่นยังไม่มีการรับรอง อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากคอนกรีตมวลเบาชนิดอื่นยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจัง แต่ในอนาคตอาจจะมีการรับรองประเภทอื่นเพิ่มขึ้น

คอนกรีตมวลเบาที่ทำขึ้นจากวัสดุผสมต่าง ๆ กัน จะมีค่าหน่วยน้ำหนักต่างกันมาก ซึ่งอาจมีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 300 ถึง 1,850 kg/m^3 และมีค่ากำลังอัดตั้งแต่ 3 ถึง 400 ksc ค่ากำลังอัดขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ถ้าหน่วยน้ำหนักสูงกำลังอัดก็สูงด้วย ปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ก็มีส่วนต่อกำลังอัดของคอนกรีตเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าต้องการกำลังอัด 210 ksc จะต้องใช้ปูนซีเมนต์ 235 ถึง 400 กิโลกรัมต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร หรือถ้าต้องการกำลังอัด 310 ksc ต้องใช้ปูนซีเมนต์ 300 ถึง 490 กิโลกรัมต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร

2.7.3 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

- ค่าการดูดซึมน้ำ (absorption) คอนกรีตมวลเบามีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากมีรูพรุนมากกว่า

- การหดตัว (shrinkage) คอนกรีตมวลเบามีการหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 5 ถึง 40% แต่คอนกรีตมวลเบาที่ใช้วัสดุผสมซึ่งเป็นผลิตผลจาก ดินเผา ดินดาน หรือตะกรัน จะหดตัวน้อยลง

- การคืบ หรือการล้า (creep) คอนกรีตมวลเบาอาจล้ามากกว่าคอนกรีตธรรมดา

- ค่าปัวซองเรโช (poison ratio) ของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับคอนกรีตธรรมดา แต่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) จะมีค่าประมาณ 1/2 ถึง 3/4 เท่า ของคอนกรีตธรรมดา เมื่อมีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากัน

- คอนกรีตมวลเบาเก็บเสียงได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่ถ้าดัดแปลงผิวหน้าของคอนกรีตเสียใหม่ แทนที่จะเก็บเสียง คอนกรีตมวลเบานี้จะกลายเป็นฝาสำหรับสะท้อนเสียงได้สูงมากเช่นกัน

- สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาประมาณ 7×10^{-6} ถึง 14×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา

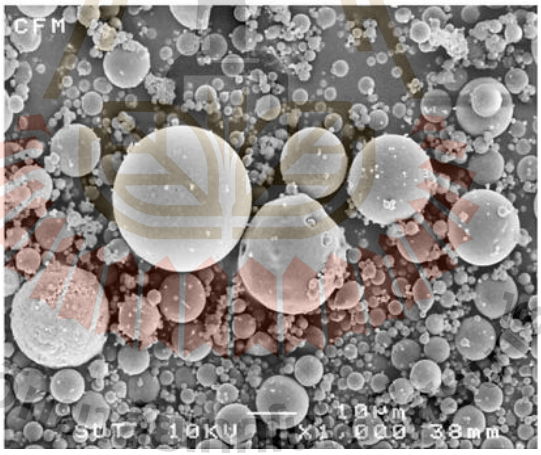
- คอนกรีตมวลเบามีความต้านทานเพลิงไหม้ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

จากข้อมูลของ ACI 213 R-87 (1999) และ วินิต ช่อวิเชียร (2544) เป็นที่น่าสังเกตว่า ดินและดินเหนียว สามารถนำมาเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัวและสามารถนำมาทำวัสดุผสมมวลรวมเบาในการทำคอนกรีตมวลเบาได้ โดยมีรายงานวิจัยสนับสนุนในเรื่องนี้ของ ศิริรัตน์ รัตนจันทร์ (2543) ซึ่งได้ทำการศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมวัสดุเพื่อผสมทำคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบา เพื่อหาความเป็นไปได้ในการเตรียมมวลรวมเบาจากดินที่มีในท้องถิ่น ศึกษาโดยการนำดินไปเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้ขยายตัว เพื่อให้มีรูพรุนขนาดเล็กในโครงสร้างทำให้มีน้ำหนักเบา ซึ่งดินที่นำมาศึกษา คือ ดินในเขตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2 ชนิด ได้แก่ ดินสีแดงและดินสีขาว โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาส่วนผสมและอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสม ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของเม็ดดินเผาและทดลองเบื้องต้นในการเตรียมคอนกรีตมวลเบา จากการศึกษาพบว่ามวลรวมเบาเตรียมได้จากส่วนผสมดินแดงร้อยละ 70 ถึง 90 และเผาที่อุณหภูมิ 1,250°C เมื่อดินผ่านกระบวนการเผาแล้วพบว่ามีการค่าดูดซึมน้ำระหว่างร้อยละ 1.83 ถึง 13.17 ค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง มีค่าระหว่าง 1.31 ถึง 1.99 และหน่วยน้ำหนักระหว่าง 796 ถึง 1,066.73 kg/m^3 ส่วนค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าเท่ากับ 333.66 ถึง 547.6 ksc จึงสามารถ

สรุปได้ว่า ดินเมื่อผ่านกระบวนการเผาจะสามารถขยายตัวได้จริง เมื่อนำมาเป็นวัสดุผสมคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา และมีค่ากำลังอัดที่สามารถนำไปใช้งานได้ ดังนั้นถ้าต้องการเผาวัสดุชนิดอื่นที่ได้จากธรรมชาติ เพื่อที่จะทำการศึกษาการเป็นวัสดุมวลรวมเบาจึงน่าจะมีความเป็นไปได้ แต่ต้องคำนึงถึงราคาต้นทุนในการผลิต และความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานด้วย

2.8 เถ้าลอย

เถ้าลอย(Fly Ash) หรือเถ้าถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิงหลักอย่างหนึ่งในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเมื่อถ่านหินถูกเผาจะกลายเป็นเชื้อเพลิงใช้ในการต้มน้ำจนกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะไปหมุนกังหันไอน้ำ และกังหันไอน้ำจะไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และยังมีวัตถุพลอยได้คือ เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าก้นเตา หรือ เถ้าหนัก (Bottom ash) และยิปซัม เถ้าถ่านหินมีลักษณะเป็นฝุ่นปนไปกับก๊าซร้อน และถูกดักจับด้วยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อแยกฝุ่นออกจากก๊าซร้อนก่อนปล่อยออกจากปล่องควันเหล่านี้จะถูกเก็บไว้ในไซโลก่อนนำไปทิ้งในสถานที่ที่เตรียมไว้ (บุรฉัตรและพิชัย, 2537)



รูปที่ 2.13 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคเถ้าลอย (ธีรวัฒน์ ชัยและปริญญา, 2548)

เถ้าลอยมีลักษณะโดยทั่วไปคือ เป็นฝุ่นผงคล้ายปูนซีเมนต์ มีสีเทาดำ หรือน้ำตาล ดังรูปที่ 2.3 จัดเป็นวัสดุปอซโซลานอย่างหนึ่ง (Pozzolanic materials) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักทางเคมี คือ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นเถ้าลอยจึงมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเมื่อผสมน้ำ เถ้าลอยนิยมนำมาใช้งานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผลสองประการคือ ประการแรก พบว่าเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุ ซิลิกา, อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง

เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็ก และส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหิน หรือทราย ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นและลักษณะทรงกลมของเถ้าลอยจะช่วยให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ดีขึ้น ทำให้การสูบส่งคอนกรีตหรือเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวกและง่ายขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินยังสามารถผสมได้ง่ายและลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมลงได้ เนื่องจากรูปร่างที่กลม และผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้าถ่านหินทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง

การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือ เพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยจะมีข้อเสีย คือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพื่อเพิ่มฟองอากาศมากขึ้น เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอยผสมอยู่

ในทางปฏิบัติจะใช้เถ้าลอยผสมกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารปอซโซลานและจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้กำลังรับแรงที่อายุมากขึ้นดีขึ้น และเนื่องจากเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์และการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้คุณสมบัติด้านความคงทนต่อการทำลายของเกลือซัลเฟตและคลอไรด์ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยมีรูปร่างทรงกลม เมื่อผสมทดแทนปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มความสามารถทำงานได้ของส่วนผสมหรือทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำลดลง ซึ่งทำให้ส่วนผสมมีความทึบน้ำสูงขึ้น และความคงทนดีขึ้นด้วยจึงนิยมใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อนของสภาพแวดล้อม

2.8.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบเคมีหลักเถ้าลอยคือ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 อัตราส่วนออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดขึ้นอยู่กับ ชนิดถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา ASTM C 618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F มีประมาณ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักได้จากการเผาหินชนิดแอนทราไซด์(Anthracite) และบิทูมินัส (Bituminous) และ Class C มีปริมาณออกไซด์ร้อยละ 50 –70 โดยน้ำหนักได้จากการเผาหินสับบิทูมินัส(Subbituminous) และถ่านหินลิกไนต์(Lignite) สำหรับโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นวัตถุดิบในการให้ความร้อน เถ้าลอยที่ได้เป็น

ทั้ง Class F และ Class C เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติและมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีจึงต่างกัน (วราภรณ์ , 2536)

2.8.2 ความละเอียดของเถ้าลอย

โดยทั่วไปเถ้าลอยจะมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อย มีลักษณะรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 μm (0.001 mm) จนถึง 0.15 mm ความละเอียดที่ได้ขึ้นอยู่กับการบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา ถ้าการเผาสมบูรณ์จะได้เถ้าลอยที่มีคุณภาพสูงมีทรงกลม ถ้าไม่สมบูรณ์เถ้าลอยจะมีรูปร่างไม่แน่นอน สำหรับเถ้าลอยในประเทศไทยพบว่าความละเอียดของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งทดสอบโดยวิธีของเบลนมีความละเอียดอยู่ในช่วง 2,500 ถึง 3,500 cm^2/g

การวัดความละเอียดของเถ้าลอยมี 2 วิธีคือ วิธีร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 μm) กับวิธีวัดพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักโดยวิธีของเบลน ในสหรัฐอเมริกาใช้วิธีร่อนผ่านแร่งเป็นวิธีมาตรฐานในการกำหนดความละเอียด กล่าวคือ เถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคร่อนผ่านตะแกร่งเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยที่มีความละเอียดจะมีความไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าเถ้าลอยที่หยาบ โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (strength activity index) ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$\text{ดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์} = (A/B)\times 100 \qquad (2.5)$$

โดย A = กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20
B = กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานซึ่งไม่มีเถ้าถ่านหินในส่วนผสม

มาตรฐาน ASTM C 618 ได้กำหนดค่าดัชนีกำลังของเถ้าถ่านหินทั้ง Class F และ Class C ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่อายุ 7 หรือ 28 วัน

2.8.3 ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย

ความสามารถของเถ้าลอยในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน จะขึ้นอยู่กับความละเอียดและคุณสมบัติของเถ้าลอย เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบที่มีสถานะที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) อยู่ประมาณร้อยละ 70 – 80 โดยเถ้าลอยที่ละเอียดจะมีความไม่เป็นผลึกสูงกว่าเถ้าลอยที่หยาบ เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดต่ำ นอกจากนี้เถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำสามารถ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พัฒนากำลังได้เร็วเช่นกัน ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้เป็นแคลเซียม ซิลิเกรตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 – 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น

2.8.4 ประโยชน์ของเถ้าลอยในงานคอนกรีต

1) ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจากกรด เนื่องจากในปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดสารเชื่อมประสานและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งหากคอนกรีตสัมผัสกับกรดไฮโดรคลอริคหรือกรดซัลฟูริค ก็จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับกรดไฮโดรคลอริคหรือกรดซัลฟูริค ดังนี้ (สมชัย, 2542)

$$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaSO_4 + 2H_2O \qquad (2.11)$$

$$HCl + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCl_2 + 2H_2O \qquad (2.12)$$

ซึ่งสารประกอบ $CaSO_4$ จะตกตะกอนกลายเป็นยิปซัม (Gypsum) อยู่บนผิวคอนกรีต ทำให้ถูกชะล้างได้ง่าย ส่วนสารประกอบ $CaCl_2$ จะกลายเป็นผลึกเกลือคลอไรด์สะสมอยู่ในโพรงของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทำให้เกลือดังกล่าวสามารถละลายได้ จากสาเหตุดังกล่าวเมื่อนำเถ้าลอยมาใช้ในคอนกรีตทำให้ $Ca(OH)_2$ ที่มีอยู่ลดน้อยลง และสาเหตุอีกประการหนึ่งคือเถ้าลอยมีอนุภาคส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมเมื่อใช้ผสมคอนกรีตทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น จึงสามารถลดการกัดกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ผสมเถ้าลอย

2) ลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในงานที่ใช้คอนกรีตเป็นปริมาณมากๆ ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะสูง ดังนั้นเมื่อใช้เถ้าลอยผสมในคอนกรีต ความร้อนสะสมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์จะลดลงเพราะปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้น้อยลง และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยก็จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้ลดโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวจากผลของความร้อน

3) เพิ่มกำลังของคอนกรีตในช่วงระยะปลาย การพัฒนากำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นได้ต้องมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ดังนั้นเมื่อปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นก็จะทำปฏิกิริยาเคมีกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่ในเถ้าลอยอย่างช้า ๆ ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นจากเดิม จึงทำให้ความแข็งแรงในระยะยาวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้น พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาจะลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น แต่สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์พบว่า เมื่อปริมาณเถ้าลอยแทนที่ในซีเมนต์มากขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดามีค่าเพิ่มขึ้น และพบว่าเถ้าลอยแม่เมาะสามารถใช้แทนที่ในซีเมนต์ได้สูงสุด ประมาณร้อยละ 39 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมซีเมนต์ที่เหมาะสมจะเท่ากับ 0.42 ถ้าใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์เกินกว่าร้อยละ 39 จะทำให้กำลังอัดลดลงทันที การใช้เถ้าลอยลิกไนต์แทนที่ในซีเมนต์สูงร้อยละ 35 ที่ระยะเวลาการบ่มชื้น 28 วัน พบว่า อัตราส่วนกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตธรรมดามีค่าเท่ากับร้อยละ 83.1 และจากการศึกษายังพบว่า สามารถใช้เถ้าลอยลิกไนต์แทนที่ในซีเมนต์สูงถึงร้อยละ 35 ในการนำไปผลิตคอนกรีตในงานชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ

4) เพิ่มความสามารถในการเทได้ เนื่องจากเถ้าลอยส่วนใหญ่มีรูปร่างกลมขนาดระหว่าง 5-40 ไมครอน ดังนั้นเมื่อนำเถ้าลอยมาผสมคอนกรีตจึงทำให้ซีเมนต์เพสต์สามารถไหลได้ง่ายขึ้น กลไกสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้เถ้าลอยเพิ่มความสามารถในการเทได้ คือ อนุภาคเถ้าลอยในส่วนที่มีขนาดเล็กกว่าจะจับอยู่ที่ผิวของเม็ดปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดเป็นชั้นบางๆ ส่งผลให้อนุภาคของปูนซีเมนต์อยู่ห่างกันจึงสามารถไหลได้ง่ายขึ้น พบว่า การที่เถ้าลอยมีปริมาตรมากกว่าปูนซีเมนต์ที่น้ำหนักเท่ากันมีผลทำให้ซีเมนต์เพสต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีความสามารถในการเทได้มากขึ้น

5) ลดการหดตัวแบบแห้งจากการสูญเสียน้ำ การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต (Dry Shrinkage) เป็นผลมาจากซีเมนต์เพสต์เกิดการสูญเสียความชื้น คอนกรีตที่มีอัตรส่วนของน้ำต่อสารเชื่อมประสานมากย่อมเกิดการหดตัวแบบแห้งได้มาก (วราภรณ์, 2536) เถ้าลอยเมื่อนำมาใช้ผสมแทนปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตลดลงที่ความสามารถในการเทได้เท่าเดิม ทำให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีความหดตัวแบบแห้งลดลง แต่การที่เถ้าลอยมีปริมาตรมากกว่าปูนซีเมนต์ที่น้ำหนักเท่ากันทำให้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีผลทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นได้

2.9 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียด(Fine Aggregate) หรือทราย (sand) ไดแก่ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือ สามารถผ่านตระแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือผ่าน

ตระแกรง มาตรฐานเบอร์ 200 ในทางธรณีวิทยาถูกจัดให้เป็นตะกอน (Sediments) ชนิดหนึ่งมีลักษณะร่วนหรือยังไม่แข็งตัวเป็นหิน เกิดจากการผุพังของหินต้นกำเนิดที่มักมีแร่ควอร์ตเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เช่น หินแกรนิตหรือตระกูลแกรนิต หินทราย และหินกรวดมน เป็นต้น หินแกรนิตนอกจากมีแร่ควอร์ตเป็นองค์ประกอบแล้ว ยังมีแร่เฟลด์สปาร์เกิดร่วมอยู่ด้วย แต่แร่ทั้งสองนี้มีอัตราการผุผังที่แตกต่างกันมาก คือ ในกรณีที่มีน้ำเป็นตัวกลาง แร่เฟล์สปาร์ ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็นแร่ดิน ที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นและหลุดลอยไปกับน้ำได้ง่าย ส่วนแร่ควอร์ตซ์ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ

2.9.1 ชนิดของทราย

ทรายเกิดขนเองตามธรรมชาติโดยการแปรรูปหรือการกะเทาะแต่สวนมาจากหิน และกรวดทรายที่ขุดได้บนพื้นดินเรียกว่า ทรายบก ที่เกิดจากลำธารแม่น้ำ เรียกว่า ทรายแม่น้ำ ที่เกิด จากทะเลเรียกว่า ทรายนาเค็ม ทรายที่นิยมนำมาใช้เป็นสวนผสมคอนกรีตในงานก่อสร้างมี 2 ชนิด คือ ทรายบกและทรายแม่น้ำ

1) ทรายบก เกิดจากหินทรายที่แตกแยกชำรุดออกมา เป็นเม็ดทรายละเอียด ตามสภาพภูมิอากาศสิ่งแวดล้อม และจะฝังจมอยู่ในพื้นดินเป็นแห่ง ๆ ทรายชนิดนี้จะมีดิน ซากพืช และซากสัตว์ปะปนอยู่ด้วย ในการใช้งานจึงต้องนำทรายมาล้างแยกดินซากพืชและซากสัตว์ออกให้ สะอาด การผลิตทรายบกแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ

- ผลิตโดยการเปิดหน้าดินด้วยรถตักดินจนถึงระดับน้ำใต้ดินจนมีสภาพเป็นแอ่งน้ำขนาดใหญ่แล้วจึงนำเรือมาดูด หรือใช้รถตักทรายขึ้นมาผ่านตะแกรงเพื่อแยกกรวดออก

- ผลิตโดยการใช้เครื่องจักรในการผลิตทราย โดยอาศัยการเปิดหน้าดินเหมือนวิธีแรก หลังจากนั้น จะผ่านขั้นตอนและเครื่องจักรต่างๆ

2) ทรายแม่น้ำ ทรายชนิดนี้มีอยู่ทั่วไปในที่ราบลุ่มของแม่น้ำเกิดจากกระแสน้ำ ได้พัดพาทรายจากที่ต่างๆ มาตกตะกอนรวมกันในแหล่งที่ราบลุ่ม เป็นทรายที่นิยมนำไปใช้ในการก่อสร้าง เพราะเป็นทรายที่สะอาด เม็ดมีเหลี่ยมมีมุมขนาดต่างๆกันเมื่อผ่านตะแกรงร่อนแล้ว นำไปใช้ในการก่อสร้าง เช่น งานโครงสร้าง งานปูนฉาบ ปูนก่อ ส่วนทรายแม่น้ำที่มีส่วนผสมของ สารอินทรีย์มาก มีสีดำปนสีน้ำตาลเข้ม ใช้ในการก่อสร้างไม่ได้แต่นิยมนำมาใช้โรยบนหน้าดิน ก่อนทำสนามหญ้า และใช้ถมที่ดินเพราะมีราคาถูกเรียกว่า ทรายขี้เป็ด

2.9.2 ขนาดของทราย

ทรายในอุตสาหกรรมการก่อสร้างคือวัตถุผสมละเอียดที่มี่ มีขนาดผ่านตะแกรงร่อน 4.75 มิลลิเมตรเม็ดทรายมีลักษณะแข็งแกร่ง ทนทาน มีเหลี่ยมคม ไม่ขยายตัวมาก และมีสารประกอบอื่น เจือปนอยู่น้อยโดยทรายที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์จะเรียกว่าวัสดุผสมมวลรวมละเอียดมีขนาด 0.5 - 4.75 มิลลิเมตร

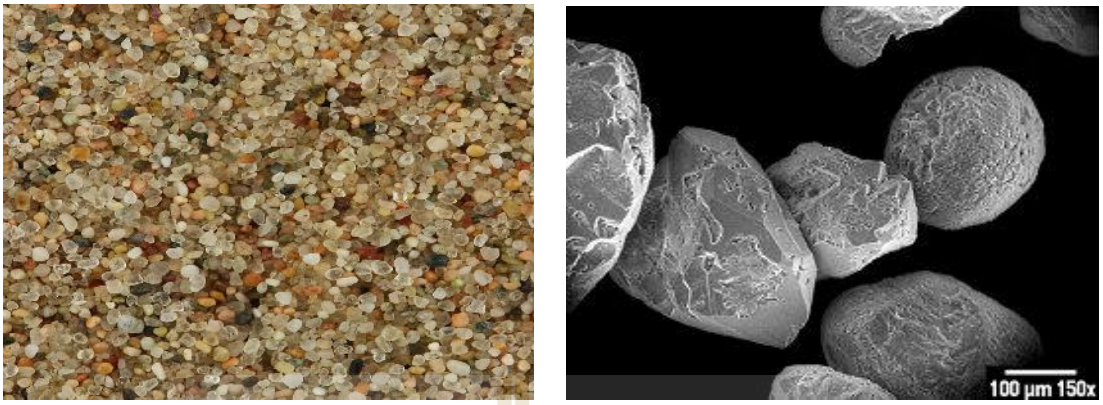
1) ทรายละเอียด เป็นทรายเม็ดละเอียดมาก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 - 1.5 มิลลิเมตร มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus F.M.) ที่ 1.2-1.4 มีความละเอียดมาก นอกจากนี้ยังมีค่าผลทดสอบค่าซิลิกา จากกรมทรัพยากรธรณี สูงถึงกว่า 91% เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องใช้กำลังมากนัก เช่น งาน นำมาเป็นส่วนผสมของปูนฉาบผิวหน้า งานฉาบที่ต้องการความละเอียดมาก ทำบัว ทำลวดลายต่างๆ ปูนก่อ ปูนฉาบ ปูนถือ ทำทรายบังเกอร์สนามกอล์ฟ สามารถนำไปใช้ใน หรือทำอิฐมวลเบา งานหินทายเทียม งานหล่อปฏิมากรรมนูนสูง เป็นต้น

2) ทรายกลาง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 - 3.0 มิลลิเมตรใช้ในงานคอนกรีต ปูนก่อสร้างที่ต้องรับแรงอัด ปูนฉาบผนังใต้ดิน พื้น คาน และไม่นิยมใช้ในการผสมคอนกรีตที่รับน้ำหนักมาก มีสีอ่อนกว่าทรายหยาบ

3) ทรายหยาบ เป็นทรายเม็ดใหญ่ มีเหลี่ยม แง่มุม แข็งแรงดี มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2-4.75 มิลลิเมตร มีค่า FM ความหยาบประมาน 2.6-3.0 จัดว่าความหยาบอยู่ในระดับที่เหมาะสม(งานคอนกรีที่มีค่า FM ที่2.25-3.25) อย่างยิ่งสำหรับงานก่อสร้าง หรือใช้เป็นส่วนผสมงานคอนกรีตทั่วไปที่ต้องการรับน้ำหนักมากงานคอนกรีตเทพื้น ฐานราก งานที่ต้องการกำลังอัดคอนกรีตที่สูง เช่น โครงสร้างสะพาน อาคารที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ฐานราก เขื่อนกั้นดิน เป็นต้น

นอกจากทรายยังเป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปแล้ว สำหรับการวิจัยการเลือกใช้วัสดุผสมชนิดนี้มีส่วนสำคัญที่จะช่วยให้ได้มอร์ต้าร์ที่ดี กล่าวคือ ทรายมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ สัดส่วนของการผสมและในด้านความประหยัด ทรายที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมของมอร์ต้าร์ต้องมีลักษณะ สะอาด แข็งแกร่ง ทนทาน มีเหลี่ยมคม ไม่ขยายตัวมาก มีสารที่ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพต่อมอร์ต้าร์น้อยที่สุด ทรายเป็นวัสดุผสมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม หรือสามารถเล็ดลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ทั้งนี้ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.070 มม ดังแสดงในรูปที่ 2.12

ทรายมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติม์ต้าจะใช้ทรายคละขนาด(Graded Standard Sand) ตามที่ระบุไว้นมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 12 ASTM C778 และ คุณสมบัติบางอย่างของปูนซีเมนต์มีข้อกำหนดให้วัดด้วยการทดสอบมอร์ต้าร์ ซึ่งคุณสมบัติของมอร์ต้าร์จะขึ้นอยู่กับชนิดของทรายที่ใช้ผสม(Maneralzone, 2015)



รูปที่ 2.14 ขนาดอนุภาคเม็ดทรายละเอียดกับอนุภาคโดยการถ่ายภาพ SEM (Maneralzone, 2015)

2.9.3 การใช้ประโยชน์จากทราย

การใช้ประโยชน์จากทรายภายในประเทศส่วนมากใช้เป็นวัสดุก่อสร้างประมาณร้อยละ 80 ของประมาณการใช้ทรายทั้งหมด ที่เหลืออีกร้อยละ 15 ใช้ในการอุตสาหกรรม และร้อยละ 5 เพื่อการใช้ประโยชน์อย่างอื่น คุณสมบัติของทรายเพื่อการใช้ประโยชน์ต่างๆ สามารถสรุปได้ ดังนี้

1) ทรายก่อสร้าง เป็นวัสดุประกอบที่มีประโยชน์ในงานก่อสร้างหลายๆ ด้านได้แก่ งานคอนกรีต งานปูนก่อ งานปูนฉาบ เป็นต้น ทรายที่มีความเหมาะสมเพื่อการก่อสร้างต้องเป็นทรายที่สะอาด มีเม็ดทรายที่แข็งทนทานต่อการสึกกร่อนและผุผัง มีมลทินหรือสารประกอบอย่างอื่นอยู่น้อยมาก โดยทั่วไปทรายที่ใช้เพื่อการก่อสร้างจะต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้น เช่น รูปร่างของเม็ดทราย ขนาดของเม็ดทราย ลักษณะของเนื้อทรายโดยรวม การเกาะกลุ่มและการเชื่อมประสานกันของเม็ดทราย สีของทรายและการปนเปื้อนของแร่อื่นๆ เป็นต้น

2) ทรายถม ปกติทรายที่ใช้ในการถมที่มักไม่กำหนดมาตรการที่เข้มงวด ยกเว้นในงานถมที่มีลักษณะเฉพาะและพิเศษ เช่น การก่อสร้างสนามบิน และอาคารในพื้นที่ลุ่ม ซึ่งต้องการวัสดุที่ระบายน้ำได้ดี

3) ทรายเพื่อใช้ในการอุตสาหกรรม จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติทั้งทางเคมีและฟิสิกส์เป็นอย่างมาก โดยทั่วไปผู้ประกอบการอุตสาหกรรมจะเป็นผู้กำหนดคุณสมบัติเหล่านี้ ทรายในอุตสาหกรรมของไทยส่วนมากใช้ในการทำแก้วและกระจกต่างๆ นอกจากนั้น มีการนำไปใช้ทำแบบหล่อหรือแบบพิมพ์ ใช้ในการกรอง การขัดสีหรือขัดมัน การฉาบผิว ใช้ในอุตสาหกรรมทำสี ทำอิฐ และอื่นๆ (วินิต, 2544)

2.10 สรุปปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cadance,2015 ได้ทำการศึกษาปูนซีเมนต์ขาว เทคโนโลยีที่ลดค่าความร้อนและค่าเชื้อเพลิง กล่าวว่าปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ (White ordinary Portland cement :WOPC) มีความคล้ายกับปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์สีเทาธรรมดา (Ordinary Portland cement :OPC) ทุกประการยกเว้นความระดับความขาวกว่า การได้สีนี้จำเป็นต้องมีการดัดแปลงเป็นอย่างมากกับวิธีการผลิตในการผสมแบบดิบ และการทำปิโตรเคมีเนื่องจากมีส่วนผสมของเหล็กต่ำ ส่วนเตาเผาปูนซีเมนต์ขาวมีการทำงานที่มากกว่า อุณหภูมิสูงที่ใช้การผลิกกว่าปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ธรรมดา(สีเทา) ผลที่ใช้เชื้อเพลิงที่สูงขึ้น และยังส่งผลให้ออกไซด์ของไนโตรเจนสูงขึ้นตาม นอกจากนี้เตาเผาปูนซีเมนต์ขาว จะต้องรักษาบางส่วนไว้เพื่อการลดสภาพในถาดแร่ในเขตการเผาไหม้ ให้แน่ใจว่าการลด ธาตุไอเอิร์นออกไซด์ 203(Fe 203) ให้ไปเป็นธาตุเหล็ก FeO + CO เสร็จสมบูรณ์

ไอเอิร์นออกไซด์(FeO) เป็นสารเคมีที่สำคัญที่ทำให้ซีเมนต์สีเทาสีอ่อน ด้วยข้อบังคับระเบียบที่เข้มงวดมากขึ้นเกี่ยวกับการปล่อยมลพิษของการผลิตซีเมนต์ ทางบริษัทได้มีการใช้จ่ายเงินสำหรับการลดการปล่อยมลพิษโดยใช้เทคโนโลยีเข้ามาจัดการ เช่น Selective Non-Catalytic Reduction : SNCR เพื่อให้การปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of Nitrogen : NOx) ในโครการSNCR มีต้นทุนสูงเนื่องจากต้องใช้เงินทุนจำนวนมากในการลงทุนเริ่มต้นด้วยระบบ SNCR ต้องจัดเก็บท่อและระบบสูบน้ำ การลงทุนนี้อาจต้องใช้เงินหลายล้านดอลลาร์ในตอนแรก นอกจากนี้สารเคมีนั้นเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องอาจเป็นได้ว่าค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่สำคัญสำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหิน นอกจากนี้ สารแอมโมเนียเนียนั้น เป็นความท้าทายอย่างยิ่งสำหรับโรงงานปูนซีเมนต์ มักทำให้เกิดกองวัสดุที่มองเห็นซึ่งอาจทำให้เกิดความห่วงใยด้านสิ่งแวดล้อมจากชุมชนบริเวณที่โรงงานปูนซีเมนต์ตั้งอยู่ สำหรับเตาหลอมที่ใช้เชื้อเพลิงทดแทน เช่น โค้กปิโตรเลียมเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในกำมะถันการระเหยกลายเป็นความกังวลที่ถูกต้องในการดำเนินงานเนื่องจากปริมาณกำมะถันที่สูงขึ้น

Mohammed Ali Abdulrehman, Mais A. Abdulkareem and Ali Abed Salman,2016 ได้ศึกษาการลดควบคุมรอยร้าวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สีขาว ผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของปูนซีเมนต์ขาว โครงสร้างปูนซีเมนต์ขาวสามารถใช้ได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา นักออกแบบและวิศวกรดให้ใช้ปูนซีเมนต์สีขาวภายในผสมคอนกรีตตกแต่งรูปทรงต่างๆ และใช้กับพลังงานด้านสะท้อนความร้อนสูงลดการใช้เครื่องปรับอากาศ สามารถเพิ่มแสงสว่างในอาคารที่เปิดโล่งได้ลดค่าใช้จ่ายในการระบายความร้อน และระบบแสง อัตราส่วนการผสม

เท่ากับ 1: 3 สำหรับ (ปูนซีเมนต์:ทราย)สารเติมแต่ง 3ชนิดได้แก่ ผงหินปูน อัตราส่วนต่อผงหินปูนเป็น (4%, 8%และ 12%) โดยน้ำหนักของส่วนผสมและสารละลายโพลิเมอร์ Carboxymethyl-cellulose; (CMC) เป็น(0.25%, 0.5% และ 1%) โดยน้ำหนักของส่วนผสมและPolyvinyl alcohol ; (PVA) อยู่ที่ (1%, 3% และ 5%) โดยน้ำหนักของส่วนผสม อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์(W/C) คงที่ 0.5 งานวิจัยชิ้นนี้ตรวจสอบความแข็งแรงอัดและการดัดงอ, การดูดซึมน้ำและการอบแห้งการหดตัวได้รับการตรวจสอบของปูนดัดแปลง นอกจากนี้ยังทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยเครื่องอัลตราโซนิค ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ขาวนั้นมีอิทธิพลที่ไม่พึงประสงค์ ผลเสียต่อทั้งทางกลและทางกายภาพสมบัติของปูนซีเมนต์ขาว นอกจากนี้ในการลดรอยแตกของปูนซีเมนต์ขาวปูนมีทิศทางดีขึ้น โดยการใช้สารเติมแต่งพอลิเมอร์เช่น PVAและ CMC ซึ่งโพลิเมอร์ของ CMC มีประสิทธิภาพมากกว่า PVA นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมของการเติมโพลีเมอร์คือ 3%และ 0.25% ของ PVA และ CMC ตามลำดับ

ตารางที่ 2.12 อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนขาวปอตแลนด์

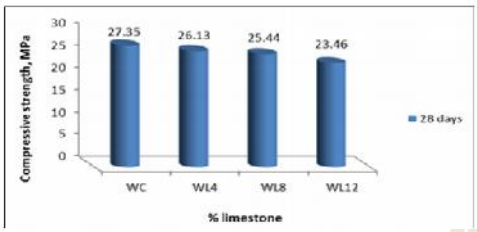
Mix	Cement (kg)	Sand (kg)	Water/cement ratio	Limestone (kg)	PVA (kg)	CMC (kg)
WC	1.00	3	0.5	-	-	-
WL4	0.96	3	0.5	0.04	-	-
WL8	0.92	3	0.5	0.08	-	-
WL12	0.88	3	0.5	0.12	-	-
WP1	0.99	3	0.5	-	0.01	-
WP3	0.97	3	0.5	-	0.03	-
WP5	0.95	3	0.5	-	0.05	
WCC0.25	0.9975	3	0.5	-	-	0.0025
WCC0.5	0.995	3	0.5	-	-	0.005
WCC1	0.99	3	0.5	-	-	0.01

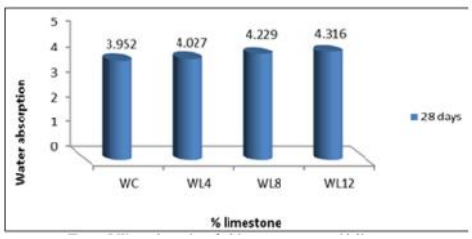
ตารางที่ 2.13 ออกไซค์หลักปูนซีเมนขาวปอตแลนด์

Constituents	% weight	Specification limits of IQS (5:1993) [6]
SiO2	24.03	-
AL2O3	4.75	-
Fe2O3	0.50	-
CaO	68.12	-
MgO	0.77	<5
SO3	2.57	<3
Loss on ignition	3.37	<4
Insoluble residue	0.46	<1.5
Lime saturation factor	0.90	0.66-1.022
Total	100%	-

ผลแสดงรูปที่ 1 อัตราส่วนผสม 1:3 เมื่อปริมาณหินปูนเพิ่ม ทำให้กำลังอัดลดลงการดูดซึมน้ำก็เพิ่มขึ้นทำให้อะตอมของซีเมนต์มอร์ต้าขาวไม่เชื่อมต่อกัน ในรูปที่ 2 และ 3 ตามข้อมูลเหล่านี้ปริมาณสารผสม PVA และ CMC ที่เหมาะสมที่สุดคือ 3% และ 0.25% ตามลำดับกำลังรับแรงอัด

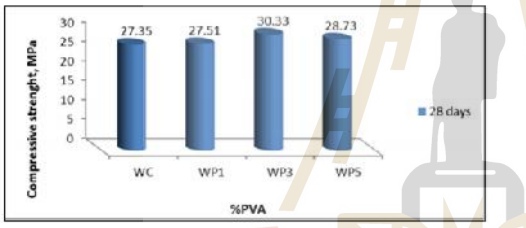
สูงสุด 30.33 MPa นอกจากนี้การดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อโพลิเมอร์ ช่องว่างขนาดใหญ่ในองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ที่ดัดแปลง สามารถปิดโดยคอมโพสิตของพอลิเมอร์ซีเมนต์

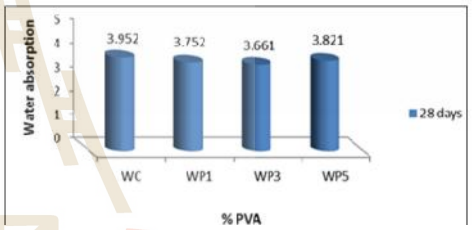




a) กำลังอัดของปูนซีเมนต์ขาวผสมหินปูน b) การดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์ขาวผสมหินปูน

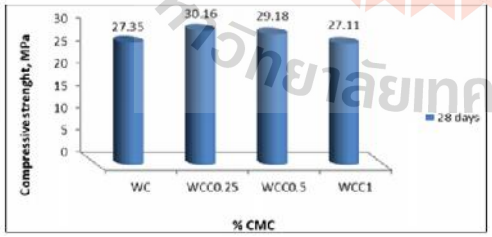
รูปที่ 2.15 กำลังอัดของปูนซีเมนต์ขาวลดลงเมื่อปริมาณหินปูนเพิ่มขึ้น และการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น

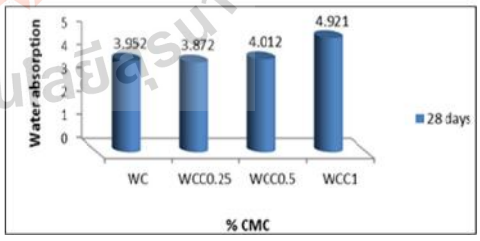




a) กำลังอัดของปูนซีเมนต์ขาวผสม PVA b) การดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์ขาวผสม PVA

รูปที่ 2.16 กำลังอัดของปูนซีเมนต์ขาวเพิ่มเมื่อปริมาณ PVA เพิ่มขึ้น และการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น





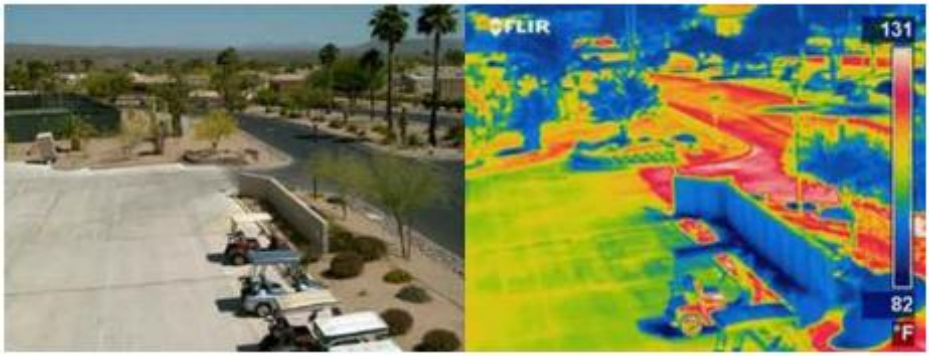
a) กำลังอัดของปูนซีเมนต์ขาวผสม CMC b) การดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์ขาวผสม CMC

รูปที่ 2.17 กำลังอัดของปูนซีเมนต์ขาวเพิ่มเมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้น และการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น

KARTERINA MORESOVA, FRANTISEK SKVARA,2001 ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติปูนซีเมนต์ขาว การผลิต ความคาดหวังกับปูนซีเมนต์สีขาว พบว่าความสามารถของปูนซีเมนต์ขาวปอตแลนด์ มีคุณสมบัติไม่แตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ธรรมดา แต่มีความเหมาะสมในงาน

ก่อสร้างสถาปัตยกรรมเป็นหลัก ด้วยราคา กับจิตนาการที่สามารถถ่ายทอด งานที่ต้องการคอนกรีตสีขาว หรือสีเข้าเข้าไปผสมในคอนกรีต การกระทำเป็นพื้นผิวการตกแต่งของแผงขนาดใหญ่ บล็อก งานซ่อมแซม งานรักษาประติมากรรม และผลิตภัณฑ์อาคารสำหรับตกแต่ง ยังพบปูนซีเมนต์ขาวว่าได้มีการนำมาใช้ซ่อมแซมรอยร้าวในสระว่ายน้ำท่อควบคุมอุทกภัยและโครงสร้างใต้น้ำอื่น ๆ ในมุมมองของการใช้งานที่หลากหลายของสีขาวปูนซีเมนต์นี้ทำให้สามารถสร้างงานทางสถาปัตยกรรม และในทางโครงสร้างที่ใส้มิติทางสีลงไปเกิดประโยชน์ ถึงแม้ในปัจจุบันพยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตที่เหมาะสม เป็นธรรม พร้อมการวิจัยที่สอดคล้องกัน เพื่อการประหยัดพลังงาน และการลดต้นทุนอยู่ในระหว่างการดำเนินการทั่วโลก จากการสำรวจยังพบว่าสามารถผลิตปูนเม็ดสีขาวได้จากวัตถุดิบทั่วไปโดยเน้นวิธี หรือปรับกระบวนการโดยเฉพาะอย่างยิ่งมาขั้นตอนการระบายความร้อนด้วยเม็ดสี ด้วยวิธีนี้เป็นไปได้ผลิตปูนซีเมนต์ขาวที่มีคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่สอดคล้องกันคุณสมบัติและความขาวอย่างเพียงพอโดยไม่ต้องกินพลังงานมากเกินไป ภายใต้กรอบงานวิจัยที่กำลังดำเนินการอยู่ที่ภาควิชาแก้วและเซรามิคของสถาบันของเทคโนโลยีเคมีในปรากมีความเป็นไปได้คือขณะนี้กำลังพิจารณาถึงการใช้ปูนซีเมนต์ปลอดยิปซัมใช้ปูนเม็ดขาวเป็นวัสดุทนไฟมามุมมองของเนื้อหา Fe2O3 ในปูนเม็ดนั้น

Gordana และคณะ,2016 ได้ทำการศึกษาคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาวเป็นองค์ประกอบของการก่อสร้างเกี่ยวกับวัสดุ มีผลที่เกี่ยวกับอุณหภูมิของบรรยากาศที่เกิดการแปลง และขยายตัวอย่างรวดเร็ว พื้นที่วิจัยในการวิจัยขั้นพื้นฐานเป็นผู้กำกับสี องค์ประกอบของวัสดุ และความสามารถในการสะท้อน หรือดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ สีเป็นองค์ประกอบของวัสดุที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิวัสดุที่สัมผัสกับรังสีแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์จะถูกดูดซึม และเข้าสู่บรรยากาศโดยรอบที่ก่อให้เกิดความร้อนสูง และระดับหมอกควันก็มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นก่อให้เกิดมลพิษอีกด้วย คอนกรีตจึงเป็นหนึ่งในวัสดุที่ลดปัญหาข้างต้นของสิ่งแวดล้อม คอนกรีตที่ทำจากซีเมนต์สีขาวเป็นที่นิยมกับสถาปนิกด้วยคุณมันลักษณะบริสุทธิ์และสม่ำเสมอเหมือนกระดาษสามารถนำเสนอสีให้กับอาคารนั้นเกิดประโยชน์ในทางปฏิบัติ ด้านสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมที่ไม่มีขีดจำกัดแสงสีของคอนกรีตปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์เป็นหนึ่งของคุณลักษณะที่สำคัญที่สุดของวัสดุ ปูนซีเมนต์ขาวไม่ได้ถูกนำมาใช้ในงานก่อฉาบเท่านั้น คุณสมบัติของซีเมนต์ขาวไม่แตกต่างกับปูนซีเมนต์ปอตแลนด์(สีเทา)

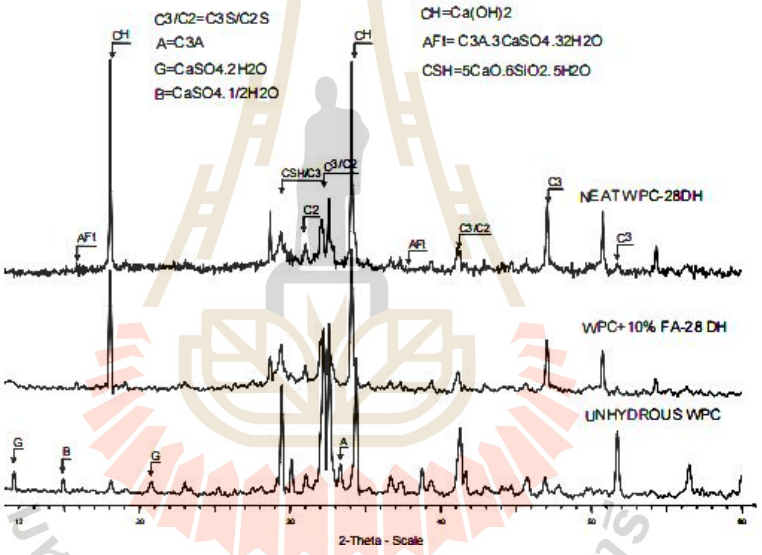


รูปที่ 2.18 อินฟราเรดแสดงให้เห็นว่าแสงสีทางซ้ายที่เป็นคอนกรีตเย็นกว่าถนนลาดยางที่สีเข้ม

สำหรับการสร้างนั้นยังคงปูนซีเมนต์ขาวในงานด้านเคาน์เตอร์พื้น ทางเท้า ก่ออิฐคอนกรีตเฟอร์นิเจอร์ และปูนยาแนวในขณะที่ความสวยงามเป็นปัจจัยหลักของการใช้คอนกรีตสีขาวสะท้อนแสงที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตสีขาวสามารถนำมาใช้เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน และการก่อสร้างอย่างยั่งยืนคอนกรีตสีขาวสามารถสะท้อนแสงลดการใช้พลังงานแสงสว่างภายในโดยประมาณร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตแสงที่สะท้อนช่วยในการมองเห็นและความปลอดภัยสำหรับในงานถนนโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในสภาพอากาศเปียกเพราะสีเทาจะมืดเป็นประโยชน์ด้านการขนส่งคอนกรีตสีขาวลดชายฝั่งทาสีขาวที่สร้างตัวสะพาน และโครงสร้างอื่น ๆ ด้วยเหตุผลด้านความปลอดภัย

ประภาส วันทองและประชุม คำพุฒ (2550) ได้ทำการศึกษากำลังอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยและหินฝุ่นที่มีอายุการบ่มแตกต่างกัน โดยออกแบบส่วนผสมของมอร์ต้าให้มีอัตราส่วนระหว่างวัสดุผงต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก และกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในสัดส่วนประมาณ 0.52 ให้อัตราส่วนของเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ผสมหินฝุ่นแทนทรายร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ตามลำดับ จากนั้นทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่มด้วยน้ำ 7, 14, 21 และ 28 วัน ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด 50 x 50 x 50 มม จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้หินฝุ่นผสมแทนทรายในอัตราส่วนที่สูงขึ้นจะส่งผลให้มอร์ต้าร์มีกำลังอัดสูงขึ้นด้วย และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มกำลังอัดกับอายุการบ่ม พบว่าหินปูนสามารถเพิ่มกำลังให้กับมอร์ต้าร์ในช่วงอายุไม่เกิน 21 วันหลังจากนั้น กำลังของมอร์ต้าร์จะพัฒนาได้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย

R K Singh, S Tripathi, S K Ananthakrishnan and H R Kapoor ได้ทำการศึกษาลักษณะผลทบของปฏิกริยาไฮเดรชั่นของเถ้าลอย (FA) ที่ผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตขาวแลนด์ (WPC) ใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (w / b) ที่ 0.50. โดยน้ำหนัก ใส่เถ้าอย 10% โดยน้ำหนักทดสอบกำลังอัดประลัยที่สอบ 3, 7 และ 28 วัน การเกิดปฏิกริยาไฮเดรชั่นโดยการวิเคราะห์ X-ray ปฏิกริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตขาวแลนด์ (WPC) + เถ้าลอย (FA) การทำปฏิกริยามีความเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตขแลนด์ปกติ(OPC) ยกเว้นปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซต์ Ca (OH) 2 ต่ำจะทำให้การเกิดปฏิกริยาไฮเดรชั่นการก่อปกติช้า กว่าปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ธรรมดา การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ทำการบ่มทั้งหมด การก่อตัวของ Ettringite (AFT)ในปฏิกริยาในช่วงเริ่มต้นทดสอบ X-ray Diffractrometer; XRD



รูปที่ 2.19 X-ray การเลี้ยวเบนแสงของ WPC และ WPC+FA เพิ่ม 10% ปฏิกริยาไฮเดรชั่นที่ 28 วัน

ปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ซึ่งผสมในอัตราร้อยละที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (≈35%) จะถูกแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานนั้นจะช่วยประหยัดพลังงานเป็นอันมาก นอกจากนี้ซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ผสม แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าซีเมนต์ธรรมดาในหลายประการ เช่น ความร้อนที่ลดลง ของปฏิกริยาไฮเดรชั่นในช่วงต้น กับช่วงแข็งแรงที่สูงขึ้นและสามารถความต้านทานการกัดกร่อนทางเคมีในระยะยาวที่ดีกว่าการ การใช้สารเถ้าลอย พื้นทรายตะกรันเตาหลอม, ซิลิกาฟูม ฯลฯ ในปูนซีเมนต์และคอนกรีตขนาดใหญ่ได้รับการยอมรับทั่วโลกว่ามีคุณสมบัติ และประสิทธิภาพอย่างมากในต่อความแข็งแรง ความทนทาน และไปสู่การพัฒนา ช่วยลดการซึมผ่านของซีเมนต์ และคอนกรีต ลดการแตกร้าว คุณสมบัติดังกล่าวให้ความทนทานสูง

การใช้งานของวัสดุปอซโซลานยังสามารถทนซัลเฟตอีกด้วย เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยากับ CH เกิดปฏิกริยาไฮเดรชั่นการผลิตเจล CSH ภายในปูนซีเมนต์เจล CSH ช่วยเพิ่มแรงอัดและจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ฟิสิกซ์เชิงกลของการปรับเปลี่ยนปูนซีเมนต์ให้เพิ่มขึ้นและวิเคราะห์ X-ray Diffractometer; XRD ยืนยันว่าแคลเซียมไฮดรอกไซ [CH] ถูกรวมตัวโดยเถ้าลอยเป็นสารเติมต็มในช่องว่าปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.14 ความแข็งแรงของซีเมนต์ขาวร้อยละที่แตกต่างกันของสารเติมแต่ง

Name of additives	Content (Mass %)	Compressive Strength [MPa] (Age in days)		
		7 days	28 days	90 days
Neat Cement	0	44.5	58.2	68.7
FA	2	39.5	62.0	73.2
	5	42.7	64.5	81.5
	10	44.0	65.8	83.1

ดังตารางที่ 1 แสดงค่าของแรงอัดของปูนซีเมนต์ขาวเป็น 44.5, 58.2 และ 68.7 MPa ตามลำดับที่ 7, 28 และ 90 วัน. ผลของความแข็งแรงขึ้นอยู่กับลักษณะและปริมาณของสารเติมแต่งที่ผสมในซีเมนต์. รูปแบบในความแข็งแรงของซีเมนต์ 2.0 ถึง 10.0% ของเถ้าลอยโดยน้ำหนัก

สุวิทย์ วิทยาจักษุ์ และ สนไชย ฤทธิโชติ (2554) ได้ศึกษาการทำหินเทียมที่ได้ทำการผลิตขึ้นมีทั้งหมด 5 Treatment 3 Replication รวมทั้งหมดมี 15 หน่วยทดลอง (1หน่วยทดลองต่อ 1 ก้อน) คือ treatment ที่ 1 ปูนซีเมนต์ผสมทรายละเอียดอัตราส่วน 1 : 3 และปูนซีเมนต์ผสมทรายละเอียดผสมดิน อัตราส่วน 1 : 2 : 1 ธรรมชาติ จำนวน 4 ชนิด ได้แก่ Treatment ที่ 2 ชุดดินฝั่งแดง (ดินสีแดง) Treatment ที่ 3 ชุดดินหนองคล้า (ดินสีส้ม) Treatment ที่ 4 ชุดดินท่าใหม่ (ดินสีแดงม่วง) และ Treatment ที่ 5 ชุดดินสิงห์บุรี (ดินสีดำ) โครงสร้างภายในหินเทียมทุกก้อนจะเป็นโครงเหล็กเส้นขนาด 2 หุน คลุมด้วยลวดตาข่าย (โครงไก่) 2 ชั้น ยึดด้วยผูกหินเทียมที่ได้จะมีขนาด ความกว้าง 0.35 เมตร ความยาว 0.57 เมตร ความสูง 0.22 เมตร และความหนา 0.02 เมตร ในการตกแต่งผิวสัมผัสของหินเทียมทุกก้อนใช้วิธีลอกลายหินธรรมชาติด้วยน้ำยางพารา และนำมาคลุมหินเทียมเพื่อลอกลายลงบนหินเทียม ในการทดสอบพบว่า หินเทียม Treatment ที่ 5 มีน้ำหนักมากสุด 18.76 กิโลกรัม ขณะหินเทียมที่มีขนาดน้ำหนักเบาสุด คือ Treatment ที่ 1 มีน้ำหนัก 15.96 กิโลกรัม ซึ่ง

แปรผกผันกับความสามารถในการรับน้ำหนักหินเทียม Treatment ที่ 1 รับน้ำหนักได้มากที่สุด 1,212 กิโลกรัม และหินเทียม Treatment ที่ 5 รับน้ำหนักได้น้อยสุด 462.66 กิโลกรัม การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีหินเทียมโดยการเปรียบเทียบกับสีมาตรฐานจากสมุดเทียบสี Munsell soil color charts สีของดินเมื่อผสมกับซีเมนต์และทรายแล้วจะมีสีอ่อนลง และเมื่อหินเทียมที่ผลิตแห้งสีจะอ่อนลงอีก สีของหินเทียมก่อนการแช่น้ำทุก Treatment จะมีสีสดและหลังแช่น้ำสีหินเทียมเปลี่ยนไปทางโซนสีเทาโดยที่น้ำที่แช่หินเทียมมีเปลี่ยนแปลงซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่า pH น้อยมากและหลังจากแช่น้ำไปประมาณ 5-7 วัน แล้วค่า pH ของน้ำกลับสู่ค่าปกติในการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้กับสีของหินเทียมพบว่า ผู้ใช้พึงพอใจของสีหินเทียมใน Treatment ที่ 4 มากที่สุดและมีความพึงพอใจในหินเทียมที่ผสมสีของดินใน Treatments อื่นๆลดหลั่นลงมา และเมื่อเปรียบเทียบกับหินเทียมที่ไม่ผสมสีแล้ว ผู้ตอบแบบสำรวจมีความพึงพอใจในหินเทียมที่ผสมสีของดินมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด การศึกษาต้นทุนการผลิตต่อก้อนรวมค่าแรง พบว่า Treatment ที่ 1 มีต้นทุน 132.80 บาท Treatments ที่ 2, 3, 4 และ 5 มีต้นทุน 127.40 บาท

Verstrynge, E., L. Schueremans and D. Van Gemert (2012) ได้ทำการศึกษาการทำนายการคืบและการวิบัติของหินทรายธรรมชาติ พร้อมสร้างแบบจำลองและแนวทางการซ่อมแซมหอระฆังเก่า โดยทำการศึกษาหินทรายธรรมชาติ 2 แบบ คือ หินทรายธรรมชาติปน Diestian และหินทรายธรรมชาติปน Brusselian ทำการเจาะตัวอย่างทดสอบด้านกำลังอัด ความหนาแน่น ความพรุน และทำนายระยะเวลาการคืบ พบว่า หินทรายธรรมชาติทั้งแบบปน Diestian และแบบปน Brusselian มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 13 และ 7 MPa ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2070 และ 1957 kg/m3 ค่าความพรุนมีค่าเท่ากับร้อยละ 28.4 และ 27.4 โดยปริมาตร เมื่อทำการจำลองรูปแบบ 3 มิติของโครงสร้างเพื่อหาลักษณะการคืบของโครงสร้างหอระฆัง พบว่า ลักษณะส่วนประกอบของแร่ธาตุภายในของหินธรรมชาติ มีผลต่อการคืบเกิดเป็นลักษณะวนซ้ำๆ จึงต้องหาวัสดุทดแทนแนวใหม่สำหรับใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมหินทรายให้เหมือนลักษณะคงเดิม

Barr, S., McCarter, W.J. and Suryanto, B., (2015) ได้ทำการศึกษาแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ต้าร์หินทรายจากวัสดุปูนไลม์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ธรรมชาติ โดยใช้ปูนไลม์ไฮดรอลิกแทนที่ปูนซีเมนต์ธรรมชาติ ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 3.5, 5 และใช้เพียงปูนซีเมนต์ธรรมชาติล้วน 100 % ศึกษาอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดที่ 1 : 2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ 1.52, 1.16, 1.04 และ 0.69 บ่มตัวอย่างทดสอบตั้งแต่อายุ 7 – 28 วัน จากนั้นทำการทดสอบการยึดเหนี่ยว, กำลังอัด, กำลังดัด และการดูดซึมน้ำ พบว่า กำลังอัดของมอร์ต้าร์หินทรายเป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่าความเครียด การใช้ปูนไลม์ไฮดรอลิกในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มกำลังการยึดเหนี่ยวของมอร์ต้าร์หินทราย โดยมีค่ากำลังดัดที่สูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ธรรมชาติผสม ค่ากำลังอัดและ

กำลังดัดเพิ่มขึ้น 0 – 4 % มีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 4 นอกจากนี้ควรปรับอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดขึ้นเป็นอัตราส่วน 1 : 2.5 และ 1 : 3 ให้เหมาะสมกับอัตราส่วนมาตรฐาน

ปิญชาน์ ต่อกิตติกุล และ ทนงศักดิ์ โนไชยา (2558) ได้ทำการศึกษาค่ากำลังอัด ค่าความหนาแน่น และค่าการนำความร้อนของมอร์ต้าร์ ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าหนัก จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้าหนักเป็นวัสดุทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 50 และ 100 โดยปริมาตร ซึ่งจะควบคุมให้เถ้าหนักมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเป็นแบบเดียวกันกับทราย จากผลการทดลองพบว่า ค่ากำลังอัดและค่าความหนาแน่นของมอร์ต้าร์ลดลงเมื่อผสมเถ้าลอยและเถ้าหนัก โดยมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้าหนักทดแทนทรายร้อยละ 100 โดยปริมาตร ที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 23.4 เมกะปาสคาล และมีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 1.78 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ การใช้เถ้าหนักทดแทนทราย อาจส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของมอร์ต้าร์ลดลงด้วยเช่นกัน โดยมอร์ต้าร์ที่ไม่ผสมถ้าลอยและใช้เถ้าหนักทดแทนทรายร้อยละ 100 มีค่าการนำความร้อนลดลงร้อยละ 73.0 สำหรับมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 การใช้เถ้าหนักทดแทนทรายร้อยละ 100 มีค่าการนำความร้อนลดลงร้อยละ 71.1 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ควบคุม

แสงสุรีย์ พังแดง, วันชัย สะตะ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2558) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากดินขาวเผาที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวในส่วนผสมที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่าเนื้อจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวซึ่งสอดคล้องกับการพรุนตัว (Porosity) ตามวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) ปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมที่ร้อยละ 50 และทำให้วัสดุจีโอโพลีเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด นอกจากนั้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวในวัสดุจีโอโพลีเมอร์ทำให้องค์ประกอบทางแร่ของจีโอโพลีเมอร์มีการเปลี่ยนแปลง โดยพบการเกิดตัวของผลึกของสารประกอบแคลเซียม ได้แก่ ปอร์ตแลนไดต์ (Portlandite) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และสารประกอบสัณฐานของโซเดียมอะลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) และมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ขาวล้วนและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวทำปฏิกิริยา สามารถให้วัสดุที่มีความสามารถรับแรงอัดได้ดี

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้สารปอซโซลานธรรมชาติอย่างเถ้าลอยแม่เมาะ มาปรับปรุงคุณสมบัติพื้นฐานของหินทรายเทียมมวลเบา ให้มีผิวพื้นใกล้เคียงหินทรายธรรมชาติ การวิจัยในครั้ง

นี้แต่ละส่วนผสมจะใช้วัสดุหลักเป็นปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ต่อทรายละเอียดอัตราส่วนผสมควบคุมที่ 1 : 3 โดยน้ำหนักทุกอัตราส่วนผสม และแทนเถ้าลอย(Fly Ash) ที่ร้อยละ 5, 15, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (w/c) เท่ากับ 1.0, 1.2, 1.3 และ 1.4 ทุกอัตราส่วนผสมทั้งในอัตราส่วนควบคุม พร้อมเทคโนโลยีมวลเบา และอัตราส่วนวิจัย บ่มชื้นที่อุณหภูมิห้องทดลองปกติโดยใช้พลาสติกคลุมครบอายุที่ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ครบอายุนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกล เช่น กำลังอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การสึกกร่อน และทางกายภาพ ทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคภายในของตัวอย่างหินทรายเทียมมวลเบาที่แข็งตัวแล้วด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีความละเอียดสูง งานวิจัยนี้เพื่อลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ขาวปอตแลนด์ลงด้วยเถ้าลอย(Fly Ash) เพื่อให้เกิดประโยชน์ในการผสม และนำมาประยุกต์ในการดำเนินงานวิจัยต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ รวมการศึกษาวิธีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ทางกล และทางกายภาพ การศึกษานี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1) การการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

2) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัย

3) การทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของหินทรายเทียมมวลเบา เช่น กำลังอัด, ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความทนทานต่อการสึกกร่อน โครงสร้างทางจุลภาค และการแต่งผิวชิ้นงานด้วยกรดเกลือ(hydrochloric acid ;HCL)

3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

3.2.1 วัสดุที่ใช้ทำงานวิจัย

1) ปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ (White Portland Cement) ตราช้าง

2) เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 618

3) ทราย (Fine Aggregate) เป็นทรายละเอียดแม่น้ำภายในเขตอำเภอพิมายจังหวัดนครราสีมา ทำการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 33

5) สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์(synthetic foaming agent)

6) น้ำ (Water) ใช้น้ำประปาภายในจังหวัดนครราชสีมา

7) กรดกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid ;HCl) หรือกรดกลือ

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1) เครื่องทดสอบกำลังอัดอ่านค่าแบบตัวเลข (Universal Testing Machine 500 Ton)

2) แบบหล่อมาตรฐานสำหรับหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 50 มม x 50 มม x 50 มม

3) แบบหล่อตัวอย่างแบบปั้นลอยนูน สร้างจากปูนพลาสเตอร์

4) ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C188

5) ชุดทดสอบใช้วิธีการตะแกรงร่อนให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM C 136

6) เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ละเอียด 0.01 กรัม

7) ตู้อบปรับอุณหภูมิ 105˚C - 110˚C

8) เครื่องผสมคอนกรีต (Mixing Machine)

9) เครื่องลอสแองเจลิสสำหรับทดสอบการขัดสีของหินทรายธรรมชาติ (Los Angeles Abrasion Machine)

10) เครื่องอัดอากาศทำโฟมมวลเบา

3.3 การเตรียมวัสดุและหล่อก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.1 การเตรียมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว (White Portland Cement)

1) นำปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์มาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ทุกครั้งก่อนการใช้งาน และควรเลือกปูนซีเมนต์ขาวใหม่ที่ผลิตจากโรงงาน(หากเป็นไปได้) และเลือกซื้อในกลุ่มเดียวกัน

2) ก่อนที่จะนำปูนซีเมนต์มาใช้ในการทดสอบ ควรหอด้วยถุงพลาสติกให้มิดชิด จัดเรียงให้เป็นระเบียบ เพื่อป้องกันความชื้นตามมาตรฐานกระทรวงโยธาธิการ และผังเมือง

3) ปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ที่จะนำมาทดสอบนั้น ควรที่จะเป็นกลุ่มเดียวกันและเพียงพอในการทดสอบของงานวิจัย ป้องกันความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบอันเกินจากวัสดุคนละชุด หรือกลุ่ม

3.3.2 การเตรียมเถ้าลอย (Fly Ash)

1) เถ้าลอยแม่เมาะ จัดอยู่ในคุณภาพชั้น C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูง จากแหล่งโรงไฟฟ้าถ่านหิน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ควรนำมาใช้ในการทดสอบกลุ่มเดียวกัน

2) เถ้าลอยควรหอด้วยถุงพลาสติกให้มิดชิด จัดเรียงให้เป็นระเบียบ เพื่อป้องกันความชื้นก่อนนำมาทดสอบ การจัดเก็บให้เป็นไปตามมาตรฐานกระทรวงโยธาธิการ และผังเมือง

3.3.3 ทรายละเอียด (Sand or Fine Aggregate)

1) ทราย ใช้ทรายละเอียดในท้องที่เขตอำเภอพิมายจังหวัดนครราสีมา ให้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C33 (2008)

2) นำทรายมาร่อนผ่านตะข่าย แยกเศษวัสดุ และวัชพืชจากนั้น นำมาทำความสะอาดล้างเอาสิ่งเจือปนออก นำทรายที่ทำการล้างมาผึ่งตากแดดกลางแจ้งให้แห้ง แบ่งออกเป็น 2 ส่วนส่วนแรกทำการร่อนด้วยตะแกรงเพื่อตรวจสอบขนาดในการกำหนดทำหินทราย ส่วนที่สองทดสอบความชื้นบรรจุลงถุงพลาสติกทดสอบตาม มาตรฐาน ASTM C 128 (2007) บรรจุลงในถุงที่มีกระสอบหุ้มด้านนอก ปิดให้มิดชิด ก่อนนำมาใช้งานต้องตรวจสภาพความชื้นให้อยู่ในช่วงอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry)

รูปที่ 3.1 แบบหล่ออาคริลิค ขนาด 50x50x50 mm

3.3.4 ขั้นตอนผสมหินทรายเทียมและการหล่อก้อนตัวอย่าง

1) จัดเตรียมส่วนผสมสำหรับก้อนตัวอย่างหินทรายเทียม เช่น ปูนซีเมนต์ขาว เถ้าลอย และสารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศ ทำการตวงชั่งส่วนผสมตามตารางที่ 3.1

2) เตรียมเครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับผสมหินทรายเทียม และวัสดุปอซโซลาน ประกอบด้วยเครื่องผสมคอนกรีตแบบใบพัดเกลียว สว่านมือสำหรับปั่นส่วนผสม (ในกรณีที่ส่วนผสมยังไม่เข้ากันดี) ในปริมาณที่ต้องการใช้ในแต่ละครั้งตามอัตราส่วนที่ผสมที่ออกแบบไว้

3) ใส่ทราย ปูนซีเมนต์ขาวลงในเครื่อง เปิดเครื่องผสม เถ้าลอย เติมน้ำให้ส่วนผสมทั้งหมดคลุกเคล้าเข้ากันดีจนเป็นเนื้อเดียวกัน สังเกตการณ์หมุนของใบผสมขณะหมุนเนื้อซีเมนต์มอร์ต้ามีการจับตัวเป็นก้อนหรือไม่

4) เมื่อส่วนผสมเข้ากันจนสังเกตสีที่ผสมระหว่างซีเมนต์ขาว ทราย และเถ้าลอย ออกสีทราย สีเนื้อ ทำการเติมน้ำที่ได้เตรียมไว้ลงในเครื่องผสม ในช่วงระหว่างเติมน้ำลงไปในส่วนผสมให้เครื่องผสมเดินตามปกติ เพื่อให้ใบพัดตีส่วนผสมกับน้ำที่เติมเพิ่มไปให้เข้ากันดี ถ้าผสมด้วยเครื่อง ควรใช้เวลาอย่างน้อย 3 นาทีจึงจะได้ส่วนผสมที่ดี

5) เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้ว จนสังเกตว่าเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จึงทำการหยุดเครื่องผสม การผสมในแต่ละครั้งควรใช้เวลาอย่างน้อย 3 นาที การเข้ากันของส่วนผสมให้ดูจากลักษณะส่วนใหญ่ จากนั้นนำส่วนเทลงในแบบหล่อสำหรับทดสอบ และแบบหล่อที่ขึ้นรูป สำหรับในการนำไปทดสอบก้อนตัวอย่างจะถูกทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

6) เมื่อครบเวลากำหนดถอดแบบประมาณ 24 ชั่วโมง จึงจะทำการถอดแบบได้ จากนั้นนำชิ้นงานที่ถอดแบบไป แล้วไปตากผึ่งลมในร่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (หน้างานจริง) แต่ในการศึกษาทำหินทรายเทียม และวัสดุปอซโซลาน ได้นำตัวอย่างไปบ่มต่อในน้ำสะอาดอีก 7 วัน และนำตัวอย่างชิ้นงานไปผึ่งไว้ในอุณหภูมิห้องอีก 1 วัน จึงนำไปทดสอบการใช้กรดกัดผิวหน้าในขั้นตอนต่อไป

3.4 สัญลักษณ์แสดงสัดส่วนผสมของหินทรายเทียม

งานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ของส่วนผสมต่างๆ ของงานวิจัยไว้ดังนี้

WWWWPC-XXS-YYFA-ZZSFA (3.1)

WWW	หมายถึง	ร้อยละของปริมาณปูนซีเมนต์ขาว ปอร์ตแลนด์
XX	หมายถึง	ร้อยละของปริมาณทรายละเอียดโดยน้ำหนักวัสดุประสาน
YY	หมายถึง	ร้อยละของปริมาณสารปอซโซลานโดยน้ำหนักวัสดุประสาน
ZZ	หมายถึง	ร้อยละของปริมาณสารเพิ่มฟองโดยน้ำหนักวัสดุประสาน
WPC	หมายถึง	ปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ (วัสดุประสาน)
S	หมายถึง	ทรายละเอียด
FA	หมายถึง	เถ้าลอยแม่เมาะ (สารปอซโซลาน)
SFA	หมายถึง	สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์(synthetic foaming agent)

ตัวอย่างในการอ่านสัญลักษณ์ เช่น 100WPC-300S หมายถึง อัตราส่วนควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ 100 % ต่อทรายละเอียด 300 % โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (อัตราส่วน 1 ต่อ 3 เท่า) และ 95WPC-300S-5FA หมายถึง อัตราส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ 95 % ต่อทรายละเอียด 300 % ต่อเถ้าลอย 5 % โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (อัตราส่วน 1 ต่อ 3 ต่อ 0.05 เท่า)

อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างทดสอบของหินทรายเทียมมวลเบา ที่ใช้ในการทดสอบ รวมทั้งหมด 1,404 ตัวอย่าง แบ่งตามลักษณะสัดส่วนการผสม ดังนี้

3.4.1 จำนวนตัวอย่างหินทรายเทียมควบคุม

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์, อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างหินทรายเทียมควบคุม (1 : 3.00)

Symbol	WPC-S (Ratio)	WPC-S (%)	w/c	Curing (day) / Quantity (piece)						Total
				3	7	14	28	60	90	
100WPC-200S	1 : 2.00	100 : 200	1.00	6	6	6	6	6	6	36
100WPC-250S	1 : 2.50	100 : 250		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-300S	1 : 3.00	100 : 300		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-350S	1 : 3.50	100 : 350		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-400S	1 : 4.00	100 : 400		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-200S	1 : 2.00	100 : 200	1.20	6	6	6	6	6	6	36
100WPC-250S	1 : 2.50	100 : 250		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-300S	1 : 3.00	100 : 300		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-350S	1 : 3.50	100 : 350		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-400S	1 : 4.00	100 : 400		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-200S	1 : 2.00	100 : 200	1.30	6	6	6	6	6	6	36
100WPC-250S	1 : 2.50	100 : 250		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-300S	1 : 3.00	100 : 300		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-350S	1 : 3.50	100 : 350		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-400S	1 : 4.00	100 : 400		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-200S	1 : 2.00	100 : 200	1.40	6	6	6	6	6	6	36
100WPC-250S	1 : 2.50	100 : 250		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-300S	1 : 3.00	100 : 300		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-350S	1 : 3.50	100 : 350		6	6	6	6	6	6	36
100WPC-400S	1 : 4.00	100 : 400		6	6	6	6	6	6	36
Total				120	120	120	120	120	120	720

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในการทำตัวอย่างค่าควบคุมเลือกพิจรณาที่อัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมในการทำหินทรายเทียมมวลเบาให้พิจรณาค่าด้านกำลังตามมาตรฐานวัสดุไม่รับน้ำหนัก ตามมาตราฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.1505-2541) และ ต้องมีความคงทนพอที่ในรูปลักษณ์ สิ่งแวดล้อม ลักษณะ รูปทรง มิติ ขนาด ให้ยึดหลักตามมาตราฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.194/2546)

3.4.2 จำนวนตัวอย่างหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ขาว

ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์, อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย

Symbol	WPC-S-FA (Ratio)	WPC-S-FA (%)	w/c	Curing (day) / Quantity (piece)						Total
				3	7	14	28	60	90	
95WPC-300S-5FA	1 : 3 : 0.05	95 : 300 : 5	1.00	6	6	6	6	6	6	36
85WPC-300S-15FA	1 : 3 : 0.15	85 : 300 : 15		6	6	6	6	6	6	36
70WPC-300S-30FA	1 : 3 : 0.30	70 : 300 : 30		6	6	6	6	6	6	36
60WPC-300S-40FA	1 : 3 : 0.40	60 : 300 : 40		6	6	6	6	6	6	36
95WPC-300S-5FA	1 : 3 : 0.05	95 : 300 : 5	1.20	6	6	6	6	6	6	36
85WPC-300S-15FA	1 : 3 : 0.15	85 : 300 : 15		6	6	6	6	6	6	36
70WPC-300S-30FA	1 : 3 : 0.30	70 : 300 : 30		6	6	6	6	6	6	36
60WPC-300S-40FA	1 : 3 : 0.40	60 : 300 : 40		6	6	6	6	6	6	36
95WPC-300S-5FA	1 : 3 : 0.05	95 : 300 : 5	1.30	6	6	6	6	6	6	36
85WPC-300S-15FA	1 : 3 : 0.15	85 : 300 : 15		6	6	6	6	6	6	36
70WPC-300S-30FA	1 : 3 : 0.30	70 : 300 : 30		6	6	6	6	6	6	36
60WPC-300S-40FA	1 : 3 : 0.40	60 : 300 : 40		6	6	6	6	6	6	36
95WPC-300S-5FA	1 : 3 : 0.05	95 : 300 : 5	1.40	6	6	6	6	6	6	36
85WPC-300S-15FA	1 : 3 : 0.15	85 : 300 : 15		6	6	6	6	6	6	36
70WPC-300S-30FA	1 : 3 : 0.30	70 : 300 : 30		6	6	6	6	6	6	36
60WPC-300S-40FA	1 : 3 : 0.40	60 : 300 : 40		6	6	6	6	6	6	36
Total				96	96	96	96	96	96	576

3.4.3 จำนวนตัวอย่างหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ขาว และสารเพิ่มฟองโฟม

ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์, อัตราส่วนผสมตัวอย่างหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มฟองโฟม

Symbol	WPC-S-FA-SFA (Ratio)	WPC-S-FA-SFA (%)	w/c	Curing (day) / Quantity (piece)						Total
				3	7	14	28	60	90	
70WPC-300S-30FA-1SFA	1 : 3 : 0.30 : 0.01	70 : 300 : 30 : 1	1.30	6	6	6	6	6	6	36
70WPC-300S-30FA-3SFA	1 : 3 : 0.30 : 0.03	70 : 300 : 30 : 3		6	6	6	6	6	6	36
70WPC-300S-30FA-5SFA	1 : 3 : 0.30 : 0.05	70 : 300 : 30 : 5		6	6	6	6	6	6	36
Total				18	18	18	18	18	18	108

3.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.5.1 การทดสอบคุณสมบัติของทราย

1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทราย

จุดประสงค์การทดสอบเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพต่าง ๆ โดยเฉพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (saturated surface dry) ,การดูดซึมน้ำ (absorption) เพื่อนำไปออกแบบส่วนผสมมอร์ต้าร์ ค่าความถ่วงจำเพาะมวลละเอียดสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง มีค่าอยู่ระหว่าง 2.4 ถึง 3.0 อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 128 (2001) การทดสอบแสดงในรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทรายละเอียด

2) การทดสอบหาขนาดคละของทราย

จุดประสงค์การทดสอบเพื่อหาการกระจายตัวและส่วนคละของทรายซึ่งมีผลต่อ

ความสามารถเทได้ และแต่ละก้อนของมวลรวมละเอียดจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสไม่ว่ามวลรวมนั้นจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ตาม ในการทดสอบใช้วิธีการตะแกรงร่อนให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM C 136 (2001) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

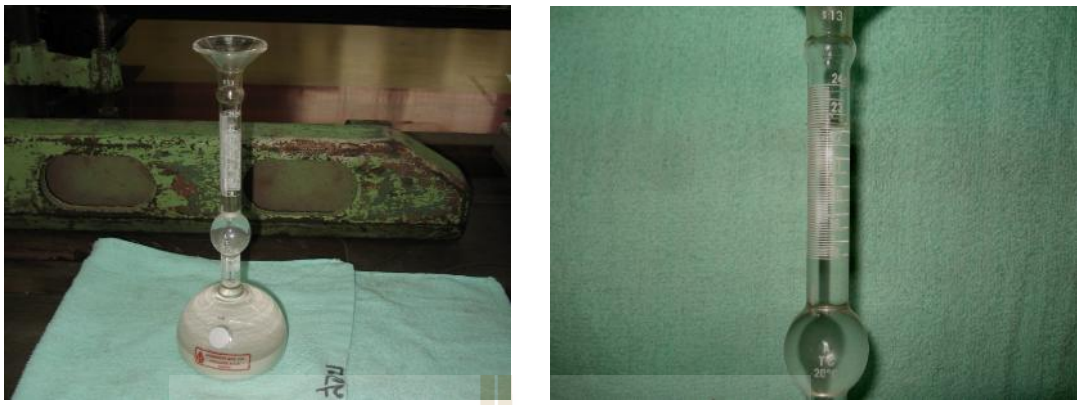
รูปที่ 3.3 การทดสอบการหาขนาดคละของทรายละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 136

3) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อให้สามารถหาค่าหน่วยน้ำหนักของทรายและนำค่าที่ได้มาออกแบบส่วนผสมของมอร์ต้าร์ อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2001)

3.5.2 การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ขาว ปอร์ตแลนด์ ในการวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.15 ทำการทดสอบโดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่าวัสดุนั้น โดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว หาได้จากการแทนที่ในน้ำมันก๊าด อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 (2003) รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

3.5.3 การทดสอบคุณสมบัติของสารปอซโซลาน

1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของสารปอซโซลาน

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย สามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ขาว ปอร์ตแลนด์ โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่าวัสดุนั้น ตามมาตรฐาน ASTM C 188 (2003) รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอย

2) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอย โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับทราย อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2001)

3) การทดสอบหาค่าความละเอียดของเถ้าลอย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความละเอียดของเถ้าลอย โดยวัดจากปริมาณที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991) ดังแสดงในรูปที่ 3.5

3.6 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการวิจัย

3.6.1 การทดสอบหาระยะการก่อตัวของปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์

จุดประสงค์การทดสอบ ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลาย โดยวิธีเข็มไวแคตตามมาตรฐาน ASTM C 191 โดยใช้ปริมาณน้ำที่พอเหมาะจากการทดสอบความข้นเหลวปกติ ซึ่งการก่อตัวระยะต้น คือระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนทำให้เข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเองได้ วิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 191 -17 Standard Fest Method For Time Of Setting Of Hydraulic Cement by Vicat Needle ดังแสดงในรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยวิธีเข็มไวแคตตามมาตรฐาน ASTM C 191

3.6.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวและสารปอซโซลาน

1) การทดสอบหาค่าความละเอียดของอนุภาควัสดุด้วยวิธีของเบลน (Blaine method)

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวและสารปอซโซลาน ด้วยวิธีของเบลน (Blaine method) เพื่อพิจารณาความละเอียดสัมพัทธ์ในรูปของ

พื้นที่ผิวจำเพาะ(เป็นค่าพื้นที่ผิวทั้งหมดมีหน่วยเป็น ซม^2/กรัม) อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204 (2011) ดังแสดงในรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 ชุดการทดสอบหาความละเอียดของวัสดุประสานด้วยวิธีของเบลน (Blaine fineness)

3.6.3 การทดสอบหาค่าการกระจายตัวของอนุภาค

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวและสารปอซโซลาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Analysis) ดังแสดงในรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยระบบเลเซอร์ (Lacer Particle Size Analysis)

3.6.4 การทดสอบวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ โดยการนำผงตัวอย่างมาบดในครกบดสาร (Ceramic or agate mortar) เพื่อให้ตัวอย่างเป็นผงที่ละเอียดขึ้น และมีขนาดของเม็ดผงใกล้เคียงกัน ทาตัวอย่างลงบนเทปด้านที่เป็นกาวบนแผ่นเฟรมที่เตรียมไว้ ใช้พู่กันที่สะอาดเกลี่ยผงตัวอย่างให้ติดบนเทปเป็นชั้นบางอย่างสม่ำเสมอ ทำความสะอาดแผ่นตัวอย่างให้เรียบร้อย ตรวจสอบความสม่ำเสมอของแผ่นตัวอย่างใช้เทปกาวปิดทับตัวอย่าง เพื่อกันไม่ให้ผงหลุดออกจากแผ่นเฟรม จากนั้นนำไปทดสอบ ด้วยเทคนิค X-ray Absorption Spectroscopy (XAS) และ X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) ดังแสดงในรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

3.6.5 การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

โดยการนำผงตัวอย่างมาโรยบนแท่นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 ซม. ที่ติดแผ่นกาว 2 หน้า เตรียมไว้แล้ว โดยให้ผงตัวอย่างติดแผ่นกาวเป็นแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำไปเป่าด้วยลมออกซิเจนเพื่อให้ผงตัวอย่างหลุดออกให้เหลือเพียงชั้นเดียวนำแท่นตัวอย่างไปอบด้วยแสงไฟเพื่อไล่ความชื้นแล้วนำแท่นตัวอย่างไปเคลือบด้วยอิออนทองคำหลังจากนั้นจึงนำไปถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูง Scanning Electron Microscope(SEM) ดังแสดงในรูป 3.10

รูปที่ 3.10 เครื่องถ่ายภาพกำลังสูงถ่ายภาพกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.7 การทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของหินทรายเทียม

3.7.1 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์หินทรายเทียม

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาอัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์หินทรายเทียมควบคุม มีอัตราส่วนสารซีเมนต์ต่อทรายตั้งแต่ 1 : 2, 1 : 2.5, 1 : 3, 1 : 3.5 และ 1 : 4 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์หินทรายเทียมอัตราส่วนสารซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 3 โดยน้ำหนัก (อัตราส่วนมาตรฐาน) ศึกษาการใช้ปริมาณน้ำต่อสารซีเมนต์(w/c) ที่เหมาะสมตั้งแต่อัตราส่วน 1.0 ถึง 1.4 เพื่อทดลองหาปริมาณน้ำที่ใช้ผสม เพราะต้องทำให้ส่วนผสมไหลเข้าแทรกตามลวดลายของแบบหล่อได้ดี ซึ่งถ้าใช้ส่วนผสมที่ข้นเหลวตามมาตรฐานกำหนด คุณภาพลวดลายของชิ้นงานไม่เด่นชัด ดังนั้นปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมมีค่าเท่ากับความข้นเหลวที่มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่ ร้อยละ 105 - 115 จึงไม่สามารถนำมาควบคุมได้ ในส่วนขั้นตอนการผสมมอร์ต้าร์ใช้ตามมาตรฐาน ASTM C 305- 65 Standard Test Method For Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Paste and Mortar of Plastic Consistency วิธี การหล่อ การบ่มตัวอย่าง และการทดสอบกำลังอัด อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109-77 Standard Test Method For Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar ก้อนตัวอย่างทดสอบจะถูกถอดออกจากแบบเมื่ออายุได้ 24 ชั่วโมง และบ่มในน้ำสะอาดทันที ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องทดลอง ใช้ตัวอย่างทดสอบที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ก่อนนำไปทดสอบกำลังอัด และชักตัวอย่างทดสอบไม่น้อยกว่า 6 ตัวอย่างต่ออายุการบ่ม ค่ากำลังอัดสามารถคำนวณได้จากตามสมการที่ 3.1

$$f = \mathrm{P} / \mathrm{A} \qquad (3.1)$$

เมื่อ f = กำลังอัดสูงสุด (kg / cm^2 หรือ ksc)

P = แรงกด (kgf)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบด้านที่รับแรงกด (cm^2)

3.7.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียม

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อทดสอบการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียม โดยการนำก้อนตัวอย่างทดสอบจำนวน 6 ก้อน นำไปแช่ในน้ำเย็น ที่อุณหภูมิห้องทดลองปกติ เป็นเวลา 24ชั่วโมง นำก้อนตัวอย่างขึ้นชั่งน้ำหนักโดยแขวนด้วยตะแกรงโลหะและจมอยู่ในน้ำทั้งก้อน ยกก้อนตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ทิ้งไว้ในให้น้ำระบายออกเป็นเวลา 1 นาที วางก้อนตัวอย่างลงบนแร่ง ขนาด 9 มิลลิเมตร หรือหยาบกว่าหยดน้ำตามผิวที่มองเห็นด้วยตาเปล่าให้ซับออกด้วยผ้าแล้วทำการชั่งน้ำหนักทันที หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างทดสอบไปอบให้แห้งในเตาอบที่ระบายอากาศที่อุณหภูมิ 110 ถึง 115 องศาเซลเซียสเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง และทำการชั่งน้ำหนัก 2 ครั้ง ระยะเวลาห่างกัน 21 ชั่วโมง แสดงน้ำหนักที่สูญเสีย เพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 0.2 ของตัวอย่างในการชั่งครั้งก่อน ค่าการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.2 โดยเป็นค่าเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างจำนวน 6 ก้อน การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 109-2517 และ ASTM C 140-70

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (\%)} = (W_w / W_d) \times 100 \qquad (3.2)$$

เมื่อ W_w = น้ำหนักน้ำในก้อนตัวอย่างที่ดูดซึมเข้าไป (kg)

W_w = น้ำหนักก้อนตัวอย่างหลังแช่ในน้ำ – น้ำหนักก้อนตัวอย่างหลังอบ (kg)

W_d = น้ำหนักก้อนตัวอย่างหลังอบ (kg)

3.7.3 การทดสอบหาค่าความหนาแน่น

จุดประสงค์การทดสอบ การทดสอบหาค่าความหนาแน่นชื้น (moisture density) ความหนาแน่นแห้ง (dry density) ของหินทรายเทียม ทำได้โดยการนำก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์มาตรฐาน ขนาด 50 × 50 × 50 mm จำนวน 6 ก้อน ที่มีอายุบ่ม 28 วัน เข้าตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 110±5 °C จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดเพื่อหาปริมาตร ซึ่งความหนาแน่นคือ

อัตราส่วนระหว่างมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมีหน่วยเป็น kg/m^3 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3 การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C495 (1999)

$$\text{ความหนาแน่น } (\rho s) = (Ms / Vs) \times 100 \qquad (3.3)$$

เมื่อ ρ_s = ความหนาแน่นของตัวอย่างทดสอบ (kg / m^3)

Ms = น้ำหนักมวลตัวอย่างทดสอบ (kg)

Vs = ปริมาตรมวลตัวอย่างทดสอบ (m^3)

3.7.4 การทดสอบความทนทานต่อการขัดสีความสึกกร่อนของหินทรายเทียม

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาความทนทานต่อการขัดสีของความสึกกร่อนของหินทรายเทียม ตามมาตรฐาน มยธ.(ท) 1012.2 - 2534 และมาตรฐาน ASTM C 131 สำหรับทดสอบมวลรวมหยาบขนาดเล็กและ ASTM C 535 สำหรับทดสอบมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ เป็นการทดสอบหาความสึกกร่อนของวัสดุมวลหยาบ (Coarse Aggregate) โดยใช้เครื่องทดสอบลอสแองเจลิส (Los Angeles)

ในการทดสอบนั้นต้องนำหินทรายเทียมทุบ ย่อยให้ได้เม็ดหินตามมาตรฐานตามชั้นเกรดที่จะทำการทดสอบ โดยใช้ตะแกรงคัดขนาดของวัสดุมวลหยาบ ใช้ตะแกรงมีช่องผ่านเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 75.0 มม. (3 นิ้ว), 50.0 มม. (2 นิ้ว), 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) 6.3 มม. (1/2 นิ้ว), 4.75 มม.(เบอร์ 4), 2.36 มม. (เบอร์ 8) และ 1.70 มม.(เบอร์ 12) นำตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ 50,000 กรัม + 25 กรัม พร้อมแบบราชิพชาร์จ (ลูกเหล็ก) ตามมาตรฐานกำหนดใส่เข้าไปในเครื่องลอสแองเจลิส หมุนเครื่องด้วยความเร็วรอบระหว่าง 30 – 33 รอบต่อนาที เป็นจำนวนรอบ 500 รอบ เมื่อเครื่องทดสอบหมุนครบตามจำนวนรอบ ให้นำตัวอย่างออกจากเครื่อง นำตัวอย่างไปล้าง และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 12 ให้นำส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12 ให้นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส ที่ 24 ชั่วโมง เมื่อครบให้นำตัวอย่างออกให้พักไว้ที่อุณหภูมิปกติ จนได้น้ำหนักคงที่แล้วคำนวณหาน้ำหนักตัวอย่างในส่วนที่เหลือ คำนวณค่าความสึกกร่อนเป็นค่าร้อยละดังแสดงในรูป 3.9 สามารถคำนวณความสึกหรอของมวลรวมได้ดังสมการที่ 3.4 การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C131 หรือ ASTM C535

ความสึกหรอของมวลรวมโดยใช้เครื่องทดสอบ LOS ANGELES

$$= \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่ M_1 = มวลของตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ ; (g)

M_2 = มวลของตัวอย่างที่ค้างตะแกรงเบอร์ 12 ; (g)

หมายเหตุ และข้อควรระวัง

- ให้ทำการชั่ง Abrasive Charge แต่ละลูกอย่างน้อย 1 ครั้ง ทุก ๆ 6 เดือน เพื่อตรวจสอบให้เป็นไปตามตาราง
- ในกรณีที่เหล็กขวางเป็นเหล็กฉากให้ติดที่ริมฝาเหล็กปิดช่องใส่วัสดุการติดต้องให้ด้านนอกของเหล็กฉากหันไปในทิศทางที่เครื่องหมุน

รูปที่ 3.11 การทดสอบขัดสีด้วยเครื่องทดสอบ LOS ANGELES (ASTM C131or C535)

3.7.5 การใช้กรด (HCl) แต่งผิวหน้าชิ้นงาน

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อใช้กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid ;HCL) หรือ กรดเกลือ ใช้แต่งผิวหน้าชิ้นงาน ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตหินทรายเทียมหรือหินทรายเทียมนับว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ บรรดาชิ้นงานไม่ว่าจะเป็นการหล่อ การพ่น หรือการฉาบผิวด้วยเนื้อหินทรายเทียมหรือหินทรายเทียมหากไม่มีการนำชิ้นงานที่หล่อเสร็จแล้วไปทำการกัดแต่งผิว อาจทำให้ชิ้นงานขาดลักษณะเฉพาะ

รูปที่ 3.12 กัดผิวชิ้นงานด้วยกรดเกลือ(hydrochloric acid ;HCL) เจือจาง ที่กรดต่อน้ำเท่ากับ 1 : 10

เมื่อถอดแบบชิ้นงานและบ่มได้ตามระยะเวลาแล้วที่ 7 วัน ขั้นตอนสุดท้ายคือนำชิ้นงานไปทำการกัดผิว ในอัตราส่วนระหว่างกรดเกลือ : น้ำเปล่า ที่อัตราส่วน 1 : 10 โดยปริมาตร จากนั้นนำชิ้นงานไปแช่จมในสารละลายของกรดเกลือ ระยะเวลาของการแช่ตัวอย่างขึ้นอยู่กับรายละเอียดที่ผิวชิ้นงานประมาณ 10 นาที ใช้แปลงขนอ่อน ฟองน้ำลูบที่ผิวชิ้นงานให้ทั่ว ในระหว่างแช่ชิ้นงานนั้น ให้สังเกตเนื้อ ผิวชิ้นงานว่ามีลักษณะเม็ดทรายที่เกาะผิวชิ้นงานลอยสม่ำเสมอเรียบเนียนต้องเป็นไปตามมาตราฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.198/2556) เมื่อได้ลักษณะที่กล่าว ให้ไปแช่น้ำสะอาด เพื่อล้างทำความสะอาดชิ้นงาน นำไปผึ่งไว้ในในที่โล่ง และร่มขณะแช่กรดเกลือให้ใส่ผ้าปิดจมูก สวมถุงมือยาง รองเท้ายาง และสวมเสื้อผ้าให้มิดชิด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

หินทรายเทียมในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองหาอัตราส่วนควบคุมที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวกับมวลรวมละเอียด (ทราย) ที่ 1 : 2, 1 : 2.5, 1 : 3, 1 : 3.5 และ 1 : 4 แล้วเลือกใช้อัตราส่วนผสม 1 : 3 (ซีเมนต์ขาวต่อทรายละเอียด) เป็นอัตราส่วนผสมหลักในงานวิจัยนี้ ผสมวัสดุปอซโซลานบางส่วนด้วยเถ้าลอยแม่เมาะที่ 5%, 15%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักวัสดุประสานและสารเพิ่มฟองที่ 1%, 3%และ 5% ศึกษาการใช้ปริมาณน้ำผสมที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) ที่ 1.0, 1.2, 1.3 และ 1.4 โดยน้ำหนัก หล่อก้อนตัวอย่างขนาดมอร์ต้าร์มาตรฐานขนาด 5 x 5 x 5 ซม ทำการบ่มตัวอย่างทดสอบที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบ กำลังอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความทนทานต่อการสึกกร่อน เนื้อผิวงานและการแต่งผิวชิ้นงานด้วยการแช่ไฮโดรครอลิค หรือกรดเกลือ (hydrochloric acid ;HCL) นำผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์หินทรายควบคุมที่อายุการทดสอบต่างๆ ดังนี้

4.2 คุณสมบัติของมวลรวมละเอียด (ทราย) ที่ใช้ในงานวิจัย

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมละเอียด (ทราย) ที่ผ่านการร่อนพบว่า ทรายที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.62 หน่วยน้ำหนักแบบแห้งเท่ากับ 1,584 kg/m^3 และค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.66

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะ โมดูลัสความละเอียด หน่วยน้ำหนักและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (ทราย)

Materials	Sp.Gr.	F.M.	Unit Weight (kg/m^3)	Absorption (%)	Remark
SAND	2.62	1.62	1,584	1.25	

4.3 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุยึดประสานที่ใช้ในงานวิจัย

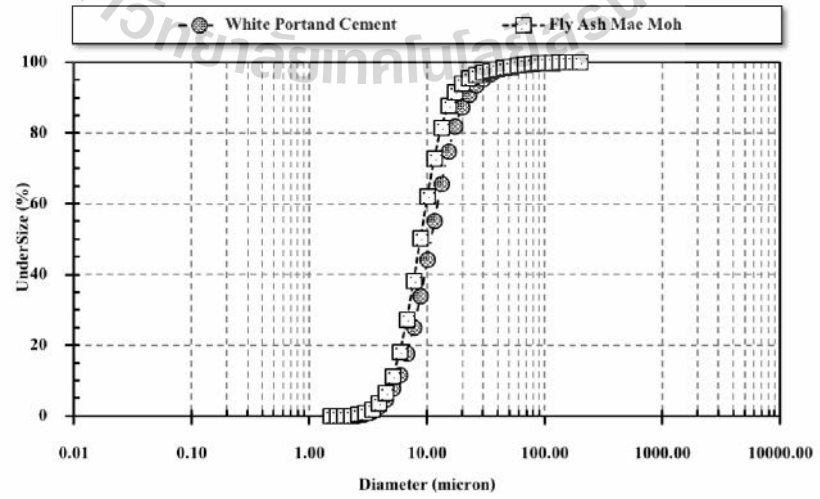
4.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

จากผลการวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนัก และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุประสาน ดังแสดงผลดังตารางที่ 4.2 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวที่ใช้ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.05 หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,400 kg/m^3 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3,430 cm^2/g และเถ้าลอยแม่เมาะ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.34 หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,297 kg/m^3 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 4,310 cm^2/g

ตารางที่ 4.2 ค่าความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย หน่วยน้ำหนัก และพื้นที่ผิวจำเพาะ

Materials	Specific Gravity	Median Particle Size d_{50} (micron)	Unit Weight (kg/m^3)	Specific Surface Area (Blaine Fineness)
WPC	3.05	11.24	1,401	3,430
FA	2.34	8.80	1,297	4,310

จากผลการทดสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Laser Particle Size ของวัสดุยึดประสาน ดังตารางที่ 4.2 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวและเถ้าลอยแม่เมาะ มีค่าอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 11.24 และ 28.80 micron (ไมครอน) ตามลำดับ และลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุยึดประสาน มีลักษณะการกระจายตัวที่ดี แสดงดังรูปที่ 4.1 นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าลอยมีขนาดเม็ดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยสุดในบรรดาวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของวัสดุยึดประสานที่ใช้ในงานวิจัย

4.3.2 องค์ประกอบทางเคมี

จากผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวและเถ้าลอยแม่เมาะ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) ดังแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยใช้ข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C618 (2008) ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ จากผลการวิเคราะห์พบว่า

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยแม่เมาะ

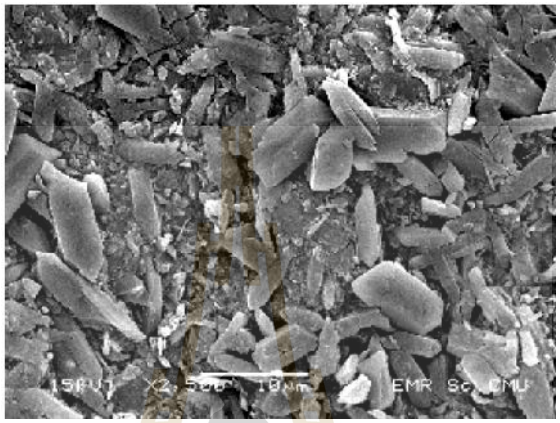
Chemical Composition (%)	White Portland Cement (WPC)	Fly Ash (FA)
Silicon Dioxide (SiO_2)	15.90	36.75
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	1.90	18.88
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	0.20	11.43
Calcium Oxide (CaO)	73.50	14.38
Magnesium Oxide (MgO)	0.10	6.03
Sulfur Trioxide (SO_3)	0.90	4.22
Loss On Ignition (LOI)	2.30	1.79
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	17.19	67.06

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว มีปริมาณสารประกอบหลัก SiO_2 = 15.9 % , Al_2O_3 = 1.9% และ Fe_2O_3 = 0.2% ซึ่งมีค่ารวมกันประมาณ $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ = 19.0% ค่าการสูญเสีย (LOI)เท่ากับ 2.30% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวไม่จัดว่าเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ แต่จัดเป็นวัสดุช่วยยึดประสาน ที่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณสูง

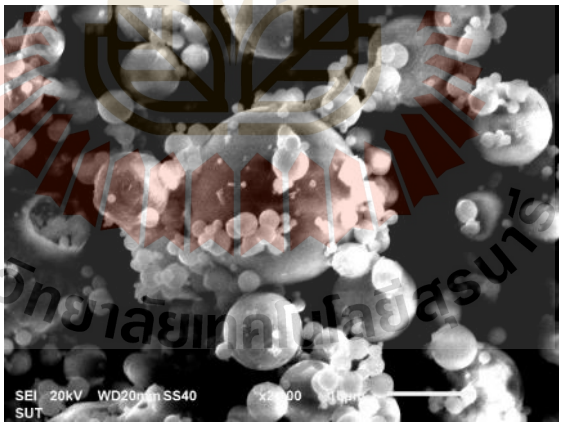
2) เถ้าลอยแม่เมาะ มีปริมาณสารประกอบหลัก SiO_2 = 35.75 % , Al_2O_3 = 18.88% และ Fe_2O_3 = 11.43% ซึ่งมีค่ารวมกันประมาณ $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ = 66.06% ค่าการสูญเสีย (LOI)เท่ากับ 1.79% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าลอยแม่เมาะจัดเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ Class C

4.3.3 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค

จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุยึดประสาน อันได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวและเถ้าลอยแม่เมาะ โดยการถ่ายภาพกำลังสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขนาด 2500 เท่าของปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขนาด 2000 เท่าของเถ้าลอยแม่เมาะ

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว มีลักษณะอนุมาคเป็นผลึกแท่งรูปหลายเหลี่ยมคล้ายปริซึม กระจายตัวอย่างเป็นระเบียบและเรียงตัวอย่างหนาแน่น และเถ้าลอยมีลักษณะรูปร่างและอนุภาคที่กลมมน ผิวภายนอกเรียบเสมอกัน เนื้อภายในแน่น มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน

4.4 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายเทียม

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลสำรวจทางกายภาพพื้นผิวภายนอกของตัวอย่างหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนวิจัยที่ 1 : 3 โดยน้ำหนัก พบว่าสีมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการใช้เถ้าลอยในส่วนผสมของเถ้าลอย ที่ผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามลำดับสีพื้นผิวภายนอกเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมในอัตราส่วนที่ 1 : 3 โดยน้ำหนักสีขาวออกน้ำตาลเหลืองนวลใส่ เนื้อผิวทรายคล้ายสีเนื้อไปจนถึงสีขาวน้ำตาลใส เนื้อผิวทรายเข้มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย นอกจากนี้ขนาดของรูพรุนหน่วยน้ำหนัก และการหดตัว มีค่าที่ลดลงตามปริมาณการใช้สารปอซโซลานในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น และค่าหน่วยน้ำหนักที่ได้ค่อนข้างคงที่ ค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ระดับสม่ำเสมอในทิศทางเดียวกัน

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของตัวอย่างหินทรายเทียม

ลักษณะทางกายภาพที่ทดลองนี้ในการนำไปใช้งานจะต้องมีการนำสีฝุ่นเข้ามาผสมเพื่อให้ได้โทนสีที่ต้องการ เพื่อความเหมาะสมกับงานปะติมากรรมสำหรับตกแต่งทางศิลปประเพณีวัฒนธรรมของแต่ละแบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่นเน้นที่ผิวพื้น ความคงทนที่พียงพอต่อการใช้งาน

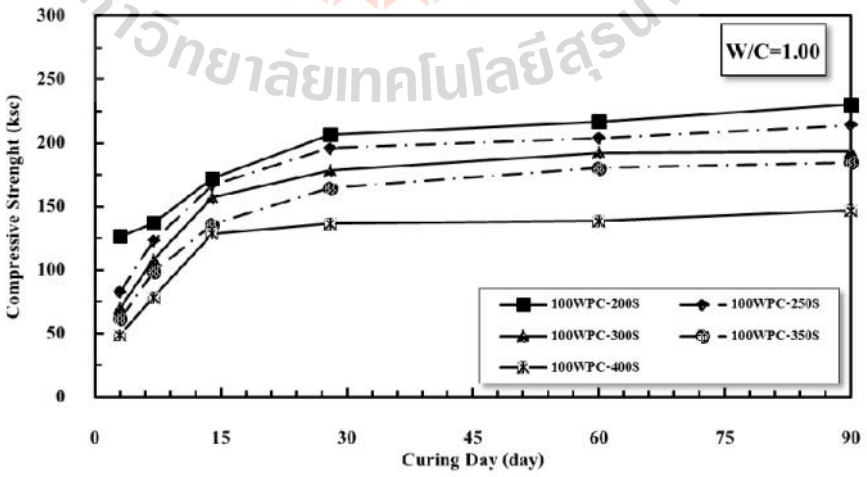
4.5 กำลังอัด (Compressive Strength)

4.5.1 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม

จากผลทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ศึกษาที่อัตราส่วน 1 : 2, 1 : 2.5, 1 : 3, 1 : 3.5 และ 1 : 4 และอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่ w/c เท่ากับ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ดังนี้

1) กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่ w/c เท่ากับ 1.00

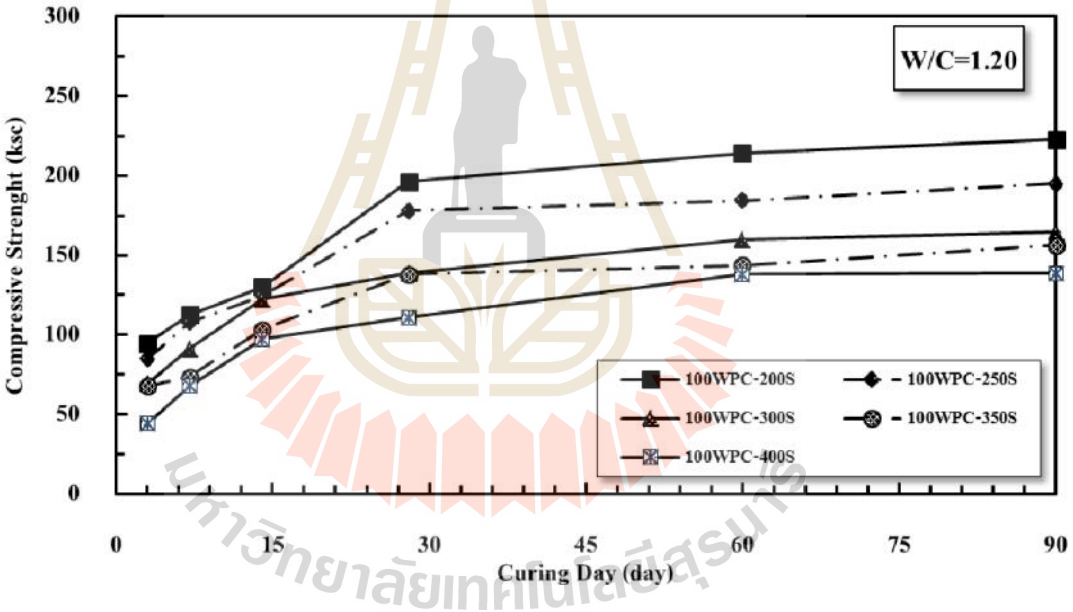
จากผลทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ (Water cement ratio ; w/c) เท่ากับ 1.00 ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ค่ากำลังอัดประลัยมีค่าที่สูงขึ้นตามอายุการบ่ม ในช่วงเวลาระยะแรกค่ากำลังอัดมีการพัฒนาที่ไม่สูงมาก แต่จะเริ่มพัฒนากำลังที่อายุ 14 วัน ไปจนถึงอายุ 90 วัน ช่วงอายุ 28 วัน ถึงอายุ 90 วัน ค่ากำลังอัดมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นไม่มากนักและค่ากำลังจะเริ่มคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 14 วัน ในส่วนแนวโน้มของค่ากำลังอัดเมื่อเทียบสัดส่วนตามลำดับอัตราส่วนผสม พบอีกว่า แนวโน้มของกำลังอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ขาวต่อทรายลดลง เป็นผลเนื่องจากวัสดุประสานที่มีในปริมาณมากในอัตราส่วนต่อทรายต่ำ ถ้าเพิ่มปริมาณมวลรวมละเอียด(ทราย)เพิ่มขึ้นการประสานระหว่างอนุภาคสารซีเมนต์กับอนุภาคมวลรวมละเอียดมีปริมาณที่ลดต่ำลง ทำให้ช่องว่างต่อปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่ากำลังอัด ค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 100WPC-200S มีค่าสูงสุดที่ 126.6, 136.8, 172.3, 206.7, 217.1 และ 230.2 ksc และอัตราส่วน 100WPC-400S มีค่ากำลังอัดต่ำสุดที่ 49.0, 78.5, 128.8, 136.6, 138.6 และ 147.0 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c เท่ากับ 1.00

2) กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่ w/c เท่ากับ 1.20

จากผลทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c เท่ากับ 1.20 ดังรูปที่ 4.6 พบว่า ค่ากำลังอัดมีค่าที่สูงขึ้นตามลำดับอายุการบ่ม ช่วงระยะแรกค่ากำลังอัดมีการพัฒนาไม่สูงมาก แต่เริ่มพัฒนากำลังที่อายุ 14 วัน ไปจนถึงอายุ 90 วัน ช่วงอายุ 28 วัน ถึงอายุ 90 วัน ค่ากำลังอัดมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นไม่มากและจะเริ่มคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 14 วัน ในส่วนแนวโน้มของค่ากำลังอัดเมื่อเทียบสัดส่วนตามลำดับอัตราส่วนผสม ยังพบอีกว่า แนวโน้มของกำลังอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ขาวต่อทรายลดลง ซึ่งคล้ายกับอัตราส่วนหินทรายเทียมควบคุมที่ w/c เท่ากับ 1.00 และค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 100WPC-200S มีค่าสูงสุดที่ 97.4, 112.6, 130.1, 196.2, 214.2 และ 222.6 ksc และอัตราส่วน 100WPC-400S มีค่ากำลังอัดต่ำสุดที่ 44.3, 67.8, 97.5, 110.8, 137.9 และ 138.6 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

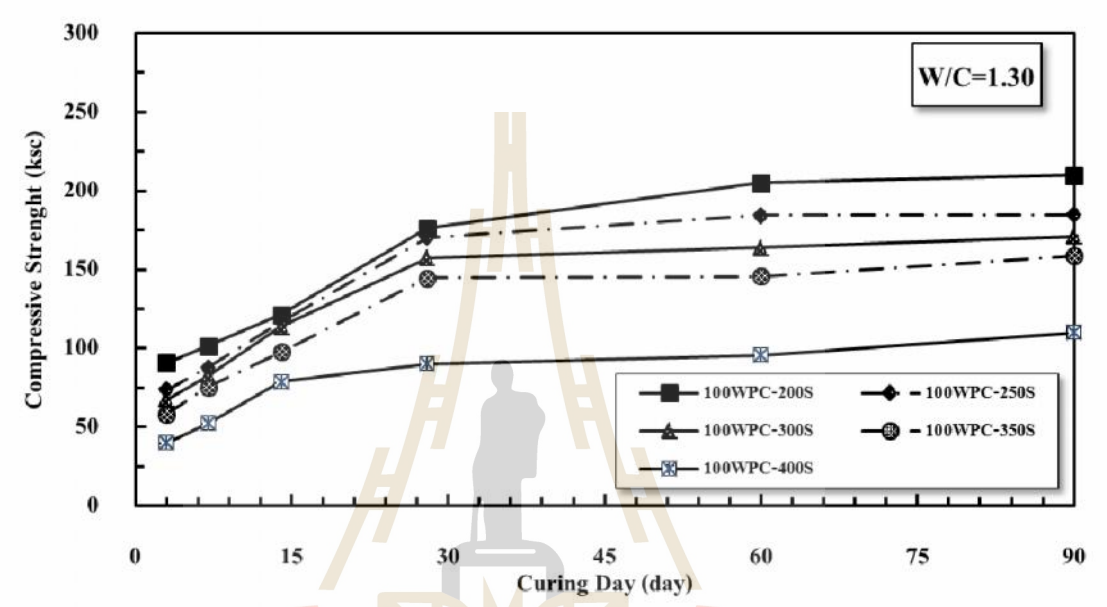


รูปที่ 4.6 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c เท่ากับ 1.20

3) กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่ w/c เท่ากับ 1.30

จากผลทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c เท่ากับ 1.20 ดังรูปที่ 4.7 พบว่า ค่ากำลังอัดมีค่าที่สูงขึ้นตามลำดับอายุการบ่ม ช่วงระยะแรกค่ากำลังอัดมีการพัฒนาไม่สูงมาก แต่เริ่มพัฒนากำลังที่อายุ 14 วัน ไปจนถึงอายุ 90 วัน ช่วงอายุ 28 วัน ถึงอายุ 90 วัน ค่ากำลังอัดมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นไม่มากและจะเริ่มคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 14 วัน แนวโน้มของค่ากำลังอัดเมื่อเทียบสัดส่วนตามลำดับอัตราส่วนผสม ยังพบอีกว่า แนวโน้มของกำลังอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วน

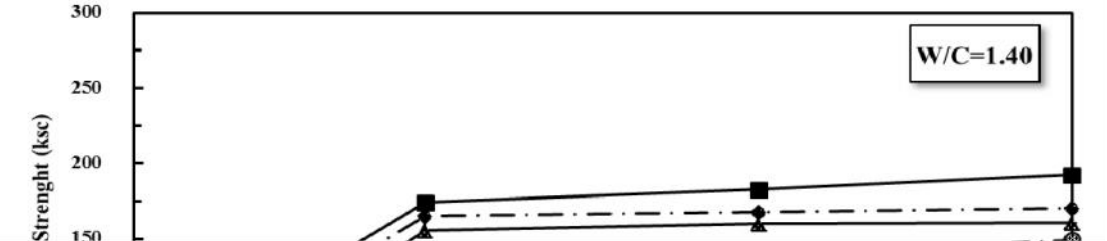
ปูนซีเมนต์ขาวต่อทรายลดลง ซึ่งคล้ายกับอัตราส่วนหินทรายเทียมควบคุมที่ w/c เท่ากับ 1.00 และ 1.20 ค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 100WPC-200S มีค่าสูงสุดที่ 91.0, 101.5, 121.4, 176.3, 205.0 และ 210.10 ksc และอัตราส่วน 100WPC-400S มีค่ากำลังอัดต่ำสุดที่ 40.2, 52.3, 78.8, 90.2, 95.7 และ 110.2 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c เท่ากับ 1.30

3) กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่ w/c เท่ากับ 1.40

ผลทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c เท่ากับ 1.40 ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 พบว่า ค่ากำลังอัดมีค่าที่สูงขึ้นตามลำดับอายุการบ่ม ช่วงระยะแรกค่ากำลังอัดมีการพัฒนาไม่สูงมาก แต่เริ่มพัฒนากำลังที่อายุ 14 วัน ไปจนถึงอายุ 90 วัน ช่วงอายุ 28 วัน ถึงอายุ 90 วัน ค่ากำลังอัดมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นไม่มากและจะเริ่มคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 14 วัน แนวโน้มของค่ากำลังอัดเมื่อเทียบสัดส่วนตามลำดับอัตราส่วนผสม ยังพบอีกว่า แนวโน้มของกำลังอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ขาวต่อทรายลดลง ซึ่งคล้ายกับอัตราส่วนหินทรายเทียมควบคุมที่ w/c เท่ากับ 1.00, 1.20 และ 1.30 ค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 100WPC-200S มีค่าสูงสุดที่ 67.9, 99.7, 116.5, 174.2, 182.5 และ 192.1 ksc และอัตราส่วน 100WPC-400S มีค่ากำลังอัดต่ำสุดที่ 40.0, 52.1, 58.5, 98.9, 100.9 และ104.8 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



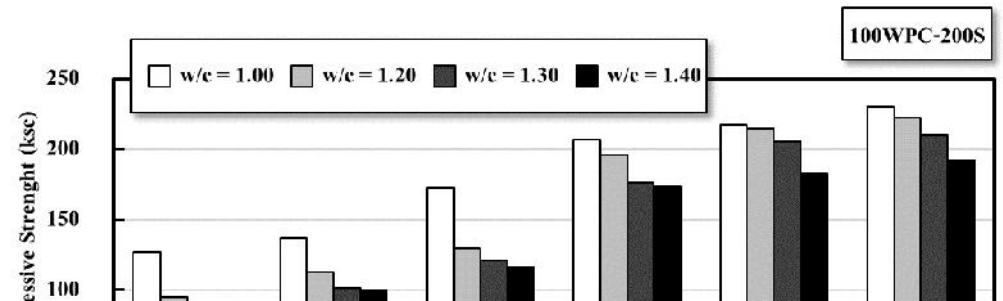
รูปที่ 4.8 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c เท่ากับ 1.40

รูปที่ 4.9 ตัวอย่างกำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมอัตราส่วน 1 ต่อ 3

4.5.2 การเปรียบเทียบกำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

1) กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2

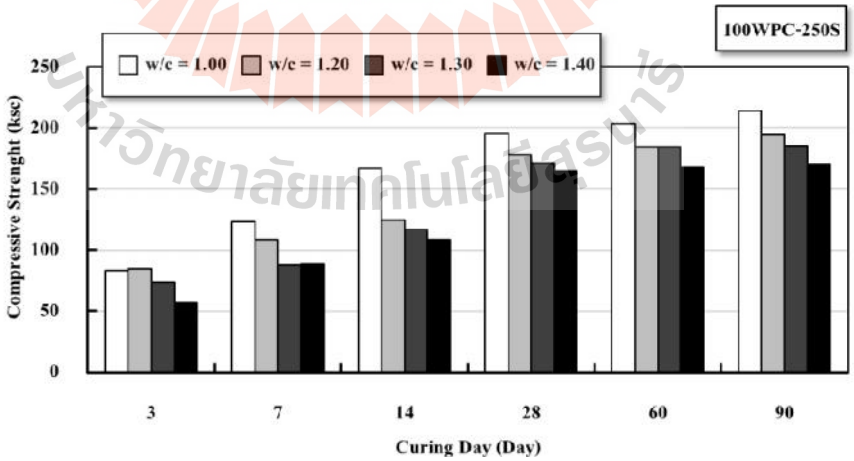
ผลการเปรียบเทียบกำลังอัดหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2 กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ควบคุม w/c ที่ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.8 พบว่า ค่ากำลังอัดจะพัฒนาขึ้นตามลำดับอายุเวลาของการบ่มที่ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เริ่มสมบูรณ์เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น และผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ก็มีผลต่อกำลังอัดเป็นอย่างมาก ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(w/c)ในอัตราส่วนที่ต่ำค่ากำลังอัดจะมีค่าที่มากกว่าอัตรา



รูปที่ 4.10 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2

2) กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2.5

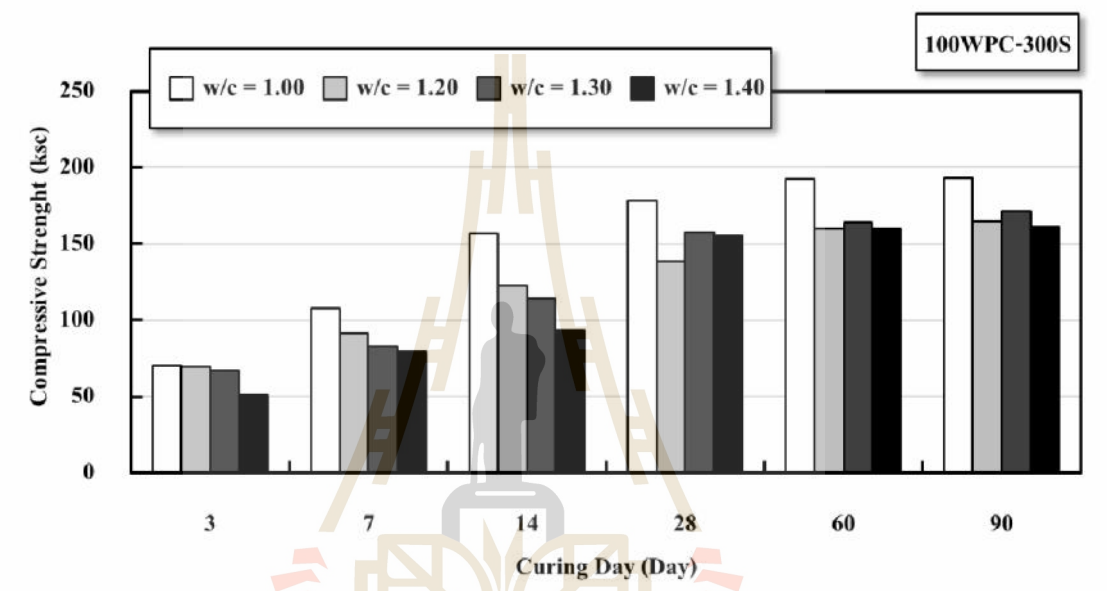
จากผลการเปรียบเทียบกำลังอัดหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2.5 กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.10 พบว่า ค่ากำลังอัดจะพัฒนาขึ้นตามลำดับอายุการบ่มเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เริ่มสมบูรณ์เมื่ออายุมากขึ้น และผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ก็มีผลต่อกำลังอัด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ต่ำค่ากำลังอัดจะมีค่าที่มากกว่าอัตราส่วนน้ำที่สูง เพราะถ้าใช้น้ำผสมสูงขึ้นกำลังอัดจะลดลง โดยค่ากำลังอัดที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2.5 อยู่ที่ระหว่าง 57.3 ถึง 214.2 ksc ตามลำดับอายุการบ่ม



รูปที่ 4.11 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2.5

3) กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3

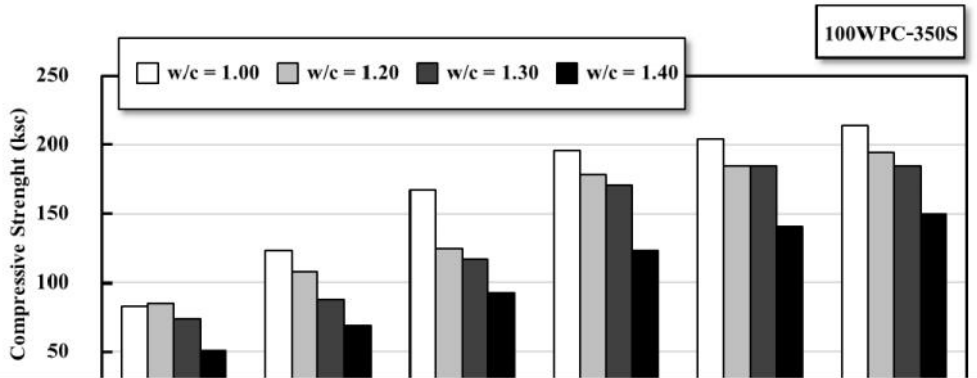
จากผลการเปรียบเทียบกำลังอัดหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2.5 กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.11 พบว่า ค่ากำลังอัดจะพัฒนาขึ้นตามลำดับอายุการบ่มเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เริ่มสมบูรณ์เมื่ออายุมากขึ้น และผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ก็มีผลต่อกำลังอัด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ต่ำค่ากำลังอัดจะมีค่าที่มากกว่าอัตราส่วนน้ำที่สูง เพราะถ้าใช้น้ำผสมสูงขึ้นกำลังอัดจะลดลง โดยค่ากำลังอัดที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2.5 อยู่ที่ระหว่าง 50.8 ถึง 193.4 ksc ตามลำดับอายุการบ่ม



รูปที่ 4.12 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3

4) กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3.5

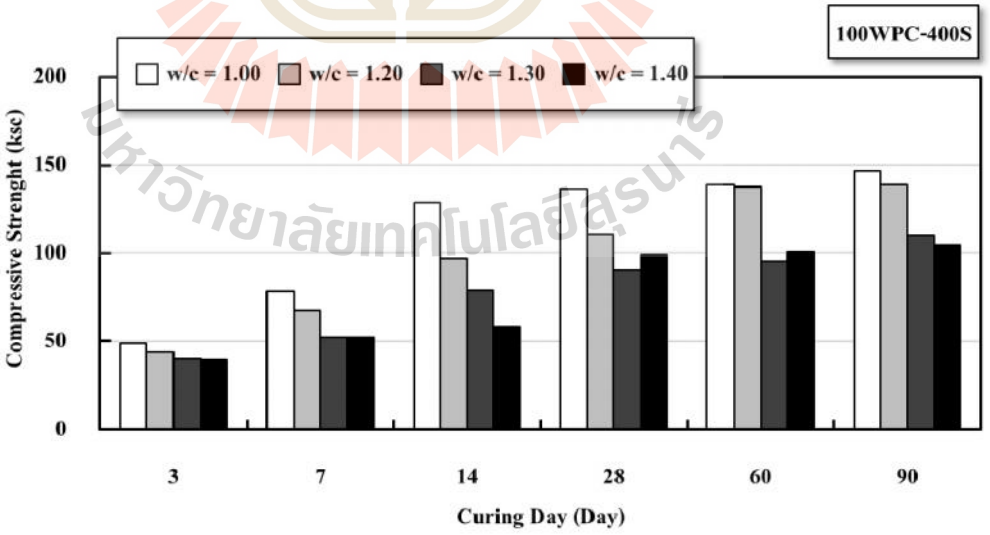
จากผลการเปรียบเทียบกำลังอัดหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3.5 กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.12 พบว่า ค่ากำลังอัดจะพัฒนาขึ้นตามลำดับอายุการบ่มเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เริ่มสมบูรณ์เมื่ออายุมากขึ้น ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อกำลังอัด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ต่ำค่ากำลังอัดมีค่าที่มากกว่าอัตราส่วนน้ำที่สูง เพราะถ้าใช้อัตราส่วนน้ำผสมสูงขึ้นค่ากำลังอัดจะลดลง โดยค่ากำลังอัดที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3.5 อยู่ที่ระหว่าง 50.6 ถึง 184.8 ksc ตามลำดับอายุการบ่ม



รูปที่ 4.13 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3.5

5) กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 4

จากผลการเปรียบเทียบกำลังอัดหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 4 กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.13 พบว่า ค่ากำลังอัดจะพัฒนาขึ้นตามลำดับอายุการบ่มเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เริ่มสมบูรณ์เมื่ออายุเพิ่มขึ้น ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อค่ากำลังอัด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ต่ำลงค่ากำลังอัดมีค่าที่มากกว่าอัตราส่วนน้ำที่สูง เพราะถ้าใช้อัตราส่วนน้ำผสมสูงขึ้นค่ากำลังอัดลดลง โดยค่ากำลังอัดที่อัตราส่วน 1 ต่อ 4 อยู่ที่ระหว่าง 40.0 ถึง 147.0 ksc ตามลำดับอายุการบ่ม



รูปที่ 4.14 กำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 4

เมื่อเปรียบเทียบผลกำลังอัดของทุกอัตราส่วนตั้งแต่อัตราส่วน 1 : 2(100WPC-200S), 1 : 2.5(100WPC-250S), 1 : 3(100WPC-300S), 1 : 3.5(100WPC-350S) และ 1 : 4(100WPC-300S) ดังในรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.13 พบอีกว่า ค่ากำลังอัดแปรผันตามอัตราส่วนของทรายที่ใช้ผสมหินทรายเทียมเบา และจะมีค่าลดต่ำลงเมื่อใช้ทรายผสมในสัดส่วนที่สูงขึ้น ส่วนผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio : w/c) ที่ใช้ผสมทั้ง 5 อัตราส่วน พบว่าทุกๆอัตราส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงการผสม กับน้ำในทุกอัตราส่วนทั้งหมดนั้นมีผลต่อความข้นเหลวของส่วนผสม และยังปรากฏผลที่ส่งต่อกำลังอัดในระยะยาวอีกด้วย เมื่อพิจรณาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อกำลังอัดที่มีค่าเพียงพอต่อการใช้งาน ในการวิจัยครั้งนี้มีค่าสูงอยู่ระหว่าง 1 : 2(100WPC-200S) ถึง 1 : 3(100WPC-200S) (การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นโดยจะใช้อัตราส่วน 1 : 3 ในการวิจัยหินทรายเทียมมวลเบา ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่นิยมใช้ผลิตหินทรายเทียมทั่วไป จากประสบการณ์ของกลุ่มผู้ชำนาญในการผลิต) และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(Water Cement Ratio : w/c)เท่ากับ 1.20 ถึง 1.30 นั้นมีความเหมาะสมต่อการผสมขึ้นรูปหินทรายทั้งความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน และประหยัดต้นทุน

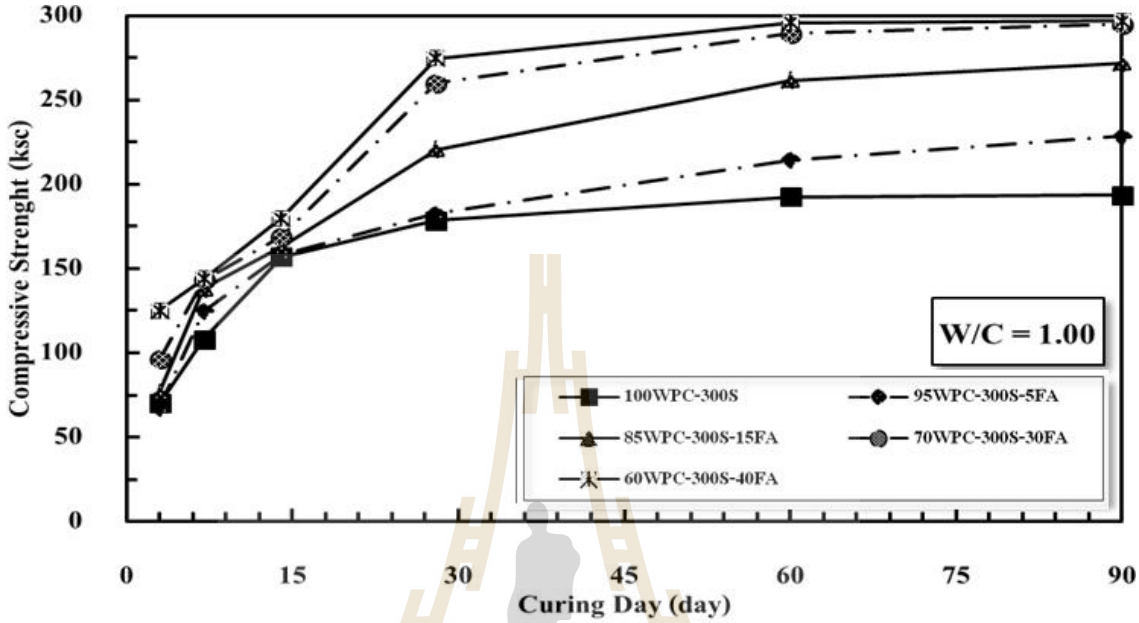
4.5.3 กำลังอัดของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย

จากผลทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมที่ผสมเถ้าลอย ศึกษาที่อัตราส่วน 1 : 3 ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน 5%, 15%, 20% และ 30% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่ w/c เท่ากับ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ดังนี้

1) กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่เถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.00

ผลทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยตั้งแต่ 5%,15%,30% และ40 % ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ หรือ (Water Cement Ratio : w/c)เท่ากับ 1.00 ดังรูปที่ 4.14 พบว่า ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม และแปรผันตามปริมาณการใช้เถ้าลอย ในช่วงระยะแรกการพัฒนาค่ากำลังอัดน้อย แต่จะเริ่มพัฒนากำลังสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ระยะปลาย คาดว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานพัฒนากำลังอัดอย่างสมบูรณ์ที่อายุ 28 วัน ต่อเนื่องไปจนถึงอายุ 90 วัน หากเปรียบเทียบสัดส่วนกำลังอัดกับอัตราส่วนควบคุมที่ 1 ต่อ 3 (100WPC-300S) ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ หรือ (Water Cement Ratio : w/c)เท่ากับ 1.00 พบอีกว่า ค่าของกำลังอัดที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าที่มากกว่าค่ากำลังอัดของอัตราส่วนควบคุม และค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมที่แทนที่เถ้าลอยอยู่ที่อัตราส่วน 60WPC-300S-40FA โดยน้ำหนักมีค่าสูงสุดที่ 125.0, 144.0, 179.9, 274.7, 295.8 และ 297.0 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

ตามลำดับ ในส่วนค่ากำลังอัดต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วน 95WPC-300S-5FA มีค่าต่ำสุดที่ 67.7, 124.7, 158.3, 182.5, 214.3 และ 228.4 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน



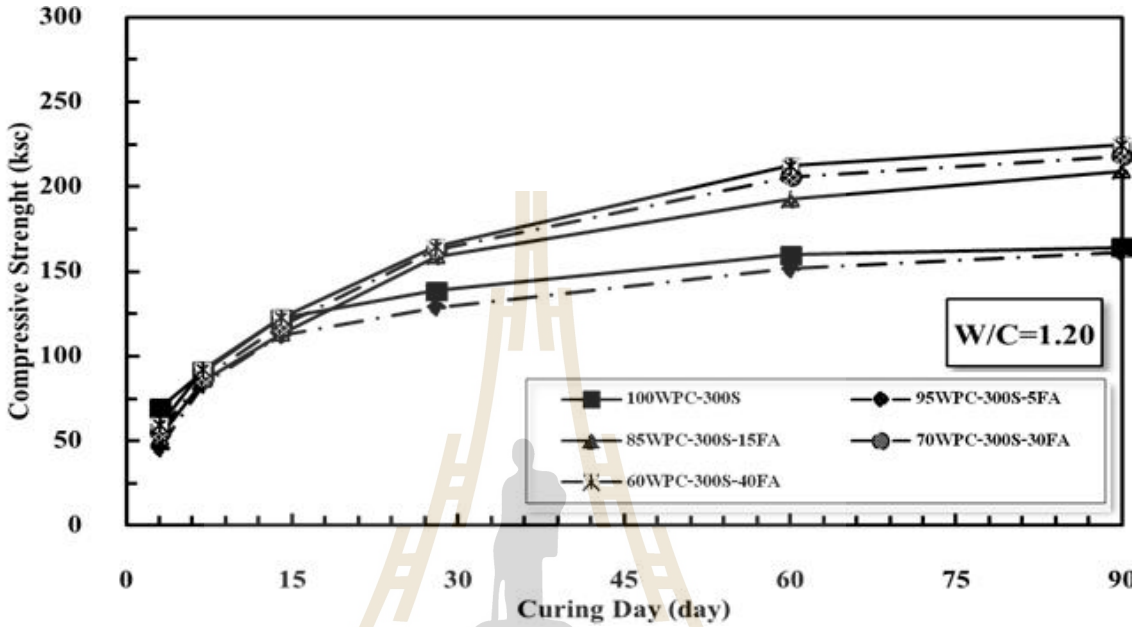
รูปที่ 4.15 กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.00

2) กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่เถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.20

จากผลทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยตั้งแต่ 5%,15%,30% และ 40 % ที่อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio : w/c)เท่ากับ 1.20 ดังรูปที่ 4.15 พบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับอายุการบ่มและแปรผันตามปริมาณการใช้เถ้าลอยผสม ในช่วงระยะแรกการพัฒนาค่ากำลังอัดไม่สูงมาก แต่มีการเริ่มพัฒนากำลังสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ระยะปลายการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานพัฒนากำลังอัดอย่างสมบูรณ์ที่อายุ 28 วัน ไปจนถึงอายุ 90 วัน ค่ากำลังอัดเปรียบเทียบสัดส่วนกับอัตราส่วนควบคุมที่ 1 ต่อ 3 (100WPC-300S) ที่ Water Cement Ratio : w/c เท่ากับ 1.20

พบว่า ค่าของกำลังอัดที่ใช้เถ้าลอยเป็นแทนที่ปูนซีเมนต์ขาวปอตแลนด์ในส่วนผสมปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าที่มากกว่าค่ากำลังอัดของอัตราส่วนควบคุม และค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมที่ผสมเถ้าลอยอยู่ที่อัตราส่วน 60WPC-300S-40FA มีค่าสูงสุดที่ 59.1, 92.3, 122.7, 164.5, 212.3 และ 224.6 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ และค่ากำลังอัดต่ำสุดอยู่ที่

อัตราส่วน 95WPC-300S-5FA มีค่าต่ำสุดที่ 45.9, 83.2, 112.4, 128.9, 151.6 และ 161.3 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



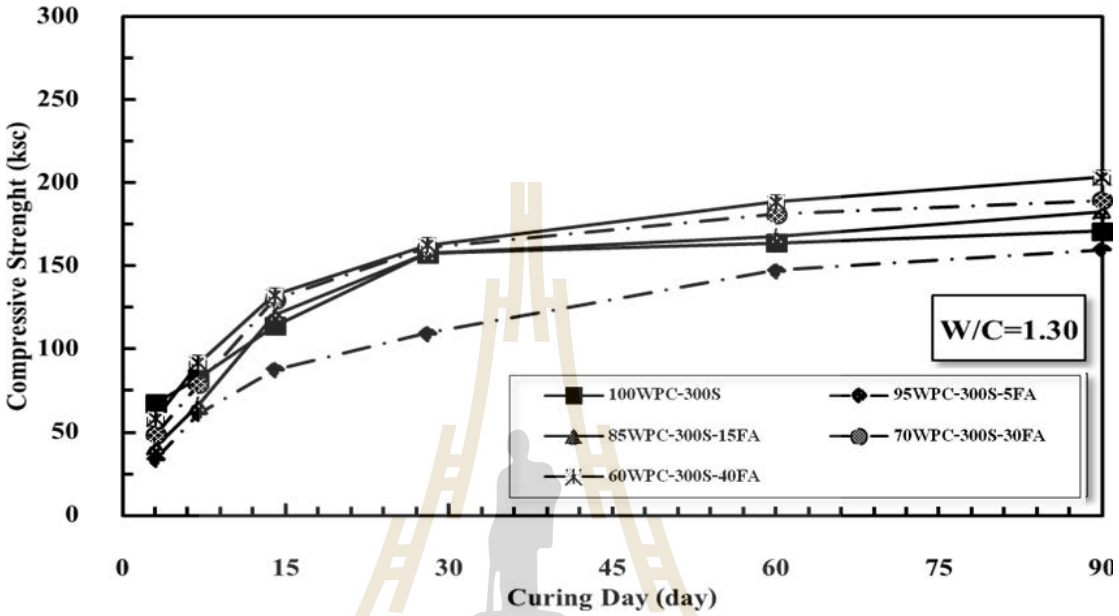
รูปที่ 4.16 กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.20

3) กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่เถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.30

จากผลทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยตั้งแต่ 5%,15%,30% และ 40 % ที่อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio : w/c) เท่ากับ 1.30 ดังรูปที่ 4.16 พบว่าค่ากำลังอัดประลัยมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุของการบ่ม และแปรผันตามปริมาณการผสมเถ้าลอย ช่วงระยะแรกการพัฒนาค่ากำลังอัดยังไม่สูงมาก แต่เริ่มพัฒนากำลังสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ระยะปลาย การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยพัฒนากำลังอัดเป็นไปอย่างสมบูรณ์ที่อายุ 28 วัน จนถึงอายุ 90 วัน ค่ากำลังอัดเปรียบเทียบสัดส่วนกับอัตราส่วนควบคุมที่ 1 ต่อ 3 (100WPC-300S) ที่อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio : w/c) เท่ากับ 1.30

พบอีกว่า ค่าของกำลังอัดที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าที่มากกว่าค่ากำลังอัดของอัตราส่วนควบคุม และค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมที่แทนที่เถ้าลอยอยู่ที่อัตราส่วน 60WPC-300S-40FA มีค่าสูงสุดที่ 57.9, 91.6, 132.6, 162.5, 188.4 และ 203.5 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ และค่ากำลังอัดต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วน 95WPC-

300S-5FA มีค่าต่ำสุดที่ 33.6, 61.3, 87.6, 109.7, 147.5 และ 159.8 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



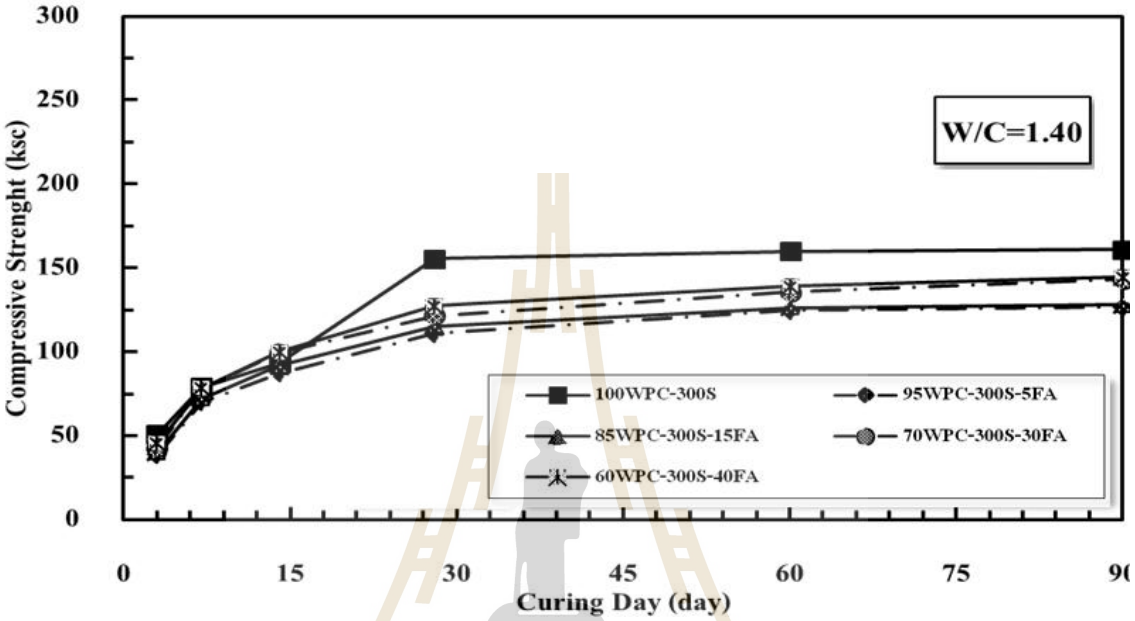
รูปที่ 4.17 กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.30

4) กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่เถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.40

จากผลทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยตั้งแต่ 5%,15%,30% และ 40 % ที่อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio : w/c) เท่ากับ 1.40 ดังรูปที่ 4.17 พบว่าค่ากำลังอัดประลัยมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุของการบ่ม และแปรผันโดยตรงกับปริมาณการผสมเถ้าลอย ช่วงเวลในระยะแรกการพัฒนาค่ากำลังอัดยังไม่สูงมาก ต่อมาเริ่มพัฒนากำลังสูงขึ้นต่อเนื่องเมื่อเข้าสู่ในช่วงเวลาระยะปลาย การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยพัฒนากำลังอัดเป็นไปอย่างสมบูรณ์ที่อายุ 28 วัน จนถึงอายุ 90 วัน ค่ากำลังอัดเปรียบเทียบสัดส่วนกับอัตราส่วนควบคุมที่ 1 ต่อ 3 (100WPC-300S) ที่ w/c เท่ากับ 1.30

พบอีกว่า ค่าของกำลังอัดที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ขาวปอตแลนด์ในส่วนผสมที่มีปริมาณสูงจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดประลัยในระยะปลายมีค่าที่มากกว่าเล็กน้อยอาจเป็นผลที่ w/c ที่มีปริมาณสูงทำให้ค่ากำลังอัดของอัตราส่วนควบคุม และค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมที่แทนที่เถ้าลอยอยู่ที่อัตราส่วน 60WPC-300S-40FA มีค่าสูงสุดที่ 45.4, 78.2, 99.7, 127.2, 138.9 และ 144.5 ksc

ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ และค่ากำลังอัดต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วน 95WPC-300S-5FA มีค่าต่ำสุดที่ 38.6, 70.0, 87.2, 110.8, 124.5 และ 126.7 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 กำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ w/c เท่ากับ 1.40

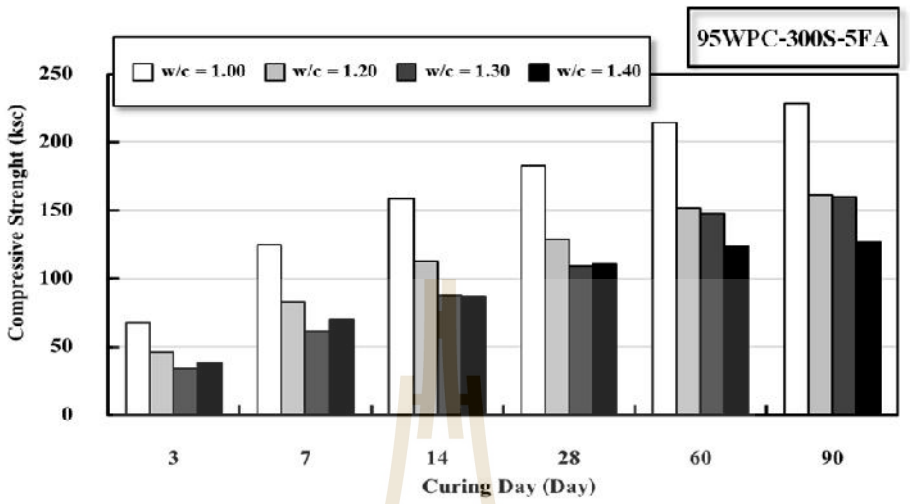
4.5.4 การเปรียบเทียบกำลังอัดของหินทรายเทียมแทนที่เถ้าลอยกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

1) กำลังอัดของหินทรายเทียมอัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 5 %

จากผลการเปรียบเทียบกำลังอัดประลัยของหินทรายเทียมมวลเบาที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่เถ้าลอย 5 % (95WPC-300S-FA5) กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ทดสอบกำลังที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.18

พบว่าค่ากำลังอัดประลัยมีการพัฒนาขึ้นตามอายุของการบ่ม และผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(Water cement ratio ; w/c) ที่เป็นตัวกำหนดปริมาณน้ำที่ใช้ผสมมีผลต่อค่ากำลังอัด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ต่ำ จะให้ค่ากำลังอัดประลัยที่มีค่ามากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง ซึ่งส่งผลต่อการก่อตัว และแข็งตัวของเพสต์ซีเมนต์มอร์ต้าร์ในช่วงอายุที่เพิ่มมากขึ้น

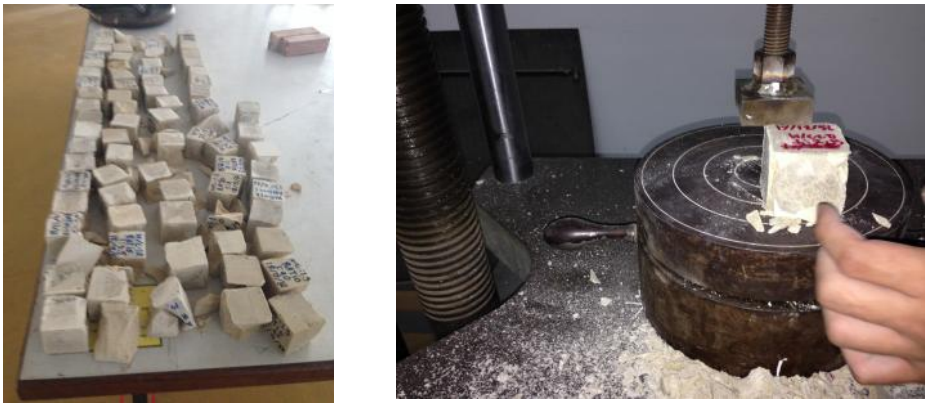
โดยค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 ผสมเถ้าลอย 5 % อยู่ที่ระหว่าง 38.6 ksc ถึง 228.4 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



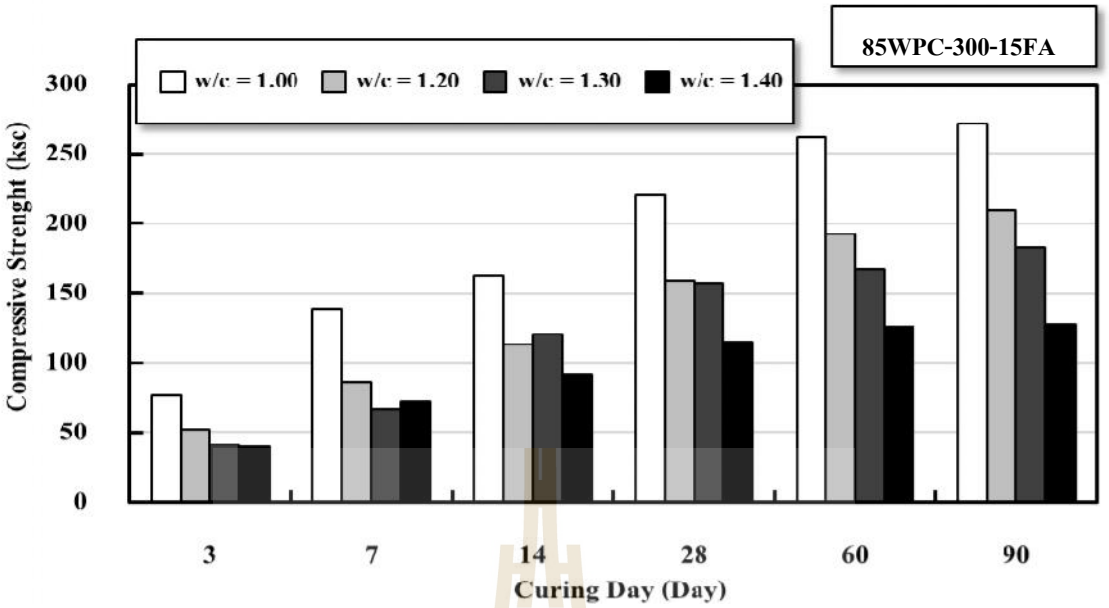
รูปที่ 4.19 กำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 5 %

2) กำลังอัดของหินทรายเทียมอัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 15 %

จากผลการเปรียบเทียบกำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่เถ้าลอย 15 % (85WPC-300S-15FA) กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.19 พบว่า ค่ากำลังอัดพัฒนาขึ้นตามลำดับอายุการบ่มและผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เป็นตัวกำหนดปริมาณน้ำที่ใช้ผสมมีผลต่อค่ากำลังอัด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ต่ำค่ากำลังอัดจะมีค่าที่มากกว่าอัตราส่วนน้ำที่สูง ซึ่งส่งผลต่อการก่อตัวและแข็งตัวของเพสต์ซีเมนต์มอร์ต้าร์ในช่วงอายุที่เพิ่มมากขึ้น โดยค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 ผสมเถ้าลอย 15 % อยู่ที่ระหว่าง 39.8 ถึง 271.8 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 การทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมมวลเบาอัตราส่วน 1 ต่อ 3

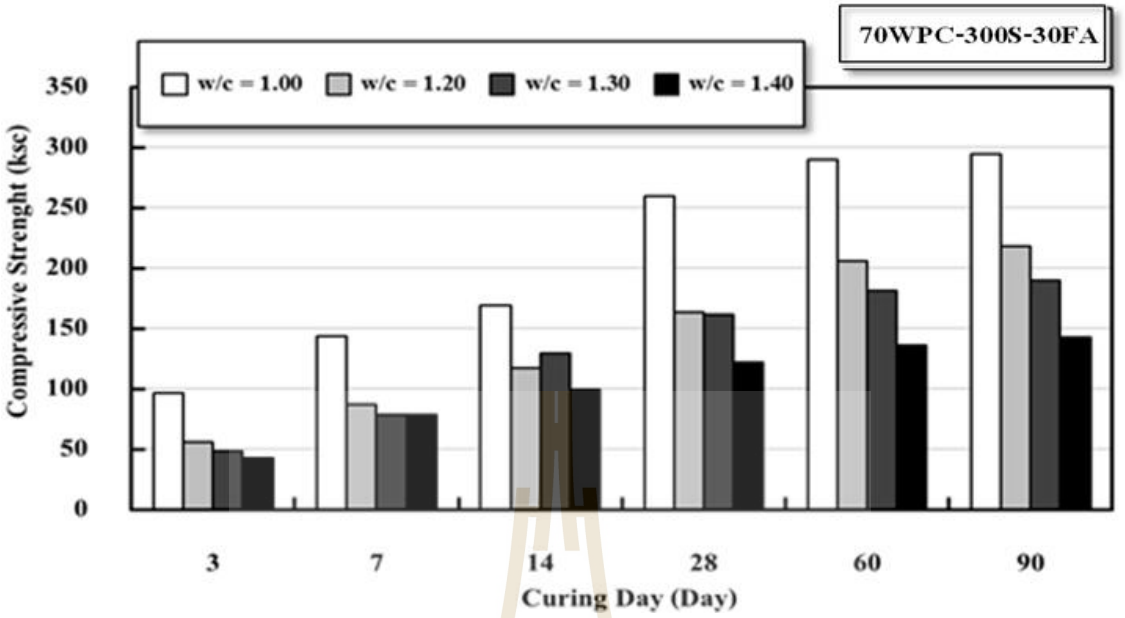


รูปที่ 4.21 กำลังอัดของหินทรายเทียมอัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 15 %

3) กำลังอัดของหินทรายเทียมอัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 30 %

จากผลการเปรียบเทียบกำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ขาวปอตแลนด์ด้วยเถ้าลอย 30 % (70WPC-300S-FA30) ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio : w/c) เท่ากับ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุการทดสอบกำลงอัด 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.21

พบว่าค่ากำลังอัดประลัยของซีเมนต์มอร์ต้านั้น มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นตามลำดับของอายุการบ่ม และผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(w/c) ที่เป็นตัวกำหนดปริมาณน้ำที่ใช้ผสมมีผลต่อค่ากำลังอัด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ต่ำค่ากำลังอัดจะมีค่าที่สูงกว่าอัตราส่วนน้ำที่สูง ซึ่งส่งผลต่อการก่อตัวและแข็งตัวของเพสต์ซีเมนต์มอร์ต้าร์ในช่วงอายุที่เพิ่มมากขึ้น โดยค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนักแทนที่เถ้าลอย 30 % จะอยู่ที่ระหว่าง 43.3 ksc ถึง 294.8 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



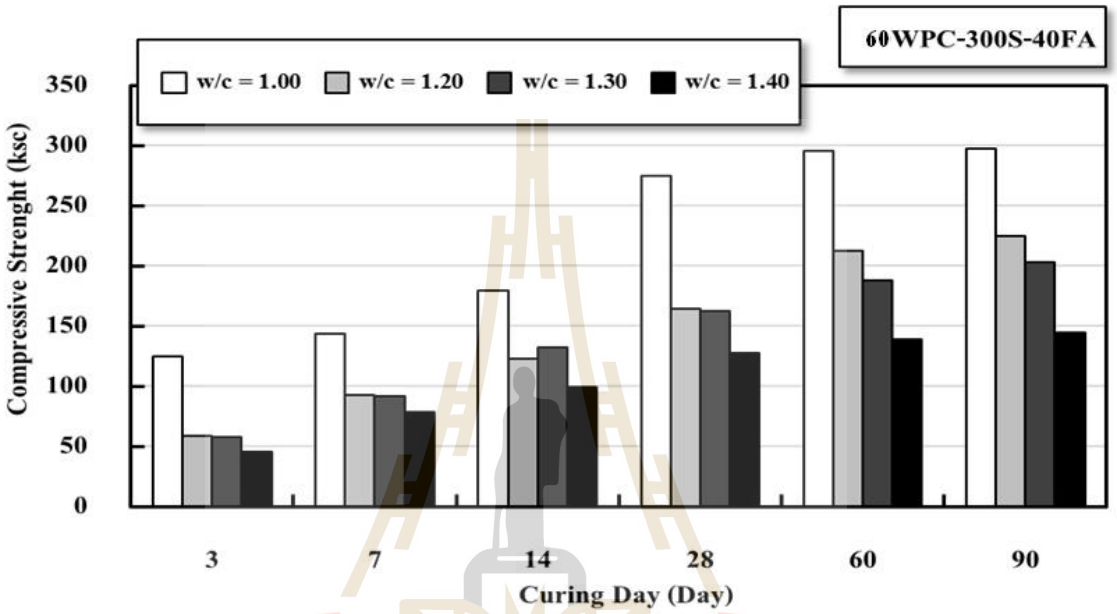
รูปที่ 4.22 กำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 30 %

4) กำลังอัดของหินทรายเทียมอัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 40 %

จากผลการเปรียบเทียบกำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ขาวด้วยเถ้าลอย 30 % ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(Water cement ratio ; w/c) ที่ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ทดสอบกำลังอัดประลัยที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.22

พบว่า ค่ากำลังอัดประลัยที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน มีพัฒนาขึ้นตามอายุการบ่มแบบไม่ค่อยเป็นค่อยไป และผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เป็นตัวกำหนดปริมาณน้ำที่ใช้ผสมนั้นมีผลต่อค่ากำลังอัดประลัย ปรากฏว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ต่ำ จะทำให้ค่ากำลังอัดประลัยจะมีค่าที่สูง เช่นเดียวหากว่าอัตราส่วนน้ำที่สูงจะทำให้ค่ากำลังอัดประลัยจะมีค่าน้อย ยังคงส่งผลต่อการก่อตัวและแข็งตัวของเพสต์ซีเมนต์มอร์ต้าร์ในช่วงอายุที่เพิ่มมากขึ้น โดยค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่ด้วยเถ้าลอย 40 % (60WPC-300S-FA40) อยู่ที่ระหว่าง 45.4 ถึง 297.0 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลของค่ากำลังอัดของอัตราส่วน 1 : 3 ผสมเถ้าลอย 5 %, 15 %, 30% และ 40 % กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.22 ยังพบอีกว่า ค่ากำลังอัดแปรผันตามอัตราส่วนของปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ผสมและผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่

เป็นตัวบ่งบอกถึงค่ากำลังอัดซึ่งมีผลต่อความข้นเหลว การก่อตัวและแข็งตัวของส่วนผสมและค่ากำลังอัดในระยะยาวปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในสัดส่วนที่สูงขึ้นส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดที่ลดลง อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อกำลังอัด ความข้นเหลว ความสามารถเทได้อยู่ที่ 85WPC-300S-15FA และ 70WPC-300S-30FA และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมต่อการผสมอยู่ที่ w/c เท่ากับ 1.20 และ 1.30

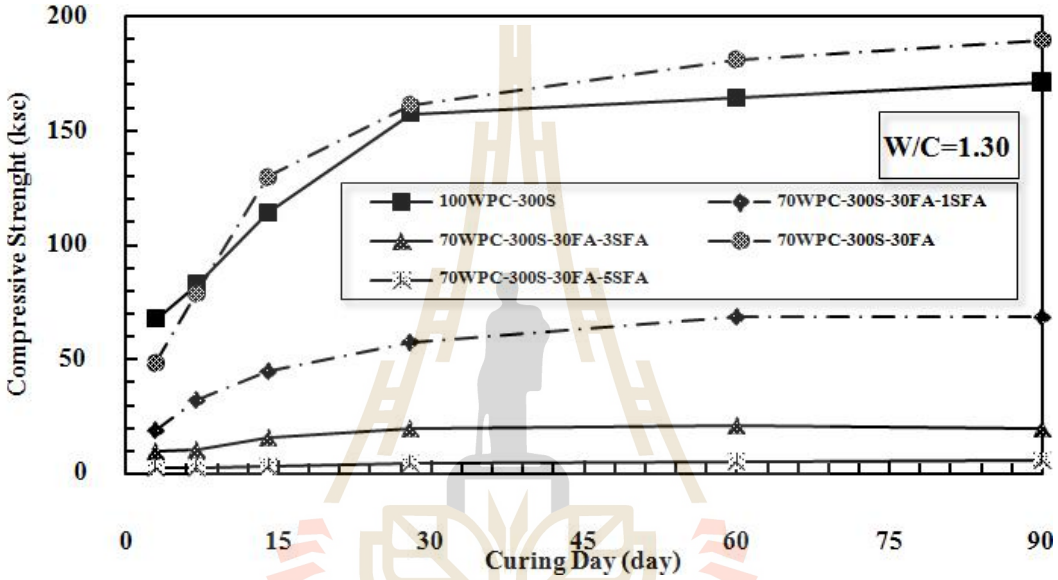


รูปที่ 4.23 กำลังอัดของหินทรายเทียมอัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 40 %

5) กำลังอัดของหินทรายเทียมอัตราส่วน 1 ต่อ 3 เถ้าลอย 30 %สารเพิ่มฟองที่ 1,3 และ5%

จากผลการเปรียบเทียบกำลังอัดของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ขาวด้วยเถ้าลอย 30 % ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(Water cement ratio ; w/c) คงที่ 1.30 สารเพิ่มฟองสังเคราะห์(synthetic foaming agent) ทดสอบกำลังอัดมีค่าต่ำ ที่เมื่อครบอายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.24 ผลจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และ สารเพิ่มฟองที่เป็นตัวกำหนดปริมาณน้ำที่ใช้ผสมส่งผลต่อกำลังอย่างมาก w/c สารเพิ่มฟองโฟมน้อยจะทำให้ค่ากำลังอัดประลัยจะมีค่าที่สูง โดยเฉพาะสารเพิ่มฟองหากมีเปอร์เซ็นต์ของสารที่สูงจะทำให้เกิดการแยกตัวของเนื้อซีเมนต์หินทรายเทียมมวลเบา ความหนาแน่นต่ำ ความพรุนสูง การหดตัว ความคงตัว และกำลังอัดประลัยที่มีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับอัตราส่วนปกติที่ 1ต่อ 3 และอัตราส่วนผสมแทนที่ด้วยเถ้าลอย 30 เปอร์เซ็นต์สารเพิ่มฟองโฟม (70WPC-300S-FA30-1SFA) อยู่ที่ระหว่าง 18.9 ถึง 63.9 ksc ,

(70WPC-300S-FA30-3SFA) อยู่ที่ระหว่าง 9.5 ถึง 15.7 ksc และ(70WPC-300S-FA30-5SFA) อยู่ที่ระหว่าง 2.1 ถึง 5.6 ksc ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วันการทสอบครั้งนี้ต้องอิงถึงความเป็นจริงที่ผิวหินทรายเป็นหลักในลักษณะที่พิจรณาทางการมอง(Vision) ผิว(Face) สี(Coler) ถึงแม้ความสามารถในทางกายภาพตามหลักวิศวกรรม ดังนั้นความเป็นไปไของการใส่เสารพิ่มฟองสังเคราะห์(synthetic foaming agent) ที่อยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์มีความเป็นไปได้มากก กับอัตราส่วน 1 ต่อ 3 แทนที่ด้วยเถ้าลอย 30 % (70WPC-300S-FA30)



รูปที่ 4.24 กำลังอัดอัตราส่วน 1 ต่อ 3 เถ้าลอยแทนที่ 30 %สารเพิ่มฟอง 1%,3% และ5%

4.6 ความหนาแน่น (Density)

4.6.1 ความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมควบคุม

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมควบคุมที่อัตราส่วน 1 : 2, 1 : 2.5, 1 : 3, 1 : 3.5 และ 1 : 4 อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่ w/c เท่ากับ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 28 วัน ดังตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมควบคุมมีค่าแปรผันตามปริมาณอัตราส่วนของทรายต่อสารซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) ค่าความหนาแน่นที่ w/c เท่ากับ 1.00 มีค่าอยู่ระหว่าง 1959 – 2070 kg/m^3 , w/c เท่ากับ 1.20 มีค่าอยู่ระหว่าง 1954 – 2015 kg/m^3 , w/c เท่ากับ 1.30 มีค่าอยู่ระหว่าง 1830 – 1989 kg/m^3 และ w/c เท่ากับ 1.40 มีค่าอยู่ระหว่าง 1810 – 1998 kg/m^3 ตามลำดับ และยังพบอีกว่าค่าความหนาแน่นที่ลดลงตามปริมาณ

อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างสารซีเมนต์กับน้ำและทรายในช่วงระยะเวลาที่มากขึ้น จึงมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าที่ลดลง

ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมควบคุม

Symbol / Curing Day	Dry Density (kg/m^3)					
	3	7	14	28	60	90
	w/c = 1.00					
100WPC-200S	1958	2020	2040	1959	1966	1978
100WPC-250S	1907	2024	2054	2025	1985	1909
100WPC-300S	1986	1954	2021	2070	1992	2009
100WPC-350S	1946	1981	2043	2012	1951	1982
100WPC-400S	1976	2014	2052	1968	1955	1959
	w/c = 1.20					
100WPC-200S	1861	1990	2005	1999	1950	1993
100WPC-250S	1930	1988	1971	1984	1981	1912
100WPC-300S	1926	2015	2045	2015	1994	1919
100WPC-350S	1971	1961	2011	1954	1985	1951
100WPC-400S	1969	1991	2021	1988	1930	1968
	w/c = 1.30					
100WPC-200S	1850	1969	1997	1894	1885	1839
100WPC-250S	2140	1946	2009	1854	1987	1909
100WPC-300S	1885	1935	1813	1830	1887	1809
100WPC-350S	1882	2014	2099	1989	1987	1982
100WPC-400S	1989	2050	1981	1980	2021	2022
	w/c = 1.40					
100WPC-200S	1792	1916	2006	1810	1887	1889
100WPC-250S	1842	1925	2008	1957	1901	1823
100WPC-300S	1823	1765	1968	1998	1846	1839
100WPC-350S	1852	1849	1881	1872	1855	1859
100WPC-400S	1995	1992	1981	1952	1966	1973

หมายเหตุ : ค่าความหนาแน่นที่ใช้ทดสอบเป็นค่าความหนาแน่นแห้งในอากาศ (Air dry density)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.6.2 ความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมที่อัตราส่วน 1 : 3 โดยแทนที่เถ้าลอยที่ 5 %, 15 %, 30 % และ 40% ใช้อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่ w/c เท่ากับ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 28 วัน ดังตารางที่ 4.5 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณการผสมเถ้าลอยและอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ ค่าความหนาแน่นแห้งที่ลดลงเป็นผลเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยที่ใช้ผสมช่วยลดน้ำหนัก เพราะเถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ และผลของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างสารซีเมนต์กับน้ำและเถ้าลอยมีส่วนทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นที่ลดลงจากส่วนควบคุมอย่างชัดเจนแต่มีค่าที่แตกต่างกันไม่มาก ค่าความหนาแน่นที่ w/c เท่ากับ 1.00 มีค่าอยู่ระหว่าง 1261 ถึง 1802 kg/m^3 , w/c เท่ากับ 1.20 มีค่าอยู่ระหว่าง 1829 ถึง 2069 kg/m^3 , w/c เท่ากับ 1.30 อยู่ระหว่าง 1678 ถึง 1943 kg/m^3 และ w/c ที่ 1.40 อยู่ระหว่าง 1547 ถึง 1817 kg/m^3

รูปที่ 4.25 ขนาด และหน่วยน้ำหนักหินทรายเทียมทุกอัตราส่วนผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.5 ความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ขาว

Symbol / Curing Day	Dry Density (kg/m^3)					
	3	7	14	28	60	90
	w/c = 1.00					
100WPC-300S	1986	1954	2021	2070	1992	2009
95WPC-300S-5FA	1939	1972	1913	1958	1968	1911
85WPC-300S-15FA	1999	1922	1955	1907	1912	1918
70WPC-300S-30FA	1926	1877	1797	1761	1770	1763
60WPC-300S-40FA	1829	1950	1693	1802	1816	1776

ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ขาว(ต่อ)

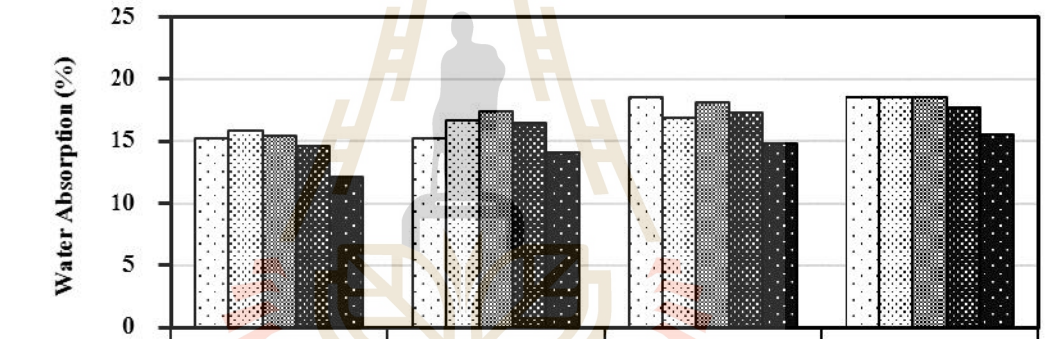
Symbol / Curing Day	Dry Density (kg/m^3)					
	3	7	14	28	60	90
	w/c = 1.20					
100WPC-300S	1926	2015	2045	2015	1994	1919
95WPC-300S-5FA	1986	1953	2021	2069	2019	2009
85WPC-300S-15FA	1926	2016	2044	2014	2026	2027
70WPC-300S-30FA	1884	1934	1812	1829	1885	1809
60WPC-300S-40FA	1823	1764	1968	1997	1995	1905
	w/c = 1.30					
100WPC-300S	1885	1935	1813	1830	1887	1809
95WPC-300S-5FA	1900	1817	2113	1778	1786	1734
85WPC-300S-15FA	1876	1857	2172	1760	1743	1747
70WPC-300S-30FA	1829	1839	1911	1943	1836	1853
60WPC-300S-40FA	1851	1834	1854	1929	1854	1845
	w/c = 1.40					
100WPC-300S	1823	1765	1968	1998	1846	1839
95WPC-300S-5FA	1868	1842	2052	1985	1997	1976
85WPC-300S-15FA	1988	1829	1968	1817	1834	1810
70WPC-300S-30FA	1829	1808	1829	1784	1798	1823
60WPC-300S-40FA	1861	2019	1939	1847	1836	1856
	w/c = 1.30					
100WPC-300S	1885	1935	1813	1830	1887	1809
70WPC-300S-30FA-1SFA	1623	1659	1658	1627	1665	1635
70WPC-300S-30FA-3SFA	1512	1559	1526	1507	1545	1533
70WPC-300S-30FA-5SFA	1163	1215	1190	1185	1197	1246

หมายเหตุ : ค่าความหนาแน่นที่ใช้ทดสอบเป็นค่าความหนาแน่นแห้งในอากาศ (Air dry density)

4.7 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

4.7.1 การดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมควบคุม

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมควบคุม ดังรูปที่ 4.22 ที่อัตราส่วน 1 : 2, 1 : 2.5, 1 : 3, 1 : 3.5 และ 1 : 4 อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่ w/c เท่ากับ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 28 วัน พบว่า ค่าการดูดซึมมีค่าที่ลดลงตามปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ผสมและตามอัตราส่วนของซีเมนต์ขาวต่อทรายละเอียดในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น และผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในระยะยาวส่งผลต่อการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้น เพราะมีความต้องการใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมาก จึงมีค่าการดูดซึมที่สูงและเกี่ยวเนื่องกับรูพรุนช่องว่างภายในเนื่องจากอนุภาคมวลรวมละเอียดด้วย ค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำสุดอยู่ที่ 100WPC-400S ที่ w/c = 1.00 มีค่าเท่ากับ 12.1 % และค่าการดูดซึมน้ำที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 100WPC-250S และ 100WPC-300S ที่ w/c = 1.40 มีค่าเท่ากับ 18.6 %



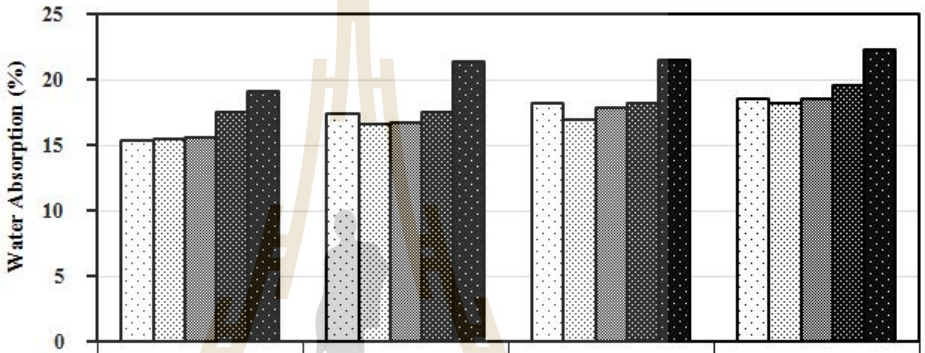
	w/c = 1.00	w/c = 1.20	w/c = 1.30	w/c = 1.40
100WPC-200S	15.2	15.2	18.5	18.5
100WPC-250S	15.8	16.7	16.9	18.6
100WPC-300S	15.4	17.4	18.2	18.6
100WPC-350S	14.6	16.5	17.3	17.8
100WPC-400S	12.1	14.1	14.9	15.6

รูปที่ 4.26 กราฟการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c = 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40

4.7.2 การดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย ดังรูปที่ 4.23 ที่อัตราส่วน 1 : 3 อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่ w/c เท่ากับ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 28 วัน พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าที่ลดลงตามปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ผสมและตามอัตราส่วนของเถ้าลอยที่

ใช้ผสมในปริมาณที่ไม่มาก (5% ถึง 15%) และผลของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างสารซีเมนต์ขาวกับเถ้าลอยส่งผลต่อการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้นเมื่อใช้ผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (30% - 40%) เพราะมีความต้องการใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาค่อนข้างมาก จึงส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำสูง ค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำสุดอยู่ที่ 95WPC-300S-5FA ที่ w/c = 1.00 มีค่าเท่ากับ 15.5 % และค่าการดูดซึมน้ำที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 60WPC-300S-40FA ที่ w/c = 1.40 มีค่าเท่ากับ 22.3 % ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการดูดซึมน้ำที่อัตราส่วนควบคุมที่ 100WPC-300S ทำให้ทราบว่าการใช้เถ้าลอยผสมในสัดส่วนที่ต่ำส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าอัตราส่วนควบคุม



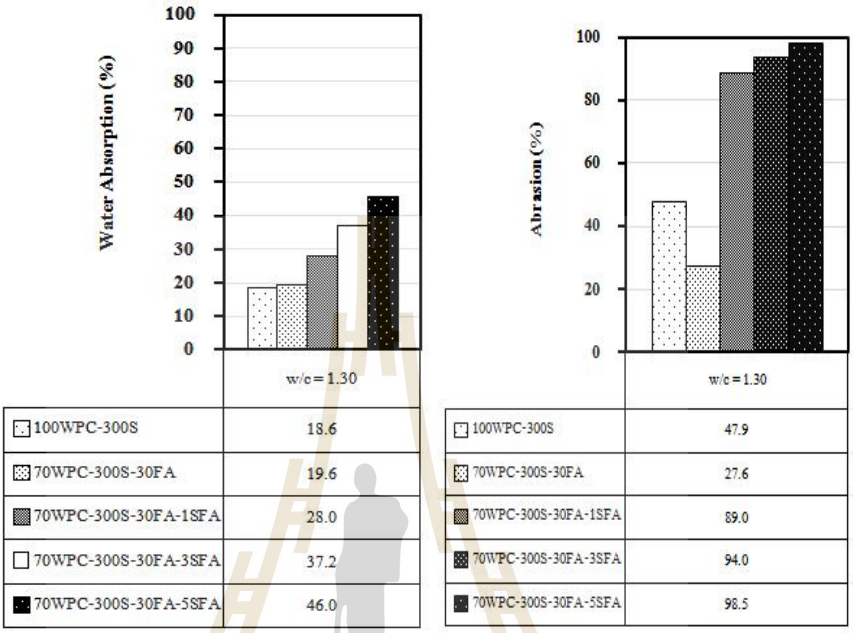
	w/c = 1.00	w/c = 1.20	w/c = 1.30	w/c = 1.40
100WPC-300S	15.4	17.4	18.2	18.6
95WPC-300S-5FA	15.5	16.6	17.0	18.3
85WPC-300S-15FA	15.6	16.8	17.9	18.6
70WPC-300S-30FA	17.5	17.6	18.2	19.6
60WPC-300S-40FA	19.2	21.4	21.5	22.3

รูปที่ 4.27 กราฟการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียม ที่ w/c = 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40

4.7.3 การดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% และสารเพิ่มฟอง

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย ดังรูปที่ 4.28 ที่อัตราส่วน 1 : 3 แทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 30% อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์คงที่ (Water cement ratio ; w/c) เท่ากับ 1.30 กับสารฟองโฟมที่ 1%,3% และ 5% ที่อายุ 28 วัน (70WPC-300S-30FA-SFA1), (70WPC-300S-30FA-SFA3) และ (70WPC-300S-30FA-SFA5) พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำมีค่า 28.0,37.2 และ46.0% มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เมื่อเทียบ70WPC-300S-30FA

ค่าที่ 42.9%,89.8%,134.7% ตามปริมาณสารเพิ่มฟอง และมีผลต่อการสึกกร่อนหินทรายเทียมที่เพิ่มขึ้น 227%,241% และ257% การแยกตัวของวัสดุ และผิวหน้ามีมากตาปริมาณสารเพิ่มฟอง(SFA)

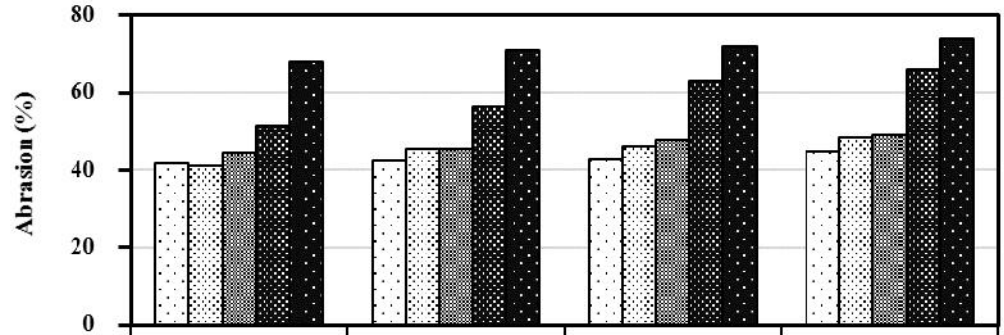


รูปที่ 4.28 กราฟการดูดซึม และการสึกกร่อนหินทรายเทียม w/c = 1.30 สารเพิ่มฟอง 1%,3%และ5%

4.8 ความทนทานต่อการสึกกร่อน (Abrasion Durability)

4.8.1 การสึกกร่อนของหินทรายเทียมควบคุม

เมื่อพิจารณาค่าการสึกกร่อนของหินทรายเทียมควบคุม ดังรูปที่ 4.29 ที่อัตราส่วน 1 : 2, 1 : 2.5, 1 : 3, 1 : 3.5 และ 1 : 4 อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่ w/c เท่ากับ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 28 วัน พบว่า ค่าการสึกกร่อนมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนของทรายละเอียดในส่วนผสม และผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ส่งผลต่อการสึกกร่อนไม่มาก โดยค่าการสึกกร่อนที่ต่ำมีผลต่อความแกร่ง กำลัง และการนำไปใช้งาน อัตราส่วนของทรายละเอียดที่สูงขึ้นยังส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของสารซีเมนต์และทราย ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวต่ำส่งผลกระทบต่อค่าการสึกกร่อน ค่าการสึกกร่อนต่ำสุดอยู่ที่ 100WPC-250S ที่ w/c = 1.00 มีค่าเท่ากับ 41.0 % และค่าการสึกกร่อนสูงสุดอยู่ที่ 100WPC-400S ที่ w/c = 1.40 มีค่าเท่ากับ 73.9 % ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ (หิน) ที่ค่ามาตรฐานที่ยอมให้ไม่เกิน 40 % บ่งบอกได้ว่าค่าการสึกกร่อนในอัตราส่วนควบคุมมีค่าที่เกินมาตรฐาน



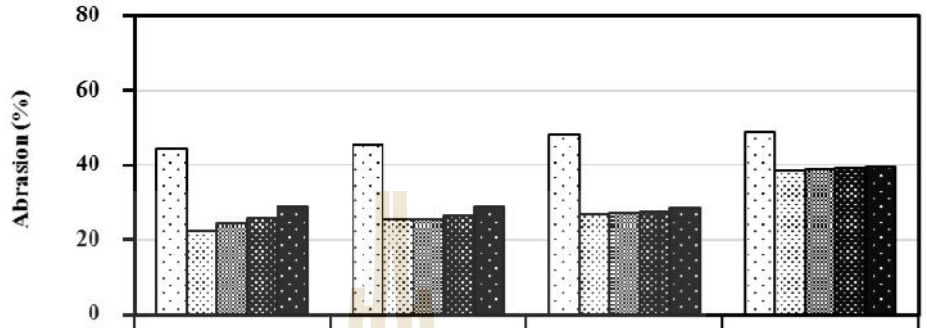
	w/c = 1.00	w/c = 1.20	w/c = 1.30	w/c = 1.40
100WPC-200S	41.8	42.4	42.8	44.8
100WPC-250S	41.0	45.4	46.0	48.6
100WPC-300S	44.3	45.3	47.9	49.0
100WPC-350S	51.4	56.5	63.1	66.0
100WPC-400S	67.8	71.0	72.0	73.9

รูปที่ 4.29 กราฟค่าการสึกกร่อนของหินทรายเทียมควบคุมที่ w/c = 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40

4.8.2 การสึกกร่อนของหินทรายเทียม

พิจารณาค่าการสึกกร่อนของหินทรายเทียมควบคุม ดังรูปที่ 4.30 ที่อัตราส่วน 1 : 3 อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่ w/c เท่ากับ 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 28 วัน พบว่าค่าการสึกกร่อนที่ลดลงลดลงตามอัตราส่วนของเถ้าลอยใช้แทนปูนซีเมนต์ขาวอยู่ระหว่าง 5% - 15% และในปริมาณ 30% - 40% ค่าการสึกกร่อนมีค่าที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ค่าการสึกกร่อนที่ต่ำจะส่งผลต่อค่าความแกร่ง กำลัง และการใช้งาน อัตราส่วนของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของสารซีเมนต์กับทราย และในเถ้าลอยทำให้เกิดเป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวส่งผลต่อค่าการสึกกร่อน ค่าการสึกกร่อนต่ำสุดอยู่ที่ 95WPC-300S-5FA ที่ w/c = 1.00 มีค่าเท่ากับ 22.1 % และค่าการสึกกร่อนสูงสุดอยู่ที่ 60WPC-300S-40FA ที่ w/c = 1.40 มีค่าเท่ากับ 39.3 % หากเปรียบเทียบอัตราส่วนควบคุม 100WPC-300S พบว่า ค่าการสึกกร่อนมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนควบคุม และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสึกกร่อนมวลรวมหยาบ (หิน) ที่ค่ามาตรฐานที่ยอมให้ไม่เกิน 40 %งานคอนกรีตไม่เกิน 50 % บ่งบอกได้ว่าค่าการสึกกร่อนในอัตราส่วนวิจัยมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และอัตราส่วน70WPC-300S-30FA ที่ w/c = 1.30 สารเพิ่มฟอง1%,3% และ 5% ดังรูปที่ 4.25 พบว่าค่าการสึกกร่อนมีเพิ่มขึ้น 227%,241% และ257% เมื่อเทียบกับ 70WPC-

300S-30FA แต่ในการพิจรณาการนำไปใช้งานงานศิลปะที่ใช้มาตราฐานคอนกรีตมวลเบานั้นเราอาจพิจรณา



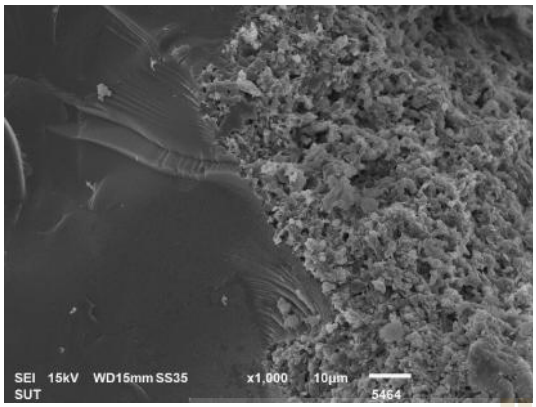
	w/c = 1.00	w/c = 1.20	w/c = 1.30	w/c = 1.40
100WPC-300S	44.3	45.3	47.9	49.0
100WPC-300S-5FA	22.1	25.5	26.8	38.5
100WPC-300S-15FA	24.5	25.4	27.3	38.8
100WPC-300S-30FA	26.0	26.4	27.6	39.1
100WPC-300S-40FA	28.8	28.9	28.3	39.3

รูปที่ 4.30 กราฟค่าการสึกกร่อนของหินทรายเทียม ที่ w/c = 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40

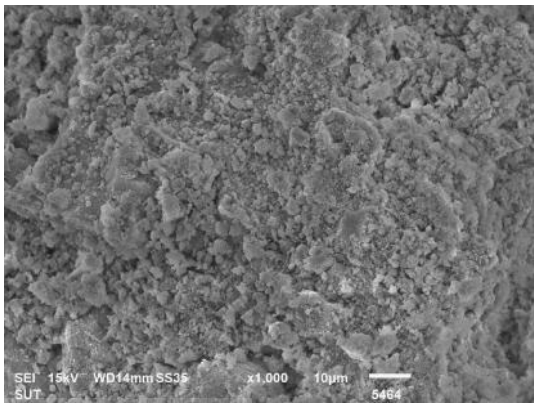
4.9 โครงสร้างทางจุลภาค (Micro Structure)

4.9.1 ลักษณะโครงสร้างภายในของหินทรายเทียมควบคุม

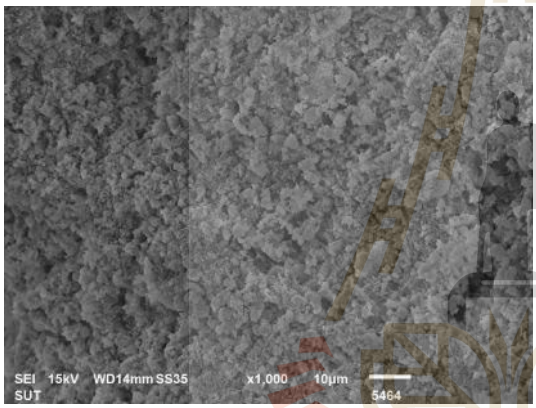
ลักษณะโครงสร้างภายในของหินทรายเทียมควบคุมในรูปที่ 4.31 (a) ถึง (e) พบว่าโครงสร้างภายในหินทรายเทียมควบคุมที่อายุ 28 วัน มีผลึกของปูนซีเมนต์ขาวและอนุภาคของทรายละเอียดปรากฏอยู่ มีการกระจายตัวและยึดติดติดกันเป็นผลึกแผ่นขนาดใหญ่ โดยยังไม่เกิดผลึกเข็มเอ็ททริงไกท์ในส่วนผสมควบคุม มีช่องว่างเกิดขึ้นไม่มาก มีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีความแน่น และผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เริ่มสมบูรณ์ที่อายุ 28 วัน ส่งผลต่อค่ากำลังอัดที่ได้รับมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มการเกาะที่ผิวของอนุภาคของทรายให้เกิดการแน่นขึ้น ช่องว่างภายในลดลง



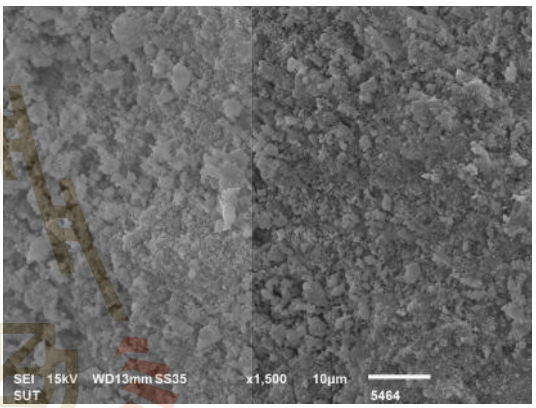
(a) 100WPC-200S อายุ 28 วัน (1000X)



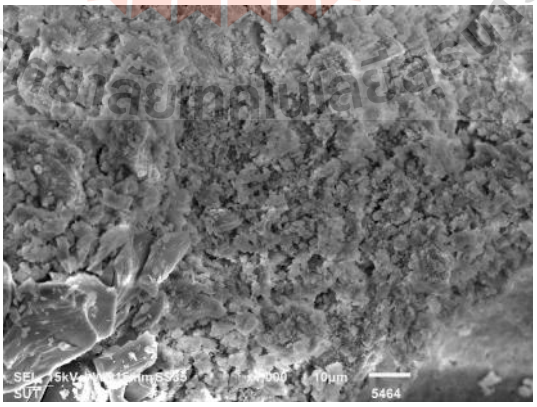
(b) 100WPC-250S อายุ 28 วัน (1000X)



(c) 100WPC-300S อายุ 28 วัน (1000X)



(d) 100WPC-350S อายุ 28 วัน (1000X)

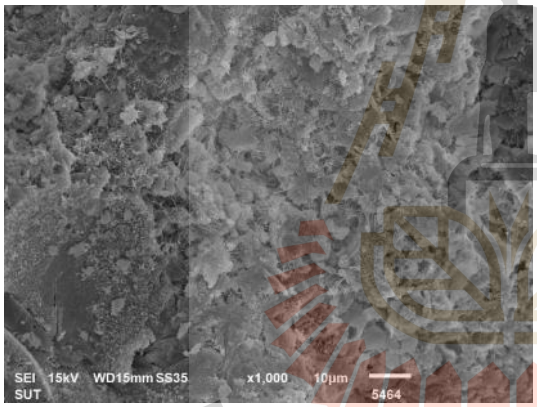


(e) 100WPC-400S อายุ 28 วัน (1000X)

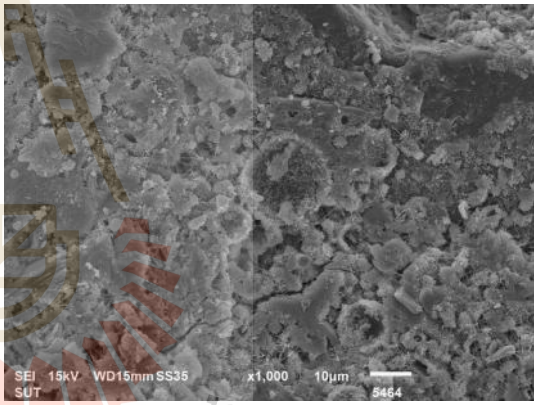
รูปที่ 4.31 (a) ถึง (e) ภาพ SEM ของหินทรายเทียมควบคุม อายุ 28 วัน

4.9.2 ลักษณะโครงสร้างภายในของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย

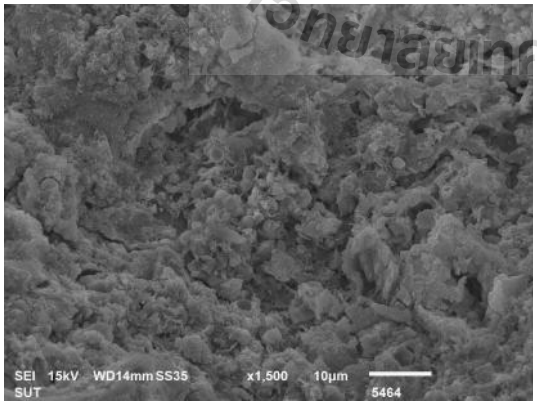
ลักษณะโครงสร้างภายในของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยในรูปที่ 4.32 (a) ถึง (d) พบว่า โครงสร้างภายในหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน มีผลึกของปูนซีเมนต์ขาวกับอนุภาคของเถ้าลอยและอนุภาคของทรายละเอียดจับตัวกันเป็นผลึกก้อนปรากฏอยู่ มีการกระจายตัวและยึดติดติดกันเป็นผลึกแผ่นขนาดใหญ่ มีช่องว่างลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมเถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (5% - 40%) เห็นได้ว่าปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดมากขึ้นเมื่อช่วงอายุครบ 28 วัน ผลึกเข็มเอ็ททริงไกท์เริ่มปรากฏและรวมตัวกันเป็นร่างแหที่มากขึ้นตามปริมาณการใช้เถ้าลอย นอกจากนี้การใช้เถ้าลอยผสมสูงขึ้นยังส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากขึ้นด้วย จึงทำให้เพสต์ของมอร์ต้าร์มีความแน่นอย่างเต็มที่สม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่ได้เป็นตัวให้กำลังกับเพสต์มอร์ต้าร์



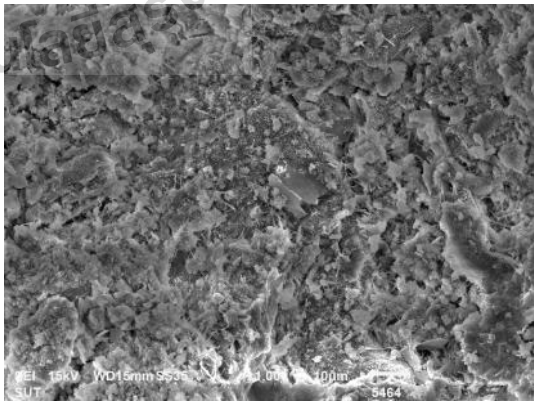
(a) 95WPC-300S-5FA อายุ 28 วัน (1000X)



(b) 85WPC-300S-15FA อายุ 28 วัน (1000X)



(c) 70WPC-300S-30FA อายุ 28 วัน (1000X)



(d) 60WPC-300S-40FA อายุ 28 วัน (1000X)

รูปที่ 4.32 (a) ถึง (d) ภาพ SEM ของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย อายุ 28 วัน

4.10 การแต่งผิวหน้าชิ้นงานหินทรายเทียมด้วยกรดเกลือ (HCl Acid) ชนิดเจือจาง

จากผลการทดสอบการนำชิ้นงานที่หล่อและบ่มแล้วนำไปกัดตกแต่งผิว เพื่อให้กรดเกลือทำปฏิกิริยากับสารซีเมนต์ เนื้อของสารซีเมนต์จะหลุดร่อนรอบ ๆ ผิวของก้อนตัวอย่าง สังเกตดูจะมองเห็นเม็ดของทรายมาก ระหว่างแช่ก้อนตัวอย่างในกรดเกลืออาจใช้วัสดุหรือสวมถุงมือยาง ทำการกลับก้อนตัวอย่างและใช้มือที่สวมถุงยางลูบล้างก้อนวัสดุหรืออาจใช้แปรงซังผ้าช่วยขัดผิวก้อนตัวอย่างใช้เวลาแช่ก้อนตัวอย่างในกรดเกลือประมาณ 5-10 นาที ถ้านานกว่านี้ กรดเกลือจะทำปฏิกิริยากับสารซีเมนต์ในระยะเวลานาน และทำให้ชิ้นงานหลุดร่อนเนื่องจากขาดสารซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานเม็ดทราย ขบวนการแต่งผิวชิ้นงานด้วยกรดเกลือ (HCI) ชนิดเจือจาง ดังรูปที่ 4.33

รูปที่ 4.33 การแต่งผิวชิ้นงานหินทรายเทียมด้วยกรดเกลือ (HCI)ชนิดเจือจาง

4.11 การวิเคราะห์ราคา

การวิเคราะห์ราคาเพื่อเปรียบเทียบราคาต้นทุนที่ใช้ในการผลิตหินทรายเทียมทังอัตราส่วนควบคุมและอัตราส่วนที่ใช้วิจัยเพื่อดูความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานและทำการผลิตออกสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ เพื่อไม่ให้มีราคาที่สูงเกินไปในท้องตลาด ซึ่งปัจจัยที่สำคัญต่อการกำหนดราคานั่นคือวัสดุประสานหรือปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์เนื่องจากว่ามีราคาเมื่อคิดต่อตันมีที่ราคาที่สูงมากเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วๆไป ซึ่งในการวิเคราะห์ราคาถึงความเหมาะสมต่อการนำใช้งานจริงจะเปรียบเทียบจากการทดสอบทั้งด้านกำลังอัด ความหนาแน่น และราคา ดังตารางที่ 4.7

โดยราคาวัสดุเทียบกับราคากลางของเดือนกรกฎาคม 2559 ดังต่อไปนี้

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว ราคา 9,500 บาท/ตัน
- ทรายละเอียด ราคา 640 บาท/ลบ.ม.
- เถ้าลอย ราคา 1,500 บาท/ลบ.ม.

ตารางที่ 4.7 ราคาของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย

สัญลักษณ์	กำลังอัด (ksc)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	บาท/ลบ.ม.
100WPC-300S	138.6	2015	4,676
95WPC-300S-5FA	128.9	2069	4,921
85WPC-300S-15FA	158.8	2014	4,591
70WPC-300S-30FA	163.0	1829	3,964
60WPC-300S-40FA	164.5	1997	3,420

ตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้เถ้าลอยเข้ามาผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ขาวนั้นหากแทนที่ในอัตราส่วนที่ 5% จะมีราคาที่สูงกว่าถึงร้อยละ 5.24หากมีการแทนทีสูงขึ้นเป็นผลทำให้ราคาถูกลงถึงร้อยละ 25 แต่ในการวิจัยในครั้งนี้มุ่งเน้นเรื่องของความเหมาะสมที่สามารถใส่สีเติมแต่งได้ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่อ 15%ลดต้นทุนร้อยละ2 และใช้เถ้าลอแทนที่ 30% ลดต้นทุนการผลิตได้ร้อยละ15

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพัฒนาหินทรายเทียมทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวกับมวลรวมละเอียด(ทราย)ซึ่งใช้เป็นอัตราส่วนหลักผสมวัสดุปอซโซลานบางส่วนด้วยเถ้าลอยแม่เมาะในปริมาณต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ กำลังอัดความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความทนทานต่อการสึกกร่อน การแต่งผิวชิ้นงานด้วยการแช่กรดเกลือ (HCL) โครงสร้างทางจุลภาค การวิเคราะห์ราคา และข้อเปรียบเทียบระหว่างหินทรายธรรมชาติกับหินทรายเทียม จากการศึกษาพบข้อสรุปที่สำคัญดังนี้

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาพัฒนาหินทรายเทียม ซึ่งทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวกับมวลรวมละเอียด (ทราย) ที่ 1 : 2, 1 : 2.5, 1 : 3, 1 : 3.5 และ 1 : 4 แล้วเลือกใช้อัตราส่วนผสม 1 : 3 (ปูนซีเมนต์ขาวปอตแลนด์ต่อทรายละเอียด) เป็นอัตราส่วนผสมหลักในงานวิจัย ผสมวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ขาวปอตแลนด์บางส่วนด้วยเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วน 5%, 15%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ศึกษาการใช้ปริมาณน้ำผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) ที่ 1.0, 1.2, 1.3 และ 1.4 โดยน้ำหนัก สามารถสรุปการผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างหินทรายเทียม

จากผลการศึกษาพบว่า สีผิวภายนอกเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการใช้เถ้าลอยในส่วนผสมๆ ที่ใช้เถ้าลอยผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ สีพื้นผิวภายนอกจะออกสีขาวขุ่นไปจนถึงน้ำตาลแกมสีเทาอ่อน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ขนาดของรูพรุน หน่วยน้ำหนักและการหดตัว มีค่าที่ลดลงตามปริมาณการใช้สารปอซโซลานในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น และค่าหน่วยน้ำหนักที่ได้ค่อนข้างคงที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.1.2 กำลังอัด

จากผลการศึกษาพบว่า ค่ากำลังอัดของหินทรายเทียมใช้เถ้าลอยแทนทีปูนซีเมนต์ขาวปอตแลนด์ที่ (5 % - 40 %) มีค่ากำลังอัดแปรผันตามปริมาณการผสมเถ้าลอยกับอายุการบ่มและค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้เป็นตัวควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้ผสม ซึ่งค่ากำลังอัดมีค่าที่สูงกว่ากำลังอัดของอัตราส่วนควบคุม ปริมาณของเถ้าลอยที่พอเหมาะที่ใช้แทนทีปูนซีเมนต์ขาวปอตแลนด์ที่ 15 % ถึง 30 % (อัตราส่วนผสม 1 ต่อ 3) และค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปอยู่ที่ w/c เท่ากับ 1.20 และ 1.30 ค่ากำลังอัดที่ได้อยู่ระหว่าง 157.5ถึง 163.0 ksc ที่อายุ 28 วัน

5.1.3 ความหนาแน่น

จากผลการศึกษาพบว่า ค่าความหนาแน่นแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณผสมของเถ้าลอยที่พอเหมาะและอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ ค่าความหนาแน่นแห้งที่ลดลงเป็นผลเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยที่ใช้ผสมช่วยลดน้ำหนัก เพราะเถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ และผลของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างสารซีเมนต์กับน้ำและเถ้าลอยมีส่วนทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับหินทรายเทียมควบคุม ค่าความหนาแน่นลดลงจากส่วนควบคุมอย่างชัดเจน ค่าความหนาแน่นแห้งของหินทรายเทียมแทนที่เถ้าลอย มีค่าอยู่ระหว่าง 1,261 ถึง 2,069 kg/m^3 ที่อายุ 28 วัน

5.1.4 การดูดซึมน้ำ

จากผลการศึกษาพบว่า ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าที่ลดลงตามปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ผสมและตามอัตราส่วนของเถ้าลอยที่ใช้ผสม (5% - 15%) และผลของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างสารซีเมนต์ขาวกับเถ้าลอยส่งผลต่อการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้นเมื่อใช้ผสมในปริมาณที่สูงขึ้นขึ้น (30% - 40%) ค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด เท่ากับ 15.5 % และค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด เท่ากับ 22.3 % ที่อายุ 28 วัน

5.1.5 ความทนทานต่อการสึกกร่อน

จากผลการศึกษาพบว่า ค่าการสึกกร่อนลดลงตามอัตราส่วนของเถ้าลอยที่ใช้ผสมในปริมาณที่ไม่สูง (5% - 15%) และใช้ผสมในปริมาณที่สูงขึ้น (30% - 40%) ค่าการสึกกร่อนมีค่าที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยค่าการสึกกร่อนที่ต่ำส่งผลต่อค่าความแกร่ง กำลัง และการนำไปใช้งาน อัตราส่วนของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของสารซีเมนต์กับทรายและเถ้าลอยทำให้เกิดเป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวส่งผลต่อค่าการสึกกร่อน ค่าการสึกกร่อนต่ำสุดเท่ากับ 22.1 % และค่าการสึกกร่อนสูงสุดค่าเท่ากับ 39.3 % ที่อายุ 28

วัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสึกกร่อนของอัตราส่วนควบคุม พบว่า ค่าการสึกกร่อนมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนควบคุม และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสึกกร่อยมวลรวมหยาบ (หิน) ที่ค่ามาตรฐานที่ยอมให้ไม่เกิน 40 % บ่งบอกได้ว่าค่าการสึกกร่อนในอัตราส่วนวิจัยมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

5.1.6 โครงสร้างทางจุลภาค

จากผลการศึกษาพบว่า โครงสร้างทางจุลภาคของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 (ใช้เถ้าลอย 5 % - 40 %) พบเป็นปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดมากขึ้น ผลึกเข็มเอ็ททริงไกท์เริ่มปรากฏและรวมตัวกันเป็นร่างแหที่มากขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอย การใช้เถ้าลอยผสมในปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงทำให้เพสต์ของมอร์ต้าร์มีความแน่นอย่างเต็มที่ สม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งพบเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่ได้เป็นตัวให้กำลังกับเพสต์มอร์ต้าร์ของหินทรายเทียม

5.1.7 ข้อเปรียบเทียบระหว่างหินทรายธรรมชาติกับหินทรายเทียม

หินทรายธรรมชาติ	หินทรายเทียม
-วัสดุเกิดขึ้นมาตามขบวนการทางธรรมชาติ -มีแร่ธาตุปนยุในเนื้อหินหลายชนิดทำให้หินมีความแกร่ง -สีของหินเป็นสีเดียวจากสีอ่อนถึงเข้ม -สามารถนำมาแกะสลักได้ดี -หล่อขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆ ไม่ได้ -ใช้ในงานอุตสาหกรรมหนักได้ -มีจำกัดเฉพาะแหล่งเท่านั้น -น้ำหนักมากไม่สะดวกในการขนย้าย -การนำหินขึ้นมาใช้ต้องขออนุญาติ -มีความแข็งแกร่ง ทนทาน ต้านทานแรงอัดได้มาก -ค่าการดูดซึมน้ำประมาณ 0.80 % -ค่าการสึกกร่อน 47.44 % -ความต้องการทางตลาดเฉพาะ -ราคาค่อนข้างสูง	-วัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับทราย -ไม่มีแร่ธาตุอื่นเจอปน นอกจากทรายที่เป็นส่วนผสม -ผสมสีได้ตามความต้องการ -หล่อเข้าแบบแม่พิมพ์หรือปั่นขึ้นรูปได้ง่าย -หล่อเป็นรูปแบบต่างๆ ได้ตามความต้องการ -เหมาะกับงานโชว์ตกแต่ง เช่น งานศิลปกรรมและสถาปัตยกรรม -สามารถผลิตได้ทุกสถานที่ไม่จำกัด -ขนส่งง่าย น้ำหนักเบา -ทำได้โดยอิสระไม่มีข้อจำกัด -ค่ากำลังอัดประมาณ 157.5 – 163.0 ksc -ค่าการดูดซึมน้ำประมาณ 22.30 % -ค่าการสึกกร่อน 21.1 – 39.3 % -ความต้องการทางตลาดทั่วไป -ราคาปานกลางถึงระดับต่ำ

5.1.8 การวิเคราะห์ราคา

จากผลการศึกษาพบว่า ราคาของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 (ใช้เถ้าลอย 5 % - 40 %) ราคาอยู่ที่ระหว่าง 5,087 – 5,687 บาทต่อ ลบ.ม. ตัวแปรที่สำคัญต่อการกำหนดราคาต่อ ลบ.ม. คือ ราคาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวและทรายละเอียดที่มีราคาค่าวัสดุต้นทุนค่อนข้างสูง

5.19 สรุป

1. วัสดุเชื้อประสานของหินทรายเทียม ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว , WPC ต่อทรายละเอียด อัตราส่วน 1ต่อ 3 ถึง 1 ต่อ 3.5 โดยน้ำหนัก สามารถใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ขาวอัตราร้อยละ 15 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โยน้ำหนักของวัสดุประสาน หากต้องการรักษาความพรุนให้มีช่องว่าขนาดเล็กและมีความเป็นไปไต่อการผลิตไม่ควรเกิน 2 เปอร์เซ็นต์ เพราะมีความเป็นไปได้ทางผิวหินทรายเทียมมากกว่าจากการทดลองผสมในบางตัวอย่าง

2. ทรายใช้ทรายละเอียดสะอาดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างตะแกรงเบอร์ 100 ร้อยละ 10ค่าโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 1.623 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62เพื่อควบคุมความคงตัวของคุณสมบัติทางผิวพื้นของหินทรายเทียมและต้องทำการล้างคราบเศษวัชพืชดินที่อาจติดมากับตัวทรายด้วยน้ำสะอาด

3. น้ำ ใช้น้ำประปาในปริมาณร้อยละ 1.2 ถึง 1.3 โดยน้ำหนัก

4. งานหินทรายเทียมส่วนใหญ่เป็นงานเฉพาะวิชาอาชีพต้องอาศัยทักษะการทำอย่างสม่ำเสมอ วัสดุท้องถิ่นมีการเปลี่ยนแปลงตามแหล่งที่มา ควรควบคุมแหล่งให้เป็นแบบเดียวกันส่วนอัตราส่วนผสมสามารถเพิ่มคุณภาพ และสร้างคุณค่าอย่าถาวรสถาน และวัตถุ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1.) ควรศึกษาการใช้เถ้าลอยแทนที่ในสัดส่วนปูนซีเมนต์ขาวในสัดส่วนที่พอเหมาะประมาณ 10 – 40 % เพื่อช่วยลดปริมาณการใช้สารซีเมนต์เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาสูง

2.) ควรประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมมาทดแทนการใช้ทรายเช่น กากแคลไซค์,เศษหินฝุ่น หรือผงอลูมิน่า ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่มีราคาถูก

3.) ส่วนผสมของหินทรายเทียม มีความต้องการปริมาณน้ำในการผสมสูงมาก จึงพอเหมาะแก่การเทเข้าแบบหล่อได้ง่าย

4.) ควรทำการศึกษาทดสอบเพิ่มเติม เช่น กำลังดัด การหดตัวแห้ง และการนำความร้อน อัตราการใช้สารลดน้ำต่อการไหลเข้าแบบ เป็นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.) ควรศึกษาการขึ้นรูปโดยวิธีอัดก้อนและปริมาณน้ำที่ใช้น้อยลงรวมถึงโดยใช้เครื่องอัดแบบที่เป็ยเหล็กหล่อ แทนปูนปลาสเตอร์เพื่อช่วยเพิ่มความเรียบเนียน ความแข็งแรง และมีรูปทรงที่ได้มาตรฐาน สามารถนำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้

6.) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาในเบื้องต้น การนำข้อมูลและผลการทดลองจากงานวิจัยไปใช้งานควรมีการควบคุมคุณภาพของวัสดุ เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว เถ้าลอย มวลรวมละเอียด เป็นต้น ตลอดจนขั้นตอนในการปฏิบัติเพื่อให้ผลใกล้เคียงกับงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

กระทรวงวัฒนธรรม. (2546). **ศิลปะหินทรายและภูมิปัญญาท้องถิ่น**. [ออนไลน์]. ได้จาก: www.m-culture.go.th/sakaeo/files/329/art_sandstone.pdf

จันทนา สุขุมานนท์. (2550). **INSEE Concrete Handbook**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัท เซอร์ตัส เพรส จำกัด.

ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2536). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด

ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2551). **ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน**. บริษัทเอสซีจี ซิเมนต์ จำกัด ในธุรกิจซิเมนต์ เครือซิเมนต์ไทย (SCG CEMENT).

ธีรวัฒน์ สินศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2548). **ผลกระทบของขนาดอนุภาคและรูปร่างเถ้าถ่านหินต่อความพรุนและการซึมผ่านอากาศของเพสต์**. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1. (หน้า CON22-CON29). กรุงเทพฯ. สมาคมคอนกรีตไทย.

ธีรวัฒน์ สินศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ (2548). **ผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของเพสต์.** สัมมนาวิชาการเรื่อง การนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต ครั้งที่ 2. : 64-82.

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิมิตยงสกุล (2537). **สมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของขี้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.** วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม. ปีที่ 16, เล่มที่ 2, หน้า 46-57.

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิมิตยงสกุล (2537). **ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยแม่เมาะ.** วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม. ปีที่ 16, เล่มที่ 2, หน้า 58-78.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย.

ประภาส วันทองและประชุม คำพุฒ. (2550). **การศึกษากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและหินฝุ่น.** วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมงคลธัญบุรี. ปีที่ 5 ฉบับที่ 9 (มกราคม-มิถุนายน). หน้า 20-25.

พิณชุกรณ์ ชอบเที่ยงธรรม (2546). **การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโครเมียมด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์และฝุ่ยทรายดำ.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วราภรณ์ คุณาวนากิจ (2536). **คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยลิกไนต์,** เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์. สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

วินิต ช่อวิเชียร. (2544). **คอนกรีตเทคโนโลยี.** พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ.

สมชัย กกกำแหง (2542). **การใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.** การสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

สุวิทย์ วิทยาจักษ์และสนไชย ฤทธิโชติ. (2554). **การถ่ายทอดเทคโนโลยีหินเทียมเชิงพาณิชย์.** รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

แสงสุรีย์ พังแดง, วันชัย สะตะ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2558). **โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากดินขาวเผาแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว.** การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 (NCCE 20). หน้า MAT 1 – MAT 5. ชลบุรี: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. (2545). กรมวิทยาศาสตร์บริการ ศูนย์ความรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. **ปอซโซลาน**. [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_11_2545_pozzalan.pdf.

มาตรฐานผลิภัณฑ์ชุมชนผลิตภัณฑ์หินทราย (**มผช.194/2546**) [ออนไลน์]. ได้จาก: http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps194_46.pdf

Mohammed Ali Abdulrehman, Mais A. Abdulkareem and Ali Abed Salman.**Reducing Cracks Of The White Portland Cement Mortar**.Applied Research Journal. Vol.2,Issue,9,pp.370-378, September, 2016

James A. Farny. **White Cement Concrete**, EB217. Portland cement Association, Skokie, Illinois, USA,2001.

Gordana Curcic,Dusan Grdi,Nenad Ristic, Zoran Grdic. **White Cement Concrete As An Element Of Sustainable Building.** International Conference Modern development in the construction industry,Subotica, SERBIA,April 2016

R K Singh, S Tripathi, S K Ananthakrishnan and H R Kapoor. **Effect Of Fly Ash On The White Portland Cement Hydration Characteristics.** Aditya R&D Center-Birla White, Ultratech Cement Ltd., Jodhpur (RJ) India,2015

American Society for Testing and Materials. (1991). **Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 618-91).

American Society for Testing and Materials. (1998). **Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 311-98).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Compressive**

Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 109/ C 109 M-99).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 128-97).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 138/ C 138 M-01a).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.02. (ASTM C 204).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 136-96a).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 204).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.02. (ASTM C 29/ C 29 M-97a).

Barr, S., W. J. McCarter and B. Suryanto (2015). **"Bond-strength performance of hydraulic lime and natural cement mortared sandstone masonry."** Construction and Building Materials 84: 128-135.

Nitinuch Science. (2557). **หินทราย (Sandstone) และศิลาแลง**. [ออนไลน์]. ได้จาก http://nitinuch.blogspot.com/2014/09/sandstone.html

mineralszone. (2015). **Sandstone**. [On-line]. Available : http://www.mineralszone.com/stones/sandstone.html#l2

Singh, M., S. Vinodh Kumar and S. A. Waghmare (2015). **"Characterization of 6–11th century A.D decorative lime plasters of rock cut caves of Ellora."** Construction and Building Materials 98(0): 156-170.

Pincha Torkittikul and Thanongsak Nochaiya. (2015). **Compressive Strength, Density and Thermal Conductivity of Mortar Containing Fly ash and Bottom ash.** Proceeding The 7th National Science Research Conference. 30 – 31 March. Page 1-6.

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ขาวปอร์ตแลนด์

Description	Test No.		
	1	2	Average
Initial flask reading, ml	0.75	0.75	0.75
Initial kerosene temperature, ºC	29.00	29.00	29.00
Initial weight of sample and pan, gm	410.20	410.20	410.20
Final flask reading, ml	21.90	21.00	21.45
Final kerosene temperature, ºC	29.00	29.00	29.00
Final weight of sample and pan, gm	368.00	368.20	368.10
Weight of sample used, (Wc) gm	64.00	63.85	63.93
Volume displaced, (Vc) ml	21.15	21.05	21.10
Density of water at temperature, (R) gm/cm^3	1.00	1.00	1.00
Specific gravity, SP.GR = Wc/(Vc*R)	3.04	3.05	3.04

ตารางที่ ก.2 แสดงผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยแม่เมาะ

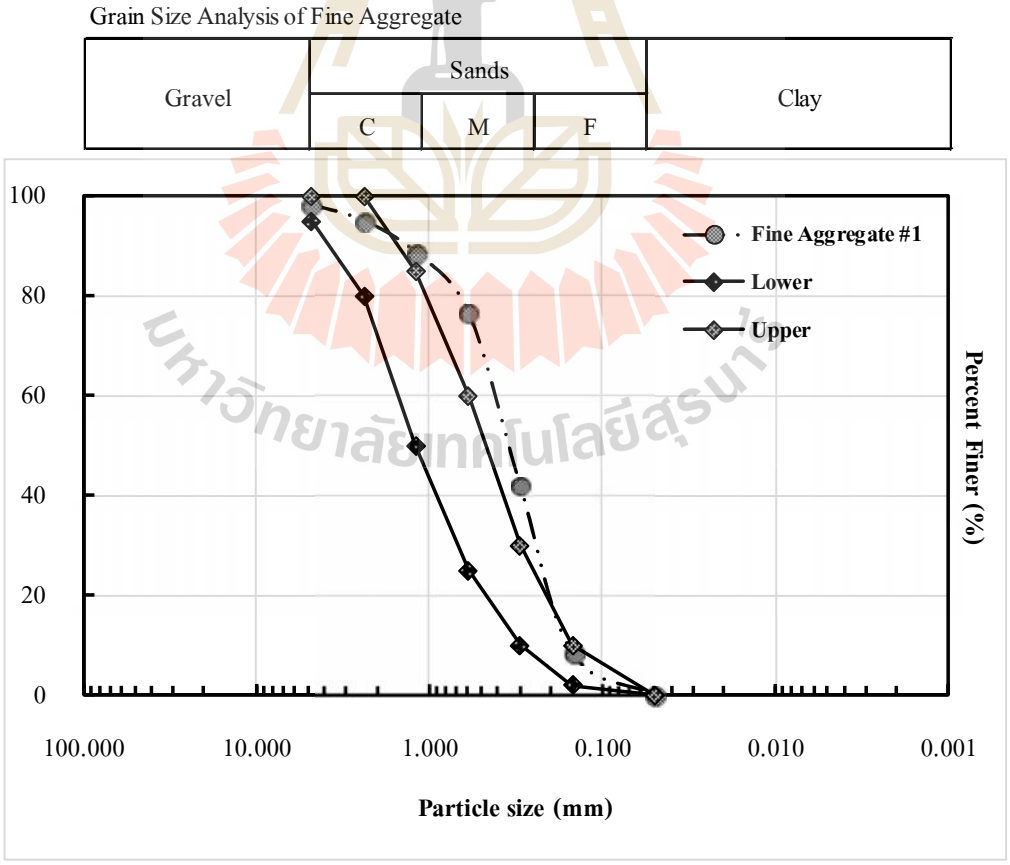
Description	Test No.		
	1	2	Average
Initial flask reading, ml	0.90	0.40	0.65
Initial kerosene temperature, °C	29.00	29.00	29.00
Initial weight of sample and pan, gm	470.80	470.60	470.70
Final flask reading, ml	21.80	21.10	21.45
Final kerosene temperature, °C	28.80	28.50	28.65
Final weight of sample and pan, gm	422.70	421.70	422.20
Weight of sample used, (Wc) gm	48.10	48.90	48.50
Volume displaced, (Vc) ml	20.90	20.70	20.80
Density of water at temperature, (R) gm/cm^3	1.00	1.00	1.00
Specific gravity, SP.GR = Wc/(Vc*R)	2.31	2.37	2.34

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบค่าการกระจายตัวของทราย (ยังไม่ร่อน)โดยวิธี SIEVE ANALYSIS

Sieve No.	Sieve opening (mm)	Wt. of Soil Retained (gm)	Cum. Retained (gm)	Cum. Retained (%)	(% Finer)
4	4.76	9.0	9.0	1.8	98.2
8	2.38	16.0	25.0	5.0	95.0
16	1.19	32.0	57.0	11.4	88.6
30	0.60	59.0	116.0	23.2	76.8
50	0.30	174.5	290.5	58.1	41.9
100	0.15	167.5	458.0	91.6	8.4
PAN	-	42.0	500.0	100.0	0.0
SUM		500.0		191.1	

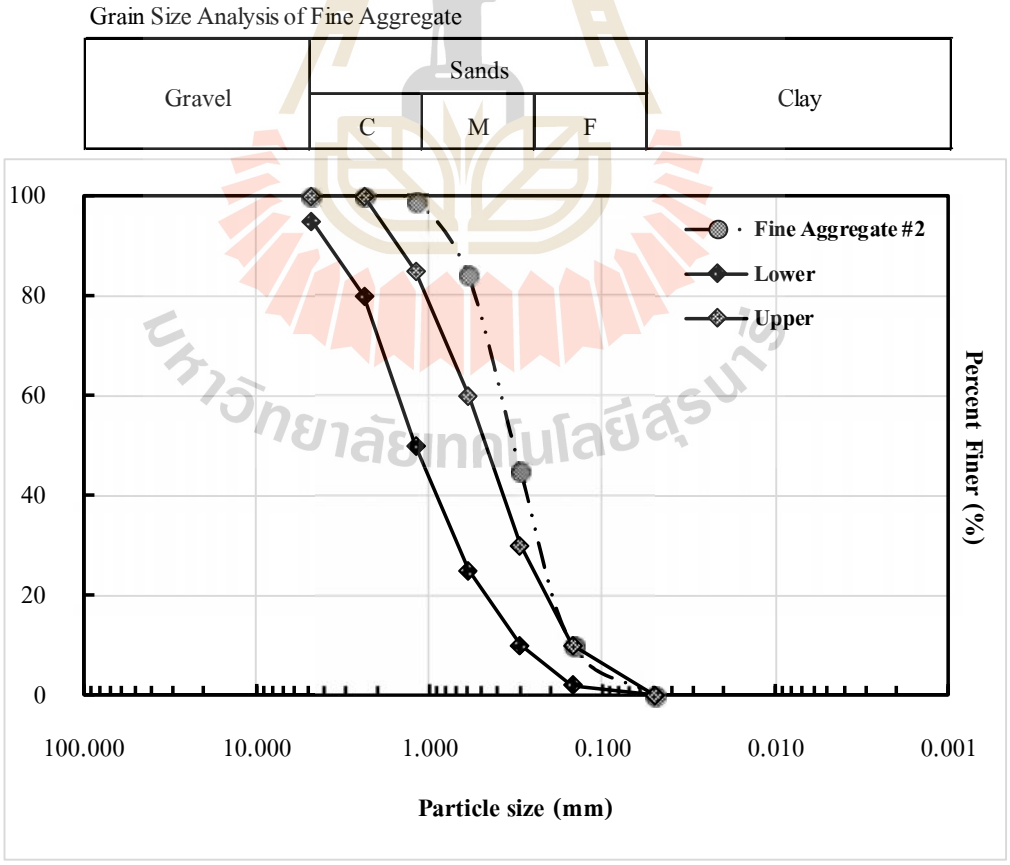
F.M. = SUM (% Cum. Retained) / 100 = 191.1 / 100 = 1.911



ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบค่าการกระจายตัวของทราย (ผ่านการร่อน)โดยวิธี SIEVE ANALYSIS

Sieve No.	Sieve opening (mm)	Wt. of Soil Retained (gm)	Cum. Retained (gm)	Cum. Retained (%)	(% Finer)
4	4.76	0.0	0.0	0.0	100.0
8	2.38	0.0	0.0	0.0	100.0
16	1.19	6.5	6.5	1.3	98.7
30	0.60	73.5	80.0	16.0	84.0
50	0.30	195.0	275.0	55.0	45.0
100	0.15	175.0	450.0	90.0	10.0
PAN	-	50.0	500.0	100.0	0.0
SUM		500.0		162.3	

F.M. = SUM (% Cum. Retained) / 100 = 162.3 / 100 = 1.623



ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของทรายและร้อยละการดูดซึมน้ำ(ไม่ผ่านการร่อน)

Determination no.	Test No.1	Test No.2	Avg.
wt. sand (sat. surf. dry) (B). gm.	500.00	500.00	500.00
wt. flask + sand (sat.surf.dry) + water (C), gm.	967.00	970.00	968.50
bowl no.	1.00	2.00	1.50
wt. bowl, gm.	388.20	392.60	390.40
wt.bowl + dry sand, gm.	883.00	888.70	885.85
wt. dry sand (A), gm.	494.50	495.50	495.00
wt.flask + water (D), gm	661.50	664.00	662.75
bulk specific gravity, A/(B + D – C)	2.54	2.55	2.55
bulk specific gravity, (sat. surf. dry), B/(B + D – C)	2.57	2.58	2.57
apparent specific gravity, A/(D + A – C)	2.62	2.61	2.62
percent absorption (%), ((B – A)*100) / A	1.11	0.91	1.01

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของทรายและร้อยละการดูดซึมน้ำ(ผ่านการร่อน)

Determination no.	Test No.1	Test No.2	Avg.
wt. sand (sat. surf. dry) (B). gm.	500.50	500.10	500.30
wt. flask + sand (sat.surf.dry) + water (C), gm.	966.50	970.50	968.50
bowl no.	1.00	2.00	1.50
wt. bowl, gm.	389.30	394.20	391.75
wt.bowl + dry sand, gm.	883.00	888.70	885.85
wt. dry sand (A), gm.	493.70	494.50	494.10
wt.flask + water (D), gm	661.50	664.00	662.75
bulk specific gravity, A/(B + D – C)	2.53	2.55	2.54
bulk specific gravity, (sat. surf. dry), B/(B + D – C)	2.56	2.58	2.57
apparent specific gravity, A/(D + A – C)	2.62	2.63	2.62

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

percent absorption (%), ((B – A)*100) / A	1.38	1.13	1.25

ตารางที่ ก.7 แสดงผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว

Description	Test No.		
	1	2	Average
Weight of Measuring Cylinder, T (kg)	2.97	2.98	2.97
Weight of Cylinder and Water (kg)	5.92	5.94	5.93
Weight of Water (kg)	2.96	2.96	2.96
Volume of Measuring Cylinder, V (m^3)	0.003	0.003	0.003
Weight of Cylinder + Sample, G (kg)	7.12	7.11	7.12
Weight of Sample alone (kg)	4.15	4.13	4.14
Unit Weight of Sample, ρ = (G-T)/V (kg/m^3)	1404.94	1397.09	1401.02

ตารางที่ ก.8 แสดงผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอยแม่เมาะ

Description	Test No.		
	1	2	Average
Weight of Measuring Cylinder, T (kg)	2.97	2.98	2.97
Weight of Cylinder and Water (kg)	5.92	5.94	5.93
Weight of Water (kg)	2.96	2.96	2.96
Volume of Measuring Cylinder, V (m^3)	0.003	0.003	0.003
Weight of Cylinder + Sample, G (kg)	6.79	6.84	6.82
Weight of Sample alone (kg)	3.82	3.86	3.84
Unit Weight of Sample, ρ = (G-T)/V (kg/m^3)	1293.64	1305.51	1299.57

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

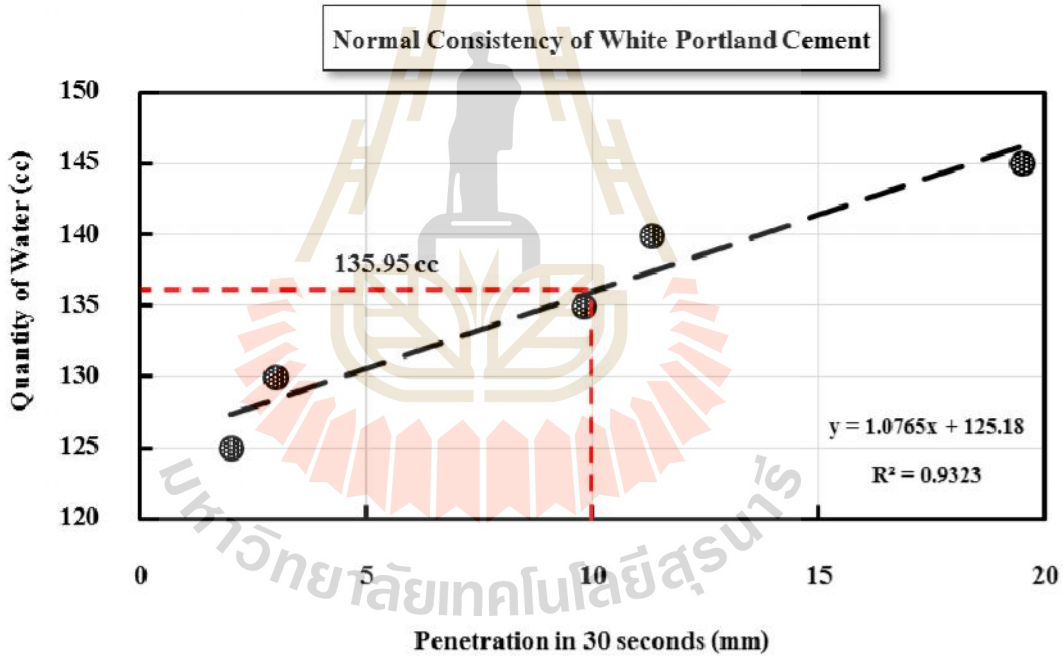
ตารางที่ ก.9 แสดงผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของทรายละเอียด (มวลรวมละเอียด)

Description	Test No.		
	1	2	Average
Weight of Measuring Cylinder, T (kg)	2.97	2.98	2.97
Weight of Cylinder and Water (kg)	5.92	5.94	5.93
Weight of Water (kg)	2.96	2.96	2.96
Volume of Measuring Cylinder, V (m^3)	0.003	0.003	0.003
Weight of Cylinder + Sample, G (kg)	7.66	7.65	7.66
Weight of Sample alone (kg)	4.69	4.67	4.68
Unit Weight of Sample, ρ = (G-T)/V (kg/m^3)	1587.62	1579.59	1583.60

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.10 แสดงผลการทดสอบค่าความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว

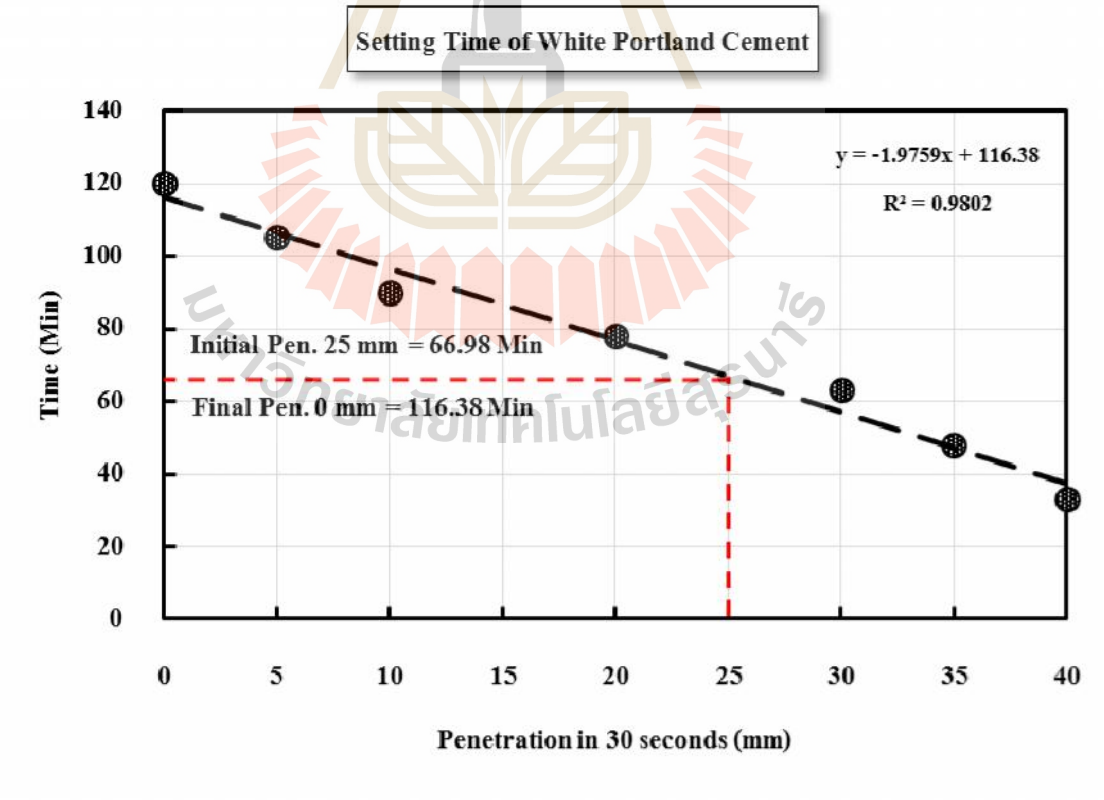
No.	weight of cement (gm)	Water		Penetration in 30 seconds (mm)
		%	cc.	
1	500	25	125	2
2	500	26	130	3
3	500	27	135	9.8
4	500	28	140	11.3
5	500	29	145	19.5



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.11 แสดงผลการทดสอบค่าระยะเวลาการก่อตัวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว

Mixing Time (Min)	Time at Testing (Min)	Total Time After Mixing (Min)	Penetration in 30 seconds (mm)
2.45	30	33.15	40
	45	48.15	35
	60	63.15	30
	75	78.15	20
	90	90.15	10
	105	105.15	5
	120	120.15	0



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบกำลังอัดของหินทรายเทียมควบคุม และหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 กำลังอัดของส่วนผสมควบคุมที่ w/c = 1.00 อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Compressive Strength (ksc.) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	126.6	136.8	172.3	206.7	217.1	230.2
2	100WPC-250S	83.0	123.2	167.2	196.1	203.8	214.2
3	100WPC-300S	70.2	107.9	157.0	178.4	192.4	193.4
4	100WPC-350S	61.8	98.7	135.8	164.5	180.5	184.8
5	100WPC-400S	49.0	78.5	128.8	136.6	138.6	147.0

ตารางที่ ข.2 กำลังอัดของส่วนผสมควบคุมที่ w/c = 1.20 อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Compressive Strength (ksc.) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	94.7	112.6	130.1	196.2	214.2	222.6
2	100WPC-250S	85.0	107.9	124.8	178.1	184.6	195.0
3	100WPC-300S	69.2	91.2	122.3	138.6	159.7	164.4
4	100WPC-350S	67.8	73.7	103.5	138.2	144.0	156.2
5	100WPC-400S	44.3	67.8	97.5	110.8	137.9	138.6

ตารางที่ ข.3 กำลังอัดของส่วนผสมควบคุมที่ w/c = 1.30 อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Compressive Strength (ksc.) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	91.0	101.5	121.4	176.3	205.0	210.1
2	100WPC-250S	73.6	87.6	117.0	170.6	184.6	184.8
3	100WPC-300S	67.4	82.5	113.9	157.4	164.1	171.1
4	100WPC-350S	58.3	75.3	97.8	144.6	145.8	158.7
5	100WPC-400S	40.2	52.3	78.8	90.2	95.7	110.2

ตารางที่ ข.4 กำลังอัดของส่วนผสมควบคุมที่ w/c = 1.40 อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Compressive Strength (ksc.) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	67.9	99.7	116.5	174.2	182.5	192.1
2	100WPC-250S	57.3	89.3	108.2	165.3	167.9	170.2
3	100WPC-300S	50.8	78.9	93.3	155.6	160.0	160.8
4	100WPC-350S	50.6	68.7	93.0	123.5	140.3	149.6
5	100WPC-400S	40.0	52.1	58.5	98.9	100.9	104.8

ตารางที่ ข.5 กำลังอัดของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.00 อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Compressive Strength (ksc.) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	70.2	107.9	157	178.4	192.4	193.4
2	95WPC-300S-5FA	67.7	124.7	158.3	182.5	214.3	228.4
3	85WPC-300S-15FA	76.7	138.1	162.8	220.7	261.8	271.8
4	70WPC-300S-30FA	96.2	143.3	168.8	260.0	289.5	294.8
5	60WPC-300S-40FA	125.0	144.0	179.9	274.7	295.8	297.0

ตารางที่ ข.6 กำลังอัดของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.20 อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Compressive Strength (ksc.) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	69.2	91.2	122.3	138.6	159.7	164.4
2	95WPC-300S-5FA	45.9	83.2	112.4	128.9	151.6	161.3
3	85WPC-300S-15FA	52.0	85.7	113.2	158.8	192.7	209.4
4	70WPC-300S-30FA	55.5	87.3	117.7	163.0	205.7	218.0
5	60WPC-300S-40FA	59.1	92.3	122.7	164.5	212.3	224.6

ตารางที่ ข.7 กำลังอัดของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.30 อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Compressive Strength (ksc.) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	67.4	82.5	113.9	157.4	164.1	171.1
2	95WPC-300S-5FA	33.6	61.3	87.6	109.7	147.5	159.8
3	85WPC-300S-15FA	41.1	66.4	120.8	157.5	167.8	182.8
4	70WPC-300S-30FA	48.5	79.0	129.7	161.4	181.2	189.8
5	60WPC-300S-40FA	57.9	91.6	132.6	162.5	188.4	203.5

ตารางที่ ข.8 กำลังอัดของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.40 อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Compressive Strength (ksc.) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	50.8	78.9	93.3	155.6	160	160.8
2	95WPC-300S-5FA	38.6	70.0	87.2	110.8	124.5	126.7
3	85WPC-300S-15FA	39.8	72.0	91.7	115.4	126.4	128.1
4	70WPC-300S-30FA	43.0	78.2	99.4	121.6	135.7	143.2
5	60WPC-300S-40FA	45.4	78.2	99.7	127.2	138.9	144.5

ตารางที่ ข.9 กำลังอัดของอัตราส่วน 1 : 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ขาวด้วยเถ้าลอย 30%ที่ w/c = 1.30 และสารเพิ่มฟองโฟม 1%,3%,5% อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Compressive Strength (ksc.) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	67.4	82.5	113.9	157.4	164.1	171.1
2	70WPC-300S-30FA	48.5	79.0	129.7	161.4	181.2	189.8
3	70WPC-300S-30FA-1SFA	18.9	32.0	45.0	57.5	68.6	68.3
4	70WPC-300S-30FA-3SFA	9.5	10.2	15.7	19.3	20.6	19.7
5	70WPC-300S-30FA-5SFA	2.1	2.3	2.7	4.5	5.3	5.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความทนทานต่อการสึกกร่อน ของหินทรายเทียมควบคุมและหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ความหนาแน่นชื้นของส่วนผสมควบคุมที่ w/c = 1.00 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	1958	1920	1940	1959	1966	1978
2	100WPC-250S	1907	1924	1954	1925	1985	1909
3	100WPC-300S	1986	1954	1921	1970	1992	1989
4	100WPC-350S	1946	1981	1943	1912	1951	1982
5	100WPC-400S	1976	1914	1952	1968	1955	1959

ตารางที่ ค.2 ความหนาแน่นชื้นของส่วนผสมควบคุมที่ w/c = 1.20 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	1961	1990	1955	1999	1950	1993
2	100WPC-250S	1930	1988	1971	1984	1981	1912
3	100WPC-300S	1926	1915	1945	1915	1994	1919
4	100WPC-350S	1971	1961	1941	1954	1985	1951
5	100WPC-400S	1969	1991	1921	1988	1930	1968

ตารางที่ ค.3 ความหนาแน่นชื้นของส่วนผสมควบคุมที่ w/c = 1.30 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	1850	1969	1997	1894	1895	1839
2	100WPC-250S	1840	1946	1909	1854	1887	1909
3	100WPC-300S	1885	1935	1813	1830	1894	1918
4	100WPC-350S	1882	1941	1899	1989	1987	1982
5	100WPC-400S	1989	1950	1981	1980	1921	1922

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.4 ความหนาแน่นชื้นของส่วนผสมควบคุมที่ w/c = 1.40 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	1892	1916	1906	1910	1887	1889
2	100WPC-250S	1842	1925	1908	1957	1901	1823
3	100WPC-300S	1823	1865	1968	1998	1846	1839
4	100WPC-350S	1852	1849	1881	1872	1858	1859
5	100WPC-400S	1995	1992	1981	1952	1966	1973

ตารางที่ ค.5 ความหนาแน่นชื้นของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.00 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	1958	1920	1940	1959	1966	1978
2	95WPC-300S-5FA	1940	1973	1914	1858	1868	1812
3	85WPC-300S-15FA	1999	1923	1955	1807	1823	1818
4	70WPC-300S-30FA	1926	1977	1997	1861	1871	1863
5	60WPC-300S-40FA	1930	1950	1993	1802	1817	1876

ตารางที่ ค.6 ความหนาแน่นชื้นของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.20 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	1961	1990	1955	1969	1950	1993
2	95WPC-300S-5FA	1986	1954	1921	1930	1919	1910
3	85WPC-300S-15FA	1926	1916	1945	1915	1926	1927
4	70WPC-300S-30FA	1885	1935	1913	1930	1985	1909
5	60WPC-300S-40FA	1823	1865	1968	1958	1996	1905

ตารางที่ ค.7 ความหนาแน่นชื้นของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.30 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	1850	1969	1997	1894	1885	1839
2	95WPC-300S-5FA	1900	1817	1814	1878	1886	1835
3	85WPC-300S-15FA	1877	1858	1872	1861	1843	1848
4	70WPC-300S-30FA	1830	1840	1912	1844	1836	1853
5	60WPC-300S-40FA	1852	1835	1855	1830	1855	1845

ตารางที่ ค.8 ความหนาแน่นชื้นของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.40 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	1892	1916	1906	1810	1887	1889
2	95WPC-300S-5FA	1868	1842	1852	1885	1898	1876
3	85WPC-300S-15FA	1889	1829	1869	1817	1835	1811
4	70WPC-300S-30FA	1829	1809	1829	1882	1799	1823
5	60WPC-300S-40FA	1861	1820	1839	1847	1836	1856

ตารางที่ ค.9 ความหนาแน่นชื้นของอัตราส่วน 1 : 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ขาวปอตแลด์ด้วยเถ้าลอย 30% ที่ w/c = 1.30 และสารเพิ่มฟอง 1%,3% ,5% อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	1850	1969	1997	1894	1885	1839
2	70WPC-300S-30FA	1830	1840	1912	1844	1836	1853
3	70WPC-300S-30FA-1SFA	1902	1895	1929	1890	1862	1878
4	70WPC-300S-30FA-3SFA	1945	1959	1900	1893	1926	1915
5	70WPC-300S-30FA-5SFA	1249	1270	1333	1280	1236	1225

ตารางที่ ค.10 ความหนาแน่นแห้งของส่วนควบคุมที่ w/c = 1.00 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	1683	1748	1797	1723	1757	1770
2	100WPC-250S	1638	1752	1809	1781	1785	1720
3	100WPC-300S	1707	1710	1780	1720	1762	1732
4	100WPC-350S	1672	1714	1787	1769	1775	1740
5	100WPC-400S	1698	1743	1807	1731	1758	1763

ตารางที่ ค.11 ความหนาแน่นแห้งของส่วนควบคุมที่ w/c = 1.20 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	1699	1722	1766	1758	1742	1694
2	100WPC-250S	1687	1721	1736	1745	1762	1774
3	100WPC-300S	1695	1745	1736	1772	1783	1786
4	100WPC-350S	1708	1697	1771	1718	1734	1742
5	100WPC-400S	1691	1723	1780	1748	1725	1761

ตารางที่ ค.12 ความหนาแน่นแห้งของส่วนควบคุมที่ w/c = 1.30 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	1690	1741	1759	1766	1738	1720
2	100WPC-250S	1722	1774	1770	1731	1761	1722
3	100WPC-300S	1719	1764	1697	1709	1748	1752
4	100WPC-350S	1717	1743	1748	1749	1735	1728
5	100WPC-400S	1709	1774	1745	1742	1737	1710

ตารางที่ ค.13 ความหนาแน่นแห้งของส่วนควบคุมที่ w/c = 1.40 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-200S	1640	1658	1665	1592	1685	1670
2	100WPC-250S	1682	1666	1669	1701	1672	1624
3	100WPC-300S	1567	1627	1633	1657	1658	1638
4	100WPC-350S	1591	1600	1656	1646	1626	1663
5	100WPC-400S	1614	1623	1645	1617	1657	1670

ตารางที่ ค.14 ความหนาแน่นแห้งของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.00 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	1707	1710	1780	1720	1762	1732
2	95WPC-300S-5FA	1667	1617	1685	1582	1612	1564
3	85WPC-300S-15FA	1618	1664	1622	1549	1582	1569
4	70WPC-300S-30FA	1655	1625	1683	1509	1536	1520
5	60WPC-300S-40FA	1623	1688	1592	1585	1604	1590

ตารางที่ ค.15 ความหนาแน่นแห้งของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.20 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	1695	1745	1736	1772	1783	1786
2	95WPC-300S-5FA	1520	1609	1525	1591	1518	1581
3	85WPC-300S-15FA	1587	1581	1597	1590	1520	1515
4	70WPC-300S-30FA	1549	1593	1577	1554	1590	1568
5	60WPC-300S-40FA	1596	1524	1538	1587	1546	1579

ตารางที่ ค.16 ความหนาแน่นแห้งของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.30 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	1719	1764	1697	1709	1748	1752
2	95WPC-300S-5FA	1633	1572	1562	1576	1507	1553
3	85WPC-300S-15FA	1612	1607	1513	1549	1555	1564
4	70WPC-300S-30FA	1572	1591	1584	1510	1550	1564
5	60WPC-300S-40FA	1591	1588	1633	1697	1657	1652

ตารางที่ ค.17 ความหนาแน่นแห้งของอัตราส่วน 1 : 3 ที่ w/c = 1.40 อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	1567	1627	1633	1657	1658	1638
2	95WPC-300S-5FA	1605	1507	1607	1594	1528	1511
3	85WPC-300S-15FA	1609	1582	1635	1598	1540	1531
4	70WPC-300S-30FA	1572	1564	1611	1570	1608	1532
5	60WPC-300S-40FA	1599	1549	1608	1561	1573	1593

ตารางที่ ค.18 ความหนาแน่นแห้งของอัตราส่วน 1 : 3 แทนที่ปูนซีเมนต์ขาวปอตแลด์ด้วยเถ้าลอย 30% ที่ w/c = 1.30 และสารเพิ่มฟอง 1%,3% ,5% อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน

No.	Symbol	Density (kg / m^3) / Curing day					
		3	7	14	28	60	90
1	100WPC-300S	1719	1764	1697	1709	1748	1752
2	70WPC-300S-30FA	1655	1625	1683	1509	1536	1520
3	70WPC-300S-30FA-1SFA	1790	1815	1835	1800	1817	1795
4	70WPC-300S-30FA-3SFA	1885	1875	1890	1855	1905	1890
5	70WPC-300S-30FA-5SFA	1255	1223	1251	1220	1265	1229

ตารางที่ ค.19 ค่าการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมควบคุม ที่ w/c = 1.00, 1.20, 1.30 และ1.40 ที่อายุ 28 วัน

No.	Symbol	Water Absorption (%) / (w/c)			
		w/c = 1.00	w/c = 1.20	w/c = 1.30	w/c = 1.40
1	100WPC-200S	15.2	15.2	18.5	18.5
2	100WPC-250S	15.8	16.7	16.9	18.6
3	100WPC-300S	15.4	17.4	18.2	18.6
4	100WPC-350S	14.6	16.5	17.3	17.8
5	100WPC-400S	12.1	14.1	14.9	15.6

ตารางที่ ค.20 ค่าการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมผสมเถ้าลอย ที่ w/c = 1.00, 1.20, 1.30 และ1.40 ที่อายุ 28 วัน

No.	Symbol	Water Absorption (%) / (w/c)			
		w/c = 1.00	w/c = 1.20	w/c = 1.30	w/c = 1.40
1	100WPC-300S	15.4	17.4	18.2	18.6
2	95WPC-300S-5FA	15.5	16.6	17.0	18.3
3	85WPC-300S-15FA	15.6	16.8	17.9	18.6
4	70WPC-300S-30FA	17.5	17.6	18.2	19.6
5	60WPC-300S-40FA	19.2	21.4	21.5	22.3

ตารางที่ ค.21 ค่าการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมแทนที่ด้วยเถ้าลอย 30% ที่ w/c = 1.30 และสารเพิ่มฟอง 1%,3% ,5% ที่อายุ 28 วัน

No.	Symbol	Abrasion (%) / (w/c)
		w/c = 1.30
1	100WPC-300S	18.6
2	70WPC-300S-30FA	19.6
3	70WPC-300S-30FA-1SFA	28.0
4	70WPC-300S-30FA-3SFA	37.2
5	70WPC-300S-30FA-5SFA	46.0

ตารางที่ ค.22 ค่าการสึกกร่อนของหินทรายเทียมควบคุม w/c = 1.00, 1.20,1.30 และ1.40 อายุ 28วัน

No.	Symbol	Abrasion (%) / (w/c)			
		w/c = 1.00	w/c = 1.20	w/c = 1.30	w/c = 1.40
1	100WPC-200S	41.8	42.4	42.8	44.8
2	100WPC-250S	41.0	45.4	46.0	48.6
3	100WPC-300S	44.3	45.3	47.9	49.0
4	100WPC-350S	51.4	56.5	63.1	66.0
5	100WPC-400S	67.8	71.0	72.0	73.9

ตารางที่ ค.23 ค่าการสึกกร่อนของหินทรายเทียมแทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่ w/c = 1.00, 1.20, 1.30 และ 1.40 ที่อายุ 28 วัน

No.	Symbol	Abrasion (%) / (w/c)			
		w/c = 1.00	w/c = 1.20	w/c = 1.30	w/c = 1.40
1	100WPC-300S	44.3	45.3	47.9	49.0
2	95WPC-300S-5FA	22.1	25.5	26.8	38.5
3	85WPC-300S-15FA	24.5	25.4	27.3	38.8
4	70WPC-300S-30FA	26.0	26.4	27.6	39.1
5	60WPC-300S-40FA	28.8	28.9	28.3	39.3

ตารางที่ ค.24 ค่าการสึกกร่อนของหินทรายเทียมแทนที่ด้วยเถ้าลอย 30% ที่ w/c = 1.30 และสารเพิ่มฟอง 1%,3% ,5% ที่อายุ 28 วัน

No.	Symbol	Abrasion (%) / (w/c)
		w/c = 1.30
1	100WPC-300S	47.9
2	70WPC-300S-30FA	27.6
3	70WPC-300S-30FA-1SFA	89.0
4	70WPC-300S-30FA-3SFA	94.0
5	70WPC-300S-30FA-5SFA	98.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการนำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

พศวีร์ ศรีวัฒนปียังกูร และ ธีรวัฒน์ สินศิริ. (2557). **การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพหินทรายเทียมและวัสดุปอซโซลาน.** การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 19 ประจำปี 2557 (The National Convention on Civil Engineering, NCCE-19), หน้า 766 – 769.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19
วันที่ 14-16 พฤษภาคม 2557 จ. ขอนแก่น

19th National Convention on Civil Engineering
14-16 May 2014, Khon Kaen, THAILAND

การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพหินทรายเทียมและวัสดุปอซโซลาน

A Study Property Base Physical of Imitation Sandstone And Pozzolan

พสวีร์ ศรีวัฒนปิยังกูร* และ จีรวัฒน์ สินศิริ

* หน่วยวิจัยเทคโนโลยีก่อสร้าง สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพหินทรายเทียม และวัสดุปอซโซลาน กำลังรับแรงอัดของหินทรายเทียม, พฤติกรรมการดูดซึมน้ำ และการสึกกร่อน อัตราส่วนการแทนที่ของวัสดุปอซโซลาน โดยใช้ปริมาณปอซโซลานแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวอัตราส่วนร้อยละ 5, 15, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำต่อสารซีเมนต์สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว (WPC) มีค่าเท่ากับ 1.2 ถึง 1.3 หล่อตัวอย่างทดสอบรูปแบบหล่อเป็นมอร์ต้าขนาด 50 x 50 x 50 มม ตามตัวอย่างทดสอบให้แห้งที่อุณภูมิห้องทดลองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบ่มตัวอย่างทดสอบที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของหินทรายเทียม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำ และการสึกกร่อนมีแนวโน้มลดลง

คำสำคัญ:กำลังอัด, หินทรายเทียม, การดูดซึมน้ำ, การสึกกร่อน

Abstract

This paper is to study the basic properties of imitation sandstone and containing fly ash such as compressive strength, water absorption and abrasion resistance. The ratios of fly ash to white portland cement (wpc) by weight are 5, 15, 30 and 40 were studied. The ratios of water to cement agent for (wpc) ranging from 1.2 to 1.3 were tested. All specimens were cast with cubic 50 x 50 x 50 mm specimens. Test specimens were cured for 24 hours in a humid room. After demolding, they were kept in a curing room at 60% relative humidity, and were cured for 7, 14, and 28 days until testing. From tests, it was found that compressive strength of imitation sandstone is increased. In contrast,the water absorption and abrasion resistance trended to decreased.

Keywords: Compressive Strength, Imitation sandstone,Water Absorption, Abrasion resistance

1. บทนำ

หินทราย (Sandstone) เป็นแร่หินชนิดหนึ่งที่ตกผลึกขับตัวเป็นเวลาหลายสิบปี ประกอบ ด้วยเม็ดทราย ส่วนมากเป็นทรายของควอร์ตซ์ (Quartz) แต่เป็นทรายของแมกนีไทต์ (Magnetite) หรือ แคลไซต์ (Calcite) ทรายเหล่านี้เชื่อมติดกันโดยกระบวนการทางธรรมชาติ วัตถุธาตุที่เชื่อมนั้นเป็นแร่ธาตุ (Minerals) บางชนิด ส่วนมากเป็นซิลิกา(Silica) หรือ คาร์บอนเนตของปูน (Carbonate Lime) หินทรายมีสีต่างๆ กัน ตั้งแต่สีขาวขนถึงสีทาแก่ สีน้ำตาล น้ำตาลปนแดง ด้วยความโดดเด่นบนบุมย์ได้นำเอาหินทรายมาจัดวาง ก่อสร้างเป็นที่อยู่อาศัยจนเป็นอุตสาหกรรมนำหินทรายมาจัดทำเป็นวัสดุตกแต่ง และสลัก รวมไปถึงเป็นวัสดุตกแต่งอาคาร เนื่องมีการนำทรัพยากรมาใช้มาก ทำให้เกิดการรุกพื้นที่ทางธรรมชาติ จึงมีการคิดค้นถึงวัสดุออกเลียนแบบหินทรายให้เสมือนจริงที่สุด เช่นเดียวกับภายในจังหวัดนครราชสีมา นั้นเป็นศูนย์กลางประติมากรรมหินทราย แหล่งใหญ่ที่สุดของประเทศไทย (OTOP) ประจำจังหวัดนครราชสีมา คือหมู่บ้านหนองโสน ตำบลทำอ่าง อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา หินทรายได้เข้ามามีผลในงานก่อสร้างมากขึ้นทั้งในงานสถาปัตยกรรมภายนอก และภายใน แต่ในการนำไปใช้ มีผลเรื่องของทรัพยากร และน้ำหนักที่มาก ปัญหาในเรื่องน้ำหนักนี้ทำให้มีผลต่อราคาการขนส่งที่มีการคิดจากองประกอบ วัสดุที่ใช้ในการหล่อหินทรายมีราคาสูง รวมถึงแม่แบบลักษณะต่างที่ขึ้นตามความยากง่าย ฝีมือผู้จัดทำส่วนผสมมีผลกระทบกับราคา และเมื่อนำไปใช้ยังคงติดปัญหาเรื่องของสีที่ไม่สม่ำเสมอ ความคะกอนที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ไปได้ประมาณ 2-3 ปี รูปร่างลักษณะที่กำหนดได้ยาก ใช้เวลาในการจัดสร้างนาน ทรัพยากรถูกทำลายมากขึ้น จากสิ่งที่ปรากฏดังกล่าวประกอบกับหินทรายประดิษฐ์ จึงมีความประสงค์ที่จะต้องการศึกษาในเรื่องของวัสดุผสมในงานหินทรายประดิษฐ์ที่สามารถนำมาใช้งานได้จริง และได้นำเอาวัสดุปอซโซลานเข้ามาร่วมพัฒนาร่วมพื้นฐาน เพื่อประกอบข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้โดยใช้แทนที่ซิเมนต์บางส่วน แต่ในการทดลองเบื้องต้นนี้ จะทำการศึกษาทดลองเฉพาะแทนมอร์ต้าเท่านั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิ์ภาพของหินทราย

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)
E-mail address: ponavee_vee@hotmail.com

เทียมให้ได้คุณสมบัติที่ดีขึ้นในลักษณะสัดส่วนที่เหมาะสม ที่ยังคงมีคุณสมบัติความคงทน น้ำหนักที่น้อยลง และกำลังอัดดีขึ้นอันที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานได้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อทดลองหาสัดส่วนผสมของการผลิตหินทรายเทียม ให้มีคุณสมบัติและสัดส่วนที่เหมาะสม สามารถขึ้นรูปได้โดยง่าย

2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านกำลังอัดในอัตราส่วนที่กำหนดกับปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวควบคุม

2.3 เพื่อศึกษากำลังอัด,การดูดซึมน้ำ และการสึกกร่อนในอัตราส่วนที่กำหนดกับปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวควบคุม

3. ขอบเขตและวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

1) ปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว(WPC)

2) เถ้าลอย เป็นเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ตามมาตรฐาน ASTM C618

3) ทรายในท้องที่ อำเภอพิมายจังหวัดนครราชสีมา ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.623 เปอร์เซ็นต์

4) น้ำเป็นน้ำประปาในพื้นที่ จ.นครราชสีมา

3.2 อัตราส่วนผสม

1) อัตราส่วนผสมมอร์ต้าของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวควบคุม 100 % ผสมน้ำ บ่มตัวอย่างโดยการแช่ หรือคลุมให้แห้งในตู้ควบคุมความชื้นห้องทดลองที่ช่วงอายุตัวอย่าง 7, 14 และ 28 วัน

2) ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซิเมนต์ขาว(WPC) ในอัตราส่วนที่ 5, 15, 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก

3) ศึกษาปริมาณน้ำ ต่อการซีเมนต์ที่ใช้สำหรับปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว (WPC) มีค่าเท่ากับ 1.2 ถึง 1.3

4) ทำการหล่อแท่งตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าร์ โดยใช้แบบหล่อมอร์ต้าร์มาตรฐานทรงลูกบาศก์ ขนาด 50 x 50 x 50 ม.ม. ซีเมนต์มอร์ต้าร์ควบคุมโดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 ตามทิ้งไว้ในตู้ความชื้นห้องทดลองเป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นนำไปบ่ม ทำการบ่มชื้นโดยใช้พลาสติกใสหุ้มพันรอบ หรือหุ้มห่อให้มิดชิด ระยะเวลาให้เป็นไปช่วงระยะเวลาบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน การแช่ หรือคลุมให้แห้งในห้องทดลอง 1 วัน จะทำการวัดขนาด และชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนัก ก่อนนำไปทดสอบกำลังอัด

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว, ทราย และ เถ้าลอย

1) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุความถ่วงจำเพาะของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว และทราย

2) ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานออ ชาตอลิเยร์ (Le Chatelier) ตาม ASTM C188

3) ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของเถ้าลอย ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

รูปที่ 3.2 แบบหล่อซีเมนต์มอร์ต้าร์ ขนาด 50 x 50 x 50 ม.ม.

ตารางที่ 1 อัตราส่วนการผสมของปูนซิเมนต์ขาว และเถ้าลอย

No.	Mix	WPC (%)	FA (%)	W/C
1	100WPC+control	100	0	1.30
2	95WPC+5FA	95	5	1.30
3	85WPC+15FA	85	15	1.30
4	70WPC+30FA	70	30	1.30
5	60WPC+40FA	60	40	1.30

3.4 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength) ของมอร์ต้าร์ของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว(WPC) และปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาวที่ผสมด้วยเถ้าลอย (WPC+FA) ตามอัตราส่วนมาเปรียบเทียบกับปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว(WPC)ควบคุม

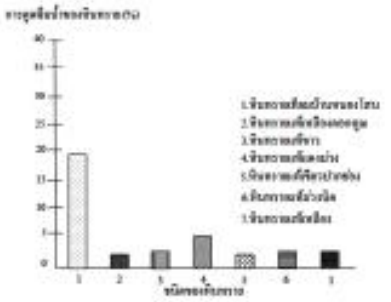
3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น หน่วยน้ำหนัก, ความคงทนต่อการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C90 และ ASTM C140

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากการทำการวิจัยแยกเป็นส่วน ดังนี้

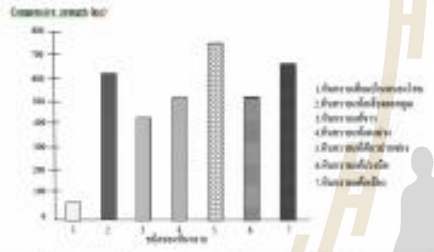
4.1 ปริมาณการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียม และหินทรายจริงตามชนิดของวัสดุ

จากรูปที่ 4.1 พบว่าการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียมสูงถึง 19.156 % แสดงถึงความหนาแน่นของเนื้อวัสดุภายในที่มีความหนาแน่นไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับหินทรายธรรมชาติที่มีการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่า 2.279 %



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของหินทรายเทียม และหินทรายธรรมชาติสามชนิด และลักษณะของหินทราย

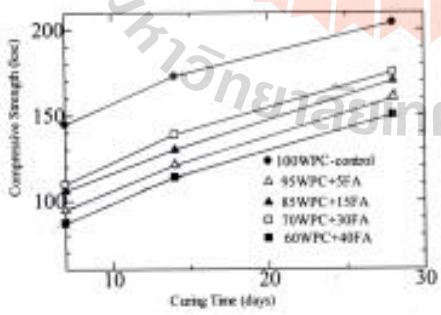
4.2 ผลการทดสอบด้านกำลังอัด



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบกำลังอัดของหินทรายเทียม ที่ได้จากการทดสอบที่หมู่บ้านหนองไสน ต.ด่านเกวียน จ.นครราชสีมา และหินทรายแท้ตามธรรมชาติ ต.หนองน้ำใส จ.นครราชสีมา

จากรูปที่ 4.2 พบว่ากำลังของหินทรายเทียมนั้นมีกำลังต่อช้างน้อยมาก และเมื่อพิจารณาลงไปถึงเรื่องการดูดซึมน้ำนั้น ในรูปที่ 4.1 ก็บ่งชี้ได้ว่าความพรุนแน่นโดยใช้ลักษณะการดูดซึมน้ำนั้นเป็นผลทำให้บ่งบอกถึงกำลังที่น้อยมากเมื่อเทียบกับการดูดซึมน้ำที่น้อย

4.3 ผลการทดสอบด้านกำลังอัด



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าปกติกับซีเมนต์มอร์ต้าผสมเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.2 พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าปกติจะให้กำลังสูงในช่วงแรก ส่วนซีเมนต์มอร์ต้าที่ผสมเถ้าลอยจะมีกำลังเพิ่มขึ้น และจะแปรผันโดยตรงกับอายุการบ่ม

4.4 ลักษณะทางกายภาพด้านพื้นผิวของซีเมนต์มอร์ต้าผสมเถ้าลอย

รูปที่ 4.3 แสดงผลการสำรวจเชิงกายภาพพื้นผิวภายนอกของก้อนตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้า ขนาด 50 x 50 x 50 ม.ม. ผสมเถ้าลอย พบว่ามีผิวภายนอกมีสีที่เปลี่ยนไปตามการแทนที่ปริมาณเถ้าลอย และมีลักษณะผิวเนื้อที่แน่นทึบ ส่วนผสมที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่สูง จากสีจะคล้ายเป็นซีเมนต์ขาวเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยผสมเข้าไป ทำให้งานต่อการเท พื้นผิวภายนอกมีลักษณะที่ผิวเรียบสม่ำเสมอกันรูพรุนน้อย

รูปที่ 4.3 ซีเมนต์มอร์ต้าผสมเถ้าลอย

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยมอร์ต้าโดยใช้เถ้าลอยแทนที่ตามอัตราส่วนผสมโดยแทนที่ซีเมนต์ เปรียบเทียบกับมอร์ต้าควบคุม

-จากผลการทดสอบกำลังอัดจะพบกำลังอัดแปรผันกับปริมาณเถ้าลอยกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อซีเมนต์มอร์ต้าที่ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 ที่ผสมเถ้าลอยประมาณ 30 %

-หน่วยน้ำหนักที่มีอัตราส่วนโดยประมาณ 70WPC+30FA ที่ 1,820 กก./ม^3 และ1,750 กก./ม^3 ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย รวมถึงผู้ร่วมวิจัย และผู้ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้ทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

[1] บุญฤทธิ์ คำทอง, ชวัญชัย ภาพันธ์ และ นิชานันท์ ห้องสินหลาก, "การเสริมกำลังสะพานคอนกรีต", *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7*, พ.ศ.2554, หน้า 100-106. (ภาพิมพ์ความในเอกสารประกอบการประชุม)

[2] บุญยกิตติ์ คำทอง, ชวัญชัย กรพันธ์ และ นิชฌานันท์ ห้องสินหลาก, *การเสริมกำลังสาคอนกรีต*, สำนักพิมพ์นานมี, พ.ศ.2554, หน้า 100-106. (การอ้างอิงหนังสือ)

[3] บุญยกิตติ์ คำทอง, ชวัญชัย กรพันธ์ และ นิชฌานันท์ ห้องสินหลาก, "การเสริมกำลังสาคอนกรีต", *วารสารวิชัย ม.ช.*, ปีที่ 5, พ.ศ.2554, หน้า 100-106. (การอ้างอิงบทความในวารสาร)

[4] ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย ชาญวิทิกกุล ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และ คอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ตุลาคม 2547

[5] นนทิวรรธน์ จันทนะสิน. *ปางสมาธิ ปูนพลาสเตอร์*. 2542.

[6] พงษ์พันธ์ วรสุนทรโวหาร. *วัสดุก่อสร้าง*.กรุงเทพฯ : ซีเอ็ด, 2535.

[7] **วิจิตร อภิชาติเกรียงไกร.** Attecced : เรื่องต้องรู้ของปฏิมากรรมและประติมากรไทย. 2526.

[8] **วิบูลย์ลักษ์วิรัชงนา. ผู้เชี่ยวชาญด้านการประดิษฐ์หินทรายเทียม.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา.

[9] **ศราวุธ ดวงจำปา.** Meditation : ปฏิมากรรมสื่อผสม. 2524.

[10] **ศาตล สิทธิผล.**บุพกาลแห่งชีวิตและการแกะสลักหิน เชื่อมโลหะ. 2540.

[11] **อุดมวิทย์ กาญจนวรรค์.** การปฏิบัติงานทดสอบวัสดุ (แบบคำอธิบาย). นนทบุรี : แผนกวิชา ช่างก่อสร้าง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตนนทบุรี, 2538.

[12] **อุมา โพธิกนิษฐ์.** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผู้เชี่ยวชาญหินทรายเทียม บ้านด่านเกวียน ต.ด่านเกวียน อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา .

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายพศวีร์ ศรีวัฒนปียังกูร เกิดวันพุธ ที่ 3 กุมภาพันธ์ 2525 ที่อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษา ที่โรงเรียนเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา ศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 ถึง 3 ที่โรงเรียนสุรนารีวิทยา 2 ศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ แผนกวิชาก่อสร้าง ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา ศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง แผนกวิชาช่างก่อสร้าง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา และเมื่อปี พ.ศ. 2545 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ในปัจจุบัน) ก่อนศึกษาในระดับปริญญาตรี ปฏิบัติหน้าที่เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีต และห้องปฏิบัติการโครงสร้าง ภายหลังจบปริญญาตรีปฏิบัติหน้าดูแลห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ในวุฒิปริญญาตรี ดังนั้น เพื่อเป็นการพัฒนาตนเองทั้งในด้านความรู้ ความสามารถในด้านการทดสอบ ในด้านงานวิจัยที่ใช้งานจริง จึงเกิดแรงจูงใจเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2555 ในระหว่างการศึกษาได้มีบทความวิจัยตีพิมพ์ภายในประเทศ 1 บทความ ดังปรากฏในภาคผนวก ง.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี