



สมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าปล้มน้ำมันที่ใช้เศษกระจกเป็นมวลรวม  
**Properties of Mortar Containing Waste Glass Aggregate and Oil Palm Ash**

อรุณ นาครักษา

**Arun Nakruksa**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Civil Engineering  
Prince of Songkla University**

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์                      สมบัติของมอร์টারผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้เศษกระจกเป็นมวลรวม  
 ผู้เขียน                                นายอรุณ นาครักษา  
 สาขาวิชา                              วิศวกรรมโยธา

<p>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก</p> <p>.....</p> <p>(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณพล ตันนโยภาส)</p>	<p>คณะกรรมการสอบ</p> <p>.....ประธานกรรมการ</p> <p>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสวี)</p> <p>.....กรรมการ</p> <p>(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณพล ตันนโยภาส)</p>
<p>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม</p> <p>.....</p> <p>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์)</p>	<p>.....กรรมการ</p> <p>(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์)</p> <p>.....กรรมการ</p> <p>(รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล สัจจวานิชย์)</p>

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณ  
บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณพล ตันนโยภาส)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายอรุณ นาครักษา)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน  
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายอรุณ นาครักษา)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	สมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันที่ใช้เศษกระจกเป็นมวลรวม
ผู้เขียน	นายอรุณ นาครัถยา
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2555

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบบของเศษกระจกทำเป็นมวลรวมละเอียดและเถ้าปลาล์มน้ำมันที่ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีต่อกำลังอัด สภาพความคงทนของมอร์ตาร์ โดยใช้เศษกระจกโพลีเอทิลีน สีน้ำตาล สีใสและผสมทั้งสามสีเป็นมวลรวมละเอียดแทนทราย ส่วนเถ้าปลาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก สมบัติของมอร์ตาร์ที่ศึกษา ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ และกำลังอัด โดยบ่มในน้ำที่ 7 28 และ 56 วัน ทดสอบแอลคาไลซิลิกาตามวิธี ASTM C1260 แห่งปริซึมมอร์ตาร์ ระยะเวลา 14 วัน ทดสอบการขยายตัวโดยแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 5 จนถึง 133 วัน ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์บ่มน้ำ 27 วัน ทดสอบการหดตัวแบบแห้งวัดเป็นระยะ 3 7 14 28 35 56 และ 90 วัน ตรวจโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์ชนิดวิทยาภาควรรณในตัวอย่างมอร์ตาร์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

ผลการศึกษาพบว่าสมบัติมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกมีผลกระทบน้อยเรียงตามกระจกสีเขียว สีฟ้า สีใส และผสมทั้งสามสี ในขณะที่ผลกระทบบจากการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปลาล์มน้ำมันพบว่า ความหนาแน่นรวมลดลง การดูดซึมน้ำและการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นตามเถ้าปลาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นในมอร์ตาร์ อย่างไรก็ตามกำลังอัดค่อยลดลงเมื่อแทนทรายด้วยเศษกระจก ซึ่งมอร์ตาร์ปกติและผสมกระจกเรียงตามสีที่กล่าวมาให้กำลังอัดสูงสุดเมื่อผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56 วัน มีค่าเฉลี่ย 37 34 33 33 และ 34 เมกะพาสคัล ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่ากำลังเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจก ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 7 28 และ 56 วัน ให้ค่าสูงกว่าร้อยละ 75 เท่านั้น

ผลวิเคราะห์ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาพบว่าขึ้นอยู่กับปริมาณของเถ้าปลาล์มน้ำมันที่ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์เป็นหลัก โดยมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นมีการยับยั้งต่อการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่วนการต้านทานไอออนคลอไรด์ก็พบว่าแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นให้ความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

การวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD แก่ตัวอย่างมอร์ทัลร์ปกติและมอร์ทัลร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกที่ผสม  
เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56 วัน พบสารประกอบ คือ แคลเซียมไฮ-  
ดรอกไซด์ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แอตตรึงไคต์และแคลไซต์ ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยา  
ปอซโซลานและไฮเดรชัน นอกจากนี้ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี SEM ของตัวอย่างมอร์  
ทัลร์ดังกล่าว พบว่าภายในซอกโพรงของเนื้อเพสต์หรือการปรับปรุงยึดหน่วงกันระหว่างเศษกระจก  
กับเนื้อเพสต์ บรรดาผลึกของสารประกอบที่ได้ เช่น แอตตรึงไคต์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ  
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลไซต์ฝังอยู่อย่างแบบสุ่มในระหว่างรอยตะเข็บ เศษแก้วทั้งสามสี  
ส่วนผสมมีพฤติกรรมในทางเดียวกันถึงปริมาณวิกฤตแรกเกิดขึ้น

**คำหลัก :** เศษกระจกโพลด, เถ้าปาล์มน้ำมัน, กำลั้งอัด, ความยับยั้งต่อปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา,  
ความต้านทานไอออนคลอไรด์, มอร์ทัลร์

<b>Thesis Title</b>	Properties of Mortar Containing Waste Glass Aggregate and Oil Palm Ash
<b>Author</b>	Mr.Arun Nakruksa
<b>Major Program</b>	Civil Engineering
<b>Academic Year</b>	2012

### ABSTRACT

In this research, the effect of waste float glass (WFG) as fine aggregate and oil palm ash (OPA) pozzolanic material on physical properties, compressive strength and durability of mortars were investigated. For each mixture, four types of float glass sand (FGS) were used, namely, green, brown, clear and mixed color of FGS. The OPA was sieved passing through 45 micron replaced partially ASTM Portland cement in proportion of 10, 20 and 30 wt.% and cured in water at the age of 7, 28 and 56 days. Physical and mechanical tests were carried out aggregate properties, fresh paste, bulk density, water absorption, and compressive strength of mortars. Alkali silica test for mortar specimens were followed ASTM 1260 (mortar-bar method) in 14 days then soaking in 5% magnesium sulfate solution until 133 days. Penetration resistance of chloride ion curing 27-day was carried out. Drying shrinkage of all mortars was measured in period of 3, 7, 14, 28, 35, 56 and 90 days was also determined. Microstructure characterizations of some FGS mortars were observed using scanning electron microscope (SEM), and mineral constituents analyzed by X-ray diffraction (XRD).

Experimental results demonstrate that the bulk density decreased whereas the water absorption and drying shrinkage increased with the increasing of OPA in mortars. The influence of FGS aggregates on properties of mortar was relatively significant less than that of OPA content. However, there was a gradual reduction in compressive strength as the instead of FGS in sand. It was found that the highest 28 and 56 days compressive strength of mortars containing natural sand and FGSs with 10% OPA were 37, 34, 33, 33 and 34 MPa, respectively. However, the 7- and 28-day relative strength activities of all FGS mortars containing 10% OPA were higher than 75%, is due to interaction of OPA and cement. Moreover, FGS mortars

increased suppression ASR extension with increasing of OPA. The resistance to chloride ion penetration of FGS mortars contained 10% OPA higher resistant than FGS mortars without OPA.

XRD analysis of sand and FGS mortars with 10% OPA at 56 days revealed forming new compounds of calcium hydroxide (CH), calcium silicate hydrate (CSH), ettringite and calcite, which confirmed the occurrence of pozzolanic reaction in these specimens. Furthermore, the SEM results of the same specimens showed that presence of large number of pore or improve the bond between FGS and paste. The CSH, CH, ettringite, and calcite random filled in the interfacial transition zone. The four FGSs batches in mortar behave in similar way of the mineral phase content.

**Keywords :** Waste float glass, Oil palm ash, Compressive strength, Alkali silica reaction, Chloride ion penetration, Mortar



## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.คณพล ตันนโยภาส อาจารย์ที่ปรึกษาหลักและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางแก่ผู้ดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการปฏิบัติงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล สัจฉาณิชย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คณะบัณฑิตวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ รวมถึง บริษัท ลำสูง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เก็บปาล์มน้ำมัน บริษัท หาดใหญ่เกษม จำกัด และห้างหุ้นส่วนจำกัด นาคศิลป์ดีเวลอปเมนท์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แจกกระจกสีต่างๆ และ ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง เครื่อง X-ray fluorescence Spectrometer รุ่น PW2400, PHILIPS, Netherlands, X-ray Diffractometer รุ่น X'Pert MPD, PHILIPS, Netherlands และ Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM-5800LV, JEOL, JAPAN และ Laser Particle Size Analysis (LPSA), COULTER LS230, USA.

สุดท้ายนี้สิ่งสำคัญสุดที่ทำให้มีข้าพเจ้าในวันนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดา นางสาวนฤมล ประกัน สมาชิกทุกคนในครอบครัวและเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และทุกคนที่มีส่วนร่วมทั้งกำลังกาย กำลังใจและทุนสนับสนุนในการศึกษาครั้งนี้

อรุณ นาครักษา

## สารบัญ

		หน้า
	สารบัญ	(10)
	รายการตาราง	(12)
	รายการภาพประกอบ	(14)
	<b>บทที่</b>	
<b>1</b>	<b>บทนำ</b>	
	1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
	1.5 สมบัติของปูนซีเมนต์	3
	1.6 มวลรวม	8
	1.7 ปอชโซลาน	8
	1.8 เถ้าปลาล์มน้ำมัน	10
	1.9 แก้วหรือกระจก	14
<b>2</b>	<b>วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
	2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	31
	2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ	34
	2.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์	34
	2.4 ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัว	35
	2.5 การทดสอบความหนาแน่น	35
	2.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำ	35
	2.7 การทดสอบกำลังอัด	35
	2.8 การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง	37
	2.9 ความยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา	37
	2.10 ความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	40
	2.11 ความต้านทานการแทรกซึมประจุไอออนคลอไรด์	40

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.12	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและวิฎภาคแร่ประกอบ 42
<b>3</b>	<b>ผลการศึกษาและอภิปรายผล</b>
3.1	องค์ประกอบทางเคมี 43
3.2	ลักษณะทางกายภาพของวัสดุ 47
3.3	ขนาดอนุภาคของวัสดุ 48
3.4	สมบัติซีเมนต์เพสต์ 50
3.5	ความหนาแน่นของมอร์ต้าร์ 52
3.6	การดูดซึมน้ำของมอร์ต้าร์ 55
3.7	กำลังอัดของมอร์ต้าร์ 58
3.8	การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ 63
3.9	ความยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา 67
3.10	ความยับยั้งสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 70
3.11	การแทรกซึมประจุไอออนคลอไรด์ในมอร์ต้าร์ 74
3.12	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของมอร์ต้าร์ 75
3.13	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของมอร์ต้าร์ 79
<b>4</b>	<b>สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ</b>
4.1	สรุปผลการศึกษา 84
4.2	ข้อเสนอแนะ 85
	<b>บรรณานุกรม 86</b>
	<b>ภาคผนวก</b>
	ก. ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุและก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ 94
	การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ 147
	ประวัติผู้เขียน 159

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	การจำแนกชั้นของวัสดุปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618	9
1.2	องค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่มีผลต่อสีของแก้ว	16
1.3	ความหนาแน่นรวมของแก้วแต่ละชนิด	17
2.1	ความหมายของรหัสตัวอย่าง	34
2.2	อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบกำลัง	36
2.3	อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบการหดตัวแห้ง	38
2.4	อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาและ การต้านทานซัลเฟต	39
2.5	อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์	41
3.1	องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุ	44
3.2	สมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับวัสดุปอชโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618	45
3.3	สมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์ที่ศึกษา	49
3.4	ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติและเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้า ปาล์มน้ำมัน	50
3.5	ผลวิเคราะห์ชนิดแร่และคำนวณปริมาณได้เส้นลายพิมพ์ของมอร์ตาร์ ด้วยวิธี XRD	76
ก-1	ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ของซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปกติ (OPC)	95
ก-2	ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ของซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (OPA10)	96
ก-3	ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ของซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 (OPA20)	97
ก-4	ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ของซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 (OPA30)	98

### รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก-5	ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ปกติและซีเมนต์เพสต์ที่ผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน	99
ก-6	ผลทดสอบการกระจายขนาดและโมดูลัสความละเอียดของทราย	100
ก-7	ผลทดสอบการกระจายตัวและโมดูลัสความละเอียดของเศษกระจกสีเขียว	101
ก-8	ผลทดสอบการกระจายตัวและโมดูลัสความละเอียดของเศษกระจกสีน้ำตาล	101
ก-9	ผลทดสอบการกระจายตัวและโมดูลัสความละเอียดของเศษกระจกสีใส	102
ก-10	ความถ่วงจำเพาะและค่าดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดของเศษกระจก ASTM C 128-97	103
ก-11	ความหนาแน่นของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 29/C 29M-97	104
ก-12	ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์	105
ก-13	ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์	114
ก-14	ผลการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของมอร์ต้าร์ที่ทดสอบ	123
ก-15	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์	124
ก-16	ผลการทดสอบความยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา	130
ก-17	ผลการทดสอบความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	133
ก-18	ผลการทดสอบการแทรกซึมผ่านประจุไอออนคลอไรด์	138

## รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	แผนภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต	5
1.2	แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	7
1.3	ภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเถ้าปาล์มน้ำมัน (ก) ก่อนบด (ข) หลังบด	11
1.4	โครงสร้างควอตซ์ แก้วซิลิกา และแก้วโซเดียมแคลเซียมซิลิเกต ก) โครงข่ายแบบเดิม ข) โครงข่ายตัดแปร และ ค) โครงข่ายทั้งสองแบบ	19
2.1	แผนผังดำเนินการศึกษามอร์ทัลร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้เศษกระจกเป็นมวลรวม	32
2.2	วัสดุประสาน (ก) ปูนซีเมนต์ และ (ข) เถ้าปาล์มน้ำมัน	33
2.3	มวลรวมละเอียดที่ใช้ชนิด (ก) ททราย (ข) เศษกระจกสีเขียว (ค) เศษกระจกสีน้ำตาล และ (ง) เศษกระจกสีใส	33
2.4	(ก) มอร์ทัลร์ควบคุม (ข) มอร์ทัลร์เศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน	37
2.5	ตัวอย่างมอร์ทัลร์วัด (ก) การขยายตัวจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา และ (ข) การแทรกซึมของคลอไรด์	41
3.1	ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเศษกระจกสีเขียวที่ใช้ทดลอง	45
3.2	ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเศษกระจกสีน้ำตาลที่ใช้ทดลอง	46
3.3	ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเศษกระจกสีใสที่ใช้ทดลอง	46
3.4	จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า มีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมค่อนข้างมนถึงกลมมน (ข) 1,500 เท่า มีรูพรุน และ (ค) 3,000 เท่า รูพรุนและผิวไม่เรียบ	47
3.5	การกระจายตัวอนุภาคของวัสดุประสานและมวลรวมละเอียดที่นำมาหล่อมอร์ทัลร์	49
3.6	(ก) พฤติกรรมการก่อตัวของเพสต์ และ (ข) ช่วงระยะเวลาเริ่มต้นก่อตัวและสิ้นสุดของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มอัตราส่วนต่างกัน	51

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	ความหนาแน่นรวมของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีต่างๆ	53
3.8	ความหนาแน่นรวมของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีเขียวผสม เถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	53
3.9	ความหนาแน่นรวมของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีน้ำตาลผสม เถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	54
3.10	ความหนาแน่นรวมของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใสผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	54
3.11	ความหนาแน่นรวมของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	55
3.12	การดูดซึมน้ำของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 7 วัน	56
3.13	การดูดซึมน้ำของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน	57
3.14	การดูดซึมน้ำของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 56 วัน	57
3.15	กำลังอัดของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีต่างๆ	60
3.16	กำลังอัดของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีเขียวผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	61
3.17	กำลังอัดของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีน้ำตาลผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	61
3.18	กำลังอัดของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใสผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	62
3.19	กำลังอัดของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	62
3.20	การหดตัวแบบแห้งของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีต่างๆ	64

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.21	การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วย เศษกระจกสีเขียวผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	65
3.22	การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วย เศษกระจกสีน้ำตาลผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	65
3.23	การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วย เศษกระจกสีใสผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	66
3.24	การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วย เศษกระจกผสม ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	66
3.25	การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์ แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีต่างๆ	68
3.26	การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์ แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีเขียวผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	68
3.27	การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์ แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีน้ำตาลผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	69
3.28	การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์ แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใสผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	69
3.29	การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์ แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสม ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ	70
3.30	การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีต่างๆ แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	72
3.31	การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีเขียว ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	72
3.32	การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสี น้ำตาลผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	73
3.33	การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใส ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	73



### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.34	การขยายตัวของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใสผสมเก้าปาล์มน้ำมันแซ่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	74
3.35	ประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ซึมผ่านมอร์ดีอาร์ทดลองผสมเก้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10	75
3.36	ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีเขียวผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56	76
3.37	ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีน้ำตาลผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56	77
3.38	ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใสผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56	77
3.39	ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56	78
3.40	40 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วย เศษกระจกสีเขียวผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0 บ่ม 56 วัน (ก, ข) กำลังขยาย 5,000, 10,000 เท่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์แทรกในแผ่นกระจก (ค) กำลังขยาย 1,000 เท่า แผ่นเศษกระจกและแอตริงไคด์ (E) เคลือบ	80
3.41	ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วย เศษกระจกสีน้ำตาลผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 บ่ม 56 วัน (ก, ข) กำลังขยาย 5,000 เท่าแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) เคลือบแผ่นกระจก (ค) กำลังขยาย 1,000 เท่า แผ่นเศษกระจกและแอตริงไคด์ (E) และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) เคลือบ	81
3.42	ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใส (ก, ข) กำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า แคลไซด์ (ค) กำลังขยาย 1,000 เท่า แผ่นเศษกระจกและแคลไซด์	82

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.43	ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกรวมทุกสีผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 บ่ม 56 วัน (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า แผ่นเศษกระจกและแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) เคลือบ (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า แอตรึงไค้รูปเข็มและแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) เคลือบทั่วแผ่นกระจก (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า แอตรึงไค้รูปเข็มและแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) เคลือบทั่วแผ่นกระจก	83
ก-1	ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกตัวของเข็มไวแคตกับปริมาณน้ำของซีเมนต์ปกติ (OPC)	95
ก-2	ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกตัวของเข็มไวแคตกับปริมาณน้ำของซีเมนต์พิเศษที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 (OPA30)	96
ก-3	ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกตัวของเข็มไวแคตกับปริมาณน้ำของซีเมนต์พิเศษที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 (OPA30)	97
ก-4	ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกตัวของเข็มไวแคตกับปริมาณน้ำของซีเมนต์พิเศษที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 (OPA30)	98
ก-5	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับการแทรกตัวของเข็มไวแคต	100

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การนำเอาขยะแก้วกลับมาใช้ถือว่าเป็นปัญหาสำคัญแก่เทศบาลทั่วโลก ประเทศไทยมีขยะแก้วที่ทิ้งเป็นขยะอยู่ปี 2554 ประมาณละ 1,700,000 ตันต่อปี [1] ร้อยละ 77 แปรรูปใช้ใหม่และใช้ซ้ำ การใช้แก้วที่นำกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานผลิตแก้วช่วยลดการใช้พลังงาน ลดวัตถุดิบ ลดการสึกหรอและการซ่อมเครื่องจักรกล อย่างไรก็ตามแก้วที่ใช้ไม่สามารถนำกลับมาใช้แก้วใหม่ได้ทั้งหมดเพราะมีสิ่งเจือปน ค่าใช้จ่ายหรือการคัดแยกมี มีรายงานว่ามีปริมาณขยะแก้วหลายสิบล้านตันมากกว่าปริมาณแก้วคัดแยกได้ จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาตลาดสำหรับขยะแก้วหลายสิบล้านตัน การใช้วัสดุกลับมาใช้ใหม่ในงานก่อสร้างดูเหมือนเป็นทางเลือกน่าพึงพอใจมากที่สุด เนื่องจากปริมาณมากเกณฑ์กำหนดคุณภาพต่ำ และสถานที่ก่อสร้างแพร่หลาย การประยุกต์ที่สำคัญประกอบด้วยมวลรวมแทนที่บางส่วนในคอนกรีตยางมะตอย (asphalt concrete) เป็นมวลรวมละเอียดในพื้นที่รองไม่ยึดเหนี่ยว ชั้นวางท่อระบบระบายน้ำที่ฝังกลบ กรวดถมกลับเพื่อระบายน้ำ เมื่อเร็วนี้ได้มีการศึกษาหลายประเด็นได้เน้นการใช้ขยะแก้วเป็นมวลรวมสำหรับคอนกรีตปูนซีเมนต์หรือการแทนที่ปูนซีเมนต์ [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] อย่างไรก็ตามแก้วเป็นอสัณฐาน และประกอบด้วยปริมาณค่อนข้างมากของซิลิกอนและแคลเซียม ในเชิงทฤษฎีนั้นเป็นสารปอซโซลานหรือแม้แต่นิวคลีอัสในธรรมชาติเมื่อละเอียดได้มีการแสวงหาประโยชน์จากการใช้แก้วเป็นสารประกอบของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเพิ่มคุณค่ามากยิ่งขึ้นและให้พลังงานแฝงมาก่อนในระหว่างกระบวนการทำแก้ว [9]

เนื่องจากสถานะปัจจุบันมีการใช้งานกระจกหรือแก้วในงานก่อสร้างมากขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้ว่าในทุกโครงการที่มีการก่อสร้าง จะต้องมีการใช้วัสดุงานกระจกเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่เนืองๆ ถึงแม้ยังไม่มีข้อมูลปริมาณเศษกระจกที่แท้จริงต่อหน้า ซึ่งในปัจจุบันจะมีการนำเศษกระจกกลับไปใช้ใหม่มีหลายวิธี เช่น การนำกลับไปหลอมใหม่ การทำเป็นกระเบื้องเศษกระจก การทำอิฐมวลเบาจากเศษกระจก เป็นต้น แต่การนำกลับไปใช้ใหม่แต่ละวิธีมีต้นทุน และขีดจำกัด เช่น การหลอม โรงงานส่วนใหญ่อยู่ในกรุงเทพและปริมณฑล หากขยะทางไกลๆ เช่นอยู่ในภาคใต้คง

ต้องสูญเสียค่าขนส่งมากพอสมควร นอกเหนือไปจากต้นทุนเริ่มต้นในด้านเชื้อเพลิงสำหรับการหลอมเนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง  $1,500^{\circ}\text{C}$  หากสามารถกำจัดเศษกระจกเหล่านี้ได้ในส่วนภูมิภาคก็ไม่จำเป็นต้องสูญเสียค่าขนส่งที่มากมายและค่าเชื้อเพลิงในการหลอมใหม่และในปัจจุบันวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตไม่จำเป็นต้องเป็นทรายเสมอไป โดยอาจเป็นวัสดุเทียบเท่าชนิดอื่นก็ได้ หากผลการทดสอบได้ตามมาตรฐาน ASTM และหากผลการทดลองผสมเศษกระจกแทนมวลรวมละเอียดมีสมบัติดีกว่าหรือเทียบเท่าคอนกรีตทั่วไป คงเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและทำให้มีทางเลือกวัสดุทดแทนวัสดุธรรมชาติเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มอยู่หลายจังหวัดในประเทศไทย และมีผลผลิตต่อปี 10,776,848 ในปี 2554 [13] ดังนั้นจึงมีปริมาณเถาปาล์มน้ำมันที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้เฉลี่ยประมาณร้อยละ 5 ของผลผลิตประมาณ 500,000 ตันต่อปี ทิ้งออกจากระบวนการผลิตมากมาย หลายปีที่ผ่านมานักวิจัยได้วิจัยเถาปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน Awal and Hussin [14] ศึกษาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์จากผลกระทบของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา พบว่าการใช้เถาปาล์มน้ำมันช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้มากตามการแทนที่ที่มากขึ้น จักกฤษณ์ [15] ได้ใช้เศษขวดแก้วใสเป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตผสมเถาชานอ้อยพบว่าสามารถใช้เศษขวดแก้วใสเป็นมวลรวมหยาบได้ Ismail and AL Hashmi [16] ศึกษาสมบัติทางกำลังและการต้านทานปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา พบว่าสามารถใช้เศษแก้วแทนที่ทรายได้ถึง 66% และยังให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติที่ 28 วัน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำเอาเศษกระจกโพลด สีเขียว สีน้ำตาลและสีใส มาทำเป็นมวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์และผสมเถาปาล์มน้ำมันแทนที่บางส่วนปูนซีเมนต์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและสมบัติของมอร์ตาร์ในอายุบ่มต่างๆ อันเป็นทางเลือกหนึ่งในงานคอนกรีตที่นำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดต้นทุนการผลิตมอร์ตาร์จนถึงต้นทุนการก่อสร้างและลดมลภาวะสิ่งแวดล้อมวัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมงานก่อสร้างและแนวทางสร้างสรรค์ได้ผลิตภัณฑ์นิเวศน์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาสมบัติของมวลรวมที่ได้มาจากเศษกระจก
- 2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ผสมมวลรวมเศษกระจกกับเถาปาล์มน้ำมันเป็นตัวประสานในคอนกรีต
- 3) ศึกษาความต้านทานปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาและความคงทนต่อการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถาปาล์มน้ำมันที่ใช้มวลรวมเศษกระจก

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้มวลรวมละเอียดแบ่งเป็น 4 ชนิด คือ ทรายแม่น้ำ และ เศษกระจกโฟลต 3 สี บด แล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 หลอมอร์ตาร์ที่ผสมเข้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด 45 ไมครอนแทนที่ปูนซีเมนต์ 10 20 และ 30 ถอดแบบที่อายุ 1 วัน นำไปป้อมในน้ำสะอาดมีอายุ 7 28 และ 56 วัน ทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น กำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง ความยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาและความต้านทาน สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การแทรกซึมผ่านประจุคลอไรด์ วิเคราะห์ชนิดและปริมาณแร่ด้วย วิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และตรวจโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพิ่มมูลค่าและลดมลภาวะสิ่งแวดล้อม จากวัสดุที่เหลือทิ้งในอุตสาหกรรมงาน ก่อสร้างและอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน
- 2) เป็นแนวทางในการนำวัสดุที่เหลือทิ้งในอุตสาหกรรมก่อสร้างงานกระจกมา ประยุกต์ในงานเทคโนโลยีคอนกรีต
- 3) ลดมลภาวะการหลอมและพื้นที่ฝังกลบขยะแก้ว

### 1.5. สมบัติของปูนซีเมนต์

#### 1.5.1 การก่อตัวและแข็งตัว

ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นผงละเอียด สามารถเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)” ทำให้มีสมบัติในการรับแรงได้ ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ จะก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวและสามารถลื่นไหลได้ในช่วงเวลาหนึ่ง โดยจะเรียกช่วงเวลาที่สมบัติของซีเมนต์เพสต์ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า “ช่วงสงบ (Dormant Period)” หลังจากนั้น ซีเมนต์เพสต์จะเริ่มจับตัว (Stiff) ถึงแม้ว่าจะยังนิ่มอยู่ แต่ก็จะไม่สามารถไหลตัวได้อีกแล้ว (Unworkable) จุดนี้จะเป็นจุดที่เรียกกันว่า การเริ่มก่อตัว (Initial Set) และระยะเวลาตั้งแต่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดนี้เรียกว่า “เวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time)” การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนถึงจุดที่เป็น

ของแข็งที่แกร่ง (Rigid Solid) ซึ่งจะเรียกว่า การก่อตัวครั้งสุดท้าย (Final Set) และเวลาที่ใช้จนถึงจุดดังกล่าวเรียกว่า เวลาในการก่อตัวครั้งสุดท้าย (Final Setting Time) ซีเมนต์เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป จนกระทั่งสามารถรับน้ำหนักได้กระบวนการทั้งหมดนี้เรียกว่า “การก่อตัวและการแข็งตัว (Setting and Hardening)”

### 1.5.2 ปฏิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เกิดจากปฏิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ใน 2 ลักษณะ ดังนี้คือ

1. ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิดไอออน (Ions) ในสารละลายและไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2. การเกิดปฏิริยาระหว่างของแข็งปฏิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิริยาประเภทนี้เรียกว่า “ปฏิริยาสถานะของแข็ง (Solid State Reaction)”

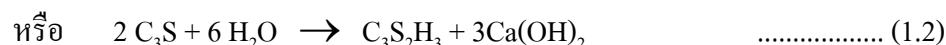
ปฏิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิริยาระหว่างของแข็ง

ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิริยาต่อไป ทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้จะแยกพิจารณาปฏิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์มีดังนี้

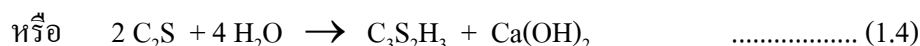
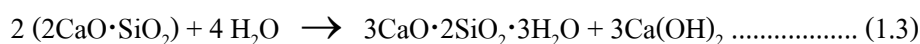
- ปฏิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$  และ  $C_2S$ )

แคลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิริยากับน้ำก่อให้เกิด “แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ )” ประมาณ 15-25% และสารประกอบ “แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ  $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$  หรือ  $C_3S_2H_3$  หรือ CSH)” ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรงดังสมการต่อไปนี้

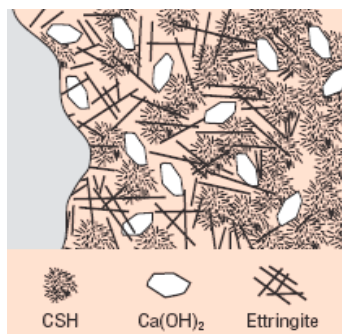
สมการของ  $C_3S$



สมการของ  $C_2S$



จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิดเจล (Gel) ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (รูปที่ 1.1)



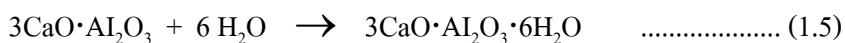
รูปที่ 1.1 แผนภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต  
ที่มา: ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน (เครื่องซีเมนต์ไทย, 2548) [17]

นอกจากนี้  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นด่างมาก คือ มี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

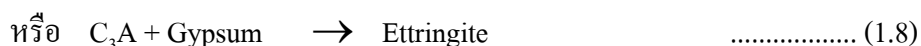
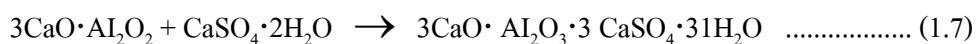
- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ )

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  จะเกิดทันทีทันใดและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ  $\text{C}_3\text{A}$



เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  ไม่ให้เกิดเร็วเกินไป ยิปซัมที่ใส่จะทำปฏิกิริยากับ  $\text{C}_3\text{A}$  ทำให้เกิดชั้นของแอดตริงไต์ (Ettringite) บนผิวของอนุภาค  $\text{C}_3\text{A}$  ดังสมการต่อไปนี้

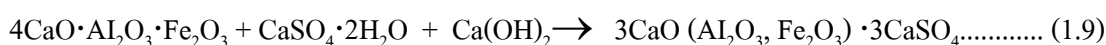


ชั้นของแอสตริงไคต์ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ  $C_3A$  และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  และ  $C_3A$  เป็นส่วนใหญ่ จะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของแอสตริงไคต์แตกออก และ เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิดแอสตริงไคต์ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างไรไปจนกระทั่งไอออนซัลเฟตมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดแอสตริงไคต์ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  โดยเปลี่ยนแอสตริงไคต์ไปเป็น โมโนซัลเฟต (Monosulphate )

- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ )

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_4AF$  นี้ จะเกิดในช่วงต้นโดย  $C_4AF$  จะทำปฏิกิริยากับ ยิปซัม และ  $Ca(OH)_2$  ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphosluminate และ Sulphoferrite ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ  $C_4AF$



### 1.5.3 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยรวมของสารประกอบทั้ง 4 นั้น จะเกิดวุ้น CSH และแอสตริงไคต์เคลือบอยู่บนอนุภาคปูนซีเมนต์และเป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งอธิบายการเกิดช่วงสงบ อันเป็นช่วงเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่ยังคงสภาพเหลวและสามารถไหลได้ในช่วง 1-2 ชั่วโมง

เมื่อสิ้นสุดช่วงสงบจะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้นโดย CSH ที่เคลือบอยู่บนอนุภาคปูนซีเมนต์จะเกิดการแตกออกด้วยแรงดันออสโมซิส (Osmotic) ซึ่งแรงดันนี้เกิดจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนในสารละลายที่อยู่ระหว่างวุ้นกับอนุภาคปูนซีเมนต์และไอออนในสารละลายที่อยู่รอบๆ CSH ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป

ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีขนาดใหญ่กว่าสองเท่าของปูนซีเมนต์ก่อนทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ที่ละน้อย จนเกิดผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการก่อตัวของ

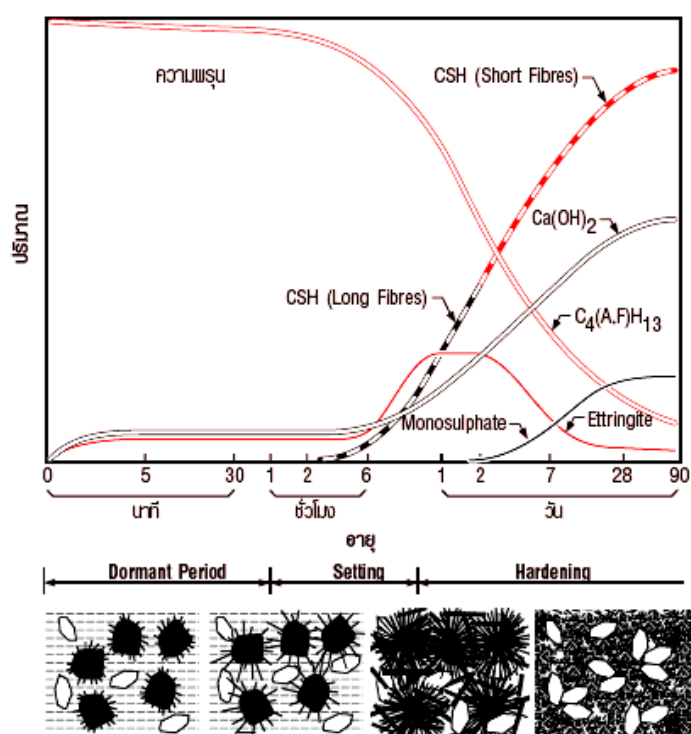


ซีเมนต์เพสต์มากขึ้น ทำให้เกิดจุดเชื่อมต่อมากขึ้น จนอนุภาคปูนซีเมนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้และกลายเป็นของเนื้อแข็งในที่สุด ซึ่งถือว่าเข้าสู่จุดการก่อตัวครั้งสุดท้าย (Final set)

จากรูปที่ 1.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ โดยอนุภาคปูนซีเมนต์จะแสดงด้วยเม็ดสีดำ ในขณะที่  $\text{Ca(OH)}_2$  จะแสดงด้วยรูปหกเหลี่ยม

แอดตริงไคต์และ CSH จะแสดงด้วยเส้นสั้นทึบและเส้นสั้นบางตามลำดับ ซึ่งในช่วงสงบ อนุภาคปูนซีเมนต์จะอยู่แยกกันและจะเกิด  $\text{Ca(OH)}_2$  และแอดตริงไคต์เป็นส่วนใหญ่ หลังจาก 1 ชั่วโมง วัน CSH จะเริ่มเกิดขึ้น โดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและการขยายตัวของ วัน CSH นี้ก่อให้เกิดการก่อตัว ในขณะที่ของแข็งมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ความพรุนของซีเมนต์เพสต์จะลดลงและกำลังเริ่มพัฒนาขึ้น

หลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้ว Sulphate Ions ถูกใช้หมดไป ออกไซด์ของอะลูมิเนียม และเหล็กเริ่มก่อตัวและแอดตริงไคต์ได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นโมโนซัลเฟตส่วน  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องได้ CSH ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้น ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งหมดนี้ จะไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของซีเมนต์เพสต์ลดลงในระยะยาว



รูปที่ 1.2 แผนภาพการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ที่มา: ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน (เครือซีเมนต์ไทย, 2548) [17]

## 1.6 มวลรวม

มวลรวม (Aggregate) คือวัสดุเนื้อที่ใช้เป็นวัสดุแทรกในคอนกรีต เช่น หิน กรวด และทราย ที่เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมมีปริมาณมากถึง 70-80% ของปริมาณคอนกรีตทั้งหมด ซึ่งมวลรวมมีความสำคัญคือ มวลรวมช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นคุณภาพของมวลรวมมีผลกระทบต่อสมบัติของคอนกรีตอย่างมาก จึงมีความจำเป็นอย่างหลีกเลี่ยงมิได้ที่จะต้องให้ความสำคัญกับมวลรวมไม่น้อยไปกว่าปูนซีเมนต์

### 1.6.1 ประเภทของมวลรวม

มวลรวมตามขนาด สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ

(1) มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) คือ หินหรือกรวดที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร (ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มวลรวมผสมคอนกรีต หรือ มอก. 566 ยอมให้มวลรวมหยาบมีส่วนที่ละเอียดกว่านี้ผสมอยู่ได้บ้าง

(2) มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) คือทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือ ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) โดยมาตรฐาน มอก. 566 ยอมให้มวลรวมละเอียดมีส่วนที่หยาบกว่านี้ผสมอยู่ได้บ้าง ทรายสำหรับผลิตคอนกรีตควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดตั้งแต่ 2.3-3.2 ส่วนที่มีขนาดเล็กกว่ามวลรวมละเอียด ซึ่งมีอยู่ปริมาณน้อยมากในมวลรวมสามารถแบ่งได้เป็น Silt มีขนาดประมาณ 0.07 มิลลิเมตร และ Clay มีขนาดอยู่ในช่วง 0.02-0.06 มิลลิเมตร

## 1.7 ปอซโซลาน (Pozzolan)

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [18] ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า ปอซโซลาน (Pozzolan) หมายถึง วัสดุที่มีซิลิกา (Silica) และอะลูมินา (Alumina) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีสมบัติของวัสดุประสานได้น้อยมากหรือไม่เลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่พอเพียงจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) สารปอซโซลานอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการนำมาใช้งาน คือ สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) เช่น หินเถ้า-

ภูเขาไฟ (Volcanic Tuff) และหินพัมมิช (Pumicite) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุปอซโซ-  
 ลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzlanas) ส่วนใหญ่คือวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัสดุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ ซิลิกาฟูม เถ้าลอย ตะกรันถลุงเหล็กบดละเอียด  
 และเถ้าจากการเกษตรกรรม เช่น เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย เป็นต้น ASTM C 618 ได้จำแนกวัสดุปอซ-  
 โซลานเป็นสามกลุ่มดังนี้ (ตารางที่ 1.1)

ตารางที่ 1.1 การจำแนกชั้นของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [18]

เกณฑ์กำหนดทางเคมี	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ไม่น้อยกว่าร้อยละ)	70	70	50
SO <sub>3</sub> (ไม่เกินร้อยละ)	4	5	5
MgO (ไม่เกินร้อยละ)	5	5	5
Na <sub>2</sub> O (ไม่เกินร้อยละ)	1.5	1.5	1.5
น้ำหนักสูญหายหลังเผาไหม้ (ไม่เกินร้อยละ)	10	12	6
ปริมาณความชื้น (ไม่เกินร้อยละ)	3	3	3
เกณฑ์กำหนดทางกายภาพ			
ความละเอียดข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ไม่เกินร้อยละ)	34	34	34
ดัชนีกำลังของปูนซีเมนต์			
7 วัน (ร้อยละไม่น้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม)	75	75	75
28 วัน (ร้อยละไม่น้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม)	75	75	75

1) Class N ได้แก่ สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ คือวัสดุที่ได้จากการปะทุ  
 ภูเขาไฟ และ หินพัมมิช เป็นต้น

2) Class F ได้แก่ สารประกอบปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) คือ  
 วัสดุที่ได้จากกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัสดุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว  
 หินดินดาน เป็นต้น

3) Class C ได้แก่ สารปอซโซลานสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการทางความร้อน  
 เช่นเดียวกับ Class F แต่มีข้อกำหนดสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งด้านกำลัง ความคงทนต่อสารเคมีจำพวกกรดหรือซัลเฟตและสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดอาจส่งผลดีต่อคอนกรีตแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุ และความละเอียดของวัสดุปอซโซลานคือปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี

### 1.7.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  หรือ C-S-H) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  หรือ C-A-H)

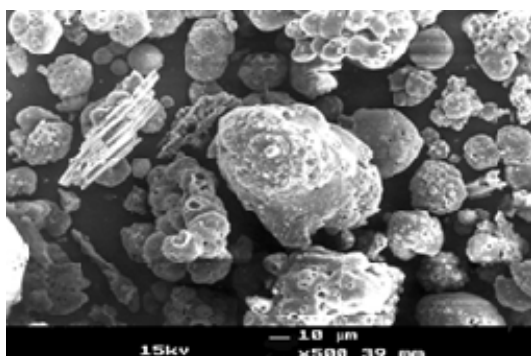
ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินาไตรออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วันและทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ

## 1.8 ถ่านปล้ำมน้ำมัน

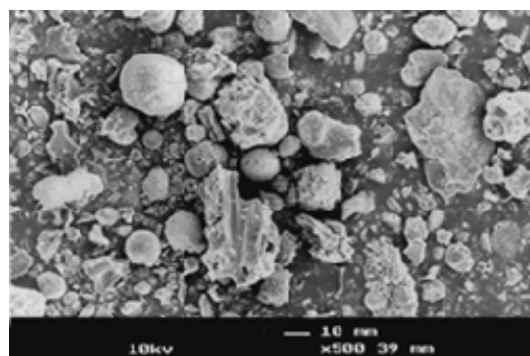
ถ่านปล้ำมน้ำมัน (Oil palm ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปล้ำมน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใยและทลายปล้ำมเปล้าของผลปล้ำม เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ  $800-900^\circ\text{C}$  หลังจากเผา ถ่านปล้ำมน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ถ่านปล้ำมน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา เช่น ปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม เป็นต้น

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันจากจังหวัดชุมพร พบว่าผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ของเถ้าปาล์มน้ำมัน มีค่าร้อยละ 70 มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ต่ำกว่าร้อยละ 5 และปริมาณ LOI ร้อยละ 10 ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง ซึ่งปริมาณ LOI ที่สูงนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมาก เพราะการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และส่งผลให้ LOI มีค่าต่ำลง ดังนั้นเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ได้ อย่างไรก็ตามยังไม่มีมาตรฐานโดยตรงในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในคอนกรีต [19]

ลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังบดแสดงในรูปที่ 3 พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีลักษณะรูปร่างโดยรวมค่อนข้างหยาบ ความพรุนสูง รูปร่างกลมมน ติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดมีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมน รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.3 ภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเถ้าปาล์มน้ำมัน (ก) ก่อนบด (ข) หลังบด [19]

### 1.8.1 ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อคอนกรีตสด

เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดและมีความพรุน การใช้เถ้าปาล์มที่ได้จากโรงงานโดยตรงจะใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้นในส่วนผสมคอนกรีตเนื่องจากการดูดน้ำของเถ้าปาล์มน้ำมัน ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มแทนที่ปูนซีเมนต์จะเป็นเช่นเดียวกับ กรณีของการใช้วัสดุปอซโซลานทั่วไป คือ จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยาวนานขึ้น กว่ากรณีของคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันประมาณ 15-20 นาที เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์

ร้อยละ 10-20 และการก่อตัวจะนานกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันประมาณ 40-60 นาทีเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30-40

Tay and Show [20] ศึกษาการใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันแทนที่ในปูนซีเมนต์ พบว่าระยะเวลาการก่อตัวอยู่ในค่าตามมาตรฐานทั้งของอังกฤษและอเมริกา และความสามารถในการเทได้ให้ผลอย่างที่น่าพอใจ และการแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถให้ค่ากำลังอัดเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อศึกษาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ดจากผลกระทบของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (Alkali-Silica Reaction) พบว่าการใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันสามารถลดการขยายตัวลงได้มากตามการแทนที่เพิ่มขึ้น และคิดว่าการใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียวทุกอัตราส่วนแทนที่

วิรัชชาติ และคณะ [21] ได้ศึกษาการแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์นานขึ้น และความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ดมากขึ้น แต่เมื่อความละเอียดของเถ้าปลาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันก่อนบดและความต้องการน้ำลดลงใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ดมาตรฐาน สำหรับมอร์ตาร์ดที่ใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันก่อนบดเป็นส่วนผสมให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ดมาตรฐาน เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่และความพรุนสูง จึงไม่เหมาะสมที่นำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน ส่วนการใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดและบดละเอียดมาก (ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.9 และ 10.1 ไมครอนตามลำดับ) เป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ดในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ดมาตรฐานที่อายุ 7 และ 28 วัน นอกจากนี้การใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดมาก (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10.1 ไมครอน) เป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ดในอัตราร้อยละ 10 และ 20 ที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ดมาตรฐานโดยเท่ากับร้อยละ 104 และ 101 ตามลำดับ แสดงว่าเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลานได้

### 1.8.2 ผลกระทบของเถ้าปลาล์มน้ำมันต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ผลกระทบของเถ้าปลาล์มน้ำมันต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าปลาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1990 โดย Tay [22] ได้ศึกษาการใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีต พบว่าเถ้าปลาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอชโซลานต่ำและคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าปลาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปลาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ ต่อมาในปี ค.ศ. 1997 Awal and Hussin [14] ได้ศึกษาการนำเถ้าปลาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน โดยบดเถ้าปลาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่า

ปูนซีเมนต์ และแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ และกำลังอัดที่ช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมได้ และยังคงทดลองอีกว่าเถ้าปาล์มช่วยลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน [23]

วันชัย และคณะ [24] ได้นำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันมาทำการบดให้ละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 2 และแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 0 ถึง 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อทำคอนกรีตกำลังสูงเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 10 ถึง 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ให้กำลังอัดเท่ากับร้อยละ 100 ถึง 113 ของคอนกรีตควบคุม และการแทนที่ร้อยละ 20 จะให้กำลังอัดสูงสุด

ธีรสิทธิ์ และคณะ [25] ได้ทำการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้ละเอียดจนมีน้ำหนักที่ข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 1 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 0 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีต พบว่าการแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดและสูงกว่าคอนกรีตควบคุมตั้งแต่ 7 วันไปแล้ว และการแทนที่ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะทำให้กำลังอัดสูงเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดี สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตได้

อภิรักษ์ และคุณพล [26] ศึกษาผลกระทบของหินฝุ่นแกรนิตและเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีต่อกำลังอัดและความคงทนต่อมอร์ตาร์ด โดยแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 10 20 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและใช้หินฝุ่นแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียดแทนทรายสมบัติของมอร์ตาร์ดที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความหนาแน่นของกำลังอัด บ่มน้ำที่ 7 และ 28 วัน และความคงทนต่อกรดพบว่ามอร์ตาร์ดผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 อายุ 28 วัน ให้มอร์ตาร์ดคล้ายกำลังอัดปกติ นอกจากนี้ยังพบว่ามอร์ตาร์ดที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น ช่วยให้ความคงทนต่อกรดเพิ่มขึ้นด้วย

## 1.9 แก้วหรือกระจก

แก้วหรือกระจกเป็นวัสดุโปร่งใส เนื้อใสสะอาด มีความเป็นมันแวววาวสุกใสเป็นสารประกอบของซิลิกากับสารโลหะออกไซด์มีลักษณะโปร่งตาและมีความเปราะในตัวเอง ตาม ASTM กล่าวว่า แก้ว คือ วัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ต่างๆ มาเผาให้ถึงจุดละลายที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเวลาเย็นตัวลงมาจะกลายเป็นของแข็งโดยไม่เป็นผลึก [27] และตรวจด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ไม่ปรากฏลายพิมพ์ระบุนิคแร่ใดได้ [28]

แก้วหรือกระจกเป็นวัสดุที่ใช้ตกแต่งภายในอาคารเพื่อความสวยงามและเพิ่มความสว่างไสวให้กับอาคารบ้านเรือนใช้กับอุตสาหกรรมยานยนต์และมีการใช้งานทั่วไปอย่างกว้างขวางวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระจกประมาณ 80% ได้มาจากแหล่งผลิตในประเทศ ได้แก่ ทรายแก้ว หินฟันม้า หินโดโลไมต์ เศษกระจกและวัตถุดิบที่นำเข้ามาจาก ต่างประเทศ ได้แก่ โซดา-แอช ผงคาร์บอน ผงเหล็ก โซเดียมซัลเฟต

กรรมวิธีการผลิตกระจกโพลิตเริ่มผลิตโดยการนำวัตถุดิบซึ่ง ได้แก่ ทรายแก้ว หินฟันม้า หินโดโลไมต์ เศษกระจก โซดาแอช หินปูนและโซเดียมซัลเฟตมาผสมเข้าด้วยกันตามอัตราส่วนที่ได้กำหนดไว้ แล้วนำส่วนผสมที่ได้นั้นไปใส่ในเตา ที่มีอุณหภูมิ 1,500°C จนวัสดุต่าง ๆ เกิดการหลอมละลายจนได้น้ำแก้ว (เชื้อเพลิงได้แก่ น้ำมันเตาซึ่งใช้แทนถ่านหิน) หลังจากนั้นจะปรับอุณหภูมิของน้ำแก้วให้เหลือประมาณ 1,100°C จนมีความหนืดพอเหมาะต่อการขึ้นรูปน้ำแก้ว จะถูกนำไป ผ่านกระบวนการที่ทำให้เป็นแผ่นโดยวิธีการปล่อยให้ไหลลงไปที่ฟอรัมตัวเป็นแผ่นกระจกบนผิวดีกระบอกแหลมกรรมวิธีนี้ จะได้ แผ่นกระจก ที่เรียกว่า กระจกโพลิต มีสมบัติดีกว่าแผ่นกระจกที่ผลิตโดยระบบอื่น ๆ คือผิวของแผ่นกระจกมีลักษณะเรียบไม่เป็นคลื่น มีความหนาสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น ผิวสุกใส แวววาว ไม่ขุ่นมัว [28]

### 1.9.1 ชนิดของแก้วหรือกระจก

การแบ่งประเภทของแก้วมีเกณฑ์แบ่งได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต แบ่งองค์ประกอบทางเคมี หรือแบ่งตามการใช้งาน แต่โดยส่วนใหญ่มักจะบอกประเภทของแก้วตามองค์ประกอบ ดังนี้

#### (1) แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime glass)

ผลิตจากวัตถุดิบหลัก คือ ทราย โซดาแอช หินปูน เป็นแก้วที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ได้แก่ แก้วที่เป็นขวด แก้วน้ำ กระจก เป็นต้น สามารถทำให้เกิดสีต่างๆ ได้โดยการเติมออกไซด์ที่มีสีลงไป



(2) แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) หรือ (Pyrex)

เป็นแก้วที่มีการเติมบอริกออกไซด์ลงไป ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำและทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อน แก้วที่ได้สามารถนำไปใช้ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ ทำภาชนะแก้วสำหรับใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น

(3) แก้วตะกั่ว (Lead glass) หรือแก้วคริสตัล

### 1.9.2 วัตถุประสงค์ในการหลอมแก้ว

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่มีผลต่อสมบัติของแก้ว ดังต่อไปนี้

$\text{SiO}_2$  แก้วที่มีปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  สูง จะทำให้แก้วนั้นมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนต่อความร้อนและสารเคมี แต่ทำการผลิตได้ยากเนื่องจากต้องใช้ในการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปและขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากมีความหนืดสูง

$\text{Na}_2\text{O}$  แก้วที่มีปริมาณ  $\text{Na}_2\text{O}$  สูงจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เพราะแตกง่ายและไม่ทนต่อสารเคมี ถ้ามีปริมาณ  $\text{Na}_2\text{O}$  สูงมากๆ จะสามารถละลายน้ำได้

$\text{K}_2\text{O}$  ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปได้ง่ายขึ้นทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

$\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  หรือ  $\text{BaO}$  จะช่วยในการขึ้นรูป ทำให้แก้วก่อตัว (set) เร็วขึ้นเมื่อเย็นลงและเพิ่มความทนต่อสารเคมี แก้วที่มีปริมาณ  $\text{MgO}$  มากกว่า  $\text{CaO}$  จะทำให้ให้การตกผลึกเป็นไปได้ง่ายขึ้น ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

$\text{Al}_2\text{O}_3$  แก้วที่มีปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  สูง ทำให้แก้วมีความทนทานต่อการสึกกร่อนและสารเคมีได้ดีขึ้น

$\text{B}_2\text{O}_3$  แก้วที่มีสารประกอบพวกโบรอน (Boron) เป็นองค์ประกอบ (Borosilicate) จะมีความคงทนต่อกรด ด่างและทนต่อความร้อนเนื่องจากจะทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง แก้วประเภทนี้เป็นแก้วที่ใช้ในอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และเป็นแก้วประเภทที่สามารถใช้ในเตาไมโครเวฟได้

$\text{PbO}$  แก้วที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ (Lead glass) เนื้อแก้วใสวยเนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูง มีความอ่อน (soft) ไม่แข็งกระด้าง ง่ายต่อการเจียรระโน เวลาเคาะมีเสียงกังวาน

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  ช่วยประหยัคเชื้อเพลิงในขณะที่หลอม แต่จะทำให้เนื้อกระจกใส มีสีค่อนข้างดำทางน้ำตาลเหลือง

ตารางที่ 1.2 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่มีผลต่อสีของแก้ว

องค์ประกอบทางเคมี	สี
โครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ))	สีเขียว
โคบอลต์ออกไซด์ (Cobalt oxide (CoO))	สีน้ำเงิน
ยูเรเนียม (Urenium (U))	สีเหลือง
นิกเกิล (Nickle (Ni))	สีน้ำตาล
คาร์บอน-กำมะถัน-เหล็ก (Carbon-Sulfur-Iron (C-S-Fe))	สีอำพัน
แมงกานีส (Manganese (Mn))	สีชมพู

ที่มา: หน่วยบริการข้อมูลวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว (GSAT) [28]

### 1.9.3 สมบัติของวัสดุแก้ว

#### 1) สมบัติทางกลของวัสดุแก้ว

(1) ความยืดหยุ่น (Elasticity) แก้วเป็นวัสดุยืดหยุ่น (elastic material) ที่สมบูรณ์แบบ คือจะไม่เปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร แต่มีความเปราะ ซึ่งหมายถึงจะแตกทันทีเมื่อได้รับความเค้น (stress) เพิ่มขึ้นโดยปราศจากการเปลี่ยนรูป

- โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus, E) เป็นค่าที่แสดงถึงแรงดึงตามทฤษฎีที่ใช้ในการทำให้แก้วยืดออกให้ยาวขึ้นเท่ากับความยาวเดิม หน่วยมีค่าเป็นแรงต่อพื้นที่ สำหรับแก้วตามมาตรฐานยุโรปจะมีค่า  $E = 7 \times 10^{10} \text{ Pa} = 70 \text{ GPa}$

- อัตราส่วนปัวซองน์ (Poisson's ratio) :  $\mu$  (lateral contraction coefficient) เมื่อวัสดุถูกดึงด้วยแรง ขนาดตามขวางของมันจะลดลงค่า  $\mu$  คือความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่ลดลงตามทิศทางที่ตั้งฉากกับแรง กับหน่วยของความเครียด (strain) ตามทิศทางของแรง สำหรับแก้วในงานก่อสร้างค่า  $\mu = 0.22$

#### (2) กำลังอัด (Compressive strength)

แก้วมีค่ากำลังอัดสูงมาก คือ  $1000 \text{ N/mm}^2$  หรือ  $1000 \text{ MPa}$  นั้นหมายถึงในการทำให้แก้วขนาด  $1 \text{ cm}^3$  แตกละเอียดลงได้ต้องให้น้ำหนักถึง 10 ตัน

#### (3) กำลังดึง (Tensile strength)

แก้วตามปกติจะมีกำลังดึงประมาณ  $40 \text{ MPa}$  และอาจทำให้เพิ่มสูงขึ้นไปถึง  $120\text{-}200 \text{ MPa}$  เมื่อผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงต่างๆ

## 2) สมบัติทางกายภาพของวัสดุแก้ว

### (1) ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของแก้วธรรมดาประมาณ 2.5 (กก./ม<sup>3</sup>) ซึ่งทำให้กระจกที่มีความหนา 1 มม. และ ขนาด 1 ตรม. มีน้ำหนัก 2.5 กก.

ตารางที่ 1.3 ความหนาแน่นรวมของแก้วแต่ละชนิด

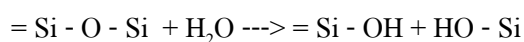
ชนิดแก้ว	ความหนาแน่น (กก./ม <sup>3</sup> )
ตะกั่วซิลิเกต (Lead silicate)	2.85-3.12
โซดาไลม์ (Soda-lime)	2.48-2.60
อลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate)	2.47-2.65
โบโรซิลิเกต (Borosilicate)	2.24-2.41
96%Silica (Vycor)	2.20

ที่มา: หน่วยบริการข้อมูลวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว (GSAT) [28]

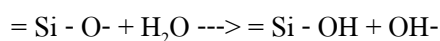
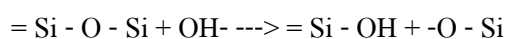
## 3) สมบัติทางเคมีของวัสดุแก้ว

เมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่นๆ เช่น โลหะและพอลิเมอร์ แก้วนับว่ามีความทนทานต่อสารเคมีมากกว่า จึงนิยมนำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามแก้วก็สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้

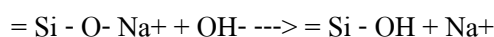
(1) ปฏิกิริยาของโครงสร้างแก้วกับความชื้น แก้วที่ทิ้งไว้นานอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีกับความชื้นได้ ดังต่อไปนี้



ปฏิกิริยาในสภาพที่เป็นด่าง จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับความชื้น

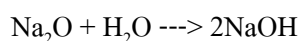


ปฏิกิริยาในสภาพที่เป็นกรด

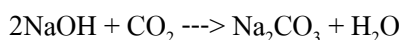


จะเห็นว่าในสภาพที่เป็นด่างจะเกิดปฏิกิริยาที่ต่อเนื่อง ซึ่งทำลายโครงสร้างของแก้วได้มากกว่าสภาพที่เป็นกรด

(2) ปฏิกิริยาของ Na<sub>2</sub>O กับความชื้น ชั้นของแก้วที่มีปริมาณ Na<sub>2</sub>O มากอาจเกิดปฏิกิริยากับความชื้นได้ง่าย ดังต่อไปนี้



NaOH ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับ CO<sub>2</sub> ในอากาศ



เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า (Blooming) โดย Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> มีลักษณะเป็นฝ้าขาวและจะหนาขึ้นเรื่อยๆ และ NaOH ซึ่งเป็นด่างจะกัดกร่อนชั้นซิลิกาด้วย การนำขวดเก่าไปล้างฝ้าขาวนี้ออกและนำไปบรรจุน้ำ อาจพบตะกอนของซิลิกาที่ก้นขวดหรือขวดที่ล้างแล้วเก็บไว้ ก็อาจพบว่ามีสารตกสะเก็ดเป็นแผ่นๆ ขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Flaking

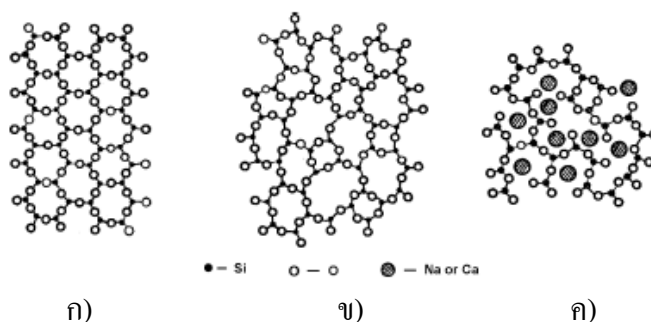
#### 1.9.4 เคมีและคุณลักษณะทางโครงสร้างของแก้ว

ตามองค์ประกอบสำคัญ แก้วสามารถจำแนกออกได้เป็น ซิลิกาเนื้อแก้วแอลคาไล-ซิลิเกต แก้วโซดาไลม์ (soda-lime glasses) แก้วโบโรซิลิเกต (borosilicate glasses) แก้วตะกั่ว แก้วเบเรียมและแก้วอะลูมิเนียมซิลิเกต สารเติมปริมาณเล็กน้อยบ่อยครั้งเติมในระหว่างการผลิตแก้วสีต่างๆ หรือ ปรับปรุงสมบัติเฉพาะ

แก้วโซดาไลม์ใช้กันแพร่หลายในบรรจุภัณฑ์จากโรงงาน กระจกธรรมดาและกระจกแผ่น ในขณะแก้ว แก้วโซดาไลม์มีมากกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก คำนึงในแง่ร้อยละ 63 เป็นซิลิกา ร้อยละ 25 ลิธา ร้อยละ 10 เป็นซิลิเนียมและร้อยละ 2 เป็นสีน้ำเงินหรือสีอื่นๆ องค์ประกอบสำคัญของแก้วเหล่านี้เหมือนกันอย่างมาก ยกเว้นแตกต่างกันเล็กน้อยของสารเติมเพื่อให้ได้สีตามต้องการ องค์ประกอบแบบฉบับของชนิดต่างกันสำหรับใช้งานแตกต่างกันได้แจ้งไว้ในตารางที่ 1.2 แก้วโซดาไลม์ประกอบด้วยประมาณ SiO<sub>2</sub> ร้อยละ 73 Na<sub>2</sub>O จำนวนร้อยละ 13-16 และ CaO ร้อยละ 10 ดังนั้นตามส่วนประกอบทางเคมี แก้วโซดาไลม์จะเป็นวัสดุประสานปอซโซลาน ชนิดแก้วที่สำคัญอันดับสองคือ แก้วตะกั่ว จากหลอดทีวีสี หลอดแสงนีออน ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามเกี่ยวข้องกับสำคัญสำหรับใช้แก้วชนิดนี้ในปูนซีเมนต์และคอนกรีตคือปริมาณตะกั่วที่มีสูงในแก้ว ซึ่งมีศักยภาพจะละลายเข้าไปในสิ่งแวดล้อม สำหรับโบโรซิลิเกตใช้กันน้อยเมื่อวัสดุหลอมเย็นตัวอย่างรวดเร็วก็ได้แก้วลายพิมพ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแก้วโซดาไลม์ไม่มีขอดีที่สามารถระบุตำแหน่งถึงสารประกอบผลึกเลย ยกเว้นทรงกลมการเลี้ยวเบนกว้าง ซึ่งถือว่าเป็นวัฏภาคแก้ว ตำแหน่งของทรงกลมการเลี้ยวเบนสัมพันธ์กับปริมาณปูนขาวและโซเดียมในแก้ว [29, 30, 31]

โครงสร้างของแก้วนั้นสามารถอธิบายโดยใช้โครงข่ายสองมิติของเททราฮีดรา SiO<sub>4</sub> แทนภาพร่างในรูปที่ 1.4 ตามทฤษฎีโครงข่ายที่เสนอโดย Zachariasen [32] ส่วนประกอบของแก้วสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มคือ (1) โครงข่ายแบบเดิม (2) โครงข่ายแบบคัดแปร และ (3) โครงข่ายทั้งสองแบบ

โครงข่ายแบบเดิมมีลักษณะจากแขนไอออนเล็ก วาเลนซีไอออนนำมาที่สุดและล้อมรอบด้วยสี่อะตอมออกซิเจน ยี่อะตอมออกซิเจนด้วยกัน แก้วเหล่านี้ก่อรูปโครงข่ายสามมิติไม่เป็นระเบียบจนถึงเตตราฮีดรา (tetrahedra) ไม่มากก็น้อย พลังงานพันธะระหว่างเหล่านี้อาจโครงข่ายกับอะตอมออกซิเจนมักสูงกว่า 335 กิโลจูล/โมล ชาติซิลิกา กับฟอสเฟตเป็นแบบฉบับโครงข่ายอยู่ในตะกอนเตาหลุงเนื้อแก้ว ตัวรูปโครงข่ายปริมาณสูงกว่าก็จะเป็นแก้วมีระดับชั้นการควบแน่นสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 1.4 โครงสร้างควอตซ์ แก้วซิลิกาและแก้วโซเดียมแคลเซียมซิลิเกต ก) โครงข่ายแบบเดิม ข) โครงข่ายตัดแปร และ ค) โครงข่ายทั้งสองแบบ [27]

โครงข่ายตัดแปรมีเลขพิกัดของ 6 หรือ 8 และมีรัศมีไอออนขนาดใหญ่ ปรากฏตัวโครงข่ายตัดแปรขาดระเบียบและไม่เป็นพอลิเมอร์โครงข่าย พลังงานพันธะระหว่างตัวโครงข่ายตัดแปรกับอะตอมออกซิเจนมักน้อยกว่า 210 กิโลจูล/โมล Na, K, Ca เป็นโครงข่ายแบบตัดแปรในตะกอนเตาหลุงเนื้อแก้วจัดเป็นแบบฉบับ

โครงข่ายทั้งสองแบบสามารถเป็นได้ทั้งโครงข่ายแบบเดิมและโครงข่ายตัดแปร Al และ Mg ในโลหะตะกอนเตาหลุงเนื้อแก้วเป็นแบบฉบับ โครงข่ายทั้งสองแบบ ตัวเลขพิกัดคือ 4 เมื่อเหล่านี้เป็นรูปโครงข่ายแบบเดิม และ 6 เป็นรูปโครงข่ายแบบตัดแปร พลังงานพันธะของอะตอมออกซิเจนอยู่ในช่วง 210 ถึง 335 กิโลจูล/โมล จากพลังงานพันธะของรูปโครงข่ายแบบเดิมและแบบตัดแปร คาดหมายว่ามีการก่อรูปโครงข่ายมากขึ้นปฏิกิริยาแก้วคดน้อยลง การมีออกซิเจนสองชนิดคือ ไอออนออกซิเจนประสานกับไม่ประสาน เหล่าไอออนออกซิเจนประสานเชื่อมโยงแบบสองโพลีฮีดราและไอออนออกซิเจนไม่ประสานเป็นแบบโพลีฮีดรอนเท่านั้น การมีไอออนออกซิเจนไม่ประสานเป็นสาเหตุให้เกิดอาณาเขตประจุบไม่สมดุล การตัดแปรโครงข่ายหรือบรรดาแคตไอออนของประจุบวกน้อยและขนาดใหญ่ อาทิเช่น  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  และ  $\text{Ca}^{2+}$  อาจอยู่ในโพรงระหว่างออกซิเจน ทำให้สมดุลแก่ประจุบเกินไปของไอออนออกซิเจนไม่ประสาน

### 1.9.5 การผลิตแก้วและวัสดุอสังฐาน

เนื่องจากวัสดุอสังฐานมีความหมายกว้างกว่าวัสดุแก้ว การผลิตวัสดุอสังฐานอาจจะไม่ต้องใช้การหลอมก็ได้จึงมีเทคนิคหรือวิธีการอื่นๆ อีก ดังนี้

(1) วิธีหลอมและชุบ (Melting and Quenching) คือ การหลอมแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการผลิตแก้วโดยทั่วไป อย่างไรก็ตามเทคนิคต่างๆ ในการขึ้นรูปแก้วในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ นั้น จะแตกต่างกันออกไป

(2) Sol-gel method คือ การใช้สารละลายของสารอนินทรีย์และตัวเร่ง ทำให้เกิดการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ โดยวิธีนี้สามารถใช้ในการฉาบผิววัสดุ การดึงเป็นเส้นใย และการผลิตฟิล์มบาง

(3) Sputtering method คือ การทำให้เกิดความต่างศักย์สูงในสุญญากาศ ทำให้เกิดไอของสารขึ้นไปทำปฏิกิริยาหรือเกาะตัวบนเป้าหมาย ซึ่งวิธีการนี้มักจะใช้ในการผลิตฟิล์มบางต่างๆ

(4) วิธีการอื่นๆ ได้แก่ วิธีการสำหรับผลิตแก้วพิเศษบางประเภท เช่น แท่งแก้ว Preform สำหรับผลิตใยแก้วนำแสง แผ่นโซล่าเซลล์ เป็นต้น

### 1.9.6 การใช้งานวัสดุแก้ว

วัสดุศาสตร์จะแบ่งชนิดของแก้วตามประเภทของการใช้งานดังต่อไปนี้

(1) แก้วในงานก่อสร้าง (Constructions) เช่น กระจกแผ่น กระจกฉนวน อิฐแก้ว เป็นต้น ต้องมีความแข็งแรง ความโปร่งใสสูง สามารถผลิตในปริมาณมากเพื่อให้คุ้มกับการลงทุน

(2) แก้วบรรจุภัณฑ์ (Containers) เช่น ขวด แก้วน้ำและภาชนะต่างๆ ควรจะมีความทนทานทางกายภาพและทางเคมีระดับในระดับหนึ่ง และควรสามารถนำกลับมาล้างใช้ใหม่อย่างน้อย 50 ครั้ง

(3) แก้วทำพิเศษ (Speciality glass) เช่น กระจกนิรภัยชนิดต่างๆ กระจกฉนวน กระจกเสริมลวด เป็นการนำกระจกแผ่นแบบโพลิตมาดัดแปลง ซึ่งจะทำให้ได้กระจกมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ มีความทนทานมากขึ้น กระจกนิรภัยจะช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากการแตกได้

(4) แก้วเครื่องประดับ ตกแต่ง (Ornaments & Figurines) เช่น แก้วคริสตัลของชำร่วยต่างๆ แก้วสลัก เจียรไน มักเป็นแก้วพวก borosilicate ซึ่งสามารถนำมาเป่าขึ้นรูปได้ง่าย หรือ แก้วผสมตะกั่ว ซึ่งจะทำให้แกะสลักและเจียรไนได้ง่าย

(5) แก้วในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics & Electrical Glass) เช่น หลอดรังสีแคโทด (Cathode-ray tubes) ตัวเก็บประจุ (capacitors) ตัวต้านทาน (resistors) ส่วนประกอบคอมพิวเตอร์และวงจรพิมพ์ เป็นต้น แก้วที่ใช้จะต้องมีค่าไดอิเล็กทริก (dielectric) ที่ดี มีการสูญเสียทางไฟฟ้าน้อยในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันสูง หน้าจอทีวี แก้วสำหรับการป้องกันการแผ่รังสี ก็ควรมีปริมาณตะกั่วที่สูง

(6) แก้วในงานทางแสง (Optical glass) เช่น หลอดไฟ ต้องมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ส่วนเลนส์ใยแก้วนำแสง ต้องใช้วัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูง

(7) แก้วในงานอื่นๆ (Other Glass) เช่น ใยแก้ว โฟมแก้ว วัสดุผสม ต้องสามารถใช้งานที่ต้องการความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อน ทนความร้อน และมีความต้านทานไฟฟ้าที่ดี ขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่จะนำไปใช้

ในแง่ของผลกระทบต่อการใช้งานนำไปใช้ในงานคอนกรีต พบว่าแก้วมี ( $\text{SiO}_2$ ) สูงเป็นผลทำให้เกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้ง่ายนี่เป็นจุดด้อย หากพิจารณาคุณสมบัติของเศษแก้วที่ไม่ได้กำจัดจะพบว่าการนำมาผสมในคอนกรีตเป็นทางเลือกหนึ่งที่ยากและประหยัดที่สุด ซึ่งอาจนำไปใช้กับโครงสร้างที่รับน้ำหนักไม่มาก เพื่อลดมลภาวะสิ่งแวดล้อมได้

### 1.9.7 การใช้ขยะแก้วเป็นมวลรวมคอนกรีต

การศึกษาศักยภาพของขยะแก้วได้ดำเนินการในปี 1960 พยายามใช้เศษขยะแก้วเป็นมวลรวมสำหรับคอนกรีตและพบว่าคอนกรีตทั้งหลายที่มีมวลรวมแก้วเกิดร้าวขึ้น [33, 34, 35, 36] ในทศวรรษที่ผ่านมา การใช้แก้วเป็นมวลรวมคอนกรีตที่ได้มาจากการศึกษาเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่พึงกลบสำหรับแก้วสูงขึ้นและกฎระเบียบทางด้านสิ่งแวดล้อม [2, 3, 4, 6, 7, 37, 38] Meyer and Baxter [38, 3] ดำเนินการศึกษาในห้องปฏิบัติการเพิ่มเติมเรื่องเศษแก้วใช้เป็นมวลรวม พบว่าส่วนผสมคอนกรีตเป็นไปได้ในการปฏิบัติผลิตมวลรวมเป็นเศษแก้วล้วน (แก้วไซขนาด 8 เมช ร้อยละ 25 แก้วสีขนาด 16 เมช ร้อยละ 25 แก้วสีขนาด 30 เมช ร้อยละ 25 และแก้วสีขนาด 50 เมช ร้อยละ 15 และแก้วสีขนาด 100 เมช ร้อยละ 10) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท III ตาม ASTM จำนวนร้อยละ 80 และดินขาวแปรร้อยละ 20 เป็นวัสดุประสานและสารลดน้ำปริมาณเล็กน้อย Chen et al. [39] ศึกษาสมบัติของคอนกรีตใส่อนุภาคขยะแก้วอิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด อนุภาคขยะแก้วอิเล็กทรอนิกส์ได้รับจากเศษชิ้นส่วนขวดแก้วอิเล็กทรอนิกส์โดยบดให้ขนาดอนุภาคเล็กลง การกระจายขนาดของอนุภาคแก้วทรงกระบอกคือ 38 ถึง 300 ไมครอน และมีประมาณร้อยละ 40

ของอนุภาคแก้วอีเล็กทรอนิกส์เล็กกว่า 150 ไมครอนตามสมบัติของคอนกรีตแข็งตัวปริมาณเศษแก้วอีเล็กทรอนิกส์พบว่าร้อยละ 40–50

Topcu and Canbaz [7] ศึกษาขยะแก้ว (waste glass) ใช้เป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีต ใส่ขยะแก้วขนาดประมาณ 4-16 มม. ในสัดส่วนร้อยละ 0-60 ในผลิตภัณฑ์ คอนกรีตชนิด PKC/B 32.5R ศึกษาผลกระทบของขยะแก้วมีผลต่อความสามารถในการเทได้และกำลังของคอนกรีต และเมื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง ผลของการศึกษานี้ ปรากฏว่าขยะแก้วไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต และทำให้ค่ากำลังลดลงมาเล็กน้อย ขยะแก้วอย่างเดียวไม่สามารถต้านทานปฏิกิริยาแอลคาไลได้ สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนพบว่าทำให้คอนกรีตมีต้นทุนต่ำ ส่วนการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีความเห็นว่า ควรนำขยะแก้วไปใช้เป็นมวลสารรวมหยาบในการผสมคอนกรีต ซึ่งจะช่วยให้ลดต้นทุนได้และประหยัดพลังงาน

#### 1.9.8 ผลกระทบของมวลรวมแก้วที่มีต่อสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีต

แก้วที่ใช้แล้วได้นำกลับมาใช้จากการล้างบรรจุภัณฑ์อีกครั้งในปริมาณมาก และมีส่วนน้อยใช้ในวัตถุประสงค์อื่นๆ เช่น มวลรวมคอนกรีต อย่างไรก็ตามก็ยังมีอัตราส่วนหนึ่งซึ่งไม่ได้ตามเกณฑ์สำหรับแก้วบรรจุภัณฑ์ ส่งไปฝังกลบ ทำให้สูญเสียพื้นที่ที่น่าสามารถนำไปใช้ทำประโยชน์ได้กว่านี้ Corinaldesi et al. [40] ศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายละเอียดด้วยแก้วบดปริมาณร้อยละ 30–70 สังเกตว่าตรวจไม่พบผลเสียหายในระดับมหภาค อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์เพสต์กับขยะแก้วบดละเอียดที่ขนาดอนุภาคถึง 100 ไมครอน แต่กลับพบว่าพฤติกรรมเชิงกลของมอร์ตาร์ได้ปรับปรุงดีขึ้นอย่างมาก อันเนื่องจากการได้รับแรงบดของขยะแก้วต่อสมบัติโครงสร้างจุลภาค การใช้ขยะแก้วเป็นมวลรวมไม่ได้มีผลกระทบปรากฏชัดต่อความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต แต่ได้ลดการยุบตัว ปริมาณโพรงอากาศและหน่วยน้ำหนักสด [7, 39] คอนกรีตมีมวลรวมแก้วควรจะกำหนดปริมาณน้ำสูงกว่ามวลรวมทั่วไปถึงได้ความสามารถในการเทได้ที่เท่าเทียมกัน [4] กำลังอัด กำลังค้ำและกำลังดึงในทางอ้อม เช่นเดียวกับความแข็งแรงลดลงในอัตราส่วนเพิ่มมวลรวมขยะแก้ว สังเกตว่ากำลังลดลงเมื่อปริมาณแก้วมากกว่าร้อยละ 20 [8] Terro [41] ศึกษาผลกระทบจากการแทนที่มวลรวมละเอียดและหยาบด้วยแก้วนำกลับมาใช้ใหม่มีต่อสมบัติของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สดและแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องและสูงขึ้น ผลระบุว่ากำลังอัดของคอนกรีตใส่แก้วนำกลับมาใช้ลดลงจนถึงร้อยละ 20 จากค่าเดิม พร้อมกับอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 700°C โดยทั่วไปคอนกรีตแทนที่มวลรวมร้อยละ 10 มีผลกระทบของการแทนที่มวลรวมละเอียดและหยาบด้วยแก้วนำกลับมาใช้ใหม่ต่อสมบัติของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สดและแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องและสูงขึ้น ขยะแก้วหยาบและผสม



รวมกับขยะแก้วละเอียดมีสมบัติในสถานะสดและแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องและสูงขึ้นดีกว่าการแทนมากขึ้น คอนกรีตทำด้วยมวลรวมขยะแก้วละเอียดมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตทำด้วยขยะแก้วหยาบ และคอนกรีตขยะแก้วละเอียดผสมกับหยาบที่อุณหภูมิห้องและสูงขึ้น การทดสอบความคงทนต่อความเย็นเยือกและละลายตาม ASTM C666 [42] ชนิดความคงทนของคอนกรีตที่มีมวลรวมแก้วไม่น่าดีกว่าคอนกรีตปกติควบคุม [4] อย่างไรก็ตามมีความสำคัญเกี่ยวข้องแก่การใช้ขยะแก้วเป็นมวลรวมคอนกรีตคือ การขยายตัวและเกิดรอยร้าวขึ้น ซึ่งจะได้อภิปรายในรายละเอียดหัวข้อถัดไป

ปริมาณของขยะแก้วที่มากขึ้นในแต่ละปีจากผลพวงของอุตสาหกรรม และมีมาตรฐานในการปรับปรุงขยะแก้วไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้แต่ปัญหาที่น่าวิตกกังวลก็คือ ขยะเป็นพิษต่อธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม Park et al. [43] ศึกษาสาเหตุของความเป็นไปได้ของการนำแก้วกลับมาใช้ จากขวดแก้วสีเขียวมรกต ฟลินต์มาผสมเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีต การทดสอบของคอนกรีตสดแสดงทั้งค่าการยุบตัวและรูปทรงเมื่อบรรจุรูปเหลี่ยมและช่องว่างของอากาศ ซึ่งมีขนาดเล็กมากในขยะแก้ว ส่วนด้านกำลังอัด แรงดึง และกำลังดึงแตกแยก มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มของขยะแก้วลงไป ผลลัพธ์ของการศึกษานี้พบว่า ขยะแก้วเมื่อผสมลงไปน้อยกว่าร้อยละ 30 ในคอนกรีต จะใช้เวลาในการประสานนานขึ้นร้อยละ 10 ใน SBR และเมื่อผสมขยะแก้วน้อยกว่าร้อยละ 30 ทำให้ความสามารถในการเทติและโพรงอากาศลดลงด้วย

### 1.9.9 การขยายตัวของมอร์ต้าร์และคอนกรีตที่ใส่มวลรวมแก้ว

แก้วไม่เสถียรในสภาพแวดล้อมแอลคาไลของคอนกรีตและเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาความเสียหายจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (ASR) การขยายตัวและการร้าวของคอนกรีตที่มีมวลรวมแก้วทราบกันมานานนับทศวรรษ Shayan and Xu (2004) [44] ได้ใช้สมบัตินี้ให้เป็นประโยชน์ด้วยการบดเป็นผงแก้วละเอียดสำหรับผสมรวมในคอนกรีตเป็นวัสดุพอซโซลาน ในห้องทดสอบสามารถยับยั้งสภาพปฏิกิริยาแอลคาไลของอนุภาคแก้วหยาบเช่นเดียวกับมวลรวมทำปฏิกิริยาตามธรรมชาติ ผลดำเนินงานได้ผลปฏิกิริยาพอซโซลานในคอนกรีตและสามารถแทนที่ได้ถึงร้อยละ 30 ของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตบางชนิดที่พัฒนากำลังได้อย่างน่าพอใจ การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใส่ผงแก้วละเอียดยอมรับได้ การทำแก้วสังเคราะห์ขึ้นมาได้แสดงว่าแก้วซิลิกาของโซเดียมและโพแทสเซียมการขยายตัวมากแม้ในมอร์ต้าร์ทำมาจากปูนซีเมนต์ที่มีอะลูมินาสูงและปูนปลาสเตอร์ยิปซัมที่มีปริมาณแอลคาไลต่ำมากก็ตาม [44] แห่งทดสอบการขยายตัวขึ้นกับสีของแก้ว ยกตัวอย่างแก้วโซดาโลมใส่ทำปฏิกิริยาได้มากที่สุด ตามด้วยแก้วสีชาแก้วสีเขียวมรกต อันเป็นสาเหตุให้การขยายตัวมากขึ้น [2] Bazant et al. [36, 5] ลองทำแบบจำลองปริมาตรการขยายตัวและกำลังของคอนกรีตที่ใส่อนุภาคขยะแก้วแตกต่างกัน ความจริงแล้วการใช้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแอลคาไลต่ำไม่ได้ลดการขยายตัวของคอนกรีตทำด้วยเศษขยะแก้วผสม [2] ในแง่กลับกันพวกคล้ายแก้วใสเทียมและตะกั่วไม่ขยายตัวภายใต้สภาวะการทดสอบคล้ายกัน [33] แก้วสีต่างกันมีผลต่อการขยายตัวของคอนกรีต จากการศึกษาที่มหาวิทยาลัยโคลัมเบีย ในสหรัฐอเมริกา [38, 46] ระบุว่า  $Cr_2O_3$  ในแก้วสีเขียวมรกตสามารถยับยั้งการขยายตัวของคอนกรีตที่ใส่มวลรวมแก้ว อย่างไรก็ตามการศึกษานี้มหาวิทยาลัยเซฟฟิลด์ในอังกฤษ [47] พบว่าไม่มีความแตกต่างในแก้วสีเขียวมรกต เหลืองและฟลินต์ ดังนั้นขนาดของมวลรวมแก้วยังมีผลต่ออัตราและค่าการขยายตัว อย่างไรก็ตามผลการศึกษานี้มหาวิทยาลัยโคลัมเบีย [38, 46] ก็ยังได้ผลต่างไปจากของมหาวิทยาลัยเซฟฟิลด์ [47] ในอดีตพบว่าขนาดไม่ดีสำหรับแก้วโซดาไลม์ (ฟลินต์) สีใส แก้วไพเร็กซ์ (Pyrex glass) และ ซิลิกาที่หลอมละลายคือ 1.18 มม. 150 ไมครอน และ 75 ไมครอนตามลำดับ ในขณะที่การศึกษาต่อมาให้ช่วงขนาดของมวลรวมแก้วต่างกันขึ้นมาถึง 12 มม. และพบว่า การขยายตัวเพิ่มขึ้นพร้อมกับขนาดมวลรวมแก้วเพิ่มขึ้น ได้พยายามต่างกันทำให้ลดหรือกำจัดการขยายตัวของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตใส่มวลรวมแก้ว ถ้ามีรูพรุนทำให้ปฏิกิริยาการขยายตัวส่งผลให้การซึมผ่านในรูพรุนหรืออ่อนคลายความดันการขยายตัว จะลดลงหรือกำจัดการขยายตัว ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการระบุว่า การกักอากาศหรือใส่มวลรวมน้ำหนักเบาเนื้อพรุนเป็นวิธีการมีประสิทธิภาพที่ลดหรือกำจัดการขยายตัว Meyer and Baxter [3] พบว่าการให้สารกักอากาศช่วยลดการขยายตัวได้ประมาณร้อยละ 50 ในการศึกษาอื่นอีกพบว่าเมื่อปริมาตรของหินดินดานที่ขยายตัวมากกว่าร้อยละ 60 ของปริมาตรมวลรวมทั้งหมด การขยายตัวของก้อนตัวอย่างลดลงอย่างมากและลดลงต่ำกว่าขีดจำกัดการขยายตัวที่อันตรายมาก [48] ในความเป็นจริงพบว่าก้อนตัวอย่างไม่ได้ขยายตัวทั้งหมดเมื่อใช้แก้วเนื้อพรุนเป็นมวลรวมคอนกรีต [49] มวลรวมเนื้อพรุนจึงขึ้นชื่อว่าสามารถบรรเทาการขยายตัวอันเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยามวลรวมแอลคาไล [50] วัสดุประสานเพิ่มเติม อาทิเช่น ตะกรันเตาถลุงบดละเอียด (ground blast furnace slag) เถ้าลอย (fly ash) เขม่าซิลิกา (silica fume) และ ดินขาวแปร (metakaolin) มักใช้ลดหรือกำจัดการปฏิกิริยาแอลคาไล การศึกษาในห้องปฏิบัติการ [38, 46, 47] ได้ระบุว่า การใช้วัสดุเหล่านี้ก็สามารถลดการขยายตัวของคอนกรีตที่ใส่มวลรวมแก้ว ซึ่งประสิทธิภาพจะขึ้นกับคุณลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุ ได้มีการพิสูจน์ว่าดินขาวแปรเป็นวัสดุมีประสิทธิภาพสูงสุด [38, 46, 47]

Tonnayopas and Thanawisitsawas [51] ได้บดแก้วละเอียดกว่า 45 ไมครอน ผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมันผสมในมอร์ตาร์พบว่าลดการขยายตัว Idir et al. [52] ได้ใช้แก้วอนุภาคละเอียดและมวลรวมแก้วในมอร์ตาร์ ทั้งแยกกันและผสมรวมกัน ศึกษาปัจจัยทั้งสองยึดถือตามการทดสอบมาตรฐาน การประเมินปอซโซลานโดยทดสอบเชิงกลต่อตัวอย่างมอร์ตาร์และลักษณะมวลรวมทำปฏิกิริยาแอลคาไล และประเมินตัวยับยั้งละเอียดโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงมิติ บันทึกพบว่าไม่มี

ความจำเป็นใช้แก้วละเอียดเนื่องจากไม่มีการบวมตัวอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาเมื่อขนาดเม็ดแก้วเล็กกว่า 1 มม. นอกจากนี้ผงแก้วละเอียดมีพื้นที่ผิวจำเพาะในช่วง 180-540  $\text{m}^2/\text{กก}$ . ลดการขยายตัวของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาที่กระทำต่อมอร์ตาร์ โดยเฉพาะเมื่อใช้มวลรวมแก้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 1 มม.

Tan and Du [53] ศึกษา มอร์ตาร์ ทำด้วยขยะแก้วเป็นมวลรวมละเอียดเพื่อใช้ให้เหมาะสมสำหรับการก่อสร้าง ส่วนผสมมอร์ตาร์อ้างอิงตาม ASTM C 109 และมวลรวมละเอียดได้แทนด้วยอนุภาคแก้วร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ศึกษาผลกระทบต่อสมบัติของมอร์ตาร์ ในแต่ละส่วนผสมของทรายจากแก้วใช้ด้วยกันสี่ชนิด ได้แก่ แก้วสีชา แก้วสีเขียว มรกต แก้วใส และแก้วผสม ผลการทดสอบระบุว่า การใช้อนุภาคขยะแก้วเป็นมวลรวมละเอียดได้ลดสภาพการไหลและความหนาแน่นของมอร์ตาร์ แต่โพรงอากาศเพิ่มขึ้น ยกเว้นการหดตัวแบบแห้งและสมบัติเชิงกลอันเนื่องมาจากรอยร้าวขนาดจุลในทรายทำจากแก้ว และแรงยึดเหนี่ยวกับซีเมนต์เพสต์อ่อนตัวลง อย่างไรก็ตามสภาพความคงทนเพิ่มพูน โดยเฉพาะในรูปความต้านทานต่อการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ การทดสอบแท่งมอร์ตาร์แบบเร่งตาม ASTM C 1260 บ่งว่า แก้วสีเขียวมรกตและสีชาไม่ทำปฏิกิริยาในขณะที่แก้วสีส้มแฉวโน้มเสียหายจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

### 1.9.10 กลไกการขยายตัวของคอนกรีตใต้มวลรวมแก้ว

ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (ASR) เป็นสาเหตุหนึ่งในแนวหน้าที่ทำความเสียหายแก่คอนกรีตไปทั่วโลก และผลต่อส่วนประกอบโครงสร้างและไม่ใช่โครงสร้าง จึงได้มีการวิจัยอย่างเข้มแข็งตั้งแต่ในปลายปี 1930 ปฏิกิริยาเกิดความเสียหายนี้ยังไม่เข้าใจแจ่มชัดหรือมาตรการป้องกันที่ลดความเสี่ยงของ ASR ได้มีการอภิปรายขาดความเข้าใจชัดเจนเกี่ยวกับวัสดุประสานเสริมอย่างไร โดยเฉพาะถ้าลดย ขอบเขตการคุกคามของปฏิกิริยา เหตุผลประการหนึ่งเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ถ้าลยจำนวนหนึ่งในคอนกรีตทำให้เป็นปริมาณแอลคาไลของถ้าลย เพราะมีแนะนำไว้เพียงเล็กน้อยและไม่มีการทดสอบมาตรฐานที่วัดได้อย่างแม่นยำการให้แอลคาไลจากในถ้าลยใส่เข้าไปในส่วนผสมคอนกรีตจริง ว่าถ้าลยมากเท่าใดควรหลีกเลี่ยง นักวิจัยบางคนได้พยายามใช้ทฤษฎีปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาแบบเดิมมาอธิบายการขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมขยะแก้วเป็นมวลรวมปรากฏการณ์ขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมขยะแก้วเป็นมวลรวมจากงานที่ตีพิมพ์แตกต่างกันจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาแบบเดิม Figg [45] สังเกตความแตกต่างระหว่างการขยายตัวปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาแบบเดิมกับการขยายตัวอันมีสาเหตุมาจากมวลรวมแก้ว รูปแบบปกติของการเกิดความดันบวมพองภายในคอนกรีตปรากฏขึ้นอันเนื่องมาจากการแปรเปลี่ยนและการอ่อนตัวลงของเม็ดมวลรวม โดยการฟุ้งกระจายเข้าไปของโลหะแอลคาไลและไอออนไฮดรอกซิล ตามมาด้วยการ

คูคกิ้นความชื้นพร้อมกับการเกิดความดันออกซิเจนผสมและการพิบัติแรงดึงขึ้นและเกิด ร้าวรอบเนื้อพื้น สังกัดได้ทั่วไปปฏิกิริยาของบรอมเมียมรวมที่มีสิ่งตกค้างของอนุภาครวม แปรเปลี่ยนและปริมาณมากของวุ้นแอลคาไลซิติเกตและผลิตผลของปฏิกิริยาวัณทุติยภูมิ รู้จักกันดี ว่าซิลิกาอสัณฐานสามารถกัดกร่อนได้ง่ายเมื่อพีเอชของสภาพแวดล้อมมากกว่า 12 ส่วน pH ของ สารละลาย  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่อิ่มตัวอยู่ราว 12.4 ที่  $20^\circ\text{C}$  ดังนั้น pH ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แอลคาไล ต่ำก็ยิ่งสูงพอที่กัดกร่อนแก้วโซดาไลม์ได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมค่า pH ของคอนกรีตให้อยู่ต่ำกว่า 12 เพื่อหลีกเลี่ยงคอนกรีตที่ใส่อนุภาคแก้วขนาดใหญ่ขยายตัวจนก่อให้เกิดเสียหายและแตกร้าว

Ismail and Al-Hashmi [16] ศึกษาผลกระทบของกระจกที่มีต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งการ กำจัดส่วนใหญ่ยังไม่ได้รับการเอาใจใส่เท่าที่ควร จึงยังมีบางส่วนที่ยังผลัดดันให้น้ำขยะที่เป็น ของแข็งกลับมาใช้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับงานคอนกรีต ซึ่งก็เป็นอีกทางหนึ่งที่สามารถทำได้ โดยได้ทำการศึกษาสมบัติทางกำลังและเกิดการต้านปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ผลการวิเคราะห์ เศษกระจกบรอมเมียม ในปริมาณ 80 กก. แทนที่ลงไปนทรายร้อยละ 10 15 และ 20 ในส่วนผสม คอนกรีต 900 กก. ผลที่ได้หลังจากบ่ม 28 วัน คิดเป็นร้อยละ 80 ส่วนแรงดึงและกำลังอัดที่มี ส่วนผสมของเศษกระจกร้อยละ 20 เทียบเป็นร้อยละ 10.99 และ 4.23 ของกำลังแรงดึงและแรงอัด สูงกว่าคอนกรีตปกติที่ 28 วัน แท่งคอนกรีตที่ทดสอบจากเศษแก้วจะช่วยให้การลดทรายได้ถึง ร้อยละ 66 เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ

ในปี 2013 Du and Tan [52] ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแก้ว สี ขนาดอนุภาคที่มี ต่อการขยายตัว ASR ของมอร์ตาร์ โดยวิธีแท่งมอร์ตาร์แบบแรง ได้ศึกษาสองวิธีในควบคุมการ ขยายตัว ASR สำหรับมอร์ตาร์ทรายทำจากแก้วสีเขียวมรกต สีชาและสีใส วิธีที่หนึ่งโดยแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยสารปอซโซลาน คือ เถ้าลอยร้อยละ 30 ตะกรันเตาสูงร้อยละ 60 เขม่าซิลิการ้อยละ 10 หรือผงแก้วร้อยละ 20 วิธีสองโดยเติมสารยับยั้ง ได้แก่ ไยเหล็กเต็มที และลิเทียมคลอไรด์ และ สารประกอบลิเทียมคาร์บอเนต ผลการทดสอบแสดงว่าการขยายตัว ASR เพิ่มขึ้นตามปริมาณแก้ว สูงขึ้น ในกรณีมอร์ตาร์ใส่ทรายทำจากแก้วใส แต่ลดลงตามปริมาณเพิ่มขึ้นสำหรับมอร์ตาร์ใส่ทราย ทำจากแก้วสีเขียวมรกตและสีชา การขยายตัว ASR ยังลดลงตามขนาดอนุภาคแก้วเล็กน้อยไม่ว่าสี ใดๆก็ตาม เถ้าลอยและตะกรันเตาสูงมีผลกระทบมากที่สุดแก่การบรรเทาการขยายตัว ASR ตาม ด้วยเขม่าซิลิกา ไยเหล็กและสารประกอบลิเทียม

Kou and Poon [53] ศึกษาผลกระทบของแก้วนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled glass, RG) ที่ผ่านการคัดเลือกตามสมบัติของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตนเอง (Self-compacting concrete, SCC) ในขณะที่ยังเหลวและแข็งตัวแล้ว มีการใช้แก้วนำกลับมาใช้ใหม่แทนที่ทรายแม่น้ำ (อัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30) และหิน (ร้อยละ 5 10 และ 15) ในการผสมคอนกรีตอัดแน่นด้วย

ตัวเอง (SCC) และมีการใช้เกลือผสมเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (Alkali-Silica) ผลของการทดลอง แสดงค่าการไหลผ่าน ส่วนปริมาณของอากาศของ RG – SCC จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อผสม RG เพิ่มขึ้น ส่วนค่ากำลังอัด กำลังดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการซึมผ่านคลอไรด์ของ RG-SCC จะเพิ่มขึ้นอีก เมื่อมีการเพิ่มแก้วนำกลับมาใช้ใหม่จากผลการทดลอง การเลือกผสมที่ผสม SCC กับ RG มีผลลัพธ์ ที่ดีสำหรับการนำไปใช้

คุณสมบัติของขยะแก้วในคอนกรีตสามารถเป็นสาเหตุแห่งการแตกร้าวและพังง่ายเนื่องจากการขยายตัวโดยปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (ASR) Park and Lee [55] ได้วิเคราะห์การขยายตัว ASR และสมบัติอื่นๆ ของกำลังในพจน์ของปริมาณขยะแก้ว สีแก้ว (ชาและเขียวมรกต) โย (โยเหล็ก โยโพลีโพรพิลีน) และปริมาณโย คาดว่าลดการขยายตัว ASR ผลทดสอบแสดงว่าขยะแก้วสีเขียวมรกตเหมาะสมกว่าสีชาเพราะการขยายตัวน้อยกว่าแก้วสีชา ใช้การทดสอบแบบเร่งของ ASTM C 1260 กับขยะแก้ว ไม่พบปริมาณความเสียหายขึ้น นอกเหนือไปจากนี้เมื่อเส้นโยและขยะแก้วรวมกัน มีผลต่อการลดของการขยายตัวและสูญเสียกำลังเนื่องจาก ASR ระหว่างแอลคาไลในซีเมนต์เพสต์กับซิลิกาในขยะแก้ว โดยเฉพาะเมื่อเติมโยเหล็กร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรแก่คอนกรีตที่มีขยะแก้วร้อยละ 20 ลดอัตราส่วนการขยายตัวได้ร้อยละ 40 และกำลังอัดเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 110 การปรับปรุงสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขยะแก้วอย่างเดียวเท่านั้น (บ่มด้วยน้ำร้อน 80°C )

### 1.9.11 การทำมวลรวมน้ำหนักเบาด้วยเศษแก้ว

การทำมวลรวมน้ำหนักเบาด้วยการผสมเกลือกับแก้วให้หลอมพนักอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิระหว่าง 1040 ถึง 1120 °C ในเตาหมุน ได้หาค่าความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความแข็งแรง การหลอมพนักส่วนผสมเกลือกับขยะแก้วที่ 1120°C ได้ให้มวลรวมน้ำหนักเบาที่มีความหนาแน่นเฉลี่ย 1.35 กรัม/ซม.<sup>3</sup> การดูดซึมน้ำประมาณร้อยละ 16 และกำลังบด 7.3 เมกะพาสคัล วัตถุประสงค์สำคัญในวัสดุหลอมพนัก คือ ควอตซ์ (SiO<sub>2</sub>) แอลไบต์ (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) มอยซาไนต์ (SiC), ฮีมาไทต์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), โวลลาสโทไนต์ (CaSiO<sub>3</sub>) และไดออปไซด์ (CaMg(Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>))

### 1.9.12 แร่ผสมเพิ่มใสในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตมวลรวมทำจากแก้ว

หลายปีที่ผ่านมา นักวิจัยได้วิจัยแก้วปาล์มน้ำมันมาทำเป็นวัสดุปอซโซลาน Awal and Hussin [14] ศึกษาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์จากผลกระทบของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา พบว่าการใช้แก้วปาล์มน้ำมันช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้มากตามการแทนที่ที่มากขึ้น นอกจากนี้ จักกฤษณ์ [15] ได้ศึกษาการใช้เศษแก้วใสทำเป็นมวลรวมขยายในงานคอนกรีตผสม แก้วชานอ้อยพบว่าสามารถใช้เศษแก้วใสเป็นมวลรวมขยายได้ Ismail and AL-Hashmi [16] ศึกษา

สมบัติทางกำลังและการต้านทานปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา พบว่าสามารถใช้เศษแก้วแทนที่ทรายได้ถึงร้อยละ 66 และยังให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติที่ 28 วัน

ในปี 2009 Limbachiya [56] รายงานผลการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์ตรวจสอบการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผลิตคอนกรีตใส่ทรายทำจากแก้วที่ล้างแทนที่ทรายธรรมชาติ ผลกระทบของตัวอย่างสดีใส่แก้วร้อยละ 50 ได้ทำการทดสอบทางวิศวกรรมและความคงทนเกี่ยวข้องกับสมบัติต่างๆ และประเมินความเหมาะสมสำหรับใช้ในวงการผลิตคอนกรีตชนิดปกติ ผลทดสอบคุณสมบัติของทรายทำจากแก้วล้างแสดงว่าขยะแก้วภายหลังบรรจุของแล้ว สามารถย่อยได้ ให้สมบัติทางกายภาพของทรายทำจากแก้วที่ล้าง ตามชุดเกณฑ์กำหนดในปัจจุบันเหมาะสมกับมาตรฐานของทรายธรรมชาติสำหรับคอนกรีต พบว่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของทรายทำจากแก้วที่ล้างต่ำกว่าทรายธรรมชาติ ผลทดสอบของคอนกรีตสดแสดงถึงว่าการลดลงความสามารถการเทได้ของคอนกรีตตามการเพิ่มของอัตราส่วนทรายทำจากแก้วผสมในร้อยละ 20 ถึงแม้ว่าวัฏการยุบตัวยังอยู่ภายในกรอบยอมให้  $\pm 25$  ส่วนผสมที่มีส่วนผสมทรายทำจากแก้วล้างพบว่าการยึดเกาะกันน้อย การศึกษาสมบัติคอนกรีตที่แข็งตัวประกอบด้วย สมบัติทางวิศวกรรมรวม กำลังอัดทรงลูกบาศก์และทรงกระบอก กำลังดัด โมดูลัสยืดหยุ่น การหดตัวแบบแห้ง) และสภาพความคงทน (การดูดซึมน้ำเกลือ ปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา) แสดงว่าพฤติกรรมคล้ายคลึงกับคอนกรีตผลิตด้วยมวลรวมตามธรรมชาติกับที่ใส่ทรายทำจากแก้วถึงร้อยละ 15

ในปี 2011 Ling et al. [57] ศึกษาความเป็นไปได้ นำแก้วกลับมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ในมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์สีขาวเชิงสถาปัตยกรรม ส่วนผสมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ทั้งหมดมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ร้อยละ 0.40 เดิมสารลดน้ำแปรผันให้ส่วนผสมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์สีขาวอัดตัวเองได้ใส่แก้วที่ใช้แล้วสามารถเทได้คล่อง ดินขาวแปรใช้ผสมในส่วนผสมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์สีขาวอัดตัวเองได้ใส่แก้วที่ใช้แล้วให้ยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ผลทดสอบแสดงว่าเพิ่มปริมาณแก้วใช้แล้วปรับปรุงพฤติกรรมของความสามารถในการเทได้และการหดตัวแบบแห้ง อย่างไรก็ตามกำลังดัดและกำลังอัดค่อยลดลงเมื่อปริมาณแก้วที่ใช้แล้วเพิ่มขึ้น การผสมรวมกับดินขาวแปรบรรเทาการขยายตัวของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน ผลทดสอบทั้งหมดในภาพรวมได้พิสูจน์ว่ามีความเป็นไปได้ถึงการผลิตมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์เชิงสถาปัตยกรรมปูนปั้นโดยใช้แก้วที่ใช้แล้วร้อยละ 100 เป็นมวลรวมละเอียด

ในปี 2005 Corinaldesi et al. [58] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเศษแก้วภาชนะและรีดออนอาคารนำกลับมาใช้ใหม่เป็นมวลรวมสำหรับหล่อมอร์ตาร์และคอนกรีต ปัจจุบันวัสดุที่นำมาใช้ซ้ำชนิดนี้ยังไม่ใช้ทั่วไป เนื่องจากอันตรายของปฏิกิริยาแอลคาไล-ซิลิกากระหว่างความเป็นต่างของปูนซีเมนต์กับซิลิกาของขยะแก้ว ปฏิกิริยาการขยายตัวนี้จะอาจทำให้เกิดปัญหา

ใหญ่ของการแตกร้าว ผลตามมาส่งผลเสียมากสำหรับความทนทานของปูนและคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ข้อมูลรายงานไว้ว่าในวรรณกรรมปริทัศน์แสดงว่าหากขยะแก้วละเอียดกว่า 75 ไมครอน ปรากฏการณ์ของปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาไม่เกิดขึ้นและรับประกันความคงทนของมอร์ตาร์ ด้วยเหตุนี้ในงานนี้พิสูจน์ปฏิกิริยาเป็นไปได้ของขยะแก้วมาใช้กับซีเมนต์เพสต์ในการหล่อมอร์ตาร์ โดยการแปรผันขนาดอนุภาคของขยะแก้วบดละเอียด พบว่าขนาดอนุภาคถึง 100 ไมครอน ตรวจไม่พบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ดังนั้นระบุว่าความเป็นไปได้ของขยะแก้วที่นำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์และคอนกรีต นอกจากนี้ขยะแก้วดูเหมือนจะให้แกวบแกมมอร์ตาร์ที่มีสมบัติโครงสร้างที่ละเอียด ซึ่งยังผลให้มีการปรับปรุงการใช้งานเชิงกลที่ดีขึ้น

ในปี 2007 Lam et al. [59] นำขยะแก้วกลับมาใช้ใหม่รวมในวัสดุก่อสร้างเพราะขยะแก้วและขยะกระจกมีลักษณะที่ดูดซึมน้ำ แต่การใช้ขยะกระจกมีปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (ASR) ในการศึกษาจะประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกศึกษาปริมาณการขยายตัวของ ASR ผสมแร่เพื่อลดการขยายตัวของคอนกรีตโดยการผสมขยะแก้ว และใช้ปูนซีเมนต์ตามเกณฑ์ ASTM C 1260 (80°C, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 N) ในส่วนที่สองหล่อคอนกรีตโดยใช้สัดส่วนการผสมดีกว่าในส่วนแรกและได้ศึกษาสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กำลังอัด กำลังดึง และกำลังดัด โดยใช้ปูนซีเมนต์ 25% พบว่าการขยายตัว ASR เพียงเล็กน้อย และเมื่อทดสอบระยะบ่มน้ำ 28 วัน ที่ผสมขยะกระจกสูงกว่า 25% และมีเถ้าลอยเชื้อเพลิง (pulverized) และดินขาวแปร (metakaolin) ก็สามารถระงับการขยายตัวของ ASR ภายในข้อกำหนดแต่ต้องมีผลการทดลองอื่นๆ มายืนยันอีก เช่น การทดสอบปริซึมคอนกรีต ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดส่วนผสมที่ดี สำหรับการใช้ประโยชน์จากขยะกระจกและขยะแก้วควรมีส่วนผสมอย่างน้อยเถ้าลอย (PFA) 10% โดยน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดที่ใช้

Ozhan and Yuksel [60] ศึกษาสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์กับซีเมนต์ที่ผสมขยะแก้วในอุตสาหกรรมการผลิต ได้ศึกษาลักษณะของมอร์ตาร์เกี่ยวกับกำลังอัด ความต้านทานซัลเฟตและการซึมผ่านคลอไรด์ การต้านทานอุณหภูมิ และต้านทานปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (ASR) การเตรียมการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมขยะแก้ว โดยแทนที่ขยะแก้วในมวลรวมละเอียดแทนทรายแล้วใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground Granulated Blast-Furnace Slag, GGBFS) หรือผสมเถ้าลอย (FA) ตามมาตราส่วน ผลลัพธ์ที่ได้เมื่อมีการเพิ่มขยะแก้วขึ้นเรื่อยๆ จากการสังเกตมอร์ตาร์สูญเสียกำลังมากที่อายุบ่ม 28 วัน การสูญเสียรองอยู่ประมาณร้อยละ 10 ของการแทนที่ร้อยละ 30 เช่นเดียวกับการพิจารณาสมบัติในตัวอย่างนี้ เช่นการผสมขยะแก้วกับ GGBFS หรือ FA ทำให้การผสมเข้ากันที่มากกว่าใช้ขยะแก้วผสมมอร์ตาร์อย่างเดียว

การใช้ขี้เถ้าและเศษแก้วเป็นมวลรวมคอนกรีตมีการใช้กันอย่างกว้างขวางมากขึ้นในแต่ละวัน เนื่องจากใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ การนำของเสียกลับมาใช้ใหม่มีความสำคัญมากสำหรับการพัฒนาที่ยั่งยืน เมื่อแก้วใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์การขยายตัวและความเค้นภายในเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (ASR) ซึ่งทำให้คอนกรีตแตกและไม่ทนทานสังเกตจากรอยร้าวของคอนกรีต จึงมีความจำเป็นต้องมีสารแร่ผสมเพิ่มบางชนิดมาใช้ให้ลดรอยร้าวที่เกิดขึ้น Topcu et al. [61] ในปี 2008 จึงศึกษาหล่อแท่งมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์โดยใช้แก้วสีต่างกันสามสีคือ สีใส สีเขียวมรกต สีชา เป็นมวลรวมละเอียด ในปริมาณที่ต่างกันโดยน้ำหนักสี่สูตร และตรวจสอบผลกระทบของมวลรวมเหล่านี้ที่มีต่อ ASR ตามวิธี ASTM C 1260 นอกจากนี้เพื่อลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ จึงผสมรวมกับแร่ผสมเพิ่มเกลือร้อยละ 10 และ 20 และสารเคมีผสมเพิ่ม  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  ร้อยละ 1 และร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ และตรวจสอบผลที่มีต่อการขยายตัวเป็นที่สังเกตว่าท่ามกลางมวลรวมแก้วใส สีเขียวมรกต และสีชา มวลรวมแก้วใสเป็นสาเหตุให้มีการขยายตัวมากที่สุด นอกจากนี้การขยายตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณแก้วเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ตามผลทดสอบเห็นว่าเกลือร้อยละ 20 และ  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  ร้อยละ 2 แทนที่ตามกำหนดไว้ใน การหล่อมอร์ตาร์ ซึ่งมีค่าการขยายตัวต่ำกว่าค่าวิกฤตร้อยละ 0.2 หลังจาก ASR อย่างไรก็ตาม ประโยชน์ของสารผสมเพิ่มเหล่านี้ลดการเกิดการขยายตัวอันเนื่องจาก ASR ลง

เศษแก้วหลายสีนำกลับมาใช้เป็นวัสดุของเสียไม่สามารถนำกลับไปใช้ในอุตสาหกรรมแก้วได้อีก พิจารณาทางออกให้แก้วหลายสีนำกลับไปใช้ปริมาณมากที่สุดคือทำคอนกรีต Taha and Nounu [62] ได้ทำงานวิจัยศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่แก้วใช้ใหม่ (RGS) และผงแก้วปอซโซลาน (PGP) ผสมในคอนกรีตทำเป็นทรายและแทนที่ปูนซีเมนต์ ตามลำดับ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ตะกรันเตาถลุงโลหะบดละเอียด (GGBS) และดินขาวแปร (MK) แทนที่ปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์ และได้ศึกษาผลกระทบของ RGS ที่มีต่อพฤติกรรมและสมบัติของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุประสานต่างกัน ได้สังเกตการณ์เยี่ยมและแยกตัวอย่างร้ายแรงเมื่อทรายปกติแทนที่ด้วย RGS และสมบัติพลาสติกของคอนกรีตเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการที่มี PGP ในคอนกรีตได้เน้นสมบัติพลาสติกของคอนกรีต สังเกตไม่มีความแตกต่างอย่างนัยสำคัญในกำลังอัดของคอนกรีตที่มี RGS อยู่ในคอนกรีต ในขณะที่เกิดลดลงเฉลี่ยร้อยละ 16 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย PGP ร้อยละ 20 ผลกระทบของการใช้ประโยชน์ขี้เถ้ากลับมาใช้เป็นทรายและการแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตได้ค้นคว้าด้วยการทดสอบต่างกัน อาทิเช่น กำลังดึงแบบผ่าซีก กำลังดัด โมดูลัสยืดหยุ่นและการดูซึมน้ำ



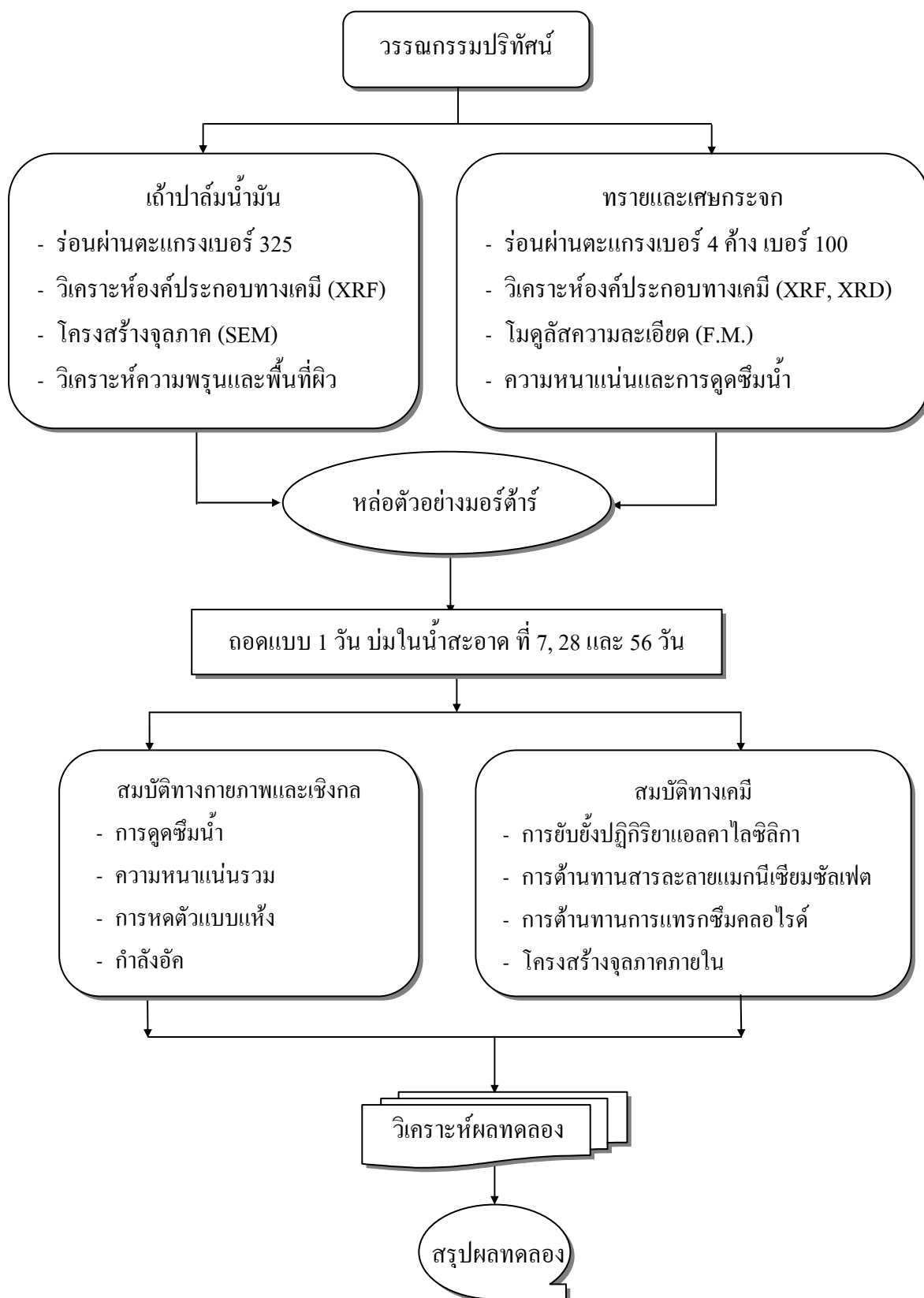
## บทที่ 2

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย การตรวจสอบตัวอย่างที่ใช้ การเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดสอบ วิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุปผล ได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 2.1

#### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่ใช้ดังในรูปที่ 2.2 (ก)
- 2) ฝ้าปลั๊กน้ำมันจาก บริษัทลำสูง (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ตำบลกะลาเส อำเภอสีเกา จังหวัดตรัง แล้วนำคัตขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 หรือ 45 ไมครอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 (ข)
- 3) ทรายใช้ทรายแม่น้ำจากบ่อทรายในท้องถิ่นบ่อพรุพ้อ ล้างสะอาด อบที่อุณหภูมิ  $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 100 (รูปที่ 2.3 ก)
- 4) เศษกระจกโพลิตจาก บริษัทหาดใหญ่เกษมจำกัด ใช้เป็นมวลรวมละเอียดโดยการนำเศษกระจกที่ตัดออกจากแผ่นใหญ่ คัดแยกตามสีล้างสะอาดอบที่อุณหภูมิ  $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาบดให้ละเอียดแล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างตะแกรงเบอร์ 100 (รูปที่ 2.3 ข-ง)
- 5) น้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำประปาสะอาด



รูปที่ 2.1 แผนผังดำเนินการศึกษามอร์ต้าร์ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้เศษกระจกเป็นมวลรวม



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 วัสดุประสาน (ก) ปูนซีเมนต์ และ (ข) ใ้่าปาล์มน้ำมัน



(ค)



(ง)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.3 มวลรวมละเอียดที่ใช้ชนิด (ก) ทรายหยาบ (ข) เศษกระจกสีเขียว (ค) เศษกระจกสีน้ำตาล และ (ง) เศษกระจกสีใส

## 2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้หล่อมอร์ต้าร์ ใช้วิธี X-ray Fluorescence Spectrometry ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence Spectrometer รุ่น PW2400, PHILIPS วิเคราะห์แร่ประกอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction-XRD) ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer รุ่น X'Pert MPD, PHILIPS วิเคราะห์โครงสร้างอนุภาคโดยถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM-5800LV, JEOL, JAPAN ส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area-SSA) และการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยลำแสงชนิดเลเซอร์ (Laser Particle Size Analysis -LPSA) รุ่น COULTER LS230

## 2.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์

อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบ ทั้งหมด 17 สูตร โดยใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ใช้มวลรวมละเอียด 5 ชนิด คือ ททราย (S) เศษกระจกสีเขียว (WGG) เศษกระจกสีน้ำตาล (WGB) เศษกระจกสีใส (WGC) และเศษกระจกผสม (WGM) โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากันทุกอัตราส่วนผสม และให้ความหมายของรหัสตัวอย่างวัสดุดังตาราง ที่ 2.1 และปริมาณอัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 2.2-2.4

ตารางที่ 2.1 ความหมายของรหัสตัวอย่างวัสดุ

รหัสตัวอย่าง	ความหมาย
OPC	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
10-OPA	เถ้าปลาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10
20-OPA	เถ้าปลาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20
30-OPA	เถ้าปลาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30
S	มวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำ
WGG	มวลรวมละเอียดเศษกระจกสีเขียว
WGB	มวลรวมละเอียดเศษกระจกสีน้ำตาล
WGC	มวลรวมละเอียดเศษกระจกสีใส
WGM	มวลรวมละเอียดเศษกระจกผสม สีเขียว สีน้ำตาลและสีใส

## 2.4 ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัว

ทดสอบความชื้นเหลวปกติ โดยใช้เครื่องมือไวแคต (Vicat Apparatus) เป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นค่ามาตรฐานในการทดสอบสมบัติอื่นๆของซีเมนต์-เพสต์ต่อไป เช่น การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ โดยพิจารณาจากการจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เป็นระยะ  $10 \pm 1$  มม. ภายในเวลา 30 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM C 187 [63]

ทดสอบระยะเวลาก่อตัว โดยทำการทดสอบทั้งระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาสิ้นสุดก่อตัวตามมาตรฐาน ASTM C 191 [64] ใช้ปริมาณน้ำคงที่ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ซึ่งการก่อตัวระยะต้น คือ ระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ภายในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลาย คือ ระยะเวลาที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้วจนเข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงในซีเมนต์เพสต์ด้วยน้ำหนักของตัวเองได้

## 2.5 การทดสอบความหนาแน่น

ใช้ก้อนตัวอย่างเดียวกับที่ใช้ทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 2.4) โดยเมื่อเอาขึ้นจากน้ำแช่ให้แห้งแล้วปล่อยให้ไว้ในอุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง อิมตัวสภาพผิวแห้งโดยวิธีการวัดมิติทั้งสามขนาดหาปริมาตรและชั่งน้ำหนัก การทดสอบอัตราส่วนละ 3 ก่อนต่ออายุการบ่มต่อชนิดเศษกระจก

## 2.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

ใช้ก้อนตัวอย่างเดียวกับการทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 2.4) โดยการชั่งน้ำหนักก่อนบ่ม แล้วเอาขึ้นจากน้ำแช่ให้แห้งแล้วปล่อยให้ไว้ในอุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง อิมตัวสภาพผิวแห้งและชั่งน้ำหนักหลังบ่ม การทดสอบอัตราส่วนละ 3 ก่อนต่ออายุการบ่มต่อชนิดเศษกระจก

## 2.7 การทดสอบกำลังอัด

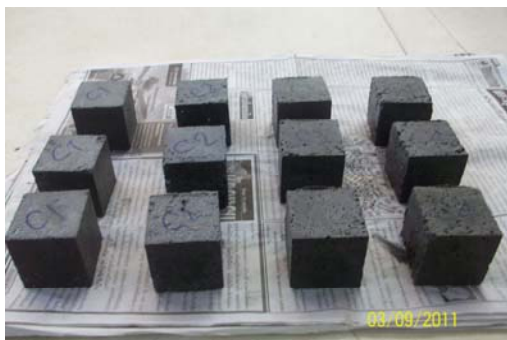
การทดสอบกำลังอัดใช้แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 [65] โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุประสานต่อมวลรวมเศษกระจกที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 2.2 โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.4 ตลอด

การทดลองทำการถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นบ่มในน้ำสะอาดและทดสอบ กำลังอัดที่อายุตั้งแต่ 1 7 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ผลค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองมาจากผลการทดสอบอย่างละ 3 ตัวอย่าง (รูปที่ 2.4)

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบกำลังอัด

รหัสตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม/ก้อน)						น้ำ
	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	เถ้าปาล์ม น้ำมัน	ทราย	เศษกระจกสี			
				เขียว	น้ำตาล	ใส	
Control	80	0	220	0	0	0	32
OPC-G	80	0	0	220	0	0	32
OPC-B	80	0	0	0	220	0	32
OPC-C	80	0	0	0	0	220	32
OPC-M	80	0	0	73.33	73.33	73.33	32
10-OPA-G	72	8	0	220	0	0	32
20-OPA-G	64	16	0	220	0	0	32
30-OPA-G	56	24	0	220	0	0	32
10-OPA-B	72	8	0	0	220	0	32
20-OPA-B	64	16	0	0	220	0	32
30-OPA-B	56	24	0	0	220	0	32
10-OPA-C	72	8	0	0	0	220	32
20-OPA-C	64	16	0	0	0	220	32
30-OPA-C	56	24	0	0	0	220	32
10-OPA-M	72	8	0	73.33	73.33	73.33	32
20-OPA-M	64	16	0	73.33	73.33	73.33	32
30-OPA-M	56	24	0	73.33	73.33	73.33	32

หมายเหตุ: w/b = 0.40



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 (ก) มอร์ต้าร์ควบคุม และ (ข) มอร์ต้าร์เศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

## 2.8 การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 596 [66] โดยการหล่อแท่งตัวอย่างขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร รูปที่ 2.5 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 2 โดยน้ำหนัก โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.4 ดังในตารางที่ 2.3 จากนั้นบ่มในน้ำสะอาดจนมีอายุครบ 48 ชั่วโมง นำแท่งทดสอบขึ้นจากน้ำ เช็ดผิวให้แห้ง วัดความยาวด้วยเครื่องเปรียบเทียบความยาว (Length Comparator) และชั่งน้ำหนักครั้งแรก ปล่อยให้ไว้ในบรรยากาศแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 29 °C มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 จากนั้นทำการวัดแท่งทดสอบเช่นเดิมที่เมื่อครบเวลา 3 7 14 28 35 56 และ 90 วัน

## 2.9 ความยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

การทดสอบความยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ของมอร์ต้าร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1260 [67] ขนาดของมอร์ต้าร์เท่ากับตัวอย่างการหดตัวแบบแห้ง 25×25×285 มิลลิเมตร อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด 1:2.25 แล้วใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.47 ถอดแบบที่อายุบ่ม 1 วัน (ตารางที่ 2.4) นำตัวอย่างมอร์ต้าร์มาวัดความยาวด้วยเครื่องเปรียบเทียบความยาว ตัวอย่างละ 3 ครั้ง ทิศค่าเฉลี่ย จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำสะอาด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80±2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างมอร์ต้าร์เดิมมาวัดความยาวอีกครั้ง ก่อนนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1N NaOH หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์

40 กรัมต่อน้ำ 1,000 กรัม แล้วนำไปไว้ที่ตู้อบอุณหภูมิ  $80 \pm 2^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 14 วัน วัดขนาดความยาวที่อายุ 3 7 และ 14 วัน

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

รหัสตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม/ก้อน)						
	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	เถ้าปลั่ม น้ำมัน	ทราย	เศษกระจกสี			น้ำ
				เขียว	น้ำตาล	ใส	
Control	80	0	220	0	0	0	32
OPC-G	80	0	0	220	0	0	32
OPC-B	80	0	0	0	220	0	32
OPC-C	80	0	0	0	0	220	32
OPC-M	80	0	0	73.33	73.33	73.33	32
10-OPA-G	72	8	0	220	0	0	32
20-OPA-G	64	16	0	220	0	0	32
30-OPA-G	56	24	0	220	0	0	32
10-OPA-B	72	8	0	0	220	0	32
20-OPA-B	64	16	0	0	220	0	32
30-OPA-B	56	24	0	0	220	0	32
10-OPA-C	72	8	0	0	0	220	32
20-OPA-C	64	16	0	0	0	220	32
30-OPA-C	56	24	0	0	0	220	32
10-OPA-M	72	8	0	73.33	73.33	73.33	32
20-OPA-M	64	16	0	73.33	73.33	73.33	32
30-OPA-M	56	24	0	73.33	73.33	73.33	32

หมายเหตุ: w/b = 0.40



ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาและการต้านทานซัลเฟต

รหัสตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม/ก้อน)						น้ำ
	พอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ Type 1	เถ้าปาล์ม น้ำมัน	ทราย	เศษกระจกสี			
				เขียว	น้ำตาล	ใส	
Control	80	0	220	0	0	0	37.6
OPC-G	80	0	0	220	0	0	37.6
OPC-B	80	0	0	0	220	0	37.6
OPC-C	80	0	0	0	0	220	37.6
OPC-M	80	0	0	73.33	73.33	73.33	37.6
10-OPA-G	72	8	0	220	0	0	37.6
20-OPA-G	64	16	0	220	0	0	37.6
30-OPA-G	56	24	0	220	0	0	37.6
10-OPA-B	72	8	0	0	220	0	37.6
20-OPA-B	64	16	0	0	220	0	37.6
30-OPA-B	56	24	0	0	220	0	37.6
10-OPA-C	72	8	0	0	0	220	37.6
20-OPA-C	64	16	0	0	0	220	37.6
30-OPA-C	56	24	0	0	0	220	37.6
10-OPA-M	72	8	0	73.33	73.33	73.33	37.6
20-OPA-M	64	16	0	73.33	73.33	73.33	37.6
30-OPA-M	56	24	0	73.33	73.33	73.33	37.6

หมายเหตุ w/b = 0.47

## 2.10 การต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

การทดสอบความการต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ขนาดมอร์ตาร์เท่ากับการวัดการขยายตัวจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา คือ  $25 \times 25 \times 285$  มิลลิเมตร อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด 1:2.25 แล้วใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.47 ถอดแบบที่อายุบ่ม 1 วัน นำตัวอย่างมอร์ตาร์มาวัดความยาวด้วยเครื่องเปรียบเทียบความยาว ตัวอย่างละ 3 ครั้ง คิดค่าเฉลี่ย จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 วัดความยาวที่อายุ 14 21 28 56 และ 133 วัน

## 2.11 ความต้านทานการแทรกซึมประจุไอออนคลอไรด์

ใช้แบบหล่อมอร์ตาร์ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C1202 [68] โดยใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด 1:2.75 ดังแสดงในตารางที่ 2.5 แท่งมอร์ตาร์จำนวน 9 ตัวอย่าง โดยนำสูตรที่มีกำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุมและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.4 ทำการถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นบ่มในน้ำสะอาด แล้วจึงนำมาทดสอบวัดการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุ 27 วัน ดังรูปที่ 2.5 (ข)

วัดความต้านทานการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ในรูปของค่าผ่านประจุรวมผ่านก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ใส่เศษกระจกผสมแก้ปาล์มน้ำมัน โดยมีก้อนอะคริลิกเซลล์ประกอบอยู่ทั้งสองด้าน ด้านประจุบวกเติมด้วยสารละลาย NaOH ประมาณ 0.3 โมลาร์ ส่วนประจุลบเติมด้วยสารละลาย NaCl 3% โดยมีกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (DC) มีความต่างศักย์ 60 โวลต์ ติดไว้หน้าตัดก้อนตัวอย่าง มีการบันทึกกระแสไฟฟ้าทุกช่วงละ 30 นาที รวมเวลาทั้งหมด 6 ชั่วโมง จากกระแสไฟฟ้าและเวลาในอดีตทั้งหมดมีหน่วยเป็น (คูลอมบ์) ทะลุผ่านก้อนตัวอย่าง คำนวณโดยสูตร

$$Q = (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360})$$

เมื่อ Q เป็นประจุผ่าน (คูลอมบ์)

I เป็นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) ทันทีหลังจากให้ความต่างศักย์

$I_t$  เป็นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) ที่เวลาใดๆ หลังจากให้ความต่างศักย์

ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

รหัสตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม/ก้อน)						น้ำ
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าปาล์ม น้ำมัน	ทราย	เศษกระจกสี			
				เขียว	น้ำตาล	ใส	
Control	1067	0	2933	0	0	0	427
OPC-G	1067	0	0	2933	0	0	427
OPC-B	1067	0	0	0	2933	0	427
OPC-C	1067	0	0	0	0	2933	427
OPC-M	1067	0	0	977	977	977	427
10-OPA-G	960	107	0	2933	0	0	427
10-OPA-B	960	107	0	0	2933	0	427
10-OPA-C	960	107	0	0	0	2933	427
10-OPA-M	960	107	0	977	977	977	427

หมายเหตุ: w/b = 0.4



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างมอร์ต้ารั่ว (ก) การขยายตัวจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา และ (ข) การแทรกซึมของคลอไรด์

## 2.12 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและวัฏภาคแร่ประกอบ

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ได้จากหลังการทดสอบกำลังอัด อายุบ่ม 56 วัน เฉพาะอัตราส่วนที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น SEM: JEOL JSM-5800LV ได้ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณแร่ประกอบด้วยวิธีการคำนวณพื้นที่ได้กราฟลายพิมพ์ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer รุ่น X'Pert MPD, PHILIPS ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

## บทที่ 3

### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

#### 3.1 องค์ประกอบทางเคมี

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าปาล์มน้ำมัน เศษกระจก สีเขียว เศษกระจกสีน้ำตาลและเศษกระจกสีใส ด้วยวิธี X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ดังตารางที่ 3.1 พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีผลรวมของ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 50 คือเท่ากับ 56.61 มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) ไม่เกินร้อยละ 5 คือเท่ากับ 0.42 และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ 6 คือ 3.7 จึงสามารถเทียบเคียงเป็นวัสดุปอซโซลานชั้นคุณภาพ C ได้ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ดังตารางที่ 3.2 และพบว่าเศษกระจกมีซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ประมาณร้อยละ 64 โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ประมาณร้อยละ 15 และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ประมาณร้อยละ 15 และยังพบโครเมียมออกไซด์ ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) และ นิกเกิลออกไซด์ ( $\text{NiO}$ ) อันเป็นสารทำให้เกิดสีเขียวและสีน้ำตาล ตามลำดับ ส่วนซิลิกอนไดออกไซด์มีปริมาณสูงอันจะเป็นผลเสียต่อการหลอมอร์ตาร์เพราะทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกากับมวลรวมได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบแก้วสีชนิดเดียวกันที่ Shayan and Xu [11] ได้นำมาทำวิจัยพบว่ามีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มากกว่า แต่มี  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{SO}_3$  น้อยกว่าจากงานวิจัยนี้

สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์มเป็นหลักในภาคใต้นั้น มักมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันไปและไม่ถือว่าเป็นของเสียอันตราย เพราะมีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักชะละลายออกมาต่ำกว่าเกณฑ์ (ทองแดง แคดเมียม นิกเกิล ตะกั่ว) [69] โดยเฉพาะอย่างยิ่งซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ทั้งนี้ขึ้นกับกระบวนการหีบเอาน้ำมันออกจากใยและกะลาปาล์มบางแห่งอาจใช้ดินขาวหรือปูนขาว ดังนั้นเมื่อเอาไปทำเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในโรงงานซึ่งมีความร้อนประมาณ  $800^\circ\text{C}$  ก่อนพ่นทิ้งออกมาเป็นเถ้า จึงทำให้มีองค์ประกอบทางเคมีเทียบเคียงเป็นวัสดุปอซโซลานชั้นคุณภาพแตกต่างออกไปด้วย นอกจากนี้ยังขึ้นกับผลิตผลของปาล์มน้ำมันด้วย หากเป็นเถ้ามาจากกะลาปาล์มน้ำมันก็มีองค์ประกอบทางเคมีหลักของวัสดุปอซโซลานสูงกว่า

ของใยปาล์มน้ำมัน [70] ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ผลการตรวจพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 46.7 ตร.ม./กรัม และมีความพรุนเท่ากับ 18.20 ตร.ม./กรัม ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ใกล้เคียงกับรายงานผลไว้ในงานของอภิรักษ์และคนุพล [26] อย่างไรก็ตามยังไม่มีเกณฑ์มาตรฐานของหน่วยงานใดรองรับถึงใยปาล์มน้ำมันมีสัคดิ์และสิทธิอยู่ในพวกเดียวกับวัสดุพอลิโพรพิลีนเช่นเดียวกับใยลายนหินเช่นเดียวกับบรรดาใยจากอุตสาหกรรมเกษตรชนิดอื่น เช่น ใยแกลบ ใยชานอ้อย แต่งานวิจัยจำนวนมากต่างก็ยอมรับว่าใช้กันได้และมีคุณลักษณะเช่นเดียวกับวัสดุพอลิโพรพิลีน [71, 72, 73] สำหรับเศษกระจกทั้งสามสีที่ใช้ก็พบว่ามีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มแก้วเชิงพาณิชย์ที่ใช้กัน [27] ยกเว้น  $\text{SiO}_2$  น้อยกว่าและ  $\text{CaO}$  สูงกว่า

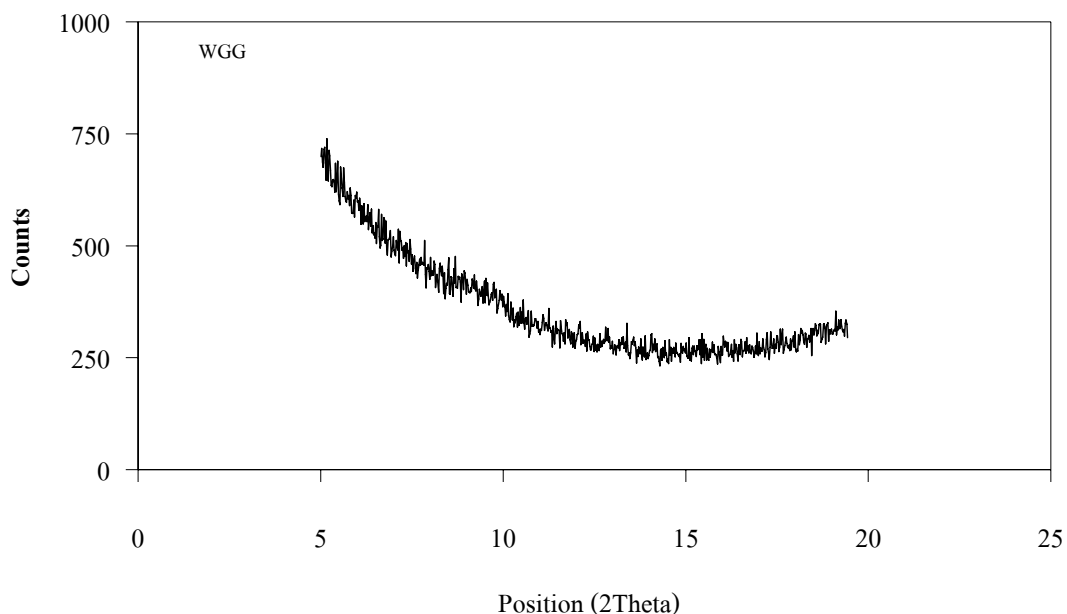
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	OPC	OPA	WGG	WGB	WGC
$\text{SiO}_2$	21.20	50.52	64.21	64.34	64.69
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5.22	1.82	1.31	0.96	0.89
$\text{K}_2\text{O}$	0.42	5.93	0.32	0.80	0.41
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.08	4.27	1.17	0.62	0.32
$\text{CaO}$	64.73	10.84	13.59	14.61	15.89
$\text{SO}_3$	2.01	0.42	0.24	0.33	0.24
$\text{P}_2\text{O}_5$	-	5.19	-	-	-
$\text{TiO}_2$	-	0.22	-	-	-
$\text{MgO}$	1.04	3.42	4.03	3.57	3.70
$\text{Na}_2\text{O}$	-	-	15.07	14.50	13.77
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	-	-	0.04	-	-
$\text{NiO}$	-	-	-	0.19	-
LOI	1.45	3.7	0	0	0
พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $\text{m}^2/\text{กรัม}$ )	1.628	46.7	-	-	-
ความพรุนจำเพาะ ( $\text{m}^2/\text{กรัม}$ )	0	18.20	-	-	-
การดูดซึมน้ำ (%)	-	-	0.45	0.40	0.45

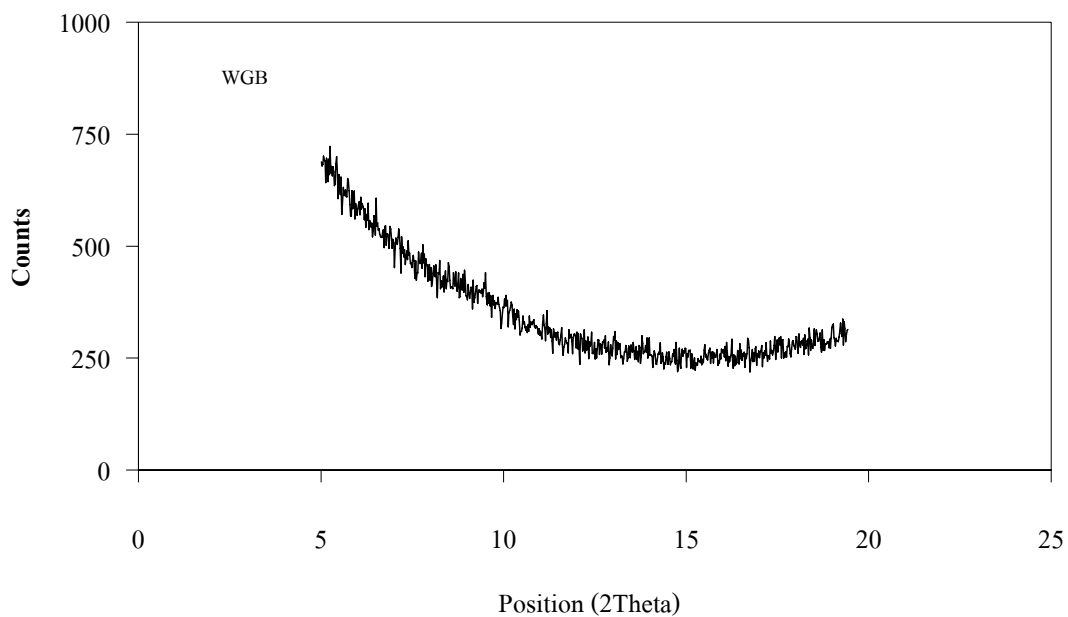
จากผลทดสอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ใน  
 เศษกระจกสีเขียว เศษกระจกสีน้ำตาลและเศษกระจกสีใส ไม่ปรากฏลายพิมพ์การเลี้ยวเบน  
 รังสีเอกซ์ของชนิดแร่แสดงขึ้นมา ดังในรูปที่ 3.1-3.3 ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นถึงระบุชัดเจนว่า  
 บรรดากระจกนำมาใช้ศึกษาครั้งนี้เป็นวัสดุอสัณฐาน (amorphous materials) ซึ่งตรงกับผลงานวิจัย  
 ของ Shao et al. [8] ที่ได้วิเคราะห์แก้วที่นำมาบดละเอียดทำเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับวัสดุพอลิซิลานตามมาตรฐาน ASTM C 618

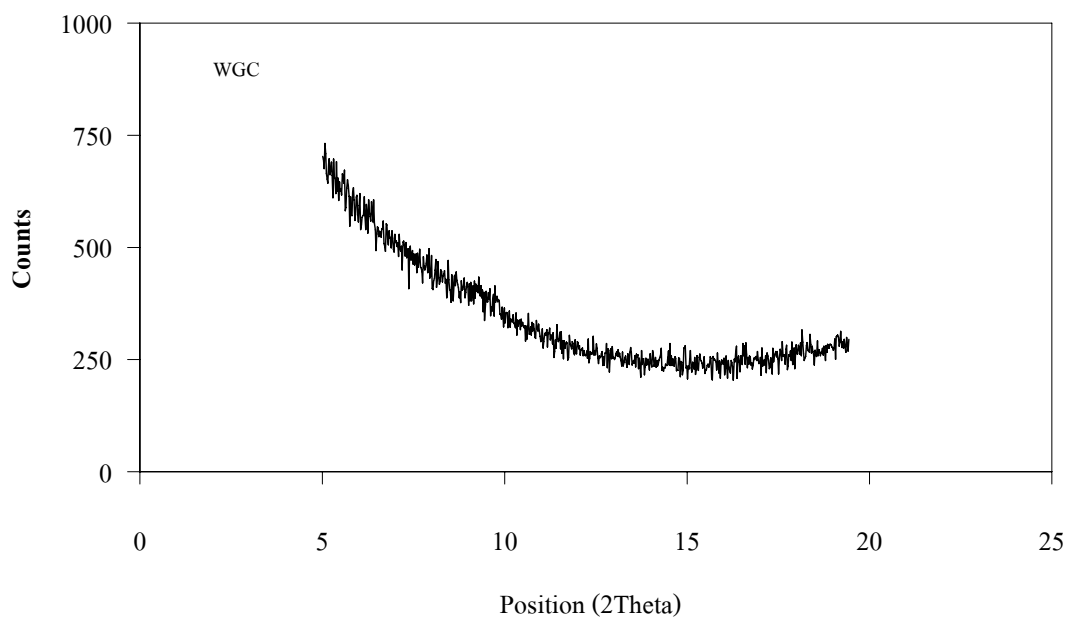
สมบัติทางเคมีและกายภาพ	วัสดุพอลิซิลาน			เถ้าปาล์มน้ำมัน
	N	F	C	
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ไม่น้อยกว่าร้อยละ)	70	70	50	56.61
SO <sub>3</sub> (ไม่เกินร้อยละ)	4	5	5	0.42
Na <sub>2</sub> O (ไม่เกินร้อยละ)	1.5	1.5	1.5	-
น้ำหนักสูญหายหลังเผาไหม้ (ไม่เกินร้อยละ)	10	12	6	3.7
ค่าแรงกระแทกเบอร์ 325 (ไม่เกินร้อยละ)	34	34	34	13.59



รูปที่ 3.1 ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเศษกระจกสีเขียวที่ใช้ทดลอง



รูปที่ 3.2 ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเศษกระจกสีน้ำตาลที่ใช้ทดลอง



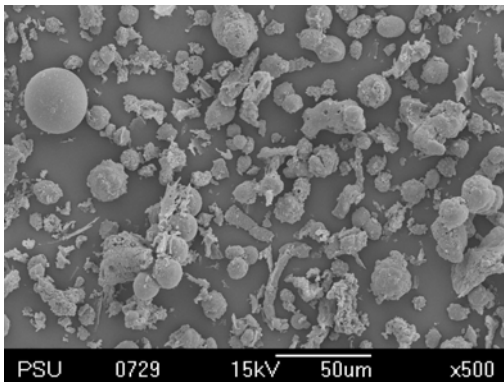
รูปที่ 3.3 ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเศษกระจกสีใสที่ใช้ทดลอง



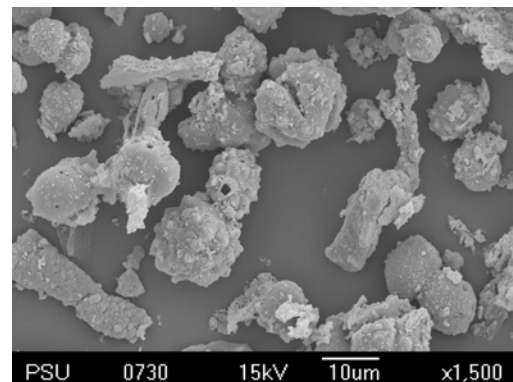
### 3.2 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุ

#### 3.2.1) วัสดุประสาน

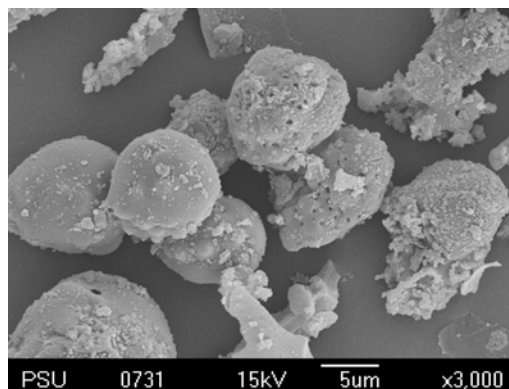
จากการถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเถ้าปลาล์มน้ำมัน ดังรูปที่ 3.4 เมื่อนำมาตรวจสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนด้วยวิธี (Spectrometer of Surface Area) มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 46.7 ตร.ม./กรัม และมีความพรุนเท่ากับ 18.20 ตร.ม./กรัม ตารางที่ 3.1 เป็นผลให้เมื่อนำมาผสมเป็นซีเมนต์เพสต์มีความต้องการน้ำมากขึ้น เพื่อเคลือบอนุภาคผิวให้อยู่ในสถานะเหลวและบางส่วนดูดซึมไปในเนื้อพูน นอกจากนี้ ลักษณะทรงกลมบางส่วนของเถ้าปลาล์มน้ำมันยังจะช่วยเพิ่มให้การลื่นไหลระหว่างวัสดุประสานกับมวลรวมละเอียด ทำให้มีความสามารถในการเทได้ดีขึ้น (Workability) การอัดแน่นด้วยตนเองเป็นไปได้สูง (self consolidation)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเถ้าปลาล์มน้ำมันที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า มีลักษณะรูปทรงพื้นฐานค่อนข้างมนถึงกลมมน (ข) 1,500 เท่า มีรูพรุน และ (ค) 3,000 เท่า รูพรุนและผิวไม่เรียบ

จากการเปรียบเทียบสีของปูนซีเมนต์และเถ้าปลาล์มน้ำมันที่ผ่านการร่อนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (รูปที่ 2.2) พบว่ามีสีที่แตกต่างกัน โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสีเทา ในขณะที่เถ้าปลาล์มน้ำมันมีสีดำสนิท โดยทั้งคู่มีลักษณะเป็นผงละเอียดเหมือนกัน เป็นผลให้เมื่อนำมาผสมเป็นซีเมนต์เพสต์โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปลาล์มน้ำมันมากขึ้น จะทำให้สีของซีเมนต์เพสต์เข้มขึ้น ตามลำดับอัตราส่วนผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน

### 3.2.2) มวลรวมละเอียด

จากการเปรียบเทียบลักษณะของทรายกับเศษกระจก ด้วยตาเปล่า (รูปที่ 2.3) พบว่าทรายมีลักษณะสีเหลือง รูปร่างกลมมนไม่ค่อยมีเหลี่ยมคม ซึ่งแตกต่างจากเศษกระจก ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงเหลี่ยม ผิวเรียบ จากการศึกษาค้นคว้าความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีต โดยมวลรวมก้อนกลมและผิวเรียบจะต้องการซีเมนต์เพสต์เพื่อเคลือบผิวน้อยกว่ามวลรวมรูปร่างอื่น นอกจากนี้ยังมีการขัดกันระหว่างก้อนมวลรวมต่ำ ดังนั้นจึงทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ดีกว่ามวลรวมที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมและผิวหยาบ มวลรวมก้อนเหลี่ยมและผิวหยาบมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทำให้ต้องการซีเมนต์เพสต์มาเคลือบผิวมากขึ้นและความเป็นเหลี่ยมยังทำให้เกิดการขัดกันระหว่างก้อนมวลรวมทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ต่ำ [74]

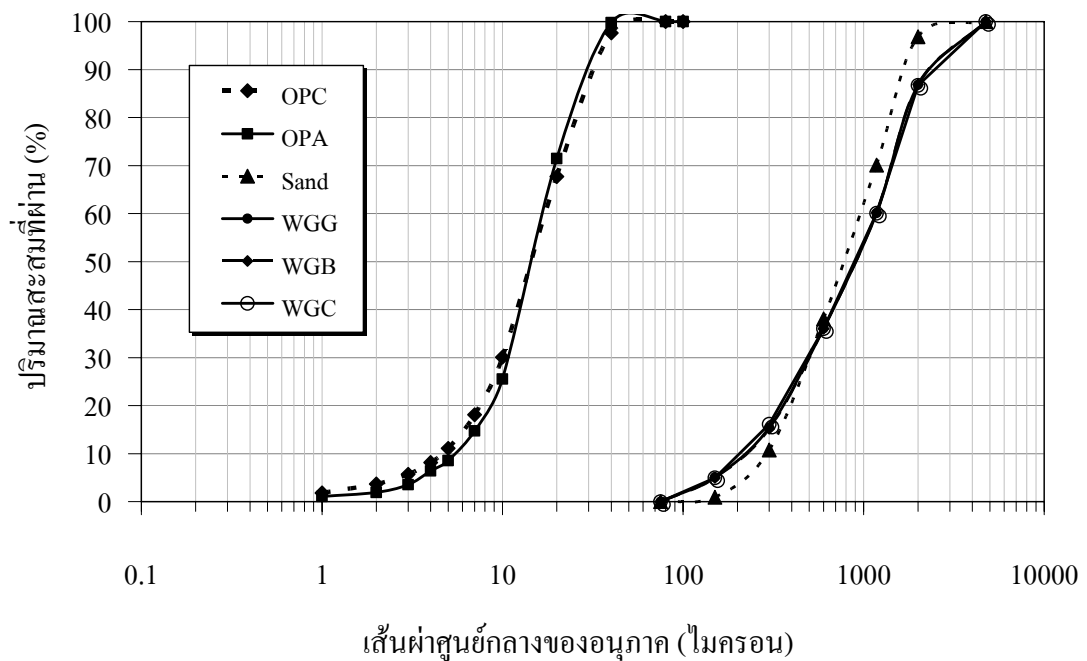
## 3.3 ขนาดอนุภาคของวัสดุ

### 3.3.1 วัสดุประสาน

ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของวัสดุตั้งรูปที่ 3.3 พบว่าเมื่อนำวัสดุประสานคือปูนซีเมนต์และเถ้าปลาล์มน้ำมัน มาวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ยด้วยวิธี Laser light Scatter Partical Size Analyzer ปูนซีเมนต์มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 ( $d_{10}$ - $d_{90}$ ) อยู่ในช่วง 4.65-30.41 ไมครอนเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 16.44 ไมครอนเมตร ส่วนเถ้าปลาล์มน้ำมันมีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 ( $d_{10}$ - $d_{90}$ ) อยู่ในช่วง 8.68-49.76 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 26.57 ไมครอนเมตร เนื่องจากขนาดอนุภาคของเถ้าปลาล์มน้ำมันโดยเฉลี่ยใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นผลจากโพรงภายในอนุภาค จึงสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนที่มีมากกว่าปูนซีเมนต์

### 3.3.2) มวลรวมละเอียด

จากผลทดสอบการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดคือ ทราย เศษกระจกสีเขียว เศษกระจกสีน้ำตาลและเศษกระจกสีใสที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ (รูปที่ 3.5) วิเคราะห์ขนาดละเอียดด้วยวิธีโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ได้ผลเท่ากับ 2.70 2.96 2.97 และ 2.96 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเศษกระจกมีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่าทรายและเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 33 [75] กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดอยู่ระหว่าง 2.3-3.2 ดังนั้นวัสดุกระจกที่นำมาทำมวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน การลดขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีความต้องการน้ำในการหล่อมอร์ต้าร์น้อยกว่าของทราย



รูปที่ 3.5 การกระจายตัวอนุภาคของวัสดุประสานและมวลรวมละเอียดที่นำมาหล่อมอร์ต้าร์

ตารางที่ 3.3 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียดในมอร์ต้าร์ที่ศึกษา

รายการสมบัติ	ทราย	WGG	WGB	WGC
การดูดซึมน้ำ (%)	1.52	0.45	0.40	0.45
ความถ่วงจำเพาะรวม	2.54	2.56	2.59	2.53
ความหนาแน่นแบบหลวม (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	1.62	1.55	1.55	1.54
ความหนาแน่นแบบอัดแน่น (กรัม/ซม <sup>3</sup> )	1.68	1.59	1.59	1.58
โมดูลัสความละเอียด	2.83	2.96	2.97	2.96

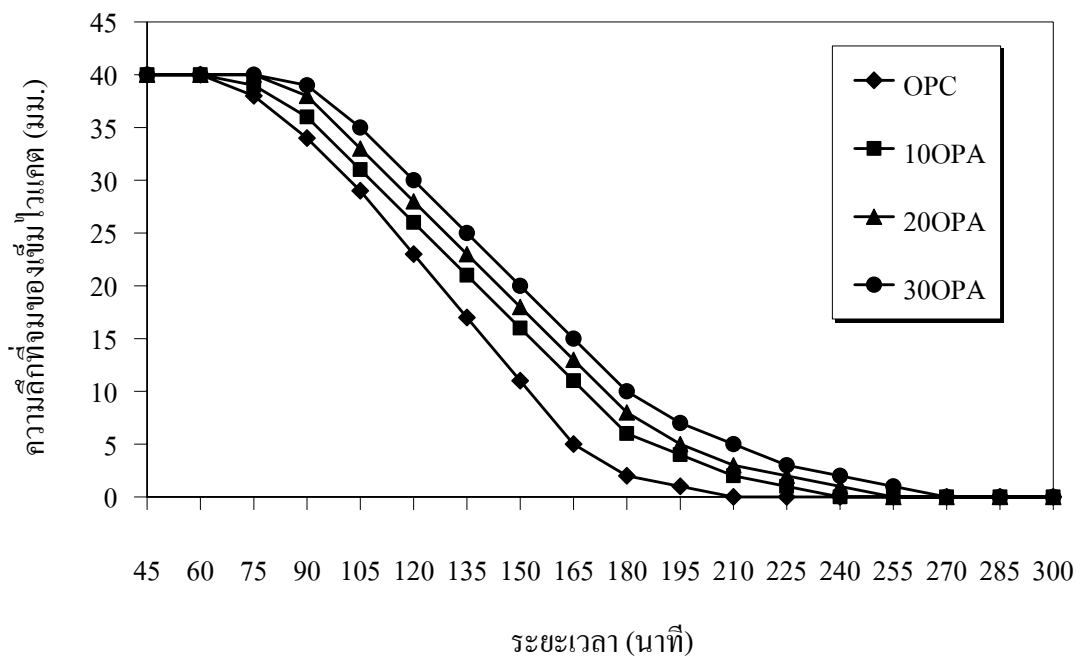
### 3.4 สมบัติของซีเมนต์เพสต์

#### 3.4.1 ระยะเวลาการก่อตัว

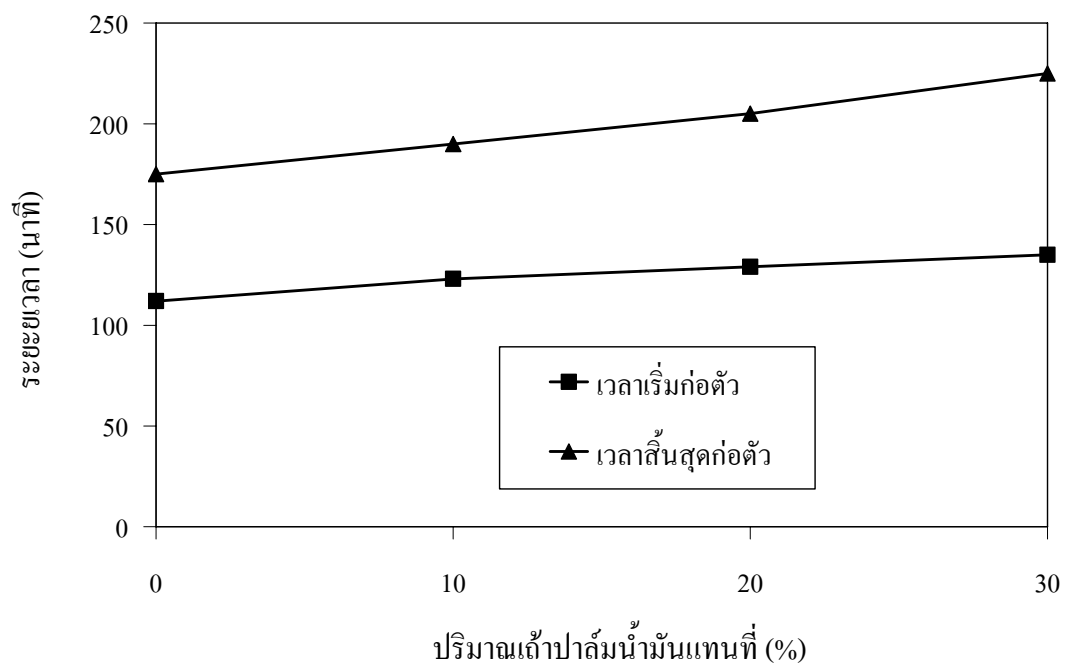
การทดสอบนี้ใช้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติเพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 30 ดังรูปที่ 3.6 พบว่าระยะเวลาเริ่มต้นก่อตัวและสิ้นสุดการก่อตัวของซีเมนต์ล้วน (OPC) เท่ากับ 112 นาที และ 225 นาที แต่เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-30 การเริ่มต้นก่อตัวและสิ้นสุดก่อตัวเท่ากับ 123-225 129-270 และ 135-285 นาที ตามลำดับ นั้นหมายความว่าเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันมากขึ้น จะสามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวได้นานขึ้นตามลำดับ (รูปที่ 3.6 ข) เนื่องจากการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์มากขึ้น ความต้องการปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติมากขึ้น ทำให้ไปชะลอการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ ซีเมนต์เพสต์จึงแข็งตัวช้าลงตามลำดับ อย่างไรก็ตามซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทุกส่วนผสมยังมีการก่อตัวทั้งระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและเวลาในการก่อตัวครั้งสุดท้ายอยู่ในค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C 191 คือไม่น้อยกว่า 45 นาที สำหรับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และไม่เกิน 375 นาที สำหรับเวลาการก่อตัวครั้งสุดท้าย (ตารางที่ 3.4)

ตารางที่ 3.4 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติและเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

รหัสตัวอย่าง	อัตราส่วน W/(C+OPA)	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	ระยะเวลาก่อตัวครั้งสุดท้าย (นาที)
OPC	25.860	112	225
10-OPA	27.500	123	255
20-OPA	28.750	129	270
30-OPA	30.300	135	285



(ก)



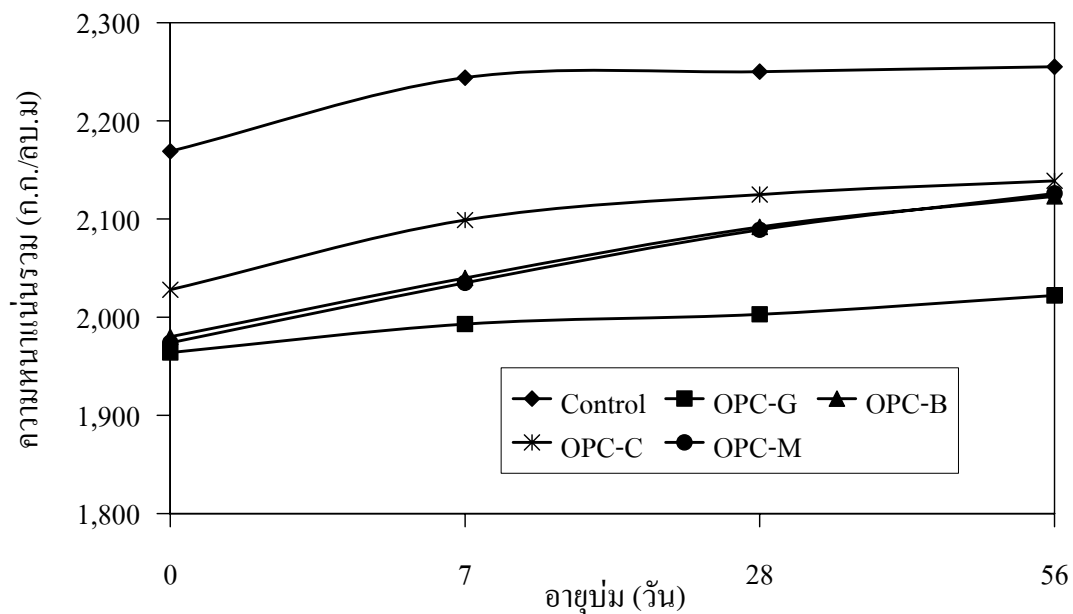
(ข)

รูปที่ 3.6 (ก) พฤติกรรมการก่อตัวของเพสต์ และ (ข) ช่วงระยะเวลาเริ่มต้นก่อตัวและสิ้นสุดของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มอัตราส่วนต่างกัน

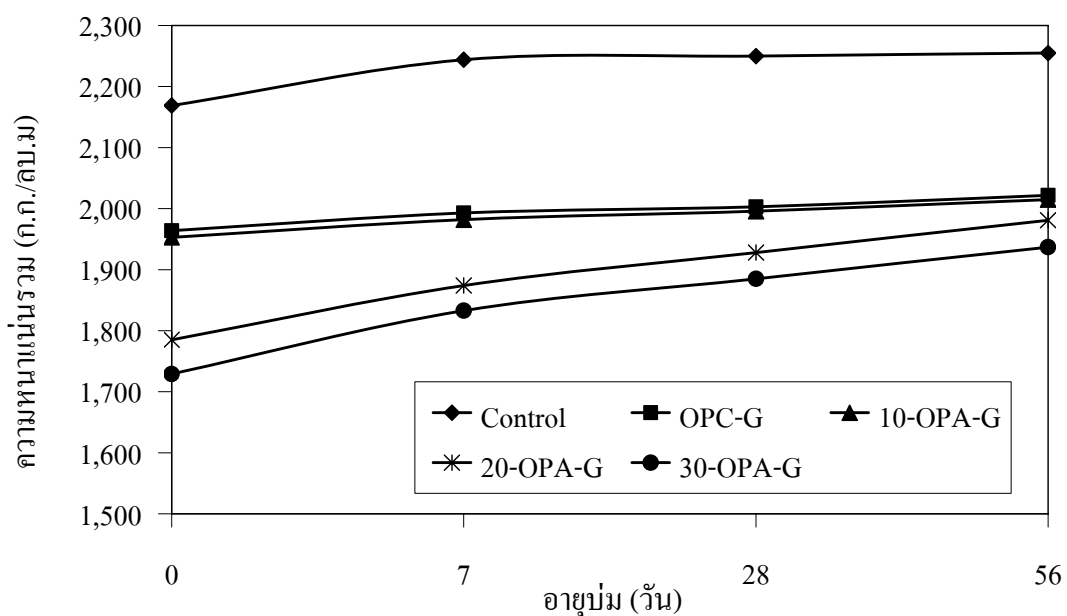
### 3.5 ความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์ปกติ (ควบคุม) และมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจก ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 ที่อายุบ่ม 7 28 และ 56 วัน ดังรูปที่ 3.7-3.11 พบว่าทั้งมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกทุกชนิด เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปลาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์ลดลงในทุกอายุการบ่ม เนื่องจากว่าเถ้าปลาล์มน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ คือ 2.17 และ 3.15 ตามผลการทดสอบ บวกกับความพรุนภายในอนุภาคมากกว่า จึงทำให้มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นมีค่าน้ำหนักเบาตามลำดับอัตราส่วนผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน นอกจากนี้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ดังได้ในรูปที่ 3.7-3.11 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อภิรักษ์และคุณพล [26] ที่ใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่บางส่วนปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ผสมหินฝุ่นแกรนิตเช่นกัน ได้กล่าวว่าความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อมีการแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันมากขึ้น ในทุกอายุบ่มเนื่องจากเถ้าปลาล์มน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์

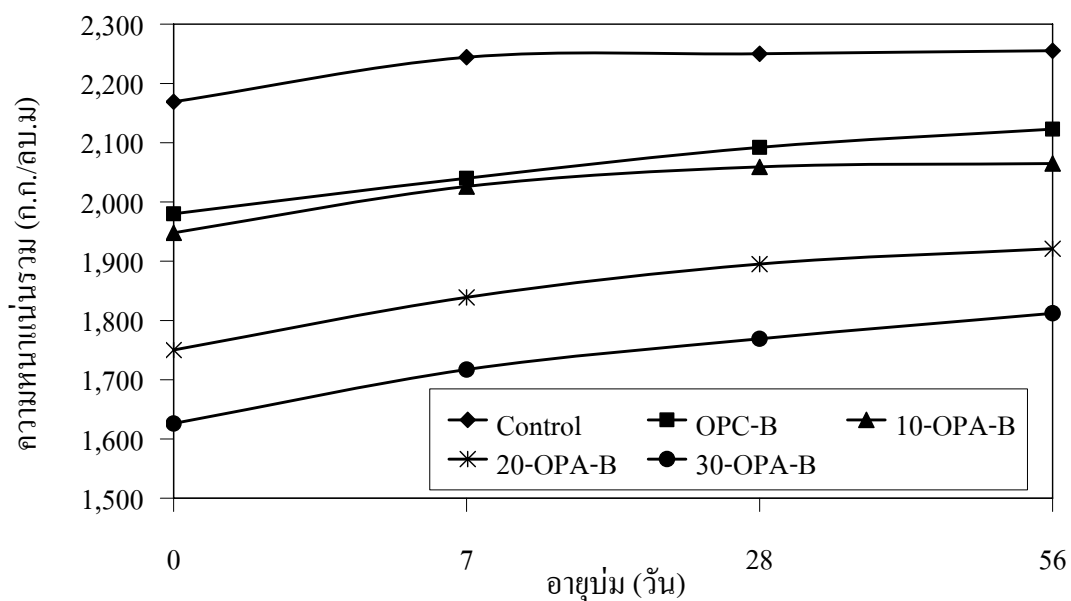
สำหรับผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของมวลรวมละเอียดดังรูปที่ 3.7 พบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมทรายด้วยเศษกระจกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 0 ที่อายุ 1 วัน และบ่มน้ำ 7 28 และ 56 วัน พบว่าค่าความหนาแน่นรวมเศษกระจกสีเขียว เท่ากับ 1,964 1,993 2,003 และ 2,022 กก./ลบ.ม. เศษกระจกสีน้ำตาล เท่ากับ 1,980 2,040 2,092 และ 2,123 กก./ลบ.ม. เศษกระจกสีใส เท่ากับ 2,028 2,035 2,125 และ 2,139 กก./ลบ.ม. และเศษกระจกสีผสมเท่ากับ 1,1974 2,035 2,089 และ 2,126 กก./ลบ.ม. ซึ่งมวลรวมทั้งสี่มีความหนาแน่นรวมน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,169 2,244 2,250 และ 2,255 ตามอายุบ่ม เนื่องจากความหนาแน่นรวมยังขึ้นอยู่กับการกระจายขนาด รูปร่างของมวลรวมละเอียดและสภาพการอัดแน่น มวลรวมที่มีขนาดละเอียดดีจะมีช่องว่างน้อย ทำให้ความหนาแน่นมากขึ้น จากผลการทดลองหาความหนาแน่นหลวมและความหนาแน่นอัดแน่นของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C29/C 29M-97 [76] พบว่าทรายมีความหนาแน่นหลวมและอัดแน่นมากที่สุด คือ 1,620 และ 1,680 กก./ลบ.ม ส่วนเศษกระจกสีเขียว สีน้ำตาลและสีใส มีความหนาแน่นหลวมและอัดแน่น คือ 1,550 และ 1,590 กก./ลบ., 1,550 และ 1,590 กก./ลบ., 1,540 และ 1,580 กก./ลบ. ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์



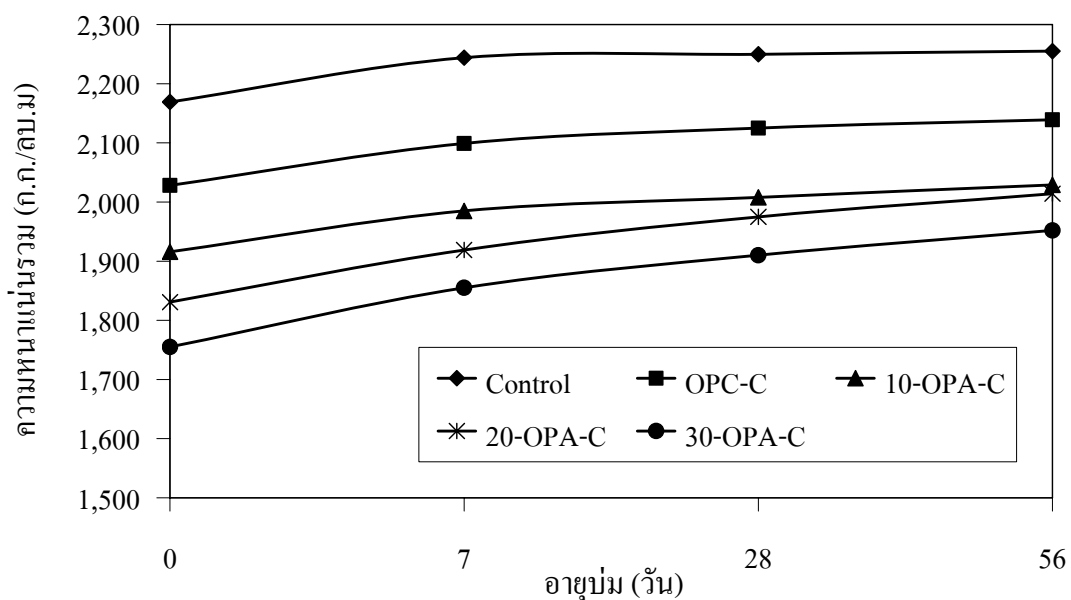
รูปที่ 3.7 ความหนาแน่นรวมของมอร์ดิอาร์แทนที่ที่ทรายด้วยเศษกระจกสีต่างๆ



รูปที่ 3.8 ความหนาแน่นรวมของมอร์ดิอาร์แทนที่ที่ทรายด้วยเศษกระจกสีเขียวผสม เถ้าปลาล้มน้ำมัน ในอัตราส่วนต่างๆ

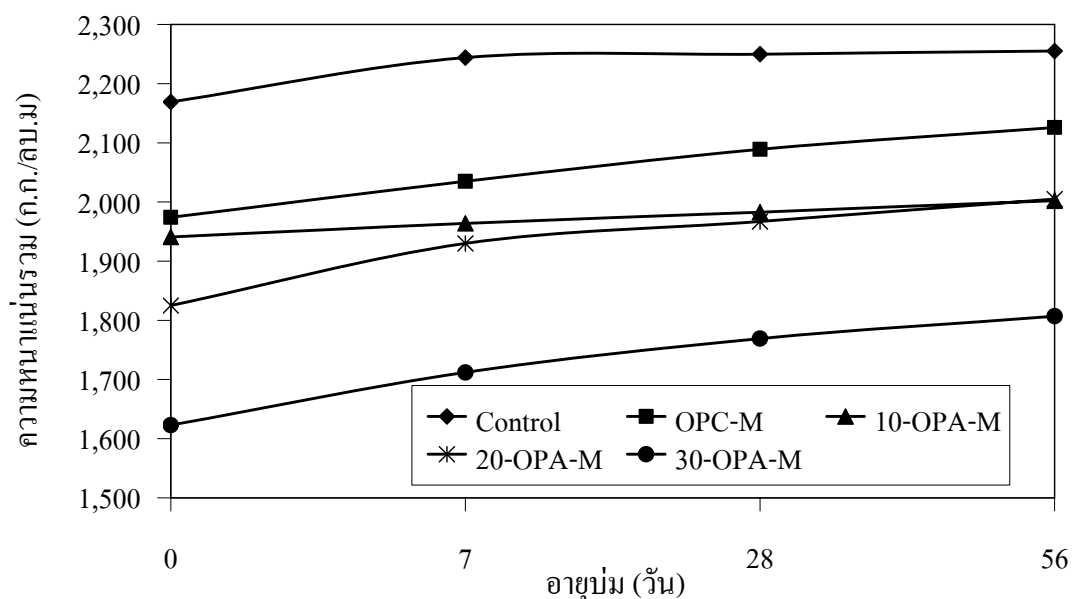


รูปที่ 3.9 ความหนาแน่นรวมของมอร์ดีอาร์แทนที่ที่ทรายเป็นด้วยเศษกระจกสีน้ำตาลผสมเก้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 3.10 ความหนาแน่นรวมของมอร์ดีอาร์แทนที่ที่ทรายเป็นด้วยเศษกระจกสีใสผสมเก้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ





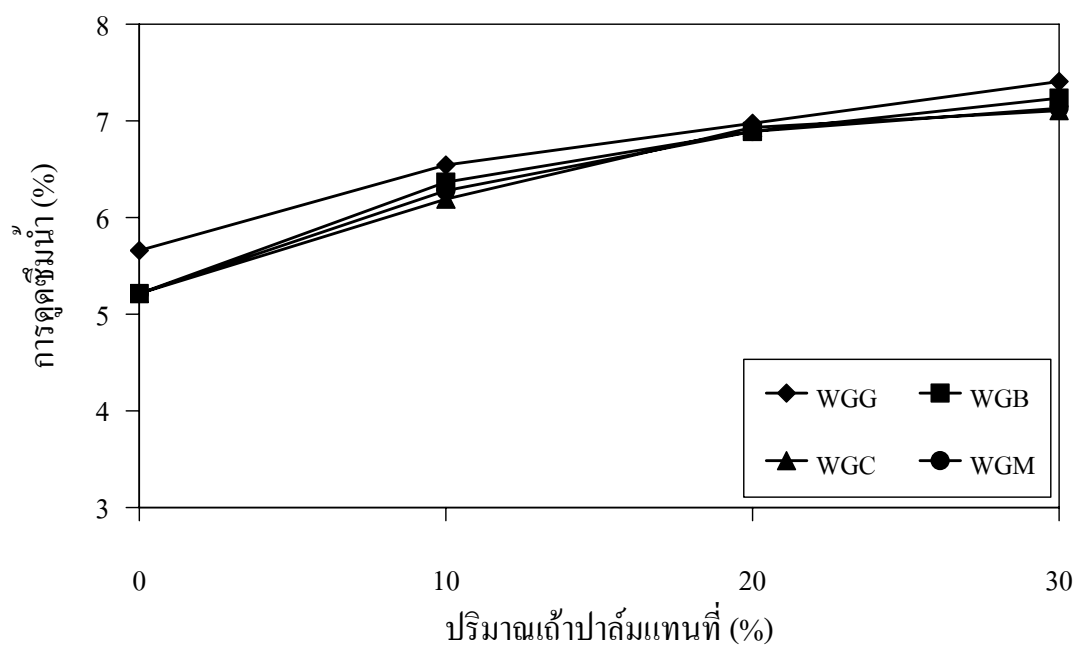
รูปที่ 3.11 ความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสม ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนต่างๆ

### 3.6 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

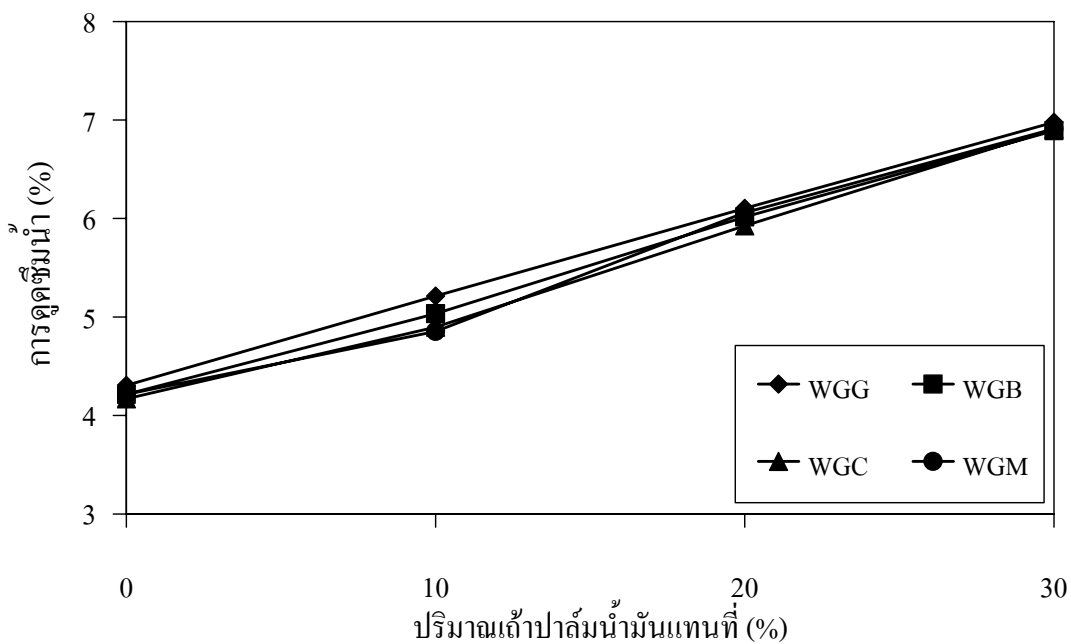
ผลการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำมอร์ตาร์ปกติ และมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 ที่อายุบ่ม 7 28 และ 56 วัน ดังรูปที่ 3.12-3.14 พบว่าทั้งมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกทุกสี เมื่อผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์มากขึ้นตามลำดับในทุกอายุการบ่ม เนื่องจากตัวเนื้อเถ้าปาล์มน้ำมันมีความเป็นโพรงและความพรุนสูงกว่าปูนซีเมนต์ (ตารางที่ 3.1) เมื่อนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ ทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนและโพรงรูเล็ก (capillary pore) สามารถดูดซึมน้ำได้ดีกว่ามอร์ตาร์ปกติที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน อีกทั้งยังพบว่ามอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน มีความสามารถดูดซึมน้ำได้น้อยกว่ามอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 7 วัน เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อายุบ่มนานขึ้นจนทำให้เกิดสารประกอบ CSH ขยายเข้าไปในโพรงหรือช่องว่างทำให้ปิดเนื้อซีเมนต์เพสต์ให้แน่นทึบขึ้น จึงยังคงเหลือช่องว่างสำหรับการดูดซึมน้ำเหลือน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์

จากการศึกษาอิทธิพลของมวลรวมละเอียดที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำพบว่า การดูดซึมน้ำของมวลรวมมีผลน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับอิทธิพลการดูดซึมน้ำจากการเติมเถ้าปาล์มน้ำมัน

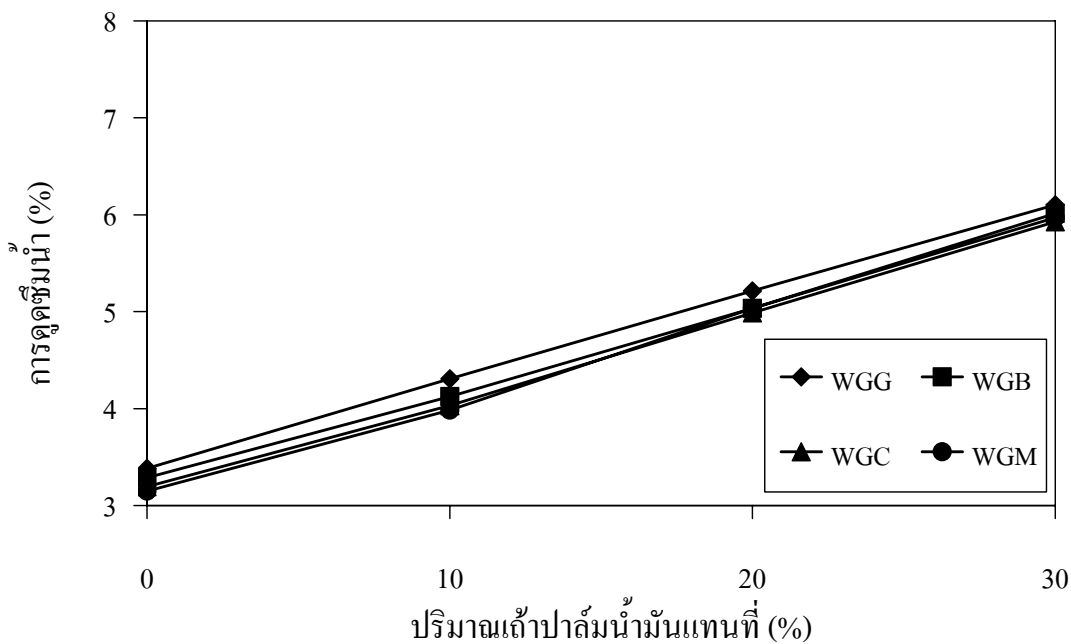
ของซีเมนต์เพสต์ (รูปที่ 3.12-3.14) พบว่ามอร์ต้าร์มวลรวมทราย เศษกระจกสีเขียว สีน้ำตาล สีใส และผสมทุกสีมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.52, 0.45, 0.40 และ 0.45 ตามลำดับ มวลรวมละเอียดจะมีอิทธิพลต่อปริมาณของซีเมนต์เพสต์ที่เคลือบอนุภาคผิวมวลรวม โดยมวลรวมที่มีขนาดละเอียดเหมาะสมจะช่วยลดปริมาณของซีเมนต์เพสต์ในส่วนผสมมอร์ต้าร์ได้



รูปที่ 3.12 การดูดซึมน้ำของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสม  
เถ้าปลั้มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุปอม 7 วัน



รูปที่ 3.13 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ดาร์ปกติและมอร์ตาร์ดาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสม  
 เถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 3.14 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ดาร์ปกติและมอร์ตาร์ดาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสม  
 เถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 56 วัน

### 3.7 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้เศษกระจกเป็นมวลรวม แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 ที่อายุบ่ม 7 28 และ 56 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3.15-3.19 โดยกำหนดให้มอร์ตาร์ปกติที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นมอร์ตาร์ควบคุม (Control) พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้เศษกระจกเป็นมวลรวมที่อายุบ่ม 7 28 และ 56 วัน ให้ค่ากำลังอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุกอัตราส่วน โดยคิดเป็นร้อยละ 12-93 เนื่องจากอิทธิพลของมวลรวมละเอียดและสอดคล้องกับขนาดคละและความหนาแน่นของมวลรวมละเอียด และเนื่องจากลักษณะการพิบัติของมอร์ตาร์เกิดจากเนื้อวัสดุประสาน ไม่ได้เกิดจากการพิบัติของมวลรวมละเอียด เพราะมวลรวมละเอียดมีความแข็งแรงมากกว่าเนื้อวัสดุประสานมาก เพราะฉะนั้นมวลรวมละเอียดที่มีขนาดคละที่ดี ความหนาแน่นของมวลรวมมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเนื้อวัสดุประสานมากก็จะมีกำลังอัดได้มากขึ้นตามลำดับ จากผลการทดลองความหนาแน่นหลวม (loose density) และความหนาแน่นอัดแน่น (dense density) ของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C29/C 29M-97 พบว่าทรายมีความหนาแน่นแบบหลวมและแบบอัดแน่นที่ 1,620 และ 1,680 กก./ลบ.ม ส่วนเศษกระจกสีเขียวและสีน้ำตาล มีความหนาแน่นแบบหลวมและแบบอัดแน่นเท่ากัน คือ 1,550 และ 1,590 กก./ลบ. และเศษกระจกสีใสมีค่า 1,540 และ 1,580 กก./ลบ. ซึ่งส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์ควบคุมมากกว่าของมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกอยู่ในช่วงร้อยละ 5-20

ทั้งนี้อิทธิพลของอายุบ่มของมอร์ตาร์ก็มีผลเป็นอย่างมากต่อมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอชโซลาน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบมอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมชนิดเดียวกัน มอร์ตาร์ที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ให้กำลังอัดสูงสุด เนื่องจากปฏิกิริยาปอชโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซิลิกาและอะลูมินาออกไซด์ในเถ้าปาล์มน้ำมันทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดเป็นสารประกอบยึดประสานคล้ายแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่ได้จากปฏิกิริยาปอชโซลาน ทำให้เนื้อมอร์ตาร์ยึดประสานแน่นขึ้น จึงเพิ่มกำลังอัดได้มากขึ้น แต่หากปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันมากเกินไป ทำให้มีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาออกไซด์ไม่เหมาะสมกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ ประกอบกับอายุบ่มไม่นานเพียงพอ จึงไม่สามารถเป็นวัสดุยึดประสานได้ ซึ่งสอดคล้องกับ Tay [20, 22, 77] ได้นำเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอชโซลานในคอนกรีตพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังอัดดีที่สุดคล้ายกับคอนกรีตปกติมากที่สุดที่อายุบ่ม 7 วันขึ้นไป

อย่างไรก็ตามมาตรฐาน ASTM C 618-98 ได้กำหนดค่าดัชนีกำลังต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุบ่ม 7-28 พบว่ามอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 มีกำลังอัด อยู่ในเกณฑ์กำหนด คืออยู่ในช่วงร้อยละ 87-96 จึงจัดเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน

### 3.7.1 ผลกระทบของอายุบ่มต่อกำลังอัดมอร์ตาร์

พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน อายุบ่ม 7, 28 และ 56 วัน มีกำลังเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ดังในรูปที่ 3.15-3.19 ยังสังเกตว่ามอร์ตาร์อายุบ่ม 28 วัน ให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่บ่มคิดเป็นร้อยละ 60-62 และมอร์ตาร์อายุบ่ม 56 วัน กำลังอัดใกล้เคียงกับ 28 วัน เป็นผลมาจากเถ้าปาล์มซึ่งมีสมบัติเทียบเคียงวัสดุปอชโซลาน เริ่มทำปฏิกิริยาปอชโซลาน และทำปฏิกิริยาต่อเนื่องตามอายุบ่ม ซึ่งเป็นไปตามหลักการ ทั้งนี้เพราะว่าอิทธิพลของอายุบ่มของมอร์ตาร์มีผลเป็นอย่างมากต่อมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอชโซลาน เนื่องจากปฏิกิริยาปอชโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซิลิกาและอะลูมินาออกไซด์ในเถ้าปาล์มน้ำมันทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดเป็นสารประกอบยึดประสานคล้ายแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่ได้จากปฏิกิริยาปอชโซลาน ทำให้เนื้อมอร์ตาร์มีความสามารถยึดประสานดีขึ้นและเพิ่มกำลังอัดได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องซึ่งสอดคล้องกับ Tay [77] ได้นำเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอชโซลานพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังอัดดีที่สุดที่อายุบ่ม 7 วันขึ้นไป

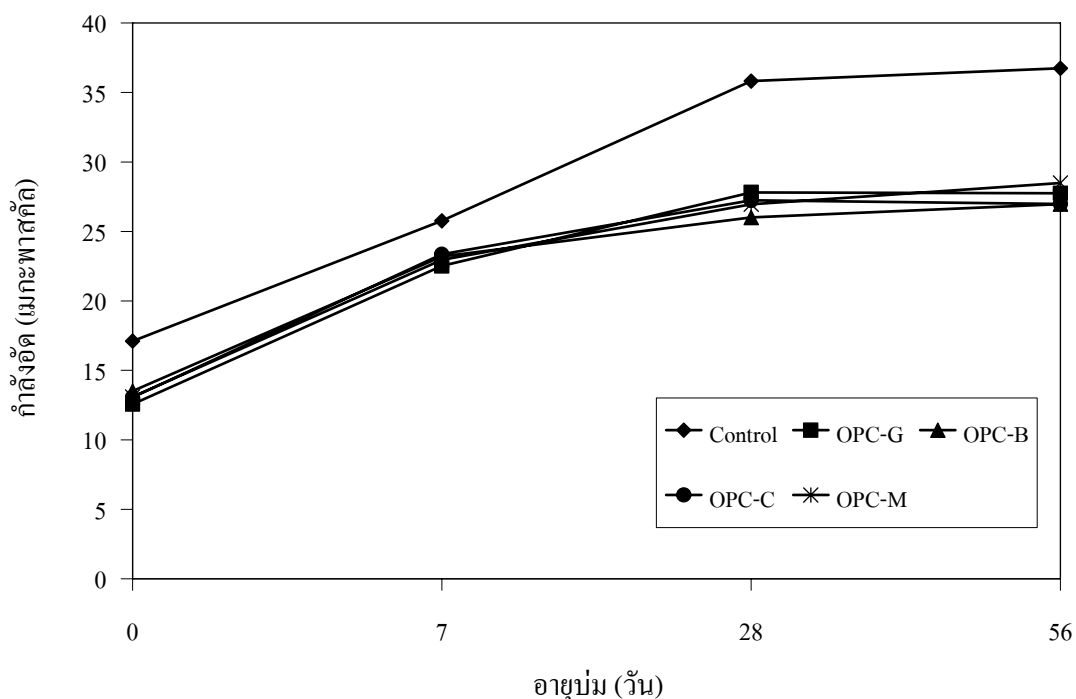
### 3.7.2 ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดมอร์ตาร์

พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ให้กำลังอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 20 และร้อยละ 30 ให้กำลังอัดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 3.15-3.19 ที่อัตราส่วนน้ำคองที่ w/b เท่ากับ 0.4 เทียบกับมวลรวมชนิดเดียวกัน เช่น มอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้มวลรวมเศษกระจกสีเขียว ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 และ 30 คิดเป็นร้อยละ 45 และ 70 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของอภิรักษ์ [26] เนื่องจากปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันมากเกินไป ทำให้มีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาออกไซด์ไม่เหมาะสมกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ ประกอบกับอายุการบ่มไม่นานเพียงพอ จึงไม่สามารถเป็นวัสดุยึดประสานได้ และพบว่ามอร์ตาร์แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 มีกำลังอัดใกล้เคียงมอร์ตาร์ปกติและให้ค่ากำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเศษกระจกอย่างเดียว เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอชโซลานสอดคล้องกับงานวิจัย

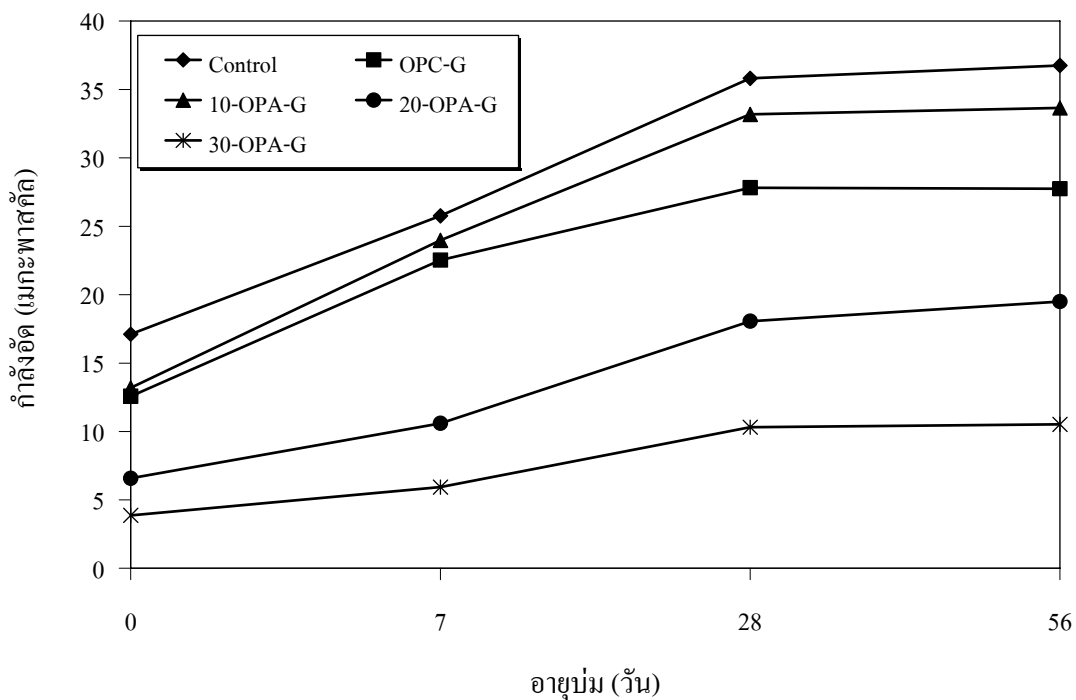
ชีวิตและคณะ [25] และว่าเมื่อแทนที่เก่าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ให้กำลังอัดเกินร้อยละ 75 ของ มอร์ต้าร์ควบคุมสามารถจัดเป็นวัสดุพอชโซลานที่ดีได้

### 3.7.3 ผลกระทบของมวลรวมเศษกระจกที่มีผลต่อกำลังอัดมอร์ต้าร์

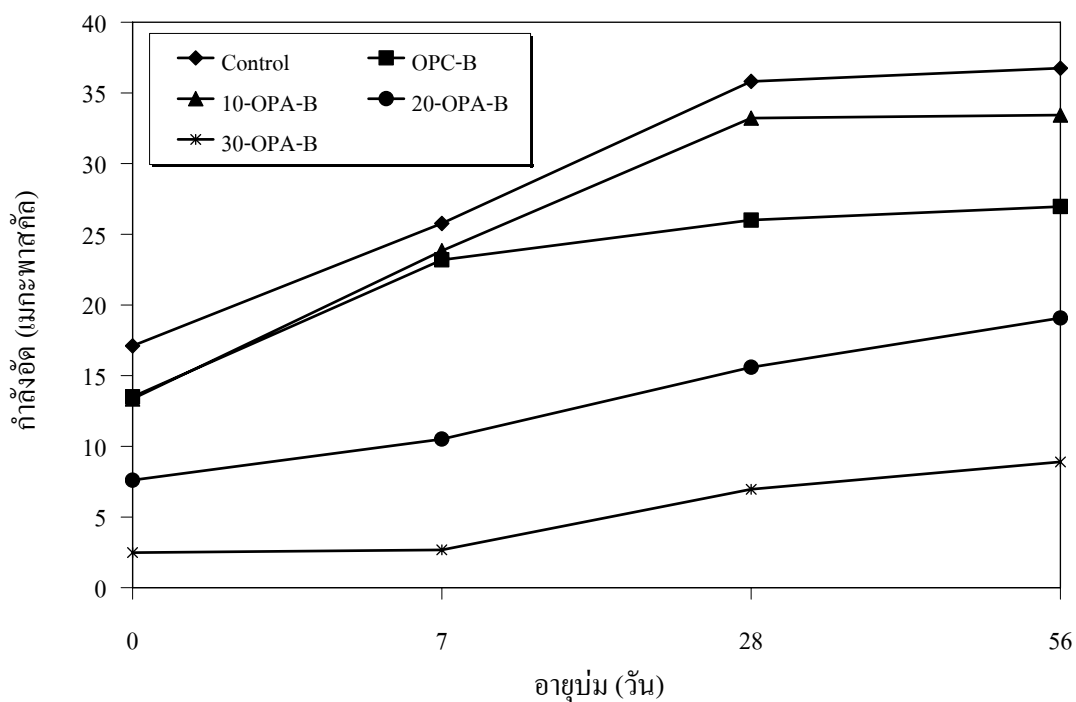
พบว่ามอร์ต้าร์ที่แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกทุกอัตราส่วน ให้กำลังอัดต่ำกว่า มอร์ต้าร์ควบคุมทุกอายุบ่ม ที่อายุบ่ม 28 วัน คิดเป็นร้อยละ 22-27 ดังในรูปที่ 3.15 เป็นผลมาจาก มวลรวมเศษกระจกซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงเหลี่ยม จากการศึกษาพบว่าความสามารถเทได้ของ คอนกรีตสดขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีต โดยมวลรวมก้อนกลม และผิวเรียบมีความต้องการซีเมนต์เพสต์เพื่อเคลือบผิวน้อยกว่ามวลรวมรูปร่างอื่น นอกจากนี้ยังมีการขัดกันระหว่างเม็ดมวลรวมต่ำ ดังนั้นคอนกรีตมวลรวมเรียบมีความสามารถในการเทได้ดีกว่า มวลรวมที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมและผิวขรุขระ มวลรวมเศษกระจกทรงเหลี่ยมและผิวเรียบมี อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทำให้การบดอัดแน่นน้อยกว่า ทำให้ซีเมนต์เพสต์มาเคลือบผิวมากขึ้น และการขัดกันระหว่างมวลรวมน้อยจึงทำให้เมื่อใช้เศษกระจกเป็นมวลรวมกำลังอัดจะลดลง ตามลำดับ ส่วนในด้านของสีในระยะสั้นไม่ส่งผลต่อกำลังอัด เนื่องจากมวลรวมมีความแข็งกว่าเนื้อ ของวัสดุประสานมากและการพิบัติของมอร์ต้าร์เกิดจากเนื้อวัสดุประสานเป็นหลัก



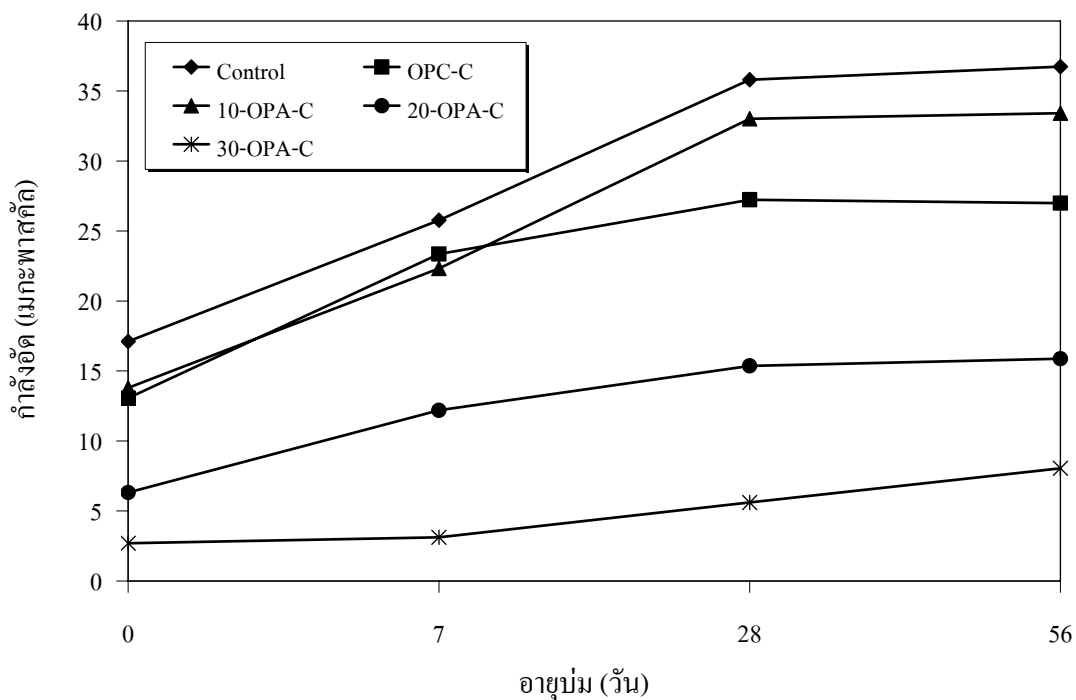
รูปที่ 3.15 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีต่างๆ



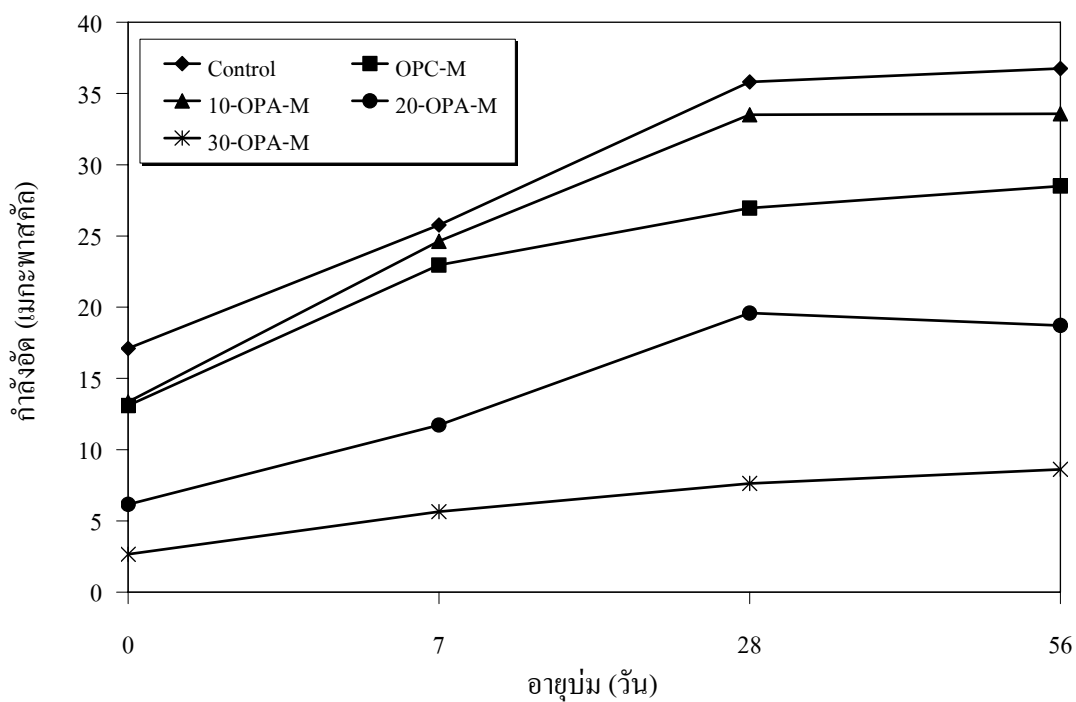
รูปที่ 3.16 กำลังอัดของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีเขียวผสม  
 ใ้ปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 3.17 กำลังอัดของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีน้ำตาลผสม  
 ใ้ปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ กับอายุขุม



รูปที่ 3.18 กำลังอัดของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใสผสม  
 ใ้ปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 3.19 กำลังอัดของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกรวมทุกสีผสม  
 ใ้ปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ

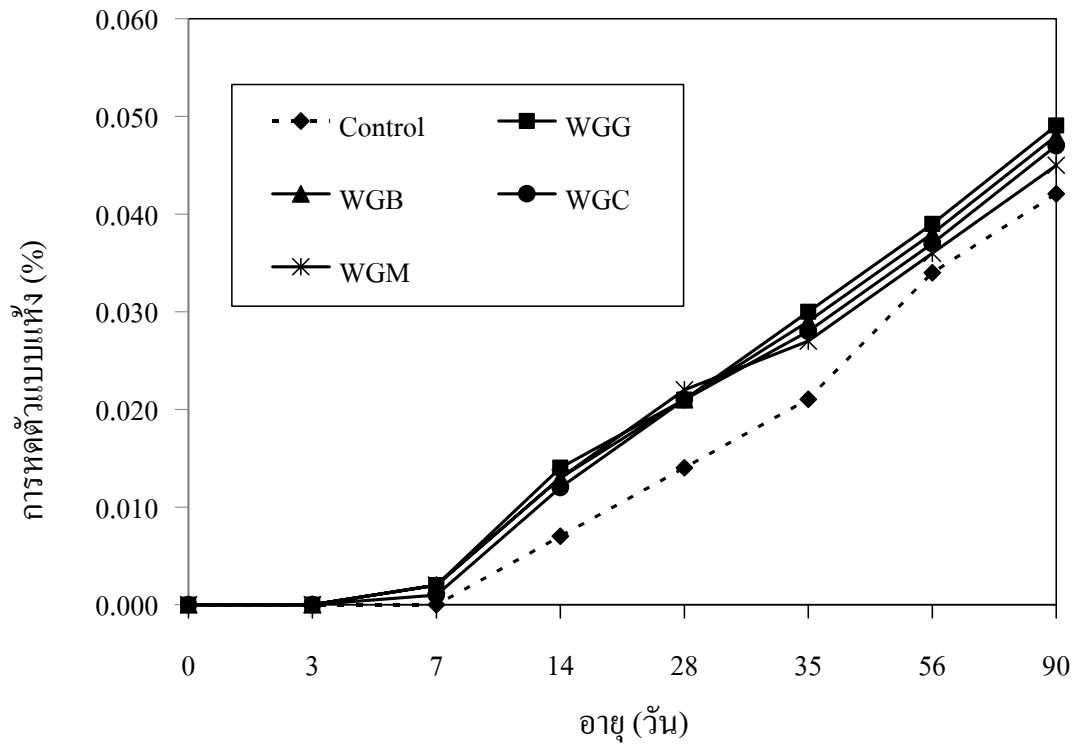


### 3.8 การหัดัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

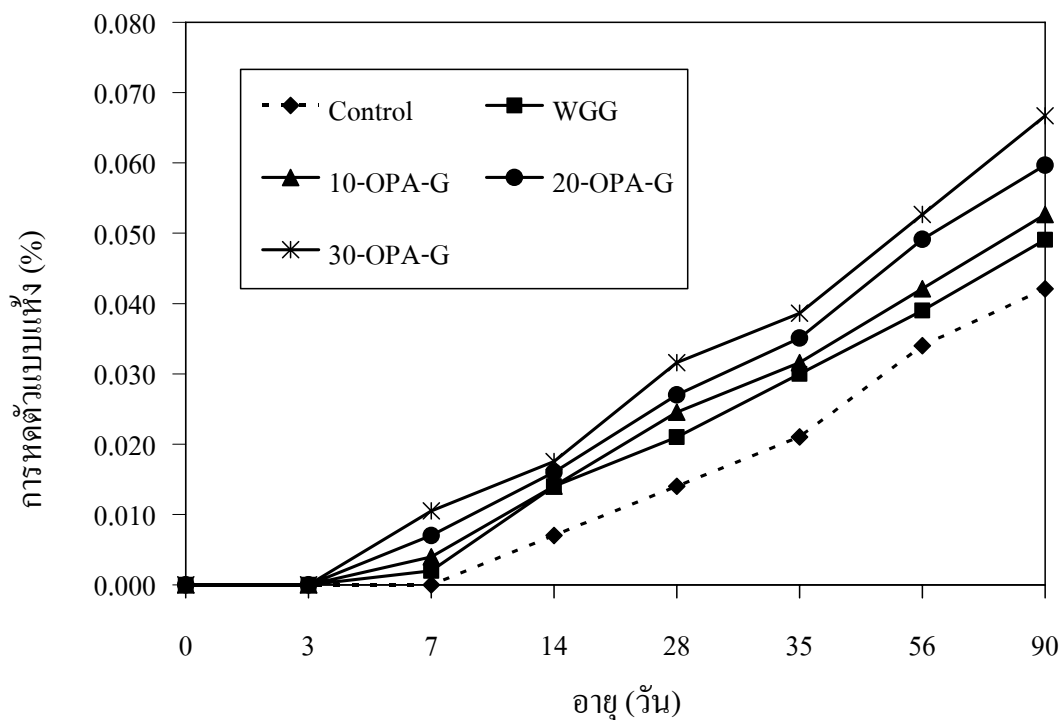
ผลการทดสอบการหัดัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ปกติ และมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 เป็นระยะเวลา 3 7 14 28 35 56 และ 90 วัน ในบรรยากาศควบคุม ดังตารางที่ ก-15 (อยู่ในภาคผนวก ก) และรูปที่ 3.20-3.24 พบว่ามอร์ต้าร์เมื่อผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น มอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกการหัดัวจะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนที่มากขึ้น ความพรุนของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ซีเมนต์เพสต์ต้องการน้ำมาก เมื่อนำมาวางในสภาวะอากาศทั่วไปซึ่งมีความชื้นต่ำ ทำให้มอร์ต้าร์เกิดการสูญเสียน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงดึงน้ำที่อยู่ในโพรงรูเล็ก (Capillary Pore) มาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นผลให้เกิดการหัดัวของซีเมนต์เพสต์

ในแง่อิทธิพลของมวลรวมละเอียด ที่มีต่อการหัดัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ พบว่ามีความสอดคล้องกับการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด โดยจากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 128-97 [78] พบว่าร้อยละการดูดซึมน้ำของทรายและเศษกระจก เท่ากับ 1.52 0.45 0.40 และ 0.45 ตามลำดับ จากรูปที่ 3.20-3.24 พบว่า ที่อายุ 3-90 วัน ค่าเฉลี่ยการหัดัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ควบคุม เท่ากับร้อยละการหัดัว 0.035 มอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกอย่างเดียว เท่ากับร้อยละ 0.000-0.049 และมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 เท่ากับร้อยละ 0.000-0.053 มอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 เท่ากับร้อยละ 0.000-0.060 และมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 เท่ากับร้อยละ 0.000-0.067 โดยค่าเฉลี่ยการหัดัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์มีค่าการหัดัวมากกว่าที่สุดคือ มอร์ต้าร์ที่แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด เนื่องจากว่าในขณะที่บ่มมอร์ต้าร์ในน้ำนอกจากซีเมนต์เพสต์จะดูดซึมน้ำได้แล้ว มวลรวมละเอียดก็ดูดซึมน้ำด้วยเช่นกัน เมื่อนำมอร์ต้าร์มาวางในอากาศจะทำให้ซีเมนต์เพสต์สูญเสียน้ำจึงเกิดการหัดัวแต่เนื่องจากมวลรวมละเอียดเป็นตัวช่วยในการกักเก็บน้ำได้ ซีเมนต์เพสต์จึงสามารถดูดน้ำจากมวลรวมละเอียด เพื่อนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไปได้ เป็นผลให้น้ำในโพรงรูเล็กลดน้อยลง จึงทำให้การหัดัวแบบแห้งลดลงด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามการหัดัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ทั้งสามชนิดยังคงมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C596-96 [79] กำหนดไว้ และ รูปที่ 3.20 พบว่ามอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0 มีการหัดัวมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม เนื่องจากซีเมนต์เพสต์

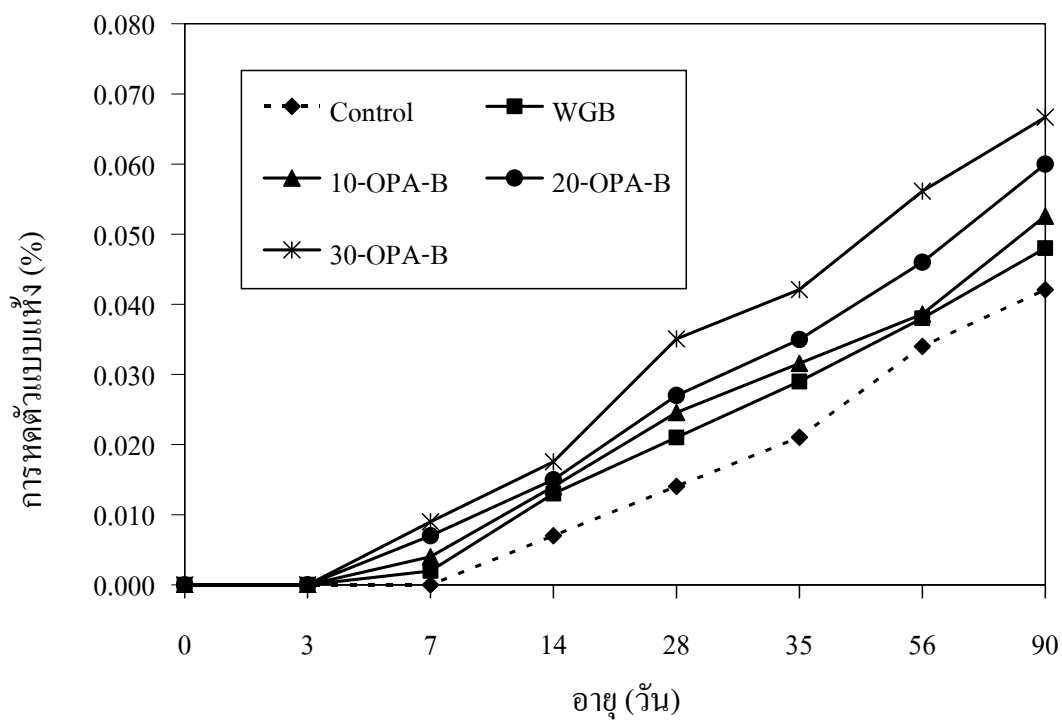
สูญเสียน้ำจืดจืดน้ำจากมวลรวมมาช่วยปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซึมน้ำของมวลรวม



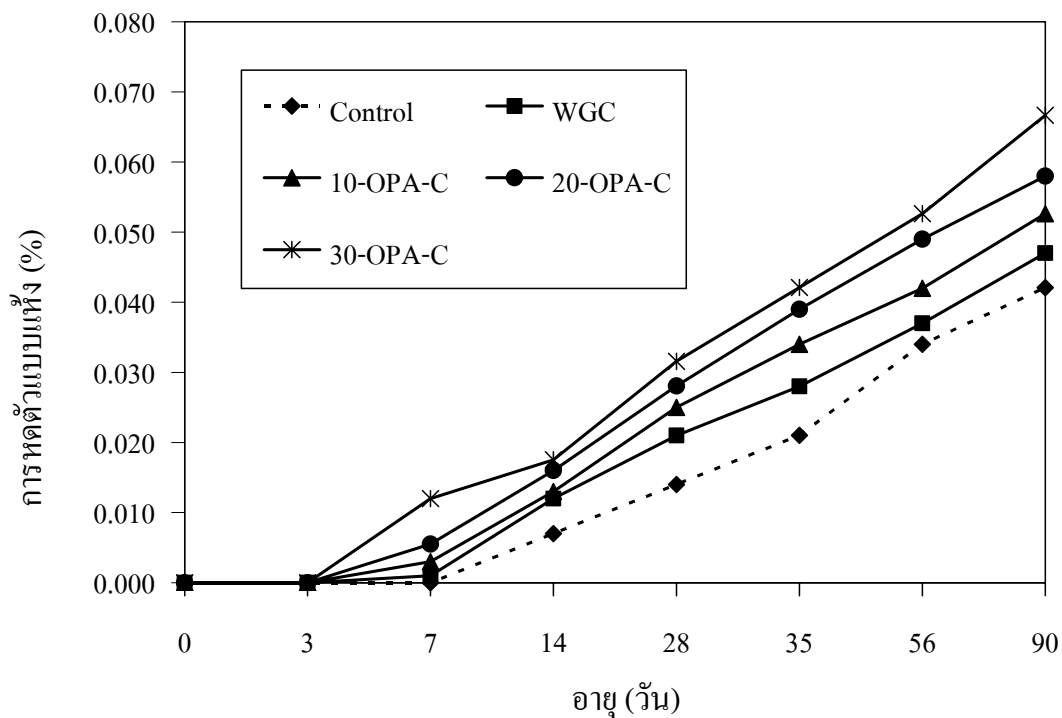
รูปที่ 3.20 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีต่างๆ



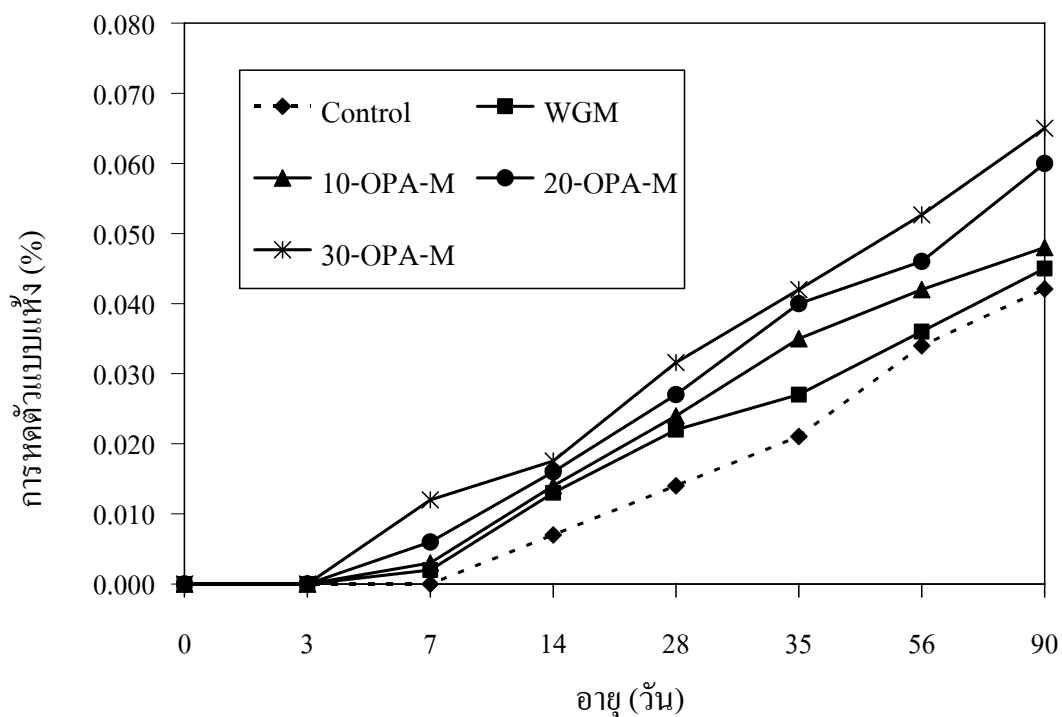
รูปที่ 3.21 การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระเจกสีเขียวผสมเล้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 3.22 การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระเจกสีน้ำตาลผสมเล้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ



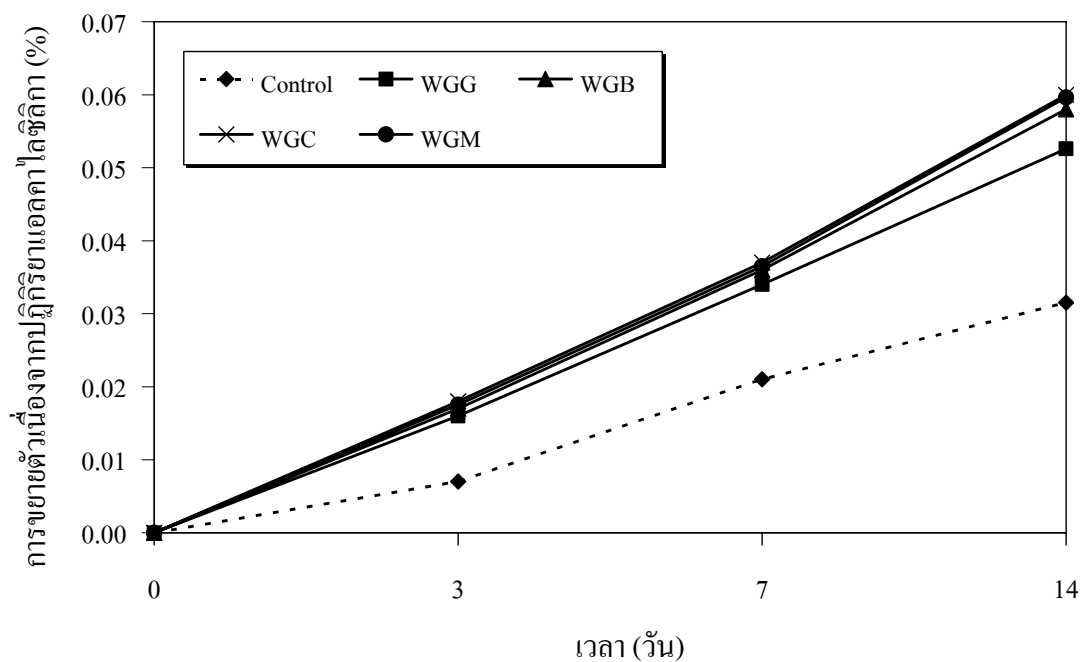
รูปที่ 3.23 การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ดิอาร์ปกติและมอร์ดิอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใสผสมถั่วปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ



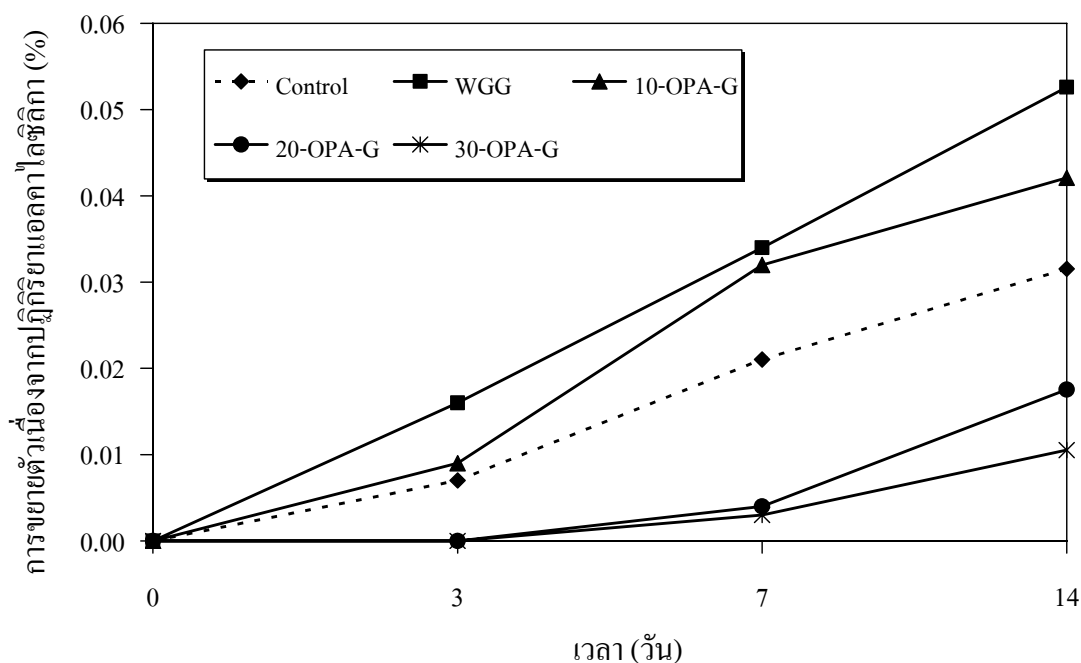
รูปที่ 3.24 การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ดิอาร์ปกติและมอร์ดิอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมผสมถั่วปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ

### 3.9 ความยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

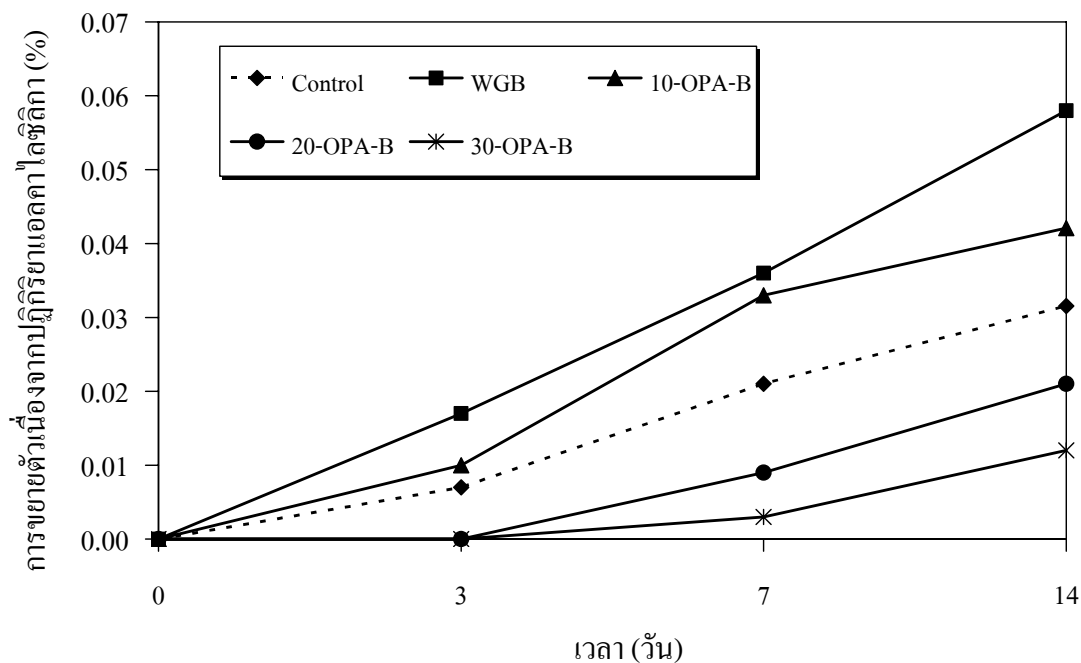
ผลการทดสอบความยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ดังตารางที่ ก-16 (ในภาคผนวก ก) จากการทดสอบความต้านทานปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ใช้แบบหล่อมอร์ตาร์ ขนาด  $2.5 \times 2.5 \times 28.5$  เซนติเมตร หล่อตามมาตรฐาน ASTM C1260-94 [67] โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุประสานต่อมวลรวมมวลรวมเศษกระจก 1:2.25 รูปที่ 3.25 พบว่ามอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกอย่างเดียวมักมีการขยายตัวมากกว่ามอร์ตาร์ปกติ สอดคล้อง Topcu and Canbaz [7] พบว่าเศษแก้วอย่างเดียวยังไม่สามารถต้านทานปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้ เศษกระจกสีใสมักมีการขยายตัวมากที่สุด รองลงมาเศษกระจกสีน้ำตาล และเศษกระจกสีเขียว ตามลำดับสอดคล้องกับ [2] ผลมาจากกระจกมีซิลิกอนไดออกไซด์สูงและประกอปกกับซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นด่างพีเอช ประมาณ 12.5 ซึ่งกระจกในสภาพต่างจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องทำลายโครงสร้างของเศษกระจก รูปที่ 3.26-3.29 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปลาล์มน้ำมันมากขึ้นจะสามารถยับยั้งการขยายตัวของมอร์ตาร์ลดลง เนื่องจากเถ้าปลาล์มน้ำมันมีความพรุนสูงและมีอนุภาคขนาดใหญ่ ไม่เพียงแต่ทำให้ลดปริมาณ  $C_3A$  และยิบซั่มที่ทำให้เกิดการขยายตัวยังทำให้มอร์ตาร์ที่แห้งตัวแล้วมีความพรุนและช่องว่างมากขึ้น มีการเกิดเนื้อปอชโซลานลามขึ้นมาอย่างช้าๆ อุดปิดช่องว่างดังกล่าว ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้การขยายตัวโดยรวมของแท่งมอร์ตาร์เกิดน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Awal and Hussin [14] ได้ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันมากขึ้นถึงร้อยละ 50 ไปลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์สูง โดยปริมาณของซิลิกาที่ได้จาก เถ้าปลาล์มน้ำมันได้ยับยั้งการขยายตัวลดลง ภายในเวลา 14 วัน ดังเช่น เมื่อแทนที่เถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 30 อายุ 14 วัน มอร์ตาร์ขยายตัวร้อยละ 0.011-0.014 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 56-65 และมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกที่ไม่เติมเถ้าปลาล์มน้ำมันขยายตัวร้อยละ 0.053-0.060 มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 65-87 เนื่องจากปูนซีเมนต์มีแคลเซียมออกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่มีสมบัติเป็นด่างและสมบัติทางเคมีของกระจกในสภาพเป็นด่างจะเกิดปฏิกิริยาที่ต่อเนื่องสามารถทำลายโครงสร้างของเศษกระจกได้ [28] นอกจากนี้ในระหว่างบดกระจกทำเป็นมวลรวมมีบางส่วนเกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้นในเนื้อกระจกมีผลทำให้ปฏิกิริยาดังกล่าวรุนแรงขึ้นได้ [80] ทำให้เกิดช่องว่างและทำให้สารละลายแทรกซึมได้ง่ายกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมันจึงทำให้เกิดการขยายตัวในที่สุด วิธีการเติมเถ้าปลาล์มน้ำมันยับยั้งได้ผลเช่นเดียวกับการเติมสารปอชโซลาน เช่น เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุง เหล็กเม็ดบดละเอียด (ground granulated blast-furnace slag) เขม่าซิลิกา (silica fume) [80]



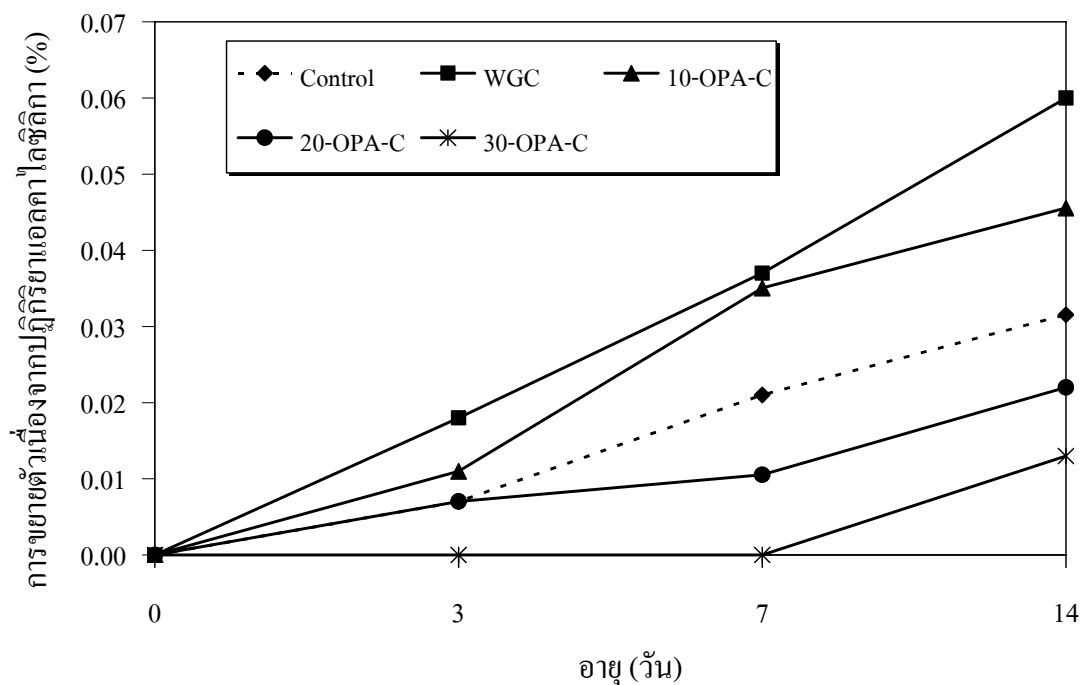
รูปที่ 3.25 การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิติกของมอร์ตังค์ปกติและมอร์ตังค์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีต่างๆ



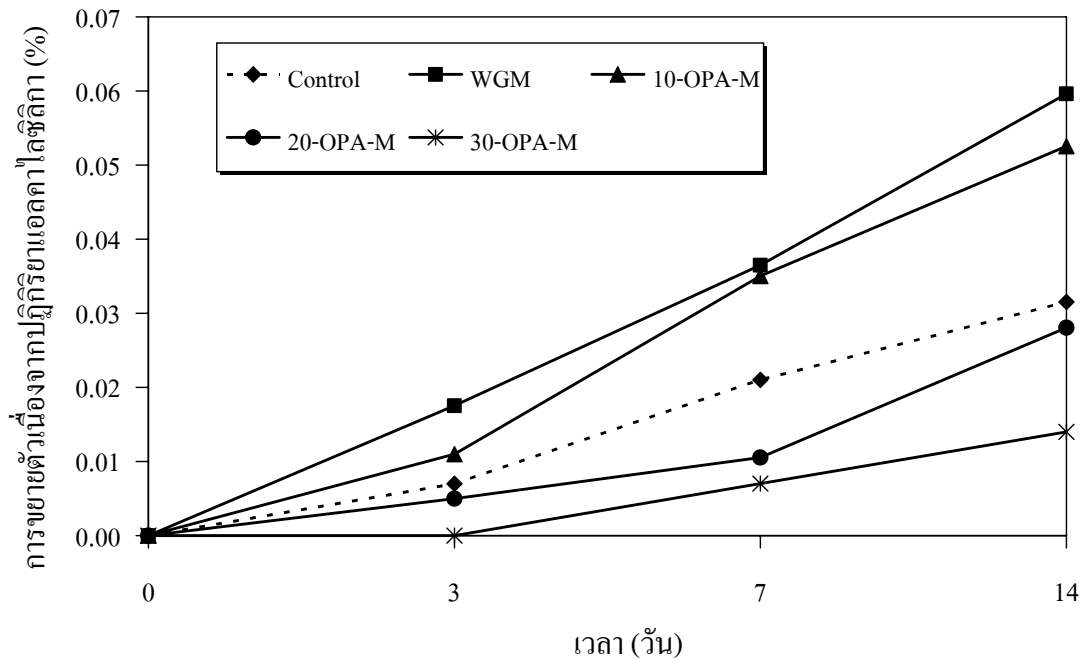
รูปที่ 3.26 การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิติกของมอร์ตังค์ปกติและมอร์ตังค์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีเขียวผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 3.27 การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิติกของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีน้ำตาลผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 3.28 การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิติกของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใสผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ



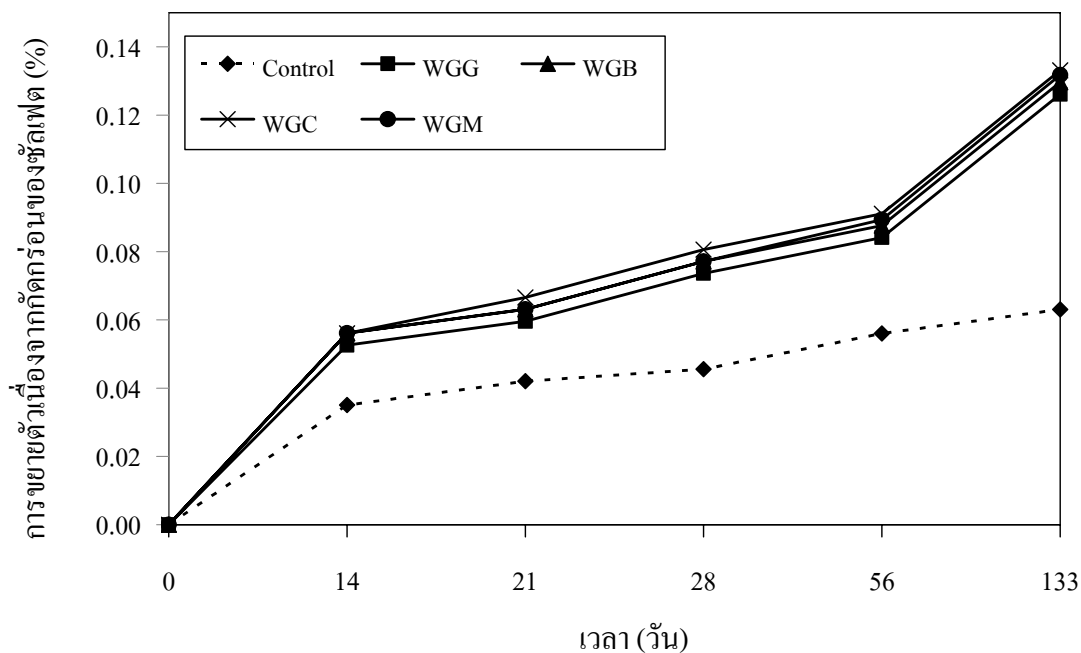
รูปที่ 3.29 การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิติกของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระดูกผสม ผสมถั่วปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ

### 3.10 ความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

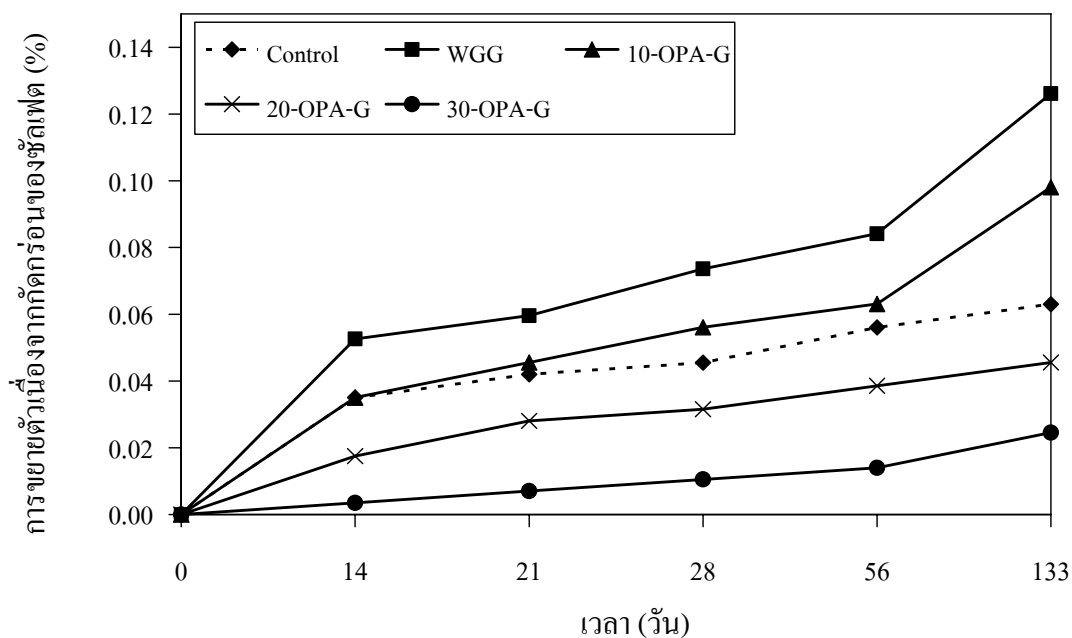
ผลการทดสอบความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังตารางที่ ก-17 (ในภาคผนวก ก) จากการทดสอบความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ใช้แบบหลอมมอร์ดีอาร์ ขนาด 2.5×2.5×28.5 เซนติเมตร โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุประสานต่อมวลรวมมวลรวมเศษกระดูก 1:2.25 นำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 เพื่อสังเกตการขยายตัวและการเปลี่ยนแปลงของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระดูกร้อยละ 100 ผสมถั่วปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน ร้อยละ 0 10 20 และ 30 ดังแสดงในรูปที่ 3.30-3.34 เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวและสังเกตการแตกลายจาระยะเวลา 133 วัน ตามลำดับ รูปที่ 3.30 พบว่ามอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระดูกอย่างเดียวยังมีการขยายตัวมากกว่ามอร์ดีอาร์ปกติ สอดคล้องกับปฏิกิริยาแอลคาไลซิติกและพบว่า การขยายตัวที่อายุ 133 วัน มอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระดูกสีใสมีการขยายตัวมากที่สุด รองลงมาเศษกระดูกสีน้ำตาล และเศษกระดูกสีเขียว ตามลำดับผลมาจากกระดูกมีซิลิกอนไดออกไซด์สูงและประกอบด้วยซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นด่างพีเอช ประมาณ 12.5 ซึ่งกระดูกในสภาพต่างจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องทำลายโครงสร้างของ



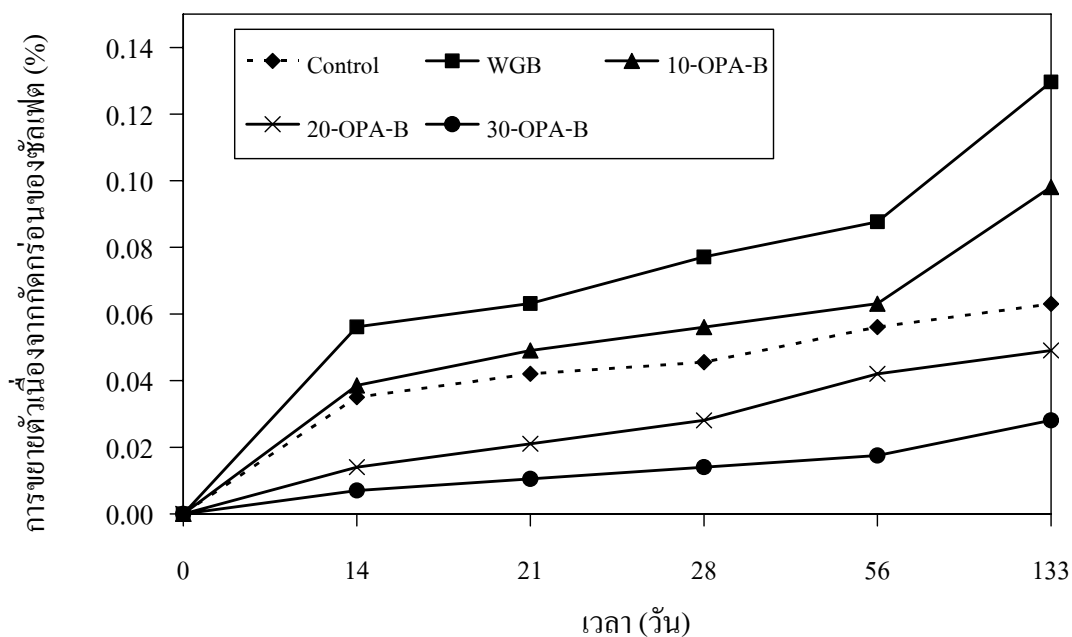
เศษกระจก รูปที่ 3.30-3.34 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันมากขึ้นจะสามารถยับยั้งการขยายตัวของมอร์ตาร์ลดลง เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีความพรุนสูงและมีอนุภาคขนาดใหญ่ไม่เพียงแต่ทำให้ลดปริมาณ  $C_3A$  และยิปซัมที่ทำให้เกิดการขยายตัว ยังทำให้มอร์ตาร์ที่แห้งตัวแล้วมีความพรุนและช่องว่างมากขึ้น มีการเกิดเนื้อปอช โขลานลามขึ้นมาอย่างช้าๆ อุดปิดช่องว่างดังกล่าวด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้การขยายตัวโดยรวมของแท่งมอร์ตาร์เกิดน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Awal and Hussin [14] ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมากขึ้นถึงร้อยละ 50 ไปลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์สูง โดยปริมาณของซิลิกาที่ได้จาก เถ้าปาล์มน้ำมัน ได้ยับยั้งการขยายตัวลดลงดังเช่น เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 อายุป้อม 133 วัน มอร์ตาร์ขยายตัวร้อยละ 0.025-0.035 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 44-60 และมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกที่ไม่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันขยายตัวร้อยละ 0.126-0.133 มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 100-111 เนื่องจากปูนซีเมนต์มีแคลเซียมออกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่มีสมบัติเป็นด่างและสมบัติทางเคมีของกระจกในสภาพเป็นด่างจะเกิดปฏิกิริยาที่ต่อเนื่องสามารถทำลายโครงสร้างของเศษกระจกได้ [28] นอกจากนี้ในระหว่างบดกระจกทำเป็นมวลรวมมีบางส่วนเกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้นในเนื้อกระจกมีผลทำให้ปฏิกิริยาดังกล่าวรุนแรงขึ้นได้ [80] ทำให้เกิดช่องว่างและทำให้สารละลายแทรกซึมได้ง่ายกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน จึงทำให้เกิดการขยายตัวในที่สุด ซึ่งในระยะสั้นอาจยังไม่แสดงผลชัดเจน ต้องอาศัยระยะเวลาผลจึงจะชัดเจนขึ้น ดังเช่นหลายงานวิจัยได้รายงานไว้ต้องดำเนินการเป็นระยะเวลาหลายปี [81] ส่วนการแตกคลายของมอร์ตาร์ยังไม่แสดงผลเท่าที่ควรเนื่องจากขนาดของตัวอย่างมีขนาดเล็กมาก นอกจากนี้เถ้าปาล์มน้ำมันยังยับยั้งการกัดกร่อนของกรดได้อย่างดีอีกด้วย [26]



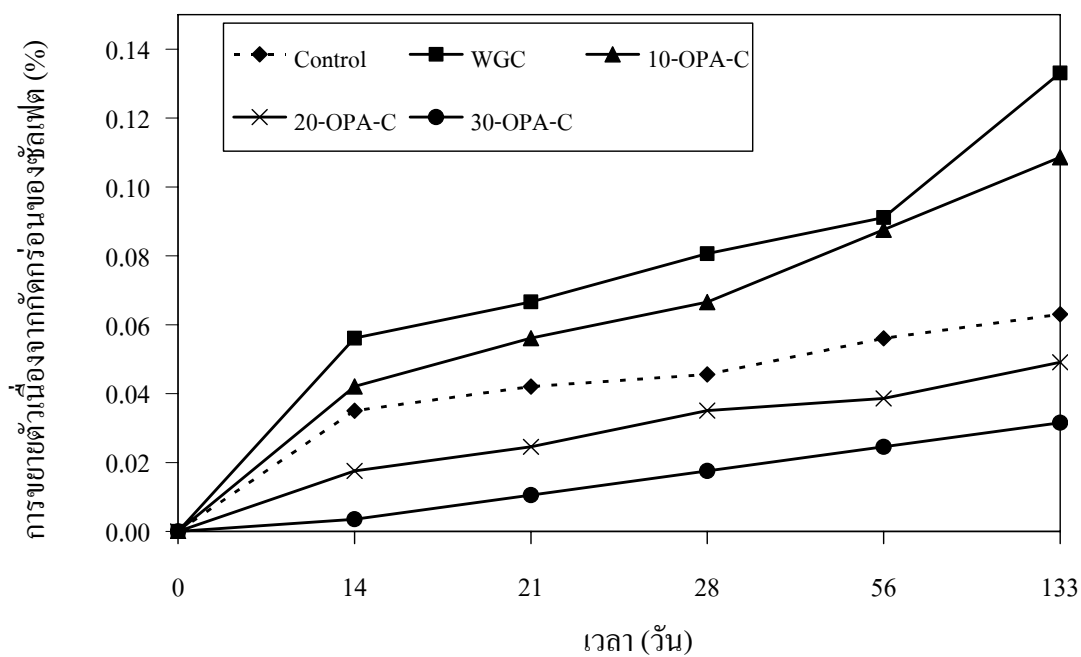
รูปที่ 3.30 การขยายตัวของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีต่างๆ แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



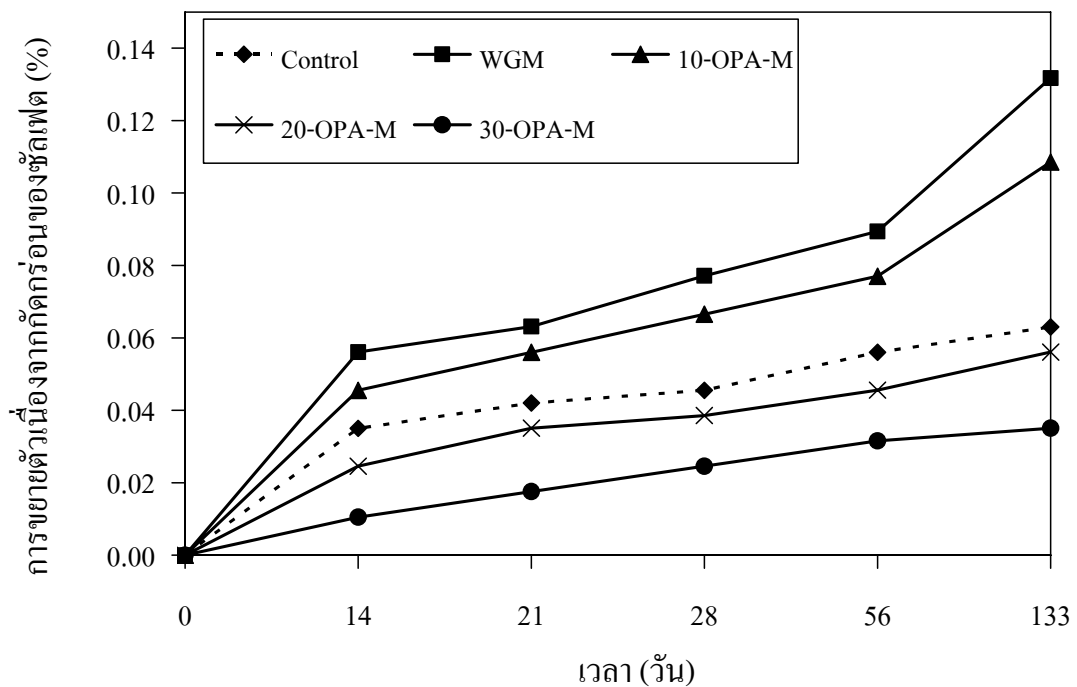
รูปที่ 3.31 การขยายตัวของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีเขียวผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน แซ่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



รูปที่ 3.32 การขยายตัวของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ที่ทรายเป็นด้วยเศษกระจกสีน้ำตาลผสมเจ้าปาล์มน้ำมัน แซในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



รูปที่ 3.33 การขยายตัวของมอร์ดีอาร์ปกติและมอร์ดีอาร์แทนที่ที่ทรายเป็นด้วยเศษกระจกสีใสผสมเจ้าปาล์มน้ำมัน แซในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

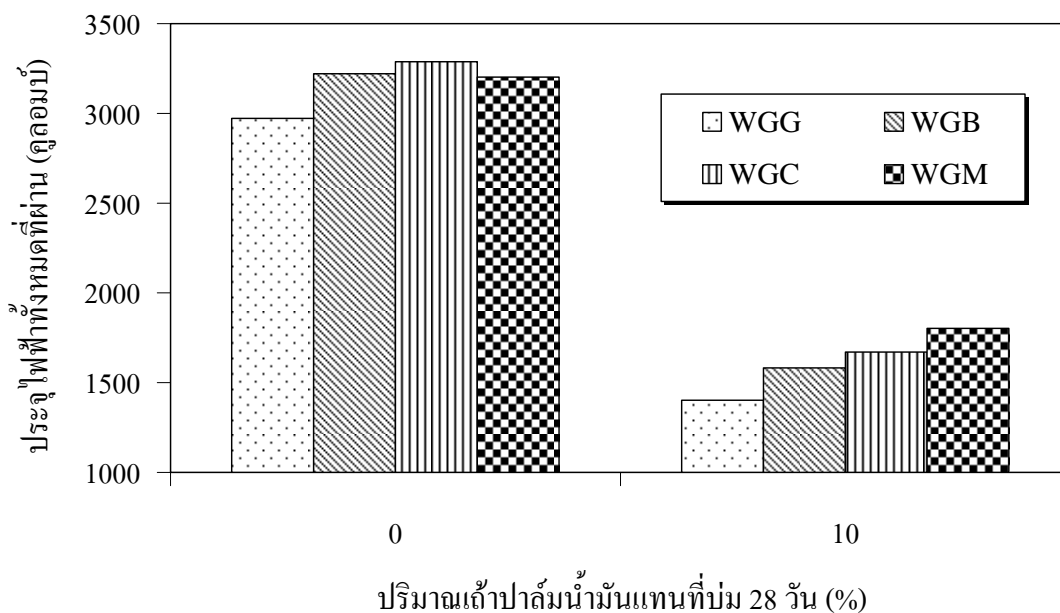


รูปที่ 3.34 การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปกติและมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมผสมแก้วปาล์มน้ำมันแซในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

### 3.11 การแทรกซึมของคลอไรด์ในมอร์ต้าร์

จากการทดลองตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดเกินร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์ควบคุม ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของประจุไอออนคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ใส่มวลรวมเศษกระจกผสมแก้วปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 3.35 พบว่ามอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกอย่างเดียวได้ให้ค่าการผ่านของประจุไฟฟ้าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปกติ อยู่ในระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ปานกลาง ตามเกณฑ์ ASTM C 1202 ได้กำหนดไว้ว่าระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ปานกลางมีค่าประจุไฟฟ้าระหว่าง 2,000-4,000 คูลอมม์ เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 อยู่ในระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำกว่า มอร์ต้าร์ควบคุม ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 (ระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำมีค่าประจุไฟฟ้าระหว่าง 1,000-2,000 คูลอมม์) พบว่าเมื่อแทนที่แก้วปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ทำให้การซึมผ่านประจุไฟฟ้าลดลง เป็นผลมาจากแก้วปาล์มที่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานเข้าไปอุดช่องว่างของเนื้อมอร์ต้าร์ ส่งผลให้เนื้อมอร์ต้าร์อัดแน่นขึ้นและมีความทึบน้ำ จึงทำให้ประจุไฟฟ้าผ่านได้น้อยลงสอดคล้องกับงานวิจัยของพรนารายณ์ [82] พบว่าเมื่อใส่แก้วปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น

สามารถต้านทานประจุไฟฟ้าได้มากขึ้น และพบว่ามอร์ตาร์ใส่มวลรวมเศษกระจกสีเขียวต้านทานได้ดีกว่ามอร์ตาร์กระจกสีชาและสีใส ตามลำดับ (รูปที่ 3.35) เนื่องจากอิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานและยังสอดคล้องกับผลการทดสอบปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา



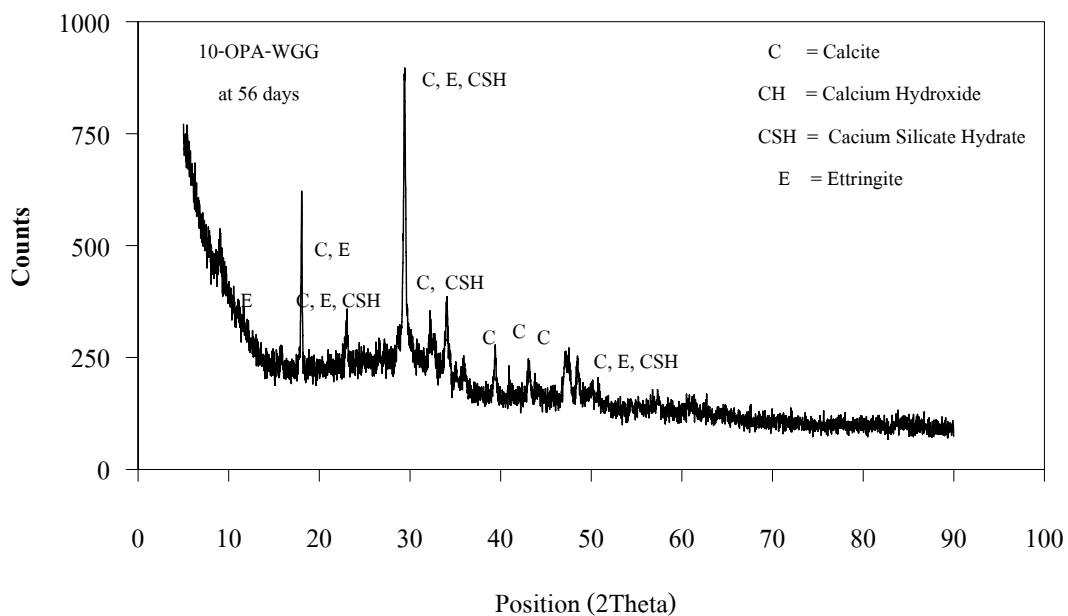
รูปที่ 3.35 ประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ซึมผ่านมอร์ตาร์ทดลองผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10

### 3.12 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของมอร์ตาร์

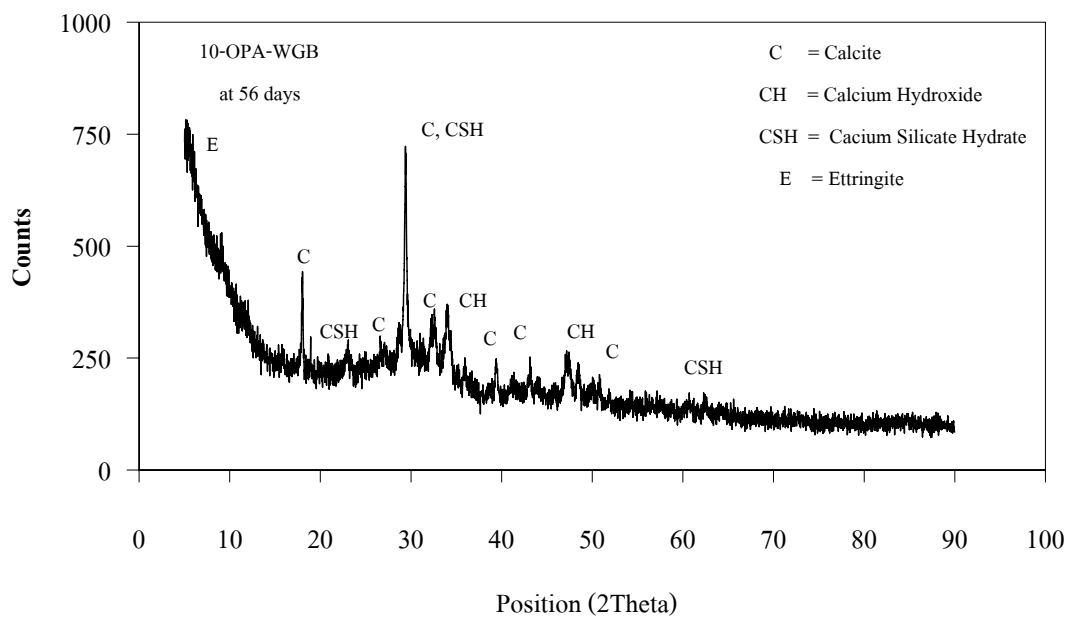
จากการวิเคราะห์ชนิดแร่ของเศษมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบกำลังอัด เฉพาะอัตราส่วน มอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 อายุบ่ม 56 วัน และมีกำลังอัดดีที่สุด เพื่อศึกษาการก่อตัวของวัฏภาคแร่และสารประกอบในมอร์ตาร์ด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ดังรูปที่ 3.36-3.39 จำนวนปริมาณแร่อย่างคร่าว โดยวิธีคำนวณพื้นที่ได้กราฟของแต่ละชนิดรวมกัน ได้ผลดังตารางที่ 3.4 พบว่าเมื่อนำมอร์ตาร์มาผสมในอัตราส่วนต่างๆ พบสารประกอบและแร่ที่ไม่มีมาก่อนเหลือเกิดขึ้นถึง 4 ชนิด คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลไซต์ (C) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) และแอมโมเนียมไนเตรต (E)

ตารางที่ 3.5 ผลวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยวิธี XRD และคำนวณปริมาณแร่ด้วยวิธีได้เส้นลายพิมพ์ของมอร์ต้าร์

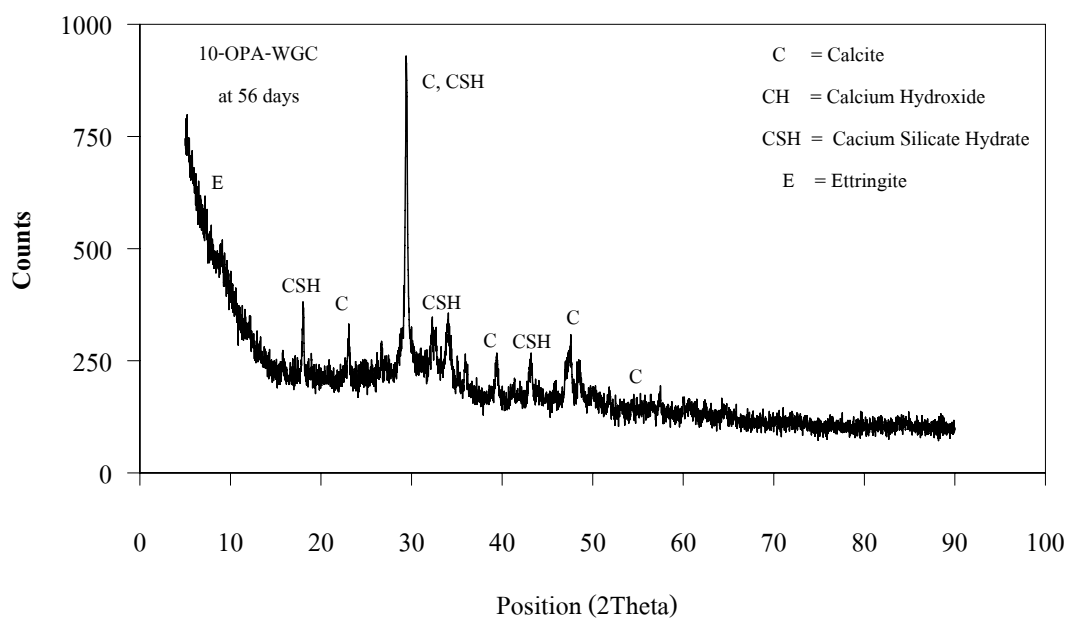
แร่ประกอบ	ชนิดตัวอย่างมอร์ต้าร์			
	10-OPA-G	10-OPA-B	10-OPA-C	10-OPA-M
แคลไซต์ (Calcite, syn -C)	27.50	38.54	46.82	42.66
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide -CH)	10.08	19.91	14.68	16.06
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate -CSH)	28.51	33.91	31.04	26.16
แอดตริงไกต์ (Ettringite, syn -E)	33.91	7.64	7.46	15.12



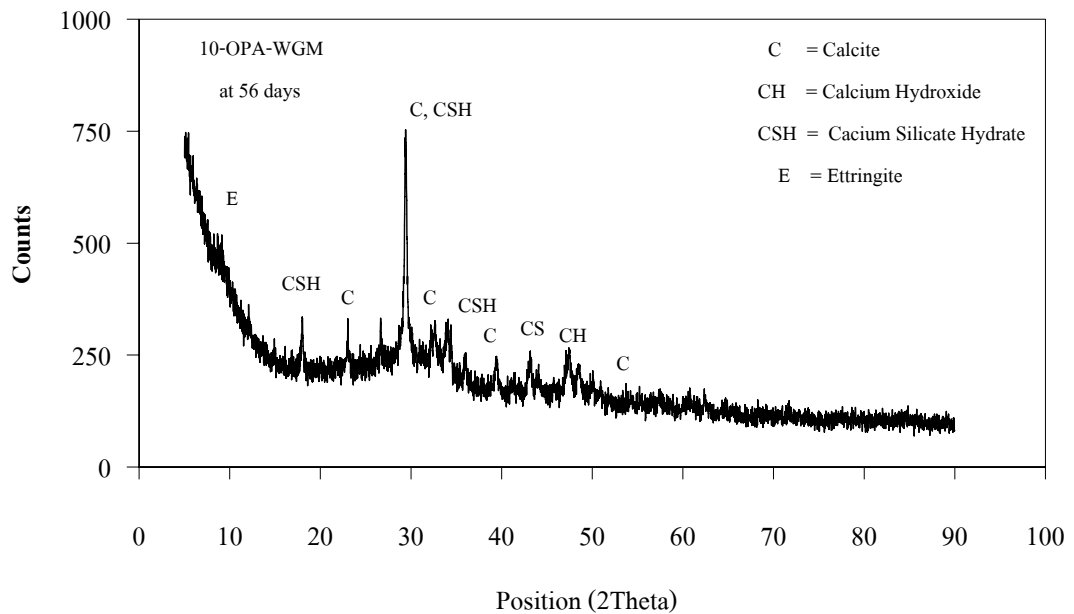
รูปที่ 3.36 ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีเขียวผสม  
ถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56 วัน



รูปที่ 3.37 ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีน้ำตาลผสม  
 ฝ้าปลั้มน้ำมันร้อยละ 10 ที่อายุปอม 56 วัน



รูปที่ 3.38 ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใสผสม  
 ฝ้าปลั้มน้ำมันร้อยละ 10 ที่อายุปอม 56 วัน



รูปที่ 3.39 ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกรวมทุกสีผสม  
 ฝ้าปล้ำมน้ำมันร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56 วัน

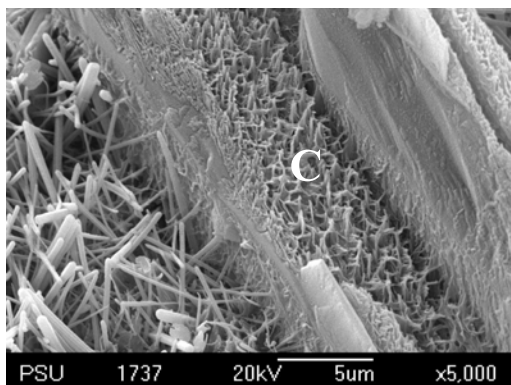
จากผลคำนวณพื้นที่ที่ได้ลายพิมพ์ของแต่ละชนิดแร่ (ตารางที่ 3.4) พบว่ามีสารประกอบที่หลงเหลือ และ/หรือ เกิดขึ้นภายหลังหล่อมอร์ต้าร์คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide-CH) มีปริมาณร้อยละ 10.08-19.91, แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate-CSH) มีปริมาณร้อยละ 26.16-33.91 แอตตริงไกต์ (Ettringite-E) มีปริมาณร้อยละ 7.46-33.91 และแคลไซต์ (Calcite, syn- Ca) มีปริมาณร้อยละ 27.5-46.82 ล้วนแต่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งสิ้น ปริญาและชัย [74] ได้กล่าวไว้ว่าโดยปกติแล้วในซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วันมี CSH อยู่ประมาณร้อยละ 50-70 โดยปริมาตร CH ประมาณร้อยละ 20-25 โดยปริมาตร, CAH และ E ประมาณร้อยละ 10-15 โดยปริมาตร ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ XRD ของมอร์ต้าร์ และยังเป็นการสุ่มตัวอย่างที่ได้จากเศษมอร์ต้าร์ จึงไม่สามารถทราบปริมาณที่แน่นอนของการเกิดสารประกอบข้างต้นที่กล่าวมาได้ สิ่งที่มีหลักฐานได้จากการทดลองความคงทนในสภาพแวดล้อมซัลเฟตและคลอไรด์ ก็คือน่าสันนิษฐานว่าอาจมี CSH บางส่วนได้ไปทำการยับยั้ง ASR ที่เกิดจากเศษกระจกกับปูน ทำให้เกิดปริมาณ CSH น้อยกว่าที่ควรเป็น ในขณะที่เดียวกันกลับพบมีแร่แคลไซต์มากขึ้นเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับผลศึกษาของ Van Rooode et al. [83]



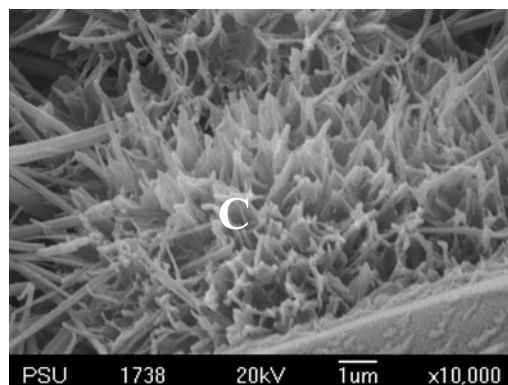
### 3.12 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเศษมอร์ตาร์ ที่นำไปจากตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดสูงสุด และผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56 วัน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคตะเข็บระหว่างรอยต่อของมวลรวมละเอียดผสมแก้วกับวัสดุประสาน (interfacial transition zone) ด้วยการถ่ายภาพขยายกำลังสูง (SEM) ดังรูปที่ 3.40-3.43 โดยศึกษาถึงการเกิดปฏิกิริยาในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10 พบว่ามอร์ตาร์มีช่องว่างหรือโพรงค่อนข้างน้อย เนื้อซีเมนต์เพสต์ค่อนข้างแน่นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างสมบูรณ์ เห็นแอดตริงไคต์ ลักษณะเป็นแท่งหนามแหลม และในบางพื้นที่ที่ทำการส่องเคลือบซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ลักษณะเป็นก้อนผิวพื้นที่รอบปกคลุมด้วยเส้นใยสั้นมากมายคล้ายผลเงาะ เนื่องจากว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณลักษณะคล้ายกับวัสดุปอชโซลาน ซึ่งมี ซิลิกาและอะลูมินาออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซิลิกาและอะลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าปาล์มน้ำมันได้ทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้น เช่นเดียวกับการเติมเถ้าลอยและผงแก้วละเอียดลงไป [60] โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอชโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน จะเห็นผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) แอดตริงไคต์ (E) และ CSH มากมายในทุกพื้นที่ เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันได้เข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ภายหลังจากเกิดไฮเดรชันในรอบแรกเสร็จ และทำให้เกิด CSH รอบสองขึ้น เป็นผลให้เกิดความพรุนและโพรงในเพสต์มากขึ้น ตามลำดับ

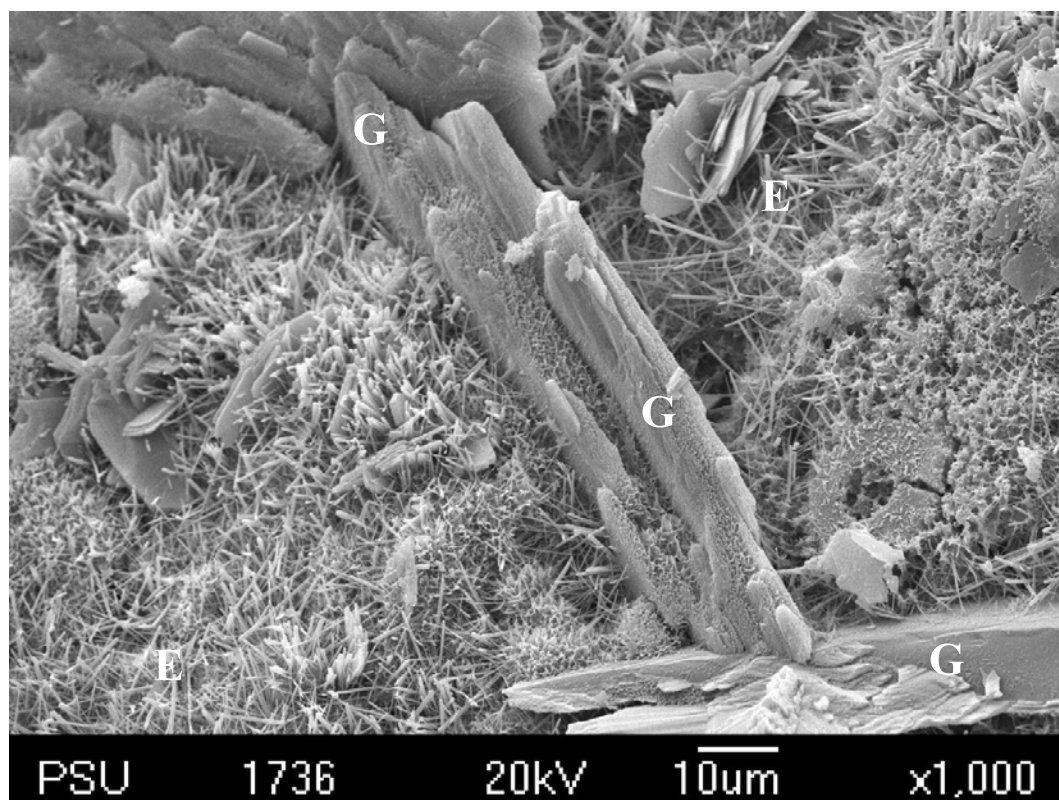
จากการศึกษาภาพถ่ายขยายกำลังสูงเมื่อเปลี่ยนมวลรวมละเอียดจากทรายเป็นเศษกระจกสีเขียว สีน้ำตาล สีใสและรวมทุกสี (รูปที่ 3.40-3.43) และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่อเปลี่ยนมวลรวมละเอียดเป็นเศษกระจกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่พบสารประกอบที่หลงเหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ การพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอชโซลาน ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 พบแท่งแอดตริงไคต์ ผลึก CH, CSH และเกิดอยู่ในซอกโพรงเพสต์อย่างเห็นได้ชัดในพื้นที่ที่ทำการส่องถ่ายภาพ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนมวลรวมละเอียดจากทรายเป็นเศษกระจกในระยะสั้นมีอิทธิพลน้อยต่อการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ แต่โพรงที่เกิดเนื่องจากอิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมันและหากบ่มนานขึ้นก็สามารถพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาปอชโซลานทำให้ลดความเป็นโพรงและได้ศึกษาเพิ่มเติมอิทธิพลของมวลรวมเศษกระจกได้



(ก)

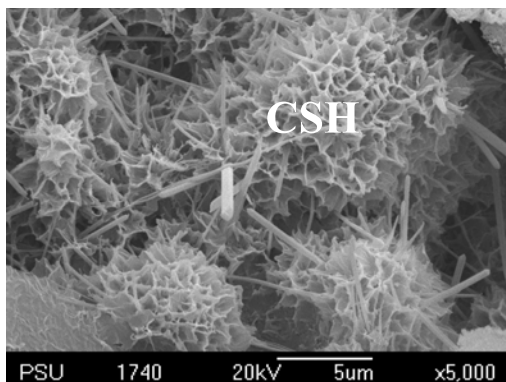


(ข)

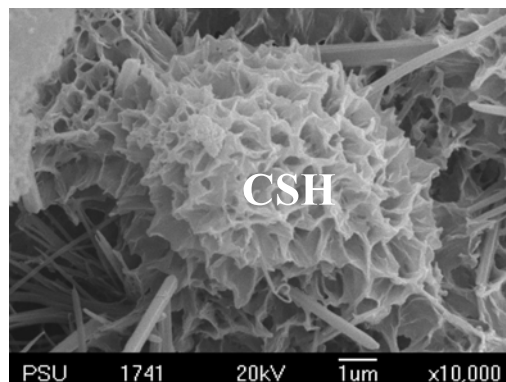


(ค)

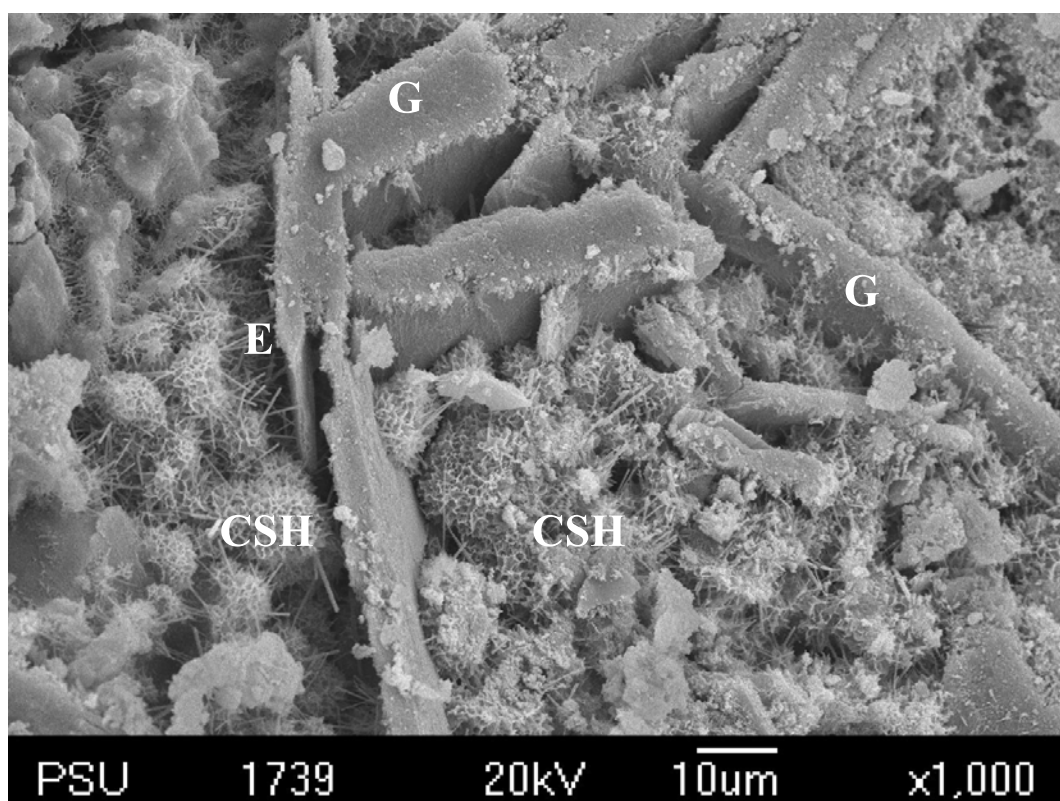
รูปที่ 3.40 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของมอร์ดีนาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีเขียวผสมเข้ากับน้ำมันร้อยละ 10 ปม 56 วัน (ก, ข) กำลังขยาย 5,000, 10,000 เท่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์แทรกในแผ่นกระจก (ค) กำลังขยาย 1,000 เท่า แผ่นเศษกระจกและแอตริงไกด์ (E) เคลือบ



(ก)

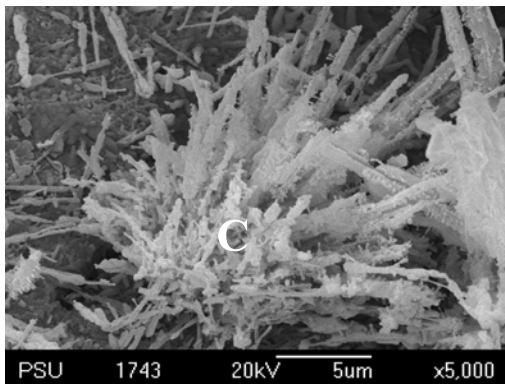


(ข)

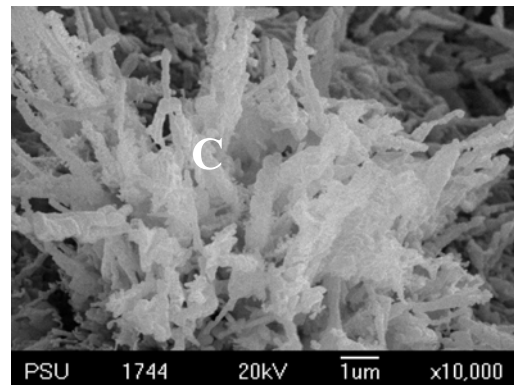


(ค)

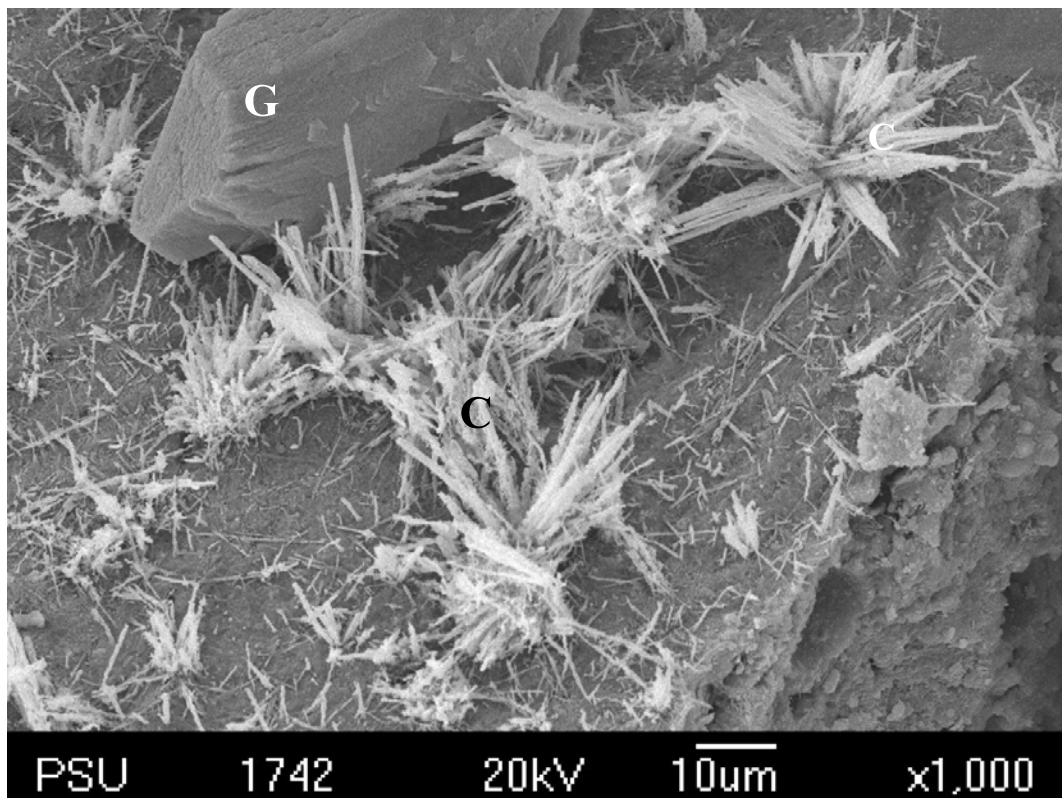
รูปที่ 3.41 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของมอร์ดีนาร์แทนที่ทรายด้วย เศษ กระดาษสีน้ำตาลผสมเถ้าปลั่มน้ำมันร้อยละ 10 ป่ม 56 วัน (ก, ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เคลือบแผ่นกระดาษ (ค) กำลังขยาย 1,000 เท่า แผ่นเศษ กระดาษและแอตริงไคต์ (E) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เคลือบ



(ก)

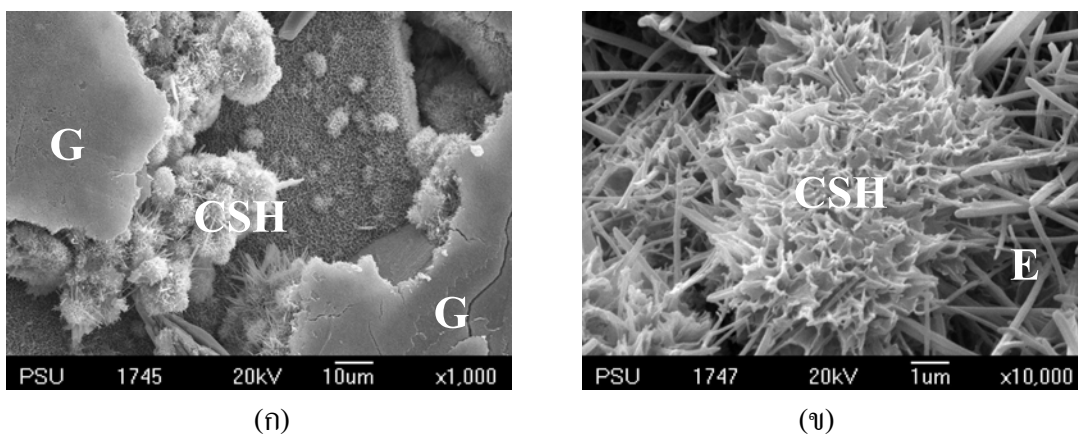


(ข)



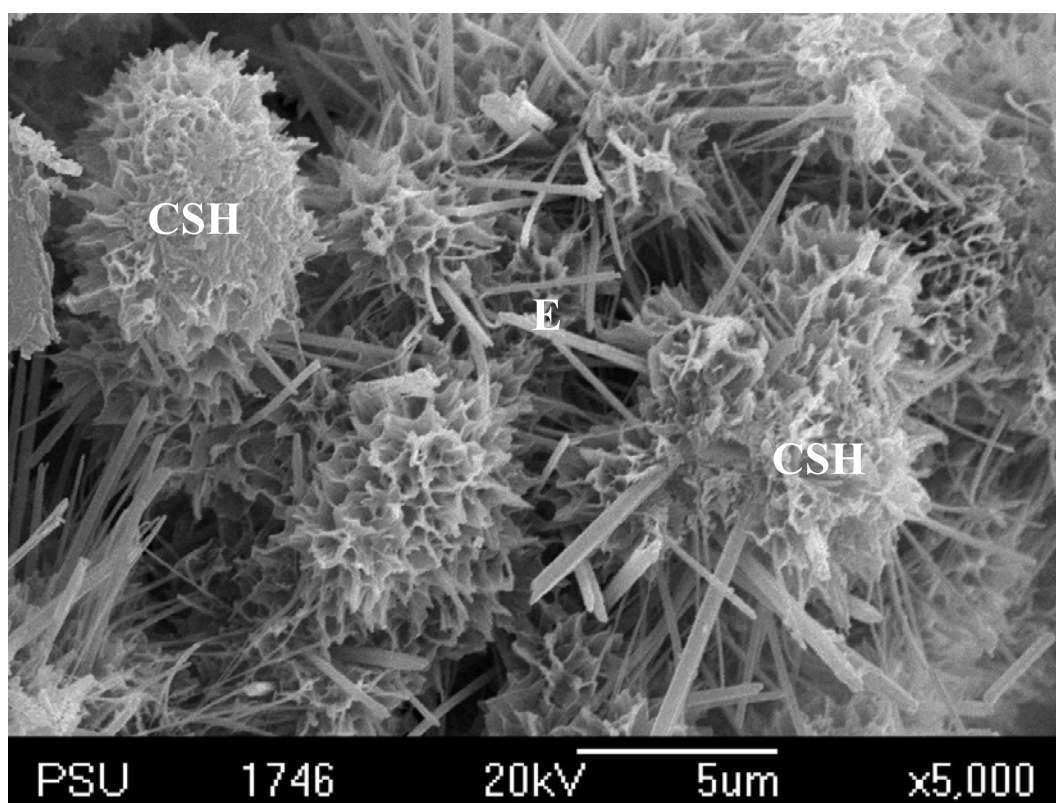
(ค)

รูปที่ 3.42 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของมอร์ต์ัวร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกสีใส (ก, ข) กำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า แคลไซต์ (ค) กำลังขยาย 1,000 เท่า แผ่นเศษกระจกและแคลไซต์



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 3.43 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของมอร์ดีอาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระดูกรวมทุกสีผสมเข้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 บ่ม 56 วัน (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า แผ่นเศษกระดูกและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เคลือบ (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า แอตรึงไคโตรูปีเพิ่มและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เคลือบทั่วแผ่นกระดูก (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า แอตรึงไคโตรูปีเพิ่มและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เคลือบทั่วแผ่นกระดูก

## บทที่ 4

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการนำเศษกระจกสีต่างๆ และ ผสมมาทำเป็นมวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน สามารถได้แนวทางสรุปดังนี้ คือ

1) เศษกระจกที่นำมาใช้ทดแทนมวลรวมละเอียดจัดเป็นมวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดระหว่าง 2.96-2.97 เป็นไปตามมาตรฐาน มอก.566 ด้วยรูปทรงไม่สม่ำเสมอและความหนาแน่นน้อยกว่ามีผลให้มีปริมาณอากาศสูงกว่าและความหนาแน่นและการไหลของมอร์ตาร์ทรายแทนด้วยกระจกต่ำกว่า โดยไม่คำนึงถึงสีของกระจก

2) เถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้เป็นวัสดุประสาน มีองค์ประกอบทางเคมีเทียบเคียงได้กับวัสดุปอซโซลานชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ซึ่งมีลักษณะกึ่งกลม มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูงกว่าปูนซีเมนต์ เป็นผลให้เมื่อนำมาผสมเป็นซีเมนต์เพสต์ทำให้ ซีเมนต์เพสต์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อเคลือบอนุภาคของวัสดุประสานให้อยู่ในสถานะเหลวที่เท่ากัน และสามารถยึดระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ได้ ตามอัตราส่วนผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น

3) การใช้กระจกเป็นทรายในมอร์ตาร์ให้กำลังอัดต่ำกว่า เนื่องมาจากกำลังยึดหน่วงอ่อนที่เขตรอยต่อตะเข็บระหว่าง (interfacial transition zone) อนุภาคกระจกกับเนื้อวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามการดูดซึมน้ำของอนุภาคแก้วได้น้อยมากทำให้ขนาดตัวอย่างมอร์ตาร์เสถียรและส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ทรายแทนด้วยกระจกต่ำลง เช่นกันกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ให้ค่าสูงสุดที่อายุบ่ม 7 28 และ 56 วัน เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ผสมมวลรวมเศษกระจกเหมือนกัน และมีอัตราการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นตามอายุการบ่ม และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ให้กำลังอัดร้อยละ 87-96 อยู่ในเกณฑ์ ASTM C 618

4) มอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์แทนทรายด้วยเศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ พบว่าเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันมากขึ้น การดูดซึมน้ำและการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นลดลง เป็นผลมาจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การดูดซึมน้ำและการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาแน่นลดลง เนื่องจากเถ้าปาล์มมีความถ่วงจำเพาะน้อย

กว่าปูนซีเมนต์และความพรุนภายในมากกว่า ส่วนการกระจายขนาด รูปร่าง และสภาพการอัดแน่นของมวลรวมละเอียด โดยพบว่ามวลรวมละเอียดที่มีขนาดละเอียดดี จะมีช่องว่างน้อยทำให้ความหนาแน่นมาก จากการทดสอบพบว่า มอร์ต้าร์ปกติมีความหนาแน่นมากกว่ามอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจก

5) ปฏิกริยาแอลคาไลซิลิกาและซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปกติน้อยกว่ามอร์ต้าร์แทนที่ทรายด้วยอนุภาคเศษกระจก และขึ้นอยู่กับชนิดสีของเศษกระจกด้วย มอร์ต้าร์อนุภาคเศษกระจกสีขยายตัวเรียงจากน้อยไปมากคือ สีผสม สีเขียว สีชา และสีใส ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณของเถ้าปาล์ม-น้ำมันที่ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ต้าร์มากขึ้น ได้ยับยั้งการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามลำดับสอดคล้องกับหลายงานวิจัย [20, 14]

6) การแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยอนุภาคเศษกระจกได้ทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์สูงขึ้น โดยมอร์ต้าร์ต้านทานดีที่สุดใส่เศษกระจกสีเขียว รองลงไปคือ สีชา สีใส และสีผสม ตามลำดับ แต่เมื่อเติมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ต้าร์ที่ร้อยละ 10 ให้ค่าการผ่านของประจุไฟฟ้าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ทุกชนิดที่ไม่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลมาจากเถ้าปาล์มน้ำมันเข้าไปอุดตามช่องว่างของเนื้อมอร์ต้าร์ให้แน่นและมีความทึบน้ำ จึงทำให้ประจุไฟฟ้าผ่านได้น้อยลง

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) เถ้าปาล์มน้ำมันมีพื้นที่ผิวและความพรุนสูง ทำให้ต้องการน้ำมากในการผสม อาจเป็นผลให้กำลังอัดลดลง หากผสมสารลดน้ำในส่วนผสม อาจจะสามารถเพิ่มกำลังอัดได้
- 2) เศษกระจกที่นำมาใช้ควรจะมีการบดให้ละเอียดกว่านี้ จะช่วยลดการขัดกันของมวลรวมและควรผสมทรายบางส่วน เมื่อนำมาเป็นมวลรวมละเอียด อาจสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มกำลังได้
- 3) ควรทดสอบมอร์ต้าร์ใช้เศษกระจกเป็นมวลรวมผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแล้วบ่มด้วยหม้ออบไอน้ำแรงดันสูง ช่วยให้เห็นผลที่มาจากปฏิกริยาแอลคาไลซิลิกา ได้เร็วและชัดเจนขึ้น
- 4) การวิเคราะห์ตัวอย่างมอร์ต้าร์ด้วยวิธี XRD ควรเลือกเนื้อตัวอย่างมีการปนเปื้อนมวลรวมละเอียดให้น้อยที่สุด ดังนั้นหากต้องการจะคำนึงการทำปฏิกริยาปอซโซลานของเถ้าปาล์ม-น้ำมันควรทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นเพสต์ดูน่าจะเหมาะสมกว่า

## บรรณานุกรม

- [1] กองแผนงานและควบคุมมลพิษ, กรมควบคุมมลพิษ, 2554, รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยประจำปี, เรื่องขยะมูลฝอย หน้า 2-4
- [2] Meyer, C, Baxter, S. and Jin, W. (1996). Alkali-aggregate reaction in concrete with waste glass as aggregate. In: Proceedings of 4th Materials Engineering Conference: Materials for the New Millennium. Reston, Va: ASCE; 1388–1397.
- [3] Meyer, C. and Baxter, S. (1998). Use of recycled glass and fly ash for precast concrete.” Rep. NYSERDA 98-18 (4292-IABR-IA-96) to New York State Energy Research and Development Authority, Dept. of Civil Engrg. and Engrg. Mech., Columbia University, New York.
- [4] Pollery, C., Cramer, S.M. and De La Cruz, R.V. (1998). Potential for using waste glass in Portland cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(4): 210-219.
- [5] Bazant, Z.P., Zi, G. and Meyer, C. (2000). Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes. *Journal of Engineering Mechanics*, 126: 226-232.
- [6] Byars, E.A., Morales-Hernandez, B. and Zhu, H.Y. (2004). Waste glass as concrete aggregate and Pozzolan. *Concrete*, 38(1): 41-44.
- [7] Topcu, I.B. and Canbaz, M. (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, 34(2): 267–274.
- [8] Shao, Y., Lefort, T., Moras, S. and Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glasses. *Cement and Concrete Research*, 30(1): 91–100.
- [9] Dyer, T.D. and Dhir, R.K. (2001). Chemical reactions of glass cullet used as cement component. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(6): 412–417.
- [10] Dhir, R, Dyer, T, Tano, A. and Cui, Y. (2004). Towards maximizing the value and sustainable use of glass. *Concrete*, 38(1): 38–40.
- [11] Shayan, A. and Xu, A. (2006). Performance of powder as pozzolnsnci materials in concrete: A filed trail on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, 36(3): 457–468.
- [12] Shi, C, Wu, Y., Shao, Y. and Riefler, C. (2004). Alkali-aggregate reaction of concrete containing ground glass powder. In: Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete; 2004. p. 789–95.



- [13] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2554). สำนักงานสถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย. กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร.
- [14] Awal, A.S.M.A. and Hussin, M.W. (1997). The effectiveness of palm oil fuel ash in preventing expansion due to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Composites*, 19(4): 367-372.
- [15] จักกฤษณ์ สุนทรานุรักษ์ (2554). การใช้เศษขวดแก้วใส่ทำเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตผสมเ้าชานอ้อย. รายงานโครงการนวิศวรรรมที่ 4-MnE 2553/2 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [16] Ismail, Z. and AL-Hashmi, E.A. (2009). Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concret. *Waste Management*, 29(2): 665-659.
- [17] เครื่องซีเมนต์ไทย, 2548, ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน, บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรมจำกัด.
- [18] ASTM C618-00. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural pozzolan for use as a Mineral Admixture in concrete, Annual Book of ASTM Standard, 2001.
- [19] ชัย จาคูพิทักษ์กุล, “เ้าปาล์มน้ำมัน: วัสดุปอชโซลันในอนาคตสำหรับคอนกรีต”. วารสารคอนกรีต, ฉบับที่ 9 ประจำเดือนเมษายน 2552,
- [20] Tay, J.-H. and Show, K.-Y. (1995). Use of ash derived from oil-palm waste incineration as a cement replacement material. *Resources, Conservation and Recycling*, 13(1): 27-36.
- [21] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธ์ แววคุ้ม และ ชัย จาคูพิทักษ์กุล, 2546, “วัสดุปอชโซลันชนิดใหม่จากเ้าปาล์มน้ำมัน”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 26, ฉบับที่ 4, หน้า 459-473.
- [22] Tay, J.H. (1990). Ash from Oil Palm Waste as Concrete Material, *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, 2(2): 94-105.
- [23] Awal, A.S.M.A. and Shehu, I.A. (2013). Evaluation of heat of hydration of concrete containing high volume palm oil fuel ash. *Fuel*, 105, 728-731.
- [24] วันชัย สะตะ, ชัย จาคูพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546, “การใช้เ้าปาล์มน้ำมันและเ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง”, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 27-32.

- [25] ชิริสิทธิ์ แซ่ตั้ง, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติ โกมล, 2547, “การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติแห่งชาติครั้งที่ 2, 28-29 ตุลาคม 2547, หน้า 17-22.
- [26] อภิรักษ์ นพรัตน์ และคุณพล ตันนโยภาส, 2551, “ผลกระทบของหินฝุ่นแกรนิตและเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีต่อกำลังอัดและความคงทนต่อการคดของมอร์ต้าร์”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, 14-16 พฤษภาคม 2551, หน้า MAT 19-24.
- [27] McLellan, G.W. and Shand, E.B. (1984). *Glass Engineering Handbook*, McGraw-Hill, Inc.
- [28] <http://www2.mtec.or.th/th/research/gsat/glassweb/gsat.asp>, แหล่งที่มาหน่วยบริการข้อมูลวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว (GSAT), ข้อมูลแก้ว: สืบค้นเมื่อ 10 มิถุนายน 2552
- [29] Diamond, S. (1983). On the glass present in low-calcium and high-calcium fly ashes. *Cement and Concrete Research*, 13(3): 459–463.
- [30] Ward, C.R. and French, D. (2006). Determination of glass content and estimation of glass composition in fly ash using quantitative X-ray diffractometry. *Fuel*, 85(16): 2268–2277.
- [31] Ibáñez, J., Font, O., Moreno, N., Elvira, J.J., Alvarez, S. and Querol, X. (2013). Quantitative Rietveld analysis of the crystalline and amorphous phases in coal fly ashes *Fuel*, 105, 314-317.
- [32] Zachariassen, W.H. (1932). The atomic arrangement in glass. *Journal of the American Chemical Society*, 54(10): 3841–3851.
- [33] Pike, R.G., Hubbard, D. and Newman, E.S. (1960). Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction. *Highway Research Board Bulletin*, 1(275): 39–44.
- [34] Schmidt, A. and Saia, W.H.F. (1963). Alkali-aggregate reaction tests on glass used for exposed aggregate wall panel work. *ACI Materials Journal*, 60, 1235–1236.
- [35] Phillips, J.C., Cahn, D.S. and Keller, G.W. (1972). Refuse glass aggregate in Portland cement. In *Proceedings of 5th Mineral Waste Utilization Symposium*. Chicago, III: IIT Research Institute; p. 385–90.
- [36] Bazant, Z.P., Jin, W. and Meyer, C. Microfracturing caused by alkali-silica reaction of waste glass in concrete. In: Mihashi
- [37] Chen, C.H., Huang, R., Wu, J.K. and Yang, C.C. (2006). Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. *Cement and Concrete Research*, 36(3): 449–456.

- [38] Meyer, C. and Baxter, S. (1997). Use of Recycled Glass for Concrete Masonry Blocks Final Report 97-15. Albany, New York: New York State Energy Research and Development Authority.
- [39] Chen, C.H., Huang, R., Wu, J.K. and Yang, C.C. (2006). Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. *Cement and Concrete Research*, 36(3): 449–456.
- [40] Corinaldesi, V., Gnappi, G., Moriconi, G. and Montenero, A. (2005). Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. *Waste Management*, 25(2): 197–201.
- [41] Terro, M.J. (2006). Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. *Building and Environment*, 41(5): 633–639.
- [42] ASTM C666/C666M-03. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, 2008.
- [43] Park, S.-B, Lee, B.C. and Kim, J.-H., (2004). Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(12): 2181–2189.
- [44] Shayan, A. and Xu, A. (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1): 81–89.
- [45] Figg, J.W. (1981). Reaction between Cement and Artificial Glass in Concrete. In: *Proceedings of Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Cape Town, South Africa, paper S252/7, 19 p.
- [46] Jin, C., Meyer, C. and Baxter, S. (2000). “Glascrete”-Concrete with glass aggregate. *ACI Materials Journal*, 97(2): 208–213.
- [47] Zhu, H. and Byars, E.A. (2004). Alkali-silica reaction of recycled glass in concrete, alkali-aggregate reaction in concrete. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, (); 811–820.
- [48] Shi, C., Wu, Y., Riefler, C. and Wang, H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*, 35(5): 987–993.
- [49] Ducman, V., Mladenovic, A. and Suput, J.S. (2002). Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*, 32(2): 223–226.

- [50] Collins, R.J. and Bareham, P.D. (1987). Alkali-silica reaction: suppression of expansion using porous aggregate. *Cement and Concrete Research*, 17(1): 89–96.
- [51] Tonayopas, D. and Thanawisitsawas, C. (2008). Influence of ground waste float glass and oil palm fiber fuel ash mixed with areca-nut fiber solution on mortar properties. 2nd International Workshop and Conference on Earth Resources Technology: Stepping towards Sustainable Mining, Metallurgical, and Petroleum Technology Development. April 3-4, 2008, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, pp. 31-35.
- [52] Idir, R., Cyr, M. and Tagnit-Hamou, A. (2010). Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1309-1312.
- [53] Du, H. and Tan, K.H. (2013). Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali–silica reaction and mitigation methods. *Cement and Concrete Composites*, 35(1): 118-126.
- [54] Kou, S.C. and Poon, C.S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with recycle glass aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 31(2): 107-113.
- [55] Park, S.-B. and Lee, B.-C. (2004). Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers. *Cement and Concrete Research*, 34(7): 1145-1152.
- [56] Limbachiya, M.C. (2009). Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2): 1078-1083.
- [57] Ling, T.-C., Poon, C.-S. and Kou, S.-C. (2011). Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars. *Cement and Concrete Composites*, 33(8): 848-854.
- [58] Corinaldesi, V., Gnappi, G., Moriconi, G. and Montenero, A. 2005. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. *Waste Management*, 25(2): 197–201.
- [59] Lam, C.-S., Poon, C.-S. and Chan, D. (2007). Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass – ASR consideration. *Cement & Concrete Composites*, 29(8): 616–625.
- [60] Ozkan, O. and Yuksel, I. (2008). Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 22(6): 1288-1298.
- [61] Topçu, I.B., Boga, A.R. and Bilir, T. (2008). Alkali–silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . *Waste Management*, 28(5): 878-884.

- [62] Taha, B. and Nounu, G. (2008). Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, 22(5): 713–720.
- [63] ASTM C187. Standard Test Methods for Normal Consistency of Hydraulic Cement, 2001.
- [64] ASTM C191. Standard Test Methods for Time of setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, 2001.
- [65] ASTM C109. Standard Test Methods for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar, 2001.
- [66] ASTM C 596-98. Standard Test Methods for Drying Shrinkage of Mortar Containing Portland Cement, 1998.
- [67] ASTM C1260. Standard Test Methods for Potential Alkali Reactivity of Aggregate (Mortar-Bow Method), 2001.
- [68] ASTM, C1202-01: Standard Test Methods for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2001.
- [69] Yin, C.Y., Kadir, S.A.S.A., Lim, Y.P., Syed-Arifin, S.N. and Zamzuri, Z. (2008). An investigation into physicochemical characteristics of ash produced from combustion of oil palm biomass waste in a boiler. *Fuel Processing Technology*, 89(7): 693-696.
- [70] Tonnayopas, D. and Laopreechakul, S. (2006). Utilization of oil palm shell ash as mineral admixture in Portland cement mortar, Proc. 1<sup>st</sup> Inter. Conf. Hazardous Waste Management for a Sustainable Future, Century Park Hotel, Bangkok, 10-12 Jan 2006, 7p.
- [71] Awal, A.S.M.A. and Hussin, M.W. 1997, The effectiveness of palm oil fuel ash in preventing expansion due to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Composites*, 19(4), 367-372
- [72] Awal, A.S.M.A. and Shehu I.A. 2013. Evaluation of heat of hydration of concrete containing high volume palm oil fuel ash. *Fuel*, 105, 728-731.

- [73] Johari, M.A.M., Zeyad, A.M., Bunnori, N.M. and Ariffin, K.S. (2012). Engineering and transport properties of high-strength green concrete containing high volume of ultrafine palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 30, 281-288.
- [74] ปรินญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, (2547). ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และ คอนกรีต, สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.).
- [75] ASTM C33-01. Standard Specification Concrete Aggregates, .
- [76] ASTM C29/C 29M-97. Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate, 1998.
- [77] Tay, J.H. (1991). Complete Reclamation of Oil Palm Waster. *Resources Conservation and Recycling*, 5(4): 383-392.
- [78] ASTM C 128-97. Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, 1998.
- [79] ASTM C 596-82 Standard Test Methods for Drying Shrinkage of Mortar Containing Portland Cement, 1998.
- [80] Maraghechi, H., Shafaatian, S.-M.-H., Fischer, G. and Rajabipour, F. (2012). The role of residual cracks on alkali silica reactivity of recycled glass aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 34(1): 41-47.
- [81] Du H. and Tan K.H. 2013. Use of\_waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali–silica reaction and mitigation methods. *Cement and Concrete Composites*, 35(1): 118-126.
- [82] พรนราชน์ บุญราศรี และคุณพล ตันนโยภาส. 2551. อิทธิพลปอชโซลานของเถ้าไยปาล์ม น้ำมันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13 รร.จอมเทียน ปาล์มบิข พัทยา จ.ชลบุรี 14-16 พฤษภาคม 2551 หน้า (MAT) Page 7 – (MAT) Page 12. (CD-ROM)
- [83] Van Roode, M., Douglas, E. and Hemmings, R.T. (1987). X-ray diffraction measurement of glass content in fly ashes and slags. *Cement and Concrete Research*, 17(2): 183–97.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก.**

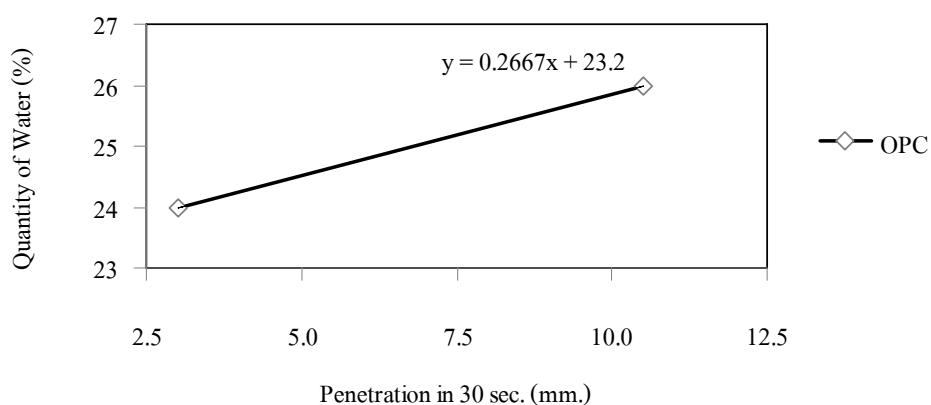
ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุและก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์



ตารางที่ ก-1 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ของซีเมนต์ปกติ (OPC)

Test No.	Portland cement : Oil palm ash	Water (%)	Penetration 30 Sec. (mm.)
1	100 : 0	24	3.0
2		26	10.5

Normal Consistency = 25.86 %

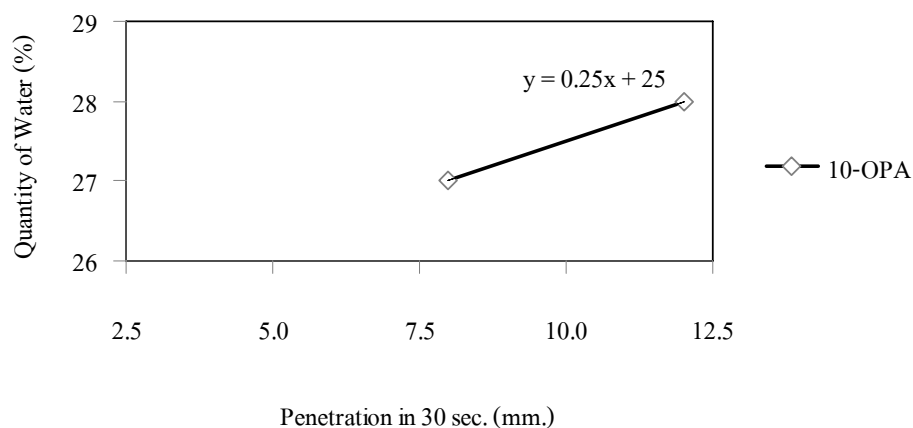


รูปที่ ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกตัวของเข็มไวกัดกับปริมาณน้ำของซีเมนต์ปกติ (OPC)

ตารางที่ ก-2 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้า  
ปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (OPA10)

Test No.	Portland cement : Oil palm ash	Water (%)	Penetration 30 Sec. (mm.)
1	90 : 10	27	8.0
2		28	12.0

Normal Consistency = 27.5 %

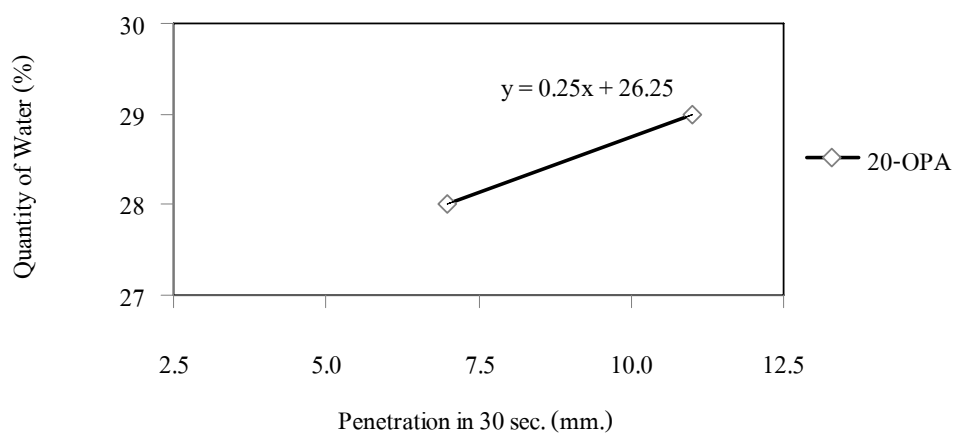


รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกตัวของเข็มไวกัดกับปริมาณน้ำของซีเมนต์เพสต์  
ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (OPA10)

ตารางที่ ก-3 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ของซีเมนต์เฟสค์ที่ผสมเถ้า  
 ปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 (OPA20)

Test No.	Portland cement : Oil palm ash	Water (%)	Penetration 30 Sec. (mm.)
1	80 : 20	28	7.0
2		29	11.0

Normal Consistency = 28.75 %

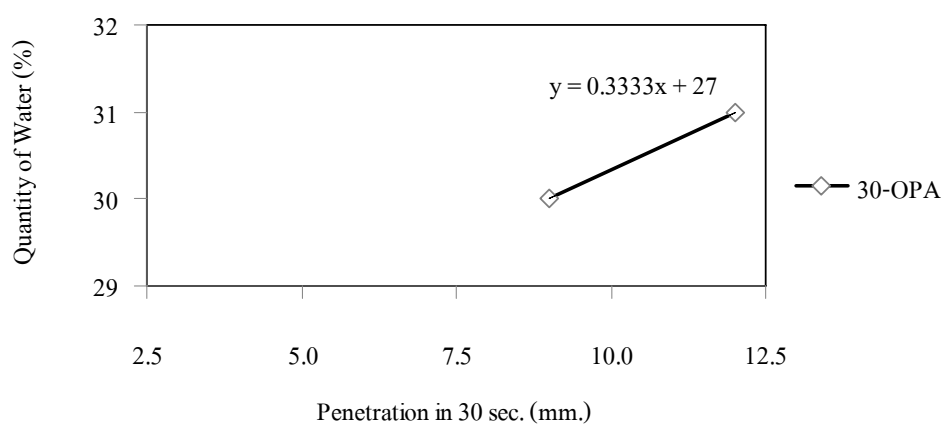


รูปที่ ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกตัวของเข็มไวนด์กับปริมาณน้ำของซีเมนต์เฟสค์ที่  
 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 (OPA20)

ตารางที่ ก-4 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ของซีเมนต์เฟสค์ที่ผสมเถ้า  
ปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 (OPA30)

Test No.	Portland cement : Oil palm ash	Water (%)	Penetration 30 Sec. (mm.)
1	70 : 30	30	9.0
2		31	12.0

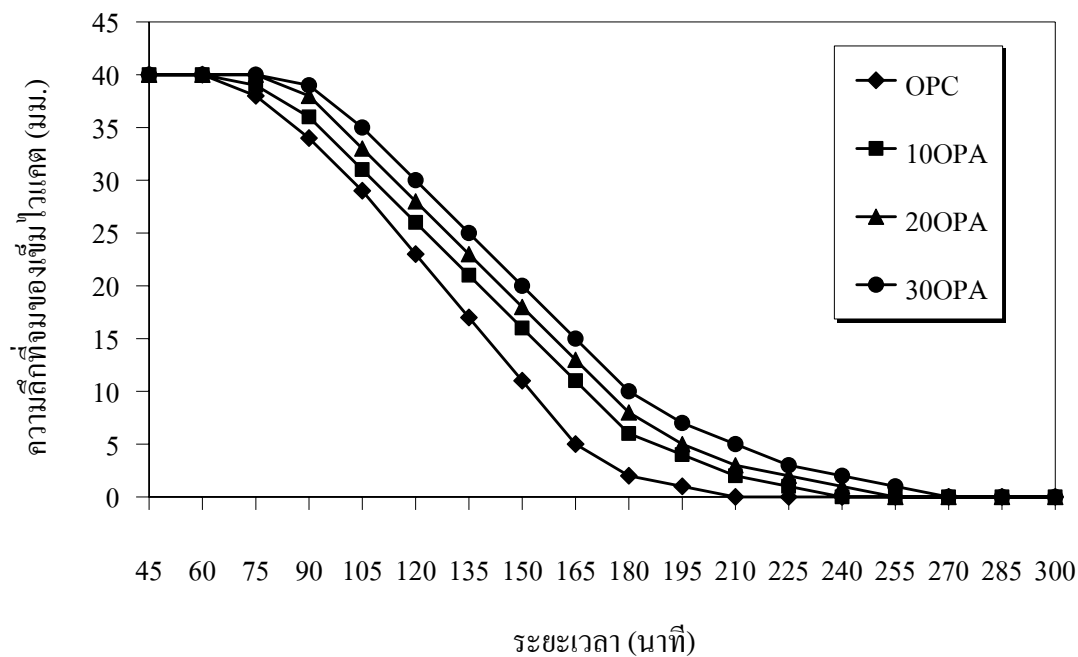
Normal Consistency = 30.3%



รูปที่ ก-4 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกตัวของเข็มไวนด์กับปริมาณน้ำของซีเมนต์เฟสค์ที่  
ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 (OPA30)

ตารางที่ ก-5 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ปกติและซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าปล้มน้ำมัน

แสดงระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ที่ผสมเถ้าปล้มน้ำมัน				
Elapsed Time (min)	penetration (mm) at 27 °C			
	OPC	10-OPA	20-OPA	30-OPA
45	40	40	40	40
60	40	40	40	40
75	37	40	40	40
90	32	37	38	39
105	27	32	33	35
120	23	26	28	30
135	17	21	23	25
150	12	16	18	21
165	8	12	14	17
180	4	8	10	13
195	2	6	8	10
210	1	4	6	8
225	0	2	4	6
240	0	1	2	4
255	0	0	1	2
270	0	0	0	1
285	0	0	0	0
300	0	0	0	0



รูปที่ ก-5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับการแทรกตัวของน้ำของซีเมนต์ไวกัด

ตาราง ก-6 ผลทดสอบการกระจายขนาดและโมดูลัสความละเอียดของทราย

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักถาด + มวลรวม	น้ำหนักถาด (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	497.15	497.15	0.00	0.00	0.00
เบอร์ 8	460.35	428.53	31.82	3.18	3.18
เบอร์ 16	677.20	409.97	267.23	26.72	29.91
เบอร์ 30	670.50	350.30	320.20	32.02	61.93
เบอร์ 50	607.80	334.78	273.02	27.30	89.23
เบอร์ 100	410.66	312.05	98.61	9.86	99.09
ถาด	290.75	281.71	9.04	0.90	99.99
รวม			999.92	99.99	383.32

โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 2.83

ตาราง ก-7 ผลทดสอบการกระจายขนาดและโมดูลัสความละเอียดของเศษกระจกสีเขียว

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักถาด + มวลรวม	น้ำหนัก ถาด (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบน ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้าง บนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	497.15	497.15	0.00	0.00	0.00
เบอร์ 8	560.29	428.53	131.76	13.18	13.18
เบอร์ 16	677.20	409.97	267.23	26.72	39.90
เบอร์ 30	590.45	350.30	240.15	24.02	63.91
เบอร์ 50	541.18	334.78	206.40	20.64	84.55
เบอร์ 100	415.66	312.05	103.61	10.36	94.92
ถาด	332.55	281.71	50.84	5.08	100.00
รวม			999.99	100.00	396.46

โมดูลัสความละเอียดของเศษกระจกสีเขียวเท่ากับ 2.96

ตาราง ก-8 ผลทดสอบการกระจายขนาดและโมดูลัสความละเอียดของเศษกระจกสีน้ำตาล

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักถาด + มวลรวม	น้ำหนัก ถาด (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบน ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้าง บนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	497.15	497.15	0.00	0.00	0.00
เบอร์ 8	559.78	428.53	131.25	13.11	13.11
เบอร์ 16	676.99	409.97	267.02	26.68	39.79
เบอร์ 30	592.55	350.30	242.25	24.20	63.99
เบอร์ 50	542.95	334.78	208.17	20.80	84.79
เบอร์ 100	414.55	312.05	102.50	10.24	95.03
ถาด	331.45	281.71	49.74	4.97	100.00
รวม			1000.93	100.00	396.72

โมดูลัสความละเอียดของเศษกระจกสีน้ำตาลเท่ากับ 2.97

ตาราง ก-9 ผลทดสอบการกระจายขนาดและโมดูลัสความละเอียดของเศษกระจกสีใส

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักถาด + มวลรวม	น้ำหนัก ถาด (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบน ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้าง บนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	497.15	497.15	0.00	0.00	0.00
เบอร์ 8	561.55	428.53	133.02	13.29	13.29
เบอร์ 16	676.70	409.97	266.73	26.65	39.94
เบอร์ 30	590.95	350.30	240.65	24.04	63.98
เบอร์ 50	533.85	334.78	199.07	19.89	83.87
เบอร์ 100	423.75	312.05	111.70	11.16	95.03
ถาด	330.45	281.71	48.74	4.87	99.90
รวม			999.91	99.90	396.00

โมดูลัสความละเอียดของเศษกระจกสีใสเท่ากับ 2.96



ตารางที่ ก-10 ความถ่วงจำเพาะและค่าดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 128-97

SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION OF FINE AGGREGATE (ASTM C128)

Sample	ทราย	WGG	WGB	WGC
Volume of Pycnometer (ml)	500.00	500.00	500.00	500.00
Weight of Can $W_i(g)$	215.00	215.00	215.00	215.00
Weight of Saturated Surface Dry Find Aggregate $W_s(g)$	499.50	500.25	500.50	499.75
Weight of Pycnometer + water Saturated Surface Dry Find Aggregate $W_l(g)$	1015.00	1017.00	1019.00	1014.00
Weight of Water $W_w(g)$	300.00	300.00	300.00	300.00
Weight of Pycnometer + Water B (g)	712.00	718.00	720.00	717.00
Weight of Can (g)	280.00	280.00	280.00	280.00
Weight of Can +Dry Find Aggregate (g)	772.00	778.00	778.50	777.50
Weight of Dry Find Aggregate A (g)	492.00	498.00	498.50	497.50
BULK SPECIFIC GRAVITY (S.S.D.) = $W_s/(B+W_s-W_l)$	2.54	2.49	2.48	2.46
APPARENT SPECIFIC GRAVITY = $A/(B+A-W_l)$	2.50	2.47	2.47	2.45
ABSORPTION = $(W_s-A)/A \times 100$	1.52	0.45	0.40	0.45

ตารางที่ ก-11 ความหนาแน่นของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 29/C 29M-97

มวลรวมละเอียด	SAND	WGG	WGB	WGC
ปริมาตรของ Mould ทรงกระบอก (cm <sup>3</sup> )	1400.00	1400.00	1400.00	1400.00
น้ำหนักของ Mould ทรงกระบอก (g)	1600.00	1600.00	1600.00	1600.00
น้ำหนักของ Mould + มวลรวมหยาบ (g)	3820.00	3765.00	3769.00	3759.00
น้ำหนักของ Mould + มวลรวมอัดแน่น (g)	3897.00	3823.00	3830.00	3810.00
น้ำหนักของมวลรวมหยาบ (g)	2270.00	2165.00	2169.00	2159.00
น้ำหนักของมวลรวมอัดแน่น (g)	2350.00	2223.00	2230.00	2210.00
ความหนาแน่นหยาบ (Loose Unite Weight g/cm <sup>3</sup> )	1.62	1.55	1.55	1.54
ความหนาแน่นอัดแน่น (Dry-rodded Unite Weight g/cm <sup>3</sup> )	1.68	1.59	1.59	1.58

ตารางที่ ก-12 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

รหัส ตัวอย่าง ก่อนที่	อายุบ่ม (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรงอัด ประลัย (MPa)	หน่วยแรงอัด ประลัยเฉลี่ย (MPa)
Control	0	25.20	42.6	17	17
	0	25.23	43.2	17	
	0	25.50	44.1	17	
Control	7	25.40	65.0	26	26
	7	25.30	64.5	25	
	7	25.60	67.1	26	
Control	28	26.45	97.3	37	36
	28	26.39	93.7	36	
	28	26.35	92.6	35	
Control	56	26.76	98.3	37	37
	56	26.42	95.7	36	
	56	26.18	97.6	37	
OPC-G	0	25.20	31.3	12	13
	0	25.23	30.5	12	
	0	25.50	33.7	13	
OPC-G	7	26.76	59.4	22	23
	7	26.42	61.0	23	
	7	26.18	58.3	22	
OPC-G	28	25.57	69.2	27	28
	28	25.40	69.9	28	
	28	25.37	73.2	29	
OPC-G	56	25.44	71.2	28	28
	56	26.11	69.9	27	
	56	25.40	72.3	28	

ตารางที่ ก-12 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง ก้อนที่	อายุบ่ม (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรงอัด ประลัย (MPa)	หน่วยแรงอัด ประลัยเฉลี่ย (MPa)
OPC-B	0	25.20	32.3	13	14
	0	24.97	35.5	14	
	0	25.00	33.7	13	
OPC-B	7	26.42	58.9	22	23
	7	26.49	63.4	24	
	7	26.25	61.3	23	
OPC-B	28	26.25	68.8	26	26
	28	26.42	69.8	26	
	28	26.25	66.6	25	
OPC-B	56	26.18	70.2	27	27
	56	26.32	70.9	27	
	56	26.28	71.3	27	
OPC-C	0	26.04	32.4	12	13
	0	26.28	34.5	13	
	0	26.35	35.9	14	
OPC-C	7	25.44	57.8	23	23
	7	26.11	63.9	24	
	7	25.40	58.1	23	
OPC-C	28	26.94	78.3	29	27
	28	26.73	77.5	29	
	28	26.52	62.7	24	
OPC-C	56	26.04	70.8	27	27
	56	26.08	70.8	27	
	56	26.15	69.6	27	

ตารางที่ ก-12 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง ก้อนที่	อายุบ่ม (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรงอัด ประลัย (MPa)	หน่วยแรงอัด ประลัยเฉลี่ย (MPa)
OPC-M	0	26.01	34.2	13	13
	0	26.18	33.5	13	
	0	26.18	34.9	13	
OPC-M	7	26.18	58.2	22	23
	7	26.35	62.4	24	
	7	26.45	60.7	23	
OPC-M	28	25.57	66.2	26	27
	28	25.57	71.3	28	
	28	25.57	69.3	27	
OPC-M	56	26.49	76.2	29	28
	56	26.59	71.3	27	
	56	26.52	79.3	30	
10-OPA-G	0	26.28	35.3	13	13
	0	26.28	34.7	13	
	0	26.11	33.8	13	
10-OPA-G	7	25.87	60.2	23	24
	7	26.11	62.4	24	
	7	26.15	64.7	25	
10-OPA-G	28	25.27	85.9	34	33
	28	25.64	83.1	32	
	28	26.04	86.3	33	
10-OPA-G	56	25.27	85.8	34	34
	56	25.64	89.8	35	
	56	26.35	84.2	32	

ตารางที่ ก-12 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง ก้อนที่	อายุบ่ม (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรงอัด ประลัย (MPa)	หน่วยแรงอัด ประลัยเฉลี่ย (MPa)
20-OPA-G	0	26.42	16.5	6	7
	0	26.39	17.2	7	
	0	26.15	18.2	7	
20-OPA-G	7	26.28	32.4	12	11
	7	26.63	24.3	9	
	7	26.52	27.4	10	
20-OPA-G	28	25.44	46.2	18	18
	28	25.23	46.8	19	
	28	25.23	44.1	17	
20-OPA-G	56	26.18	51.7	20	19
	56	26.21	54.5	21	
	56	26.01	46.7	18	
30-OPA-G	0	26.32	11.4	4	4
	0	26.35	7.1	3	
	0	26.39	12.1	5	
30-OPA-G	7	26.39	12.3	5	6
	7	26.56	18.0	7	
	7	26.76	17.0	6	
30-OPA-G	28	25.81	25.6	10	10
	28	25.67	27.8	11	
	28	25.40	25.9	10	
30-OPA-G	56	26.80	27.4	10	11
	56	26.73	28.0	10	
	56	26.52	28.8	11	

ตารางที่ ก-12 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง ก้อนที่	อายุบ่ม (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรงอัด ประลัย (MPa)	หน่วยแรงอัด ประลัยเฉลี่ย (MPa)
10-OPA-B	0	26.08	37.1	14	13
	0	26.39	32.5	12	
	0	26.28	35.6	14	
10-OPA-B	7	26.08	60.8	23	24
	7	26.35	66.8	25	
	7	26.11	59.7	23	
10-OPA-B	28	26.28	86.1	33	33
	28	26.08	85.3	33	
	28	26.28	89.8	34	
10-OPA-B	56	26.28	89.2	34	33
	56	26.08	85.9	33	
	56	26.28	87.8	33	
20-OPA-B	0	26.15	22.3	9	8
	0	26.18	19.6	7	
	0	26.15	17.8	7	
20-OPA-B	7	26.39	25.6	10	11
	7	26.42	29.9	11	
	7	26.11	27.5	11	
20-OPA-B	28	25.37	38.7	15	16
	28	25.77	38.6	15	
	28	25.13	41.6	17	
20-OPA-B	56	26.21	43.6	17	19
	56	26.39	59.1	22	
	56	26.25	47.8	18	

ตารางที่ ก-12 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง ก้อนที่	อายุบ่ม (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรงอัด ประลัย (MPa)	หน่วยแรงอัด ประลัยเฉลี่ย (MPa)
30-OPA-B	0	26.18	5.8	2	2
	0	26.32	8.5	3	
	0	26.35	5.3	2	
30-OPA-B	7	26.21	8.6	3	3
	7	26.35	6.2	2	
	7	26.21	6.3	2	
30-OPA-B	28	25.81	15.8	6	7
	28	25.54	18.7	7	
	28	25.54	19.0	7	
30-OPA-B	56	26.42	22.6	9	9
	56	26.63	23.4	9	
	56	26.59	24.9	9	
10-OPA-C	0	26.18	41.6	16	14
	0	26.35	34.3	13	
	0	26.45	33.0	12	
10-OPA-C	7	25.64	65.1	25	22
	7	25.40	51.0	20	
	7	25.33	54.5	22	
10-OPA-C	28	26.83	87.1	32	33
	28	26.45	89.2	34	
	28	26.35	86.6	33	
10-OPA-C	56	26.32	88.00	33	33
	56	26.42	87.40	33	
	56	26.49	89.30	34	



ตารางที่ ก-12 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง ก้อนที่	อายุบ่ม (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรงอัด ประลัย (MPa)	หน่วยแรงอัด ประลัยเฉลี่ย (MPa)
20-OPA-C	0	26.66	16.2	6	6
	0	25.77	20.1	8	
	0	25.74	13.1	5	
20-OPA-C	7	26.21	26.7	10	12
	7	26.39	34.7	13	
	7	26.83	35.5	13	
20-OPA-C	28	25.64	37.2	15	15
	28	25.20	39.4	16	
	28	25.27	40.3	16	
20-OPA-C	56	26.28	30.9	12	16
	56	26.35	43.8	17	
	56	26.42	50.8	19	
30-OPA-C	0	26.56	3.5	1	3
	0	26.63	7.8	3	
	0	26.28	10.1	4	
30-OPA-C	7	26.35	9.0	3	3
	7	26.32	6.5	2	
	7	26.39	9.1	3	
30-OPA-C	28	25.77	15.5	6	6
	28	25.54	11.1	4	
	28	25.67	16.6	6	
30-OPA-C	56	26.66	14.8	6	8
	56	26.56	23.9	9	
	56	26.32	25.2	10	

ตารางที่ ก-12 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง ก้อนที่	อายุบ่ม (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรงอัด ประลัย (MPa)	หน่วยแรงอัด ประลัยเฉลี่ย (MPa)
10-OPA-M	0	26.39	38.7	15	13
	0	26.52	31.5	12	
	0	26.49	35.8	14	
10-OPA-M	7	26.21	67.9	26	25
	7	26.28	62.6	24	
	7	26.28	63.5	24	
10-OPA-M	28	25.07	84.8	34	34
	28	25.23	84.5	33	
	28	25.17	83.6	33	
10-OPA-M	56	26.56	90.1	34	34
	56	26.39	88.1	33	
	56	26.39	88.2	33	
20-OPA-M	0	26.18	12.0	5	6
	0	26.32	21.6	8	
	0	26.28	15.0	6	
20-OPA-M	7	26.21	35.3	13	12
	7	25.94	24.2	9	
	7	26.04	32.3	12	
20-OPA-M	28	25.37	59.6	23	20
	28	25.54	46.9	18	
	28	25.23	42.6	17	
20-OPA-M	56	26.11	40.4	15	19
	56	26.08	70.8	27	
	56	26.15	69.6	27	

ตารางที่ ก-12 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง ก้อนที่	อายุบ่ม (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรงอัด ประลัย (MPa)	หน่วยแรงอัด ประลัยเฉลี่ย (MPa)
30-OPA-M	0	26.32	8.7	3	3
	0	26.45	6.0	2	
	0	26.73	6.4	2	
30-OPA-M	7	26.39	12.9	5	6
	7	26.39	16.0	6	
	7	26.42	15.8	6	
30-OPA-M	28	25.47	19.8	8	8
	28	25.50	19.3	8	
	28	25.70	19.4	8	
30-OPA-M	56	26.39	22.9	9	9
	56	26.80	23.6	9	
	56	26.66	22.3	8	

ตารางที่ ก-13 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาด (cm)			น้ำหนัก (g)		ความหนาแน่น (g/m <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
		กว้าง	ยาว	สูง	ก่อน	หลัง		
OPC	0	5.14	5.13	5.25	295.28	295.28	2.1	2168.54
	0	5.11	5.11	5.20	290.81	290.81	2.1	
	0	5.10	5.10	5.15	298.83	298.83	2.2	
OPC	7	5.14	5.13	5.25	295.28	305.61	2.2	2244.44
	7	5.11	5.11	5.20	290.81	300.99	2.2	
	7	5.10	5.10	5.15	298.83	309.29	2.3	
OPC	28	5.14	5.13	5.25	295.28	306.35	2.2	2249.86
	28	5.11	5.11	5.20	290.81	301.72	2.2	
	28	5.10	5.10	5.15	298.83	310.04	2.3	
OPC	56	5.14	5.13	5.25	295.28	307.09	2.2	2255.28
	56	5.11	5.11	5.20	290.81	302.44	2.2	
	56	5.10	5.10	5.15	298.83	310.78	2.3	
OPC-G	0	5.00	5.06	5.07	262.61	262.61	2.0	2014.98
	0	5.10	5.09	5.14	262.51	262.51	2.0	
	0	5.02	5.01	5.09	259.90	259.90	2.0	
OPC-G	7	5.00	5.06	5.07	262.61	270.49	2.1	2075.43
	7	5.10	5.09	5.14	262.51	270.39	2.0	
	7	5.02	5.01	5.09	259.90	267.70	2.1	
OPC-G	28	5.00	5.06	5.07	262.61	274.43	2.1	2105.66
	28	5.10	5.09	5.14	262.51	274.32	2.1	
	28	5.02	5.01	5.09	259.90	271.60	2.1	
OPC-G	56	5.00	5.06	5.07	262.61	278.37	2.2	2135.88
	56	5.10	5.09	5.14	262.51	278.26	2.1	
	56	5.02	5.01	5.09	259.90	275.49	2.2	

ตารางที่ ก-13 (ต่อ) ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาด (cm)			น้ำหนัก (g)		ความหนาแน่น (g/m <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
		กว้าง	ยาว	สูง	ก่อน	หลัง		
OPC-B	0	5.12	5.11	5.12	271.30	271.30	1.9	1942.65
	0	5.14	5.13	5.12	264.59	264.59	1.9	
	0	5.14	5.12	5.12	263.32	263.32	1.9	
OPC-B	7	5.12	5.11	5.12	271.30	279.44	2.0	1969.85
	7	5.14	5.13	5.12	264.59	272.53	2.0	
	7	5.14	5.12	5.12	263.32	271.35	2.0	
OPC-B	28	5.12	5.11	5.12	271.30	283.78	2.0	1983.45
	28	5.14	5.13	5.12	267.59	279.90	2.0	
	28	5.14	5.12	5.12	268.32	280.66	2.0	
OPC-B	56	5.12	5.11	5.12	275.30	290.17	2.0	2004.82
	56	5.14	5.13	5.12	269.59	284.15	2.0	
	56	5.14	5.12	5.12	268.32	282.81	2.0	
OPC-C	0	5.13	5.07	5.11	269.7	269.7	2.1	2033.65
	0	5.12	5.11	5.09	269.26	269.26	2.0	
	0	5.12	5.09	5.13	271.75	271.75	2.0	
OPC-C	7	5.13	5.07	5.11	269.7	279.14	2.1	2062.12
	7	5.12	5.11	5.09	269.26	278.68	2.0	
	7	5.12	5.09	5.13	271.75	281.26	2.1	
OPC-C	28	5.13	5.07	5.11	269.7	282.65	2.1	2076.36
	28	5.12	5.11	5.09	269.26	282.18	2.1	
	28	5.12	5.09	5.13	271.75	284.79	2.1	
OPC-C	56	5.13	5.07	5.11	269.7	284.53	2.1	2096.69
	56	5.12	5.11	5.09	269.26	284.07	2.1	
	56	5.12	5.09	5.13	271.75	286.70	2.1	

ตารางที่ ก-13 (ต่อ) ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาด (cm)			น้ำหนัก (g)		ความหนาแน่น (g/m <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
		กว้าง	ยาว	สูง	ก่อน	หลัง		
OPC-M	0	5.10	5.14	5.20	270.15	270.15	1.9	1908.49
	0	5.16	5.12	5.19	269.66	269.66	1.9	
	0	5.12	5.13	5.20	269.38	269.38	1.9	
OPC-M	7	5.10	5.14	5.20	270.15	278.55	1.9	1931.39
	7	5.16	5.12	5.19	269.66	278.05	1.9	
	7	5.12	5.13	5.20	269.38	277.76	1.9	
OPC-M	28	5.10	5.14	5.20	274.15	285.20	2.0	1949.52
	28	5.16	5.12	5.19	275.66	286.77	2.0	
	28	5.12	5.13	5.20	273.38	284.40	1.9	
OPC-M	56	5.10	5.14	5.20	275.15	289.18	2.0	1968.61
	56	5.16	5.12	5.19	274.66	288.67	2.0	
	56	5.12	5.13	5.20	279.38	293.63	2.0	
10-OPA-G	0	5.03	5.03	5.02	256.24	256.24	2.1	2004.06
	0	5.01	5.02	5.16	255.59	255.59	2.0	
	0	5.05	5.18	5.17	253.13	253.13	1.9	
10-OPA-G	7	5.03	5.03	5.02	256.24	260.08	2.1	2064.18
	7	5.01	5.02	5.16	255.59	259.42	2.1	
	7	5.05	5.18	5.17	253.13	256.93	2.0	
10-OPA-G	28	5.03	5.03	5.02	256.24	261.88	2.2	2134.32
	28	5.01	5.02	5.16	255.59	261.21	2.2	
	28	5.05	5.18	5.17	253.13	258.70	2.0	
10-OPA-G	56	5.03	5.03	5.02	256.24	264.44	2.2	2164.38
	56	5.01	5.02	5.16	255.59	263.77	2.2	
	56	5.05	5.18	5.17	253.13	261.23	2.1	

ตารางที่ ก-13 (ต่อ) ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาด (cm)			น้ำหนัก (g)		ความหนาแน่น (g/m <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
		กว้าง	ยาว	สูง	ก่อน	หลัง		
20-OPA-G	0	5.13	5.09	5.13	249.69	249.69	1.8	1784.84
	0	5.10	5.15	5.11	248.36	248.36	1.8	
	0	5.01	5.13	5.16	247.28	247.28	1.8	
20-OPA-G	7	5.13	5.09	5.13	249.69	260.93	1.9	1874.08
	7	5.10	5.15	5.11	248.36	259.54	1.9	
	7	5.01	5.13	5.16	247.28	258.41	1.9	
20-OPA-G	28	5.13	5.09	5.13	249.69	267.17	1.9	1927.63
	28	5.10	5.15	5.11	248.36	265.75	1.9	
	28	5.01	5.13	5.16	247.28	264.59	1.9	
20-OPA-G	56	5.13	5.09	5.13	249.69	268.67	2.0	1981.17
	56	5.10	5.15	5.11	248.36	267.24	2.0	
	56	5.01	5.13	5.16	247.28	266.07	2.0	
30-OPA-G	0	5.13	5.13	5.27	240.27	240.27	1.7	1729.50
	0	5.10	5.14	5.27	238.88	238.88	1.7	
	0	5.13	5.08	5.24	235.82	235.82	1.7	
30-OPA-G	7	5.13	5.13	5.27	240.27	254.69	1.8	1833.27
	7	5.10	5.14	5.27	238.88	253.21	1.8	
	7	5.13	5.08	5.24	235.82	249.97	1.8	
30-OPA-G	28	5.13	5.13	5.27	240.27	260.69	1.9	1885.15
	28	5.10	5.14	5.27	238.88	259.18	1.9	
	28	5.13	5.08	5.24	235.82	255.86	1.9	
30-OPA-G	56	5.13	5.13	5.27	240.27	263.10	1.9	1937.04
	56	5.10	5.14	5.27	238.88	261.57	1.9	
	56	5.13	5.08	5.24	235.82	258.22	1.9	

ตารางที่ ก-13 (ต่อ) ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาด (cm)			น้ำหนัก (g)		ความหนาแน่น (g/m <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
		กว้าง	ยาว	สูง	ก่อน	หลัง		
10-OPA-B	0	5.14	5.11	5.13	260.55	260.55	2.0	1984.86
	0	5.10	5.11	5.11	261.02	261.02	2.0	
	0	5.11	5.15	5.12	262.68	262.68	2.0	
10-OPA-B	7	5.14	5.11	5.13	260.55	270.97	2.1	2044.74
	7	5.10	5.11	5.11	261.02	271.46	2.0	
	7	5.11	5.15	5.12	262.68	273.19	2.0	
10-OPA-B	28	5.14	5.11	5.13	260.55	275.40	2.1	2117.85
	28	5.10	5.11	5.11	261.02	275.90	2.1	
	28	5.11	5.15	5.12	262.68	277.65	2.1	
10-OPA-B	56	5.14	5.11	5.13	260.55	276.21	2.2	2153.58
	56	5.10	5.11	5.11	261.02	276.71	2.2	
	56	5.11	5.15	5.12	262.68	278.47	2.1	
20-OPA-B	0	5.03	5.09	5.24	247.28	247.28	1.8	1750.00
	0	5.10	5.11	5.20	245.47	245.47	1.7	
	0	5.09	5.10	5.18	244.48	244.48	1.7	
20-OPA-B	7	5.03	5.09	5.24	247.28	259.89	1.9	1839.25
	7	5.10	5.11	5.20	245.47	257.99	1.8	
	7	5.09	5.10	5.18	244.48	256.95	1.8	
20-OPA-B	28	5.03	5.09	5.24	247.28	263.60	1.9	1895.25
	28	5.10	5.11	5.20	245.47	261.67	1.9	
	28	5.09	5.10	5.18	244.48	260.62	1.9	
20-OPA-B	56	5.03	5.09	5.24	247.28	265.83	1.9	1921.50
	56	5.10	5.11	5.20	245.47	263.88	1.9	
	56	5.09	5.10	5.18	244.48	262.82	1.9	



ตารางที่ ก-13 (ต่อ) ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาด (cm)			น้ำหนัก (g)		ความหนาแน่น (g/m <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
		กว้าง	ยาว	สูง	ก่อน	หลัง		
30-OPA-B	0	5.09	5.14	5.19	239.45	239.45	1.6	1626.36
	0	5.11	5.13	5.24	233.65	233.65	1.6	
	0	5.10	5.14	5.23	234.12	234.12	1.6	
30-OPA-B	7	5.09	5.14	5.19	239.45	252.38	1.7	1717.43
	7	5.11	5.13	5.24	233.65	246.27	1.7	
	7	5.10	5.14	5.23	234.12	246.76	1.7	
30-OPA-B	28	5.09	5.14	5.19	239.45	258.61	1.8	1769.48
	28	5.11	5.13	5.24	233.65	252.34	1.8	
	28	5.10	5.14	5.23	234.12	252.85	1.8	
30-OPA-B	56	5.09	5.14	5.19	239.45	261.96	1.8	1811.76
	56	5.11	5.13	5.24	233.65	255.61	1.8	
	56	5.10	5.14	5.23	234.12	256.13	1.8	
10-OPA-C	0	5.13	5.13	5.13	260.30	260.30	1.9	1868.62
	0	5.14	5.13	5.15	258.92	258.92	1.8	
	0	5.13	5.16	5.15	260.76	260.76	1.8	
10-OPA-C	7	5.13	5.13	5.13	260.30	269.67	2.0	1928.42
	7	5.14	5.13	5.15	258.92	268.24	1.9	
	7	5.13	5.16	5.15	260.76	270.15	1.9	
10-OPA-C	28	5.13	5.13	5.13	260.30	272.79	2.1	1999.42
	28	5.14	5.13	5.15	258.92	271.35	2.0	
	28	5.13	5.16	5.15	260.76	273.28	2.0	
10-OPA-C	56	5.13	5.13	5.13	260.30	275.66	2.1	2016.24
	56	5.14	5.13	5.15	258.92	274.20	2.0	
	56	5.13	5.16	5.15	260.76	276.14	2.0	

ตารางที่ ก-13 (ต่อ) ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาด (cm)			น้ำหนัก (g)		ความหนาแน่น (g/m <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
		กว้าง	ยาว	สูง	ก่อน	หลัง		
20-OPA-C	0	5.14	5.10	5.14	253.47	253.47	1.8	1830.66
	0	5.16	5.12	5.12	254.73	254.73	1.8	
	0	5.14	5.10	5.18	255.69	255.69	1.8	
20-OPA-C	7	5.14	5.10	5.14	253.47	265.64	1.9	1918.53
	7	5.16	5.12	5.12	254.73	266.96	1.9	
	7	5.14	5.10	5.18	255.69	267.96	1.9	
20-OPA-C	28	5.14	5.10	5.14	253.47	269.95	1.9	1975.28
	28	5.16	5.12	5.12	254.73	271.29	2.0	
	28	5.14	5.10	5.18	255.69	272.31	2.0	
20-OPA-C	56	5.14	5.10	5.14	253.47	272.48	2.0	2013.55
	56	5.16	5.12	5.12	254.73	273.83	2.0	
	56	5.14	5.10	5.18	255.69	274.87	2.0	
30-OPA-C	0	5.10	5.13	5.26	234.18	234.18	1.7	1755.09
	0	5.15	5.10	5.21	242.91	242.91	1.8	
	0	5.13	5.07	5.19	241.42	241.42	1.8	
30-OPA-C	7	5.10	5.13	5.26	234.18	247.53	1.8	1855.13
	7	5.15	5.10	5.21	242.91	256.76	1.9	
	7	5.13	5.07	5.19	241.42	255.18	1.9	
30-OPA-C	28	5.10	5.13	5.26	234.18	254.79	1.9	1909.54
	28	5.15	5.10	5.21	242.91	264.29	1.9	
	28	5.13	5.07	5.19	241.42	262.66	1.9	
30-OPA-C	56	5.10	5.13	5.26	234.18	255.72	1.9	1951.66
	56	5.15	5.10	5.21	242.91	265.26	2.0	
	56	5.13	5.07	5.19	241.42	263.63	2.0	

ตารางที่ ก-13 (ต่อ) ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาด (cm)			น้ำหนัก (g)		ความหนาแน่น (g/m <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
		กว้าง	ยาว	สูง	ก่อน	หลัง		
10-OPA-M	0	5.11	5.08	5.27	263.52	263.52	2.0	2003.90
	0	5.11	5.09	5.21	265.85	265.85	2.0	
	0	5.09	5.11	5.21	262.13	262.13	2.0	
10-OPA-M	7	5.11	5.08	5.27	263.52	266.68	2.0	2005.50
	7	5.11	5.09	5.21	265.85	269.04	2.0	
	7	5.09	5.11	5.21	262.13	265.28	2.0	
10-OPA-M	28	5.11	5.08	5.27	263.52	269.19	2.1	2082.14
	28	5.11	5.09	5.21	265.85	271.57	2.1	
	28	5.09	5.11	5.21	262.13	267.77	2.1	
10-OPA-M	56	5.11	5.08	5.27	263.52	271.82	2.1	2098.67
	56	5.11	5.09	5.21	265.85	274.22	2.1	
	56	5.09	5.11	5.21	262.13	270.39	2.1	
20-OPA-M	0	5.10	5.12	5.11	246.65	246.65	1.8	1824.60
	0	5.10	5.12	5.15	243.61	243.61	1.9	
	0	5.12	5.10	5.11	245.07	245.07	1.8	
20-OPA-M	7	5.10	5.12	5.11	246.65	257.75	1.9	1930.43
	7	5.10	5.12	5.15	243.61	254.57	2.0	
	7	5.12	5.10	5.11	245.07	256.10	1.9	
20-OPA-M	28	5.10	5.12	5.11	246.65	260.71	1.9	1966.92
	28	5.10	5.12	5.15	243.61	257.50	2.0	
	28	5.12	5.10	5.11	245.07	259.04	2.0	
20-OPA-M	56	5.10	5.12	5.11	246.65	264.41	1.9	2005.24
	56	5.10	5.12	5.15	243.61	261.15	2.0	
	56	5.12	5.10	5.11	245.07	262.72	2.0	

ตารางที่ ก-13 (ต่อ) ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์

รหัส ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาด (cm)			น้ำหนัก (g)		ความหนาแน่น (g/m <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
		กว้าง	ยาว	สูง	ก่อน	หลัง		
30-OPA-M	0	5.09	5.14	5.18	235.70	235.70	1.6	1623.12
	0	5.17	5.16	5.20	238.30	238.30	1.6	
	0	5.13	5.11	5.25	237.43	237.43	1.6	
30-OPA-M	7	5.09	5.14	5.18	235.70	248.66	1.7	1712.39
	7	5.17	5.16	5.20	238.30	251.41	1.7	
	7	5.13	5.11	5.25	237.43	250.49	1.7	
30-OPA-M	28	5.09	5.14	5.18	235.70	256.87	1.8	1768.87
	28	5.17	5.16	5.20	238.30	259.70	1.7	
	28	5.13	5.11	5.25	237.43	254.05	1.8	
30-OPA-M	56	5.09	5.14	5.18	235.70	256.68	1.8	1806.53
	56	5.17	5.16	5.20	238.30	259.51	1.8	
	56	5.13	5.11	5.25	237.43	258.56	1.8	

ตารางที่ ก-14 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

รหัสตัวอย่าง	ร้อยละการดูดซึมน้ำ		
	7 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	3.85	3.61	3.38
OPC-G	5.66	4.31	3.38
OPC-B	5.21	4.21	3.29
OPC-C	5.21	4.17	3.19
OPC-M	5.21	4.21	3.15
10-OPA-G	6.54	5.21	4.31
20-OPA-G	6.98	6.10	5.21
30-OPA-G	7.41	6.98	6.10
10-OPA-B	6.37	5.03	4.12
20-OPA-B	6.89	6.02	5.03
30-OPA-B	7.24	6.89	6.02
10-OPA-C	6.19	4.90	4.03
20-OPA-C	6.93	5.93	4.99
30-OPA-C	7.11	6.91	5.93
10-OPA-M	6.28	4.85	3.98
20-OPA-M	6.89	6.06	5.03
30-OPA-M	7.13	6.91	5.97

ตารางที่ ก-15 ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ซม.)	หดตัว (ซม.)	ร้อยละการหดตัว
Control	0	28.530	0.000	0.000
	3	28.530	0.000	0.000
	7	28.530	0.000	0.000
	14	28.528	0.002	0.007
	28	28.526	0.004	0.014
	35	28.524	0.006	0.021
	56	28.520	0.010	0.035
	90	28.518	0.012	0.042
OPC-G	0	28.540	0.000	0.000
	3	28.540	0.000	0.000
	7	28.538	0.002	0.007
	14	28.536	0.004	0.014
	28	28.532	0.008	0.028
	35	28.530	0.010	0.035
	56	28.529	0.011	0.039
	90	28.526	0.014	0.049
OPC-B	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.500	0.000	0.000
	7	28.498	0.002	0.007
	14	28.495	0.005	0.018
	28	28.493	0.007	0.025
	35	28.491	0.009	0.032
	56	28.489	0.011	0.039
	90	28.487	0.013	0.046

ตารางที่ ก-15 (ต่อ) ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (cm.)	หดตัว (cm.)	ร้อยละการหดตัว
OPC-C	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.500	0.000	0.000
	7	28.498	0.002	0.007
	14	28.495	0.005	0.018
	28	28.493	0.007	0.025
	35	28.491	0.009	0.032
	56	28.488	0.012	0.042
	90	28.486	0.014	0.049
OPC-M	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.500	0.000	0.000
	7	28.498	0.002	0.007
	14	28.495	0.005	0.018
	28	28.493	0.007	0.025
	35	28.490	0.010	0.035
	56	28.488	0.012	0.042
	90	28.486	0.014	0.049
10-OPA-G	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.500	0.000	0.000
	7	28.497	0.003	0.011
	14	28.496	0.004	0.014
	28	28.493	0.007	0.025
	35	28.491	0.009	0.032
	56	28.488	0.012	0.042
	90	28.485	0.015	0.053

ตารางที่ ก-15 (ต่อ) ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ซม.)	หดตัว (ซม.)	ร้อยละการหดตัว
20-OPA-G	0	28.499	0.001	0.004
	3	28.499	0.001	0.004
	7	28.498	0.002	0.007
	14	28.495	0.005	0.018
	28	28.493	0.007	0.025
	35	28.490	0.010	0.035
	56	28.486	0.014	0.049
	90	28.483	0.017	0.060
30-OPA-G	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.500	0.000	0.000
	7	28.499	0.001	0.004
	14	28.495	0.005	0.018
	28	28.491	0.009	0.032
	35	28.489	0.011	0.039
	56	28.485	0.015	0.053
	90	28.481	0.019	0.067
10-OPA-B	0	28.540	0.000	0.000
	3	28.538	0.002	0.007
	7	28.536	0.004	0.014
	14	28.533	0.007	0.025
	28	28.530	0.010	0.035
	35	28.528	0.012	0.042
	56	28.526	0.014	0.049
	90	28.525	0.015	0.053



ตารางที่ ก-15 (ต่อ) ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ซม.)	หดตัว (ซม.)	ร้อยละการหดตัว
20-OPA-B	0	28.520	0.000	0.000
	3	28.520	0.000	0.000
	7	28.518	0.002	0.007
	14	28.516	0.004	0.014
	28	28.514	0.006	0.021
	35	28.512	0.008	0.028
	56	28.509	0.011	0.039
	90	28.507	0.013	0.046
30-OPA-B	0	28.520	0.000	0.000
	3	28.520	0.000	0.000
	7	28.518	0.002	0.007
	14	28.515	0.005	0.018
	28	28.510	0.010	0.035
	35	28.508	0.012	0.042
	56	28.504	0.016	0.056
	90	28.501	0.019	0.067
10-OPA-C	0	28.520	0.000	0.000
	3	28.519	0.001	0.004
	7	28.516	0.004	0.014
	14	28.514	0.006	0.021
	28	28.511	0.009	0.032
	35	28.509	0.011	0.039
	56	28.506	0.014	0.049
	90	28.505	0.015	0.053

ตารางที่ ก-15 (ต่อ) ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ซม.)	หดตัว (ซม.)	ร้อยละการหดตัว
20-OPA-C	0	28.510	0.000	0.000
	3	28.508	0.002	0.007
	7	28.506	0.004	0.014
	14	28.504	0.006	0.021
	28	28.502	0.008	0.028
	35	28.500	0.010	0.035
	56	28.498	0.012	0.042
	90	28.496	0.014	0.049
30-OPA-C	0	28.520	0.000	0.000
	3	28.520	0.000	0.000
	7	28.519	0.001	0.004
	14	28.515	0.005	0.018
	28	28.511	0.009	0.032
	35	28.508	0.012	0.042
	56	28.505	0.015	0.053
	90	28.501	0.019	0.067
10-OPA-M	0	28.530	0.000	0.000
	3	28.528	0.002	0.007
	7	28.526	0.004	0.014
	14	28.523	0.007	0.025
	28	28.520	0.010	0.035
	35	28.518	0.012	0.042
	56	28.514	0.016	0.056
	90	28.515	0.015	0.053

ตารางที่ ก-15 (ต่อ) ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ซม.)	หดตัว (ซม.)	ร้อยละการหดตัว
20-OPA-M	0	28.510	0.000	0.000
	3	28.508	0.002	0.007
	7	28.506	0.004	0.014
	14	28.504	0.006	0.021
	28	28.502	0.008	0.028
	35	28.500	0.010	0.035
	56	28.499	0.011	0.039
	90	28.497	0.013	0.046
30-OPA-M	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.500	0.000	0.000
	7	28.499	0.001	0.004
	14	28.495	0.005	0.018
	28	28.491	0.009	0.032
	35	28.489	0.011	0.039
	56	28.485	0.015	0.053
	90	28.481	0.019	0.067

ตารางที่ ก-16 ผลการทดสอบความยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ชม.)	ขยายตัว (ชม.)	ร้อยละการขยายตัว
Control	0	28.530	0.000	0.000
	3	28.532	0.002	0.007
	7	28.536	0.006	0.021
	14	28.539	0.009	0.032
OPC-G	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.505	0.005	0.016
	7	28.509	0.009	0.032
	14	28.515	0.015	0.053
OPC-B	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.505	0.005	0.017
	7	28.510	0.010	0.036
	14	28.516	0.016	0.056
OPC-C	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.505	0.005	0.018
	7	28.511	0.011	0.039
	14	28.517	0.017	0.060
OPC-M	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.505	0.005	0.018
	7	28.511	0.011	0.039
	14	28.517	0.017	0.060
10-OPA-G	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.509	0.009	0.032
	7	28.510	0.010	0.035
	14	28.512	0.012	0.042

ตารางที่ ก-16 (ต่อ) ผลการทดสอบความยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ชม.)	ขยายตัว (ชม.)	ร้อยละการขยายตัว
20-OPA-G	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.500	0.000	0.000
	7	28.501	0.001	0.004
	14	28.505	0.005	0.018
30-OPA-G	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.500	0.000	0.000
	7	28.501	0.001	0.004
	14	28.503	0.003	0.011
10-OPA-B	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.503	0.003	0.011
	7	28.510	0.010	0.035
	14	28.512	0.012	0.042
20-OPA-B	0	28.520	0.000	0.000
	3	28.520	0.000	0.000
	7	28.523	0.003	0.011
	14	28.526	0.006	0.021
30-OPA-B	0	28.520	0.000	0.000
	3	28.520	0.000	0.000
	7	28.521	0.001	0.004
	14	28.523	0.003	0.011
10-OPA-C	0	28.520	0.000	0.000
	3	28.523	0.003	0.011
	7	28.530	0.010	0.035
	14	28.533	0.013	0.046

ตารางที่ ก-16 (ต่อ) ผลการทดสอบความยับยั้งปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ซม.)	ขยายตัว (ซม.)	ร้อยละการขยายตัว
20-OPA-C	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.502	0.002	0.007
	7	28.503	0.003	0.011
	14	28.506	0.006	0.021
30-OPA-C	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.500	0.000	0.000
	7	28.500	0.000	0.000
	14	28.503	0.003	0.011
10-OPA-M	0	28.530	0.000	0.000
	3	28.533	0.003	0.011
	7	28.540	0.010	0.035
	14	28.545	0.015	0.053
20-OPA-M	0	28.510	0.000	0.000
	3	28.511	0.001	0.004
	7	28.513	0.003	0.011
	14	28.518	0.008	0.028
30-OPA-M	0	28.500	0.000	0.000
	3	28.500	0.000	0.000
	7	28.502	0.002	0.007
	14	28.504	0.004	0.014

ตารางที่ ก-17 ผลการทดสอบความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ซม.)	ขยายตัว (ซม.)	ร้อยละการขยายตัว
Control	0	28.530	0.000	0.000
	14	28.540	0.010	0.035
	21	28.542	0.012	0.042
	28	28.543	0.013	0.046
	56	28.546	0.016	0.056
	133	28.548	0.018	0.063
OPC-G	0	28.500	0.000	0.000
	14	28.515	0.015	0.053
	21	28.517	0.017	0.060
	28	28.521	0.021	0.074
	56	28.524	0.024	0.084
	133	28.536	0.036	0.126
OPC-B	0	28.500	0.000	0.000
	14	28.516	0.016	0.056
	21	28.518	0.018	0.063
	28	28.522	0.022	0.077
	56	28.525	0.025	0.088
	133	28.537	0.037	0.130
OPC-C	0	28.510	0.000	0.000
	14	28.526	0.016	0.056
	21	28.529	0.019	0.067
	28	28.533	0.023	0.081
	56	28.536	0.026	0.091
	133	28.548	0.038	0.133

ตารางที่ ก-17 (ต่อ) ผลการทดสอบความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ซม.)	ขยายตัว (ซม.)	ร้อยละการขยายตัว
OPC-M	0	28.500	0.000	0.000
	14	28.516	0.016	0.056
	21	28.518	0.018	0.063
	28	28.522	0.022	0.077
	56	28.526	0.026	0.089
	133	28.538	0.038	0.132
10-OPA-G	0	28.512	0.000	0.000
	14	28.522	0.010	0.035
	21	28.525	0.013	0.046
	28	28.528	0.016	0.056
	56	28.530	0.018	0.063
	133	28.540	0.028	0.098
20-OPA-G	0	28.500	0.000	0.000
	14	28.505	0.005	0.018
	21	28.508	0.008	0.028
	28	28.509	0.009	0.032
	56	28.511	0.011	0.039
	133	28.513	0.013	0.046
30-OPA-G	0	28.503	0.000	0.000
	14	28.504	0.001	0.004
	21	28.505	0.002	0.007
	28	28.506	0.003	0.011
	56	28.507	0.004	0.014
	133	28.510	0.007	0.025



ตารางที่ ก-17 (ต่อ) ผลการทดสอบความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ซม.)	ขยายตัว (ซม.)	ร้อยละการขยายตัว
10-OPA-B	0	28.512	0.000	0.000
	14	28.523	0.011	0.039
	21	28.526	0.014	0.049
	28	28.528	0.016	0.056
	56	28.530	0.018	0.063
	133	28.540	0.028	0.098
20-OPA-B	0	28.526	0.000	0.000
	14	28.530	0.004	0.014
	21	28.532	0.006	0.021
	28	28.534	0.008	0.028
	56	28.538	0.012	0.042
	133	28.540	0.014	0.049
30-OPA-B	0	28.520	0.000	0.000
	14	28.522	0.002	0.007
	21	28.523	0.003	0.011
	28	28.524	0.004	0.014
	56	28.525	0.005	0.018
	133	28.528	0.008	0.028
10-OPA-C	0	28.520	0.000	0.000
	14	28.532	0.012	0.042
	21	28.536	0.016	0.056
	28	28.539	0.019	0.067
	56	28.545	0.025	0.088
	133	28.551	0.031	0.109

ตารางที่ ก-17 (ต่อ) ผลการทดสอบความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ซม.)	ขยายตัว (ซม.)	ร้อยละการขยายตัว
20-OPA-C	0	28.500	0.000	0.000
	14	28.505	0.005	0.018
	21	28.507	0.007	0.025
	28	28.510	0.010	0.035
	56	28.511	0.011	0.039
	133	28.514	0.014	0.049
30-OPA-C	0	28.500	0.000	0.000
	14	28.501	0.001	0.004
	21	28.503	0.003	0.011
	28	28.505	0.005	0.018
	56	28.507	0.007	0.025
	133	28.509	0.009	0.032
10-OPA-M	0	28.530	0.000	0.000
	14	28.543	0.013	0.046
	21	28.546	0.016	0.056
	28	28.549	0.019	0.067
	56	28.552	0.022	0.077
	133	28.561	0.031	0.109
20-OPA-M	0	28.510	0.000	0.000
	14	28.517	0.007	0.025
	21	28.520	0.010	0.035
	28	28.521	0.011	0.039
	56	28.523	0.013	0.046
	133	28.526	0.016	0.056

ตารางที่ ก-17 (ต่อ) ผลการทดสอบความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รหัสตัวอย่าง	จำนวนวันที่ทดสอบ	ความยาว (ชม.)	ขยายตัว (ชม.)	ร้อยละการขยายตัว
30-OPA-M	0	28.500	0.000	0.000
	14	28.503	0.003	0.011
	21	28.505	0.005	0.018
	28	28.507	0.007	0.025
	56	28.509	0.009	0.032
	133	28.510	0.010	0.035

ตารางที่ ก-18 ผลการทดสอบการแทรกซึมผ่านประจุไอออนคลอไรด์

	Test cell 1		Test cell 2		Test cell 3	
Sample	OPC		OPC		OPC	
Diameter(mm)	105		105		105	
length(mm)	51		50.1		51	
Period(min)	I	Charge Passed	I	Charge Passed	I	Charge Passed
	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)
Start						
1	154	113	147	108	150	111
30	156	344	153	333	151	333
60	159	461	157	449	154	446
90	163	698	163	685	155	674
120	173	946	176	934	165	909
150	175	1202	179	1196	168	1154
180	175	1459	181	1461	171	1403
210	175	1718	182	1729	172	1656
240	176	1977	185	1999	174	1911
270	178	2238	186	2272	175	2168
300	178	2501	186	2546	175	2426
330	179	2764	185	2819	175	2685
360	179	3028	185	3092	174	2942
Total Charge Passed(Qs)		3028		3092		2942
		Moderate		Moderate		Moderate

ตารางที่ ก-18 (ต่อ) ผลการทดสอบการแทรกซึมผ่านประจุไอออนคลอไรด์

	Test cell 1		Test cell 2		Test cell 3	
Sample	OPC-G		OPC-G		OPC-G	
Diameter(mm)	105		105		105	
length(mm)	51		50.1		51	
Period(min)	I	Charge Passed	I	Charge Passed	I	Charge Passed
	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)
Start						
1	133	98	127	94	119	88
30	151	321	147	311	134	285
60	162	440	158	427	142	389
90	170	685	164	664	150	605
120	176	940	169	910	153	828
150	181	1203	174	1163	159	1058
180	180	1469	175	1420	159	1292
210	182	1735	177	1680	159	1527
240	185	2005	181	1944	159	1761
270	188	2280	185	2213	159	1995
300	193	2561	192	2491	159	2229
330	198	2849	197	2777	159	2464
360	207	3148	202	3071	159	2698
Total Charge Passed(Qs)		3148		3071		2698
		Moderate		Moderate		Moderate

ตารางที่ ก-18 (ต่อ) ผลการทดสอบการแทรกซึมผ่านประจุไอออนคลอไรด์

	Test cell 1		Test cell 2		Test cell 3	
Sample	OPC-B		OPC-B		OPC-B	
Diameter(mm)	105		105		105	
length(mm)	51		50.1		51	
Period(min)	I	Charge Passed	I	Charge Passed	I	Charge Passed
	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)
Start						
1	161	119	180	133	167	123
30	162	357	180	398	168	371
60	165	479	182	532	170	496
90	167	723	185	802	172	748
120	170	972	188	1077	174	1003
150	173	1224	190	1356	176	1261
180	175	1481	193	1638	178	1521
210	178	1741	195	1924	180	1785
240	181	2005	198	2213	182	2052
270	184	2274	200	2506	184	2321
300	187	2548	203	2803	186	2594
330	190	2825	205	3104	188	2870
360	193	3108	208	3408	190	3148
Total Charge Passed(Qs)		3108		3408		3148
		Moderate		Moderate		Moderate

ตารางที่ ก-18 (ต่อ) ผลการทดสอบการแทรกซึมผ่านประจุไอออนคลอไรด์

	Test cell 1		Test cell 2		Test cell 3	
Sample	OPC-C		OPC-C		OPC-C	
Diameter(mm)	105		105		105	
length(mm)	51		50.1		51	
Period(min)	I	Charge Passed	I	Charge Passed	I	Charge Passed
	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)
Start						
1	161	119	179	132	169	125
30	163	359	180	397	172	378
60	166	481	183	532	175	507
90	169	728	185	803	178	767
120	171	978	188	1078	180	1031
150	174	1233	191	1357	183	1298
180	177	1491	194	1640	186	1570
210	180	1754	195	1927	189	1846
240	183	2022	198	2217	191	2126
270	185	2293	201	2511	194	2410
300	188	2568	205	2810	197	2698
330	191	2847	208	3114	200	2990
360	194	3130	211	3423	233	3309
Total Charge Passed(Qs)		3130		3423		3309
		Moderate		Moderate		Moderate

ตารางที่ ก-18 (ต่อ) ผลการทดสอบการแทรกซึมผ่านประจุไอออนคลอไรด์

	Test cell 1		Test cell 2		Test cell 3	
Sample	OPC-M		OPC-M		OPC-M	
Diameter(mm)	105		105		105	
length(mm)	51		50.1		51	
Period(min)	I	Charge Passed	I	Charge Passed	I	Charge Passed
	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)
Start						
1	157	116	133	98	167	123
30	177	377	151	321	169	372
60	182	511	162	440	172	499
90	183	779	170	685	175	754
120	185	1050	176	940	178	1014
150	185	1322	181	1203	180	1278
180	185	1595	180	1469	183	1546
210	184	1866	182	1735	186	1818
240	183	2137	185	2005	189	2094
270	184	2408	188	2280	191	2374
300	184	2679	193	2561	194	2657
330	183	2949	198	2849	197	2945
360	183	3219	207	3148	200	3238
Total Charge Passed(Qs)		3219		3148		3238
		Moderate		Moderate		Moderate



ตารางที่ ก-18 (ต่อ) ผลการทดสอบการแทรกซึมผ่านประจุไอออนคลอไรด์

	Test cell 1		Test cell 2		Test cell 3	
Sample	10-OPA-G		10-OPA-G		10-OPA-G	
Diameter(mm)	105		105		105	
length(mm)	51		50.1		51	
Period(min)	I	Charge Passed	I	Charge Passed	I	Charge Passed
	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)
Start						
1	84	62	75	55	63	47
30	84	186	75	166	69	148
60	85	248	76	222	71	201
90	85	373	76	333	74	307
120	85	499	76	446	75	417
150	85	624	76	558	77	529
180	86	751	77	671	77	643
210	86	877	77	784	77	756
240	86	1004	77	898	77	870
270	87	1132	78	1012	77	983
300	87	1260	78	1127	77	1097
330	87	1388	78	1242	81	1213
360	88	1517	79	1358	81	1333
Total Charge Passed(Qs)		1517		1358		1333
		Low		Low		Low

ตารางที่ ก-18 (ต่อ) ผลการทดสอบการแทรกซึมผ่านประจุไอออนคลอไรด์

	Test cell 1		Test cell 2		Test cell 3	
Sample	10-OPA-B		10-OPA-B		10-OPA-B	
Diameter(mm)	105		105		105	
length(mm)	51		50.1		51	
Period(min)	I	Charge Passed	I	Charge Passed	I	Charge Passed
	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)
Start						
1	75	55	87	64	95	70
30	75	166	95	204	95	210
60	76	222	92	272	96	281
90	76	333	91	406	96	422
120	76	446	92	541	96	563
150	76	558	92	677	96	705
180	77	671	92	812	97	848
210	77	784	92	947	97	991
240	77	898	95	1085	97	1134
270	78	1012	100	1228	98	1278
300	78	1127	101	1376	98	1422
330	78	1242	102	1526	98	1566
360	79	1358	104	1677	99	1711
Total Charge		1358		1677		1711
Passed(Qs)		Low		Low		Low

ตารางที่ ก-18 (ต่อ) ผลการทดสอบการแทรกซึมผ่านประจุไอออนคลอไรด์

	Test cell 1		Test cell 2		Test cell 3	
Sample	10-OPA-C		10-OPA-C		10-OPA-C	
Diameter(mm)	105		105		105	
length(mm)	51		50.1		51	
Period(min)	I	Charge Passed	I	Charge Passed	I	Charge Passed
	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)
Start						
1	95	70	90	66	87	64
30	95	210	90	199	95	204
60	96	281	91	266	92	272
90	96	422	91	400	91	406
120	96	563	91	534	92	541
150	96	705	91	669	92	677
180	97	848	92	804	92	812
210	97	991	92	939	92	947
240	97	1134	92	1075	95	1085
270	98	1278	93	1211	100	1228
300	98	1422	93	1348	101	1376
330	98	1566	93	1485	102	1526
360	99	1711	94	1623	104	1677
Total Charge		1711		1623		1677
Passed(Qs)		Low		Low		Low

ตารางที่ ก-18 (ต่อ) ผลการทดสอบการแทรกซึมผ่านประจุไอออนคลอไรด์

	Test cell 1		Test cell 2		Test cell 3	
Sample	10-OPA-M		10-OPA-M		10-OPA-M	
Diameter(mm)	105		105		105	
length(mm)	51		50.1		51	
Period(min)	I	Charge Passed	I	Charge Passed	I	Charge Passed
	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)	(mA)	(Coulombs)
Start						
1	87	64	84	62	97	71
30	95	204	96	204	106	228
60	92	272	93	272	108	307
90	91	406	96	411	110	468
120	92	541	101	556	110	630
150	92	677	102	706	110	792
180	92	812	106	860	110	954
210	92	947	108	1017	109	1115
240	95	1085	109	1177	109	1276
270	100	1228	109	1337	108	1437
300	101	1376	107	1496	108	1596
330	102	1526	107	1654	109	1756
360	104	1677	108	1813	108	1916
Total Charge Passed(Qs)		1677		1813		1916
		Low		Low		Low

**การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์**

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17

9 - 11 พฤษภาคม 2555 โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์แอนคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี

## กำลังอัดและการยับยั้งปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาในมอร์ตาร์ใส่มวลรวมเศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

### COMPRESSIVE STRENGTH AND ALKALI SILICA REACTION IN MORTAR CONTAINING WASTE GLASS AGGREGATE BLENDED OIL PALM ASH

<sup>1</sup>อรุณ นาครักษา (Arun Nakruksa)<sup>1</sup>

دنوپل ตันนโยภาส (Danupon Tonnayopas)<sup>2</sup>

ภาสกร ชัยวิริยะวงค์ (Passagorn Chaiviriyawong)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์,  
bo\_my@hotmail.com

<sup>2</sup>รศ.ดร., ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์,  
danupon.t@psu.ac.th

<sup>3</sup>ผศ.ดร., ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, cpassagorn@eng.psu.ac.th

**บทคัดย่อ:** ศึกษากำลังอัดและการยับยั้งอัลคาไลซิลิกาของมอร์ตาร์ใส่มวลรวมเศษกระจกผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีผลต่อมอร์ตาร์ โดยแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้เศษกระจกเป็นมวลรวมละเอียดแทนทราย สมบัติของมอร์ตาร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความหนาแน่นกำลังอัด บ่มน้ำที่ 7, 28 และ 56 วัน และความต้านทานปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 ระยะเวลา 56 วัน พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 อายุ 28 และ 56 วัน ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปกติ นอกจากนี้ยังพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมากขึ้น ช่วยยับยั้งปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาในมอร์ตาร์ ได้ผลดีขึ้น

**คำสำคัญ:** เศษกระจก, เถ้าปาล์มน้ำมัน, มอร์ตาร์, กำลังอัด, ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา

**Abstract:** The effect of waste glass (WG) and oil palm ash (OPA) on compressive strength and alkali silica reaction (ASR) of cement mortar was investigated. The percentage replacements of OPA in Portland cement was 10, 20 and 30 by weight of binder and used WG as fine aggregate of sand. The properties of the mortar were determined bulk density, compressive strength, cured in water at the age of 7, 28 and 56 days and ASR immersed in 5% magnesium sulfate for 56 days. According to experimental results revealed that compressive strength of 28 and 56 days mortar with 10% OPA was similarly to normal mortar. Also increase OPA, attributed to suppressing expansion due to ASR.

**Keywords:** Waste glass, Oil palm ash, Mortar, Compressive strength, Alkali silica reaction

<sup>1</sup> ผู้ติดต่อหลัก (Corresponding author)

## 1. บทนำ

เนื่องจากสภาวะปัจจุบันมีการใช้งานกระจกในงานก่อสร้างมากขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้ในทุกโครงการที่มีการก่อสร้าง จะต้องมีการใช้วัสดุงานกระจกเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่เนืองๆ ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีการนำกระจกไปใช้ใหม่มีหลายวิธี เช่น การนำกลับไปหลอมใหม่ การทำเป็นกระเบื้องเคลือบแก้ว การทำอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว เป็นต้น ซึ่งการนำกลับไปใช้ใหม่แต่ละวิธีมีต้นทุนและขอบเขตที่จำกัด เช่น การหลอมโรงงานส่วนใหญ่อยู่ในกรุงเทพและปริมณฑล หากระยะทางไกลๆเหมือนภาคใต้คงต้องสูญเสียค่าขนส่งมากพอสมควร นี่แค่เป็นต้นทุนเริ่มต้นเมื่อการหลอมเริ่มต้นต้องสูญเสียต้นทุนด้านเชื้อเพลิงเพราะการหลอมใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส ซึ่งหากเราสามารถกำจัดได้ในส่วนภูมิภาคก็ไม่จำเป็นต้องสูญเสียค่าขนส่งที่มากมายและค่าเชื้อเพลิงในการหลอมใหม่ และในปัจจุบันวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตไม่จำเป็นต้องเป็นทรายเสมอไป ซึ่งอาจจะเป็นวัสดุเทียบเท่าชนิดอื่นก็ได้ หากผลการทดสอบได้ตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งหากผลการทดลองผสมเศษกระจกแทนมวลรวมละเอียด มีสมบัติดีกว่าหรือเทียบเท่าคอนกรีตทั่วไป คงเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและทำให้มีทางเลือกวัสดุทดแทนวัสดุธรรมชาติเพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้ศึกษาวัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมงานก่อสร้าง โดยศึกษาสมบัติเปรียบเทียบกำลังอัด ความหนาแน่น และการต้านทานปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา ของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมมวลรวมเศษกระจกกับเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นตัวประสาน ซึ่งจะเป็นทางเลือกหนึ่งในงานคอนกรีตที่นำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดต้นทุนการผลิตมอร์ตาร์จนถึงต้นทุนการก่อสร้างและลดมลภาวะสิ่งแวดล้อมวัสดุที่เหลือ

ทิ้งจากอุตสาหกรรมงานก่อสร้างและแนวทางสร้างสรรค์ได้ผลิตภัณฑ์นิเวศน์

ปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มอยู่หลายจังหวัด ในประเทศไทย ดังนั้นจึงมีปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ ทอยออกมากจากกระบวนการผลิตมากมาย หลายปีที่ผ่านมานักวิจัยได้วิจัยเถ้าปาล์มน้ำมันมาทำเป็นวัสดุพอลิโพรพิลีน Toy[1] ได้ศึกษาถึงศักยภาพของเถ้าปาล์มบดละเอียดในงานคอนกรีตและพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีสมบัติพอลิโพรพิลีนที่ดีและยังช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา(ASR) นอกจากนี้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จักรกฤษณ์[2] ได้ศึกษาการใช้เศษแก้วใสทำเป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยพบว่าสามารถใช้เศษแก้วใสเป็นมวลรวมหยาบได้ Zainab Z. Ismail and AL-Hashmi[3] ศึกษาสมบัติทางกำลังและการต้านทานปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา พบว่าสามารถใช้เศษแก้วแทนที่ทรายได้ถึง 66% และยังให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติที่ 28 วัน

ดังนั้นการศึกษานี้เพื่อทราบผลต่อเนื่องจากการแทนทรายด้วยเศษกระจก ที่มีผลกระทบต่อกำลังอัดและความการต้านทานปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา ของมอร์ตาร์ ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นสารผสมเพิ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสม

## 2. การดำเนินการวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้

ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าปาล์มน้ำมันนำมาจาก บริษัทล่าสูง (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ต่าบลกะลาเส อำเภอลิเกา จังหวัดตรัง เป็นวัสดุเหลือจากการนำของเสียจากที่บน้ำมันมาทำเป็นวัสดุเชื้อเพลิงภายในโรงงาน ส่วนเศษกระจกโพลีดีต่างๆ ขนาดความหนา 5-6 มิลลิเมตร ที่เหลือจากการแบ่ง

ส่วนที่ใช้งานออก ได้นำมาจากบริษัท หาดใหญ่ เกษม จำกัด จังหวัดสงขลา ส่วนทรายแม่น้ำเป็น ทรายในพื้นที่ล้างสะอาด และน้ำใช้ในการ ทดสอบเป็นน้ำประปาสะอาด

## 2.2 ขนาดอนุภาคของวัสดุ

เศษกระจกได้มาจากบริษัท หาดใหญ่ เกษม จำกัด มีขนาดความกว้าง 10-20 เซนติเมตร นำมาตัดแยกแล้วล้างน้ำสะอาด นำมาอบที่ อุณหภูมิ  $100 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาบดละเอียดด้วยเครื่องบด ball mill เป็นเวลา 2 ชม. จากนั้นร่อนคัดขนาดให้ผ่าน ตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 100 และ ทรายแม่น้ำล้างสะอาดอบที่อุณหภูมิ  $100 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำมา ร่อนคัดขนาดให้ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้าง ตะแกรงเบอร์ 100 แสดงในรูปที่ 1 สำหรับเก็บ ุปาล์มน้ำมัน นำมาบดละเอียดด้วยเครื่องบด ball mill เป็นเวลา 2 ชม. และคัดขนาดผ่านตะแกรง เบอร์ 325 ส่วนการกระจายขนาดอนุภาคแสดง ในรูปที่ 3

## 2.3 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของเก็บ ุปาล์มน้ำมันและเศษกระจก ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer ดังตารางที่ 1 พบว่าเก็บ ุปาล์มน้ำมันมีผลรวมของ ซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์เท่ากับร้อยละ 56.61 ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ไม่เกินร้อยละ 5 และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้เกิน ร้อยละ 6 จึงจัดเป็นวัสดุพอลิซิลานชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ส่วนเศษกระจก มี  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{CaO}$  สูง เพราะเป็นแร่ตั้งต้นใน การผลิตกระจก  $\text{SiO}_2$  ทำให้แก้วนั้นมีโครงสร้างที่

แข็งแรงทนต่อความร้อนและสารเคมี  $\text{Na}_2\text{O}$  ทำให้ แก้วนั้นมีจุดหลอมเหลวต่ำ และ  $\text{CaO}$  ช่วยในการ ขึ้นรูป[4]



(a)



(b)



(c)



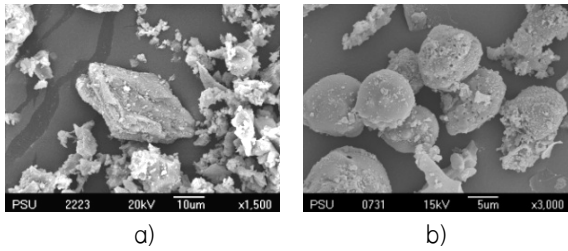
(d)

รูปที่ 1 ขนาดของทราย และเศษกระจกโพลิตที่คัด แยกขนาดแล้ว a)ทราย b)เศษกระจกสีเขียว, c) เศษกระจก สีน้ำตาลและ d)เศษกระจกสีใส

## 2.4 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุประสาน

ลักษณะของเก็บ ุปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งได้จากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังรูป ที่ 3 พบว่าปูนซีเมนต์ (รูปที่ 2 a) มีลักษณะเป็น เหลี่ยมซึ่งแตกต่างจากเก็บ ุปาล์มน้ำมันที่รูปร่าง กลมมีรูพรุน (รูปที่ 2 b)และเมื่อนำมาตรวจหา ขนาดด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยแสง เลเซอร์(Laser Particle Size Analyzer)พบว่าขนาด อนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์และเก็บ ุปาล์มน้ำมัน เท่ากับ 16.44 และ 26.57 ไมครอน ตามลำดับ





รูปที่ 2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) a)อนุภาคปูนซีเมนต์ และ ข)อนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	OPA	WGG	WGB	WGC
SiO <sub>2</sub>	50.5 2	64.21	64.34	64.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.82	1.31	0.96	0.89
K <sub>2</sub> O	5.93	0.32	0.80	0.41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.27	1.17	0.62	0.32
CaO	10.84	13.59	14.61	15.89
SO <sub>3</sub>	0.42	0.241	0.33	0.24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.19	-	-	-
TiO <sub>2</sub>	0.22	-	-	-
MgO	3.42	4.03	3.57	3.70
Na <sub>2</sub> O	-	15.07	14.50	13.77
K <sub>2</sub> O	-	0.32	0.80	0.41
LOI	3.7	-	-	-
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม/กรัม)	46.7	-	-	-
ความพรุน (ตร.ม/กรัม)	18.2	-	-	-

หมายเหตุ : OPA = เถ้าปาล์มน้ำมัน, WGG = เศษกระจกเขียว, WGB = เศษกระจกสีน้ำตาล, WGC = เศษกระจกสีใส, WGM = เศษกระจกผสมสีเขียว, สีน้ำตาลและสีใส อัตราส่วน 1:1:1

## 2.5 การออกแบบสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์

ออกแบบสัดส่วนผสมสำหรับกำลังอัดของวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 โดยกำหนดให้แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกร้อยละ 100 แยกออกเป็นมวลรวม 4 ชนิด ประกอบด้วย เศษกระจกโฟลต สีเขียว(WGG), สีน้ำตาล(WGB), สีใส(WGC) และเศษกระจกรวม 3 สี(WGM) และควบคุมปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน(w/b) ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.40 ตลอดการศึกษา เนื่องจากการทดลองของ อภิรักษ์[5] มีการหาปริมาณน้ำโดยวิธี Flow Table พบว่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นและกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ผสมเถ้าปาล์มมีค่าใกล้เคียงกันมากจากการแทนที่เถ้าปาล์ม ร้อยละ 10, 20 และ 30 ซึ่งคอนกรีตที่ให้กำลังสูงส่วนหนึ่งมาจากค่าปริมาณน้ำที่ต่ำ

สำหรับการทดสอบความการต้านทานเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา ของวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.25 โดยกำหนดให้แทนที่เศษกระจกโฟลตร้อยละ 100 และควบคุมปริมาณน้ำให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.47 ตามมาตรฐาน ASTM C1260-94

## 2.6 วิธีทดสอบ

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวตั้งต้นและปลายของซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามมาตรฐาน ASTM C191-99 แล้วใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(w/b) ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.4 ตลอดการศึกษากการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109-99 ขนาดของมอร์ตาร์เท่ากับ 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราส่วนวัสดุประสานดังตารางที่ 2 และใช้มวลรวมเศษกระจกร้อยละ 100

ถอดแบบที่อายุ 1 วัน บ่มในน้ำสะอาดที่อายุ 7, 28 และ 56 วัน เมื่อครบกำหนดนำขึ้นมาปล่อยให้แห้ง

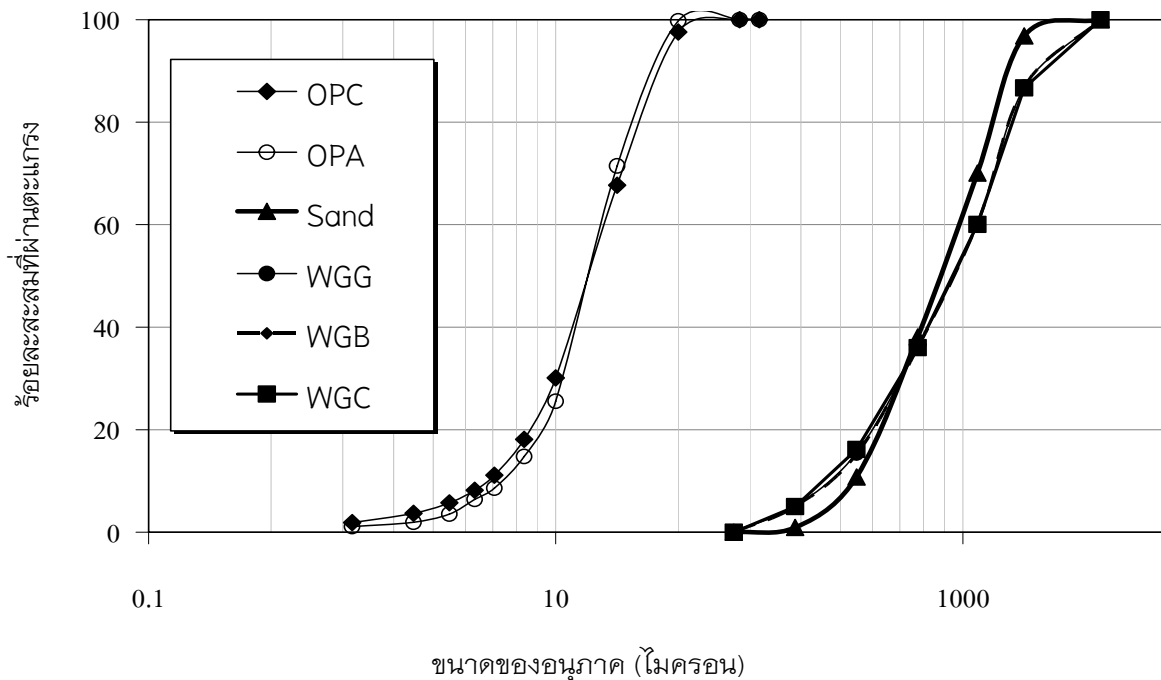
ในอุณหภูมิห้องวัดขนาดซึ่งน้ำหนัก หาความหนาแน่น นำมอร์ต้าร์มาทดสอบกำลังอัด ส่วนการทดสอบความการต้านทานปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ของมอร์ต้าร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1260-94 ขนาดของมอร์ต้าร์เท่ากับ 2.5x2.5x28.5 เซนติเมตร อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด 1:2.25 แล้วใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(w/b) ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.47 ถอดแบบที่อายุบ่ม 1 วันนำมอร์ต้าร์มาวัดความยาวด้วยเครื่องเปรียบเทียบความยาว(Length Comparator) ตัวอย่างละ 3 ครั้งหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำสะอาดแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80±2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมอร์ต้าร์มาวัดความยาวอีกครั้ง จากนั้นนำไปแช่ในสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์(1N NaOH) 40 กรัมต่อน้ำ 1,000 กรัม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนครบ 14 วัน วัดความยาวที่อายุ 3, 7 และ 14 วัน จนครบขั้นตอนของมาตรฐาน ASTM C1260-94 จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 เพื่อเร่งการขยายตัวของขนาดความยาวและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของก้อนตัวอย่างทุกๆ 7 วันจนครบ 56 วัน Topcu[6] ใช้ 1% Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> เพื่อเร่งการขยายตัว พบว่ามีรอยแตกกว้างหลังจาก 21 วัน ต่อจากกระบวนการทดสอบที่ใช้ 1N NaOH ของมาตรฐาน ASTM C1260-94

### 3. ผลการทดสอบ

#### 3.1 การก่อตัวของซีเมนต์เฟส

ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว



รูปที่ 3 การกระจายขนาดของเถ้าปาล์มน้ำมัน, ปูนซีเมนต์, ทรายและเศษกระจกสีต่างๆ

(ตารางที่ 3) พบว่าเวลาเริ่มต้นก่อตัวและสิ้นสุดก่อตัวของซีเมนต์ลั่วนที่ 112 นาที และ 175 นาที แต่เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-30 เวลาเริ่มต้นก่อตัวและสิ้นสุดก่อตัวเป็น 123-190 และ 135-225 นาที ตามลำดับ แสดงว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมากขึ้น สามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวได้นานขึ้นตามลำดับ เนื่องจากว่าเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์มากขึ้น จะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลง เป็นผลให้ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวช้าลงตามลำดับ (รูปที่ 3)

ตารางที่ 2 สูตรรอกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์

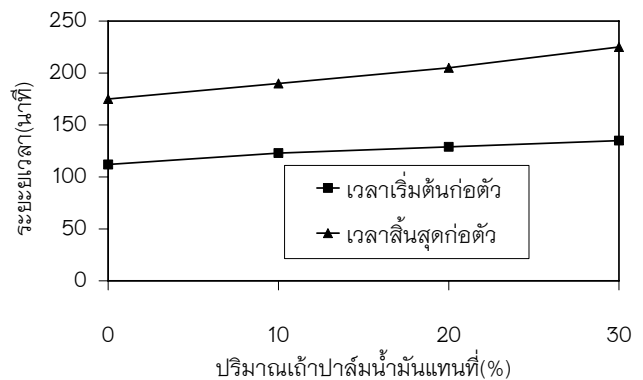
รหัสตัวอย่าง	วัสดุประสาน (%)		w/b
	OPC	OPA	
Control	100	0	0.40
OPC-WGG	100	0	0.40
OPC-WGB	100	0	0.40
OPC-WGC	100	0	0.40
OPC-WGM	100	0	0.40
10-OPA-WGG	90	10	0.40
20-OPA-WGG	80	20	0.40
30-OPA-WGG	70	30	0.40
10-OPA-WGB	90	10	0.40
20-OPA-WGB	80	20	0.40
30-OPA-WGB	70	30	0.40
10-OPA-WGC	90	10	0.40
20-OPA-WGC	80	20	0.40
30-OPA-WGC	70	30	0.40
10-OPA-WGM	90	10	0.40
20-OPA-WGM	80	20	0.40
30-OPA-WGM	70	30	0.40

หมายเหตุ : X-OPA = ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผสม X%; S=ทราย; WGG=เศษกระจกเขียว; WGB=เศษกระจกสีน้ำตาล; WGC=เศษกระจกสี

ใส; WGM=เศษกระจกผสมสีเขียว, สีน้ำตาลและสีใส อัตราส่วน 1:1:1

ตารางที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

รหัสตัวอย่าง	อัตราส่วน w/(C+OPA)	เวลาเริ่มต้นก่อตัว (นาที)	เวลาสิ้นสุดก่อตัว (นาที)
OPC	25.86	112	175
10-OPA	27.50	123	190
20-OPA	28.75	129	205
30-OPA	30.30	135	225

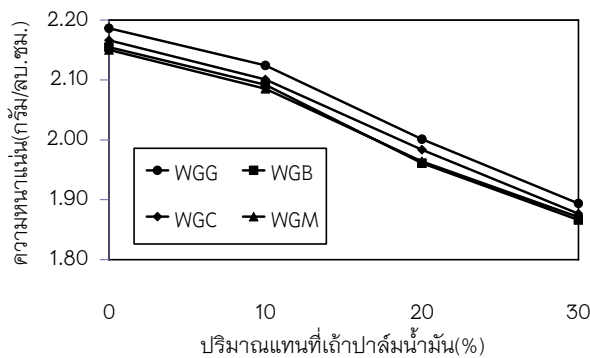


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าปาล์มที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

### 3.2 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ ได้แสดงในรูปที่ 4 พบว่ามอร์ตาร์ควบคุม มีค่าเท่ากับ 2,255 กก./ลบ.ม. ส่วนมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกร้อยละ 100 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 มากขึ้นตามลำดับ ทำให้น้ำหนักของมอร์ตาร์ลดลงเนื่องจากว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีความพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์คือ 18.2 ตร.ม./กรัม(ตารางที่ 1) จึงทำให้มอร์ตาร์ที่เมื่อผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็นโพรงมากขึ้น เป็นผลให้มอร์ตาร์มีน้ำหนักเบาและความหนาแน่นลดลง[7] อีกสาเหตุหนึ่งมาจากอิทธิพลของมวลรวมที่ทำให้ความหนาแน่นของ

มอร์ต้ามวลรวมเศษกระจกที่ไม่มีเถ้าปาล์ม แทนที่น้อยกว่ามอร์ต้าควบคุม ขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดและรูปร่างของมวลรวม สังเกตจากรูปที่ 1 พบว่าเศษกระจกมีลักษณะแบนและเป็นลูกบาศก์คละกันไป จึงทำให้สภาพการอัดแน่นไม่ดีส่งผลต่อความหนาแน่นทำให้ลดลง ส่วนกระจกแต่สีมีค่าใกล้เคียงกันบ่งบอกได้ว่าไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของมอร์ต้า



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าปาล์ม น้ำมันที่เพิ่มขึ้นกับความหนาแน่น

3.3 กำลังอัด

จากการทดสอบหาค่ากำลังอัดมอร์ต้า ปกติและมอร์ต้าแทนที่ทรายด้วยเศษกระจก ร้อยละ 100 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ดังแสดงใน ตารางที่ 4 และรูปที่ 6,7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มร้อยละ 0,10, 20 และ 30 ถอดแบบที่ 1 วัน อายุบ่ม 7, 28 และ56 วัน พบว่ามอร์ต้าปกติเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 7, 28 และ56 วัน ให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าอัตราส่วนอื่นแต่น้อยกว่ามอร์ต้าควบคุม ที่อายุ 28 และ 56 คิต เป็นร้อยละ 91 ถึง 94 ตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 และ 30 ที่

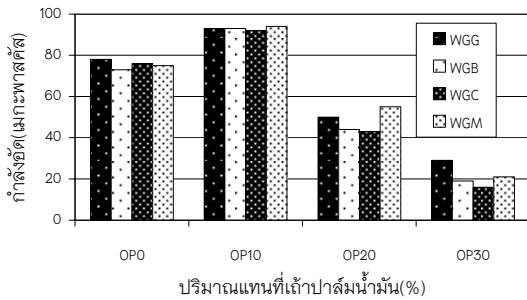
อายุการบ่ม 28 และ56 วัน ให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุมคิดเป็นร้อยละ 22 ถึง 55 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าปกติตามมาตรฐาน ASTM C618 กำหนด ถือได้ว่าเป็นอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสม

จากผลที่ได้สังเกตเห็นว่าเมื่อผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนที่เหมาะสมและบ่มมอร์ต้าที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลาน และพบว่ามอร์ต้าที่ผสมเศษกระจกร้อยละ 100 ทุกอัตราส่วนให้กำลังต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุมเป็นผลมาจากขนาดและรูปร่างของมวลรวมเศษกระจกจึงทำให้กำลังต่ำกว่า และยังพบอีกว่าเศษกระจกแต่ละสีให้กำลังอัดใกล้เคียงกันเหมือนงานวิจัยของ Ozan, O and Yuksel[8]

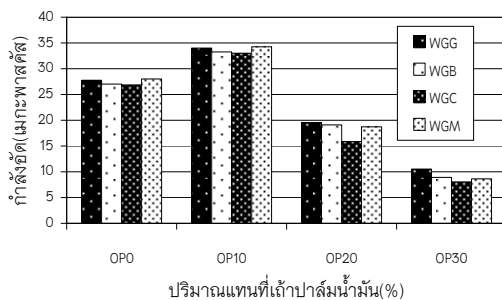
ตารางที่ 4 กำลังอัดของมอร์ต้า

รหัสตัวอย่าง	กำลังอัด (MPa)		ดัชนีกำลัง (%)			
	0 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	28 วัน	56 วัน
Control	17	26	36	37	100	100
OPC-WGG	13	23	28	28	78	75
OPC-WGB	14	23	26	27	73	73
OPC-WGC	13	23	27	27	76	73
OPC-WGM	13	23	27	28	75	78
10-OPA-WGG	13	24	33	34	93	92
20-OPA-WGG	7	11	18	19	50	53
30-OPA-WGG	4	6	10	11	29	29
10-OPA-WGB	13	24	33	33	93	91
20-OPA-WGB	8	11	16	19	44	52
30-OPA-WGB	2	3	7	9	19	24
10-OPA-WGC	14	22	33	33	92	91
20-OPA-WGC	6	12	15	16	43	43
30-OPA-WGC	3	3	6	8	16	22
10-OPA-WGM	13	25	34	34	94	91
20-OPA-WGM	6	12	20	19	55	51
30-OPA-WGM	3	6	8	9	21	23

หมายเหตุ : X-OPA = ปริมาณเก่าปาล์มน้ำมันที่ผสม X%; S=ทราย; WGG=เศษกระจกเขียว; WGB=เศษกระจกสีน้ำตาล; WGC=เศษกระจกสีใส; WGM=เศษกระจกผสมสีเขียว, สีน้ำตาลและสีใส อัตราส่วน 1:1:1



รูปที่ 6 ดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์มวลรวมเศษกระจกที่อายุปม 28 วัน

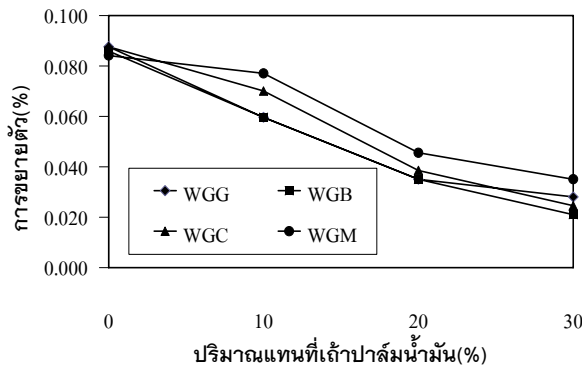


รูปที่ 7 กำลังอัดของมอร์ตาร์มวลรวมเศษกระจกที่อายุปม 56 วัน

### 3.4 ปฏิกริยาแอลคาไลซิลิกา

จากการทดสอบความต้านทานปฏิกริยาแอลคาไลซิลิกา ใช้แบบหล่อมอร์ตาร์ ขนาด 2.5x2.5x28.5 เซนติเมตร หล่อตามมาตรฐาน ASTM C1260-94 โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุประสานต่อมวลรวมมวลรวมเศษกระจก 1:2.25 หลังจาก 14 วัน นำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 เพื่อเร่งการขยายตัวของมอร์ตาร์แทนที่

ทรายด้วยเศษกระจกร้อยละ 100 ผสมเก่าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ดังแสดงในตารางที่ 5 และจากรูปที่ 8-9 เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวและสังเกตการแตกลายงาระยะเวลา 56 วัน ตามลำดับพบว่ามอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกอย่างเดียวจะมีการขยายตัวมากกว่ามอร์ตาร์ปกติ เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเก่าปาล์มน้ำมันมากขึ้นจะสามารถลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ เนื่องจากปูนซีเมนต์จะมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูง แต่เมื่อผสมเก่าปาล์มน้ำมันมากขึ้นจะไปลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ บวกกับปริมาณของซิลิกาที่ได้จากเก่าปาล์มน้ำมัน จึงทำให้มีการขยายตัวน้อยกว่า ตัวอย่างเช่น เมื่อแทนที่เก่าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 อายุปม 56 วัน มอร์ตาร์ขยายตัวร้อยละ 0.02-0.04 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม และมอร์ตาร์แทนที่ทรายด้วยเศษกระจกที่ไม่มีส่วนผสมเก่าปาล์มน้ำมันขยายตัวร้อยละ 0.08-0.09 มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากปูนซีเมนต์มีแคลเซียมออกไซด์ ที่ได้จากปฏิกริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นต่างและสมบัติทางเคมีของกระจกในสภาพเป็นต่างจะเกิดปฏิกริยาที่ต่อเนื่องและสามารถทำลายโครงสร้างของเศษกระจกได้[4] ทำให้เกิดช่องว่างและทำให้สารละลายแทรกซึมได้ง่ายกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเก่าปาล์มน้ำมัน จึงทำให้เกิดการขยายตัวในที่สุด ส่วนการแตกลายงาของมอร์ตาร์ยังไม่แสดงผลเท่าที่ควรดังรูปที่ 9 อาจต้องใช้เวลาานกว่านี้ หรือใช้วิธีของ Topcu[6]



รูปที่ 8 เปรียบเทียบการขยายตัวของมอร์ตาร์

มวลรวมเศษกระจกที่อายุป่ม 56 วัน

ตารางที่ 5 แสดงการขยายตัว

รหัสตัวอย่าง	การขยายตัว (%)				
	0วัน	7วัน	14วัน	28วัน	56วัน
Control	0.00	0.02	0.03	0.04	0.05
OPC-WGG	0.00	0.04	0.05	0.06	0.09
OPC-WGB	0.00	0.05	0.06	0.07	0.09
OPC-WGC	0.00	0.05	0.06	0.07	0.09
OPC-WGM	0.00	0.05	0.06	0.07	0.08
10-OPA-WGG	0.00	0.04	0.04	0.05	0.06
20-OPA-WGG	0.00	0.00	0.02	0.03	0.04
30-OPA-WGG	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03
10-OPA-WGB	0.00	0.04	0.04	0.05	0.06
20-OPA-WGB	0.00	0.02	0.02	0.02	0.04
30-OPA-WGB	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
10-OPA-WGC	0.00	0.04	0.05	0.05	0.07
20-OPA-WGC	0.00	0.01	0.02	0.02	0.04
30-OPA-WGC	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
10-OPA-WGM	0.00	0.04	0.05	0.06	0.08
20-OPA-WGM	0.00	0.01	0.03	0.04	0.05
30-OPA-WGM	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04

หมายเหตุ : X-OPA = ปริมาณน้ำมันปาล์มที่ผสม X%; S=ทราย; WGG=เศษกระจกเขียว; WGB=เศษกระจกสีน้ำตาล; WGC=เศษกระจกสีใส; WGM=เศษกระจกผสมสีเขียว,สีน้ำตาลและสีใส อัตราส่วน 1:1:1

#### 4. สรุป

จากการศึกษาความเป็นไปได้ ในการนำเอา ปาล์มน้ำมันมาแทนที่ปูนซีเมนต์และนำเศษกระจก มาแทนที่ทราย เพื่อลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต เพื่อใช้ในการก่อสร้างพบว่า

1. องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์ม น้ำมันจัดอยู่ใน ชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C 618 และสามารถยึดระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ เฟสได้ดี

2. เมื่อนำน้ำมันปาล์มมาผสมในมอร์ตาร์ ร้อยละ 10 และแทนที่เศษ กระจก ร้อยละ 100 ป่มน้ำอย่างต่อเนื่อง 28 วัน ให้กำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม แสดงว่ามีสมบัติเป็นวัสดุพอใช้ในงานที่ดี

3. เมื่อนำน้ำมันปาล์มมาผสม มวลรวมเศษกระจก สามารถลดการขยายตัว มากกว่ามอร์ตาร์ผสมมวลรวมเศษกระจกที่ไม่มีการแทนที่น้ำมันปาล์ม

4. เมื่อนำทรายด้วยมวลรวมเศษกระจกสี ต่างกันพบว่าไม่มีผลกระทบต่อกำลังอัดและการ ขยายตัว เนื่องจาก มี SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O และ CaO เป็น แร่หลักในการหลอมแก้ว ส่วนสีที่ต่างกันเกิดจาก ออกไซด์ที่เติมลงไปซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังตารางที่ 1 สีเขียวเกิดจากการเติม โครเมียมออกไซด์ สี น้ำตาลเกิดจากการเติมนิกเกิล ส่วนสีใสไม่เติม อะไรเลย จึงทำให้ไม่ส่งผลต่อการทดลอง

5. เมื่อนำน้ำมันปาล์มมาผสม ในมอร์ตาร์ผสม เศษมวลรวมกระจก ร้อยละ 100 พบว่าอัตราส่วนที่ ดีที่สุดคือ มอร์ตาร์ที่ผสมน้ำมันปาล์ม ร้อยละ 10 ส่วนการพัฒนาต้านกำลังของมอร์ตาร์ผสม เศษกระจก ร้อยละ 100 หากผสมน้ำมันปาล์ม มากกว่าร้อยละ 10 มีความเป็นไปได้ ควรมีการบด เศษกระจกให้ละเอียดมากขึ้นหรือผสมทราย



รูปที่ 9 รูปตัวอย่างของมอร์ต้าร์มวลรวมเศษกระจกที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา

## 5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะบัณฑิตวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รวมถึงเจ้าปาล์มน้ำมันจาก บริษัทล่าสูง (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เจ้าปาล์มน้ำมัน หจก. นาคศิลป์ดีเวลอปเม้นท์ และบจก. หาดใหญ่เกษม ที่ให้ความอนุเคราะห์เศษกระจก ในการวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธี XRF และถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ด้วย

## 6. บรรณานุกรม

- [1] Tay, J.H, 1991, "Complete Reclamation of Oil Palm Waste", Resources Conservation and Recycling, Vol.5, pp. 383-392.
- [2] จักกฤษณ์ สุนทรานุรักษ์, 2554. การใช้เศษขวดแก้วใสทำเป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตผสมเถ้าขาน้อย, โครงการงานวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [3] Zainab Z. Ismail and AL-Hashmi, 2009, "Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concret", Waste Management Vol. 29, Issue 2, pp.665-659.
- [4] [http://www2.metec.or.th/th/research/gsat/glas\\_swe/gsat.asp](http://www2.metec.or.th/th/research/gsat/glas_swe/gsat.asp), แหล่งที่มาหน่วยบริการข้อมูลวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว(GSAT), ข้อมูลแก้ว: สืบค้นเมื่อ 10 มิถุนายน 2552
- [5] อภิรักษ์ นพรัตน์ และดนุพล ตันนโยภาส, 2551, "ผลกระทบของหินฝุ่นแกรนิตและเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีต่อกำลังอัดและความคงทนต่อกรดของมอร์ต้าร์", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, 14-16 พฤษภาคม 2551, หน้า MAT 146-151.
- [6] Topcu\*, I.B. and Canbaz, M, 2003 "Properties of concrete containing waste glass", Cement and Concrete Research. Vol. 34 Issue 2. pp.267-274.
- [7] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติ โกมล, 2547, "การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต", วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 15, หน้า 32-39.
- [8] Ozkan, O and Yuksel, I, 2007, "Studies on mortars containing waste bottle glass and

- industrial by-products”, *Construction and Building* . Vol.22 Issue 6. pp.1288–1298.
- [9] Park, Lee, Kim, 2004 “Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate”, *Cement and Concrete Research*. Vol. 34 Issue 2. pp.2181–2189.
- [10] Kou, S.C. and Poon, C.S., 2009, “Properties of self-compacting concrete prepared with recycle glass aggregate”, *Cement and Concrete Composites*. Vol.31 Issue 2. pp.107–113.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายอรุณ นาครักษา	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120117	
วุฒิการศึกษา		
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
	(วิศวกรรมโยธา)	ราชมนคลชัยบุรี
		ปีที่สำเร็จการศึกษา
		2549

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนค่าเล่าเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 1/2551

ทุนอุดหนุนงานวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2554

## ประวัติการทำงาน

2549-2551 วิศวกรประจำบริษัทไทยบริการอุตสาหกรรมและวิศวกรรมจำกัด(มหาชน)

2551-ปัจจุบัน กรรมการผู้จัดการ ห้างหุ้นส่วนจำกัดนาคศิลป์ ดีเวลอปเม้นท์

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อรุณ นาครักษา ดนุพล ตันนโยภาส และภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ (2555). กำลังอัดและการยับยั้ง

ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาในมอร์ต้าร์ใสมวลรวมเศษกระจกผสมแก้วปาล์มน้ำมัน.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17. 9-11 พฤษภาคม 2555.

โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์แอนคอนเวนชันเซ็นเตอร์. จังหวัดอุดรธานี