



อิทธิพลของเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบต่อสมบัติของคอนกรีต
มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

**Influence of Oil Palm Fiber Ash and Rice Husk Ash on Properties of
Oil Palm Shell Aggregate Concrete**

พรนรายณ์ บุญราศรี

Pornarai Boonrasi

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของไส้ปลาต้มน้ำมันและไส้เกลบต่อสมบัติของคอนกรีตมวล
รวมกะลาปาล์มน้ำมัน
ผู้เขียน นายพรนราชนันท์ บุญราศรี
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณพล ตันนโยภาส)

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณพล ตันนโยภาส)

.....กรรมการ
(ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล สัจจาฉนิชย์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบต่อสมบัติของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน
ผู้เขียน	นายพรนราชนันท์ บุญราศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบเป็นตัวประสานในคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน โดยนำเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบที่ใช้มีขนาด 45 ไมครอน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ใช้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวมหยาบแทนหิน และควบคุมค่าการยุบตัว ระหว่าง 50 - 60 มม. สมบัติของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ทำการศึกษา ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ และ กำลังอัด ที่อายุบ่ม 1, 7, 28, 56 และ 90 วัน ทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคและกำลังดึงแบบผ่าซีก ที่อายุบ่ม 1, 7 และ 28 วัน ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน และศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ รวมถึงตรวจหาชนิดแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้เถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน มีการหดตัวแบบแห้ง ความหนาแน่นรวมลดลง และการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาอิทธิพลของการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ พบว่า ที่อายุบ่ม 28 วัน คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันมีค่ากำลังอัดสูงสุด 28.54 เมกะพาสคัล คอนกรีตที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 ได้ค่า 25.12, 21.56 และ 19.47 เมกะพาสคัล และค่า 29.29, 25.21 และ 21.71 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังที่ผสมเถ้าทั้งสองไม่เกินร้อยละ 30 ให้ดัชนีกำลังสูงกว่าร้อยละ 75 ทั้งสิ้น ในด้านกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 (2.43-2.99 เมกะพาสคัล ที่ 28 วัน) และที่ผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 (2.40-2.82 เมกะพาสคัล ที่ 28 วัน) มีค่ากำลังดึงค่อยลดลง อย่างไรก็ตามทั้งค่ากำลังอัดและกำลังดึงล้วนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 330-97 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกลดลงตามอัตราส่วนร้อยละ 10-30 (2.95-3.22 กม./วินาที ที่ 28 วัน) นอกจากนี้เมื่อผสมเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมวล

รวมกะลาปาล์มน้ำมันมากขึ้น ยังช่วยต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 37-70 ที่อายุบ่ม 90 วัน ขณะที่การใช้เถาใยปาล์มน้ำมันไม่เห็นผลแตกต่าง

ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างจุลภาค ของตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถาใยปาล์มน้ำมันและเถาแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าประกอบไปด้วย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแอตตรึงไคต์ จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลาน และเมื่อศึกษาถึงโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถาใยปาล์มน้ำมันและเถาแกลบเพิ่มขึ้น พบความเป็นโพรงของเพสต์ และสารประกอบที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เช่น แ่งรูเข็มแร่แอตตรึงไคต์ ผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เพิ่มมากขึ้น

การคำนวณแบบจำลองสหสัมพันธ์แบบถดถอยของสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ใช้เถาใยปาล์มน้ำมันและเถาแกลบ แบบจำลองถดถอยได้สหสัมพันธ์ที่ดีที่สุดระหว่างค่าที่วัดให้ได้ก่อนตัวอย่างที่อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมแก่ส่วนผสมคอนกรีตกะลาปาล์มที่ใส่เถาทั้งสอง

คำหลัก : กะลาปาล์มน้ำมัน, เถาใยปาล์มน้ำมัน, กำลังอัด, กำลังดึงแบบผ่าซีก, ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค, การซึมผ่านของคลอไรด์

Thesis Title	Influence of Oil Palm Fiber Ash and Rice Husk Ash on Properties of Oil Palm Shell Aggregate Concrete
Author	Mr.Pornarai Boonrasi
Major Program	Civil Engineering (Structural Engineering)
Academic Year	2009

ABSTRACT

In this research, the using of oil palm fiber ash (OPFA) and rice husk ash (RHA) as binder in oil palm shell aggregate concrete (OPSC) were investigated. The OPFA and RHA, having particle size smaller than 45 micron were used in this study. The studied concrete was prepared, using OPFA and RHA as cement replacement at three of 10, 20 and 30% (by weight and on dry weight basis) and using oil palm shell (OPS) as coarse aggregate. The slump controlled between 50-60 mm. The properties of the OPSC specimens, cured at the age of 1, 7, 14, 28, 56 and 90 days, there included drying shrinkage, bulk density, water absorption and compressive strength. Ultrasonic velocity and splitting tensile strength tests were performed after 1, 7 and 28 days of curing. Chloride-ion penetration tests were performed after 28 and 90 days. Microstructure formation of the specimen OPSC was studied, using Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray Fluorescence (XRF) and X-Ray Diffraction (XRD).

Results revealed that the bulk density and drying shrinkage of OPSC decreased whereas the water absorption increased with the increasing percentage of OPFA and RHA. It was found that the highest value of 28 day compressive strength of OPSC was 28.54 MPa. The OPSC with 10-30%OPFA yielded the compressive strength of 25.12, 21.56 and 19.47 MPa and OPSC with 10-30%RHA yielded 29.29, 25.21 and 21.71 MPa, respectively. Strength activity indexes of 10-30%OPFA and 10-30%RHA were all higher than 75%. The splitting tensile strength of OPSC with 10-30%OPFA (2.43-2.99 MPa at 28 day) and with 10-30%RHA (2.40-2.82 MPa at 28 day) dramatically decreased. However, they met standard ASTM C 330-97. The ultrasonic velocity of OPSC decreased with 10-30% (2.95-3.22 km/sec at 28 day). Furthermore, it was found that the resistance to penetration of chloride-ions OPSC with 10-30%RHA at 90 days were increased with increasing percentage of RHA were between 37-70%.

XRF, XRD analysis of OPSC specimens by 10, 20 and 30% in OPFA and RHA at 28 days revealed the existence of calcium hydroxide (CH), calcium silicate hydrate (CSH) and Ettringite, which confirmed the occurrence of pozzolanic reaction in these specimens. SEM analysis of the 90 days specimens, showed that pores in paste and the number of needle-like Ettringite, CH and CSH compounds were increased with increasing proportion of OPFA and RHA.

Several regression models were proposed, correlating some important parameters to properties of OPSC with OPFA and RHA. The best correlation between measured values and available mathematical models was achieved for the modified proportional specimen to optimize both ashes content in OPSC mixtures.

Keywords : Oil palm shell, Oil palm fiber ash, splitting tensile strength, Compressive strength, Ultrasonic velocity, Chloride-ion penetration

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.คุณพล ตันนโยภาส ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นการให้ความรู้ คำปรึกษา ในการแก้ปัญหา คำแนะนำในการเขียนรายงานวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการตรวจสอบเนื้อหาและรูปแบบของวิทยานิพนธ์ให้มีถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล สัจจาณิษฐ์ และดร.วรพจน์ ประชาเสรี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือ ห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ คณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในด้านต่างๆด้วยดีตลอดมา รวมถึงบริษัทล่าสูง (ประเทศไทย) จำกัด(มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์กะลาปาล์มน้ำมันและถั่วปาล์มน้ำมัน

นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้คำปรึกษา ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา และขอขอบคุณ เพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้องนักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง) ทุกท่านที่ให้กำลังใจและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ สิ่งสำคัญที่สุด ผู้เขียนขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

พรนราชน์ บุญราศรี

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(19)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ปฏิกรียาไฮดรชัน	4
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกรียาไฮดรชัน	7
2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan)	8
2.4 ปฏิกรียาปอซโซลาน	9
2.5 มวลรวม	10
2.6 คอนกรีตมวลเบา	11
2.7 ปาล์มน้ำมัน	12
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วัตถุประสงค์และการเตรียมตัวอย่าง	21
3.2 การออกแบบส่วนผสมตัวอย่างทดสอบ	25
3.3 การตรวจคุณสมบัติของเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ	27
3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน	29
3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน	33
3.6 การตรวจทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน	33
3.7 การวิเคราะห์ผลและสรุปผล	34
	(8)

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา	
4.1 ลักษณะของถ้ำไยปาล์มน้ำมันและถ้ำเกลบที่ใช้	37
4.2 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน	44
4.3 องค์ประกอบทางเคมีและ โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน	65
4.4 การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยสหสัมพันธ์ในรูปสหสัมพันธ์พหุคูณ	77
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษา	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
เอกสารอ้างอิง	91
ภาคผนวก	
ก ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพ เชิงกล ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมัน	95
ข องค์ประกอบทางเคมี XRF และ ลายพิมพ์ XRD ที่อายุบ่ม 28 วัน	100
ค ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson Correlation) ระหว่างค่าตัวแปร ต่างๆ	106
ผลงานการตีพิมพ์เผยแพร่	118
ประวัติผู้เขียน	131

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	สารประกอบที่สำคัญในปูนเม็ด	4
2.2	เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จร้อยละ 80	7
2.3	เกณฑ์กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618	9
2.4	คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามลักษณะการนำไปใช้	12
2.5	สมบัติทางกายภาพของมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน	14
3.1	อัตราส่วนของวัสดุผสมในคอนกรีตทดสอบ (คิดโดยน้ำหนัก)	25
3.2	จำนวนตัวอย่างและการทดสอบคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน	26
3.3	ขนาดมิติของก้อนคอนกรีตที่ทดสอบ	26
3.4	คุณภาพคอนกรีตในพจน์ของความเร็วคลื่นตามยาว	30
3.5	การจำแนกระดับคุณภาพคอนกรีตตามการซึมผ่านของคลอไรด์	32
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน	37
4.2	สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน	39
4.3	ค่าความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาก่อตัวของส่วนผสมที่ศึกษา	41
4.4	ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง	44
4.5	ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศ	47
4.6	ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ	50
4.7	ผลการทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล์น้ำมันและเถ้าแกลบ	52
4.8	ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล์น้ำมันและเถ้าแกลบ	55
4.9	ผลการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล์น้ำมันและเถ้าแกลบ	58
4.10	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล์น้ำมันและเถ้าแกลบ	61
4.11	ค่าดัชนีกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล์น้ำมันและเถ้าแกลบ	62

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสม เถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ	66
4.13 ผลการตรวจชนิดแร่ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์ม น้ำมันและเถ้าแกลบ	70
4.14 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมัน	78
4.15 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังดึง กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมัน	80
4.16 สมการความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นรวม กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวล รวมกะลาปาล์มน้ำมัน	80
4.17 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10	81
4.18 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 20	81
4.19 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 30	82
4.20 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	82
4.21 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังดึง กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	83
4.22 สมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กับค่าต่างๆ ของคอนกรีต มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	83
4.23 สมการความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นรวม กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวล รวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	83
4.24 สมการความสัมพันธ์ของค่าการดูดซึมน้ำ กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	84

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.25	สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10	84
4.26	สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 20	85
4.27	สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 30	85
4.28	สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	86
4.29	สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังดึง กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	86
4.30	สมการสมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กับค่าต่างๆ ของ คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	87
4.31	สมการความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นรวม กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวล รวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	87
4.32	สมการความสัมพันธ์ของค่าการดูดซึมน้ำ กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	87
ค-1	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน	107
ค-2	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10	108
ค-3	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 20	109
ค-4	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 30	110
		(12)

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก-5	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	111
ก-6	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10	113
ก-7	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 20	114
ก-8	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 30	115
ก-9	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30	116

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า	
2.1	ลักษณะเมล็ดพันธุ์ปาล์มน้ำมัน (ก) พันธุ์คูรา (ข) พันธุ์พิติเฟอรา (ค) พันธุ์เทนอรา	13
3.1	เก้าอี้ปาล์มน้ำมันเหลือทิ้งภายในโรงงาน (ก) ห้องเก็บเก้าอี้ และ (ข) กองเก้าอี้ปาล์ม น้ำมัน	21
3.2	ขั้นตอนการเตรียมเก้าอี้ปาล์มน้ำมัน (ก) ก่อนร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 และ (ข) ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325	22
3.3	ขั้นตอนการเตรียมเก้าอี้กลบ (ก) กองเก้าอี้กลบ (ข) ก่อนนำไปบด และ (ค) ร่อนผ่าน ตะแกรงเบอร์ 325	22
3.4	การเก็บรักษาตัวอย่างเก้าอี้ปาล์มน้ำมันและเก้าอี้กลบที่เตรียมได้	23
3.5	กะลาปาล์มน้ำมัน (ก) กองกะลาปาล์มน้ำมัน และ (ข) ค้างตะแกรงเบอร์ 4	24
3.6	การทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคแสดงขนาดก้อนตัวอย่างและชุดเครื่องมือ ทดสอบ	31
3.7	การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ (ก) ก้อนตัวอย่างที่จะทดสอบ (ข) ชุดเครื่องมือ ทดสอบ	32
3.8	แผนภูมิขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย	36
4.1	ภาพถ่ายจุลภาค SEM เก้าอี้ปาล์มน้ำมัน (ก) ขยาย 1,000 เท่า (ข) ขยาย 5,000 เท่า	38
4.2	ภาพถ่ายจุลภาค SEM เก้าอี้กลบ (ก) ขยาย 1,000 เท่า (ข) ขยาย 5,000 เท่า	39
4.3	การกระจายขนาดของวัตถุดิบที่ใช้ผสมในคอนกรีตทดสอบ	40
4.4	อิทธิพลของปริมาณเก้าอี้ปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์กับระยะเวลาก่อตัว	43
4.5	อิทธิพลของปริมาณเก้าอี้กลบแทนที่ปูนซีเมนต์กับระยะเวลาก่อตัว	43
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเก้าอี้ปาล์มน้ำมัน	45
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเก้าอี้กลบ	46
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีต มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเก้าอี้ปาล์มน้ำมัน	47
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีต มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเก้าอี้กลบ	49

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุขุมกับค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเข้าไยปาล์มน้ำมัน	51
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุขุมกับค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเข้าแกลบ	51
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุขุมกับค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตมวลรวม กะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าไยปาล์มน้ำมัน	53
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุขุมกับค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตมวลรวม กะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าแกลบ	54
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเข้าไยปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์กับประจุไฟฟ้าที่ ผ่าน	56
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเข้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์กับประจุไฟฟ้าที่ผ่าน	57
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุขุมกับค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าไยปาล์มน้ำมัน	59
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุขุมกับค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลา ปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าแกลบ	60
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุขุมกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ ผสมเข้าไยปาล์มน้ำมัน	61
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุขุมกับค่าดัชนีกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเข้าไยปาล์มน้ำมัน	63
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุขุมกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ ผสมเข้าแกลบ	64
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุขุมกับค่าดัชนีกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเข้าแกลบ	65
4.22 องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและที่ผสมเข้าไยปาล์ม น้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 ที่อายุขุม 28 วัน	67
4.23 องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและที่ผสมเข้าแกลบ ใน อัตราส่วนร้อยละ 10-30 ที่อายุขุม 28 วัน	68

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 แสดงผลปริมาณแร่ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์ม น้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 ที่อายุบ่ม 28 วัน	70
4.25 แสดงผลปริมาณแร่ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและที่ผสมเถ้าแกลบ ใน อัตราส่วนร้อยละ 10-30 ที่อายุบ่ม 28 วัน	71
4.26 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ขยาย 1,600 เท่า	72
4.27 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ขยาย 2,500 เท่า	73
4.28 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ขยาย 3,700 เท่า	73
4.29 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 30 ขยาย 10,000 เท่า	74
4.30 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตรา ส่วนร้อยละ 10 ขยาย 1,000 เท่า	74
4.31 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตรา ส่วนร้อยละ 20 ขยาย 3,700 เท่า	75
4.32 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตรา ส่วนร้อยละ 30 ขยาย 3,700 เท่า	75
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคกับค่าความหนาแน่นรวมแห้งใน อากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ	78
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกกับค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของ คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ	79
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีตมวล รวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ	79
ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์กับ ระยะเวลาการก่อตัว	96
ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ	96

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเก็บค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ	97
ก-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ	97
ก-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ	98
ก-6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์กับความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์	98
ก-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ	99
ก-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ	99
ข-1 แสดงผลองค์ประกอบทางเคมี ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30	101
ข-2 แสดงผลปริมาณแร่ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30	101
ข-3 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน	102
ข-4 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10	102
ข-5 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 20	103
ข-6 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 30	103
ข-7 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10	104
ข-8 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 20	104

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-9	
ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 30	105

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	=	ปริมาณเถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก), %
Cal	=	แคลไซต์ (Calcite ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$))
CH	=	แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$))
Control	=	คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน
CSH	=	แคลเซียม ซิลิเกต ไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate ($\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5} \cdot x\text{H}_2\text{O}$))
Ett	=	เอตริงไทต์ (Ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$))
F_c	=	ค่ากำลังอัด, เมกะพาสคัล
F_T	=	ค่ากำลังดึง, เมกะพาสคัล
F	=	ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมวัสดุปอซโซลาน, เมกะพาสคัล
G_s	=	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)
LPSA	=	กัณหาอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser Particle Size Analysis)
Mic	=	ไมโครไคลน์ (Microcline ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$))
OPC	=	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement)
OPFA	=	เถ้าใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber Ash)
OPFA _{xx}	=	คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ xx โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
OPS	=	กะลาปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Shell)
Qt	=	ควอตซ์ (Quartz (SiO_2))
RHA	=	เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)
RHA _{xx}	=	คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ xx โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
SEM	=	ภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
T	=	อายุบ่ม (Curing Time), วัน
V_p	=	ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก, กม./วินาที
W	=	ปริมาณน้ำ, %
W/C	=	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Water Cement Ratio)
W/B	=	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water Binder Ratio)

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

w	=	ค่าการดูดซึมน้ำ, %
XRD	=	ตรวจชนิดแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction)
XRF	=	ตรวจองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence)
ρ	=	ความหนาแน่นรวมที่อายุป่ม 1 วัน, กก./ลบ.ม.
ρ_m	=	ความหนาแน่นรวม, กก./ลบ.ม.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ภาคใต้ของประเทศไทยมีอุตสาหกรรมการเกษตรที่สำคัญได้แก่ ยางพารา ปาล์ม น้ำมัน มะพร้าว และข้าว เป็นปริมาณมาก ซึ่งประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันประมาณ 2,026,204 ไร่ และมีผลผลิตประมาณ 5,002,670 ตันต่อปี ทำให้มีวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มได้แก่ ทะลายปาล์ม ใบจากเปลือก และ กะลาหุ้มเนื้อ มากถึง 2,501,335 ตันต่อปี และได้เข้าปาล์มน้ำมัน 125,066 ตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ปี พ.ศ. 2548) นอกจากนี้ยังมีแผน ขยายพื้นที่ปาล์ม 5 ล้านไร่ และพัฒนาของเดิมอีก 2 ล้านไร่ รวม 7 ล้านไร่ เพื่อนำไปผลิตไบโอดีเซล ส่งผลให้มีวัสดุที่เหลือทิ้งเพิ่มขึ้นประมาณ 8,750,000 ตันต่อปี และเข้าปาล์มน้ำมันประมาณ 437,000 ตันต่อปี (ข้อมูลจากกรมวิชาการเกษตร วางเป้าหมายปี พ.ศ. 2548-2551)

แกลบเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตรเช่นกัน ในปีหนึ่ง ๆ ประเทศไทยได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ในแต่ละตันของข้าวเปลือกเมื่อสีแล้วจะมีแกลบอยู่ประมาณ 200 กก. และเมื่อนำแกลบไปเผาจะได้เข้าแกลบ ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบหรือประมาณ 40 กก. (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล 2547) จากงานวิจัยด้านคอนกรีตต่างๆ แกลบสามารถนำไปใช้ร่วมกับคอนกรีต และเข้าแกลบนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนได้

งานวิจัยนี้ศึกษาวัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและข้าว โดยศึกษาสมบัติเปรียบเทียบกำลังอัด และการซึมผ่านของคลอไรด์ ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันร่วมกับการใช้เข้าปาล์มน้ำมันและเข้าแกลบเป็นวัสดุประสานแทนที่ซีเมนต์บางส่วน ซึ่งอาจเป็นทางเลือกหนึ่งในงานคอนกรีตที่นำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตจนถึงต้นทุนการก่อสร้าง เพิ่มมูลค่าและลดมลภาวะสิ่งแวดล้อมวัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสมบัติวัสดุปอซโซลานของเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ
- 2) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบเป็นวัสดุประสาน
- 3) ศึกษาความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีตทั้งสองประเภทดังกล่าว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) การศึกษานี้ใช้เถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักวัสดุประสาน ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของ ด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) เทียบกับมาตรฐาน ASTM C 618 ตรวจชนิดแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) และ โครงสร้างจุลภาคโดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area, SSA) การกัณขนาดอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser Particle Size Analysis, LPSA)
- 2) ศึกษาค่าความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ
- 3) ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ได้แก่ การดูดซึมน้ำ ความถ่วงจำเพาะ การลดขนาด ความสึกหรอแบบลอสแอนเจลีส์ และ **ออกแบบคอนกรีตทดสอบโดยใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อทรายต่อกะลาปาล์มน้ำมัน เท่ากับ 1:1.71:0.77 และควบคุมค่าการยุบตัว (Slump Test) ระหว่าง 50-60 มม. เพื่อให้อยู่ในเกณฑ์คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง**
- 4) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน โดยทดสอบการหดตัวแบบแห้ง ความหนาแน่นรวมแห้ง การดูดซึมน้ำ ที่อายุบ่ม 1, 7, 28, 56 และ 90 วัน ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ที่อายุบ่ม 1, 7 และ 28 วัน และทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน
- 5) ทดสอบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน โดยทดสอบกำลังดึง ที่อายุบ่ม 1, 7 และ 28 วัน และทดสอบกำลังอัด ที่อายุบ่ม 1, 7, 28, 56 และ 90 วัน จากนั้น

ตรวจองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ตรวจชนิดแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และ โครงสร้างจุลภาค โดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1) เพิ่มมูลค่าและลดมลภาวะสิ่งแวดล้อม จากวัสดุที่เหลือทิ้งในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มและภาคเกษตรกรรมข้าว
- 2) พัฒนางานวิจัยของเถ้าเียงปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน
- 3) เป็นแนวทางในการนำวัสดุที่เหลือทิ้งในอุตสาหกรรมมาประยุกต์ในงานคอนกรีตนิเวศน์ (Eco-Concrete)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ขององค์ประกอบของปูนซีเมนต์โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะดังนี้คือ

1) อากาศละลาย ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิดไอออนในสารละลาย และไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบขึ้นใหม่

2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย

ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้จะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์ ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบที่สำคัญในปูนเม็ด

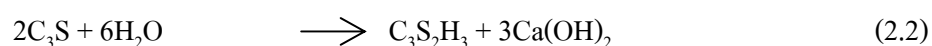
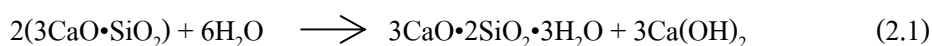
ชื่อสารประกอบหลัก	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

ที่มา: ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน (เครือซีเมนต์ไทย, 2548)

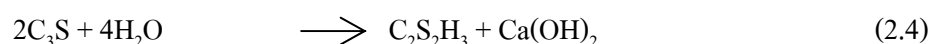
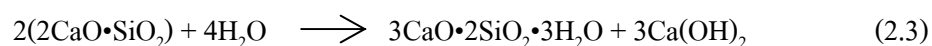
2.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

แคลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด “แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)” ประมาณร้อยละ 15-25 และสารประกอบ “(Calcium Silicate Hydrate, $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ $C_3S_2H_3$ หรือ CSH)” ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรง ดังแสดงในสมการที่ (2.1) (2.2) (2.3) และ (2.4)

สมการของ C_3S



สมการของ C_2S



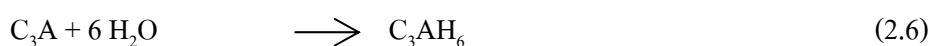
จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิดเนื้อวุ้น (Gel) ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

นอกจากนี้ ปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นด่างที่สูง คือมีค่า pH ประมาณ 12.5-13.0 ความเป็นด่างที่สูงมากของ $Ca(OH)_2$ จะก่อให้เกิดฟิล์มบางๆ ของเหล็กออกไซด์บนผิวเหล็ก ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

2.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนียม (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังแสดงในสมการที่ (2.5) และ (2.6)

สมการของ C_3S



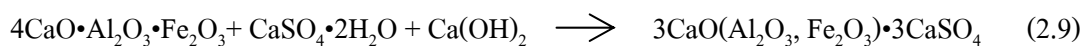
ในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ จะมีการใส่ยิปซัมเข้าไป เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A ไม่ให้เกิดเร็วเกินไป โดยยิปซัมที่ใส่จะทำปฏิกิริยากับ C_3A ทำให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังแสดงในสมการที่ (2.7) และ (2.8)



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_3A เป็นส่วนใหญ่ แต่ละชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุด ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันสิ้นสุด กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็งแรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A ต่อ แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่งไอออนซัลเฟต (Sulphate ions) มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็นโมโนซัลเฟต (Monosulphate)

2.1.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิเนียมเฟรไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้นแม้ว่าจะช้ากว่าปฏิกิริยาจาก C_3A โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของซัลโฟอะลูมินาต (Sulphoaluminate) และ ซัลโฟเฟรไรต์ (Sulphoferrite) ดังแสดงในสมการที่ (2.9) และ (2.10)



เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุร้อยละ 80 ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักทั้ง 4 ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จร้อยละ 80

สารประกอบ	เวลา (วัน)
C ₃ S	10
C ₂ S	100
C ₃ A	6
C ₄ AF	50

ที่มา: ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน (เครือซีเมนต์ไทย, 2548)

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ก็จะส่งผลกระทบต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วด้วยเช่นกัน

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่

1) อายุของซีเมนต์เพสต์ ยกเว้นช่วงซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวโดยสมบัติเพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง (Dormant Period) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมากที่สุดในช่วงแรก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งปฏิกิริยาจะสิ้นสุดโดยสมบูรณ์

2) องค์ประกอบของซีเมนต์อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงแรกเท่านั้นที่จะขึ้นอยู่กับสารประกอบหลักแต่ละสาร โดยปูนซีเมนต์ที่มี C₃S และ C₃A มากกว่าเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว

แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงปลายของแต่ละสารประกอบหลักจะไม่แตกต่างกันนัก

3) ความละเอียดของปูนซีเมนต์ เมื่อความละเอียดของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความละเอียดจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงปลาย

4) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในช่วงต้นอัตราส่วนดังกล่าว มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และในช่วงหลังถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ส่งผลให้ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉลี่ยและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย

5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้อง ไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เพสต์

6) สารผสมเพิ่ม มีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น สารจำพวกน้ำตาล กรดและเกลือของลิกโนซัลโฟนิค (Lignosulphonic) และประเภทเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น CaCl_2

2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan)

ปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็น ซิลิกา หรือ ซิลิกา และอะลูมินา มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวที่อุณหภูมิปกติ และเมื่อมีความชื้นแล้วเกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์นั้นมีที่มาจาก 2 แหล่งได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (Artificial Pozzolan)

1) ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเบา (Diatomaceous Earth) ถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ วัสดุเหล่านี้เมื่อจะนำไปใช้งานจะต้องนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ ก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้ เช่น การเผา การบด และการทำให้แห้ง เป็นต้น ปัจจุบันได้นำวัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างเขื่อน และสะพานเพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำและช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟต และช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างต่างกับซิลิกา นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้ใน การลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย

2) ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ ถ้ำลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่บด เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ้ำลอยประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมของซิลิกาเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประมาณร้อยละ 66-68 ถ้ำลอยบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับปูนขาวและค้างเกิดเป็นสารประกอบที่มีแรงยึดประสาน แต่ถ้ำลอยบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและแข็งตัวได้เช่นเดียวกัน

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1) ชั้นคุณภาพ N เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ

2) ชั้นคุณภาพ F เป็นถ้ำลอยที่ได้จากเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือ บิทูมินัส (Bituminous) ถ้ำลอยในชั้นคุณภาพนี้มีสมบัติเป็นปอซโซลาน

3) ชั้นคุณภาพ C เป็นถ้ำล่อยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือซบิทุมินัส (Subbituminous) ถ้ำล่อยในชั้นคุณภาพนี้นอกจากจะมีสมบัติเป็นปอซโซลานแล้วยังมีสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์อีกด้วยคือ สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดแรงยึดประสานได้เลย ถ้ำล่อยในชั้นคุณภาพนี้อาจมีปูนขาวปนอยู่มากกว่าร้อยละ 10

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618

	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃) และเหล็กออกไซด์ (Fe ₂ O ₃) ไม่น้อยกว่าร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) ไม่เกินร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ความชื้น ไม่เกินร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผา ไม่เกินร้อยละ	6.0	6.0	6.0

2.4 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO•2SiO₂•3H₂O หรือ CSH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (3CaO•Al₂O₃•6H₂O หรือ CAH)

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และอะลูมินาไฮดรอกไซด์ (Al₂O₃) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งทั้ง CSH และ CAH ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ

2.5 มวลรวม

มวลรวม (Aggregate) คือ วัสดุเนื้อหยาบที่ใช้เป็นวัสดุแทรกในคอนกรีต เช่น หิน กรวด และทราย ที่เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมมีปริมาณมากถึงร้อยละ 70-80 ของปริมาณคอนกรีตทั้งหมด ซึ่งมวลรวมมีความสำคัญ คือ มวลรวมมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก คุณภาพของมวลรวมจึงมีผลกระทบต่อสมบัติของคอนกรีตอย่างมาก (Neville, 1999)

2.5.1 มวลรวมแบ่งตามแหล่งกำเนิด ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

- 1) มวลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ เกิดจากกระบวนการกัดกร่อนและเสียดสีตามธรรมชาติ
- 2) มวลรวมที่มนุษย์ทำขึ้น เช่น มวลรวมน้ำหนักเบาบางประเภทที่ได้จากการเผาดิน เป็นต้น

2.5.2 มวลรวมแบ่งตามความหนาแน่น ได้ 3 กลุ่ม คือ

- 1) มวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 300-1,100 กก./ลบ.ม.
- 2) มวลรวมน้ำหนักปกติ (Normalweight Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 2,400-3,000 กก./ลบ.ม.
- 3) มวลรวมน้ำหนักหนัก (Heavyweight Aggregate) มีความหนาแน่นมากกว่า 4,000 กก./ลบ.ม.

2.5.3 มวลรวมแบ่งตามขนาด สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ

- 1) มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) คือ หินหรือกรวดที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มม. (ล้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มวลรวมผสมคอนกรีต (มอก. 566) ขอมให้มวลรวมหยาบมีส่วนที่ละเอียดกว่านี้ผสมอยู่ได้บ้าง
- 2) มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) คือ ตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม. (ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มวลรวมผสมคอนกรีต (มอก. 566) ขอมให้มวลรวมละเอียดมีส่วนที่หยาบ

กว่านี้ผสมอยู่ได้บ้าง ทราบสำหรับผลิตคอนกรีตควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดตั้งแต่ 2.3-3.2 ส่วนที่มีขนาดเล็กกว่ามวลรวมละเอียด ซึ่งมีอยู่ปริมาณน้อยมากในมวลรวมสามารถแบ่งได้เป็นทรายแป้ง (Silt) มีขนาดประมาณ 0.07 มม. และดินเหนียว (Clay) มีขนาดอยู่ในช่วง 0.02-0.06 มม.

2.6 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป (เขตสยาม และคณะ 2545) ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุมวลรวมที่ใช้ ที่มีมวลรวมน้ำหนักเบาเป็นวัสดุผสมแทนมวลรวมหิน สามารถแบ่งมวลรวมออกได้เป็น 4 ชนิด คือ

1) มวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ เวอร์มิคิวไลต์ (Vermiculite) หินเพอร์ไลต์ (Perlite) หินพัมมิช (Pumice) และตะกรันภูเขาไฟ (Scoria) ซึ่งเป็นลาวาที่พองตัวโดยธรรมชาติ เกิดขึ้นเมื่อมีภูเขาไฟปะทุ มวลรวมชนิดนี้ใช้สำหรับผสมคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูงมาก และมวลรวมก็มีสมบัติในการดูดซึมน้ำสูง

2) มวลรวมเบาที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ มวลรวมดินเหนียวที่เผาก่อให้เกิดฟองตัวขึ้น (Expanded Clay Aggregate) และมวลรวมหินดินดานที่เผาจนพองตัว (Expanded Shale Aggregate) ดินเหนียวผสมสารที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ เป็นการเอาดินเหนียวนำไปเผาในหม้อดินที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้ จะมีการขยายตัวของดินเหนียว เนื่องจากการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ภายในและเกิดเป็นก๊าซอยู่ภายในเนื้อดิน เมื่อผ่านการเผาแล้ว ดินจะมีความแข็ง ผิวเรียบแน่น แต่มีเนื้อภายในเป็นโพรงอากาศ สำหรับหินดินดานเป็นการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส วัตถุประสงค์จะถูกหลอมรวมกัน และจะมีก๊าซถูกกักเก็บไว้ภายในเนื้อ ลักษณะของหินที่ได้จะมีความแข็งแรงมากหลังจากการเผาก็จะนำไปย่อยให้ได้ขนาดตามต้องการ มวลรวมเบาทั้งสองชนิดนี้จะมีค่าความแข็งแรงค่อนข้างดี และเป็นมวลรวมที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีตมวลเบามากที่สุด

3) มวลรวมเบาที่ได้จากสารอินทรีย์ ได้แก่ การใช้ไม้บางชนิดใส่ผสมเข้ากับเนื้อคอนกรีต

4) มวลรวมเบาที่ได้จากของเหลือจากกระบวนการผลิต ได้แก่ ถ่านหิน (Furnace Bottom Ash) ที่ได้จากรังไฟฟ้าย่านหินเป็นเชื้อเพลิง ตะกรันจากโรงถลุงโลหะชนิดต่างๆ

นอกจากนี้ยังแบ่งคอนกรีตมวลเบา ตามลักษณะการนำไปใช้งาน แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามลักษณะการนำไปใช้ (Neville, 1999)

ประเภทของคอนกรีตมวลเบา	มาตรฐาน ACI 211.2-18	
	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)
1. คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานฉนวนความร้อน (Insulating Lightweight Concrete)	น้อยกว่า 800	10 - 100
2. คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่อฉาบ (Masonry Lightweight Concrete)	500 – 800	100 - 180
3. คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (Structural Lightweight Concrete)	1,400 – 1,800	180 - 400

2.7 ปาล์มน้ำมัน

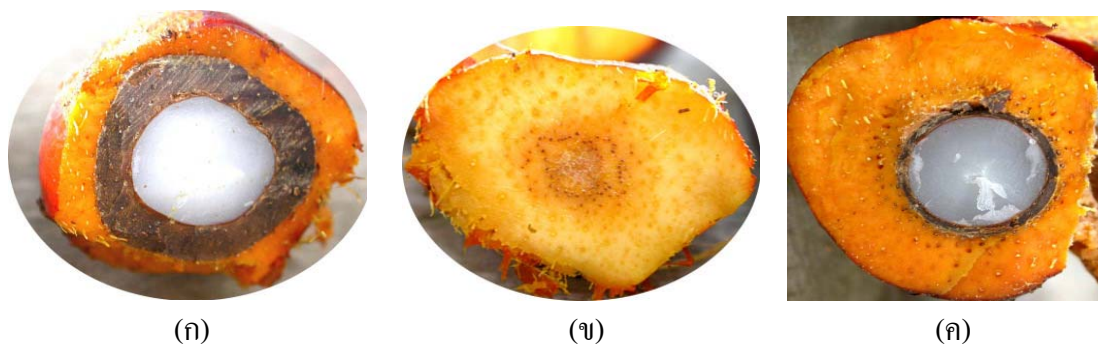
2.7.1 พันธุ์ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชตระกูลปาล์มที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา เป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด 640 - 800 กิโลกรัมน้ำมันต่อพื้นที่ปลูก 1 ไร่ และเป็นพืชน้ำมันที่มีการผลิตทั่วโลกเป็นอันดับสอง รองจากน้ำมันถั่วเหลือง โดยมีประเทศมาเลเซีย เป็นผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดของโลก (ร้อยละ 52) และอินโดนีเซียอันดับสอง (ร้อยละ 32) ส่วนประเทศไทยถึงแม้จะมีอันดับการผลิตอยู่อันดับที่ 4 ของโลก แต่มีสัดส่วนการผลิตร้อยละ 2 เท่านั้น ดังนั้นการเลือกใช้พันธุ์มีความสำคัญมาก ต่อการผลิตน้ำมันปาล์มและแปรรูปปาล์มน้ำมัน ซึ่งสามารถแบ่งแบบพันธุ์ปาล์มได้ 3 ลักษณะ ตามลักษณะของผลปาล์มซึ่งได้แก่ ความหนาของกะลา ปริมาณเนื้อของผลปาล์ม และเส้นใยรอบกะลาปาล์ม (ธีรพงศ์ จันทรนิคม 2550, 22) ดังนี้

- 1) พันธุ์คูรา เป็นปาล์มที่มีกะลาหนา (2-8 มม.) มีปริมาณของเนื้อปาล์มน้อย (ร้อยละ 30-70) ไม่มีเส้นใยรอบกะลา พันธุ์นี้จะใช้ในการเป็นแม่พันธุ์เพื่อผลิตลูกผสมทางการค้า
- 2) พันธุ์พิลีเฟอรา เป็นปาล์มที่มีกะลาบางมากหรือไม่มีกะลา มีเส้นใยสีน้ำตาลรอบกะลาหรือในเนื้อเมล็ด ผลส่วนใหญ่มีเนื้อปาล์มมากกว่าร้อยละ 90 พันธุ์นี้จะใช้เป็นพ่อพันธุ์ในการผลิตลูกผสมทางการค้า

3) พันธุ์เทนอรา เป็นลูกผสมที่เกิดจากพันธุ์ดูรากับพันธุ์ฟิลิเฟอรา จะได้พันธุ์เทนอราอาจเรียกอีกอย่างว่า D×P พันธุ์นี้จะมีลักษณะกะลาบาง (หนา 0.5-4 มม.) มีเนื้อปาล์ม (ร้อยละ 60-95) มากกว่าพันธุ์ดูรา และมีเส้นใยรอบกะลา

งานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบจากพันธุ์เทนอรา เป็นพันธุ์ที่ผลิตเพื่อปลูกในทางการค้าเป็นหลัก



รูปที่ 2.1 ลักษณะเมล็ดพันธุ์ปาล์มน้ำมัน (ก) พันธุ์ดูรา (ข) พันธุ์ฟิลิเฟอรา และ (ค) พันธุ์เทนอรา (ธีรพงศ์ จันทรนิยม 2550, 22)

2.7.2 สมบัติทางกายภาพของกะลาปาล์มน้ำมัน

คณูพล และ อภิชาติ (2550) ได้ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 พบว่ามีรูปทรงแบบไม่สม่ำเสมอ ผิวมีทั้งโค้งเว้าและนูน เนื้อค่อนข้างเรียบมีเส้นใยติดหลงเหลืออยู่บ้าง มีความหนาในช่วง 2.3 - 3.0 มม. เฉลี่ย 2.8 มม. ขอบรอยแตกแหลมและคมขึ้นกับการแตกตอนหีบผลปาล์ม การดูดซึมน้ำค่อนข้างมาก ค่ากระแทกของกะลาปาล์มที่สดมีค่าน้อยกว่าที่แห้งถึงร้อยละ 60 จัดเป็นมวลรวมประเภทแข็งมาก ค่าการสึกหรอบแบบลอสเองเจลีส มีค่าน้อยมากเช่นกัน (ร้อยละ 4.64 - 4.76) และค่าตัวประกอบภาวะเอกรูป (UF) มีค่า 0.19 - 0.20 ค่าความหนาแน่นแบบหลวมและแบบแน่นเท่ากับ 580 และ 648 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน (คณพล และ อภิชาติ, 2550)

รายการสมบัติมวลรวม	ค่า
ดัชนีความเบน (%)	61.49-69.18
ดัชนีความยาวเรียว (%)	54.45-69.86
ความถ่วงจำเพาะแห้ง	1.42-1.43
ความถ่วงจำเพาะเปียก	1.75
การดูดซึมน้ำ (%)	22.60-22.86
โมดูลัสความละเอียด	1.69
กระแทกมวลรวม (%)	0.80-2.52
ความสึกหรอแบบลอสแอนเจลีส (%)	4.64-4.76
ความหนาแน่นแบบหลวม (กก./ลบ.ม.)	580.51
ความหนาแน่นแบบแน่น (กก./ลบ.ม.)	648.45

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม นำมาคิดค้นวิจัยอย่างต่อเนื่อง มากมาย โดยเฉพาะเถ้าลอยประสบผลสำเร็จ เป็นส่วนผสมกับปูนซีเมนต์แล้ว ยังมีเถ้าอีกหลายชนิดที่สามารถนำมาเป็นสารผสมเพิ่มจากธรรมชาติ เช่น เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น และได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

สหชัย แก่นอากาศ และ วนิดา เพ็ญสุวรรณ (2545) ได้รายงานผลการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เถ้าแกลบผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ เพื่อใช้ในงานคอนกรีตกำลังต่ำ โดยใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบ 3 อัตราส่วน คือ 60:40, 50:50 และ 40:60 ซึ่งเถ้าแกลบที่ใช้ศึกษาเป็นเถ้าแกลบขาวและเถ้าแกลบเทาดำ ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกจะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดที่ผ่านตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) มีค่าประมาณ 40.0-47.5 กก./ตร.ซม. ความหนาแน่นประมาณ 2,000-2,150 กก./ลบ.ม. ได้มาจากอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบร้อยละ 60:40 ส่วนอัตราส่วนอื่น ให้ผลกำลังอัดค่อนข้างแปรปรวน และชนิดเถ้าแกลบทั้ง 2 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกันในเรื่องกำลังอัด

วันชัย สะตะ และคณะ (2546) ได้นำเอาแก้วเคลือบ-เปลือกไม้ และเอาปาล์มน้ำมันมาทำการอบคั่วให้ละเอียดจนมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 2 และแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 0 ถึง 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อทำคอนกรีตกำลังอัดสูงเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยแก้วเคลือบ-เปลือกไม้ และเอาปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 10 ถึง 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ให้กำลังอัดเท่ากับร้อยละ 100 ถึง 113 ของคอนกรีตควบคุม และการแทนที่ร้อยละ 20 จะให้กำลังอัดสูงสุด

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และคณะ (2546) ได้รายงานผลศึกษาการแทนที่เอาปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ ซึ่งทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์นานขึ้น และความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์มากขึ้น แต่เมื่อความละเอียดของเอาปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ใช้เอาปาล์มน้ำมันก่อนบดและความต้องการน้ำลดลงใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์มาตรฐาน สำหรับมอร์ต้าร์ที่ใช้เอาปาล์มน้ำมันก่อนบดเป็นส่วนผสมให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐาน เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่และความพรุนสูง จึงไม่เหมาะสมที่นำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน ส่วนการใช้เอาปาล์มน้ำมันบดละเอียดและบดละเอียดมาก (ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.9 และ 10.1 ไมครอน ตามลำดับ) เป็นส่วนผสมมอร์ต้าร์ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถให้กำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่อายุ 7 และ 28 วัน นอกจากนี้การใช้เอาปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาก (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10.1 ไมครอน) เป็นส่วนผสมมอร์ต้าร์ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 ที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐาน โดยเท่ากับร้อยละ 104 และ 101 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเอาปาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลานได้

เขาวัววัช หนูทอง และคณะ (2547) ได้ศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมแก้วเคลือบโดยทำการทดสอบหาค่าประกอบทางเคมี ความละเอียด และสมบัติทั่วไปของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและที่ใช้แก้วเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 รวมถึงการทดสอบกำลังอัดและกำลังดึง จากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของแก้วเคลือบมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 95.95 และพื้นที่ผิวจำเพาะของแก้วเคลือบมีค่า 53,698 ตร.ซม./ก. สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยแก้วเคลือบร้อยละ 10 มีกำลังอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนร้อยละ 27 และ 39 ขณะที่การแทนที่ด้วยแก้วเคลือบร้อยละ 20 มีกำลังอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนร้อยละ 21 และ 36 ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ และ การแทนที่

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 10 - 20 ทำให้กำลังคึงมีค่าสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนแต่การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 30 - 50 จะทำให้กำลังคึงมีค่าต่ำลง

ธีรสิทธิ์ แซ่ตั้ง และคณะ (2547) รายงานผลการศึกษาคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์ม น้ำมันบดให้ละเอียดจนมีน้ำหนักที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 1 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 0 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าการแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะให้กำลังอัดสูงสุด และสูงกว่าคอนกรีตควบคุมตั้งแต่ 7 วันไปแล้ว และการแทนที่ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะทำให้กำลังอัดสูงเป็นวัสดุพอชโซลานที่ดี สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตได้

บุรฉัตร ฉัตรวิระ และ ณรงค์ศักดิ์ มากุล (2547) ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าแกลบขาวบดละเอียดมาก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตอิฐมอญที่ใช้เถ้าแกลบเป็นเชื้อเพลิงที่มีต่อสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยเถ้าแกลบขาว ค่าความละเอียดในรูปของพื้นที่ผิวจำเพาะ ที่วัดด้วยวิธีแอร์เพอร์มีเอะบิ-ลิตีของเบลน (Blaine Air Permeability Test) เท่ากับ 15,640 ตร.ซม./ก. สมบัติที่ทำการศึกษประกอบด้วยหน่วยน้ำหนักในสภาพสด ค่าการยุบตัวเริ่มต้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน โดยมีตัวแปรหลักคือ สัดส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วนโดยปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดของมวลรวมที่สถานะอัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 ตามลำดับ จากการทดสอบ พบว่าหน่วยน้ำหนักในสภาพสดและค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบขาวบดละเอียดมากมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติ ในขณะที่โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน และกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเถ้าแกลบขาวบดละเอียดมากเท่ากับร้อยละ 20 และ 30 ที่อายุ 28 และ 60 วัน มีค่าสูงกว่าคอนกรีตปกติ นอกจากนั้นอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติและมีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบขาวบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อุกฤษณ์ โปศรี (2548) ได้ศึกษาถึงผลของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ ที่มีต่อกำลังและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(W/B) เท่ากับ 0.35 และ 0.60 ในแต่ละ W/B จะใช้ปริมาณของเถ้า

แกลบและเถ้าลอยตั้งแต่ร้อยละ 40 - 80 ในด้านกำลัง พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ จะมีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ 28 วัน แต่เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้นที่ 90 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบให้กำลังที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะคอนกรีตที่ผสมทั้งเถ้าลอยและเถ้าแกลบ ในส่วนผสม 60:20:20 จะมีกำลังที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม ในด้านความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม

คุณพล ตันนโยภาส และ อภิชาติ พ่วงพี (2548) ได้ศึกษาสมบัติของมวลรวมจากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยทดสอบ ค่าการกระแทก การสึกหรอแบบลอสแอนเจลีส วิเคราะห์รูปทรงและความหนาแน่นรวม ซึ่งออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยใช้กะลาปาล์มเป็นมวลรวม และใส่หินฝุ่นแกรนิตเป็นแร่ผสมเพิ่มเติมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 โดยน้ำหนัก ทดสอบคอนกรีตทำการบ่มที่อายุ 7 และ 28 วันในน้ำปูนขาวอิ่มตัว เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม หาค่าการหดตัวแบบแห้ง ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ความแข็งแบบชมิคต์ (Schmidt) ความต้านทานไฟฟ้า และกำลังอัด สรุปลงได้ว่าคอนกรีตกะลาปาล์มที่บ่มด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัว มีความหนาแน่นรวมและกำลังอัดอยู่ในช่วงเกณฑ์คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง การเติมหินฝุ่นแกรนิตแทนที่ปูนซีเมนต์ส่งผลกำลังอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในอัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 10 ที่บ่ม 7 วัน มีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 27.61 MPa และอัตราส่วนอื่นลดลงราวอัตราส่วนละร้อยละ 5 อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีตกะลาปาล์มบ่ม 7 วัน สามารถให้ค่าเทียบเคียงกับบ่ม 28 วัน นั่นคือลดเวลาการบ่มคอนกรีตมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้เร็วขึ้น

Tay (1991) ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปูนซีเมนต์ พบว่าระยะเวลาการก่อตัวอยู่ในค่ามาตรฐานทั้งของอังกฤษและอเมริกา และความสามารถในการเทได้ให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ และการแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถให้ค่ากำลังอัดเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อศึกษาการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์จากผลกระทบของ Alkali-Silica Reaction (ปริณูญา และ อุกฤษฏ์ 2548) พบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันสามารถลดการขยายตัวลงได้มากตามการแทนที่เพิ่มขึ้น และคิดว่าการใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียวทุกอัตราส่วนแทนที่

Mannan and Ganapathy (2001) ได้ศึกษาการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยใช้มาตรฐาน ACI ในการออกแบบ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน นั้นผล

ที่ได้มาค่าแตกต่างกันมากตามที่ได้ออกแบบไว้ จึงได้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจากกะลาปาล์ม น้ำมันใหม่ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่าง โดยให้ปูนซีเมนต์คงที่และปรับอัตราส่วนของทรายกับอัตราส่วนของกะลาปาล์มน้ำมัน ได้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อกะลาปาล์มน้ำมัน เท่ากับ 1:1.71:0.77 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.41 ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 24.20 MPa

การแทรกซึมของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตและเป็นผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีตในรูปของ การแตกร้าวและกะเทาะ เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ซึ่งเป็นหัวข้อสำคัญที่เกี่ยวข้องกับวิศวกร และผู้รับเหมาสร้างสะพาน โครงสร้างทางทะเล (Basheer et al., 2002) บทความจำนวนมากรายงานถึงพฤติกรรมดีเยี่ยมของคอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุประสานเพื่อเลือก อาทิเช่น เถ้าเชื้อเพลิงจากถ่านหิน (Pulverized Fuel Ash) ตะกรันเตาถลุงเม็ดบด ผงซิลิกา (Microsilica) และดินขาวแปร (Metakaolin) ในสภาพแวดล้อมทางทะเลและโครงสร้างถนนหลวง คอนกรีตเหล่านี้ให้ความคงทนที่สัมพันธ์กับการซึมผ่านของคลอไรด์ที่มากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตมีรูพรุนแบบต่อเนื่องลดน้อยลง อันเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุประสานหรือการประสานทางเคมีกับน้ำผสมปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม ผลจากปฏิกิริยาทุติยภูมิเกิดขึ้นซ้ำทำให้เป็นผลสืบเนื่องว่า ความคงทนต่อการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ของคอนกรีตผสมวัสดุประสานเหล่านี้ ยังเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เทียบกับเวลา ดังนั้น Basheer et al. ได้ศึกษาติดตามพฤติกรรมอย่างต่อเนื่อง โดยใช้คอนกรีตผสมวัสดุประสาน 10 ชนิด แซ่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.55 โมล และติดตามการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมคอนกรีตเป็นเวลา 1 ปี โดยวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานระหว่างคู่ของลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่ฝังในคอนกรีตระดับความลึกต่างๆ กัน จากผิวที่โผล่ ผลการทดสอบแสดงว่าถึงแม้ว่าความคงทนของคอนกรีตลดลงตั้งแต่เริ่มต้น จากการแทรกซึมของคลอไรด์ แต่ในช่วงเวลานานขึ้น ความคงทนของคอนกรีตผสมวัสดุประสานดีกว่าคอนกรีตควบคุมปูนซีเมนต์ล้วน ซึ่งสอดคล้องกับการทำปริมาณคลอไรด์จากตัวอย่างฝุ่นที่เจาะสกัดในช่วงเวลาต่างกัน ซึ่งยืนยันการพัฒนาความคงทนที่ดีขึ้นของวัสดุประสานเป็นผลจากภาพรวมในการลดการแทรกซึมคลอไรด์และปฏิกิริยาไฮดรชันอย่างต่อเนื่องของวัสดุประสาน

Mannan and Ganapathy (2002) ได้ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตที่ใช้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวมหยาบ ได้แก่ กำลังอัด กำลังดึงแบบดัด กำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่น โดยเปรียบเทียบที่บ่มในน้ำ 6 วัน กับ 89 วัน ของตัวอย่างอายุบ่ม 7 และ 90 วัน และ

เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้หิน พบว่าการบ่มในน้ำทำให้กำลังต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และช้าๆ หลังจากอายุบ่ม 56 วัน ซึ่งมีค่ากำลังต่างๆ สูงกว่าการบ่มในอากาศ โดยกำลังอัดบ่มในน้ำ เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 15 และกำลังดึงเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 45 และคอนกรีตผสมกะลาปาล์ม น้ำมันที่อายุบ่ม 28 วัน ค่ากำลังอัด 24.22 MPa ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 50 ค่ากำลังดึงแบบ ดัด 4.00 MPa ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 35 และค่ากำลังดึงแบบผ่าซีก 2.41 MPa ต่ำกว่า คอนกรีตควบคุมร้อยละ 48 และมีพฤติกรรมคล้ายกันกับคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามก็ถืออาจจัดว่า คอนกรีตดังกล่าวยังคงมีสมบัติพอที่จะใช้เป็นคอนกรีตมวลรวมเบาสำหรับงานโครงสร้าง แม้ว่าค่า โมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเช่นกัน

Mannan et al. (2002) ได้ศึกษาผลกระทบของสภาวะการบ่มต่อความเร็วคลื่นและ กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้กะลาปาล์มน้ำมัน เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้หิน พบว่าค่าความเร็ว คลื่นผ่านคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันจะมีค่าแปรผันตามสภาวะการบ่มโดยบ่มในน้ำจะให้ ค่าสูงที่สุด 3.3-3.6 กิโลเมตรต่อวินาที เมื่อหยุดบ่มในน้ำค่าความเร็วคลื่นก็จะลดลง และมีค่าต่ำกว่า คอนกรีตควบคุมร้อยละ 25 ส่วนค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันจะมีค่าแปรผัน ตามสภาวะการบ่มโดยบ่มในน้ำจะให้ค่าสูงที่สุด 20.00-24.25 MPa เมื่อหยุดบ่มในน้ำค่ากำลังอัดจะ ค่อนข้างคงที่ และมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 52

Makarathet et al. (2004) ใช้เส้นใยแก้ว-เปลือกไม้บดละเอียดมีค่าเฉลี่ยของอนุภาค เท่ากับ 27.40 และ 10.80 ไมครอน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในการทำคอนกรีต พบว่าการแทนที่ด้วยเส้นใยแก้ว-เปลือกไม้ ขนาดค่าเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 10.80 ไมครอน ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับร้อยละ 122 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน และได้ เสนอแนะว่าการใช้เส้นใยแก้ว-เปลือกไม้ที่มีขนาดค่าเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 10.80 ไมครอน สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยไม่ส่งผลต่อ กำลังอัด แสดงให้เห็นว่าเส้นใยแก้ว-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูงเป็นวัสดุพอชโซลานที่ดีสามารถ นำไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตได้

Chang et al. (2006) ได้ศึกษาการแปรปวนของสมบัติทางวิศวกรรมและความเร็ว คลื่นของคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา 2 ชนิด โดยวิธีการทดสอบแผ่คลื่นความเค้นแบบไม่ทำลาย ก้อนตัวอย่างทรงกระบอกและแผ่น อายุบ่มที่ 7, 14, 28 และ 56 วัน ผลการแสดงให้เห็นว่าบ่มอายุ 7

ถึง 56 วัน กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของคอนกรีตทรงกระบอกเพิ่มขึ้นร้อยละ 25-37 ในขณะที่ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity) เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 5-7 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น-พลวัตของคอนกรีตทรงกระบอกสูงกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสถิตประมาณร้อยละ 41 โดยเฉลี่ยและทั้งคู่มีสหสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดมากสอดคล้องกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ความเร็วคลื่นพี (P-Wave Velocity) ในหน้าตัดขวางทางแผ่นคอนกรีตจากหน้าแผ่นบนลงสู่หน้าแผ่นล่างแปรผันประมาณร้อยละ 14-15 โดยการคาดคะเนเชิงเส้น ยกเว้นแผ่นคอนกรีตอายุ 7 วัน ความเร็วคลื่นพี วัดที่หน้าบนของแผ่นคอนกรีตโดยวิธีความเร็วด้านหนึ่งคล้ายคลึงกับวิธีกระแทกเสียงกังวาลอยู่ร้อยละ 2-5

Gastaldini et al. (2007) ได้ศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์และปฏิกิริยาคาร์บอนेटในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบกับสารกระตุ้น โดยการใช้สารกระตุ้นเป็นตัวปรับปรุงสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ เพื่อทำการตรวจสอบอิทธิพลของสารกระตุ้นต่อปฏิกิริยาคาร์บอนेटและการซึมผ่านของคลอไรด์ ในการศึกษานี้ได้ทดสอบอิทธิพลของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20 กับสารกระตุ้นร้อยละ 1 ได้แก่ K_2SO_4 , Na_2SO_4 , Na_2SiO_3 ในการพัฒนากำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และปฏิกิริยาคาร์บอนेट ผลการทดสอบที่ได้คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบกับสารกระตุ้น ทุกอัตราส่วน มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ และค่าสัมประสิทธิ์ปฏิกิริยาคาร์บอนेटลดลงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบกับสารกระตุ้น K_2SO_4 มีสมบัติดีที่สุด

Teo et al. (2007) ได้หาค่าสมบัติแรงยึดหน่วงทางโครงสร้างของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันของเสียจากอุตสาหกรรม เป็นมวลรวมหยาบ และศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมกับคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาชนิดอื่นๆ ยังหาค่าต่างๆ ของคอนกรีตกะลาปาล์มได้แก่ กำลังดึงแบบผ่าซีก โมดูลัสแตกร้าว และโมดูลัสยืดหยุ่น หาสมบัติแรงยึดหน่วงทางโครงสร้าง ด้วยการทดสอบแรงดึง ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังยึดหน่วงทดสอบของคอนกรีตผสมกะลาปาล์มน้ำมันสูงกว่ากำลังยึดหน่วงที่กำหนดโดย BS8110 โดยทั่วไปสมบัติของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับได้ดีเท่ากับคอนกรีตมวลเบาทางโครงสร้างอื่นๆ และผลที่ได้ศึกษาสนับสนุนการใช้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวมรวม เพื่อในการผลิตคอนกรีตมวลรวมเบาด้านโครงสร้าง ส่วนที่สองศึกษาพฤติกรรมความคงทนของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมัน ผ่านการทดสอบความซึมผ่านน้ำและการดูดซึมน้ำ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์และการเตรียมตัวอย่าง

การวิจัยนี้ได้มีการใช้วัตถุหลายรายการและเตรียมตัวอย่างคอนกรีตดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

2) เถ้าใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber Ash, OPFA) จาก บริษัทลำสูง (ประเทศไทย) จำกัด(มหาชน) ตำบลกะลาเส อำเภอสีเกะ จังหวัดตรัง ตัวอย่างเถ้าใยปาล์มน้ำมันที่ไปเก็บมาเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการเผาใยปาล์มน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง เพื่อผลิตพลังความร้อนไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มของโรงงาน ในการเผาใยปาล์มน้ำมันนั้นใช้เตาเผาระบบ Stoker ซึ่งเป็นระบบการเผาไหม้แบบที่ทำให้เชื้อเพลิงมีการเคลื่อนที่ ทำให้ใยปาล์มน้ำมันมีการเผาไหม้ที่ดี สำหรับการดักจับเถ้าใยปาล์มน้ำมันใช้ระบบมัลติ-ไซโคลน (Multi Cyclone) มาไว้ในห้องเก็บเถ้าใยปาล์มน้ำมัน(รูปที่ 3.1 (ก)) และเก็บตัวอย่างเถ้าใยปาล์มน้ำมันจากห้องเก็บเถ้าโดยตรง(รูปที่ 3.1 (ข)) นำเถ้าดังกล่าวมาคัดขนาด จากรูปที่ 3.2 (ก) จะสังเกตเห็นว่ามีเส้นใยปาล์มน้ำมันปะปนและมีสีเทาเข้ม แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมครอน) ดังรูปที่ 3.2 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 เถ้าใยปาล์มน้ำมันเหลือทิ้งภายในโรงงาน (ก) ห้องเก็บเถ้า และ (ข) กองเถ้าใยปาล์มน้ำมัน



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมเถ้าไผ่ปล้ำน้ำมัน (ก) ก่อนร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 และ (ข) ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325

3) เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) ใช้ตัวอย่างแกลบข้าวในท้องถิ่นอำเภอระโนด จังหวัดสงขลา ซึ่งมีการกองเก็บ ดังรูปที่ 3.3 (ก) มาเผาในระบบปิดให้เป็นเถ้าเพื่อให้แกลบได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงและเปลี่ยนเป็นเถ้าในระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 3.3 (ข) จะสังเกตเห็นว่ามีลักษณะเป็นผงปนยังคงรูปกลีบข้าวเปลือกบางส่วนและมีสีขาวเทา จึงนำมาบดละเอียดด้วยเครื่องทดสอบลอสองเจติส ใช้เวลาบด 2 ชั่วโมง และคัดขนาด โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมครอน) ดังรูปที่ 3.3 (ค)

เถ้าไผ่ปล้ำน้ำมันและเถ้าแกลบที่คัดขนาดเสร็จแล้ว เก็บเถ้าตัวอย่างบรรจุในถุงพลาสติกสีดำที่มีดปากถุงสนิท จากนั้นนำเถ้าตัวอย่างบรรจุใส่ถังพลาสติกปิดฝาสนิท เพื่อป้องกันความชื้น ดังรูปที่ 3.4



(ก)

รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมเถ้าแกลบ (ก) กองเถ้าแกลบ



รูปที่ 3.3(ต่อ) ขั้นตอนการเตรียมเถ้าแกลบ (ข) ก่อนนำไปบด และ (ค) ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325



รูปที่ 3.4 การเก็บรักษาตัวอย่างเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบที่เตรียมได้

4) กะลาปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Shell, OPS) จาก บริษัทลำสูง(ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ได้กองไว้ลานกลางแจ้ง ดังรูปที่ 3.5 (ก) นำมาล้างด้วยน้ำเพื่อเอาฝุ่น ดินขาว ออกจากผิว กะลาปาล์มน้ำมัน ตากแดด และอบที่อุณหภูมิ 50 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนแห้งสนิท แล้วนำร้อนผ่านตะแกรง 1 นิ้ว ค้างตะแกรงเบอร์ 4 ดังรูปที่ 3.5 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 กะลาปาล์มน้ำมัน (ก) กองกะลาปาล์มน้ำมัน และ (ข) ค้างตะแกรงเบอร์ 4

5) ทรายใช้ทรายแม่ น้ำที่มีจำหน่ายทั่วไป นำมาล้างให้สะอาด เพื่อเอาเศษฝุ่นและดินออก และมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 ± 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 100

สำหรับกะลาปาล์มน้ำมันและทรายที่เตรียมเรียบร้อยแล้ว เก็บไว้ในถุงพลาสติกที่มิดสนิท จากนั้นนำตัวอย่างใส่กระสอบพลาสติก เพื่อป้องกันความชื้นเช่นเดียวกับการเก็บถั่วปาล์มน้ำมันและถั่วแกลบ

6) น้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำประปาสะอาด

3.2 การออกแบบส่วนผสมตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบคอนกรีตทดสอบที่มีกะลาปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวมหยาบใช้อัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อทรายต่อกะลาปาล์มน้ำมัน เท่ากับ 1:1.71:0.77 ตามการศึกษา ก่อนหน้านี้ (คนุพล และอภิชาติ, 2550) สัดส่วนดังกล่าวมีความเหมาะสมกับคอนกรีตมวลรวมหยาบกะลาปาล์มน้ำมัน และสอดคล้องกับงานวิจัยต่างประเทศ (Mannan and Ganapathy, 2001) เช่นเดียวกัน ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) โดยควบคุมค่าการยุบตัว (Slump Test) มีค่าอยู่ระหว่าง 50-60 มม. เพื่อให้มีความสามารถเทได้ปานกลาง มาประยุกต์ใช้สำหรับพื้นทางเท้าหรือผนังกันที่รับกำลังต่ำ และกำหนดให้วัสดุประสาน คือ เถ้าเียงปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนจำนวน ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และทดสอบจำนวนตัวอย่างทั้งหมดตลอดโครงการ ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของวัสดุผสมในคอนกรีตทดสอบ (คิดโดยน้ำหนัก)

วัสดุ	อัตราส่วน						
	ปริมาณ (กก./ลบ.ม.)						
	Control	OPFA10	OPFA20	OPFA30	RHA10	RHA20	RHA30
W/B	0.45	0.46	0.48	0.52	0.51	0.58	0.70
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	500	450	400	350	450	400	350
เถ้าเียงปาล์มน้ำมัน และ เถ้าแกลบ	0	50	100	150	50	100	150
กะลาปาล์มน้ำมัน	385	385	385	385	385	385	385
ทราย	855	855	855	855	855	855	855
น้ำ (W)	225	230	240	260	255	290	355
การยุบตัว (มม.)	55	60	50	60	60	50	55

หมายเหตุ : Control คือส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เท่ากับ 100%, OPFA_{xx} คือส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 100-xx กับเถ้าเียงปาล์มน้ำมัน ร้อยละ xx และ RHA_{xx} คือส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 100-xx กับเถ้าแกลบร้อยละ xx

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างและการทดสอบคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

การทดสอบ	บ่ม (วัน)	Control	OPFA10	OPFA20	OPFA30	RHA10	RHA20	RHA30	รวม
- ทดสอบกำลังอัด	1	3	3	3	3	3	3	3	21
- ทดสอบการดูดซึมน้ำ ¹	7	3	3	3	3	3	3	3	21
	28	3	3	3	3	3	3	3	21
	56	3	3	3	3	3	3	3	21
	90	3	3	3	3	3	3	3	21
- ทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ²	1	3	3	3	3	3	3	3	21
	7	3	3	3	3	3	3	3	21
- ทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก	28	3	3	3	3	3	3	3	21
- การหัดตัวแบบแห้ง ³	1-90	3	3	3	3	3	3	3	21
- ความหนาแน่นรวมแห้ง ³	1-90	3	3	3	3	3	3	3	21
- ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์	28	2	2	2	2	2	2	2	14
	90	2	2	2	2	2	2	2	14
- XRF	28	1	1	1	1	1	1	1	7
- XRD	28	1	1	1	1	1	1	1	7
- SEM	90	1	1	1	1	1	1	1	7

หมายเหตุ : ¹ นำเศษตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังอัดมาทดสอบการดูดซึมน้ำ, ² ทดสอบความเร็วคลื่นก่อนนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบกำลังดึง, ³ บ่มในอากาศ

ตารางที่ 3.3 ขนาดมิติของก้อนคอนกรีตที่ทดสอบ

การทดสอบ	มิติรูปทรงก้อนตัวอย่างทดสอบ (ซม.)
กำลังอัด	10×10×10
กำลังดึงแบบผ่าซีก	Ø10 × 20
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก	Ø10 × 20
การหัดตัวแบบแห้ง	7.5×7.5×28.5
ความหนาแน่นรวมแห้ง	10×10×10
การซึมผ่านของคลอไรด์	Ø10 × 5

3.3 การตรวจคุณลักษณะของเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ

3.3.1 การตรวจองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF)

เป็นการตรวจปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ เบื้องต้นก่อนนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เครื่องมือตรวจสอบเอกซ์เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรมิเตอร์ (เครื่อง PHILIPS PW2400) วิธีการตรวจสอบอ้างอิง WI-RES-XRF-001 และ WI-RES-XRF-002 และใช้เทคนิคการตรวจแบบ X-Ray Fluorescence Spectrometry ซึ่งผลที่ได้ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของเถ้าว่ามีความเป็นวัสดุปอซโซลานในชั้นใดและประเมินถึงการพัฒนากำลังของเพสต์ และคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

3.3.2 การตรวจชนิดแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

เป็นการตรวจถึงปริมาณและชนิดของแร่ ที่อยู่ในเถ้าไยปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบเบื้องต้นก่อนนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เครื่องมือตรวจสอบเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (เครื่อง Philips X'Pert MPD) วิธีการตรวจสอบอ้างอิง WI-RES-XRD-001 และใช้เทคนิคการตรวจแบบ X-Ray Diffraction ซึ่งผลวิเคราะห์ทำให้ทราบปริมาณแร่และชนิดแร่มีอยู่เดิมในเถ้าทั้งสอง

3.3.3 การตรวจโครงสร้างจุลภาคโดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

เป็นการตรวจสอบลักษณะรูปร่างโครงสร้างในระดับจุลภาคของเถ้าไยปาล์ม น้ำมันและเถ้าแกลบเบื้องต้น ก่อนนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เครื่องมือตรวจสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (เครื่อง JEOL JSM-5800LV) วิธีการตรวจสอบอ้างอิง WI-RES-SEM5800-001 และใช้เทคนิคการตรวจสอบแบบถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งขยายภาพได้สูง ทำให้ทราบถึงสัณฐานวัตถุบิในการผสมทำเป็นซีเมนต์เพสต์ และคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

3.3.4 พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area, SSA)

เป็นการตรวจหาความละเอียดด้วยขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของเก้าอี้พลาสติก น้ำมันและเก้าอี้พลาสติก โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (COULTER SA3100) ด้วยวิธีการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen Adsorption) และคำนวณโดยใช้สมการของ BET or Langmuir Function ซึ่งใช้ประกอบในการพิจารณาถึงสมบัติทางกายภาพของเก้าอี้ทั้งสองถึงโอกาสในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากน้อยเพียงใด

3.3.5 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser Particle Size Analysis, LPSA)

เป็นการตรวจสอบขนาดอนุภาคของเก้าอี้พลาสติก น้ำมันและเก้าอี้พลาสติก เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์ (Laser Particle Size Analysis (LPSA)) ด้วยเครื่อง COULTER LS 230 วิธีการตรวจสอบอ้างอิง WI-RES-LPSA-001 และใช้เทคนิคการตรวจสอบวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ ซึ่งวิเคราะห์และอธิบายการพัฒนากำลังของเพสต์ และคอนกรีตมวลรวมกะลาปลั่ม น้ำมัน ช่วยให้ทราบถึงขนาดของวัสดุประสานที่ผสมกันว่ามีผลกระทบหรือไม่ดี และมีอิทธิพลต่อการแทนที่ของวัสดุประสานชนิดต่างๆ ประการใด

3.3.6 การหาค่าความชันเหลวปกติ

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความชันเหลวปกติ โดยใช้อุปกรณ์ไวแคต (Vicat Apparatus) เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับเพสต์ที่มีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.1 ใช้เป็นค่ามาตรฐานในการทดสอบสมบัติอื่นๆ ของเพสต์ต่อไป เช่น การทดสอบหาเวลาก่อตัวของเพสต์ โดยพิจารณาจากการจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เป็นระยะ 10 ± 1 มม. ภายในเวลา 30 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM C 187 ซึ่งวิธีผสมเพสต์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 305

3.3.7 เวลาก่อตัว

เป็นการทดสอบเพื่อหาระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และเวลาในการก่อตัวครั้งสุดท้าย (Final setting time) ตามมาตรฐาน ASTM C 191 ที่ใช้ปริมาณน้ำเหมาะสมจากการทดสอบความชื้นเหลวปกติ ซึ่งการก่อตัวเริ่มต้น คือ ระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ภายในเวลา 30 วินาที และเวลาในการก่อตัวครั้งสุดท้าย คือ ระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจมเข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงในเพสต์ด้วยน้ำหนักของตนเองได้

3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

ประกอบด้วยการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง ความหนาแน่นรวมแบบแห้ง การดูดซึมน้ำ วัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และการซึมผ่านของคลอไรด์ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.1 การทดสอบหดตัวและความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศ

การทดสอบเพื่อหาค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเถ้าขี้ปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ ตามมาตรฐาน ASTM C 596 ใช้แบบหล่อขนาด 75×75×285 มม. และการทดสอบเพื่อหาค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศนั้น ใช้แบบหล่อขนาด 10×10×10 ซม. ซึ่งการทดสอบทั้งสองมีวิธีการเหมือนกัน เมื่อถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อทำเครื่องหมายหรือตำแหน่งที่จะวัดขนาด แล้ววัดขนาดและชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างที่อายุ 1 วัน นำไปแช่น้ำ 2 วัน เอาตัวอย่างขึ้นจากน้ำไปเก็บไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 25±2.5 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงร้อยละ 60-70 หลังจากนั้นวัดขนาดและชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างเมื่อครบอายุ 7, 28, 56 และ 90 วัน ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ขนาดยาว 30 ซม. ความละเอียด 0.02 มม. ตัวอย่างอัตราส่วนละ 3 ก้อน ซึ่งผลที่ได้จะนำมาพิจารณาวิเคราะห์การพัฒนาทางกายภาพและอธิบายการพัฒนากำลังของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

3.4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ ตามมาตรฐาน ASTM C 1403 โดยใช้ตัวอย่างหลังจากการทดสอบกำลังอัดแล้วมาแบ่งครึ่ง ทำความสะอาดผิว ซึ่งผลที่ได้จะทราบสมบัติและอธิบายการพัฒนาทางกายภาพของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

3.4.3 การทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive testing – NDT) เพื่อหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ ตามมาตรฐาน ASTM C 597 โดยใช้เครื่องมือ V-METER MK II ของ NDT James Instrument วัดกับคอนกรีตหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 20 ซม. ตามยาวผ่านก้อนตัวอย่างที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน ตัวอย่างอัตราส่วนละ 3 ก้อน ผลที่ได้มาประเมินคุณภาพของคอนกรีตตาม Neville (1995) ดังในตารางที่ 3.4 และนำไปพิจารณาความสัมพันธ์กับค่า กำลังดึง กำลังอัด ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 3.4 คุณภาพคอนกรีตในพจน์ของความเร็วคลื่นตามยาว (Neville, 1995)

ลำดับ	ความเร็วคลื่นตามยาว (กม./วินาที)	คุณภาพของคอนกรีต
1	4.50	ดีเยี่ยม
2	3.50-4.50	ดี
3	3.00-3.50	พอใช้
4	2.00-3.00	ต่ำ
5	2.00	ต่ำมาก



รูปที่ 3.6 การทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคแสดงขนาดก้อนตัวอย่างและชุดเครื่องมือทดสอบ

3.4.4 การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าไปปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ มาตรฐาน ASTM C 1202 โดยใช้เครื่องมือรุ่น HM-722A ของ Gilson Company, Inc. โดยหล่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 20 ซม. ตัดก้อนตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 5 ซม. แล้วทำการทดสอบก้อนตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน อัตราส่วนละ 2 ก้อน วิธีการทำงานโดยนำตัวอย่างคอนกรีตมาอยู่ระหว่าง Cells ดังรูปที่ 3.7 (จ) ที่บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.3N NaOH Solution) และโซเดียมคลอไรด์ (สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3) ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 60 โวลต์ ระหว่าง 2 จุด วัดค่าประจุไฟฟ้า (หน่วย คูลอมบ์) ที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ค่าประจุไฟฟ้านี้จะสัมพันธ์กับค่าการซึมผ่านของไอออนคลอไรด์ ซึ่งค่าที่อ่านได้ (หน่วย คูลอมบ์) แบบต่อเนื่อง จะนำผลที่ได้มาประเมินความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ตามกำหนดเกณฑ์ มาตรฐาน ASTM C 1202 แสดงในตารางที่ 3.5 และอธิบายการพัฒนาความต้านทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ผ่านก้อนคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 3.5 การจำแนกระดับคุณภาพคอนกรีตตามการซึมผ่านของคลอไรด์ (ASTM C 1202)

ประจุไฟฟ้าที่ผ่าน (คูลอมบ์)	ระดับการซึมผ่านของคลอไรด์
มากกว่า 4000	สูง
2000-4000	ปานกลาง
1000-2000	ต่ำ
100-1000	ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ไม่ซึมผ่าน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ (ก) ก่อนตัวอย่างที่เตรียมจะทดสอบ และ (ข) ชุดเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ

3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

3.5.1 การทดสอบกำลังดึง

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษากำลังดึงของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ มาตรฐาน ASTM C 496 ทดสอบก้อนตัวอย่างที่หล่อ **ทรงกระบอก** ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 20 ซม. ที่อายุบ่ม 1, 7 และ 28 วัน ตัวอย่างอัตราส่วนละ 3 ก้อน สามารถนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และอธิบายประกอบกับผลที่ได้จาก ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค กำลังอัด ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

3.5.2 การทดสอบกำลังอัด

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษากำลังของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ มาตรฐาน ASTM C 10M-01 ทดสอบก้อนตัวอย่างที่หล่อ ขนาด 10×10×10 ซม. ที่อายุบ่ม 1, 7, 28, 56 และ 90 วัน ตัวอย่างอัตราส่วนละ 3 ก้อน สามารถนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และอธิบายประกอบกับผลที่ได้จาก ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค กำลังดึง ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

3.6 การตรวจทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

3.6.1 การตรวจองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์

เป็นการตรวจเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณและชนิดของสารประกอบที่ **ได้ผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดแก่ก่อนคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันทั้งก่อนและหลังจาก** ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เครื่องมือและเทคนิคเดียวกับการตรวจวัตถุสืบ ซึ่งผลที่ได้จะใช้ประกอบในการวิเคราะห์และอธิบายการพัฒนากำลังของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

3.6.2 การตรวจชนิดแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เป็นการตรวจเพื่อศึกษาการก่อตัวแร่ในคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ เถ้าเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยใช้เครื่องมือและกระบวนการเกี่ยวกับการตรวจวัตถุบ ซึ่งผลที่ได้จะทราบปริมาณและชนิดแร่ที่เกิดขึ้นมีส่วนในการพัฒนากำลังของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

3.6.3 การตรวจโครงสร้างจุลภาคโดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เป็นการตรวจเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในเนื้อของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน หลังจากผสมเถ้าเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในระดับจุลภาคของเนื้อคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน โดยใช้เครื่องมือและเทคนิคเดียวกับตรวจวัตถุบ ถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งผลที่ได้จะใช้ประกอบในการวิเคราะห์และอธิบายการพัฒนากำลังของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

3.7 การวิเคราะห์ผลและสรุปผล

หลังจากการทดสอบวัสดุปอชโซลานและก้อนตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบแล้วเสร็จ นำผลการทดสอบทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุปผล ดังต่อไปนี้

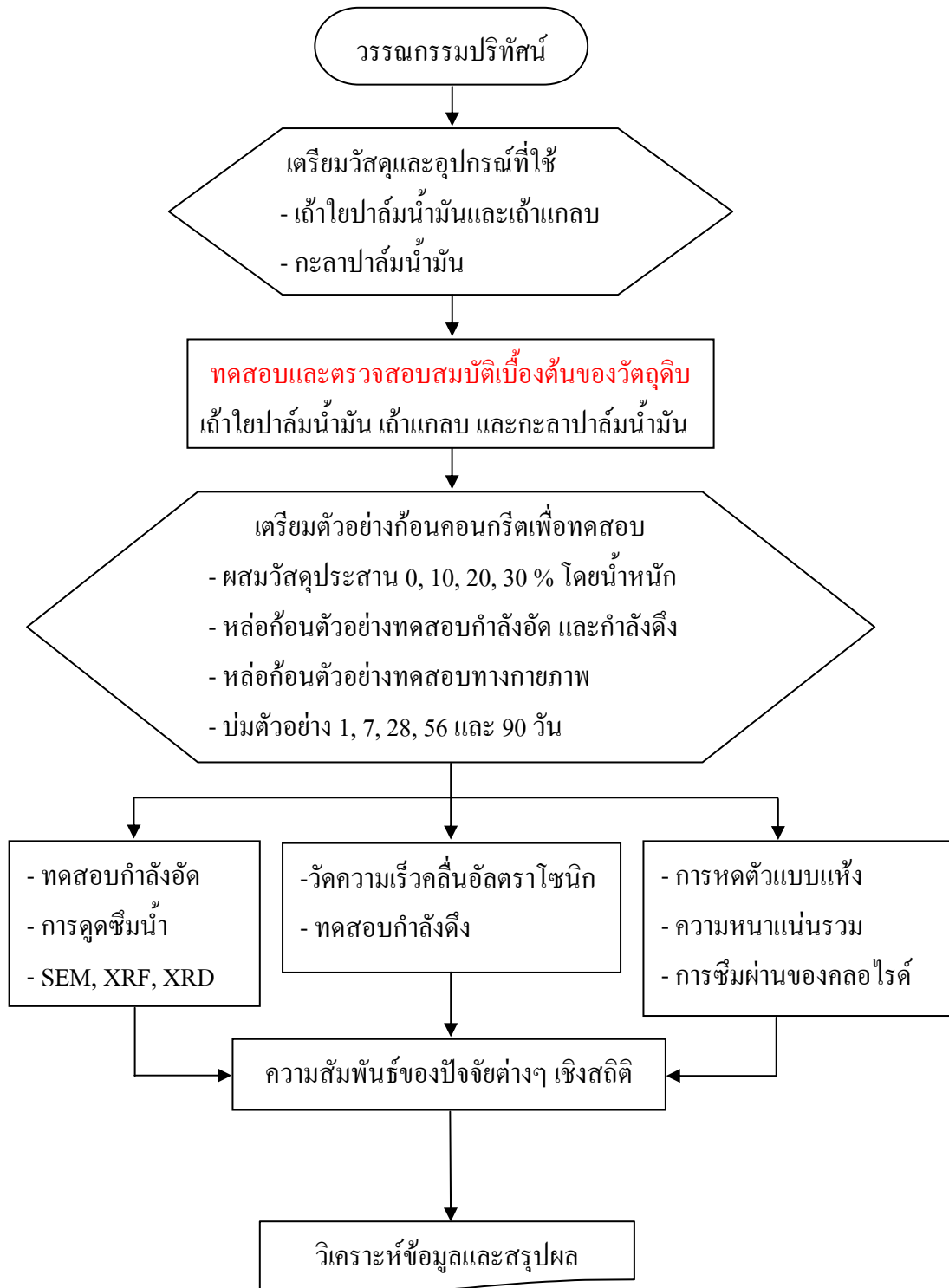
1. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบสมบัติของเถ้าเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ โดยวิเคราะห์จากผลการตรวจสอบทางห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ คือ การตรวจโครงสร้างจุลภาคโดยภาพถ่าย SEM การตรวจองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี XRF และการตรวจชนิดแร่ด้วยวิธี XRD ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ก่อนผสมกับวัสดุปอชโซลาน และวิเคราะห์ความชื้นเหลือระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมวัสดุปอชโซลาน

2. วิเคราะห์และสรุปผลของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ คือ การหดตัวแบบแห้ง ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค การซึมผ่านของคลอไรด์ และสมบัติเชิงกล คือ กำลังดึง กำลังอัด ใช้ผลการตรวจทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค ประกอบการวิเคราะห์

3. วิเคราะห์และสรุปผลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัสดุปอชโซลาน อายุบ่ม ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก กำลังดึง และกำลังอัด ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสม วัสดุปอชโซลาน โดยการสร้างสหสัมพันธ์เชิงพหุคูณ (Multiple Variable Regression) ระหว่างตัวแปร ปริมาณวัสดุปอชโซลาน อายุบ่ม ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก กำลังดึง และกำลังอัด เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นแบบจำลองคาดคะเนค่าบางชนิดที่ต้องการหล่อตามต้องการ

4. วิเคราะห์และสรุปผลคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมวัสดุปอชโซลาน ที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมวัสดุปอชโซลาน ต่อไป

ขั้นตอนการเก็บและตรวจสอบตัวอย่าง ทดสอบ วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภูมิขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

4.1 ลักษณะของเถ้าเียงปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบที่ใช้

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

ปริมาณของสารประกอบออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าเียงปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ ก่อนนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC) ได้ผลการตรวจ แสดงในตารางที่ 4.1 ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าเียงปาล์มน้ำมัน มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 รวมกันได้ประมาณร้อยละ 40.79 มีค่า CaO สูงร้อยละ 10.23 และมีค่าน้ำหนักสูญหายหลังเผา (LOI) ร้อยละ 12.00 นำมาเทียบเคียงตาม ASTM C 618 เถ้าเียงปาล์มน้ำมันไม่อยู่ในเกณฑ์วัสดุปอซโซลาน ส่วนผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 รวมกันได้ประมาณร้อยละ 63.76 ค่า SO_3 ร้อยละ 0.30 และมีค่า LOI ร้อยละ 4.80 จำแนกตาม ASTM C 618 เถ้าแกลบ อาจจัดเทียบได้กับวัสดุปอซโซลาน [Class C](#)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าเียงปาล์มน้ำมัน (%)	เถ้าแกลบ (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (%)
SiO_2	38.21	63.55	21.85
Al_2O_3	0.87	0.12	5.39
Fe_2O_3	1.71	0.09	2.10
CaO	10.53	0.58	65.91
MgO	3.01	0.41	1.16
K_2O	6.62	2.36	0.31
SO_3	1.50	0.30	2.51
LOI	12.00	4.80	0.96

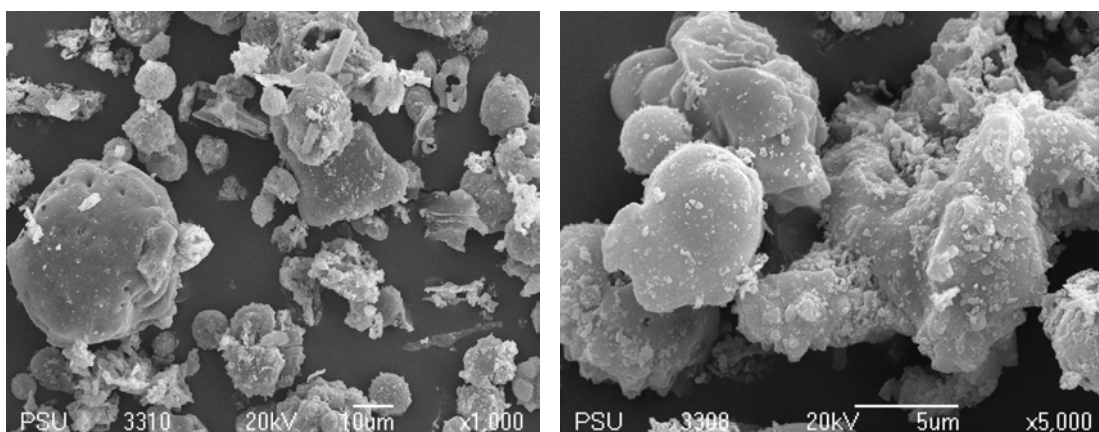
4.1.2 ชนิดและปริมาณแร่

การหาปริมาณของแร่ ด้วย XRD ที่อยู่ในถ้ำไยปาล์มน้ำมัน และถ้ำเกลบ เบื้องต้นก่อนนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าถ้ำไยปาล์มน้ำมัน ปรากฏแร่ควอตซ์ร้อยละ 66 ซิลิไคต์ร้อยละ 14 และ แคลไซต์ร้อยละ 20 อันบ่งชี้ว่าอุณหภูมิเผาถ้ำไยปาล์มน้ำมันไม่สมบูรณ์ที่จะทำให้โครงสร้างแร่แตกตัวออก และยังคงหลงเหลือโครงสร้างแร่บางชนิดอยู่อีก ส่วนถ้ำเกลบ นั้น พบว่ามีลักษณะเป็นวัสดุอสัณฐาน (Amorphous) โครงสร้างไม่เป็นผลึก ที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน และไม่พบปริมาณของแร่ใดๆ

4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของถ้ำ

ภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการตรวจโครงสร้างจุลภาคของถ้ำไยปาล์มน้ำมันและถ้ำเกลบก่อนนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งได้ผลการตรวจดังนี้

จากภาพถ่ายจุลภาค SEM ของถ้ำไยปาล์มน้ำมัน ดังแสดงตามรูปที่ 4.1 จะเห็นว่ามีส่วนที่ผิวเรียบ โค้งมน และเกลี้ยงเกลา ส่วนรูปร่างจะมีลักษณะค่อนข้างมน เนื้อแน่นทึบ

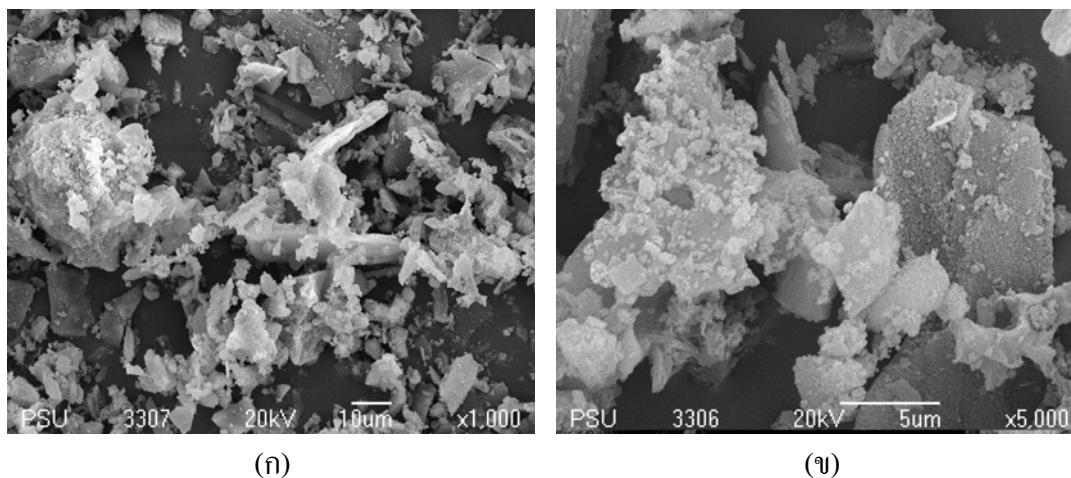


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของถ้ำไยปาล์มน้ำมัน (ก) ขยาย 1,000 เท่า (ข) ขยาย 5,000 เท่า

ในขณะที่ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของถ้ำเกลบ ตามรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า มีพื้นที่ผิวหยาบ ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม อนุภาคมีขนาดไม่แน่นอนและมีความพรุนสูง เนื่องจากรูปร่างของถ้ำเกลบ ที่มีลักษณะเป็นวัสดุอสัณฐาน



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของเถ้าแกลบ (ก) ขยาย 1,000 เท่า (ข) ขยาย 5,000 เท่า

4.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะ

พื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) เป็นการตรวจหาพื้นที่ผิว และพื้นที่ความพรุนของเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบก่อนนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งได้ผลการตรวจ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ผลการตรวจพื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีพื้นที่ผิว 1.628 ตร.ม./ก. ไม่มีพื้นที่ความพรุน สำหรับผลการตรวจพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าไยปาล์มน้ำมัน มีพื้นที่ผิว 5.138 ตร.ม./ก. ไม่มีพื้นที่ความพรุน ด้วยเหตุนี้จึงมีผลให้การเข้าทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้ช้าได้แต่เพียงผิวภายนอกเท่านั้น ดังแสดงตามรูปที่ 4.1 สำหรับผลการตรวจพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าแกลบ มีพื้นที่ผิว 51.613 ตร.ม./ก. และพื้นที่ความพรุน 3.961 ตร.ม./ก. ซึ่งช่วยให้โอกาสการเข้าทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้ง่าย รวดเร็ว และแผ่ขยายได้อย่างกว้างขวางและลึกจากผิวนอก ทำให้การดูดซึมเข้าไปด้วยการเคลื่อนที่ในรูเล็ก (Capillary migration) อันส่งผลให้ความต้องการน้ำมากขึ้นตามปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

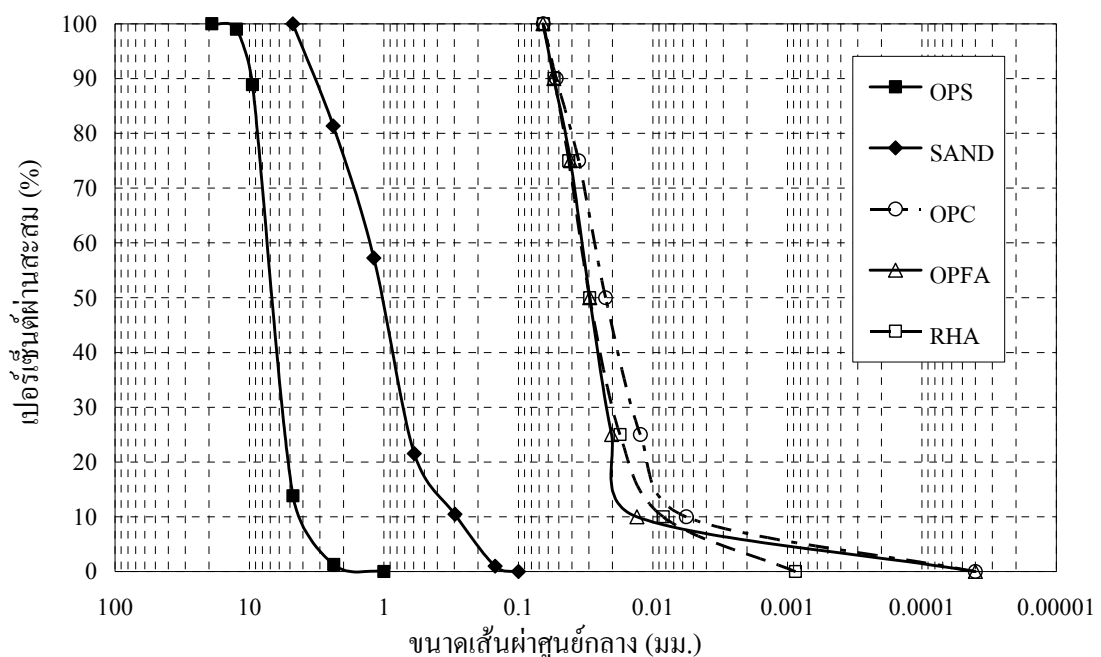
สมบัติทางกายภาพ	เถ้าไยปาล์มน้ำมัน	เถ้าแกลบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1*
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.)	5.138	51.613	1.628
พื้นที่ความพรุน (ตร.ม./ก.)	0	3.961	0
ความถ่วงจำเพาะ	2.019	2.221	3.150

หมายเหตุ : * อภิรักษ์ นพรัตน์, 2551

4.1.5 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

จากผลการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ เถ้าไฮปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมครอน) เป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าการกระจายตัวของของปูนซีเมนต์ เถ้าไฮปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ พบว่า มีขนาดในช่วง 0.040-69.62 ไมครอน ค่าเฉลี่ย 26.65 ไมครอน ซึ่งมีค่าการกระจายตัวค่อนข้างดี และอนุภาคขนาดที่เล็กกว่าเถ้าไฮปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ส่วนการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าไฮปาล์มน้ำมันพบว่ามีขนาดอยู่ในช่วง 0.040-69.62 ไมครอน ค่าเฉลี่ย 32.74 ไมครอน มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากเถ้าไฮปาล์มน้ำมัน มีรูปร่างค่อนข้างมน และผิวเรียบ อนุภาคขนาดละเอียดคละอยู่เป็นปริมาณมาก และผลการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าแกลบพบว่ามีขนาดในช่วง 0.869-69.62 ไมครอน ค่าเฉลี่ย 31.21 ไมครอน พบว่าจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ เถ้าทั้งสองมีขนาดที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย สำหรับทรายหยาบก็เป็นทรายละเอียด มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Finess modulus) 3.28 แต่กะลาปาล์มน้ำมันมีขนาดเดียว มีค่าโมดูลัสความละเอียด 1.97



รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดของวัสดุดิบที่ใช้ผสมในคอนกรีตทดสอบ

4.1.6 ค่าความชื้นเหลวปกติ

ผลการทดสอบหาค่าความชื้นเหลวปกติ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์มีค่าร้อยละ 25.60 สำหรับเพสต์ที่ผสมเถ้าไพล่าม น้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 29.40-37.30 สำหรับเพสต์ที่ผสมเถ้ากลบในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 32.90-45.70 พบว่าการแทนที่ต่างๆ กัน ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของเพสต์ที่ผสม เถ้าไพล่าม น้ำมันและเถ้ากลบทุกอัตราส่วน มีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย เถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าไพล่าม น้ำมัน ของ จักรพันธ์ วงษ์พา (2545) และ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร (2546) เนื่องจากเถ้าไพล่าม น้ำมัน มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ ส่วนเถ้ากลบนั้น มีพื้นที่ ผิวจำเพาะ และพื้นที่ความพรุนที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ ประกอบกับอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่ แน่นอน ทำให้น้ำส่วนหนึ่งเข้าไปอยู่ในรูพรุนของอนุภาคเถ้ากลบและรูปร่างที่เป็นเหลี่ยมมุมจะ ขัดขวางการลื่นไหลของเพสต์ เป็นผลทำให้ค่าปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของเพสต์ที่ผสมเถ้า ไพล่าม น้ำมันและเถ้ากลบมากขึ้นตามอัตราส่วนแทนที่ของเถ้าไพล่าม น้ำมันและเถ้ากลบที่ เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 ค่าความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวของส่วนผสมที่ศึกษา

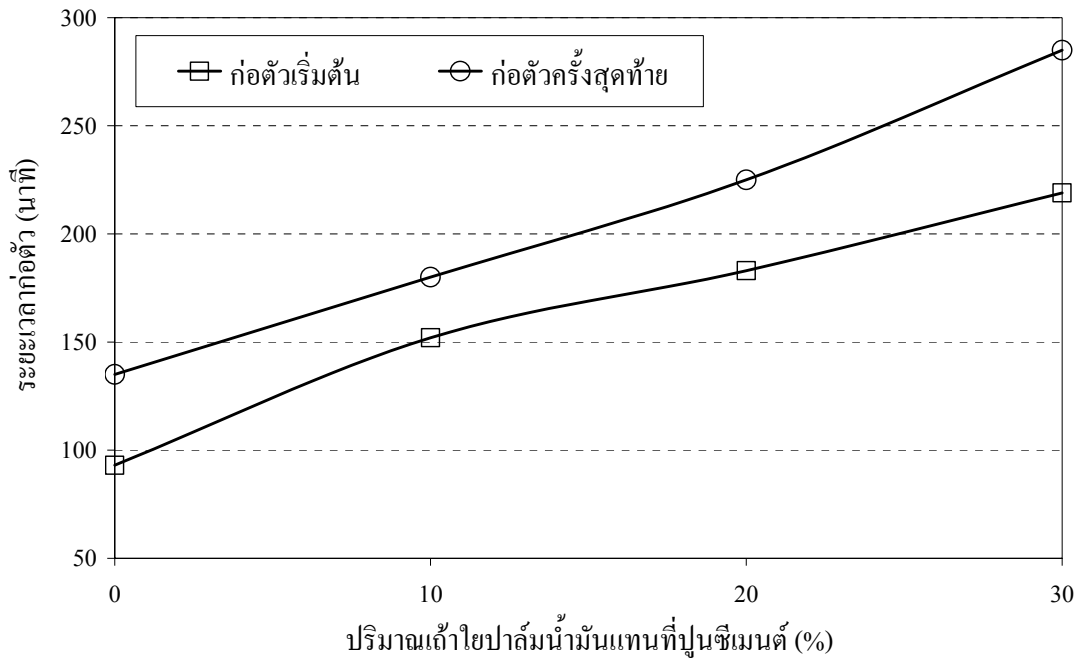
ตัวอย่าง	ความชื้นเหลวปกติ (%)	ระยะเวลาก่อตัว (นาที)	
		เริ่มต้น	ครั้งสุดท้าย
Cement	25.60	93	135
OPFA10	29.40	152	180
OPFA20	32.70	183	225
OPFA30	37.30	219	285
RHA10	32.90	97	165
RHA20	39.70	111	150
RHA30	45.70	124	145

3.1.7 ระยะเวลาก่อตัว

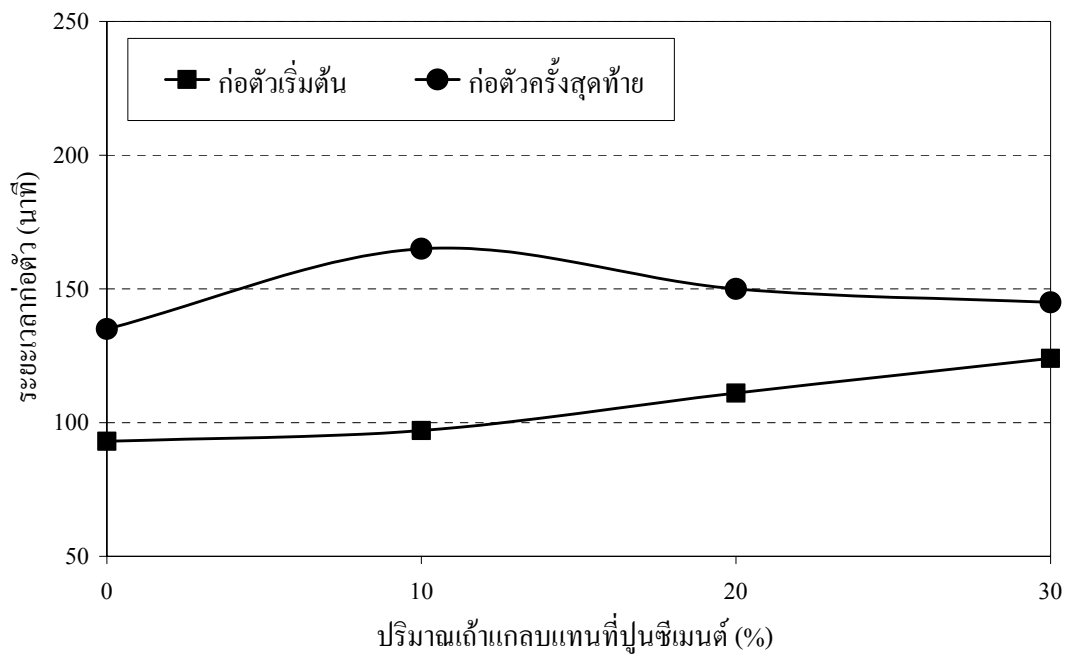
จากผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัว ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 93 นาที และระยะเวลาก่อตัวครั้งสุดท้ายเท่ากับ 135 นาที สำหรับระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ที่ผสมเถ้าไพล่าลมน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 พบว่ามีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 152-219 นาที และมีค่าระยะเวลาก่อตัวครั้งสุดท้ายอยู่ระหว่าง 180-285 นาที ส่วนระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ที่ผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 นั้น พบว่ามีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 97-124 นาที และมีค่าระยะเวลาก่อตัวครั้งสุดท้ายอยู่ระหว่าง 145-165 นาที ซึ่งผลจากการทดสอบมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 150 ที่กำหนดระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น มีค่าไม่น้อยกว่า 45 นาที และระยะเวลาก่อตัวครั้งสุดท้าย มีค่าไม่เกิน 375 นาที

จากรูปที่ 4.4 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ที่ผสมเถ้าไพล่าลมน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่ามีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 152, 183 และ 219 นาที และมีค่าระยะเวลาก่อตัวครั้งสุดท้ายเท่ากับ 180, 225 และ 285 นาที จะเห็นได้ว่ามีระยะเวลาก่อตัวสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ทั้งเริ่มต้นและครั้งสุดท้าย ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องและแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยของวีรชาติ ตั้งจิรภัทร และคณะ (2545) และพบว่าช่วงเวลาระหว่างเริ่มต้นกับครั้งสุดท้ายจะเริ่มใช้เวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าไพล่าลมน้ำมันมีพื้นที่ผิวจำเพาะและพื้นที่ความพรุนสูงกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้ดูดน้ำเข้าไปในตัวมาก รวมถึงอนุภาคที่มัน รูปร่างค่อนข้างแน่นอน ทำให้มีส่วนช่วยในความสามารถเทได้ดีขึ้น

จากรูปที่ 4.5 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ที่ผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่ามีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 97, 111 และ 124 นาที และมีค่าระยะเวลาก่อตัวครั้งสุดท้ายเท่ากับ 165, 150 และ 145 นาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าระยะเวลาก่อตัวสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ทั้งเริ่มต้นและครั้งสุดท้ายเช่นกัน ยังสังเกตได้ว่าการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ที่ผสมเถ้าแกลบแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องและแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยของจักรพันธ์ วงษ์พา (2545) ทั้งนี้เนื่องมาจากเถ้าแกลบขนาดอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและพื้นที่ความพรุนมากทำให้ดูดปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติมีค่ามากขึ้นด้วย เพราะต้องใช้น้ำดูดซึม (Capillary water) เข้าไปแทรกตามรูพรุนของเถ้าแกลบสืบเนื่องจากความดันในรูเล็ก (Capillary pressure) เป็นสาเหตุให้เพสต์ที่ผสมเถ้าแกลบแข็งตัวช้าลงในช่วงระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปทำให้ระยะเวลาก่อตัวเร็วขึ้นตามอัตราส่วนแทนที่ร้อยละของเถ้าแกลบ อันส่งผลให้ความสามารถเทได้ดีขึ้นตามปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของปริมาณเถ้าไพล์น้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์กับระยะเวลาก่อตัว



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของปริมาณเถ้าเกลบแทนที่ปูนซีเมนต์กับระยะเวลาก่อตัว

4.2 สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

4.2.1 การหดตัวแบบแห้ง

ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 พบว่าการหดตัวของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันควบคุม (Control) หรือ ที่ไม่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ มีการหดตัวเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น มีค่าการหดตัวร้อยละ 0.14 ที่อายุ 90 วัน ซึ่งมีการหดตัวมากกว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ ดังแสดงตามรูปที่ 4.6 และ 4.7

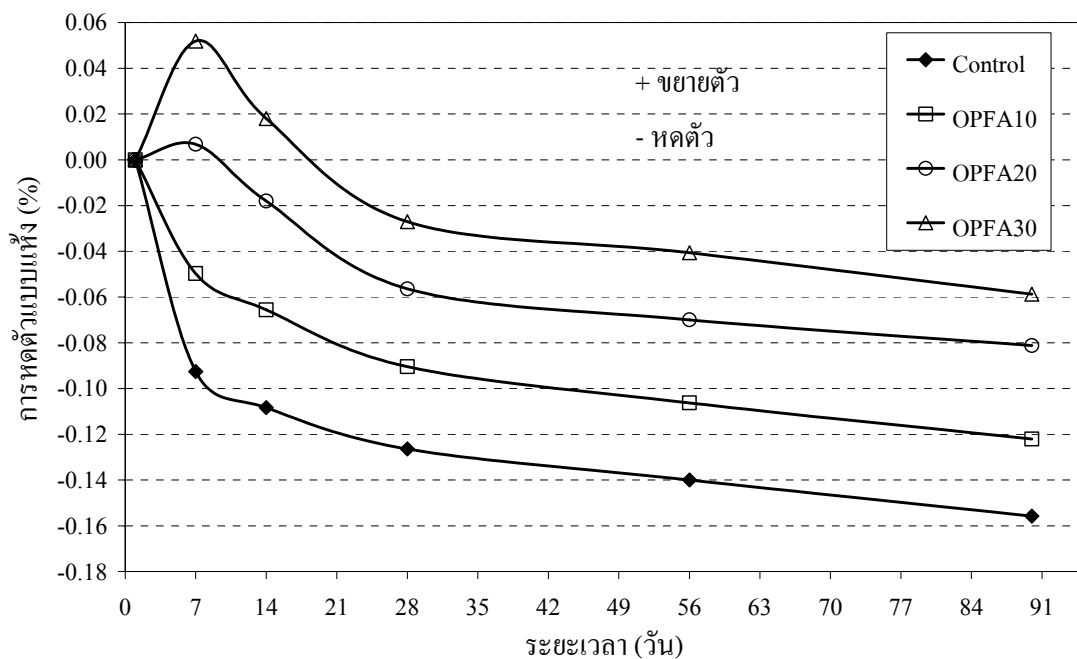
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

รหัสตัวอย่าง	การหดตัวแบบแห้ง (%)			
	7 วัน	28 วัน	56 วัน	90 วัน
Control	-0.09255	-0.12641	-0.13995	-0.15576
OPFA10	-0.04974	-0.09043	-0.10625	-0.12208
OPFA20	0.00677	-0.05640	-0.06993	-0.08121
OPFA30	0.05191	-0.02708	-0.04063	-0.05868
RHA10	0.00699	-0.05190	-0.07220	-0.09025
RHA20	0.01128	-0.04287	-0.08574	-0.10830
RHA30	0.01576	-0.03601	-0.08778	-0.11704

หมายเหตุ : + ขยายตัว, - หดตัว

จากรูปที่ 4.6 ผลการทดสอบแสดงการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน (OPFA10, OPFA20 และ OPFA30) ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 30 ที่อายุ 7 วัน มีค่าการขยายตัวมากที่สุดร้อยละ 0.05191 และค่าการหดตัว ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.10625, 0.06993 และ 0.04063 ตามลำดับ ซึ่งในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีค่าการหดตัวน้อยที่สุด ผลเนื่องมาจากการขยายตัวในช่วงแรก และเมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน มีค่าการหดตัวลดลง

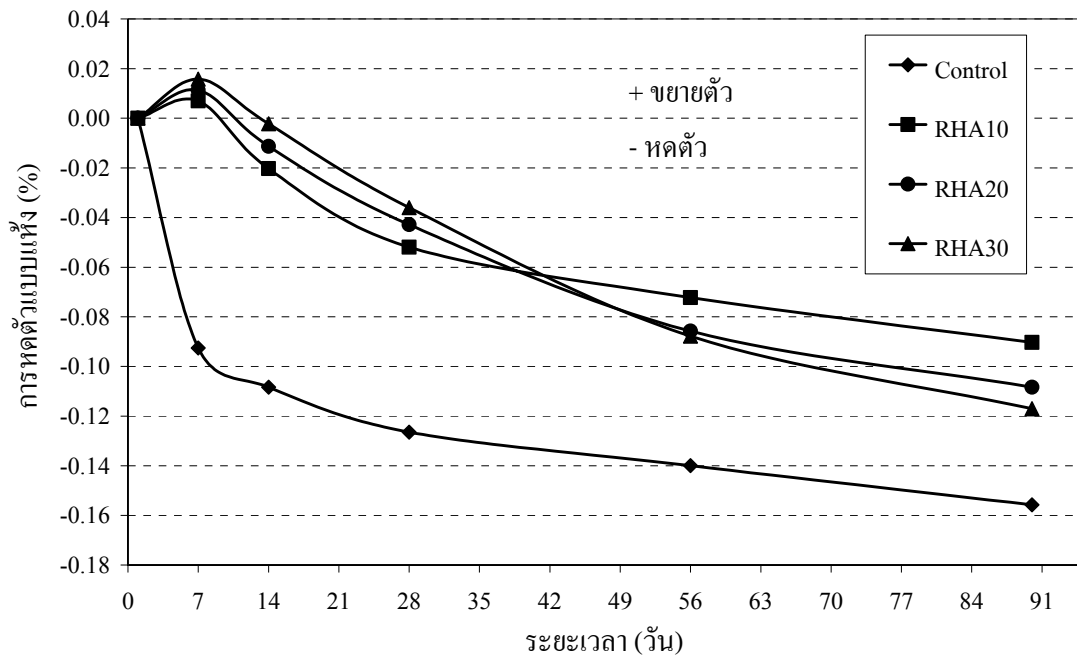
ร้อยละ 22, 48 และ 62 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tay (1991) จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่ามีการพัฒนาการหดตัวอย่างช้าๆ ตามอายุของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน เนื่องจากปริมาณแทนที่ของเถ้าใยปาล์มน้ำมันและปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ กอปรกับบ่มตัวอย่างในอากาศ ทำให้เกิดโพรงรูเล็กและโพรงอากาศ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 4.7 ผลการทดสอบแสดงการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ (RHA10, RHA20 และ RHA30) ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ จะขยายตัวในช่วง 7 วันแรก ในอัตราส่วนร้อยละ 30 ที่อายุ 7 วันมีค่าการขยายตัวมากที่สุดร้อยละ 0.01576 และค่าการหดตัว ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.07220, 0.08574 และ 0.08778 ตามลำดับ ซึ่งในอัตราส่วนร้อยละ 10 มีค่าการหดตัวน้อยที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน มีค่าการหดตัวลดลงร้อยละ 42, 30 และ 25 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่ามีการพัฒนาการหดตัวอย่างช้าๆ ตามอายุของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน และตามปริมาณแทนที่ของเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น ที่มี

ความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสูง (ระยะเวลาก่อตัวครั้งสุดท้ายลดลงตามปริมาณแทนที่ของเถ้าแกลบ) กอปรกับบ่มตัวอย่างในอากาศ ทำให้เกิดโพรงรูเล็กและโพรงอากาศ ที่ทุกอัตราส่วนมีค่าการหดตัวแบบแห้งใกล้เคียงกันมาก จากผลงานวิจัยนี้สังเกตว่าอาจจัดเป็นสารผสมเพิ่ม ช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ

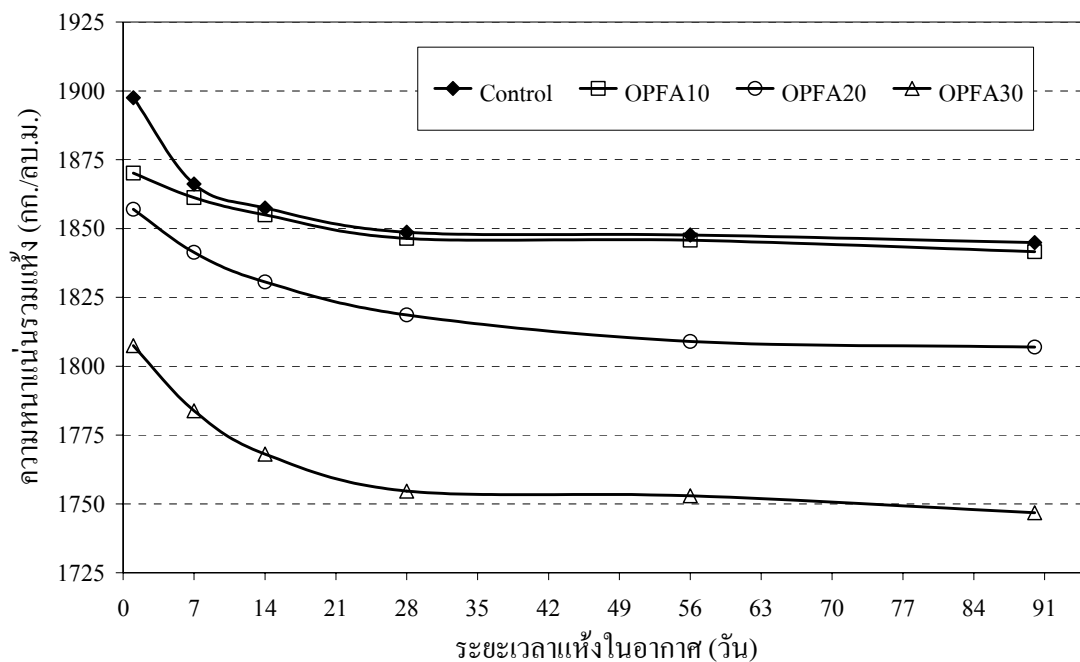
4.2.2 ความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศ

ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มและเถ้าแกลบ จะค่อยๆ ลดลงตามอายุของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน มีค่าอยู่ระหว่าง 1848 - 1898 กก./ลบ.ม. และค่าต่ำสุด 1848 กก./ลบ.ม. ที่อายุ 90 วัน โดยช่วงแรกที่อายุ 1 - 28 วัน มีค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศลดลงอย่างรวดเร็วคิดเป็นร้อยละ 2.58 ช่วงหลังที่อายุ 28-90 วัน มีค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศลดลงอย่างช้าๆ คิดเป็นร้อยละ 0.20 ซึ่งความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศต่ำกว่ามาตรฐาน ASTM C 330 (1850 กก./ลบ.ม.) เนื่องจากมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันมีความหนาแน่นที่น้อยกว่าหินคือ 580-648 กก./ลบ.ม.

และมีค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศสูงกว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ ดังแสดงตามรูปที่ 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศ

รหัส ตัวอย่าง	ความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศ (กก./ลบ.ม.)				
	1 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	90 วัน
Control	1898	1866	1858	1849	1848
OPFA10	1870	1861	1855	1846	1846
OPFA20	1857	1841	1831	1819	1809
OPFA30	1808	1784	1768	1755	1753
RHA10	1859	1839	1817	1806	1802
RHA20	1848	1818	1797	1783	1777
RHA30	1778	1723	1697	1686	1680

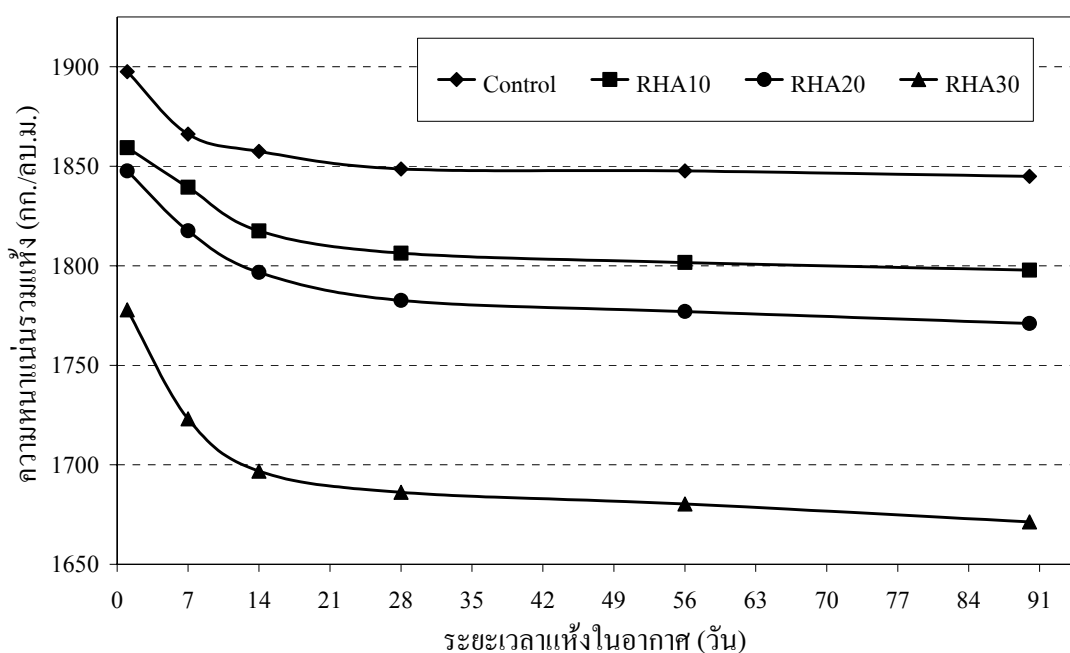


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 4.8 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์ม มีค่าอยู่ระหว่าง 1753 – 1870 กก./ลบ.ม. และค่าต่ำสุด 1753 กก./ลบ.ม. ในอัตราส่วนร้อยละ 30 ที่อายุ 90 วัน เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน มีค่าความหนาแน่นรวมแห้งลดลงร้อยละ 0.18, 2.06 และ 5.32 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศจะค่อย ๆ ลดลงตามปริมาณเถ้าไยปาล์ม น้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ และตามอายุ เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละที่อัตราส่วนเดียวกัน โดยช่วงแรก ที่อายุ 1 - 28 วัน มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ร้อยละ 1.27, 2.07 และ 2.92 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ในช่วงหลังที่อายุ 28 - 90 วัน มีค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศลดลงอย่างช้า ๆ ร้อยละ 0.26, 0.64 และ 0.45 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศต่ำกว่ามาตรฐาน ASTM C 330 และคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน เนื่องจากมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน และปริมาณเถ้าไยปาล์มน้ำมันมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้ความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าไยปาล์ม น้ำมันที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.9 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์ม มีค่าอยู่ระหว่าง 1671-1859 กก./ลบ.ม. และค่าต่ำสุด 1671 กก./ลบ.ม. ในอัตราส่วนร้อยละ 30 ที่อายุ 90 วัน เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน มีค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศลดลงร้อยละ 2.55, 4.01 และ 9.41 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศจะค่อย ๆ ลดลงตามปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ และตามอายุ เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละที่อัตราส่วนเดียวกัน โดยช่วงแรก ที่อายุ 1 - 28 วัน มีการลดลงอย่างรวดเร็ว ร้อยละ 2.85, 3.52 และ 5.16 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ช่วงหลังที่อายุ 28 - 90 วัน มีค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศลดลงอย่างช้า ๆ ร้อยละ 0.47, 0.65 และ 0.88 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศต่ำกว่ามาตรฐาน ASTM C 330 และคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน เนื่องจากมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน และปริมาณเถ้าแกลบมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ รวมถึงความชื้นเหลวที่บ่งบอกถึงความต้องการน้ำที่สูง เพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวที่ต้องการ เมื่อคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบแห้งในอากาศ ทำให้ความหนาแน่นรวมลดลงตามปริมาณการ

แทนที่ของเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตทดสอบครั้งนี้ที่อายุ 28 วัน มีค่าใกล้เคียงและน้อยกว่าของคอนกรีตจากผลงานวิจัย Mannan and Ganapathy (2001, 2002), Mannan et al. (2006), Teo et al. (2007) แต่ความหนาแน่นแห้งในอากาศที่อายุ 28 วัน ในกรณีเติมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ มีค่าสูงกว่าและต่ำกว่าที่เติมเถ้าลอย (Basri et al., 1999)



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ

4.2.3 การดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันควบคุม มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 12.61-13.43 และค่าสูงสุดร้อยละ 12.61 ที่อายุบ่ม 90 วัน ค่าการดูดซึมน้ำจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน เนื่องจากอิทธิพลของความพรุนในกะลาปาล์มน้ำมัน และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ ตามรูปที่ 4.10 และ 4.11

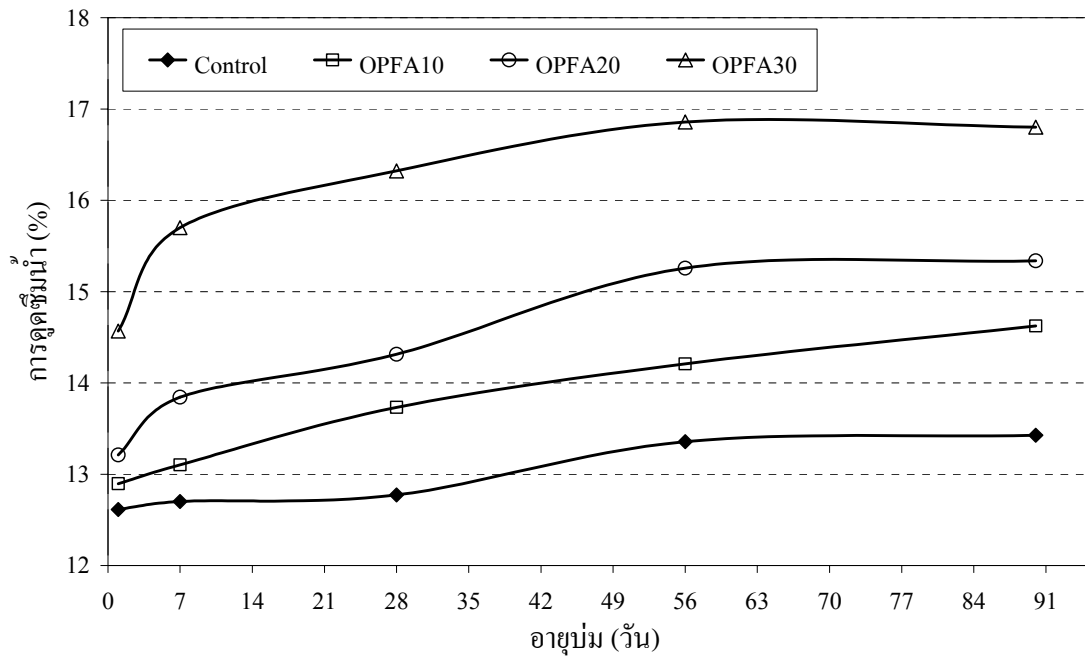
จากรูปที่ 4.10 ผลการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่ามีค่าระหว่างร้อยละ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

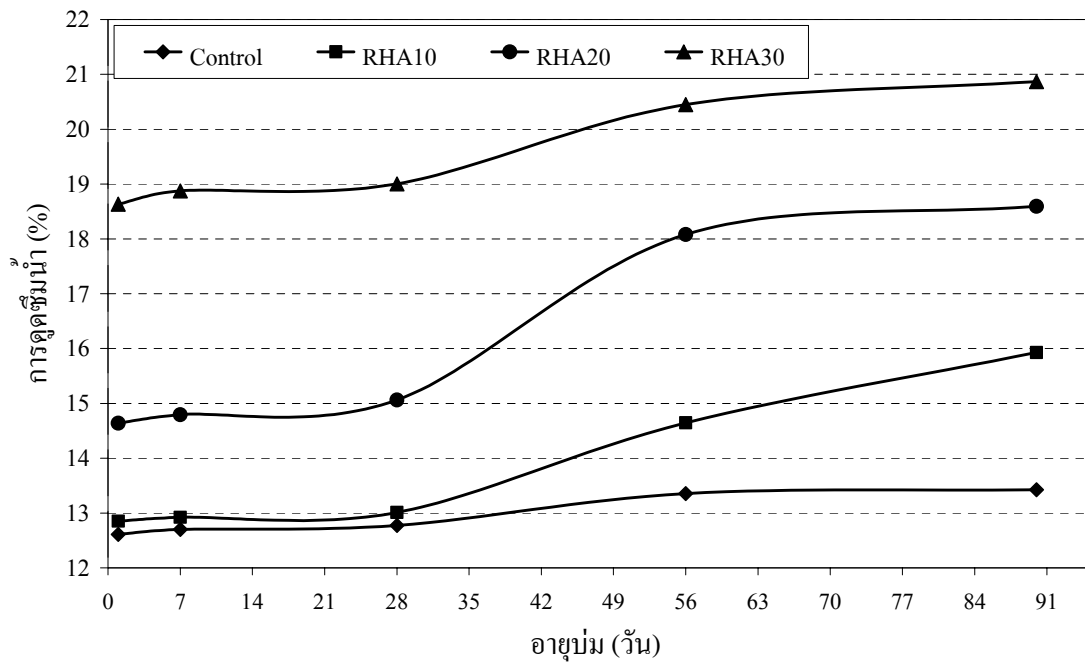
รหัส ตัวอย่าง	การดูดซึมน้ำ (%)				
	1 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	90 วัน
Control	12.61	12.70	12.77	13.36	13.43
OPFA10	12.90	13.10	13.73	14.21	14.62
OPFA20	13.21	13.84	14.31	15.26	15.34
OPFA30	14.57	15.70	16.32	16.86	16.80
RHA10	12.85	12.92	13.01	14.65	15.93
RHA20	14.64	14.79	15.06	18.08	18.60
RHA30	18.63	18.88	19.00	20.45	20.87

12.90-16.80 และค่าสูงสุดร้อยละ 16.80 ในอัตราส่วนร้อยละ 30 ที่อายุ 90 วัน เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 8.91, 14.22 และ 25.13 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ โดยสังเกตเห็นว่าค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ที่อัตราส่วนเดียวกัน และมากขึ้นตามปริมาณเถ้าไยปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากอิทธิพลของพื้นที่ความพรุนในกะลาปาล์มน้ำมันและพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าไยปาล์มน้ำมันที่มีค่าสูงกว่าปูนซีเมนต์ กอปรกับบ่มตัวอย่างในน้ำ เป็นผลให้เกิดการเคลื่อนที่ในรูเล็ก (Capillary migration) อย่างช้าๆ ตามอายุบ่ม ทำให้เกิดความดันในรูเล็ก (Capillary pressure) และซอกเล็ก (Capillary interstice) มากขึ้น

จากรูปที่ 4.11 ผลการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 12.85-20.87 และค่าสูงสุดร้อยละ 20.87 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่อายุ 90 วัน เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 18.64, 38.50 และ 55.42 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ที่อัตราส่วนเดียวกันและมากขึ้นตามปริมาณเถ้าไยปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากอิทธิพลของพื้นที่ความพรุนในกะลาปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวจำเพาะกับพื้นที่ความพรุนสูงกว่าปูนซีเมนต์ กอปรกับบ่มตัวอย่างในน้ำ เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างช้าๆ ตามอายุการบ่ม ทำให้เกิดความดันในรูเล็ก และซอกเล็ก เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ

4.2.4 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

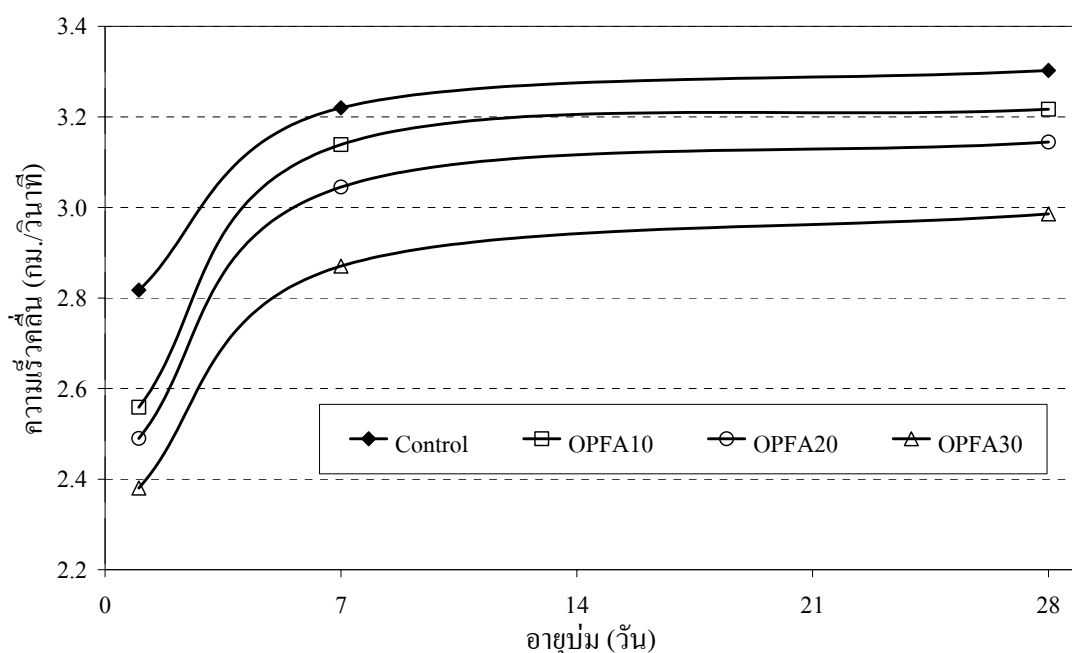
ผลการทดสอบค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันควบคุม มีค่าอยู่ระหว่าง 2.818-3.303 กม./วินาที และค่าสูงสุด 3.303 กม./วินาที ที่อายุบ่ม 28 วัน จัดเป็นคุณภาพของคอนกรีตระดับพอใช้ (Neville, 1995) ซึ่งมีค่าความเร็วคลื่นตามยาว อยู่ระหว่าง 3.000-3.500 กม./วินาที ซึ่งมีค่าสอดคล้องและแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ Mannan et al. (2002) นอกจากนี้ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม และมีค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกสูงกว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มและเถ้าแกลบ ดังแสดงตามรูปที่ 4.12 และ 3.13 อันสืบเนื่องจากลักษณะมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้คอนกรีตมีสมบัติความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศและการดูดซึมน้ำมีผลกระทบโดยตรงต่อความเร็วคลื่น

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ

รหัสตัวอย่าง	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (กม./วินาที)		
	1 วัน	7 วัน	28 วัน
Control	2.818	3.220	3.303
OPFA10	2.559	3.139	3.217
OPFA20	2.490	3.045	3.144
OPFA30	2.380	2.870	2.986
RHA10	2.357	3.094	3.183
RHA20	2.316	3.024	3.101
RHA30	2.297	2.832	2.947

จากรูปที่ 4.12 ผลการทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก มีค่าอยู่ระหว่าง 2.380-3.217 กม./วินาที และค่าสูงสุด 3.217 กม./วินาที ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 28 วัน จาก Neville (1995) ได้จำแนกคุณภาพของคอนกรีตตามความเร็วคลื่นตามยาวได้ว่าที่อายุบ่ม 28 วันในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 จัดเป็นคุณภาพของ

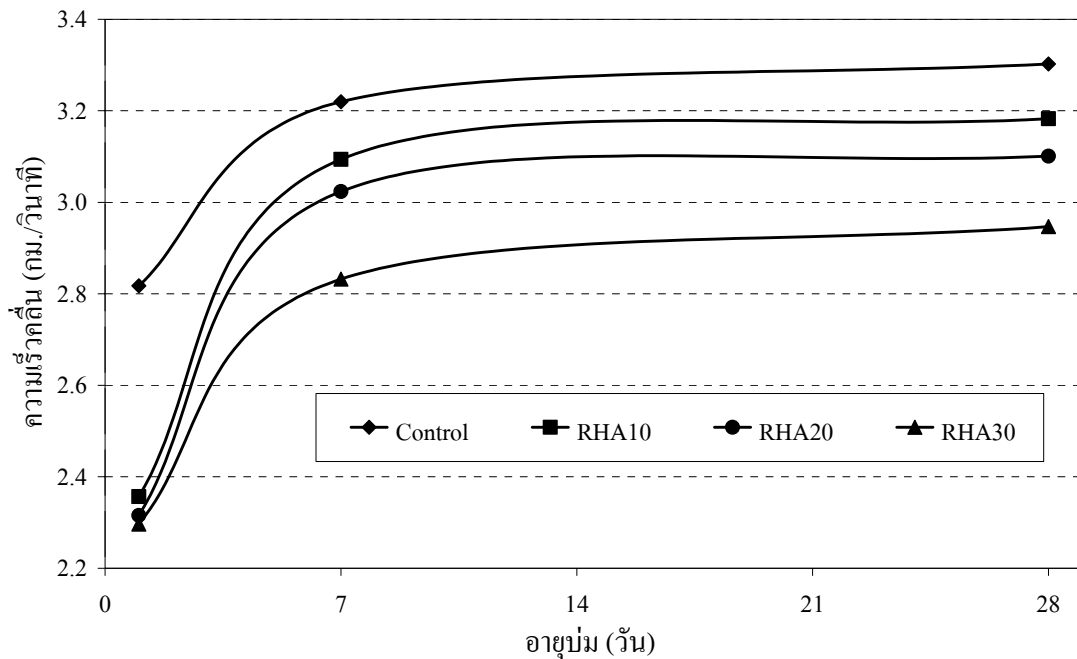
คอนกรีตระดับพอใช้ และที่อัตราส่วนร้อยละ 30 จัดเป็นคุณภาพของคอนกรีตระดับต่ำ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุ 28 วัน ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกลดลงร้อยละ 2.60, 4.79 และ 9.59 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ที่อัตราส่วนเดียวกัน และลดลงตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากอิทธิพลของความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศและการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 4.13 ผลการทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 2.297-3.183 กม./วินาที และค่าสูงสุด 3.183 กม./วินาที ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 28 วัน และที่อายุบ่ม 28 วันในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 จัดเป็นคุณภาพของคอนกรีตระดับพอใช้ และที่อัตราส่วนร้อยละ 30 จัดเป็นคุณภาพของคอนกรีตระดับต่ำ (Neville, 1995) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุ 28 วัน ค่าความเร็วคลื่นอัลตรา-โซนิกลดลงร้อยละ 3.63, 6.10 และ 10.77 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ที่อัตราส่วนเดียวกัน และลดลง

ตามปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากอิทธิพลของเถ้าแกลบที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน นอกจากนี้มีค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน และอยู่ในพิสัยเดียวกับคอนกรีตมวลเบาของงานวิจัย Chang et al. (2006)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ

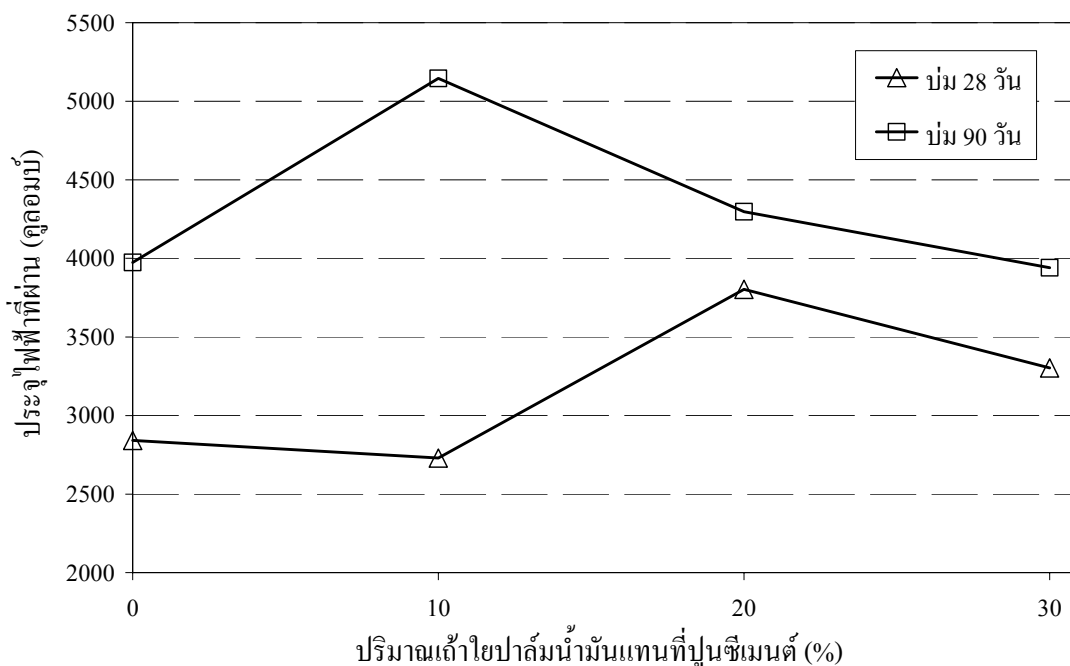
อย่างไรก็ตาม Neville (1995) ได้จัดระดับคุณภาพของคอนกรีตโดยการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกนั้น จากคอนกรีตมวลรวมปกติ และพบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกลดลงตามความหนาแน่นรวมของคอนกรีต del Rio et al. (2004) ดังนั้นการประเมินคุณภาพความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันตามนั้น จัดเป็นคุณภาพของคอนกรีตที่ดีได้ โดยพิจารณาสมบัติอื่นประกอบ

4.2.5 การซึมผ่านของคลอไรด์

จากผลการทดสอบหาค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่ามีค่า 2841 คูลอมบ์ ที่อายุบ่ม 28 วัน และ 3974 คูลอมบ์ ที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่าความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ อยู่ในระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ปานกลาง ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 (ระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ปานกลาง มีค่าประจุไฟฟ้า ระหว่าง 2000 - 4000 คูลอมบ์) เนื่องจากอิทธิพลของกะลาปาล์มน้ำมัน เมื่อพิจารณาที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ ต่ำกว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมัน และสูงกว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ดังแสดงตามรูปที่ 4.14 และ 4.15

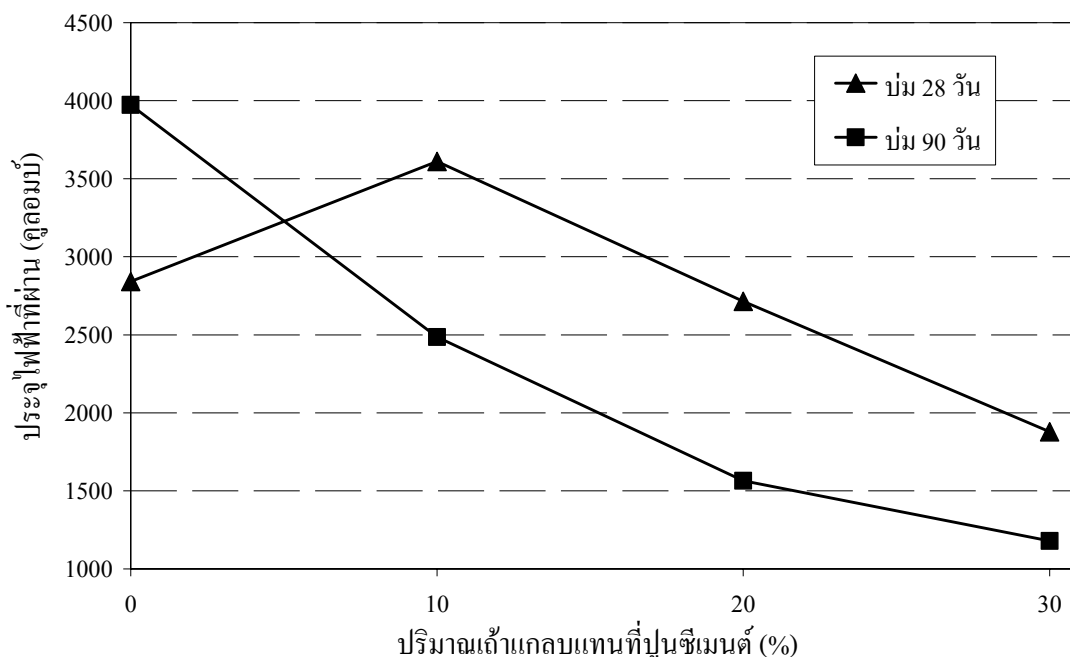
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ

รหัสตัวอย่าง	ประจุไฟฟ้าที่ผ่าน (คูลอมบ์)	
	28 วัน	90 วัน
Control	2841	3974
OPFA10	2730	5146
OPFA20	3803	4298
OPFA30	3303	3941
RHA10	3611	2486
RHA20	2715	1565
RHA30	1879	1179



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเข้าไยปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์กับประจุไฟฟ้าที่ผ่าน

จากรูปที่ 4.14 ผลการทดสอบหาค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2730-5146 คูลอมบ์ และค่าเฉลี่ยต่ำสุด 2730 คูลอมบ์ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ อยู่ในระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ปานกลางถึงสูง ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 (ระดับการซึมผ่านของคลอไรด์สูง มีค่าประจุไฟฟ้าที่ผ่านสูงกว่า 4000 คูลอมบ์) เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่าการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 29.49, 8.14 และลดลงร้อยละ 0.84 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.14 ซึ่งค่าการซึมผ่านของคลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ทุกอัตราส่วน และลดลงตามปริมาณเข้าไยปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากอิทธิพลของเข้าไยปาล์มน้ำมัน ที่มีสมบัติต่ำกว่าวัสดุปอซโซลานไม่สามารถจับยึดคลอไรด์ ด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งพบว่ามีค่าฟอสเฟต (P_2O_5) คลอไรด์ (Cl) (ตารางที่ 4.12) และจากผล XRD พบซิลิเกต (KCl) ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเข้าไยปาล์มน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเข้าไยปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์กับประจุไฟฟ้าที่ผ่าน

จากรูปที่ 4.15 ผลการทดสอบหาค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1179-3611 คูลอมบ์ และค่าเฉลี่ยต่ำสุด 1179 คูลอมบ์ ในอัตราส่วนร้อยละ 30 ที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่าความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ อยู่ในระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำถึงปานกลาง ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 (ระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำ มีค่าประจุไฟฟ้าที่ผ่านระหว่าง 100 - 1000 คูลอมบ์) เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุบ่ม 90 วัน ค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงร้อยละ 37.5, 60.6 และ 70.3 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.15 ซึ่งค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ มีแนวโน้มลดลงตามอายุบ่ม ทุกอัตราส่วน และลดลงตามปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ ผลการทดสอบครั้งนี้ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gastaldini, et al. (2007) เนื่องจากอิทธิพลของเถ้าแกลบ ที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม สามารถจับยึดคลอไรด์ได้ดี

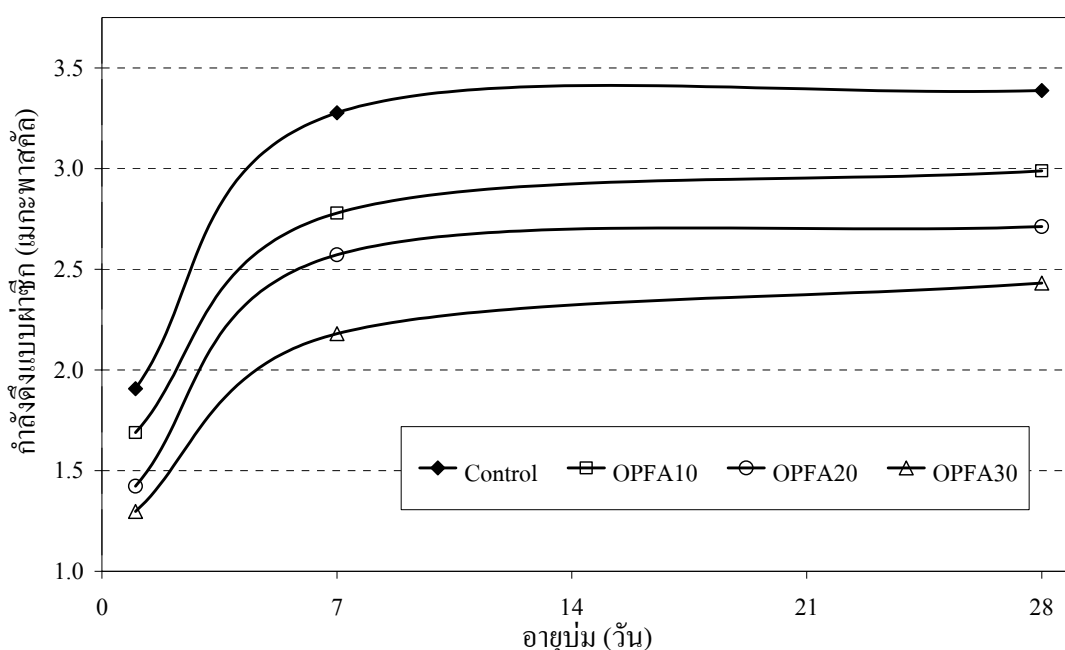
4.2.6 กำลังดึงแบบผ่าซีก

จากผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 1.907-3.388 เมกะพาสคัล และค่ากำลังดึงสูงสุด 3.388 เมกะพาสคัล ที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม มีค่ากำลังดึงตามมาตรฐาน ASTM C 330-97 อยู่ในเกณฑ์คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกไม่น้อยกว่า 2.100 เมกะพาสคัล อายุบ่ม 28 วัน) ซึ่งมีค่ากำลังดึงสูงกว่างานวิจัยของ Mannan and Ganapathy (2002) และค่ากำลังดึงสูงกว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล่ามและเถ้าแกลบ ดังแสดงตามรูปที่ 4.16 และ 4.17 นอกจากนี้ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคแนวโน้มไปด้วยกันและสอดคล้องกับค่านี้ ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล่ามและเถ้าแกลบ

รหัสตัวอย่าง	กำลังดึงแบบผ่าซีก (เมกะพาสคัล)		
	1 วัน	7 วัน	28 วัน
Control	1.907	3.277	3.388
OPFA10	1.689	2.779	2.989
OPFA20	1.423	2.572	2.713
OPFA30	1.297	2.180	2.431
RHA10	1.433	2.685	2.815
RHA20	1.310	2.487	2.673
RHA30	1.106	2.159	2.404

จากรูปที่ 4.16 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล่ามน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 1.297-2.989 เมกะพาสคัล และค่ากำลังดึงสูงสุด 2.989 เมกะพาสคัล ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกลดลงร้อยละ 11.8, 19.9 และ 28.2 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าไพล่ามน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากอิทธิพลของเถ้าไพล่ามน้ำมัน มีข้อดีของการรับกำลังดึง ทั้งนี้มีค่ากำลังดึงตามมาตรฐาน ASTM C 330-97 และจากรูป

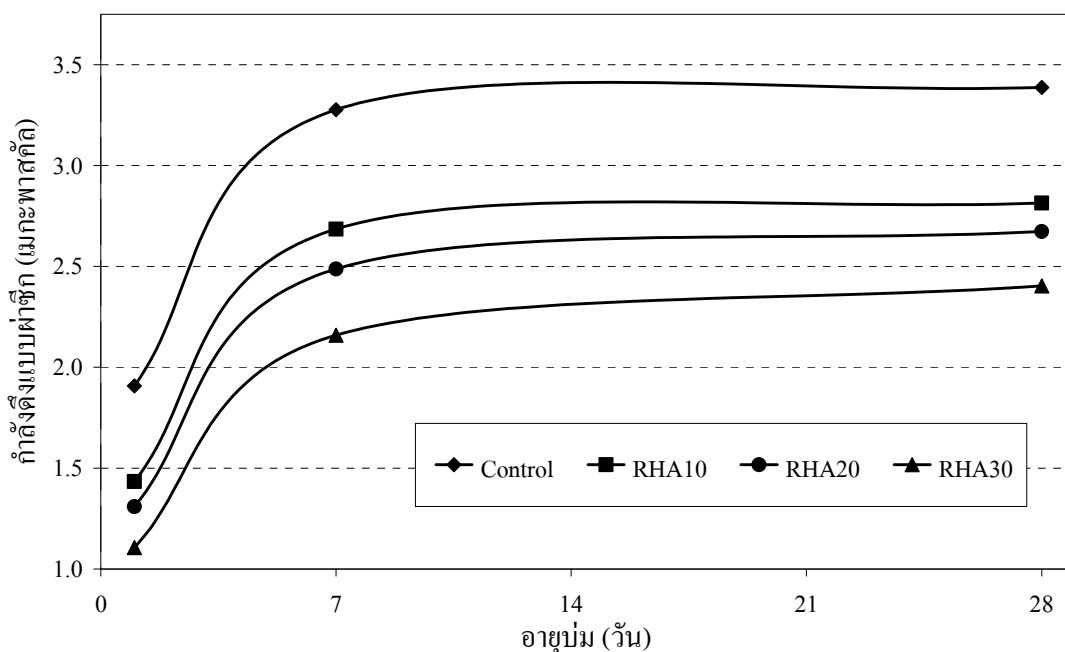
ที่ 4.16 จะเห็นว่าค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกมีแนวโน้มการพัฒนากำลังดึงเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม เปรียบเทียบเป็นร้อยละที่อัตราส่วนเดียวกัน ในช่วงอายุบ่ม 7 วันแรก มีการพัฒนากำลังดึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วร้อยละ 64.5, 80.7 และ 68.0 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ หลังจากอายุบ่ม 7 วัน มีการพัฒนากำลังดึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ร้อยละ 7.56, 5.47 และ 11.55 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 4.17 ผลการทดสอบค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 1.106-2.815 เมกะพาสคัล และค่ากำลังดึงสูงสุด 2.815 เมกะพาสคัล ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุบ่ม 28 วัน ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกลดลงร้อยละ 16.9, 21.1 และ 29.0.2 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังดึงลดลงตามปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากอิทธิพลของเถ้าแกลบ มีข้อดีของการรับกำลังดึง ทั้งนี้มีค่ากำลังดึงตามมาตรฐาน ASTM C330-97 เช่นกัน และจากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกมีแนวโน้มการพัฒนากำลังดึงเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม เปรียบเทียบเป็นร้อยละที่อัตราส่วนเดียวกัน ในช่วงอายุบ่ม 7 วันแรก มีการพัฒนากำลังดึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วร้อยละ 87.3,

89.9 และ 95.2 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ หลังจากอายุบ่ม 7 วัน มีการพัฒนา กำลังดึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ร้อยละ 4.84, 7.48 และ 11.33 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ



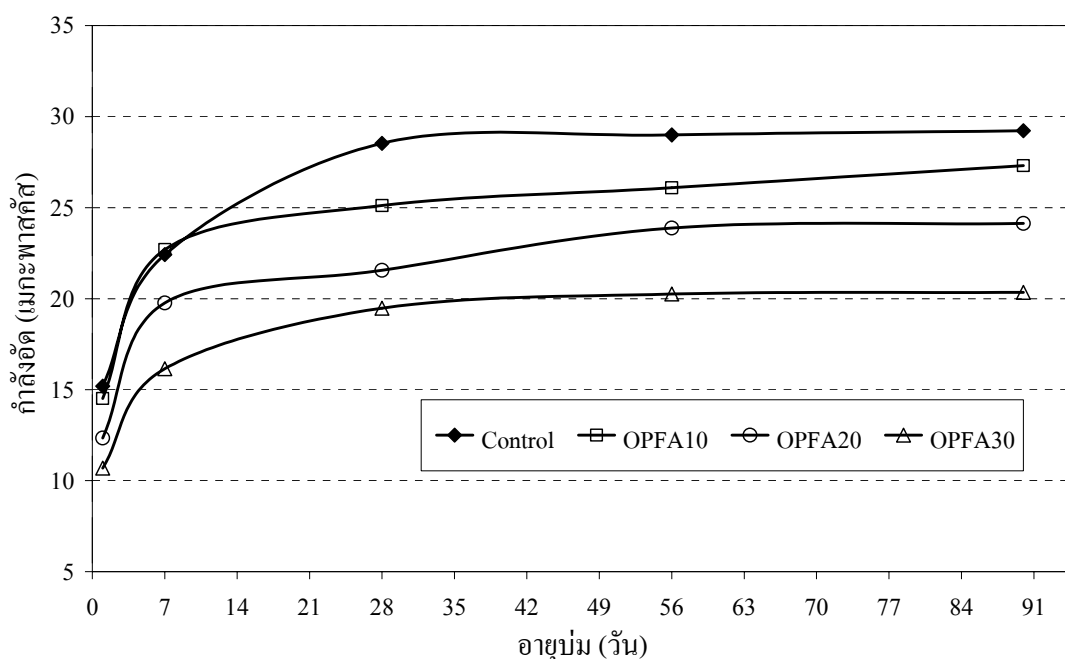
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ

4.2.7 กำลังอัด

จากผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 15.19-29.22 เมกะพาสคัล และค่ากำลังอัดสูงสุด 29.22 เมกะพาสคัล ที่อายุบ่ม 90 วัน ซึ่งค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม มีค่ากำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 330-97 อยู่ในเกณฑ์คอนกรีตมวลเบา สำหรับงาน โครงสร้าง (ค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่า 17.00 เมกะพาสคัล อายุบ่ม 28 วัน) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ ดนุพล และ อภิชาติ (2550) และมีค่ากำลังอัดสูงกว่างานวิจัยของ Manman and Ganapathy (2001) นอกจากนี้การพัฒนาด้านกำลังอัดจะสอดคล้องกับงานวิจัยดังกล่าว และค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มทุกอัตราส่วนและเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 30 ดังแสดงตามรูปที่ 4.18 และ 4.19

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมไยปาล์ม น้ำมันและเถ้าแกลบ

รหัส ตัวอย่าง	กำลังอัด (เมกะพาสคัล)				
	1 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	90 วัน
Control	15.19	22.42	28.54	28.99	29.22
OPFA10	14.52	22.69	25.12	26.09	27.30
OPFA20	12.34	19.77	21.56	23.89	24.13
OPFA30	10.69	16.14	19.47	20.25	20.34
RHA10	15.00	25.28	29.29	30.09	30.98
RHA20	12.64	21.72	25.51	25.78	26.62
RHA30	8.26	16.56	21.71	23.09	24.04



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมไยปาล์มน้ำมัน

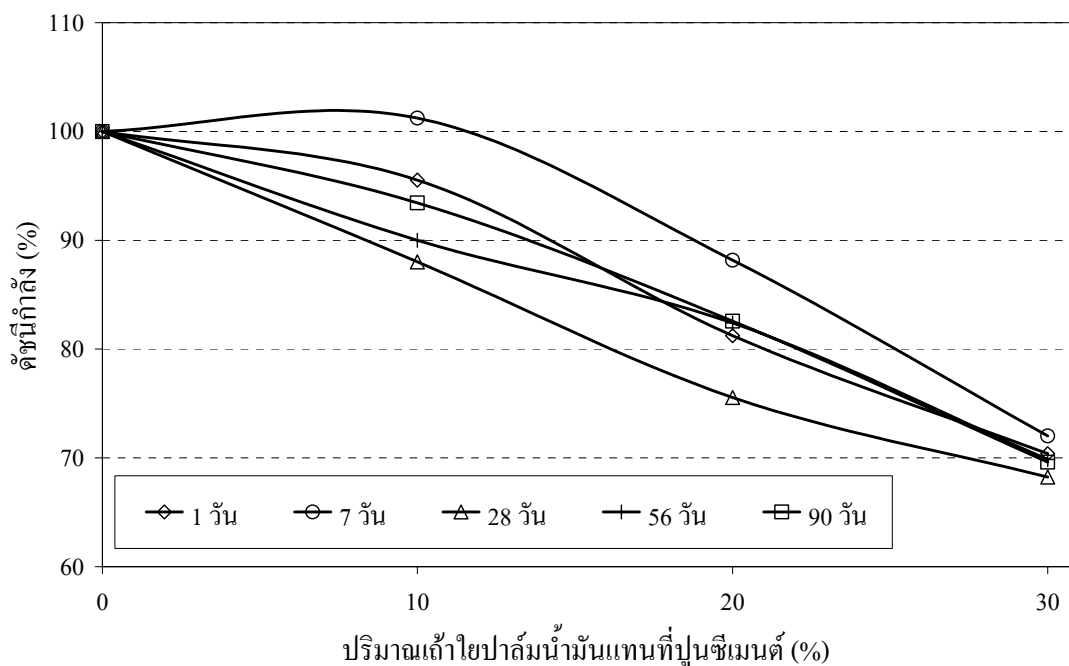
จากรูปที่ 4.18 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 10.69-27.30 เมกะพาสคัล และค่ากำลังอัดสูงสุด 27.30 เมกะพาสคัล ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 90

วัน เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดลดลงร้อยละ 12.0, 24.4 และ 31.8 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่ากำลังอัดลดลงร้อยละ 6.57, 17.4 และ 30.4 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังอัดลดลงตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากอิทธิพลของเถ้าปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 330-97 และจากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม เมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละที่อัตราส่วนเดียวกัน ในช่วงอายุบ่ม 28 วันแรก มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วร้อยละ 73.0, 74.7 และ 82.1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ หลังจากอายุบ่ม 28 วัน มีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ร้อยละ 8.71, 11.92 และ 4.46 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังอัด ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และดังแสดงตามรูปที่ 4.19 ที่อายุบ่ม 7 วัน ค่าดัชนีกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10 มีค่าดัชนีกำลังอัดสูงสุด เท่ากับร้อยละ 101.2 และทุกอัตราส่วนเกิดการพัฒนากำลังอัดสูงสุดเช่นกัน นอกจากนี้พิจารณาที่อายุบ่ม 28 วัน มีเพียงคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 30 ต่ำกว่าค่าดัชนีกำลังอัดร้อยละ 75 (ASTM C 618) ซึ่งค่ากำลังอัดยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 330-97

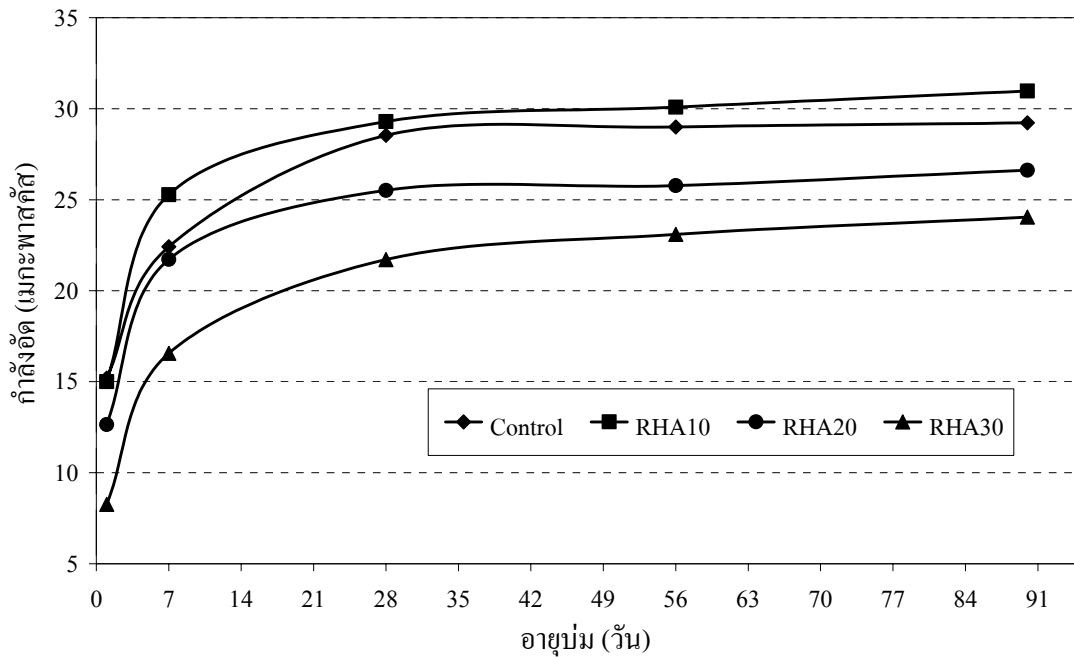
ตารางที่ 4.11 ค่าดัชนีกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและ
เถ้ากลบ

รหัสตัวอย่าง	ดัชนีกำลัง (%)			
	7 วัน	28 วัน	56 วัน	90 วัน
Control	100.0	100.0	100.0	100.0
OPFA10	101.2	88.0	90.0	93.4
OPFA20	88.2	75.6	82.7	82.6
OPFA30	72.0	68.2	69.9	69.6
RHA10	112.8	102.7	103.8	106.0
RHA20	96.9	89.4	88.9	91.1
RHA30	73.9	76.1	79.7	82.3



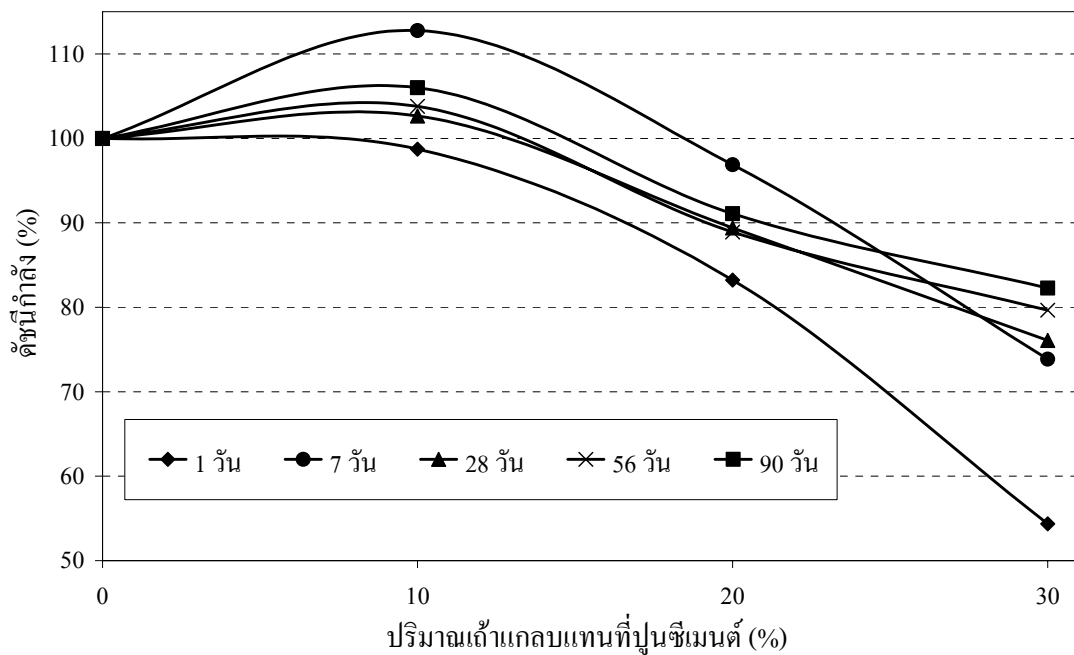
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่าดัชนีกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าไพล์น้ำมัน

จากรูปที่ 4.20 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าเคลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 8.26-30.98 เมกะพาสคัล และค่ากำลังอัดสูงสุด 30.98 เมกะพาสคัล ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 90 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับเป็นร้อยละกับคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.66 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และลดลงร้อยละ 10.60, 23.94 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.01 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และลดลงร้อยละ 8.93, 17.73 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเห็นว่าถ้าเคลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด และค่ากำลังอัดจะลดลงตามปริมาณเข้าเคลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 10 เนื่องจากอิทธิพลของเข้าเคลบ ทั้งนี้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าเคลบในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 330-97 และจากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม เมื่อเปรียบเทียบกับเป็นร้อยละที่อัตราส่วนเดียวกัน ในช่วงอายุบ่ม 28 วันแรก มีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วร้อยละ 95.3, 101.7 และ 162.8 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ หลังจากอายุบ่ม 28 วัน มีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ร้อยละ 5.75, 4.33 และ 10.76 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ

เมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังอัด ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และดังแสดงตามรูปที่ 4.21 ที่อายุบ่ม 7 วัน ค่าดัชนีกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 เกิดการพัฒนากำลังอัดสูงสุด มีค่าดัชนีกำลังอัดสูงสุด เท่ากับร้อยละ 112.8 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และเมื่อพิจารณาในอัตราส่วนร้อยละ 30 สังเกตเห็นว่าจะเริ่มมีการพัฒนากำลัง ตั้งแต่ 1, 7, 28, 56 และ 90 วัน เพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากปริมาณเถ้าแกลบที่มาก ทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานนานขึ้น นอกจากนี้พิจารณาที่อายุบ่ม 28 วัน ค่าดัชนีกำลังอัดคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบทุกอัตราส่วนสูงกว่าร้อยละ 75



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่าดัชนีกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ

4.3 องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

4.3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

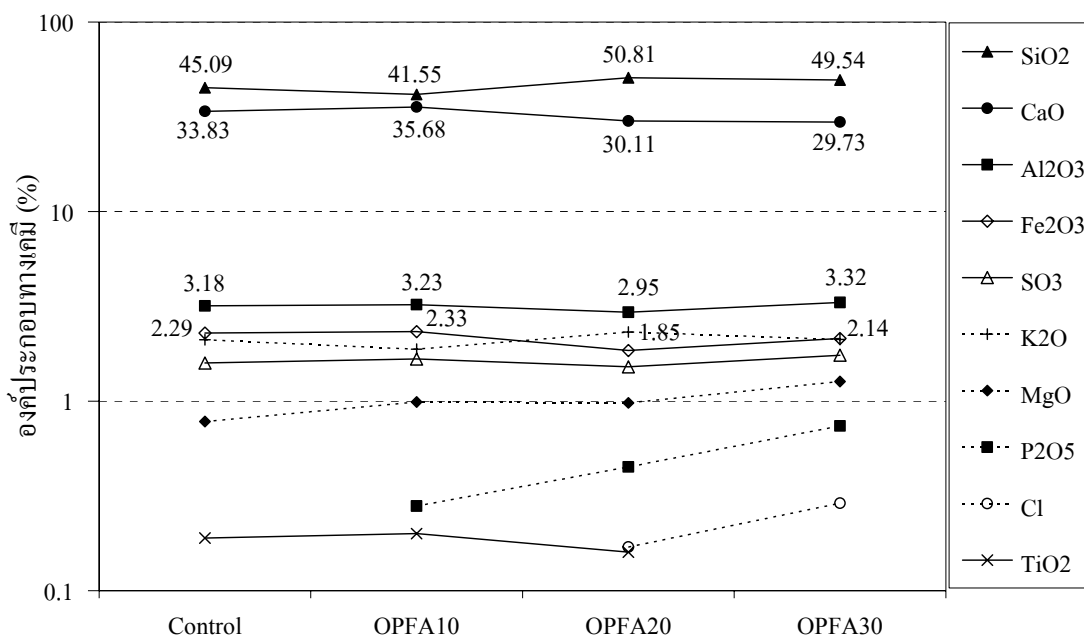
การตรวจองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) เป็นการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน (Control) คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน (OPFA10, OPFA20 และ OPFA30) ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 และคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ (RHA10, RHA20 และ RHA30) ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ (ตารางที่ 3.1) ที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งได้ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ดังนี้

ตารางที่ 4.12 ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมด้วย
ใยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ ที่อายุบ่ม 28 วัน

รหัสตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (%)										
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Cl	TiO ₂	SrO
Control	45.09	33.83	3.18	2.29	1.59	2.11	0.78	-	-	0.19	0.03
OPFA10	41.55	35.68	3.23	2.33	1.67	1.88	0.99	0.28	-	0.2	0.03
OPFA20	50.81	30.11	2.95	1.85	1.52	2.32	0.98	0.45	0.17	0.16	0.03
OPFA30	49.54	29.73	3.32	2.14	1.75	2.12	1.27	0.74	0.29	-	0.04
RHA10	46.69	34.29	3.10	2.17	1.54	1.90	0.87	-	-	-	0.04
RHA20	52.67	28.75	3.30	1.70	1.46	1.43	0.83	-	-	-	0.02
RHA30	57.27	23.09	3.09	1.77	1.39	1.04	0.71	-	-	0.15	0.02

หมายเหตุ : - ไม่ปรากฏ

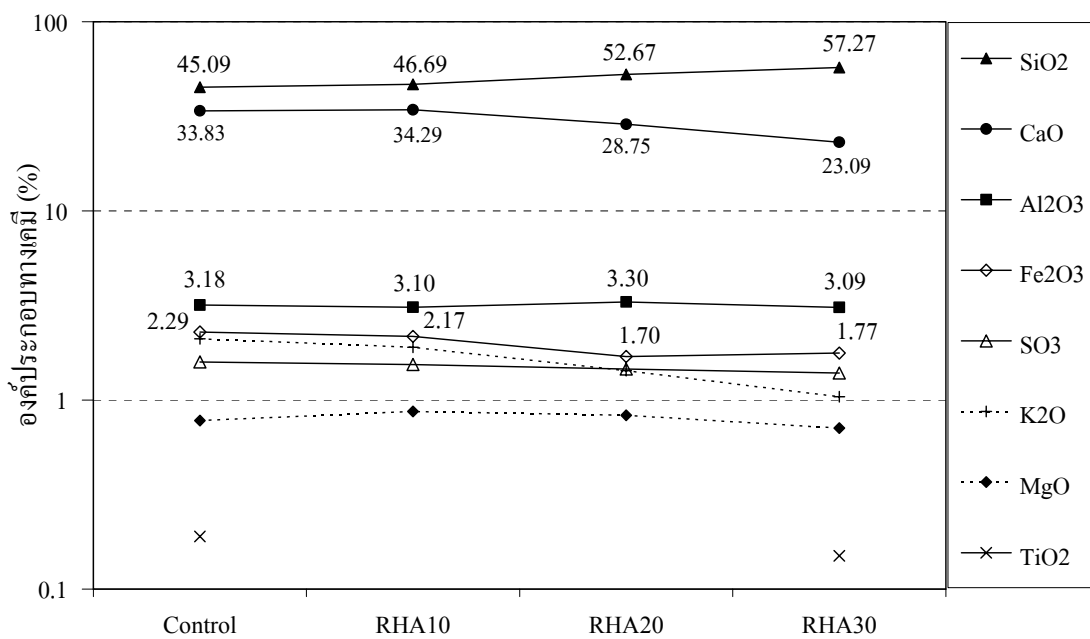
องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันประกอบด้วย สารประกอบ SiO₂ = 45.09 %, CaO = 33.83 %, Al₂O₃ = 3.18 %, Fe₂O₃ = 2.29 %, SO₃ = 1.59 %, K₂O = 2.11 %, MgO = 0.78 %, TiO₂ = 0.19 %, SrO = 0.03 % และ Rb = 0.02 % จะเห็นได้ว่า ปริมาณสารประกอบหลักคือ SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากองค์ประกอบ ทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประกอบด้วย SiO₂ = 21.85 %, Al₂O₃ = 5.39 %, Fe₂O₃ = 2.10 % และ CaO = 65.91 % ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้เกิด SiO₂ เพิ่มขึ้น กอปรกับมี ทรายปะปน และ CaO ลดต่ำลง ซึ่ง CaO นี้เป็นสารประกอบที่ทำให้เกิดแร่อื่นๆ ขึ้นมา เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide (CH = Ca(OH)₂)), แคลไซต์ (Calcite (Cal = Ca (CO₃))), แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate (CSH = Ca_{1.5}SiO_{3.5}•xH₂O)) และ แอ ตริงไทต์ (Ettringite (Ett = Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂•26H₂O)) ซึ่งแร่เหล่านี้ล้วนเกิดขึ้นทุกขบวนการภายหลัง ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพที่ดีและพัฒนากำลังให้สูงขึ้น



รูปที่ 4.22 องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 ที่อายุป่ม 28 วัน

องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน ดังแสดงตามรูปที่ 4.22 ประกอบด้วยสารประกอบ SiO₂ = 41.55 – 50.81 %, CaO = 29.711 – 35.68 %, Al₂O₃ = 2.95 – 3.32 %, Fe₂O₃ = 1.85 – 2.33 %, SO₃ = 1.52 – 1.75 %, K₂O = 1.88 – 2.32 %, MgO = 0.99 – 1.27 %, P₂O₅ = 0.28 – 0.74 %, TiO₂ = 0.16 – 0.20 %, SrO = 0.03 – 0.04 % และ Rb = 0.02 – 0.03 % จะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน คือสารประกอบ SiO₂, CaO และ P₂O₅ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วย SiO₂ = 38.21 %, CaO = 10.53 %, Al₂O₃ = 0.87 % และ Fe₂O₃ = 1.71 % แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน กอปรกับปริมาณน้ำที่ใช้แตกต่างกัน ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบหลัก SiO₂ ลดลงร้อยละ 7.85 และเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.69 และ 9.87 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ และสารประกอบ CaO เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.47 และลดลงร้อยละ 11.00 และ 12.12 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่ง CaO นี้เป็นสารประกอบที่ทำให้เกิดแร่อื่นๆ ขึ้น เช่น แร่ CH, Cal, CSH และ Ett ซึ่งแร่เหล่านี้ช่วยทำให้คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันมีการหดตัว ความหนาแน่นรวม ลดลง นอกจากนี้ปรากฏ P₂O₅ ที่ทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้า เนื่องจาก C₃S สลายตัวเป็น C₂S กับ CaO

ส่งผลให้คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันไม่สามารถจับยึดคลอไรด์ได้ ส่วนสารประกอบอื่นๆ มีการปรับลดหรือเพิ่มบ้างเล็กน้อยตามอัตราส่วนเช่น Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 และ MgO และสารประกอบที่ปรากฏนั้นไม่สามารถบ่งบอกถึงการพัฒนาต้านกำลัังอัดเนื่องจากสมบัติของเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เพิ่มขึ้นทำให้กำลัังอัดลดลง



รูปที่ 4.23 องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 ที่อายุบ่ม 28 วัน

องค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ดังแสดงตามรูปที่ 4.23 ประกอบด้วยสารประกอบ $SiO_2 = 46.69 - 57.27\%$, $CaO = 23.09 - 34.29\%$, $Al_2O_3 = 3.09 - 3.30\%$, $Fe_2O_3 = 1.77 - 2.17\%$, $SO_3 = 1.39 - 1.54\%$, $K_2O = 1.04 - 1.90\%$, $MgO = 0.71 - 0.87\%$, $TiO_2 = 0.15\%$, $SrO = 0.02 - 0.04\%$ และ $Rb = 0.02 - 0.03\%$ จะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน คือ สารประกอบ SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 และ K_2O เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ ประกอบด้วยธาตุ $SiO_2 = 63.55\%$, $CaO = 0.58\%$, $Fe_2O_3 = 0.09\%$, และ $K_2O = 2.36\%$ แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ก่อปรกับปริมาณน้ำที่ใช้แตกต่างกัน ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบหลัก SiO_2 เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.55, 16.81 และ 27.01 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ และ

สารประกอบ CaO เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.36 และลดลงร้อยละ 15.02 และ 31.75 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่ง CaO นี้เป็นสารประกอบที่ทำให้เกิดแร่อื่นๆ ขึ้น เช่น แร่ CH, CSH และ Ett ซึ่งแร่เหล่านี้ช่วยทำให้คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบมีการหดตัว ความหนาแน่นรวม การซึมผ่านของคลอไรด์ ลดลง นอกจากนี้สารประกอบ K_2O พบว่าสามารถจับยึดคลอไรด์ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gastaldini, et al. (2007) ที่ใช้เถ้าแกลบและเพิ่มสารกระตุ้นคือ K_2O ส่วนสารประกอบอื่นๆ มีการปรับลดหรือเพิ่มบ้างเล็กน้อยตามอัตราส่วนเช่น Al_2O_3 , SO_3 และ MgO และสารประกอบที่ปรากฏนี้มีเพียงคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 พัฒนาด้านกำลังอัดดีที่สุด เนื่องจากอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่น ปริมาณเถ้าแกลบ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 30 นั้นไม่สามารถบอกถึงการพัฒนาด้านกำลังอัดเนื่องจากสมบัติของเถ้าแกลบ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดลดลง

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ชนิดแร่

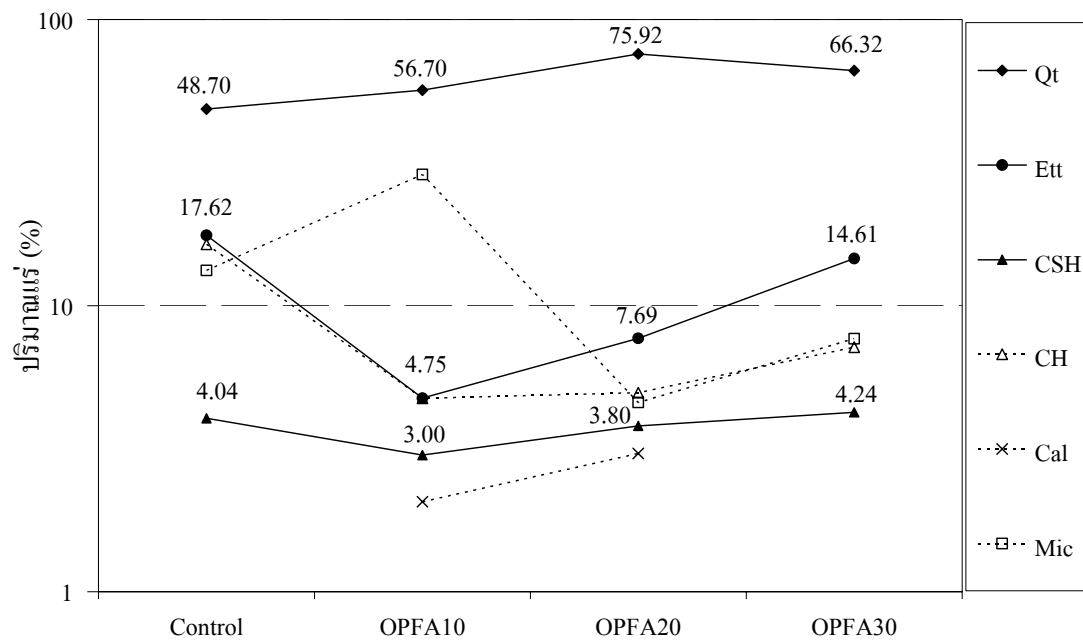
การตรวจชนิดแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เป็นการตรวจชนิดแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 และคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ (ตารางที่ 3.1) ที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งได้ผลการตรวจชนิดแร่ด้วยวิธี XRD ดังแสดงในตารางที่ 4.13 ดังนี้

จากผลการตรวจชนิดแร่ด้วยวิธี XRD ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ดังแสดงในรูปที่ 4.24 นั้น จะเห็นว่าองค์ประกอบแร่มีการเปลี่ยนแปลง โดยแร่ Qt, Ett, CSH และ CH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าไยปาล์มน้ำมัน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน จากธาตุหลักๆ ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์และเถ้าไยปาล์มน้ำมัน คือ สารประกอบ CaO, SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 กอปรกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าไยปาล์มน้ำมัน พบว่าแร่เหล่านี้ มีการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ค่อนข้างสมบูรณ์แล้ว ซึ่งแร่ CSH และ Ett ไม่สามารถยึดเกาะระหว่างอนุภาคและเชื่อมประสานกันได้ เนื่องจากใช้ปริมาณน้ำที่มาก ทำให้เกิดโพรงรูเล็ก (Capillary Pore) และโพรงอากาศ มีผลต่อการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้น ความหนาแน่นรวม และการหดตัวลดลง ความสามารถในการรับกำลังอัดและกำลังดึงก็ลดลงตามปริมาณของเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 4.13 ผลการตรวจชนิดแร่ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าใยปาล์มน้ำมัน และเส้นใย ที่อายุบ่ม 28 วัน

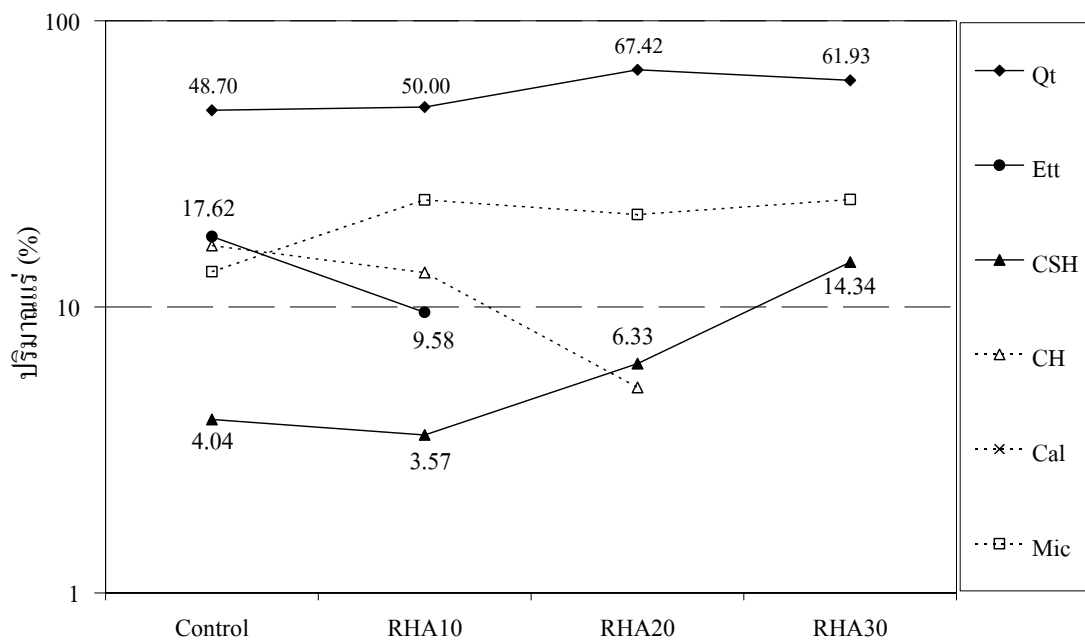
รหัสตัวอย่าง	ปริมาณแร่ (%)					
	Qt	Ett	CSH	CH	Cal	Mic
Control	48.70	17.62	4.04	16.37	-	13.27
OPFA10	56.70	4.74	3.00	4.74	2.06	28.74
OPFA20	75.92	7.69	3.80	4.96	3.04	4.58
OPFA30	66.32	14.61	4.24	7.16	-	7.67
RHA10	50.00	9.58	3.57	13.18	-	23.67
RHA20	67.42	-	6.33	5.23	-	21.02
RHA30	61.93	-	14.34	-	-	23.73

หมายเหตุ : - ไม่ปรากฏ



รูปที่ 4.24 แสดงผลปริมาณแร่ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและที่ผสมเข้าใยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 ที่อายุบ่ม 28 วัน

จากผลการตรวจชนิดแร่ด้วยวิธี XRD ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ดังแสดงในรูปที่ 4.25 นั้น จะเห็นได้ว่า องค์ประกอบแร่มีการเปลี่ยนแปลง โดยแร่ Qt และ CSH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าไย ปาล์ม น้ำมัน แร่ Et จะปรากฏในอัตราส่วนร้อยละ 10 และแร่ CH จะปรากฏในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน จากธาตุหลักๆ ที่มีอยู่ใน ปูนซีเมนต์และเถ้าไยปาล์ม น้ำมัน คือ สารประกอบ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 กอปรกับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าแกลบ พบว่าแร่เหล่านี้ ปริมาณ เถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 10 เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ที่สุด ซึ่งแร่ CSH และ Et สามารถยึดเกาะ ระหว่างอนุภาคและเชื่อมแน่นกันได้ดี กอปรกับปริมาณน้ำที่เหมาะสม ทำให้ความสามารถในการ รับกำลังอัดดีที่สุด ส่วนปริมาณเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 30 พบว่ามีปริมาณแร่มีการ ทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ค่อนข้างสมบูรณ์แล้วเช่นกัน ซึ่งแร่ CSH และ Et ไม่สามารถยึดเกาะระหว่าง อนุภาคและเชื่อมประสานกันได้ เนื่องจากใช้ปริมาณน้ำที่มาก ทำให้เกิดโพรงรูเล็ก (Capillary Pore) และโพรงอากาศ มีผลต่อการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้น ความหนาแน่นรวมและการหดตัวลดลง ความสามารถในการรับกำลังอัดและกำลังดึงก็ลดลงเช่นกันตามปริมาณของเถ้าแกลบ

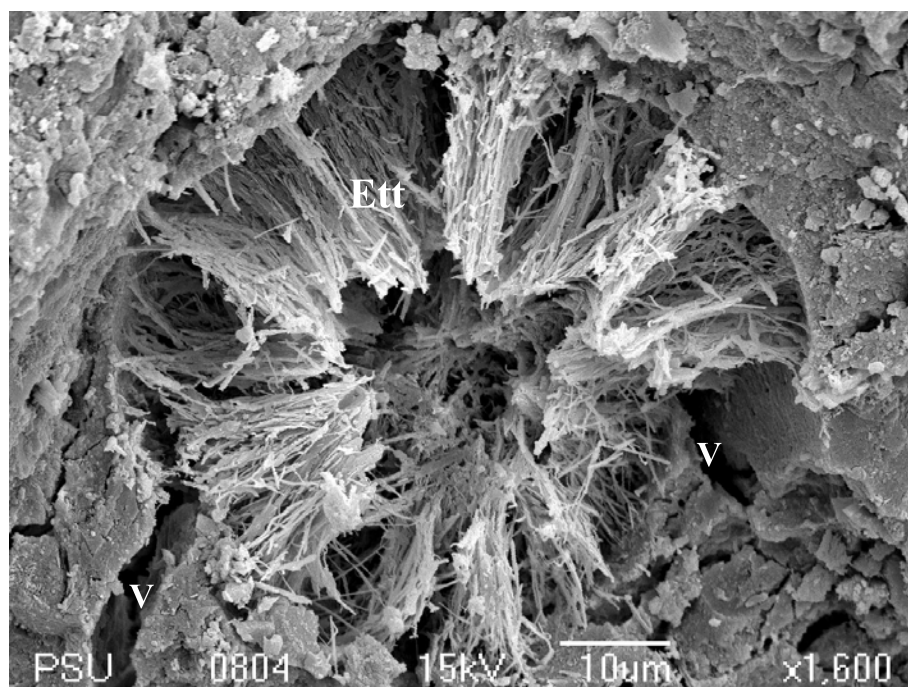


รูปที่ 4.25 แสดงผลปริมาณแร่ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันและที่ผสมเถ้าแกลบ ใน อัตราส่วนร้อยละ 10-30 ที่อายุป่ม 28 วัน

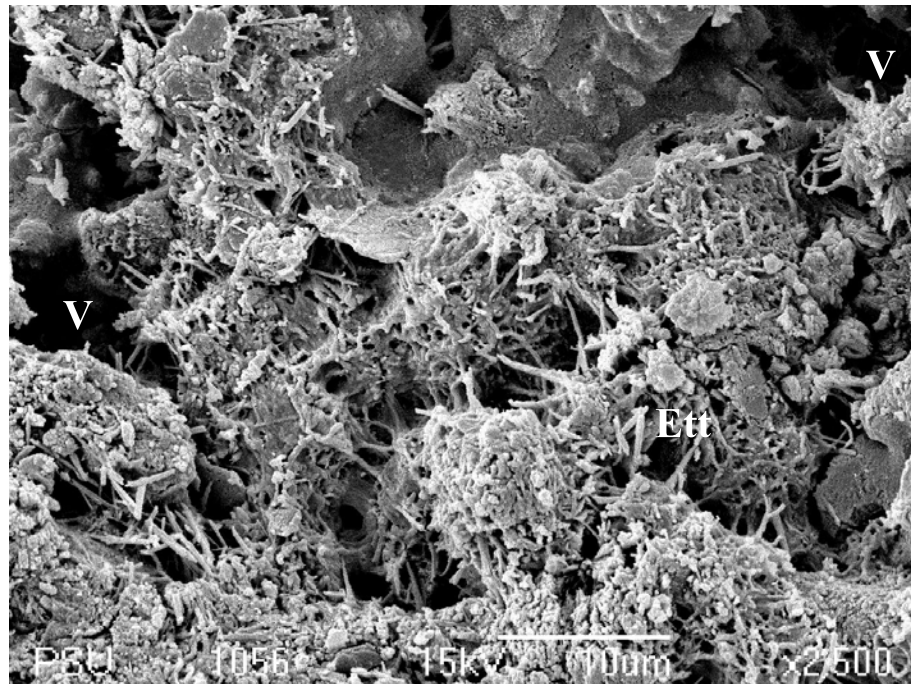
จากการศึกษาปริมาณแร่ ในคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล์น้ำมัน และ คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าไพล์น้ำมันและเถ้าแกลบ พบว่าองค์ประกอบแร่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแร่ CSH และ Et ที่พบไม่สามารถยืนยันการพัฒนากำลังอัดได้ เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ กับบ่งบอกถึงผลต่อความหนาแน่นรวม การหดตัวที่ลดลง และการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้น

4.3.3 ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาค

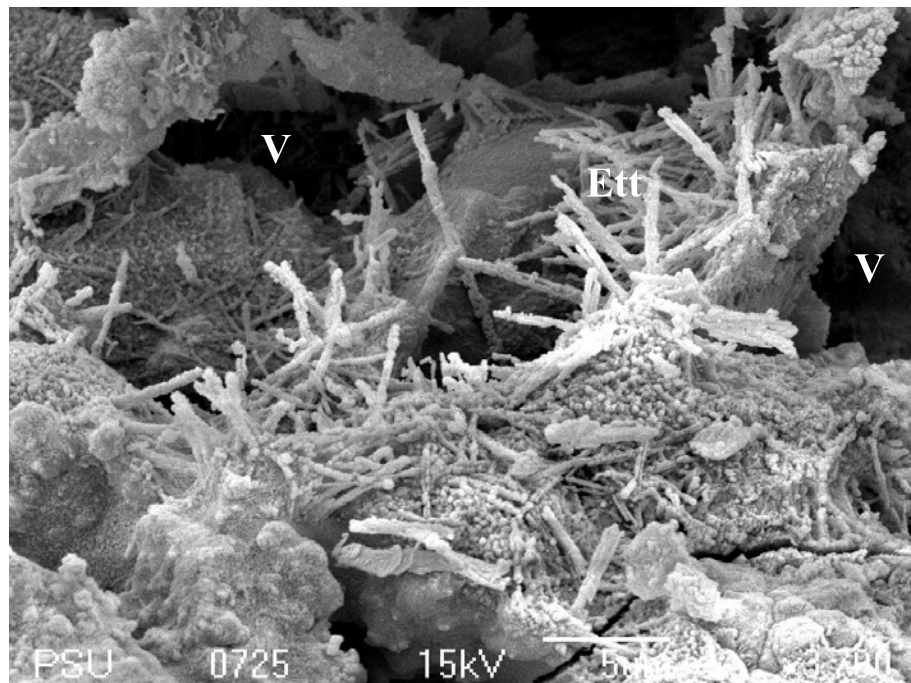
การตรวจโครงสร้างจุลภาคโดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการตรวจโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน (รูปที่ 4.26) คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล์น้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 (รูปที่ 4.27 - 4.29) และคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล์น้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 (รูปที่ 4.30 - 4.32) ที่อายุบ่ม 90 วัน ซึ่งได้ผลการตรวจดังนี้



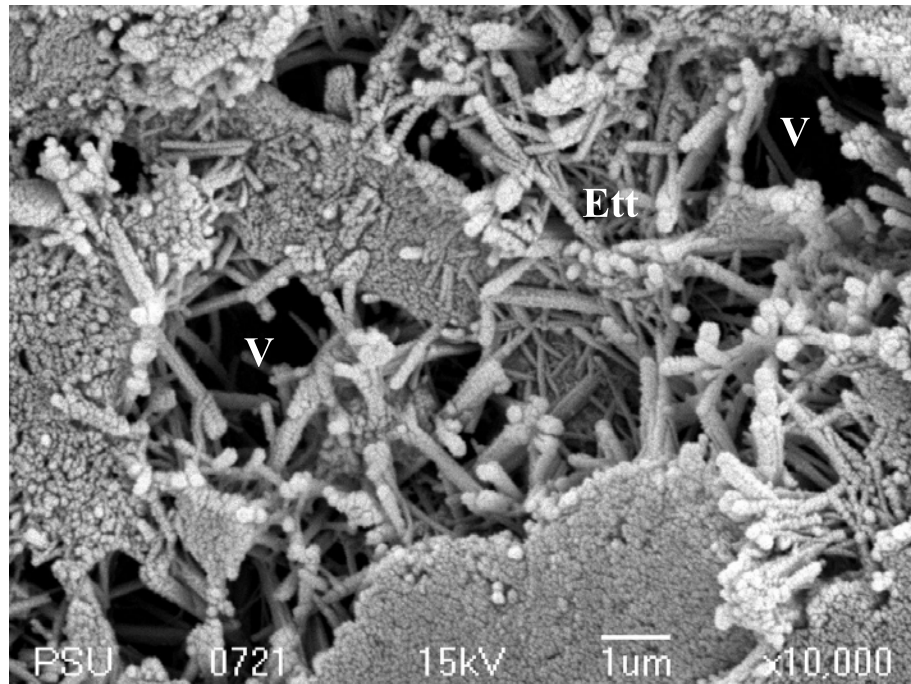
รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ขยาย 1,600 เท่า ที่อายุบ่ม 90 วัน



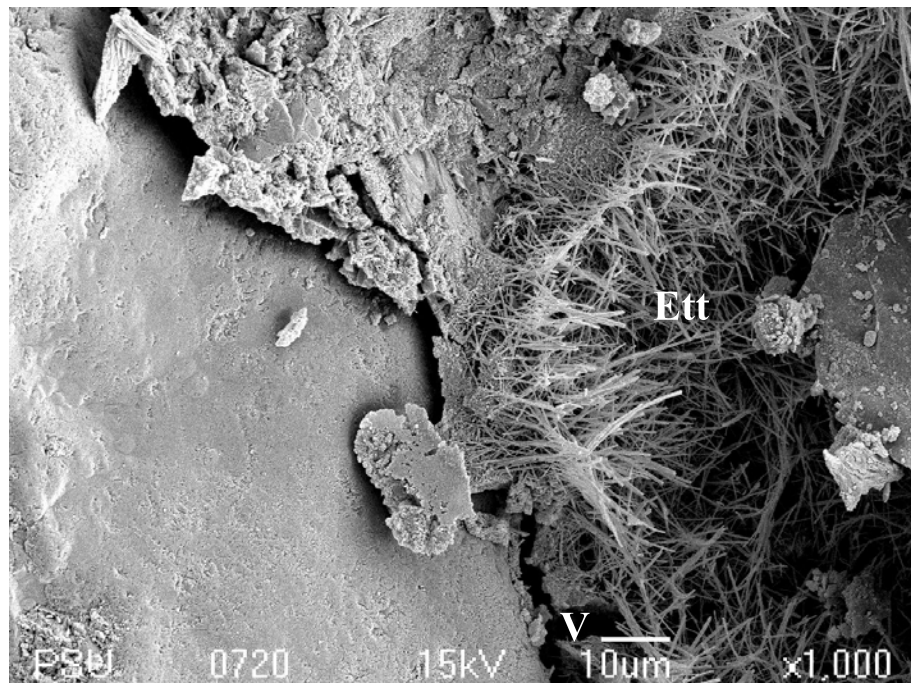
รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไฮปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10 ขยาย 2,500 เท่า ที่อายุบ่ม 90 วัน



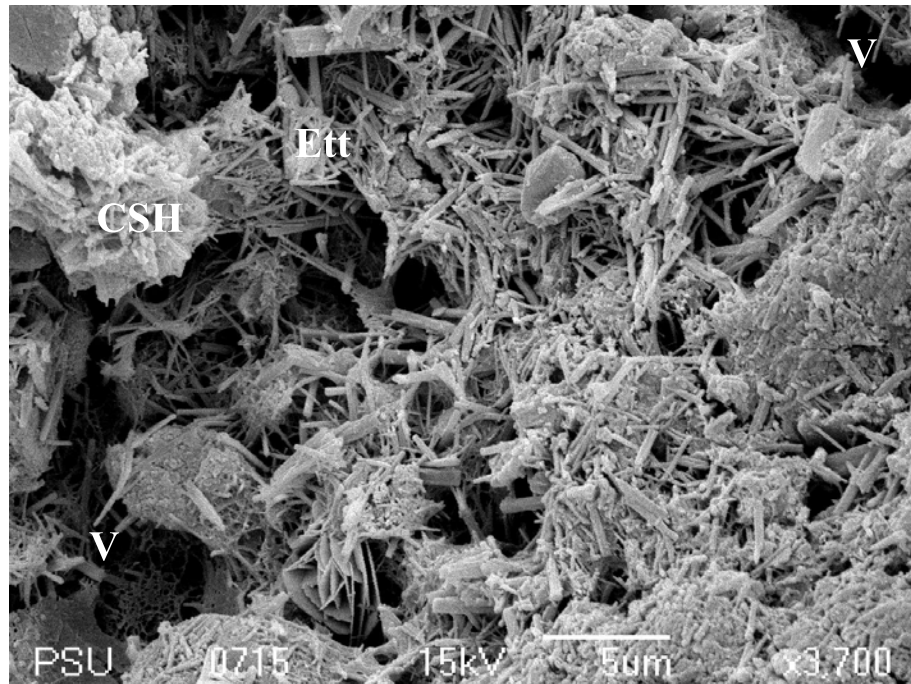
รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไฮปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 20 ขยาย 3,700 เท่า ที่อายุบ่ม 90 วัน



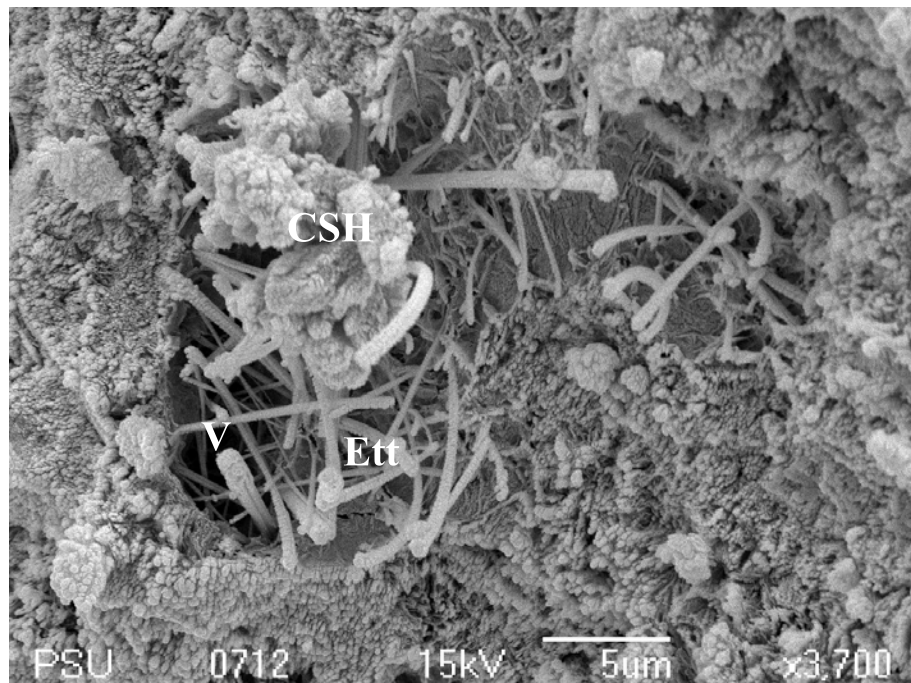
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไฮปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 30 ขยาย 10,000 เท่า ที่อายุบ่ม 90 วัน



รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ขยาย 1,000 เท่า ที่อายุบ่ม 90 วัน



รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ขยาย 3,700 เท่า ที่อายุปม 90 วัน



รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายจุลภาค SEM ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 30 ขยาย 3,700 เท่า ที่อายุปม 90 วัน

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ดังแสดงตามรูปที่ 4.26 ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณแร่ ควอตซ์, แอตริงไคต์, แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โครงสร้างโดยทั่วไปจะมีลักษณะเนื้อแน่น จะเห็นแร่ แอตริงไคต์ ที่เด่นชัด มีลักษณะเป็นหนามแหลมช่วยยึดโครงสร้างซีเมนต์กับกะลาปาล์มเข้าด้วยกันช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ดังแสดงตามรูปที่ 4.27- 4.29 ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณแร่ ควอตซ์, แอตริงไคต์, แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โครงสร้างโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นโพรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้เพิ่มขึ้น จะเห็นแร่ Et₂ ที่เด่นชัด มีลักษณะเป็นหนามแหลมที่ยึดระหว่างกันเองบางส่วน และยึดเกาะระหว่างวัสดุประสานกับกะลาปาล์มน้ำมัน เนื่องจากเป็นโพรง และพบว่าแอตริงไคต์มีขนาดเล็กลงตามอายุการบ่มและปริมาณของเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน สังเกตว่าต้องใช้อำนาจขยายโครงสร้างจุลภาคที่สูงขึ้น ส่วนปริมาณแร่ CSH จะไม่เด่นชัดเนื่องจากมีปริมาณร่น้อย

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ดังแสดงตามรูปที่ 4.30 - 4.32 ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณแร่ ควอตซ์, แอตริงไคต์, แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 10 มีลักษณะเนื้อแน่นและมีโพรงเล็กน้อย จะเห็นแร่แอตริงไคต์ที่เด่นชัด มีลักษณะเป็นรูปเข็มช่วยยึดโครงสร้างวัสดุประสานกับกะลาปาล์มเข้าด้วยกันช่วยเพิ่มกำลัง และพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 30 มีลักษณะเป็นโพรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าแกลบเนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้เพิ่มขึ้น จะเห็นแร่แอตริงไคต์ที่เด่นชัด มีลักษณะเป็นรูปเข็มเล็กน้อยและลดลง ตามอายุการบ่มและปริมาณของเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน ส่วนปริมาณแร่ CSH จะพบบางส่วน

4.4 การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยสหสัมพันธ์ในรูปสหสัมพันธ์พหุคูณ

จากผลการทดสอบที่ได้นำมาสร้างสมการความสัมพันธ์โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ไม่ผสมเถ้า คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้า ใยปาล์มน้ำมัน (ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30) และคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ (ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30) ทำการหาสมการความสัมพันธ์ของค่าสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ การวิเคราะห์ใช้โปรแกรม SPSS (Statistical Package for Social Science) ซึ่งค่าความน่าเชื่อถือของสมการถดถอยจะแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุคูณ (Multiple Coefficient of Determination - R^2) โดยค่าของตัวแปรประกอบด้วย

- 1) กำลังอัด (เมกะพาสคัล), F_c
- 2) กำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมวัสดุปอชโซลาน (เมกะพาสคัล), F
- 3) กำลังดึง (เมกะพาสคัล), F_T
- 4) ความหนาแน่นรวมที่อายุบ่ม 1 วัน (กก./ลบ.ม.), ρ
- 5) ความหนาแน่นรวม (กก./ลบ.ม.), ρ_m
- 6) ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (กม./วินาที), V_p
- 7) การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ), w
- 8) ปริมาณเถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก), A
- 9) อายุบ่ม (วัน), T
- 10) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, W/B

สำหรับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรทำการจำแนกค่า R^2 แนะนำโดย Draper and Smith (1996) คือ

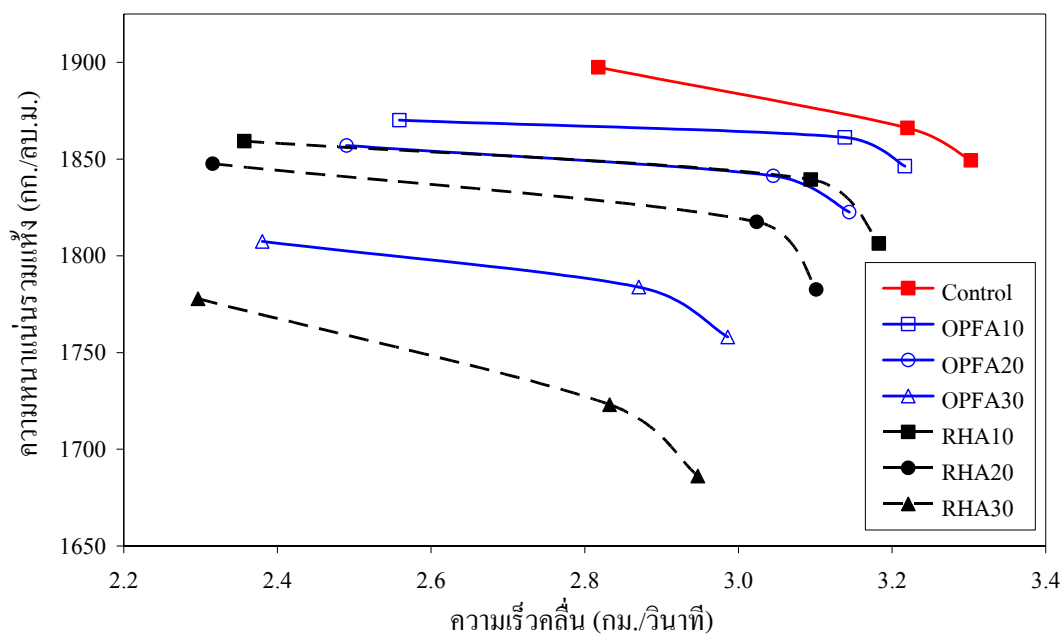
$R^2 < 0.25$	ค่าตัวแปรมีความสัมพันธ์น้อย
$R^2 = 0.25 - 0.55$	ค่าตัวแปรมีความสัมพันธ์พอใช้
$R^2 = 0.55 - 0.80$	ค่าตัวแปรมีความสัมพันธ์ดี
$R^2 > 0.80$	ค่าตัวแปรมีความสัมพันธ์ดีมาก

และทำการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พีเพอร์สัน (Pearson Correlation) ซึ่งได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก และผลจากการหาสมการความสัมพันธ์ของค่าสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

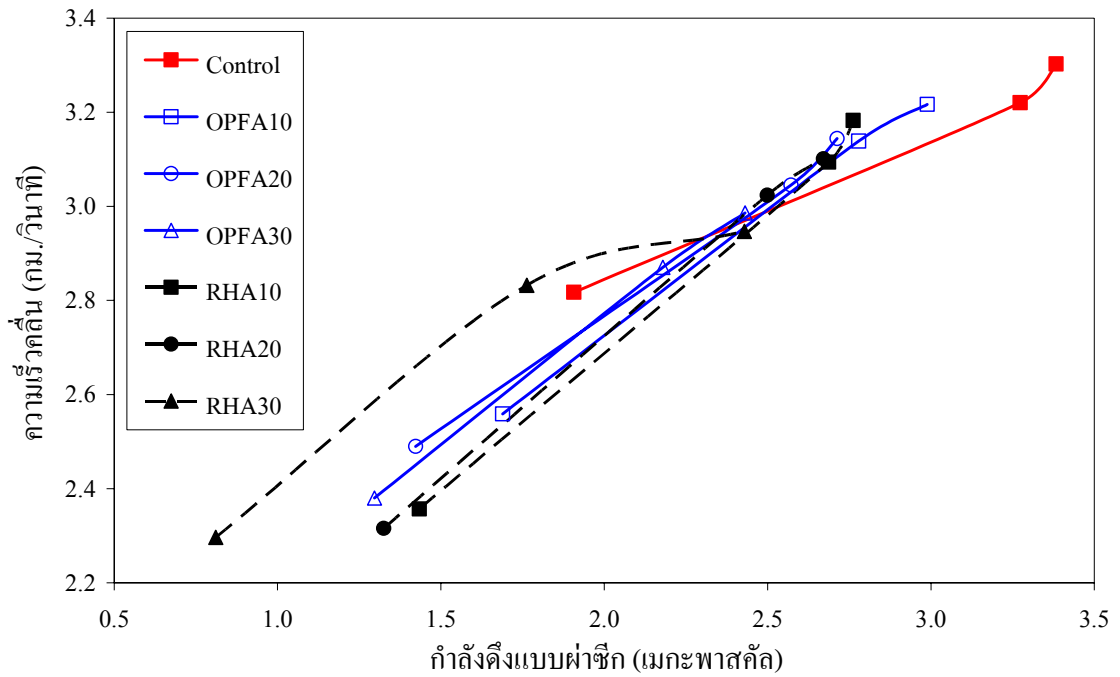
4.4.1 คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 4.14 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

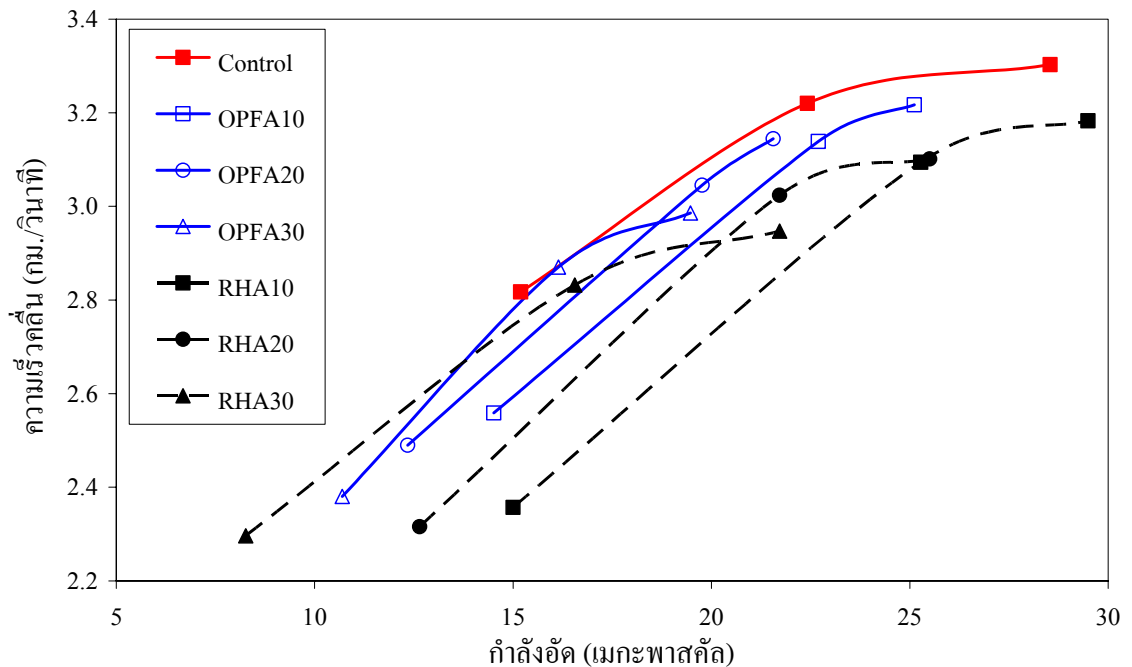
อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบสมการ	จำนวนข้อมูล
1-90	$F_c = 15.892+0.885(T)-0.0175(T)^2+0.000104(T)^3$	0.975	Cubic	15
1-28	$F_c = 15.194+1.217(T)-0.0264(T)^2$	0.992	Cubic	9
	$F_c = 216.8-72.314(V_p)^2+16.651(V_p)^3$	0.941	Cubic	18
	$F_c = -23.226+0.240(T)+13.644(V_p)$	0.992	Linear	18
	$F_c = 182.9+0.430(T)-0.0886(\rho)$	0.888	Linear	18
	$F_c = -78.175+0.223(T)-0.0274(\rho)+14.880(V_p)$	0.993	Linear	27



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล์น้ำมันและเถ้าเคลือบ



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกกับค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าไปปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเข้าไปปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ

ตารางที่ 4.15 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังดึง กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม
น้ำมัน

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบ สมการ	จำนวน ข้อมูล
1-28	$F_T = 1.907+0.243(T)-0.00680(T)^2$	0.996	Cubic	9
	$F_T = -3.371+0.392(F_C)-0.00019(F_C)^3$	0.990	Cubic	18
	$F_T = -31.844+15.485(V_p)-0.441(V_p)^3$	0.997	Cubic	18
	$F_T = -7.955-0.00794(T)+3.502(V_p)$	0.994	Linear	18
	$F_T = -6.847-0.0194(T)+2.851(V_p)+0.0477(F_C)$	0.994	Linear	27
	$F_T = 15.687-0.0546(T)-0.00912(\rho)+0.222(F_C)$	0.990	Linear	27
	$F_T = -3.443-0.0066(T)-0.00225(\rho)+3.401(V_p)$	0.994	Linear	27
	$F_T = 3.953-0.0277(T)-0.00484(\rho)+1.993(V_p)$ $+0.0946(F_C)$	0.997	Linear	36

ตารางที่ 4.16 สมการความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นรวม กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวม
กะลาปาล์มน้ำมัน

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบ สมการ	จำนวน ข้อมูล
1-90	$\rho_m = 1872.5-2.544(F_C)+0.129(F_C)^2$	0.850	Quadratic	30
	$\rho_m = 787.5+0.0677(T)+0.549(\rho)+2.990(F_C)$	0.908	Linear	45
1-28	$\rho_m = 1829.5-3.045(T)+0.176(\rho)-193.6(V_p)$ $+16.400(F_C)$	0.925	Linear	36
	$\rho_m = 501.9+0.638(T)+0.708(\rho)+16.548(F_T)$	0.802	Linear	27

3.4.2 คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 4.17 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบสมการ	จำนวนข้อมูล
1-90	$F_C = 15.935+0.734(T)-0.0155(T)^2+0.0001(T)^3$	0.865	Cubic	30
	$F_C = e^{3.919-18.700/(F)}$	0.973	S-curve	30
	$F_C = -79.008-0.0189(T)+0.0452(\rho)+0.770(F)$	0.935	Linear	45
1-28	$F_C = 14.517+1.431(T)-0.0376(T)^2$	0.989	Cubic	18
	$F_C = e^{0.604+0.809(V_p)}$	0.986	Growth	18
	$F_C = -19.397+0.0668(T)+13.257(V_p)$	0.987	Linear	18
	$F_C = -113.0+0.0456(T)+0.0517(\rho)+12.890(V_p)$	0.993	Linear	27
	$F_C = -98.34+0.0445(\rho)+11.235(V_p)+0.186(F)$	0.993	Linear	36

ตารางที่ 4.18 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 20

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบสมการ	จำนวนข้อมูล
1-90	$F_C = 13.792+0.586(T)-0.0110(T)^2+0.0001(T)^3$	0.844	Cubic	30
	$F_C = e^{3.839-19.952/(F)}$	0.949	S-curve	30
	$F_C = -60.589+0.00419(T)+0.0345(\rho)+0.698(F)$	0.938	Linear	45
1-28	$F_C = 12.344+1.109(T)-0.00099(T)^3$	0.972	Cubic	18
	$F_C = 33.853-16.625(V_p)+1.289(V_p)^3$	0.975	Cubic	18
	$F_C = -20.070+0.0247(T)+13.021(V_p)$	0.971	Linear	18
	$F_C = -80.587+0.0296(T)+0.0335(\rho)+12.724(V_p)$	0.989	Linear	27
	$F_C = -78.897+0.0330(\rho)+11.768(V_p)+0.107(F)$	0.988	Linear	36

ตารางที่ 4.19 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบสมการ	จำนวนข้อมูล
1-90	$F_C = 11.425 + 0.578(T) - 0.01135(T)^2 + 0.00007(T)^3$	0.931	Cubic	30
	$F_C = e^{3.687 - 20.048/(F)}$	0.980	S-curve	30
	$F_C = -78.807 - 0.00846(T) + 0.0437(\rho) + 0.691(F)$	0.988	Linear	45
1-28	$F_C = 10.694 + 0.810(T) - 0.00063(T)^3$	0.964	Cubic	18
	$F_C = 89.612 - 49.885(V_p) + 2.954(V_p)^3$	0.931	Cubic	18
	$F_C = -11.297 + 0.112(T) + 9.262(V_p)$	0.951	Linear	18
	$F_C = -118.470 + 0.105(T) + 0.0582(\rho) + 9.898(V_p)$	0.994	Linear	27
	$F_C = -98.34 + 0.0445(\rho) + 11.235(V_p) + 0.186(F)$	0.993	Linear	36

ตารางที่ 4.20 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบสมการ	จำนวนข้อมูล
1-90	$F_C = 14.261 + 0.696(T) - 0.01384(T)^2 + 0.00008(T)^3$	0.634	Cubic	120
	$F_C = e^{3.879 - 19.848/(F)}$	0.739	S-curve	120
	$F_C = 38.234 + 0.106(T) - 0.165(A) - 38.053(W/B)$	0.692	Linear	180
	$F_C = 9.238 + 0.105(T) - 0.241(A) - 0.00652(\rho)$	0.690	Linear	180
	$F_C = 5.434 + 0.00525(T) - 0.253(A) + 0.788(F)$	0.955	Linear	180
1-28	$F_C = 8.612(F_T)^{0.913}$	0.945	Power	72
	$F_C = 94.472 - 71.563(V_p) + 15.476(V_p)^2$	0.939	Quadratic	72
	$F_C = 5.666 + 0.120(T) - 0.0686(A) + 5.445(F_T)$	0.953	Linear	108
	$F_C = -14.206 + 0.127(T) - 0.0935(A) + 11.315(V_p)$	0.931	Linear	108

ตารางที่ 4.21 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังดึง กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันผสมเถาใยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบสมการ	จำนวนข้อมูล
1-28	$F_T = 1.579+0.198(T)-0.00542(T)^2$	0.731	Quadratic	36
	$F_T = e^{1.817-17.386(F_c)}$	0.946	S-curve	72
	$F_T = 0.117e^{1.015(V_p)}$	0.982	Exponential	72
	$F_T = -3.777-0.00403(A)+2.124(V_p)$	0.958	Linear	108
	$F_T = 3.201-0.00877(T)-0.00187(\rho)+0.143(F_c)$	0.927	Linear	144
	$F_T = -2.830-0.00541(T)+1.448(V_p)+0.0544(F_c)$	0.971	Linear	144
	$F_T = -283-0.00336(A)-0.00886(T)+0.143(F_c)$	0.925	Linear	144

ตารางที่ 4.22 สมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันผสมเถาใยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบสมการ	จำนวนข้อมูล
1-90	$W/B = 0.446+0.00227(A)-0.0001(F_c)$	0.918	Linear	180
	$W/B = 0.476-0.00225(A)-0.00002(\rho)-0.00008(F_c)$	0.916	Linear	240
1-28	$W/B = 0.151+0.00260(A)+0.00016(\rho)+0.00037(F_T)$	0.919	Linear	144
	$W/B = 0.444+0.00229(A)+0.01264(F_T)-0.00165(F_c)$	0.921	Linear	144

ตารางที่ 4.23 สมการความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นรวม กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันผสมเถาใยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบสมการ	จำนวนข้อมูล
1-90	$\rho_m = 1531.2+40.403(F_c)-1.882(F_c)^2+0.0323(F_c)^3$	0.824	Cubic	120
	$\rho_m = 708.6-1.238(A)+0.588(\rho)+3.199(F)$	0.947	Linear	240
	$\rho_m = 793.8-0.356(A)+0.533(\rho)+3.890(F_c)$	0.946	Linear	240
1-28	$\rho_m = 206.1+0.167(A)+0.847(\rho)+31.921(F_T)$	0.956	Linear	144

ตารางที่ 4.24 สมการความสัมพันธ์ของค่าการดูดซึมน้ำ กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลา
ปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบ สมการ	จำนวน ข้อมูล
1-90	$w = 11.538+0.100(A)+0.01839(T)+0.00031(\rho)$	0.882	Linear	240
	$w = -2.375+0.02423(A)+0.01847(T)+32.731(W/B)$	0.917	Linear	240
	$w = 11.238-0.110(A)+0.01421(T)+0.04006(F_c)$	0.895	Linear	240
1-28	$w = 11.437+0.09846(A)+0.02107(T)+0.274(F_T)$	0.846	Linear	144

3.4.3 คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ

ตารางที่ 4.25 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม
น้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบ สมการ	จำนวน ข้อมูล
1-90	$F_c = 16.631+0.989(T)-0.02075(T)^2+0.00013(T)^3$	0.900	Cubic	30
	$F_c = e^{4.176-22.076/(F)}$	0.982	S-curve	30
	$F_c = -64.919-0.00878(T)+0.0348(\rho)+1.063(F)$	0.988	Linear	45
1-28	$F_c = 14.999+1.532(T)-0.00130(T)^3$	0.992	Cubic	18
	$F_c = 73.213-27.994(V_p)^2+7.431(V_p)^3$	0.989	Cubic	18
	$F_c = -14.748+0.138(T)+12.622(V_p)$	0.992	Linear	18
	$F_c = -91.472+0.128(T)+0.0414(\rho)+12.505(V_p)$	0.998	Linear	36
	$F_c = -102.998+0.0479(\rho)+9.315(V_p)+0.458(F)$	0.995	Linear	36

ตารางที่ 4.26 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม
น้ำมันผสมเข้าเกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 20

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบ สมการ	จำนวน ข้อมูล
1-90	$F_c = 14.023+0.903(T)-0.01926(T)^2+0.00012(T)^3$	0.908	Cubic	30
	$F_c = -19.528+2.729(F)-0.0399(F)^2$	0.988	Quadratic	30
	$F_c = 12.869-0.00835(T)-0.00792(\rho)+0.979(F)$	0.963	Linear	45
1-28	$F_c = 12.645+11.575(T)-0.03985(T)^2$	0.994	Quadratic	18
	$F_c = 77.187-31.626(V_p)^2+8.459(V_p)^3$	0.990	Cubic	18
	$F_c = -13.918+0.138(T)+11.469(V_p)$	0.996	Linear	18
	$F_c = -83.627+0.120(T)+0.0374(\rho)+12.068(V_p)$	0.999	Linear	36
	$F_c = -65.540+0.0283(\rho)+8.425(V_p)+0.465(F)$	0.999	Linear	36

ตารางที่ 4.27 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม
น้ำมันผสมเข้าเกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบ สมการ	จำนวน ข้อมูล
1-90	$F_c = 9.363+0.883(T)-0.01735(T)^2+0.00010(T)^3$	0.950	Cubic	30
	$F_c = e^{4.254-32.473/(F)}$	0.985	S-curve	30
	$F_c = -34.801+0.0175(T)+0.0163(\rho)+0.960(F)$	0.983	Linear	45
1-28	$F_c = 8.259+1.232(T)-0.00096(T)^3$	0.998	Cubic	18
	$F_c = 70.214-33.465(V_p)^2+9.457(V_p)^3$	0.990	Cubic	18
	$F_c = -21.956+0.174(T)+13.162(V_p)$	0.996	Linear	18
	$F_c = -28.237+0.174(T)+0.00359(\rho)+13.129(V_p)$	0.996	Linear	36
	$F_c = -34.039+0.00987(\rho)+6.249(V_p)+0.690(F)$	0.988	Linear	36

ตารางที่ 4.28 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัด กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม
น้ำมันผสมเต้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบ สมการ	จำนวน ข้อมูล
1-90	$F_C = 13.977+0.915(T)-0.0187(T)^2+0.000114(T)^3$	0.739	Cubic	120
	$F_C = -12.829+2.036(F)-0.0227(F)^2$	0.739	Quadratic	120
	$F_C = 50.585+0.131(T)+0.322(A)-66.244(W/B)$	0.639	Linear	180
	$F_C = -130.769+0.120(T)+0.0379(A)+0.0811(P)$	0.646	Linear	180
	$F_C = 1.233+0.00115(T)-0.221(A)+1.009(F)$	0.930	Linear	180
1-28	$F_C = e^{3.834-1.815/(FT)}$	0.882	S-curve	72
	$F_C = 94.472-71.563(V_p)+15.476(V_p)^2$	0.939	Quadratic	72
	$F_C = 7.111+0.223(T)-0.0748(A)+5.030(F_T)$	0.887	Linear	108
	$F_C = -10.433+0.220(T)-0.0925(A)+10.241(V_p)$	0.894	Linear	108

ตารางที่ 4.29 สมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังดึง กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม
น้ำมันผสมเต้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบ สมการ	จำนวน ข้อมูล
1-28	$F_T = 1.439+0.215(T)-0.00590(T)^2$	0.733	Quadratic	36
	$F_T = 1.575-0.199(F_C)-0.01969(F_C)^2-0.00038(F_C)^3$	0.838	Cubic	72
	$F_T = 1.499-0.546(V_p)^2+0.217(V_p)^3$	0.975	Cubic	72
	$F_T = -3.172-0.00491(A)+1.931(V_p)$	0.953	Linear	108
	$F_T = 2.887-0.01382(T)-0.001162(P)+0.126(F_C)$	0.817	Linear	144
	$F_T = -3122-0.00277(T)+1.779(V_p)+0.01706(F_C)$	0.949	Linear	144
	$F_T = 0.437-0.00778(A)-0.00237(T)+0.09968(F_C)$	0.822	Linear	144

ตารางที่ 4.30 สมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบสมการ	จำนวนข้อมูล
1-90	$W/B = 0.450 + 0.00809(A) - 0.00005(F_c)$	0.972	Linear	180
	$W/B = 1.710 - 0.00608(A) - 0.00068(\rho) - 0.00002(F_c)$	0.981	Linear	240
1-28	$W/B = 1.722 + 0.00599(A) - 0.00068(\rho) + 0.00088(F_T)$	0.980	Linear	144
	$W/B = 0.434 + 0.00835(A) + 0.03202(F_T) - 0.00363(F_c)$	0.981	Linear	144

ตารางที่ 4.31 สมการความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นรวม กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบสมการ	จำนวนข้อมูล
1-90	$\rho_m = 1418.1 + 58.746(F_c) - 2.882(F_c)^2 + 0.04848(F_c)^3$	0.631	Cubic	120
	$\rho_m = 560.2 - 1.586(A) + 0.665(\rho) + 3.452(F)$	0.953	Linear	240
	$\rho_m = 1037.4 - 1.637(A) + 0.409(\rho) + 3.472(F_c)$	0.952	Linear	240
1-28	$\rho_m = -78.493 + 0.144(A) + 1.005(\rho) + 28.271(F_T)$	0.969	Linear	144

ตารางที่ 4.32 สมการความสัมพันธ์ของค่าการดูดซึมน้ำ กับค่าต่างๆ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

อายุบ่ม (วัน)	สมการถดถอย	R ²	รูปแบบสมการ	จำนวนข้อมูล
1-90	$w = 67.204 + 0.126(A) + 0.03436(T) - 0.02977(\rho)$	0.927	Linear	240
	$w = -4.641 - 0.07646(A) + 0.03036(T) + 36.336(W/B)$	0.946	Linear	240
	$w = 13.071 + 0.203(A) + 0.04142(T) - 0.08477(F_c)$	0.917	Linear	240
1-28	$w = 10.637 + 0.217(A) - 0.00867(T) + 0.448(F_T)$	0.845	Linear	144

จากตารางที่ 4.13 - ตารางที่ 4.15 เป็นตารางแสดงสมการถดถอยของการหาค่าความสัมพันธ์ ของค่าสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันกับตัวแปรต่างๆ ที่ไม่ผสมเถ้า จากตารางที่ 4.16 - ตารางที่ 4.18 เป็นตารางแสดงสมการถดถอยของการหาค่าความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ กับตัวแปรต่างๆ จากตารางที่ 4.19 - ตารางที่ 4.23 เป็นตารางแสดงสมการถดถอยของการหาค่าความสัมพันธ์ของค่าสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ตามลำดับ กับตัวแปรต่างๆ จากตารางที่ 4.24 - ตารางที่ 4.26 เป็นตารางแสดงสมการถดถอยของการหาค่าความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ กับตัวแปรต่างๆ จากตารางที่ 4.27 - ตารางที่ 4.31 เป็นตารางแสดงสมการถดถอยของการหาค่าความสัมพันธ์ของค่าสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ตามลำดับ กับตัวแปรต่างๆ

จากสมการถดถอยข้างต้นนั้น มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.63 – 0.99 แสดงว่า สมการมีความสัมพันธ์ระดับดีถึงดีมาก การหาค่าความหนาแน่นรวม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ไม่ปรากฏตัวแปรต้นคืออายุบ่ม แสดงว่าไม่ขึ้นอยู่กับอายุบ่มนั่นเอง ส่วนค่าการดูดซึมน้ำ จะต้องใช้ตัวแปรต้นคือ ปริมาณเถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม แสดงว่าวัสดุประสานมีผลต่อการดูดซึมน้ำที่สัมพันธ์กับอายุบ่ม

ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ทำให้สามารถคาดคะเนค่าที่ต้องนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการทดสอบ เพื่อหาค่าโดยตรง เช่น ค่าความหนาแน่นรวม (รูปที่ 4.33) ค่ากำลังอัดและกำลังดึง (รูปที่ 4.34) เป็นต้น ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ก็ได้ตั้งตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังอัด ดังแสดงในรูปที่ 4.35 และกระจายนิพจน์รูปสมการในตารางที่ 4.14-4.19 ซึ่งก็พบว่าค่าสหสัมพันธ์หาได้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Chang et al. (2006), del Rio et al. (2004), Hobbs et al. (2007)

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

- 1) เถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้ากลบที่นำมาใช้เป็นวัสดุประสาน ซึ่งเถ้ากลบมีองค์ประกอบทางเคมีเทียบเคียงสารปอซโซลานชั้นคุณภาพ C เมื่อผสมเถ้าดังกล่าวแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น จะยืดระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ได้ ตามลำดับอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น
- 2) ผลจากควบคุมค่าการยุบตัวระหว่าง 50-60 มม. ที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้ากลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น เป็นผลให้ความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามลำดับอัตราส่วนผสมเถ้าดังกล่าว ที่มีพื้นที่ผิวและความพรุนสูง
- 3) คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้ากลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้นจะมีความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศ การหดตัวแบบแห้งลดลง และการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ตามลำดับอัตราส่วนผสมเถ้าดังกล่าว และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกลดลงเช่นกัน สามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศ และกำลังดึง
- 4) ความต้านการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้ากลบเพิ่มขึ้นตามลำดับอัตราส่วนผสมและอายุบ่ม ซึ่งเถ้ากลบ มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม สามารถจับยึดคลอไรด์ได้ดี และเถ้าไยปาล์มน้ำมันนั้นไม่เห็นผลแตกต่าง
- 5) กำลังอัดคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้ากลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดที่อายุบ่ม 90 วัน และที่ผสมซึ่งที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันร้อยละ 10-30 และที่ผสมเถ้ากลบร้อยละ 20-30 มีค่ากำลังอัดลดลง ส่วนกำลังดึงมีค่าลดลงตามลำดับอัตราส่วนผสมเช่นกัน ผลดังกล่าวยังคงผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C 330-97 และอยู่ในประเภทคอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้าง
- 6) อายุบ่มกับวัสดุปอซโซลานนั้น มีผลต่อการพัฒนาทางกายภาพและกำลังของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้ากลบ มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก หลังจากอายุบ่ม 7 วันจะมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

7) จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลง โดยพบความเป็นโพรงของซีเมนต์เพสต์ และสารประกอบที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เช่น แอตตรึงไคต์, ฟลิกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนร้อยละและที่อายุบ่มเดียวกัน

8) สมการสหสัมพันธ์พหุคูณเพื่อสร้างสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ พบว่ามีความสัมพันธ์กันดีถึงดีมาก และสามารถใช้งานออกแบบส่วนผสมอย่างคร่าวๆได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวและพื้นที่ความพรุนสูง ทำให้ต้องการน้ำมากในการผสม เป็นผลให้กำลังอัดลดลง หากผสมสารลดน้ำในส่วนผสมหรือลดปริมาณน้ำอาจจะสามารถเพิ่มกำลังอัดได้

2) ควรทดสอบกรณีผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันกับเถ้าแกลบหรือสารผสมเพิ่มผสมกับเถ้าดังกล่าว อาจส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและเชิงกลดียิ่งขึ้น

3) ควรทดสอบคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันในระยะยาวและกำลังยึดเหนี่ยวต่อเหล็กเสริม เพื่อนำมาพิจารณาในงานคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้างต่อไป

4) การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธี XRF และ XRD ควรทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นเพสต์จะเหมาะสมกว่า

เอกสารอ้างอิง

- เขตสยาม สุขาทิพย์, ธนาวุฒิ คะโยธา และวัชราราช ศรีพวงเพ็ด. (2545). คอนกรีตเบา. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- เครื่องซีเมนต์ไทย (2548). ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด.
- จักรพันธุ์ วังษ์พา (2545). การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อเป็นวัสดุปอซโซลาน. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพมหานคร. 136 หน้า
- ชัชวาล เศรษฐบุตร (2536). คอนกรีตเทคโนโลยี. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้างจำกัด. กรุงเทพมหานคร. 26 หน้า
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธุ์ วังษ์พา และ สุรพันธ์ สุคันปรีย์ (2545). การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อใช้ในงานคอนกรีต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8. 23-25 ตุลาคม 2545. โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด จังหวัดขอนแก่น. หน้า MAT 163-172
- เชาว์วัช หนูทอง, การุณ ใจปัญญา และ นกตล ศรีสุภาพ. (2547). กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเปลือกผสมเถ้าแกลบ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9. 19-21 พฤษภาคม 2547. หน้า MAT 125-130
- ธีรสิทธิ์ แซ่ตั้ง, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติ โกมล (2547). การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต. การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติแห่งชาติครั้งที่ 2. 28-29 ตุลาคม 2547. หน้า 17-22
- ธีระพงศ์ จันทนิยม. (2550). ปาล์มน้ำมัน ชุดอบรมสำหรับวิทยากรปาล์มน้ำมัน. สถาบันวิจัยพืชกรรมปาล์มน้ำมัน คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. จังหวัดสงขลา. หน้า 21-23
- ดนุพล ดันนโยภาส และ อภิชาติ พ่วงพี (2548). คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมหินฝุ่นแกรนิต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2-4 พฤษภาคม 2550. Volume 5. หน้า MAT 175 -180
- บุรฉัตร ภัตตรีระ และ ณรงค์ศักดิ์ มากุล (2547). ผลกระทบของเถ้าแกลบขาวบดละเอียดมากที่มีต่อคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9. 19-21 พฤษภาคม 2547. หน้า MAT 83-88

- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2547). ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.)
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อุกฤษฏ์ โช้ศรี (2548). กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทาน การซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ. การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10. 2-4 พฤษภาคม 2548. โรงแรมแอมบาสเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา. จังหวัดชลบุรี. หน้า MAT 83-88
- วินิต ช่อวิเชียร (2539). คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. หน้า 1-6
- วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แวงคุ้ม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2546). วัสดุปอชโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 26. ฉบับที่ 4. หน้า 459-473
- วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล (2547). การศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา. ปีที่ 15. ฉบับที่ 3. หน้า 32-39
- วันชัย สะตะ, ชัย จาตุพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล (2546). การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. ปีที่ 4. ฉบับที่ 2. หน้า 27-32
- สหชัย แก่นอากาศ และ วนิดา เพ็ญสุวรรณ (2545). กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าแกลบ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 8. 23-25 ตุลาคม 2545. โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด. จังหวัดขอนแก่น. หน้า MAT 138-143
- สำนักงานสถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย ปีเพาะปลูก 2548/49 ,ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร , กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์ , เล่มที่ 47, 2549.
- Basheer, P.A.M., Gilleece, P.R.V., Long, A.E. and Mc Carter, W.J. (2002). Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. Cement and Concrete Composites. Vol. 24. Issue 5. pp. 437-449.
- Chang, T.-P., Lin, H.-C., Chang, W.-T. and Hsiao, J.F. (2006). Engineering properties of lightweight aggregate concrete assessed by stress wave propagation methods. Cement and Concrete Composites. Vol. 28. pp. 57-68.

- Gastaldini, A.L.G., Isaia, G.C., Gomes, N.S. and Sperb, J.E.K. (2007). Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators. Cement and Concrete Composites. Vol. 29. Issue 5. pp. 176-180.
- Neville, A.M. (1995). Properties of concrete. 4th ed. London. Longman Group Limited. pp. 504-506.
- Neville, A.M. (1999). Properties of concrete. 4th and Final ed. London. Longman Group Limited. pp. 631-632, pp. 688-706.
- Mannan, M.A. and Ganapathy, C. (2001). Mix design for oil palm shell concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 31. pp. 1323–1325.
- Mannan, M.A. and Ganapathy, C. (2002). Engineering properties of concrete with oil palm shell as coarse aggregate. Construction and Building Materials. Vol. 16. pp. 29-34.
- Mannan, M.A., Basri, H.B., Zain, M.F.M. and Islam, M.N. (2002). Effect of curing conditions on the properties of OPS-concrete. Building and Environment Vol. 37. pp. 1167-1171.
- Mannan, M.A., Alexande, J., Ganapathy and Teo, D.C.L. (2006). Quality improvement of oil palm shell (OPS) as coarse aggregate in lightweight concrete. Building and Environment Vol. 41. pp. 1239-1242.
- Makaratal, N., Tangchiraoat, W., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. and Siripanichgorn, A. (2004). Utilization of Rice Husk-Bark Ash as a Cement Replacement. Proceeding of the First International Conference of Asian Concrete Federation. 28-29 October 2004. Chiang Mai. Thailand. pp. 650-659.
- Tay, J.H. (1991). Complete Reclamation of Oil Palm Waster. Resources Conservation and Recycling. Vol. 5. pp. 383-392.
- Teo, D.C.L., Mannan, M.A., Kurian, V.J. and Ganapathy, C. (2006). Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties. Building and Environment. Vol. 42. Issue 7. pp. 2614-2621.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพ เชิงกล ของคอนกรีต
มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

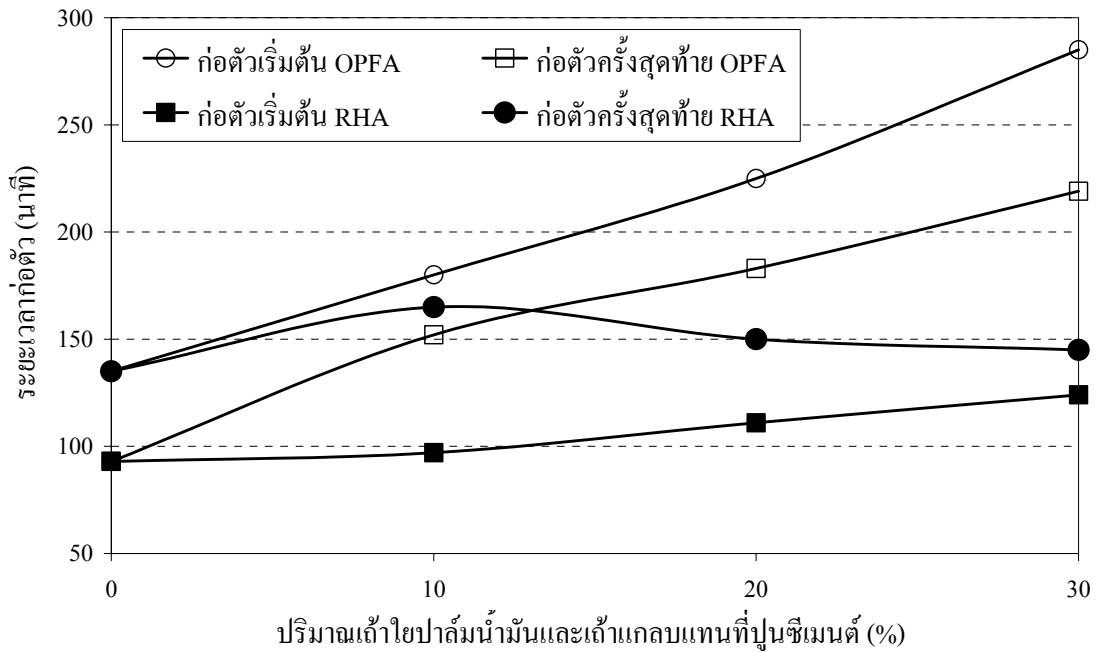
ภาคผนวก ข องค์ประกอบทางเคมี XRF และ ลายพิมพ์ XRD

ภาคผนวก ค ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson Correlation)

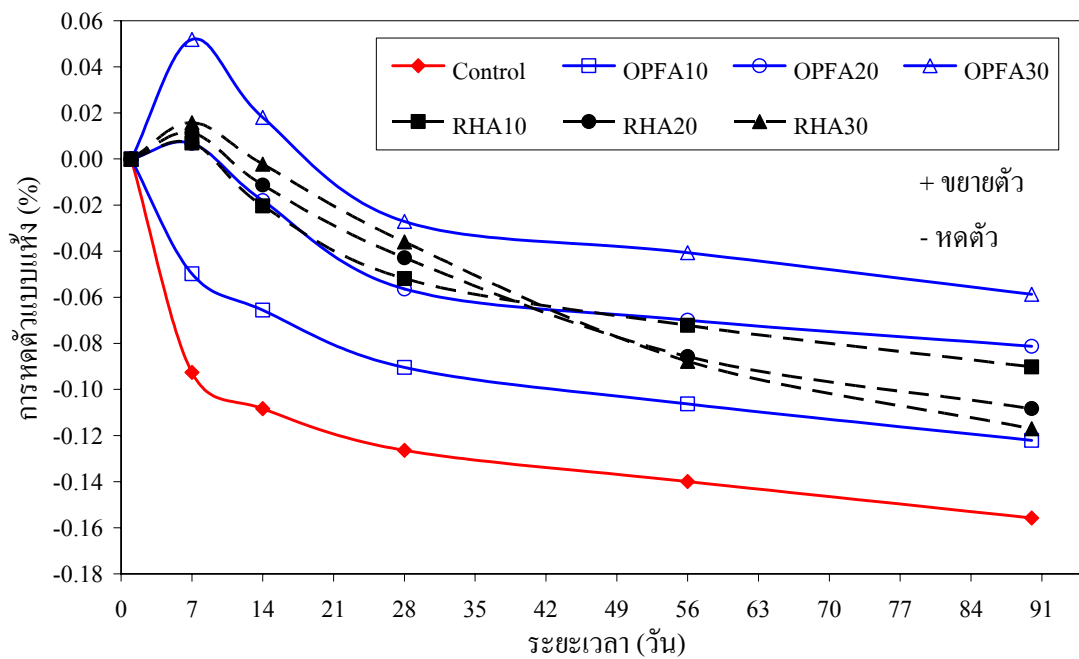
ภาคผนวก ก

ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพ เชิงกล ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

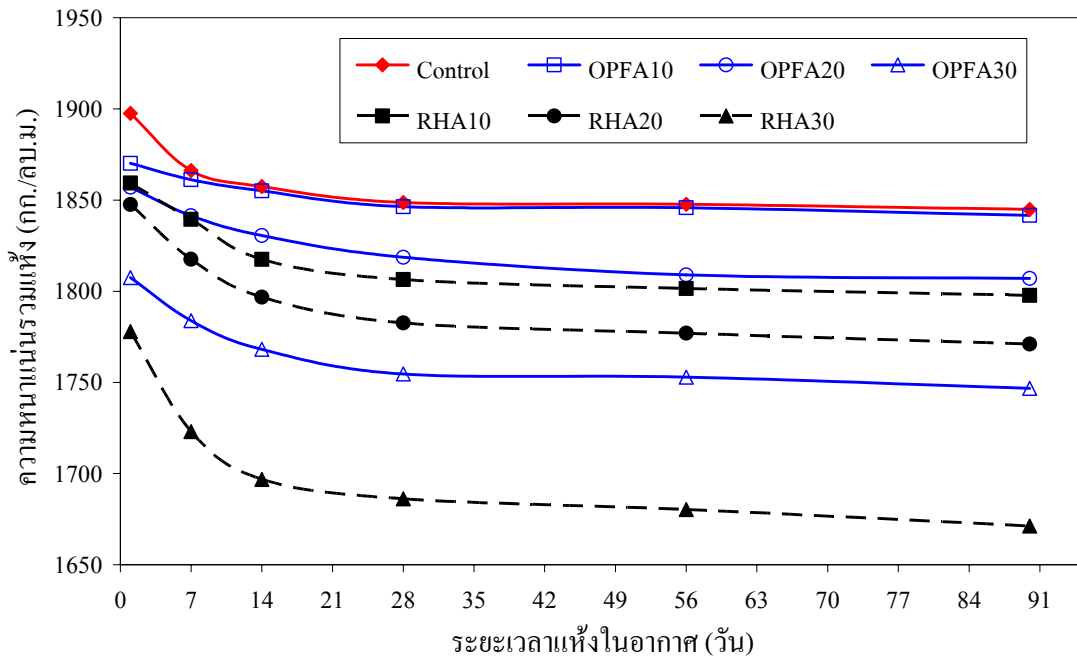
- ระยะเวลาก่อตัว
- การหดตัวแบบแห้ง
- ความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศ
- การดูดซึมน้ำ
- ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก
- ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์
- กำลังดึงแบบผ่าซีก
- กำลังอัด



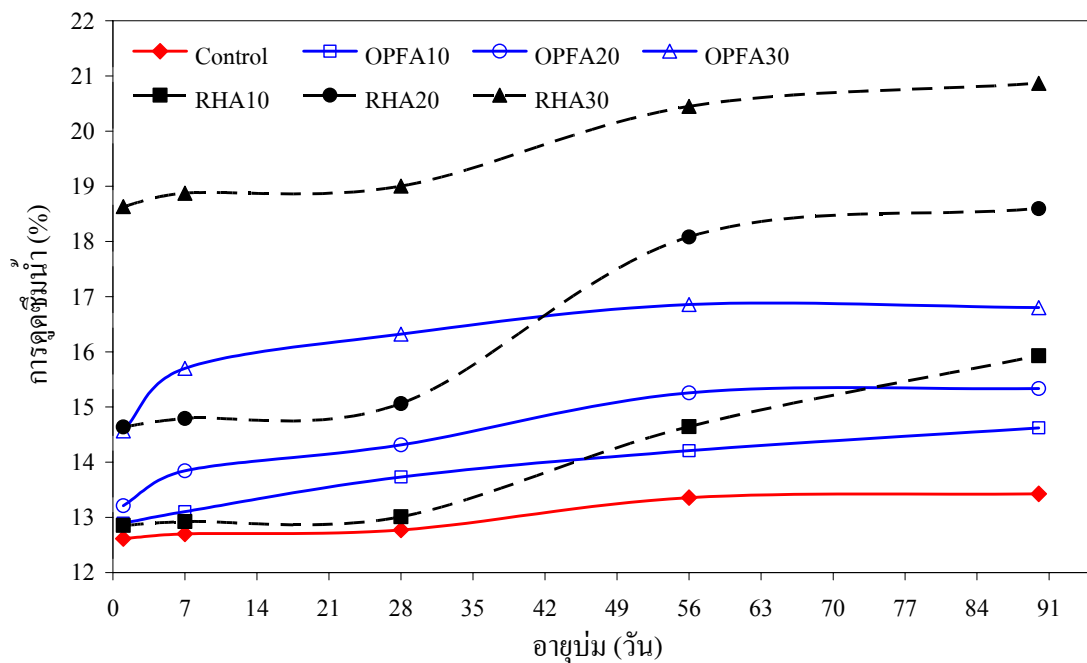
รูปที่ ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์กับระยะเวลาก่อตัว



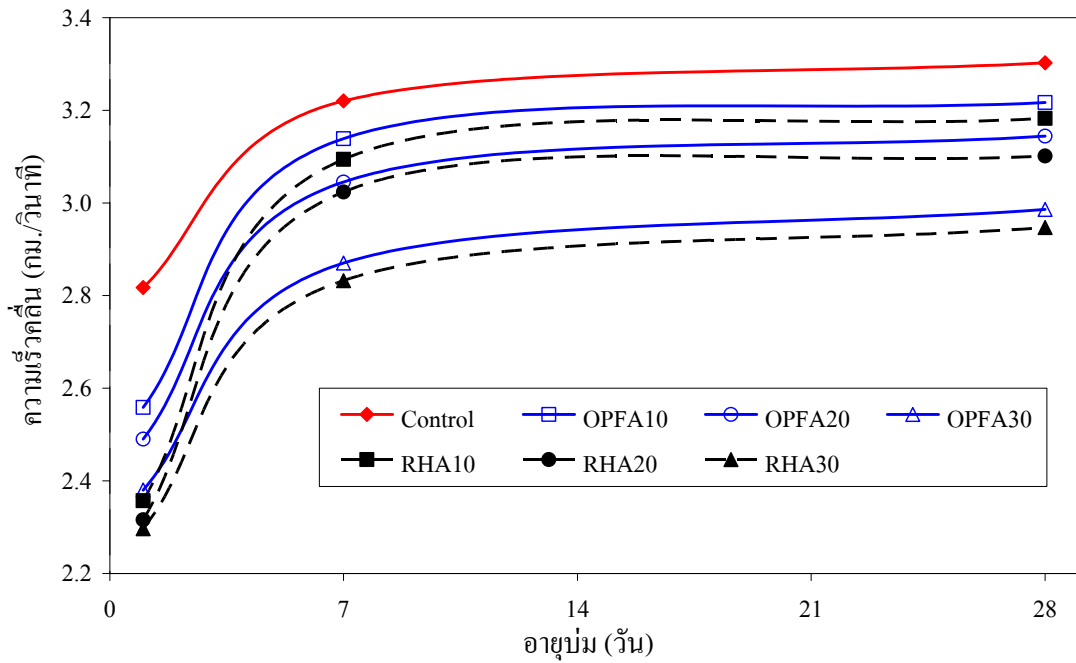
รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ



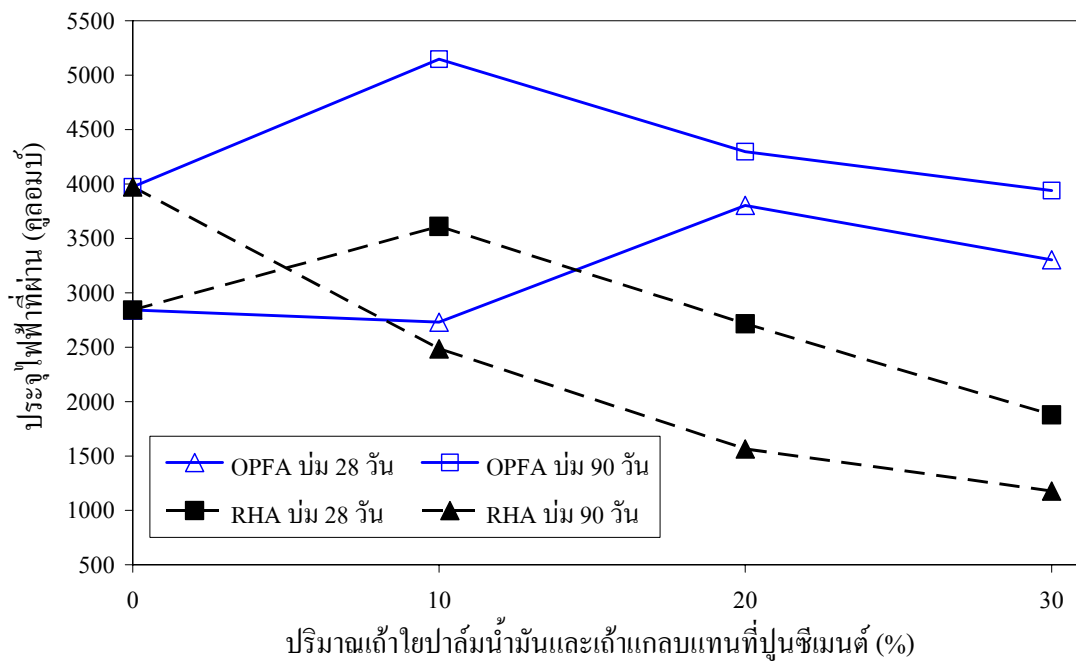
รูปที่ ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเก็บค่าความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ



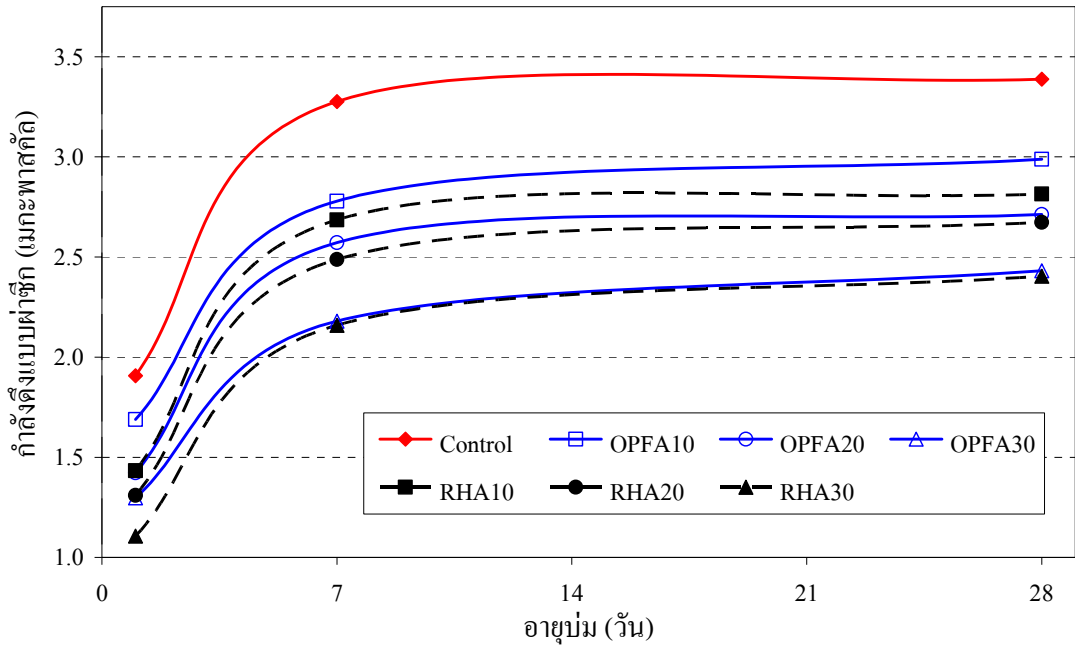
รูปที่ ก-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ



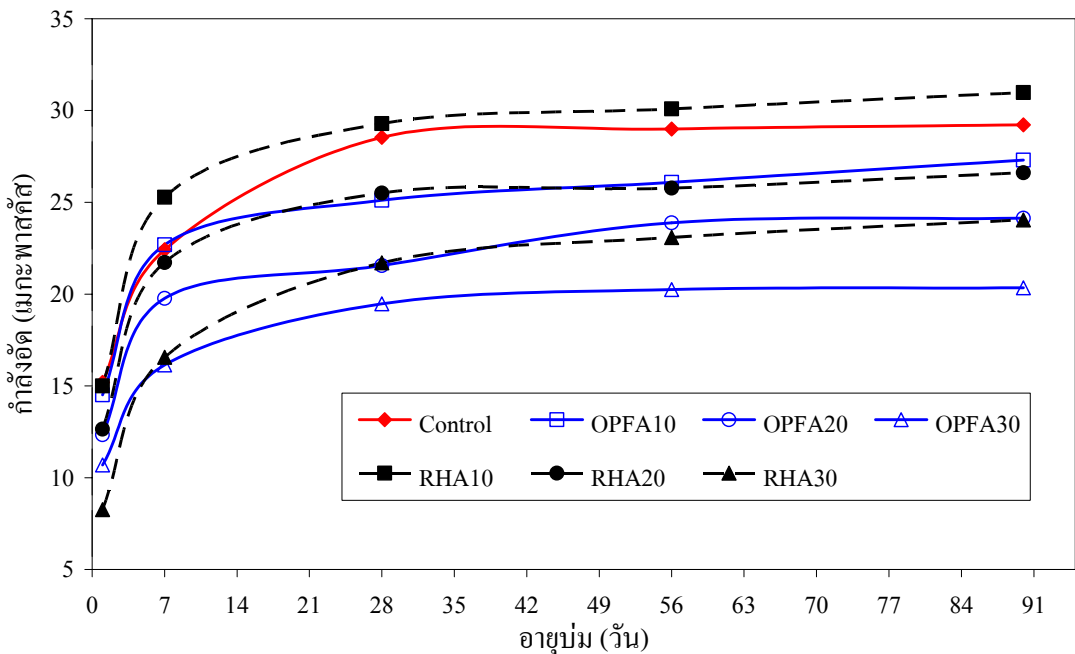
รูปที่ ก-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่าความเร็วจลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ



รูปที่ ก-6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์กับความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์



รูปที่ ก-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ

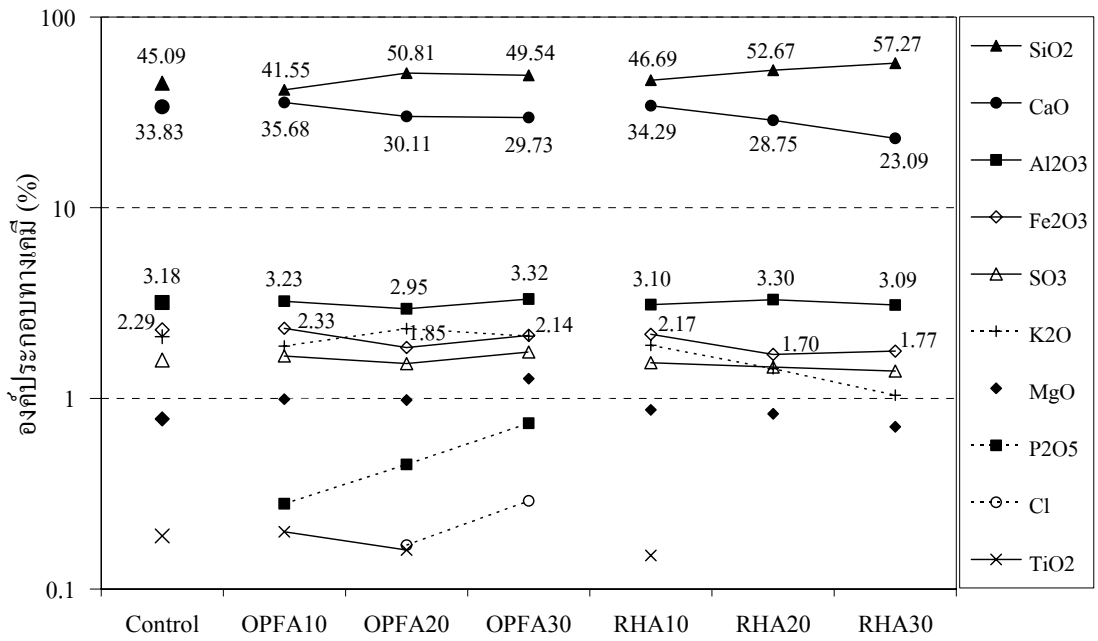


รูปที่ ก-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์ม น้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ

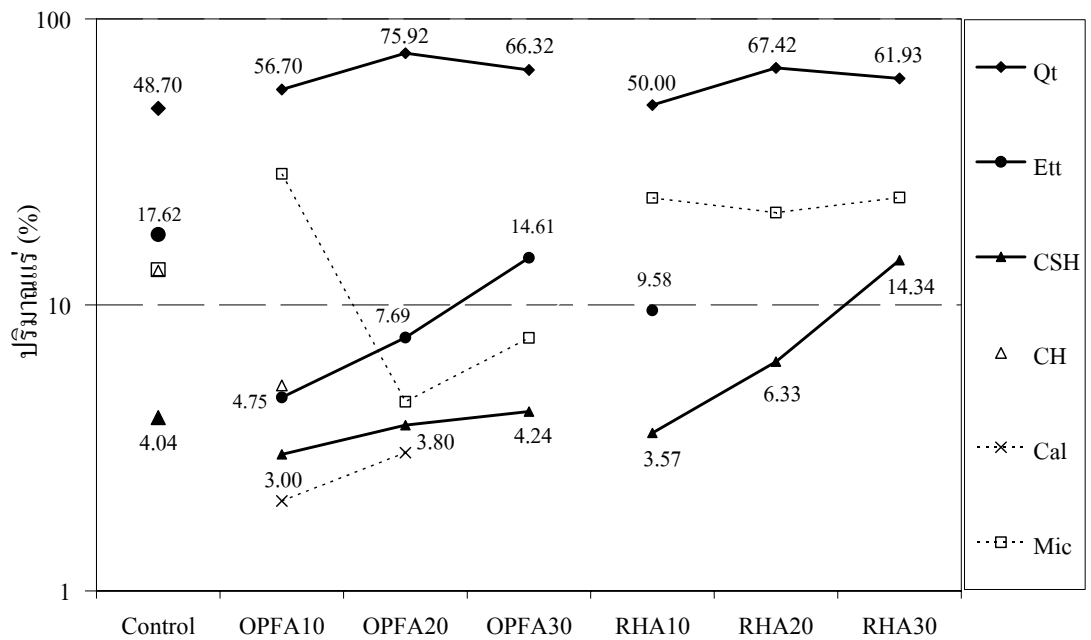
ภาคผนวก ข

องค์ประกอบทางเคมี XRF และ ลายพิมพ์ XRD ที่อายุป้อม 28 วัน

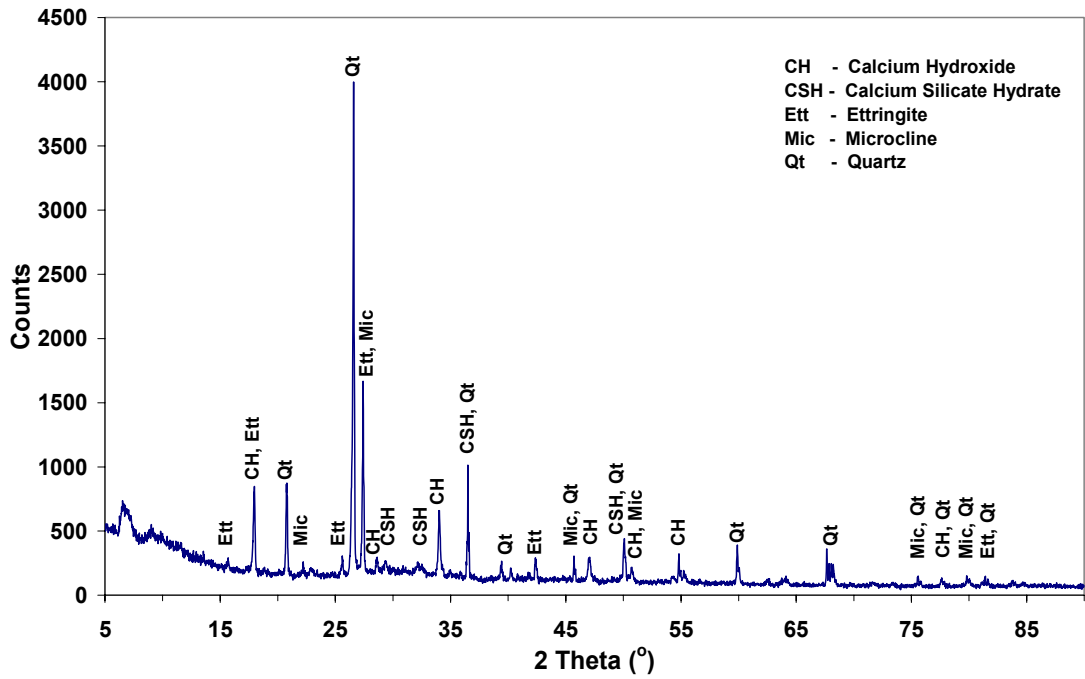
- คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน
- คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าเใยปาล์มน้ำมัน
- คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ



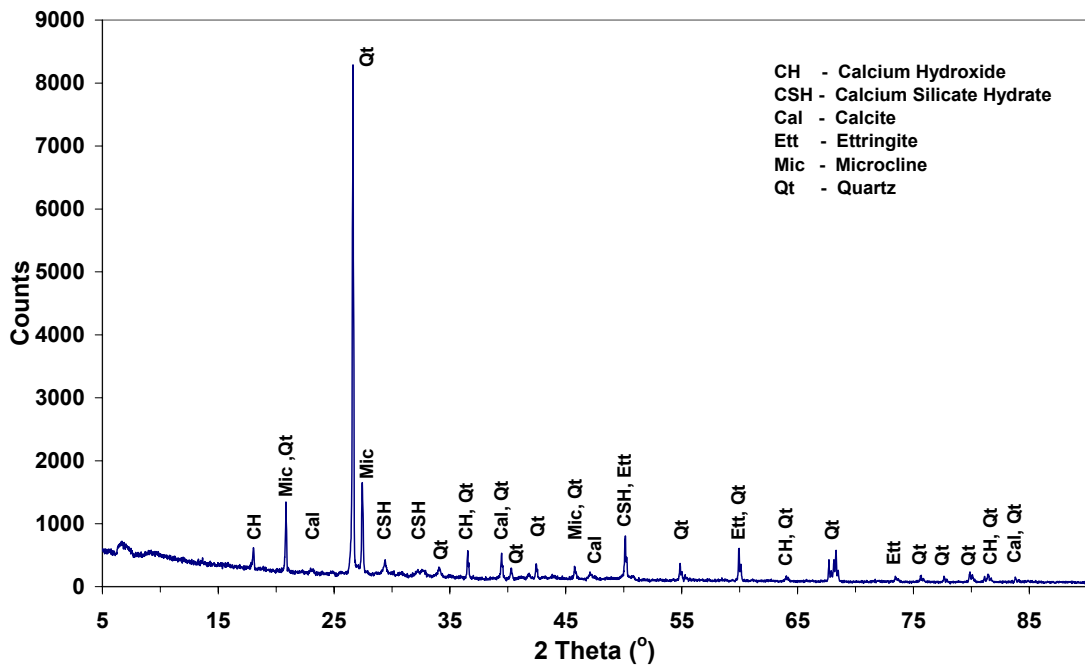
รูปที่ ข-1 แสดงผลองค์ประกอบทางเคมี ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30



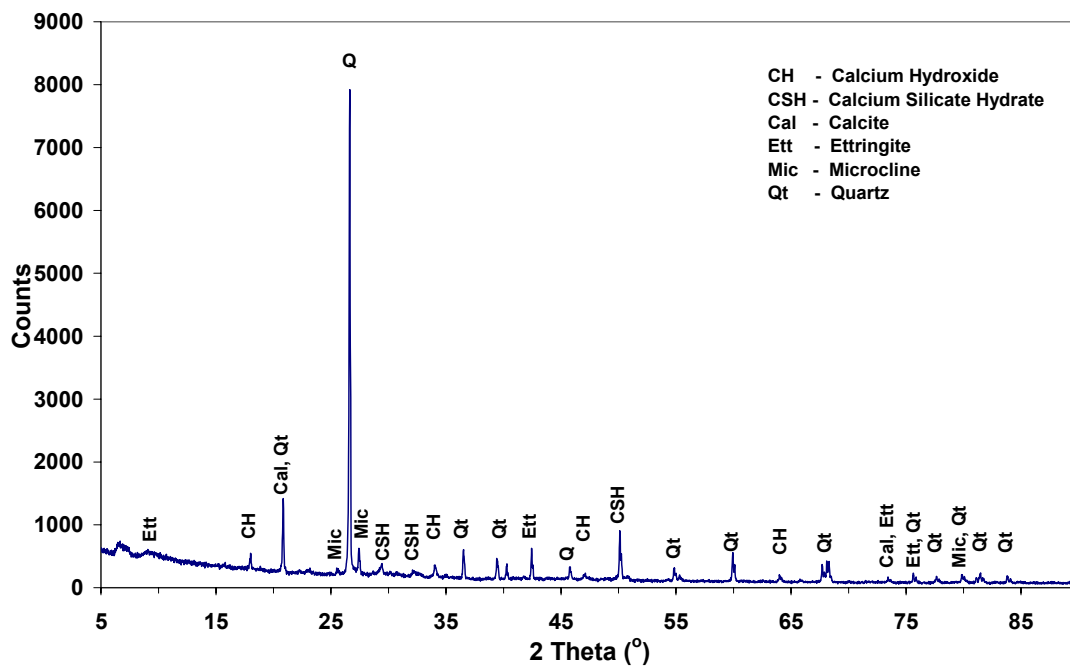
รูปที่ ข-2 แสดงผลปริมาณแร่ ของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30



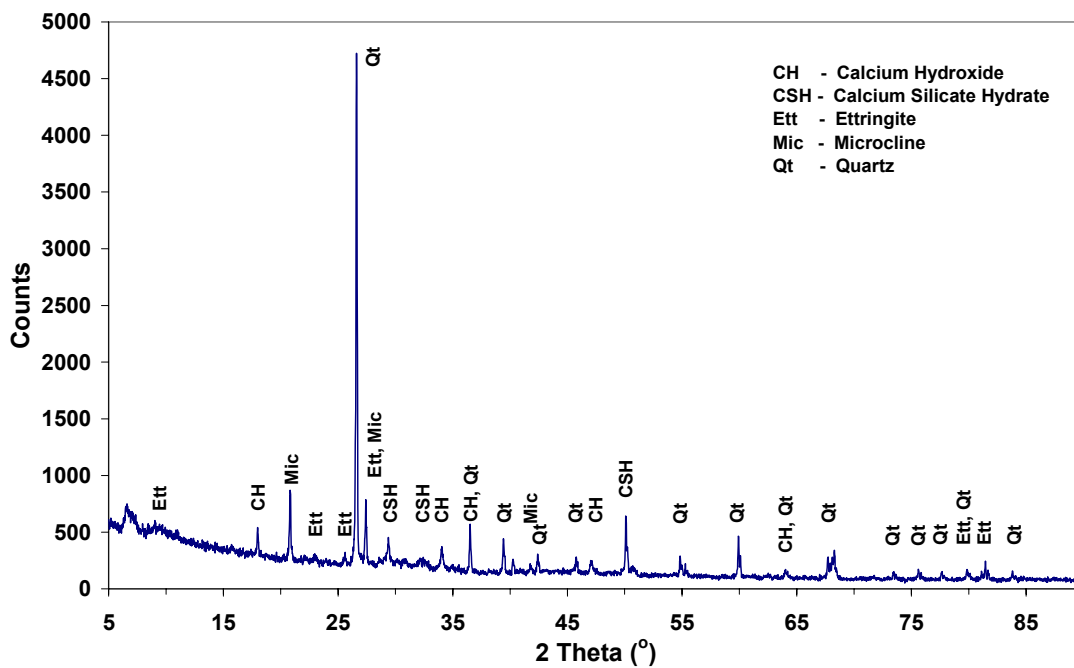
รูปที่ ข-3 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน



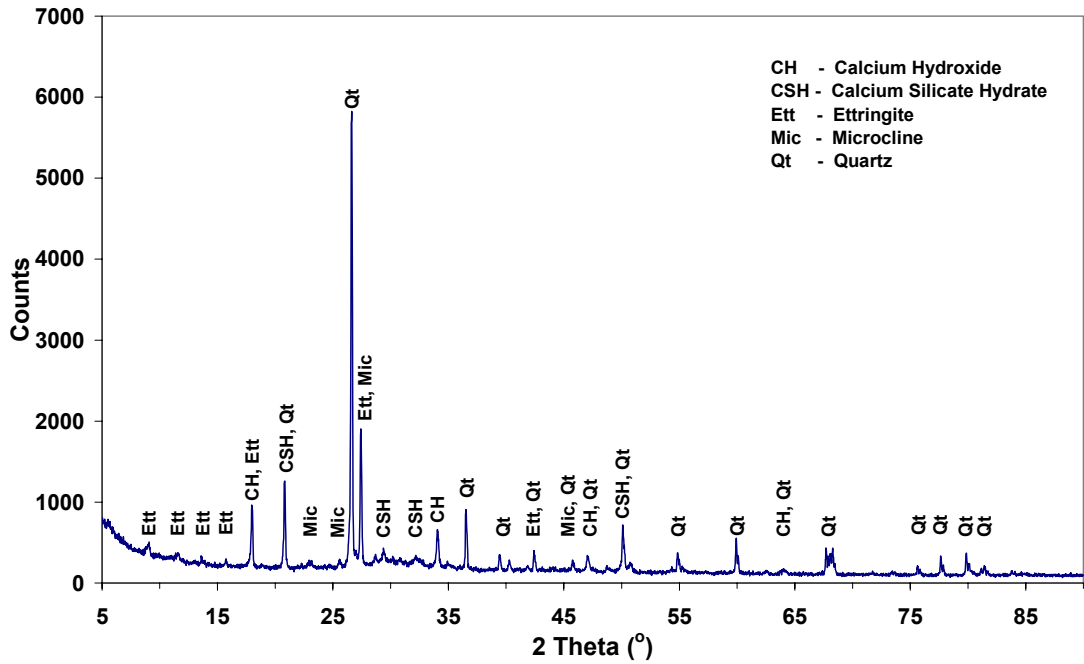
รูปที่ ข-4 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วน ร้อยละ 10



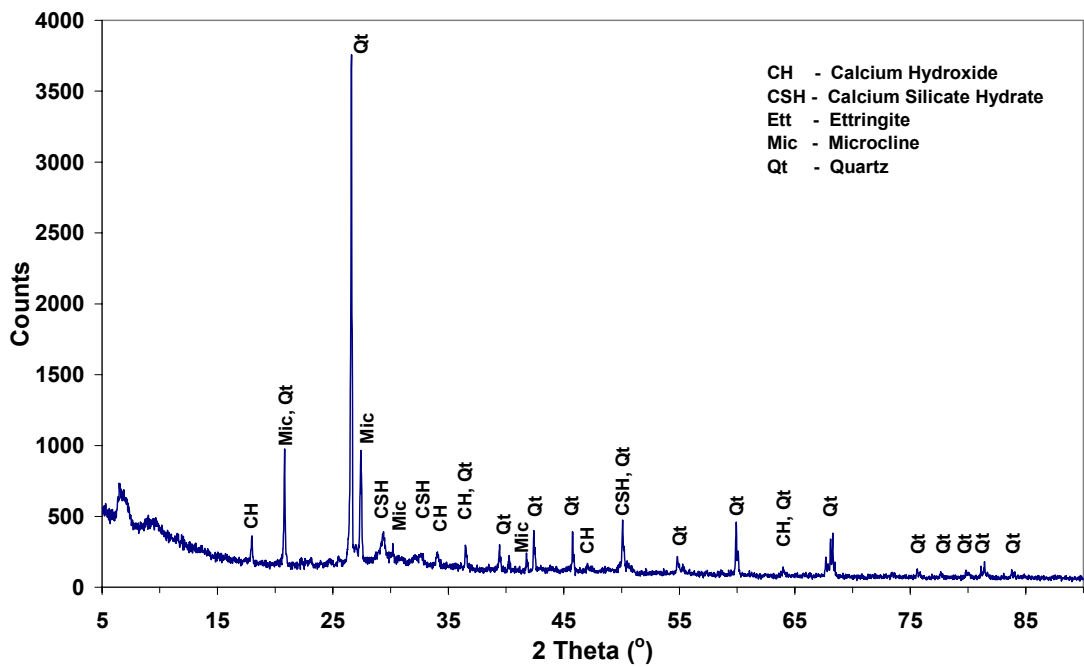
รูปที่ ข-5 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วน ร้อยละ 20



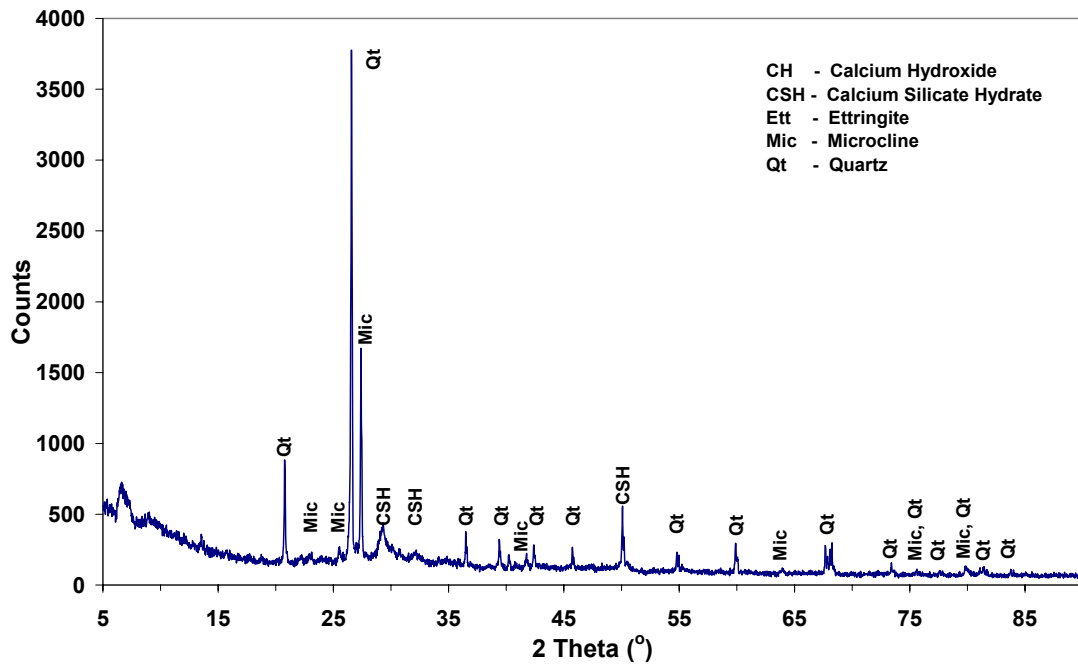
รูปที่ ข-6 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วน ร้อยละ 30



รูปที่ ข-7 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเต็มแก้ว ในอัตราส่วนร้อยละ 10



รูปที่ ข-8 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเต็มแก้ว ในอัตราส่วนร้อยละ 20



รูปที่ ข-9 ลายพิมพ์ XRD คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 30

ภาคผนวก ค

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson Correlation) ระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ

- คอมนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน
- คอมนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมัน
- คอมนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าแกลบ

ตารางที่ ค-1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูลคอนกรีต
มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

		T	F _C	ρ	F _T	V _P	w
T	Correlation	1	.779(**)	.825(**)	.739(*)	.796(*)	.951(**)
	Sig. (2-tailed)		0.001	0.000	0.023	0.010	0.000
F _C	Correlation	.779(**)	1	.925(**)	.916(**)	.946(**)	.738(**)
	Sig. (2-tailed)	0.001		0.000	0.001	0.000	0.002
ρ	Correlation	.825(**)	.925(**)	1	.761(*)	.787(*)	.753(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000		0.017	0.012	0.001
F _T	Correlation	.739(*)	.916(**)	.761(*)	1	.994(**)	.904(**)
	Sig. (2-tailed)	0.023	0.001	0.017		0.000	0.001
V _P	Correlation	.796(*)	.946(**)	.787(*)	.994(**)	1	.943(**)
	Sig. (2-tailed)	0.010	0.000	0.012	0.000		0.000
w	Correlation	.951(**)	.738(**)	.753(**)	.904(**)	.943(**)	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ค-2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูลคอนกรีต
มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าขี้ปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 10

		T	F _C	ρ	F _T	V _P	w
T	Correlation	1	.773(**)	.813(**)	.794(*)	.767(*)	.936(**)
	Sig. (2-tailed)		0.001	0.000	0.011	0.016	0.000
F _C	Correlation	.773(**)	1	.970(**)	.992(**)	.989(**)	.802(**)
	Sig. (2-tailed)	0.001		0.000	0.000	0.000	0.000
ρ	Correlation	.813(**)	.970(**)	1	.949(**)	.947(**)	.845(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
F _T	Correlation	.794(*)	.992(**)	.949(**)	1	.999(**)	.706(*)
	Sig. (2-tailed)	0.011	0.000	0.000		0.000	0.034
V _P	Correlation	.767(*)	.989(**)	.947(**)	.999(**)	1	.685(*)
	Sig. (2-tailed)	0.016	0.000	0.000	0.000		0.042
w	Correlation	.936(**)	.802(**)	.845(**)	.706(*)	.685(*)	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.034	0.042	

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ค-3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูลคอนกรีต
มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเข้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 20

		T	F _C	ρ	F _T	V _P	w
T	Correlation	1	.791(**)	.674(**)	.761(*)	.787(*)	.922(**)
	Sig. (2-tailed)		0.000	0.006	0.017	0.012	0.000
F _C	Correlation	.791(**)	1	.919(**)	.990(**)	.988(**)	.903(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
ρ	Correlation	.674(**)	.919(**)	1	.874(**)	.860(**)	.780(**)
	Sig. (2-tailed)	0.006	0.000		0.002	0.003	0.001
F _T	Correlation	.761(*)	.990(**)	.874(**)	1	.998(**)	.923(**)
	Sig. (2-tailed)	0.017	0.000	0.002		0.000	0.000
V _P	Correlation	.787(*)	.988(**)	.860(**)	.998(**)	1	.935(**)
	Sig. (2-tailed)	0.012	0.000	0.003	0.000		0.000
w	Correlation	.922(**)	.903(**)	.780(**)	.923(**)	.935(**)	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ค-4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูลคอนกรีต
มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าขี้ปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 30

		T	F _C	ρ	F _T	V _P	w
T	Correlation	1	.775(**)	.749(**)	.830(**)	.810(**)	.822(**)
	Sig. (2-tailed)		0.001	0.001	0.006	0.008	0.000
F _C	Correlation	.775(**)	1	.941(**)	.968(**)	.958(**)	.949(**)
	Sig. (2-tailed)	0.001		0.000	0.000	0.000	0.000
ρ	Correlation	.749(**)	.941(**)	1	.798(**)	.776(*)	.871(**)
	Sig. (2-tailed)	0.001	0.000		0.010	0.014	0.000
F _T	Correlation	.830(**)	.968(**)	.798(**)	1	.999(**)	.959(**)
	Sig. (2-tailed)	0.006	0.000	0.010		0.000	0.000
V _P	Correlation	.810(**)	.958(**)	.776(*)	.999(**)	1	.956(**)
	Sig. (2-tailed)	0.008	0.000	0.014	0.000		0.000
w	Correlation	.822(**)	.949(**)	.871(**)	.959(**)	.956(**)	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ค-5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูลคอนกรีต
มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเข้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

		T	F _C	ρ	ρ_m	F _T	V _P
T	Correlation	1	.679(**)	.488(**)	.618(**)	.738(**)	.746(**)
	Sig. (2-tailed)		0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
F _C	Correlation	.679(**)	1	.701(**)	.950(**)	.978(**)	.964(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
ρ	Correlation	.488(**)	.701(**)	1	.824(**)	0.356	0.316
	Sig. (2-tailed)	0.001	0.000		0.000	0.069	0.108
ρ_m	Correlation	.618(**)	.950(**)	.824(**)	1	.884(**)	.860(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000
F _T	Correlation	.738(**)	.978(**)	0.356	.884(**)	1	.996(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.069	0.000		0.000
V _P	Correlation	.746(**)	.964(**)	0.316	.860(**)	.996(**)	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.108	0.000	0.000	
w	Correlation	.557(**)	0.112	-0.231	0.017	0.083	0.121
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.462	0.127	0.913	0.681	0.547
A	Correlation	0.000	-.486(**)	-.628(**)	-.530(**)	-0.360	-0.310
	Sig. (2-tailed)	1.000	0.001	0.000	0.000	0.065	0.115
W/B	Correlation	0.000	-.478(**)	-.637(**)	-.534(**)	-0.355	-0.315
	Sig. (2-tailed)	1.000	0.001	0.000	0.000	0.069	0.109
F ₀	Correlation	.779(**)	.847(**)	.376(*)	.744(**)	.879(**)	.893(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ค-5(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล
คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

		w	A	W/B	F ₀		
T	Correlation	.557(**)	0.000	0.000	.779(**)		
	Sig. (2-tailed)	0.000	1.000	1.000	0.000		
F _C	Correlation	0.112	-.486(**)	-.478(**)	.847(**)		
	Sig. (2-tailed)	0.462	0.001	0.001	0.000		
ρ	Correlation	-0.231	-.628(**)	-.637(**)	.376(*)		
	Sig. (2-tailed)	0.127	0.000	0.000	0.011		
ρ _m	Correlation	0.017	-.530(**)	-.534(**)	.744(**)		
	Sig. (2-tailed)	0.913	0.000	0.000	0.000		
F _T	Correlation	0.083	-0.360	-0.355	.879(**)		
	Sig. (2-tailed)	0.681	0.065	0.069	0.000		
V _P	Correlation	0.121	-0.310	-0.315	.893(**)		
	Sig. (2-tailed)	0.547	0.115	0.109	0.000		
w	Correlation	1	.754(**)	.776(**)	.562(**)		
	Sig. (2-tailed)		0.000	0.000	0.000		
A	Correlation	.754(**)	1	.982(**)	0.000		
	Sig. (2-tailed)	0.000		0.000	1.000		
W/B	Correlation	.776(**)	.982(**)	1	0.000		
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000		1.000		
F ₀	Correlation	.562(**)	0.000	0.000	1		
	Sig. (2-tailed)	0.000	1.000	1.000			

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ค-6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูลคอนกรีต
มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเข้าเกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 10

		T	F _C	ρ	F _T	V _P	w
T	Correlation	1	.755(**)	.629(*)	.752(*)	.760(*)	.959(**)
	Sig. (2-tailed)		0.001	0.012	0.020	0.017	0.000
F _C	Correlation	.755(**)	1	.897(**)	.978(**)	.981(**)	0.558
	Sig. (2-tailed)	0.001		0.000	0.000	0.000	0.059
ρ	Correlation	.629(*)	.897(**)	1	.866(**)	.873(**)	0.440
	Sig. (2-tailed)	0.012	0.000		0.003	0.002	0.152
F _T	Correlation	.752(*)	.978(**)	.866(**)	1	1.000(**)	.778(*)
	Sig. (2-tailed)	0.020	0.000	0.003		0.000	0.023
V _P	Correlation	.760(*)	.981(**)	.873(**)	1.000(**)	1	.786(*)
	Sig. (2-tailed)	0.017	0.000	0.002	0.000		0.021
w	Correlation	.959(**)	0.558	0.440	.778(*)	.786(*)	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.059	0.152	0.023	0.021	

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ค-7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูลคอนกรีต
มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเก้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 20

		T	F _C	ρ	F _T	V _P	w
T	Correlation	1	.743(**)	.857(**)	.778(*)	.755(*)	.947(**)
	Sig. (2-tailed)		0.002	0.000	0.014	0.019	0.000
F _C	Correlation	.743(**)	1	.834(**)	.985(**)	.979(**)	.645(**)
	Sig. (2-tailed)	0.002		0.000	0.000	0.000	0.009
ρ	Correlation	.857(**)	.834(**)	1	.883(**)	.883(**)	.823(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000		0.002	0.002	0.000
F _T	Correlation	.778(*)	.985(**)	.883(**)	1	.999(**)	.836(**)
	Sig. (2-tailed)	0.014	0.000	0.002		0.000	0.005
V _P	Correlation	.755(*)	.979(**)	.883(**)	.999(**)	1	.819(**)
	Sig. (2-tailed)	0.019	0.000	0.002	0.000		0.007
w	Correlation	.947(**)	.645(**)	.823(**)	.836(**)	.819(**)	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.009	0.000	0.005	0.007	

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ค-8 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูลคอนกรีต
มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเก้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 30

		T	F _C	ρ	F _T	V _P	w
T	Correlation	1	.813(**)	.775(**)	.810(**)	.803(**)	.963(**)
	Sig. (2-tailed)		0.000	0.001	0.008	0.009	0.000
F _C	Correlation	.813(**)	1	.964(**)	.977(**)	.973(**)	.759(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000		0.000	0.000	0.000	0.001
ρ	Correlation	.775(**)	.964(**)	1	.924(**)	.921(**)	.745(**)
	Sig. (2-tailed)	0.001	0.000		0.000	0.000	0.001
F _T	Correlation	.810(**)	.977(**)	.924(**)	1	1.000(**)	.977(**)
	Sig. (2-tailed)	0.008	0.000	0.000		0.000	0.000
V _P	Correlation	.803(**)	.973(**)	.921(**)	1.000(**)	1	.974(**)
	Sig. (2-tailed)	0.009	0.000	0.000	0.000		0.000
w	Correlation	.963(**)	.759(**)	.745(**)	.977(**)	.974(**)	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ค-9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูลคอนกรีต
มวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

		T	F _C	ρ	ρ_m	F _T	V _P
T	Correlation	1	.690(**)	0.115	.381(**)	.665(**)	.681(**)
	Sig. (2-tailed)		0.000	0.380	0.003	0.000	0.000
F _C	Correlation	.690(**)	1	.509(**)	.761(**)	.906(**)	.911(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
ρ	Correlation	0.115	.509(**)	1	.900(**)	.426(**)	.396(*)
	Sig. (2-tailed)	0.380	0.000		0.000	0.010	0.017
ρ_m	Correlation	.381(**)	.761(**)	.900(**)	1	.714(**)	.681(**)
	Sig. (2-tailed)	0.003	0.000	0.000		0.000	0.000
F _T	Correlation	.665(**)	.906(**)	.426(**)	.714(**)	1	.975(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.010	0.000		0.000
V _P	Correlation	.681(**)	.911(**)	.396(*)	.681(**)	.975(**)	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.017	0.000	0.000	
w	Correlation	.359(**)	-0.169	-.828(**)	-.647(**)	-.371(*)	-0.327
	Sig. (2-tailed)	0.005	0.196	0.000	0.000	0.026	0.051
A	Correlation	0.000	-.393(**)	-.924(**)	-.852(**)	-.480(**)	-.428(**)
	Sig. (2-tailed)	1.000	0.002	0.000	0.000	0.003	0.009
W/B	Correlation	0.000	-.415(**)	-.950(**)	-.863(**)	-.461(**)	-.412(*)
	Sig. (2-tailed)	1.000	0.001	0.000	0.000	0.005	0.012
F ₀	Correlation	.779(**)	.883(**)	0.092	.436(**)	.806(**)	.821(**)
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.485	0.000	0.000	0.000

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ ค-9(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูล
คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30

		w	A	W/B	F ₀		
T	Correlation	.359(**)	0.000	0.000	.779(**)		
	Sig. (2-tailed)	0.005	1.000	1.000	0.000		
F _C	Correlation	-0.169	-.393(**)	-.415(**)	.883(**)		
	Sig. (2-tailed)	0.196	0.002	0.001	0.000		
ρ	Correlation	-.828(**)	-.924(**)	-.950(**)	0.092		
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.485		
ρ _m	Correlation	-.647(**)	-.852(**)	-.863(**)	.436(**)		
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.000		
F _T	Correlation	-.371(*)	-.480(**)	-.461(**)	.806(**)		
	Sig. (2-tailed)	0.026	0.003	0.005	0.000		
V _P	Correlation	-0.327	-.428(**)	-.412(*)	.821(**)		
	Sig. (2-tailed)	0.051	0.009	0.012	0.000		
w	Correlation	1	.883(**)	.904(**)	.256(*)		
	Sig. (2-tailed)		0.000	0.000	0.049		
A	Correlation	.883(**)	1	.986(**)	0.000		
	Sig. (2-tailed)	0.000		0.000	1.000		
W/B	Correlation	.904(**)	.986(**)	1	0.000		
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000		1.000		
F ₀	Correlation	.256(*)	0.000	0.000	1		
	Sig. (2-tailed)	0.049	1.000	1.000			

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ผลงานการตีพิมพ์เผยแพร่

- การปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตมวลรวมจากกะลาปาล์มน้ำมันด้วยเถ้าแกลบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกล
- อิทธิพลปอซโซลานของเถ้าไยปาล์มน้ำมันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน

การปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตมวลรวมจากกะลาปาล์มน้ำมันด้วยเถ้าแกลบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกล

Quality Improvement of Oil Palm Shell Aggregate Concrete with Rice Husk Ash on Physico-Mechanical Properties

พรนรายณ์ บุญราศรี^{1*} ดนุพล ตันนโยภาส²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

²ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

Pornarai Boonrasi^{1*} Danupon Tonnayopas²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat-Yai, Songkhla 90112

²Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat-Yai, Songkhla 90112

E-mail: pornarai@yahoo.com

บทคัดย่อ

ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตที่มีกะลาปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวมหยาบด้วยเถ้าแกลบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกล เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 โดยน้ำหนัก ได้ทดสอบพฤติกรรมความชื้น เหลว และระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เฟสดีผสมเถ้าแกลบ สมบัติทางกายภาพและเชิงกล อันประกอบด้วย การหดตัวแบบแห้ง ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ กำลังแรงดึง และกำลังอัดของคอนกรีตกะลาปาล์มเปรียบเทียบกับก้อนลูกบาศก์ที่ป่มในน้ำที่ 7 และ 28 วัน คอนกรีตกะลาปาล์มพบว่ามีความสามารถในการเทได้ดีกว่า ในขณะที่ความหนาแน่นแห้งในอากาศที่ 28 วัน มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมอยู่ร้อยละ 2.8-8.6 นอกจากนี้กำลังอัดของเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่ป่ม 28 วัน มีกำลังอัดสูงสุด 29.5 MPa อย่างไรก็ตามผลทั้งหลายก็ยังคงอยู่ในพิสัยคอนกรีตมวลเบางานโครงสร้างตัวอย่าง

คำหลัก เถ้าแกลบ, กะลาปาล์มน้ำมัน, คอนกรีตมวลเบา, สมบัติทางกายภาพและเชิงกล, ปอซโซลาน

Abstract

Quality improvement of concrete with oil palm shells (OPS) as coarse aggregate with mineral admixture of rice husk ash (RHA) on physico-mechanical properties was investigated. RHA was replaced ordinary Portland cement, type 1 (OPC) with different proportions of 10, 20, and 30 wt%. RHA cement

pastes behaviors in normal consistency of hydraulic and setting time were also carried out. Physical and mechanical properties consisting of drying shrinkage, bulk density, water absorption, tensile strength, and compressive strength of OPS concrete were compared with cubes cured in water at 7 and 28-day. Fresh OPS concrete was found to have better workability while its 28-day air-dry density was 2.8-8.6% lower than control concrete. Furthermore, compressive strength of 10%RHA replacement of OPC for curing of 28-days showed highest value of 29.5 MPa. However, these results were still within the normal range for structural lightweight concrete.

Keywords: Rice husk ash, Oil palm shell aggregate, Lightweight concrete, Physico-mechanical properties, Pozzolan

1. บทนำ

ภาคใต้ของประเทศไทย มีอุตสาหกรรมการเกษตรที่สำคัญ ได้แก่ ยางพารา ปาล์ม น้ำมัน มะพร้าว และข้าว เป็นปริมาณมาก จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์ม น้ำมัน ประมาณ 2,026,204 ไร่ และมีผลผลิตประมาณ 5,002,670 ตันต่อปี [1] ทำให้มีวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ได้แก่ ทะลายปาล์ม ใบจากเปลือก และกะลาหุ้มเนื้อ ประมาณ 2,501,335 ตันต่อปี และได้เถ้าปาล์มน้ำมัน ประมาณ 125,066 ตัน

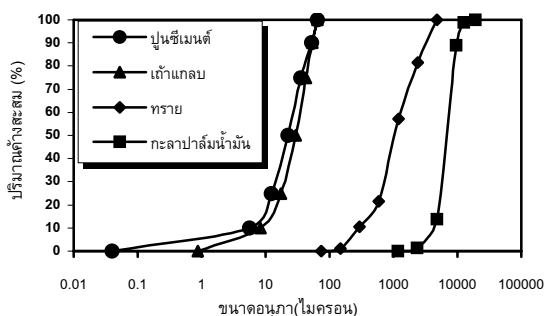
ต่อปี นอกจากนี้จากข้อมูลจากกรมวิชาการเกษตร วางเป้าหมายปี พ.ศ. 2548-2551 ขยายพื้นที่ปาล์ม 5 ล้านไร่ และพัฒนาของเดิม 2 ล้านไร่ รวม 7 ล้านไร่ เพื่อนำไปผลิตไบโอดีเซล [2] ส่งผลให้มีวัสดุที่เหลือทิ้งเพิ่มขึ้นประมาณ 8,750,000 ตันต่อปี และเข้าปาล์มน้ำมันประมาณ 437,000 ตันต่อปี

แกลบเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตรเช่นกัน ในปีหนึ่ง ๆ ประเทศไทยได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ในแต่ละตันเมื่อผ่านกระบวนการสีแล้วจะได้แกลบออกมาประมาณ 200 กก. และเมื่อนำแกลบไปเผาจะได้อ่างแกลบ ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบ [3] จากงานวิจัยด้านคอนกรีตต่างๆ แกลบสามารถผลิตเป็นคอนกรีต และเข้าแกลบมาผสมกับปูนซีเมนต์ได้

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้

วัสดุที่ใช้ประกอบด้วย กะลาปาล์มน้ำมันได้รับการสนับสนุนจากบริษัทค้าสูง (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ตำบลกะลาเส อำเภอลิเกา จังหวัดตรัง ส่วนแกลบได้จากแกลบข้าวในท้องถิ่น อำเภอรโนด จังหวัดสงขลา ทราชน้ำจืดชนิดหยาบทั่วไป และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (รูปที่ 1) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบกึ่งปริมาณของแกลบ (ตารางที่ 1) มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 รวมกันได้ประมาณร้อยละ 63.76 จัดเป็นสารปอซโซลานชนิด C ทราชน้ำจืดชนิดหยาบมากที่สุดที่ 4.75-0.60 มม. โดยปริมาณที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 1.18-0.60 มม. ถึง 35.69% มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Modulus of Fineness, F.M.) เท่ากับ 3.28 ส่วนแกลบ ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์อนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ พบว่ากระจายอยู่ในช่วง 0.869 ถึง 133.8 ไมครอน โดยค่ามัธยฐานเท่ากับ 31.21 ไมครอน และกะลาปาล์มน้ำมันมีการกระจายขนาดในช่วง 4.70 ถึง 9.50 มม. กระจายตัวมากที่สุดที่ 6.50 มม. เท่ากับ 51.11% ค่าโมดูลัสความละเอียด 1.97 จึงทำให้ต้องการน้ำมากในการหล่อคอนกรีต



รูปที่ 1 การกระจายขนาดของวัสดุดิบในคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันผสมแกลบ

2.2 การเตรียมและอัตราส่วนผสมของคอนกรีต

กะลาปาล์มน้ำมัน ใช้เป็นมวลรวมหยาบล้างด้วยน้ำเปล่าให้น้ำมันเคลือบผิวและฝุ่นออก ตากแดด และอบให้แห้งสนิท (50°ซ.)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

ทางเคมี	RHA (%)	OPC (%)
SiO_2	63.55	21.85
Al_2O_3	0.12	5.39
Fe_2O_3	0.09	2.10
CaO	0.58	65.91
MgO	0.41	1.16
K_2O	2.36	0.31
SO_3	0.30	2.51
LOI	4.80	0.96
ทางกายภาพ		
พื้นที่ผิว (m^2/g)	51.613	1.628
พื้นที่ความพรุน (m^2/g)	3.961	0
ความถ่วงจำเพาะ	2.22	3.15

คัดและคละขนาดในคอนกรีต 9.50, 6.50 และ 4.70 มม. เป็นปริมาณ 11, 51 และ 38% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนแกลบเผาในระบบเปิดจนแกลบได้เป็นแกลบสีขาวเทา แล้วนำมาบดละเอียดและคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมครอน) และกำหนดปริมาณแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำ:วัสดุประสาน (w/b) (ตารางที่ 2) อัตราส่วนปูนซีเมนต์:ทราชน้ำจืดเป็น 1.71 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์:กะลาปาล์มน้ำมันเป็น 0.77 โดยกะลาปาล์มน้ำมัน คัดโดยน้ำหนัก วัดความเร็วคลื่น (ultrasonic pulse velocity test) และทดสอบกำลังดึงด้วยก้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 20 ซม. ทดสอบแรงอัดหล่อก้อนขนาด 10×10×10 ซม. บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง (25°ซ.) เป็นเวลา 7 และ 28 วัน เฉลี่ยทดสอบอัตราส่วนละ 3 ก้อน

ตารางที่ 2 ออกแบบอัตราส่วนของวัสดุผสมในคอนกรีตทดสอบ

วัสดุ	อัตราส่วน	ปริมาณ (กก/ลบ.ม.)			
		0	10%	20%	30%
w/b		0.45	0.51	0.58	0.70
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		500	450	400	350
แกลบ		0	50	100	150
กะลาปาล์มน้ำมัน		385	385	385	385
ทราชน้ำจืด		855	855	855	855
น้ำ (w)		225	255	290	355
การยุบตัว (มม.)		55	60	50	55

2.3 วิธีการทดสอบก่อนตัวอย่าง

ทดสอบพฤติกรรมการความชื้นเหลวปกติ (ASTM 187) ทดสอบเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมแกลบ (ASTM C191) ทดสอบการยุบตัว (ASTM C143) สำหรับก้อนคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ (ASTM C1403) การหดตัวแบบแห้ง

(ASTM C596) การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านคอนกรีต (ASTM C597-97) กำลังดึงแบบผ้าซีก (ASTM C496) และกำลังอัด (ASTM C109M-01)

3. ผลและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะมวลรวมจากกะลาปาล์มน้ำมัน

สมบัติทางกายภาพของมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน [4] ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 พบว่ามีรูปทรงแบนไม่สม่ำเสมอ ผิวมีทั้งโค้งเว้าและนูน เนื้อค่อนข้างเรียบมีเส้นใยติดหลงเหลืออยู่บ้าง มีความหนาในช่วง 2.3-3.0 มม. เฉลี่ย 2.8 มม. ขอบรอยแตกแหลมและคมขึ้นกับการแตกตอนหีบผลปาล์ม การดูดซึมน้ำค่อนข้างมาก ค่ากระแทกของกะลาปาล์มที่สดมีค่าน้อยกว่าที่แห้งถึงร้อยละ 60 จัดเป็นมวลรวมประเภทแข็งมาก ค่าการสึกหรอบบลดอสแองเจลีส์ มีค่าน้อยมากเช่นกัน (4.64-4.76) และค่าความหนาแน่นแบบหลวมและแบบแน่นเท่ากับ 580 และ 648 กก/ลบ.ม. ตามลำดับ

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและทราย [4]

สมบัติมวลรวม	กะลาปาล์ม น้ำมัน	ทราย
ดัชนีความแบน (%)	61.49-69.18	-
ดัชนีความยาวเรียว (%)	54.45-69.86	-
ความถ่วงจำเพาะแห้ง	1.15	2.61
การดูดซึมน้ำ (%)	17.76	0.46
โมดูลัสความละเอียด	1.97	3.28
กระแทกมวลรวม (%)	0.80-2.52	-
สึกหรอบบลดอสแองเจลีส์ (%)	4.64-4.76	-
ความหนาแน่นแบบหลวม (กก/ลบ.ม)	580.51	-
ความหนาแน่นแบบแน่น (กก/ลบ.ม)	648.45	-

3.2 การก่อดัวของซีเมนต์เพสต์

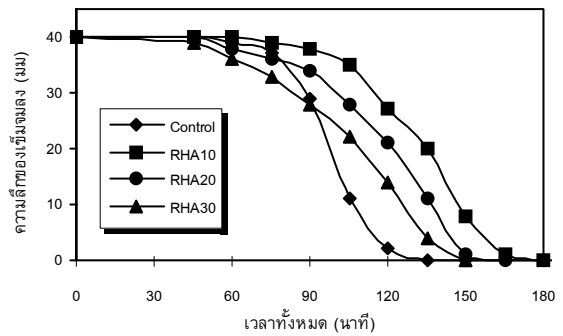
ระยะเวลาการก่อดัวเริ่มต้นและสิ้นสุดของซีเมนต์เพสต์เร็วที่สุด ส่วนซีเมนต์เพสต์หรือน้ำปูนชั้นผสมเถ้าแกลบ 30% ระยะเวลาการก่อดัวเริ่มต้นช้าที่สุด (รูปที่ 2) และระยะเวลาสิ้นสุดการก่อดัวช้าที่สุดเทียบกับน้ำปูนชั้นผสมเถ้าแกลบ นั่นคือปริมาณเถ้าแกลบแทนที่มากขึ้นทำให้เวลาการก่อดัวสั้นลง (รูปที่ 3)

3.3 การยุบตัว

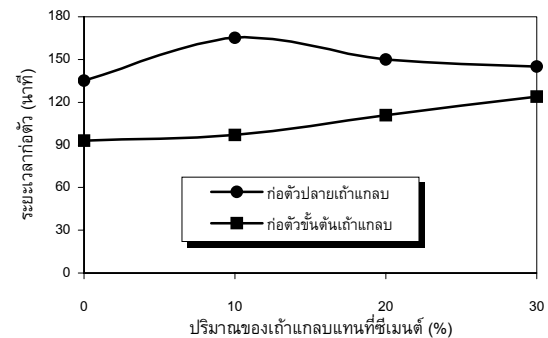
การยุบตัวของคอนกรีตสดที่ผสมมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ ได้ควบคุมให้การยุบตัวอยู่ระหว่าง 50-60 มม. มีระดับความสามารถในการเทได้ต่ำถึงปานกลาง [3] ลักษณะการยุบเป็นแบบการยุบตัวจริง (true slump) ซึ่งคอนกรีตสดไม่แทนที่เถ้าแกลบ มีค่า $w/b = 0.45$ ส่วนคอนกรีตสดแทนที่เถ้าแกลบ 30% มีค่า $w/b = 0.70$ มากที่สุด พบว่าการแทนที่ของเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้องการใช้น้ำมากขึ้นเช่นกัน (ตารางที่ 2)

3.4 การหดตัวแบบแห้ง

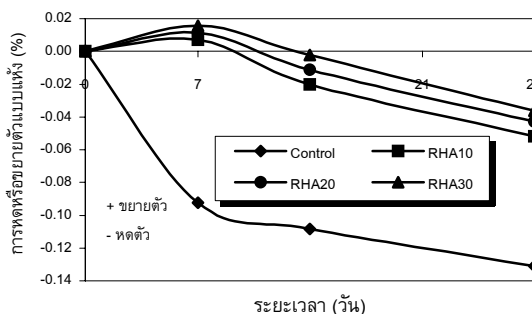
การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันแปรผันตามปริมาณเถ้าแกลบ คอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบ 10% ที่ 7 วัน มีการขยายตัวมากที่สุดถึง 0.009% ส่วนคอนกรีตแทนด้วยเถ้าแกลบ 30% ที่ 28 วัน มีการหดตัวน้อยสุดถึง 0.036% (รูปที่ 4) ซึ่งบ่งว่าการเติมเถ้าแกลบช่วยลดการหดตัวได้อย่างชัดเจนแก่คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 2 อัตราการแทรกจมลงของเข็มวัดแคตในตัวอย่างน้ำปูนชั้นผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วนต่างๆ กับเวลาที่แปรผัน



รูปที่ 3 ช่วงเวลาการก่อดัวของตัวอย่างน้ำปูนชั้นผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 4 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ

3.5 การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ที่อัตราส่วนเดียวกันจะมีค่าแปรปรวนตามอายุบ่ม แต่จะมีค่าใกล้เคียง

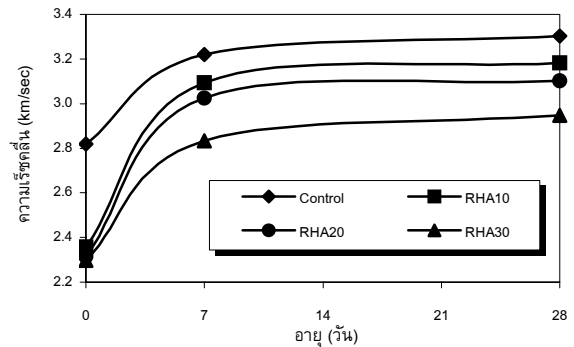
กัน ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ (รูปที่ 5) มีค่าในช่วง 12-19% ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของความพรุนในกะลาปาล์มน้ำมันส่งผลให้ค่าแปรปรวนและปริมาณเถ้าแกลบเองทำให้มีการดูดซึมน้ำสูงขึ้น

3.6 ความหนาแน่นรวม

ความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน พบว่าแปรผกผันกับปริมาณเถ้าแกลบและแปรผันตามอายุ (รูปที่ 6) ความหนาแน่นรวมแห้งต่ำสุดที่ 1685 กก/ม³ ผสมเถ้าแกลบ 30% ที่ 28 วัน โดยก้อนคอนกรีตมีความหนาแน่นแห้งระหว่าง 1685-1849 กก/ม³ จัดอยู่ในเขตแดนบนของคอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้าง (ASTM C330) ซึ่งมีค่า 1350-1900 กก/ม³ และมีค่าต่ำกว่าผลงานวิจัยของ Basri et al. [5]

3.7 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค

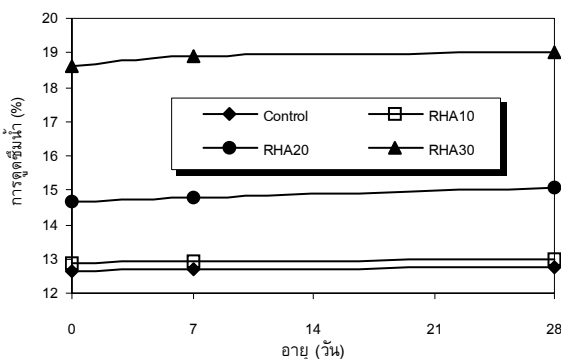
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน มีค่าแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ (รูปที่ 7) และที่อัตราส่วนเดียวกันมีค่าความเร็วคลื่นเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม พบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงสุด 3.30 กิโลเมตรต่อวินาที ที่ไม่ผสมเถ้าแกลบบ่ม 28 วัน โดยค่าความเร็วคลื่นอยู่ในช่วง 2.30-3.30 กิโลเมตรต่อวินาที จัดเป็นคุณภาพของคอนกรีตระดับต่ำถึงพอใช้ (ตารางที่ 4) [6] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mannan et al. [7]



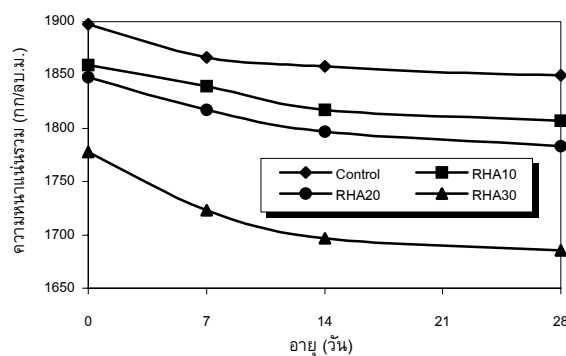
รูปที่ 7 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 4 คุณภาพคอนกรีตในพจน์ของความเร็คลื่นตามยาว [4]

ลำดับ	ความเร็วคลื่นตามยาว (กิโลเมตรต่อวินาที)	คุณภาพของคอนกรีต
1	4.50	ดีเยี่ยม
2	3.50-4.50	ดี
3	3.00-3.50	พอใช้
4	2.00-3.00	ต่ำ
5	2.00	ต่ำมาก



รูปที่ 5 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 6 ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ

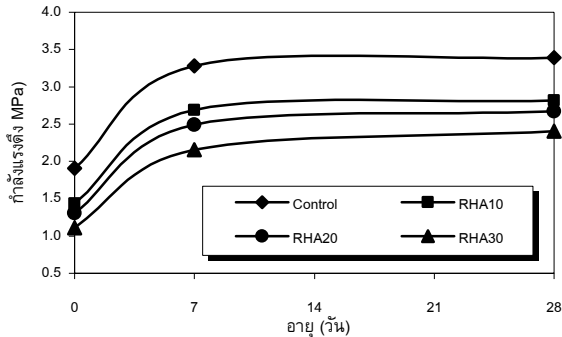
3.8 กำลังแรงดึง

กำลังแรงดึงของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันทดสอบโดยวิธีผ่าซีก (splitting tensile strength) มีค่ากำลังแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 3.38 เมกะพาสคัล ที่ไม่ผสมเถ้าแกลบบ่ม 28 วัน และค่ากำลังแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุดคือ 1.10 เมกะพาสคัล ที่ผสมเถ้าแกลบ 30% ที่ไม่บ่ม (รูปที่ 8) กำลังแรงดึงจะลดลงตามปริมาณแทนที่ของเถ้าแกลบที่อายุบ่มเดียวกัน ทุกอัตราส่วนมีค่ากำลังแรงดึงเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มเช่นกัน ซึ่งเกิดการพัฒนาด้านกำลังแรงดึงในช่วงสั้นหลังจากอายุบ่ม 7 วัน จะมีค่ากำลังแรงดึงเพิ่มขึ้น พบว่าเนื้อปูนคอนกรีตรับกำลังแรงดึงดีกว่าเนื้อวัสดุประสาน ซึ่งผลครั้งนี้มีค่าสูงกว่าผลวิจัยของ Mannan and Ganapathy [8] อยู่ประมาณ 20%

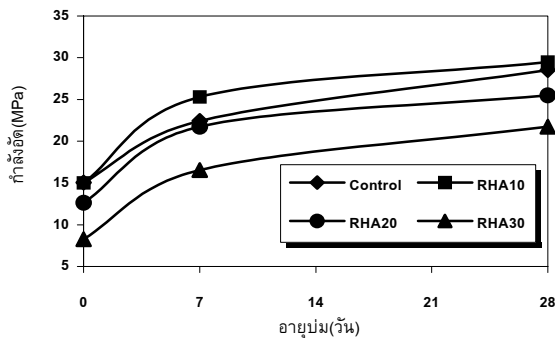
3.9 กำลังอัด

คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดที่ 29.49 เมกะพาสคัล ที่ผสมเถ้าแกลบ 10% บ่ม 28 วัน และค่ากำลังอัดเฉลี่ยต่ำสุดคือ 8.26 เมกะพาสคัล ที่ผสมเถ้าแกลบ 30% ที่ไม่บ่ม กำลังอัดจะลดลงตามปริมาณแทนที่เถ้าแกลบที่อายุบ่มเดียวกัน และทุกอัตราส่วนเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มเช่นกัน อย่างไรก็ตามแนวโน้มกำลังอัดคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแทบทุกปริมาณเถ้าแกลบแทนที่ (รูปที่ 9) อันบ่งชี้ว่าเถ้าแกลบต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ค่าดัชนีกำลัง (strength activity index) ประจักษ์ชัดว่าในช่วง 10% เกิดการพัฒนาด้านกำลังขึ้น (รูปที่ 10) ลักษณะการพิบัติก่อนคอนกรีตทำให้ตัวมวลรวมจากกะลาปาล์มแตกออกด้วย ดังนั้นความแข็งกะลาปาล์มเองมีส่วนช่วยให้ก้อนคอนกรีตมีกำลังเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่ากำลังอัดที่ได้อยู่ในเกณฑ์คอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้าง (ไม่น้อยกว่า 17 เม

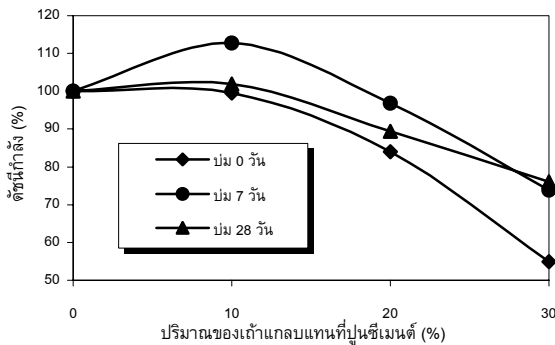
กะปาสคัล บ่ม 28 วัน) [5] และยิ่งสูงกว่าในผลงานวิจัยของ Mannan and Ganapathy [8, 9]



รูปที่ 8 กำลังดึงของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 9 กำลังอัดของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 10 ดัชนีกำลังอัดของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังดึง พบว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมทุกอัตราส่วนเถ้าแกลบมีค่ากำลังดึง 10% ของกำลังอัด ในช่วงอายุบ่ม 7 วัน หลังจากบ่ม 28 วัน พบว่าแนวโน้มกำลังอัดมีการพัฒนาด้านกำลังก้ำก๋าวหน้าได้ดีกว่ากำลังดึงที่มีการพัฒนาด้านกำลังอย่างช้าๆ (รูปที่ 8)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมทุกปริมาณเถ้าแกลบ พบว่าความเร็วคลื่นมีค่าต่ำกว่าที่ไม่ผสมเถ้า

แกลบ ส่วนกำลังอัดที่ผสมเถ้าแกลบ 10% มีค่าสูงกว่าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ นั่นคือเถ้าแกลบมีผลทำให้ความเร็วคลื่นลดลงแต่ไม่มีผลต่อกำลังอัด อีกนัยหนึ่งเวลาของคลื่นที่ผ่านคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันสามารถผ่านได้ดีกว่าที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ควบคุมค่าการยุบตัว ให้มีความสามารถในการเทได้ โดยใช้คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าแกลบ การแทนที่ของเถ้าแกลบนั้นทำให้มีความต้องการใช้น้ำมาก ช่วยลดระยะเวลาการก่อตัว การหดตัว และความหนาแน่นรวม ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกลดลง การดูดซึมน้ำสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น การพัฒนาด้านกำลังอัดผลแทนที่เถ้าแกลบ 10% สูงกว่าคอนกรีตควบคุม 10% และอัตราส่วนอื่นลดลงราวอัตราส่วนละ 14% เถ้าแกลบมีข้อดีต่อการพัฒนาด้านกำลังแรงดึง มีค่ากำลังแรงดึง 10% ของกำลังอัด และผลแทนที่เถ้าแกลบกำลังดึงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม 20% อย่างไรก็ตามความหนาแน่นรวมและกำลังอัดอยู่ในช่วงเกณฑ์คอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้าง และช่วยลดเวลาการบ่มคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานได้เร็วขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนบางส่วนจากบัณฑิตวิทยาลัย ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตสงขลา

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานสถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย. 2549. ปีเพาะปลูก 2548/49. ศูนย์สารสนเทศการเกษตรสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์. เล่มที่ 47.
- [2] http://www.doa.go.th/meeting_doa/roadmap_power.pdf, แหล่งที่มา กรมวิชาการเกษตร. 2550. Road Map การผลิตพืชทดแทนพลังงาน: สืบค้นเมื่อ 11 พฤษภาคม 2550
- [3] Nair, D.G., Jagadish, K.S. and Fraaij, A. 2006. Reactive Pozzolanas From Rice Husk Ash: An Alternative to Cement for Rural Housing. Cement and Concrete Research 36(6): 1062–1071.
- [4] ดนุพล ตันนโยภาส และ อภิชาติ พ่วงพี. 2548. คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมหินฝุ่นแกรนิต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, พิษณุโลก, ประเทศไทย, 2-4 พ.ค. 2550: Volume 5 (MAT): 175-180.
- [5] Basri, H.B., Mannan, M.A. and Zain, M.F.M. 1999. Concrete using Waste Oil Palm Shells as Aggregate. Cement and Concrete Research, 29(4): 619-622.

- [6] Neville, A.M. 1995. Properties of concrete. 4th ed., London, Longman Group Limited.
- [7] Mannan, M.A., Basri, H.B., Zain, M.F.M. and Islam, M.N. 2002. Effect of Curing Conditions on the Properties of OPS-Concrete. Building and Environment, 37(11): 1167-1171.
- [8] Mannan, M.A. and Ganapathy, C., 2002. Engineering Properties of Concrete with Oil Palm Shell as Coarse Aggregate. Construction and Building Materials, 16(1): 29-34.
- [9] Mannan, M.A. and Ganapathy, C. 2001. Mix Design for Oil Palm Shell Concrete. Cement and Concrete Research, 31(9): 1323-1325.

POZZOLANIC INFLUENCE OF OIL PALM FIBER ASH ON PHYSICO-MECHANICAL
PROPERTIES OF OIL PALM SHELL AGGREGATE CONCRETE

พรนรายณ์ บุญราศรี (Pornarai Boonrasi)¹

ดนุพล ตันนโยภาส (Danupon Tonnayopas)²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ E-mail: pornarai@yahoo.com

²รศ.ดร. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ E-mail: danupon.t@psu.ac.th

บทคัดย่อ : ศึกษาอิทธิพลของเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตที่มีกะลาปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวมหยาบ เถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 โดยน้ำหนัก ได้ทดสอบพฤติกรรมความชื้นเหลวและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เฟสผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน สมบัติทางกายภาพและเชิงกลอันประกอบด้วย การหดตัวแบบแห้ง ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค กำลังแรงดึง และกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มเปรียบเทียบกับก้อนลูกบาศก์ที่บ่มในน้ำที่ 7 และ 28 วัน คอนกรีตกะลาปาล์มสดพบว่ามีความสามารถในการเทได้ดีกว่า ในขณะที่ความหนาแน่นแห้งในอากาศที่ 28 วัน มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมอยู่ร้อยละ 0.2-5 นอกจากนี้กำลังอัดที่ 28 วัน ได้ลดลงน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 10-30 เถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีดัชนีกำลังร้อยละ 90 อย่างไรก็ตามผลทั้งหลายก็ยังคงอยู่ในพิสัยคอนกรีตมวลเบางานโครงสร้าง

ABSTRACT : Pozzolanic influence of oil palm fiber ash (OPFA) on physico-mechanical properties of concrete with oil palm shells (OPS) as coarse aggregate has been determined. OPFA was replaced ordinary Portland cement, type 1 (OPC) with different proportions of 10, 20, and 30wt.%. OPFA cement pastes behaviors in normal consistency of hydraulic and setting time were also carried out. Physical and mechanical properties consisting of drying shrinkage, bulk density, water absorption, ultrasonic velocity, tensile strength, and compressive strength of OPS concrete were compared with cubes cured in water at 1, 7 and 28-day. Fresh OPS concrete was found to have better workability while its 28-day air-dry density was 0.2-5% lower than control concrete. Nevertheless, 28-day compressive strength was decreased 10-30% lower than control concrete. The 10%OPFA concrete has revealed pozzolanic strength index of 90%. However, these results were still within the normal range for structural lightweight concrete.

KEYWORDS : Oil palm fiber ash, Oil palm shell, Lightweight concrete, Pozzolanic reaction, Ultrasonic velocity

1. บทนำ

อุตสาหกรรมเกษตรที่สำคัญในภาคใต้ของประเทศไทย

ได้แก่ ยางพารา ปาล์มน้ำมัน และมะพร้าว จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ปี

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

ทางเคมี	OPFA (%)	OPC (%)
SiO ₂	38.21	21.85
Al ₂ O ₃	0.87	5.39
Fe ₂ O ₃	1.71	2.10
CaO	10.53	65.91
MgO	3.01	1.16
K ₂ O	6.62	0.31
SO ₃	1.50	2.51
LOI	12	0.96
ทางกายภาพ		
พื้นที่ผิว (ม ² /กรัม)	5.138	1.628
พื้นที่ความพรุน (ม ² /กรัม)	0	0
ความถ่วงจำเพาะ	2.02	3.15

ตารางที่ 2 ออกแบบอัตราส่วนของวัสดุผสมในคอนกรีตทดสอบ

วัสดุ	อัตราส่วน			
	ปริมาณ (กก/ลบ.ม.)			
	0	10%	20%	30%
w/b	0.45	0.46	0.48	0.52
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	500	450	400	350
เถ้าไพล่าม่น้ำมัน	0	50	100	150
กะลาไพล่าม่น้ำมัน	385	385	385	385
ทราย	855	855	855	855
น้ำ (w)	225	255	290	355
การยุบตัว (มม.)	55	60	50	60

2.2 การเตรียมและอัตราส่วนผสมของคอนกรีต

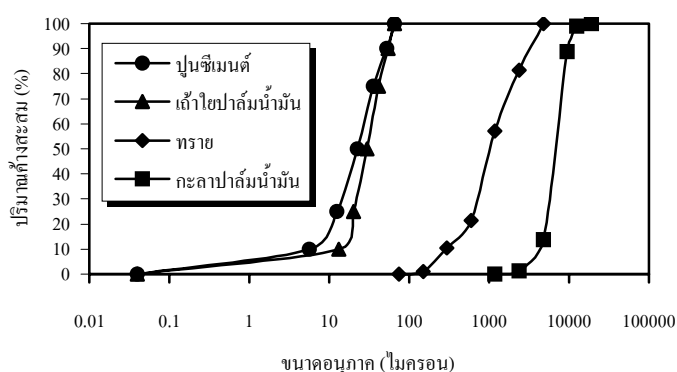
กะลาไพล่าม่น้ำมัน ใช้เป็นมวลรวมหยาบล้างด้วยน้ำเปล่าให้น้ำมันเคลือบผิว และฟุ้งออก ตากแดด และอบให้แห้งสนิท (50°C) คัดและคัดขนาดในคอนกรีต 9.50, 6.50 และ 4.70 มม. เป็นปริมาณ 11, 51 และ 38% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนเถ้าไพล่าม่น้ำมัน นำมาคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมครอน) และกำหนดปริมาณเถ้าไพล่าม่น้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำ:วัสดุประสาน (w/b) ยึดถือตามค่าความชื้นเหลว (ตารางที่ 2) อัตราส่วนปูนซีเมนต์:ทราย เป็น 1.71 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์:กะลาไพล่าม่น้ำมันเป็น 0.77 โดยกะลาไพล่าม่น้ำมัน คัดโดยน้ำหนัก วัดความเร็วคลื่นเหนือเสียง (ultrasonic pulse velocity test) และทดสอบกำลังดึงด้วยก้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 20 ซม. ทดสอบ

พ.ศ. 2548 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันประมาณ 2,026,204 ไร่ และมีผลผลิตประมาณ 5,002,670 ตันต่อปี [1] ทำให้มีวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ได้แก่ ทะลายปาล์ม ใบจากเปลือก และกะลาหุ้มเนื้อ ประมาณ 2,501,335 ตันต่อปี และได้เถ้าปาล์มน้ำมัน ประมาณ 125,066 ตันต่อปี นอกจากนี้จากข้อมูลจากกรมวิชาการเกษตร วางเป้าหมายปี พ.ศ. 2548-2551 ขยายพื้นที่ปาล์ม 5 ล้านไร่ และพัฒนาของเดิม 2 ล้านไร่ รวม 7 ล้านไร่ เพื่อนำไปผลิตไบโอดีเซล [2] ส่งผลให้มีวัสดุที่เหลือทิ้งเพิ่มขึ้นประมาณ 8,750,000 ตันต่อปี และได้เถ้าปาล์ม น้ำมันประมาณ 437,000 ตันต่อปี

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้

วัสดุที่ใช้ประกอบด้วย กะลาไพล่าม่น้ำมันและเถ้าไพล่าม่น้ำมัน ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทล่าสูง (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ตำบลกะลาเส อำเภอสีเกา จังหวัดตรัง ทรายน้ำจืดชนิดหยาบทั่วไป และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (ภาพที่ 1) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบกึ่งปริมาณของเถ้าไพล่าม่น้ำมัน (ตารางที่ 1) มีปริมาณ SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ รวมกันได้ประมาณร้อยละ 40.79 ไม่จัดเป็นสารพิษอันตราย ทรายน้ำจืดกระจายมากที่สุดที่ 4.75-0.60 มม. มีปริมาณมากที่สุดอยู่ในช่วง 1.18-0.60 มม. ถึง 35.69% มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.28 ส่วนเถ้าไพล่าม่น้ำมัน ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์อนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ พบว่ากระจายอยู่ในช่วง 0.040 ถึง 234.1 ไมครอน โดยค่ามัธยฐานเท่ากับ 32.74 ไมครอน และกะลาไพล่าม่น้ำมันมีการกระจายขนาดในช่วง 4.70 ถึง 9.50 มม. กระจายตัวมากที่สุดที่ 6.50 มม. เท่ากับ 51.11% ค่าโมดูลัสความละเอียด 1.97 จึงทำให้ความต้องการน้ำมากในการหล่อคอนกรีต



ภาพที่ 1 การกระจายขนาดของวัสดุคืบในคอนกรีตกะลาไพล่าม่น้ำมัน

แรงอัดกับก้อนตัวอย่างขนาด $10 \times 10 \times 10$ ซม. บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง (25° ซ.) เป็นเวลา 7 และ 28 วัน ทดสอบอัตราส่วนละ 3 ก้อน มาเฉลี่ยค่า

2.3 วิธีการทดสอบก้อนตัวอย่าง

ทดสอบพฤติกรรมความขึ้นเหลวปกติ (ASTM 187) ทดสอบเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าไพล่าม่น้ำมัน (ASTM C191) ทดสอบการยุบตัว (ASTM C143) สำหรับก้อนคอนกรีตมวลรวมกะลาไพล่าม่น้ำมันทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ (ASTM C1403) การหดตัวแบบแห้ง (ASTM C596) การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีต (ASTM C597-97) กำลังดึงแบบผ่าซีก (ASTM C496) และกำลังอัด (ASTM C109M-01)

3. ผลและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะมวลรวมจากกะลาไพล่าม่น้ำมัน

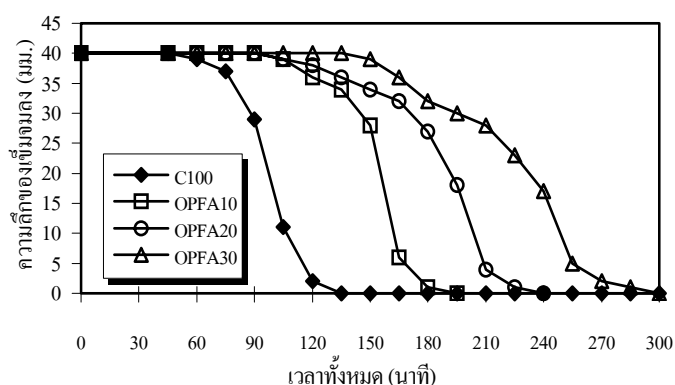
สมบัติทางกายภาพของมวลรวมกะลาไพล่าม่น้ำมัน [3] ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 พบว่ามีรูปทรงแบนไม่สม่ำเสมอ ผิวมีทั้งโค้งเว้าและนูน เนื่องจากข้างเรียบมีเส้นใยติดหลงเหลืออยู่บ้าง มีความหนาในช่วง 2.3-3.0 มม. เฉลี่ย 2.8 มม. ขอบรอยแตกแหลมและคมขึ้นกับการแตกต่อนหีบผลไพล่าม่น้ำมัน การดูดซึมน้ำค่อนข้างมาก ค่ากระแทกของกะลาไพล่าม่น้ำมันที่สดมีค่าน้อยกว่าที่แห้งถึงร้อยละ 60 จัดเป็นมวลรวมประเภทแข็งมาก ค่าการสึกหรอแบบลอสแอนเจลิส มีค่าน้อยมากเช่นกัน (4.64-4.76) และค่าความหนาแน่นแบบหลวมและแบบแน่นเท่ากับ 580 และ 648 กก/ลบ.ม. ตามลำดับ

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมกะลาไพล่าม่น้ำมัน [3] และทราย

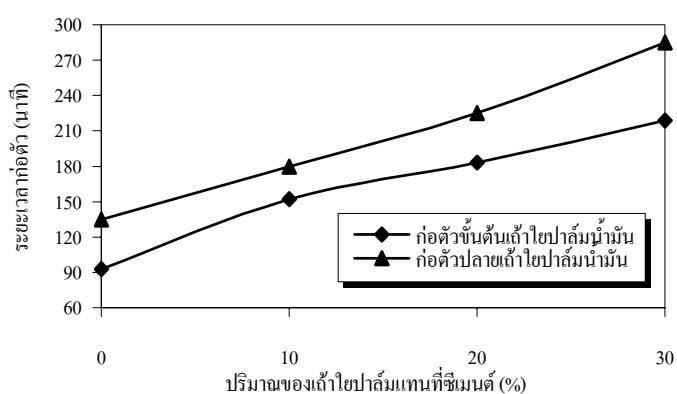
สมบัติมวลรวม	กะลาไพล่าม่น้ำมัน	ทราย
ดัชนีความแบน (%)	61.49-69.18	-
ดัชนีความยาวเรียว (%)	54.45-69.86	-
ความถ่วงจำเพาะแห้ง	1.15	2.61
การดูดซึมน้ำ (%)	17.76	0.46
โมดูลัสความละเอียด	1.97	3.28
กระแทกมวลรวม (%)	0.80-2.52	-
สึกหรอแบบลอสแอนเจลิส (%)	4.64-4.76	-
ความหนาแน่นแบบหลวม (กก/ลบ.ม)	580.51	-
ความหนาแน่นแบบแน่น (กก/ลบ.ม)	648.45	-

3.2 การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดของซีเมนต์เพสต์เร็วที่สุดส่วนซีเมนต์เพสต์หรือน้ำปูนขึ้นผสมเถ้าไพล่าม่น้ำมัน 30% ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดช้าที่สุด (ภาพที่ 2) และน้ำปูนขึ้นผสมเถ้าไพล่าม่น้ำมันที่ 20%, 10% ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดเร็วขึ้นตามลำดับ นั่นคือปริมาณเถ้าไพล่าม่น้ำมันแทนที่มากขึ้นทำให้ยืดเวลาก่อตัวนานขึ้น (ภาพที่ 3) ซึ่งอาจนำไปใช้เป็นสารผสมเพิ่มหน่วงเวลาก่อตัวในงานตกแต่งผิว



ภาพที่ 2 อัตราการแทรกของเข็มไวกัดในตัวอย่างน้ำปูนขึ้นผสมเถ้าไพล่าม่น้ำมันที่อัตราส่วนต่างๆ กับเวลาที่แปรผัน



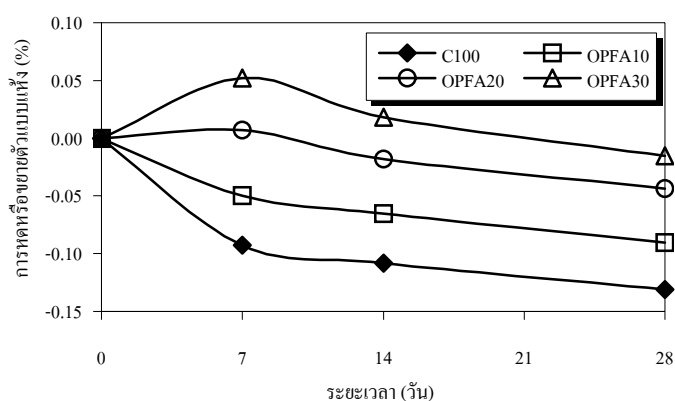
ภาพที่ 3 ช่วงเวลาก่อตัวของตัวอย่างน้ำปูนขึ้นผสมเถ้าไพล่าม่น้ำมัน

3.3 การยุบตัว

การยุบตัวของคอนกรีตสดที่ผสมมวลรวมกะลาไพล่าม่น้ำมันและเถ้าไพล่าม่น้ำมัน ได้ควบคุมให้ค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 50-60 มม. มีระดับความสามารถในการเทได้ต่ำถึงปานกลาง [3] ลักษณะการยุบเป็นแบบการยุบตัวจริง (true slump) ซึ่งคอนกรีตสดไม่แทนที่เถ้าไพล่าม่น้ำมัน มีค่า $w/b = 0.45$ ส่วนคอนกรีตสดแทนที่เถ้าไพล่าม่น้ำมัน 30% มีค่า $w/b = 0.52$ มากที่สุด พบว่าการแทนที่ของเถ้าไพล่าม่น้ำมันเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้องการใช้น้ำมากขึ้นด้วยเช่นกัน (ตารางที่ 2)

3.4 การหดตัวแบบแห้ง

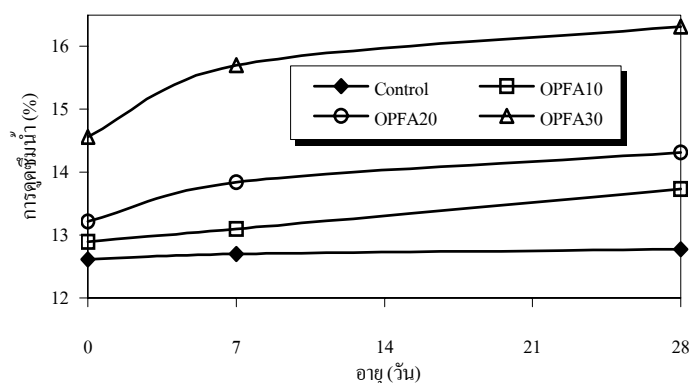
การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน แปรผันตามปริมาณเถ้ายปาล์มน้ำมัน คอนกรีตแทนที่เถ้ายปาล์มน้ำมัน 30% ที่ 7 วัน มีการขยายตัวมากที่สุดถึง 0.052% ส่วนคอนกรีตแทนด้วยเถ้ายปาล์มน้ำมัน 30% ที่ 28 วัน มีการหดตัวน้อยสุดถึง 0.036% (ภาพที่ 4) ซึ่งบ่งว่าการเติมเถ้ายปาล์มน้ำมันช่วยลดการหดตัวได้อย่างชะงัดแก่คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้ายปาล์มน้ำมัน



ภาพที่ 4 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้ายปาล์มน้ำมัน

3.5 การดูดซึมน้ำ

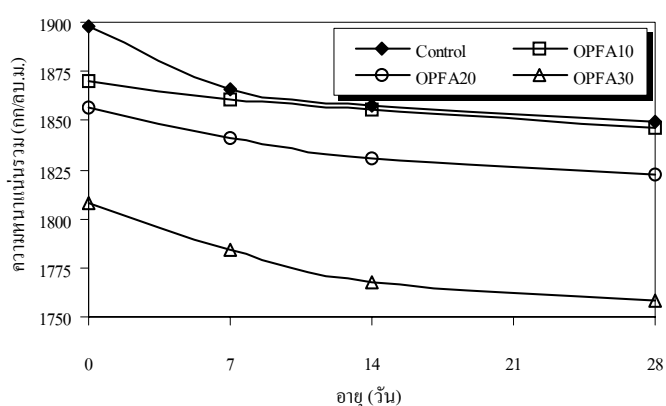
การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน ที่อัตราส่วนเดียวกันจะมีค่าแปรปรวนตามอายุบ่ม แต่มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้ายปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ (ภาพที่ 5) มีค่าในช่วง 12.6-16.3% ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของความพรุนในกะลาปาล์มน้ำมันนั้น ส่งผลให้ค่าแปรปรวน และปริมาณเนื้อเถ้ายปาล์มน้ำมันเองก็ทำให้การดูดซึมน้ำสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 5 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้ายปาล์มน้ำมัน

3.6 ความหนาแน่นรวม

ความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน พบว่าแปรผกผันกับปริมาณเถ้ายปาล์มน้ำมัน และแปรผันตามอายุ (ภาพที่ 6) ความหนาแน่นรวมแห้งต่ำสุดที่ 1760 กก/ม³ ผสมเถ้ายปาล์มน้ำมัน 30% ที่ 28 วัน โดยก่อนคอนกรีตมีค่าความหนาแน่นแห้งระหว่าง 1760-1849 กก/ม³ จัดอยู่ในเขตแดนบนของคอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้าง (ASTM C330) ซึ่งมีค่า 1350-1900 กก/ม³ และมีค่าต่ำกว่าผลงานวิจัยของ Basri et al. [4]



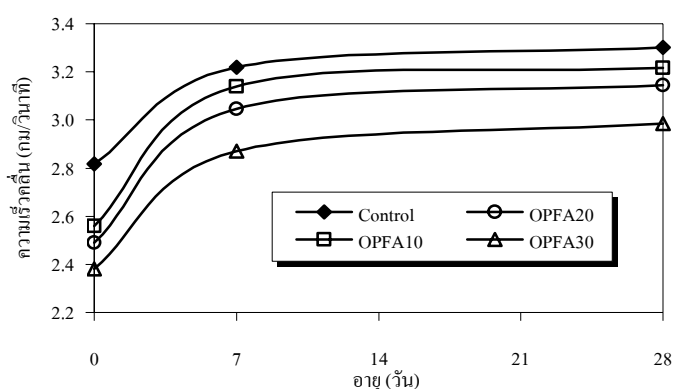
ภาพที่ 6 ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้ายปาล์มน้ำมัน

3.7 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน มีค่าแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้ายปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ (ภาพที่ 7) และที่อัตราส่วนเดียวกันมีค่าความเร็วคลื่นเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม พบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงสุด 3.30 กิโลเมตรต่อวินาที ที่ไม่ผสมเถ้ายปาล์มน้ำมันบ่ม 28 วัน โดยค่าความเร็วคลื่นอยู่ในช่วง 2.40-3.30 กิโลเมตรต่อวินาที จัดเป็นคุณภาพของคอนกรีตระดับต่ำถึงพอใช้ (ตารางที่ 4) [5] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mannan et al. [6]

ตารางที่ 4 คุณภาพคอนกรีตในพจน์ของความเร็วคลื่นตามยาว [4]

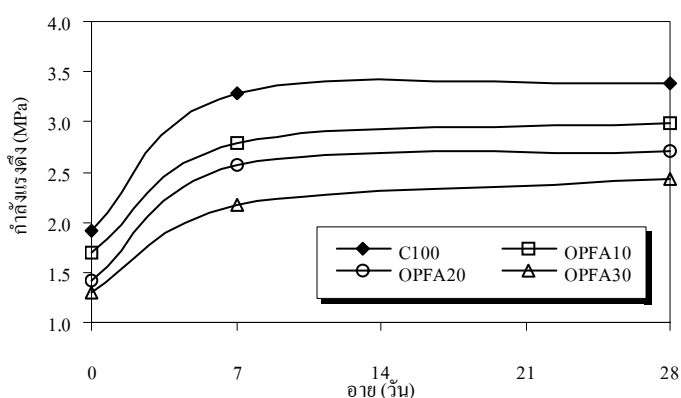
ลำดับ	ความเร็วคลื่นตามยาว (กิโลเมตรต่อวินาที)	คุณภาพของคอนกรีต
1	4.50	ดีเยี่ยม
2	3.50-4.50	ดี
3	3.00-3.50	พอใช้
4	2.00-3.00	ต่ำ
5	2.00	ต่ำมาก



ภาพที่ 7 ความเร็วคลิ่นอัตราไอออนิกของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

3.8 กำลังแรงดึง

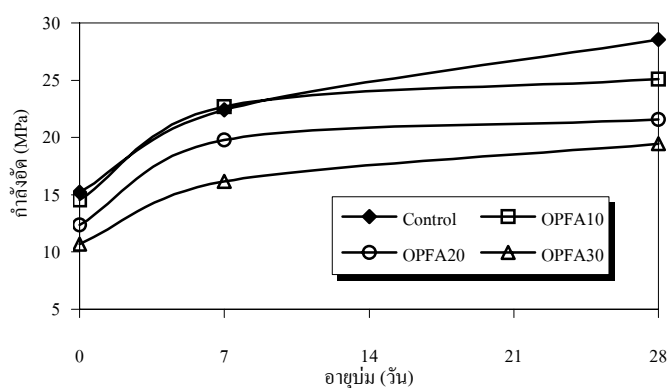
กำลังแรงดึงของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันทดสอบโดยวิธีผ่าซีก (splitting tensile strength) มีค่ากำลังแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 3.38 เมกะพาสคัล ที่ไม่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันบ่ม 28 วัน และค่ากำลังแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุดคือ 1.30 เมกะพาสคัล ที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน 30% ที่ไม่บ่ม (ภาพที่ 8) กำลังแรงดึงจะลดลงตามปริมาณแทนที่ของเถ้าไยปาล์มน้ำมันที่อายุบ่มเดียวกัน ทุกอัตราส่วนมีค่ากำลังแรงดึงเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มเช่นกัน ซึ่งเกิดการพัฒนาด้านกำลังแรงดึงในช่วงสั้น หลังจากอายุบ่ม 7 วัน จะมีค่ากำลังแรงดึงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำ) และความเร็วคลิ่นอัตราไอออนิก มีลักษณะเส้นกราฟคล้ายคลึงกัน (ภาพที่ 7, 8) พบว่าเนื้อปูนคอนกรีตกำลังแรงดึงดีกว่าเนื้อวัสดุประสาน ซึ่งผลครั้งนี้มีค่าสูงกว่าผลวิจัยของ Mannan and Ganapathy [7] อยู่ประมาณ 20%



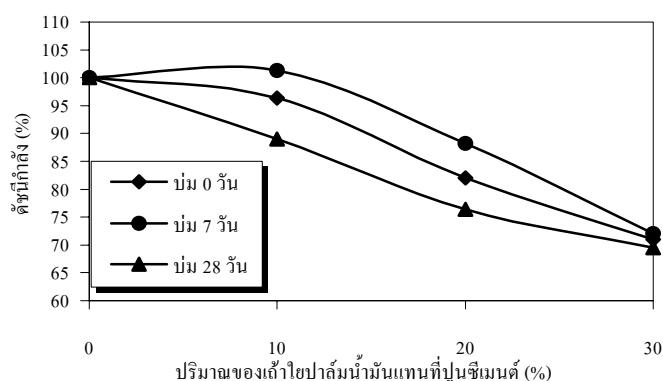
ภาพที่ 8 กำลังแรงดึงของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

3.9 กำลังอัด

คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดที่ 28.54 เมกะพาสคัล ที่ไม่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน บ่ม 28 วัน และค่ากำลังอัดเฉลี่ยต่ำสุดคือ 10.069 เมกะพาสคัล ที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน 30% ที่ไม่บ่ม กำลังอัดจะลดลงตามปริมาณแทนที่เถ้าไยปาล์มน้ำมันที่อายุบ่มเดียวกัน และทุกอัตราส่วนเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มเช่นกัน อย่างไรก็ตามแนวโน้มกำลังอัดคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแทบทุกปริมาณเถ้าไยปาล์มน้ำมันแทนที่ (ภาพที่ 9) อันบ่งชี้ว่าเถ้าไยปาล์มน้ำมันต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ค่าดัชนีกำลัง (strength activity index) ประจักษ์ชัดว่าในช่วง 10% เกิดการพัฒนาด้านกำลังขึ้น (ภาพที่ 10) ลักษณะการพิบัติก่อนคอนกรีตทำให้ตัวมวลรวมจากกะลาปาล์มแตกออกด้วย ดังนั้นความแข็งกะลาปาล์มเองมีส่วนช่วยทำให้ก่อนคอนกรีตมีกำลังเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่ากำลังอัดที่ได้อยู่ในเกณฑ์คอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้าง (ไม่น้อยกว่า 17 เมกะพาสคัล บ่ม 28 วัน) [4] ซึ่งสูงกว่าค่าในผลงานวิจัยของ Mannan and Ganapathy [7, 8]



ภาพที่ 9 กำลังอัดของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน



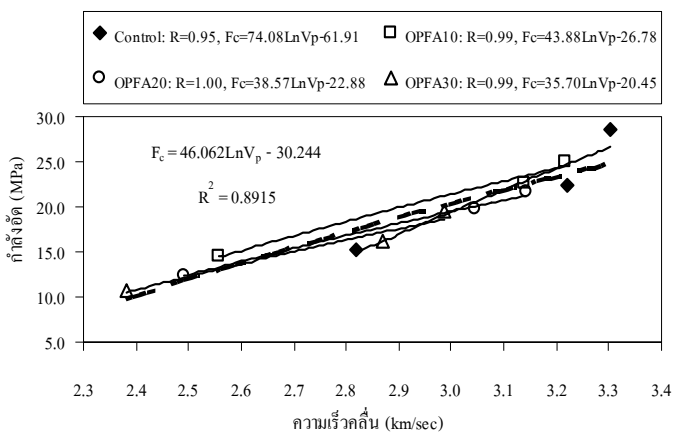
ภาพที่ 10 ดัชนีกำลังของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังแรงดึง พบว่าคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไพล์มน้ำมันทุกอัตราส่วนมีค่ากำลังดึงน้อยกว่า 12-13% ของค่ากำลังอัดที่บ่ม 7 วัน หลังจากบ่ม 28 วัน จากความชันของเส้นกราฟในภาพที่ 8 และ 9 ยังพบว่าแนวโน้มกำลังอัดมีการพัฒนาด้านกำลังก้ำวหน้าได้ดีกว่ากำลังดึงที่มีการพัฒนาด้านกำลังอย่างช้า (ภาพที่ 8)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค (ภาพที่ 11) พบว่าค่าความเร็วคลื่นของก้อนผสมเถ้าไพล์มน้ำมันต่ำกว่าของคอนกรีตควบคุม ประมาณ 12-15% ของกำลังอัดที่บ่ม 28 วัน ยังสอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำ) ของคอนกรีตอันส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค และได้สมการความสัมพันธ์ในสภาวะทั่วไป (สมการที่ 1) การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคสามารถโยนไปสู่สมบัติการทดสอบแบบทำลายของก้อนตัวอย่าง

$$\sigma_c = 46.06 \ln V_p - 30.24 \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ σ_c = กำลังอัด เมกะพาสคัล V_p = ความเร็วคลื่น กม/วินาที



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีตกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไพล์มน้ำมัน

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ควบคุมค่าการยุบตัว ให้มีความสามารถในการเทได้ โดยใช้คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมเถ้าไพล์มน้ำมัน การแทนที่ของเถ้าไพล์มน้ำมันนั้นทำให้มีความต้องการใช้น้ำมาก ยี่ระยะเวลาการก่อตัว ลดการหดตัว ความหนาแน่นรวม ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค และการดูดซึมน้ำสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าไพล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น การพัฒนาด้านกำลังอัดผล

แทนที่เถ้าไพล์มน้ำมัน 10% ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม 10% และอัตราส่วนอื่นลดลงราวอัตราส่วนละ 10% เถ้าไพล์มน้ำมันมีข้อดีของการพัฒนาด้านกำลังแรงดึง มีค่ากำลังแรงดึง 12-13% ของกำลังอัด และผลแทนที่เถ้าไพล์มน้ำมันทำให้กำลังดึงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม 20% อย่างไรก็ตามความหนาแน่นรวมและกำลังอัดอยู่ในช่วงเกณฑ์คอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้าง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนบางส่วนจากบัณฑิตวิทยาลัย ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา หน่วยวิจัยธรณีเทคนิค ภาควิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ และภาควิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตสงขลา

6. บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานสถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย. 2549. ปีเพาะปลูก 2548/49. ศูนย์สารสนเทศการเกษตรสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์. เล่มที่ 47.
- [2] http://www.doa.go.th/meeting_doa/roadmap_power.pdf, แหล่งที่มา กรมวิชาการเกษตร. 2550. Road Map การผลิตพืชทดแทนพลังงาน: สืบค้นเมื่อ 11 พฤษภาคม 2550
- [3] ดนุพล ตันนโยภาส และอภิชาติ พ่วงพี. 2548. คอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมันผสมหินฝุ่นแกรนิต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, พิษณุโลก, ประเทศไทย, 2-4 พ.ค. 2550: Volume 5 (MAT): 175-180.
- [4] Basri, H.B., Mannan, M.A. and Zain, M.F.M. 1999. Concrete using Waste Oil Palm Shells as Aggregate. Cement and Concrete Research, 29(4): 619-622.
- [5] Neville, A.M. 1995. Properties of concrete. 4th ed., London, Longman Group Limited.
- [6] Mannan, M.A., Basri, H.B., Zain, M.F.M. and Islam, M.N. 2002. Effect of Curing Conditions on the Properties of OPS-Concrete. Building and Environment, 37(11): 1167-1171.
- [7] Mannan, M.A. and Ganapathy, C., 2002. Engineering Properties of Concrete with Oil Palm Shell as Coarse Aggregate. Construction and Building Materials, 16(1): 29-34.
- [8] Mannan, M.A. and Ganapathy, C. 2001. Mix Design for Oil Palm Shell Concrete. Cement and Concrete Research, 31(9): 1323-1325.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายพรนราชนันท์ บุญราศรี	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4910120027	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	2540

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ข้าราชการ ตำแหน่ง อาจารย์

สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

โทรศัพท์ 074-316260-3 ต่อ 1811 มือถือ 0-81959-5878

โทรสาร 074-321750

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. พรนราชนันท์ บุญราศรี และ ดนุพล ตันนโยภาส (2551). การปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตมวลรวมจากกะลาปาล์มน้ำมันด้วยเถ้าแกลบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกล. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6. 8-9 พฤษภาคม 2551. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. จังหวัดสงขลา
2. พรนราชนันท์ บุญราศรี และ ดนุพล ตันนโยภาส (2551). อิทธิพลปอชโซลานของเถ้าไยปาล์ม น้ำมันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13. 14-16 พฤษภาคม 2551. โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช พัทยา. จังหวัดชลบุรี