

## การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

วันโชค เครือหงษ์<sup>1</sup> ธีรวัฒน์ ลินศิริ<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

และ ปริญญา จินดาประเสริฐ<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียดแตกต่างกัน 2 ขนาดคือขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์และขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ทดสอบความไม่เป็นผลึกของเถ้าปาล์มน้ำมันโดยวิธีรีเฟรคโวลต์ กำลังอัดของเพสต์ การทดสอบเพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน การทดสอบกระจายขนาดโพรงของเพสต์ ผลการทดสอบพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก กำลังอัดของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดหยาบมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC ขณะที่เพสต์ผสม เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมีกำลังอัดสูงกว่าการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดหยาบ เพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดร้อยละ 20 มีปริมาณโพรงทั้งหมดต่ำที่สุด ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันลดลงด้วยการแทนที่เพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันและมีปริมาณที่ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC นอกจากนี้ขนาดโพรงวิกฤตของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดช่วยลดขนาดโพรงวิกฤตมากกว่าเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดหยาบ

**คำสำคัญ :** เถ้าปาล์มน้ำมัน / ความไม่เป็นผลึก / โครงสร้างจุลภาค / ซีเมนต์เพสต์ผสม

\* Corresponding author. E-mail: wunchock\_k@hotmail.com

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

<sup>3</sup> ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

## A Study Microstructure of Blended Cement Paste Containing Palm Oil Fuel Ash

**Wunchock Kroehong<sup>1</sup> Theerawat Sinsiri<sup>2</sup>**

Suranaree University of Technology, Nakorn Ratchasima 30000, Thailand

**Chai Jaturapitakkul<sup>3</sup>**

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140, Thailand

**and Prinya Chindaprasirt<sup>3</sup>**

Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

### Abstract

This paper presents microstructure of blended cement paste containing palm oil fuel ash. Palm oil fuel ash (POFA) was ground to obtain two finenesses: one was the same size as Portland cement type I and the another one was smaller than the cement. The Type I Portland cement was replaced by POFA at 0%, 20%, and 40% by weight of binder. A water to binder ratio (W/B) of 0.35 was used for all blended cement paste mixes. The amorphous of ground palm oil fuel ash by Rietveld method, compressive strength, thermogravimetric analysis, pore size distribution of blended cement paste were investigated. The results showed that the ground palm oil fuel ash was an amorphous silica material. The compressive strengths of the blended cement pastes containing coarse POFA were lower than that of OPC cement paste. Blended cement paste with high fineness POFA had a higher compressive strength than that of coarse POFA. The blended cement pastes containing 20% of POFA with high fineness had the lowest total porosity. The  $\text{Ca(OH)}_2$  contents of blended cement paste containing POFA decreased with the increasing replacement of POFA and they were lower than those of the OPC cement paste. In addition, the critical pore size of blended cement paste containing POFA was lower than that of the OPC cement paste. The incorporation of high fineness POFA in to cement paste decreased the critical pore size of blended cement paste more than that with coarse POFA.

**Keywords :** Palm Oil Fuel Ash / Amorphous / Microstructure / Blended Cement Paste

---

\* Corresponding author. E-mail: wunchock\_k@hotmail.com

<sup>1</sup> Ph.d. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>3</sup> Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

## 1. บทนำ

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มของผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า พบว่าในประเทศไทยมีเถ้าปาล์มน้ำมันถึง 100,000 ตันต่อปี [1] ปัจจุบันเถ้าปาล์มน้ำมันยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์จึงเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) [2, 3] นักวิจัยได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต Tangchirapat et al. [3] พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีและเมื่อนำมาบดให้มีความละเอียดสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ร้อยละ 20-30 และ Sata et al. [4] พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อบดให้มีความละเอียดสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง อีกประการหนึ่งยังช่วยในการปรับปรุงกำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต [1] นอกจากนี้ นักวิจัยพบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยในการต้านทานซัลเฟต [5] และการแทรกซึมของคลอไรด์ [6]

ซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมินาไดรอกไซด์ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ทำให้ได้ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H), แคลเซียมอลูมินาซิลิเกตไฮดรต ( $\text{C}_2\text{ASH}_6$ ) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ) นักวิจัยได้มีการศึกษาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์แทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานโดยวิธีการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric analysis) พบว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ลดลงด้วยการแทนที่วัสดุปอซโซลานเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อความละเอียดสูงขึ้น [7] การลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์บ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน นอกจากนี้การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงส่งผลให้คอนกรีตช่วยต้านทานซัลเฟต [8] ขณะที่การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลาน Chaipanich and Nochiya [9] ใช้อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามอนุกรม (Derivative Thermo gravimetric) หาปฏิกิริยาเพื่ออธิบายการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของเพสต์ พบว่ามีฟิ-

เอททริงโกต์, แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต, แคลเซียมอลูมินาซิลิเกต ไฮดรตและแคลเซียมคาร์บอเนต ของปฏิกิริยาดังกล่าว และการลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ผลรวมการสูญเสียน้ำหนักของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H), แคลเซียม อลูมินาซิลิเกตไฮดรต ( $\text{C}_2\text{ASH}_6$ ) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ) เพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น

ปริมาตรโพรงและโครงสร้างโพรงของคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญต่อการซึมผ่านของสารเคมีและความทนทานของคอนกรีต โครงสร้างโพรงในซีเมนต์เพสต์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท [7, 10] ประกอบไปด้วยโพรงเจล (Gel pore) และโพรงคาปิลารี (Capillary pore) โดยโพรงเจลที่มีขนาดโพรงเล็กกว่า 10 นาโนเมตร ส่งผลต่อการหดตัวและการล้า ส่วนโพรงคาปิลารีสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ขนาด คือโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่ (Large capillary) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 50 นาโนเมตร -10 ไมครอน ส่งผลต่อกำลังอัด การซึมผ่าน และโพรงคาปิลารีขนาดกลาง (Medium capillary) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 10-50 นาโนเมตร ส่งผลต่อกำลังอัด การซึมผ่าน การหดตัว จากงานวิจัย Chindrprasirt et al. [11] ได้มีการศึกษาใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนพบว่าเพสต์ผสมด้วยเถ้าลอยทำให้ขนาดโพรงเฉลี่ยต่ำกว่าเพสต์ควบคุม นอกจากนี้ Halamickova et al. [12] ศึกษาการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและการแทรกซึมของคลอไรด์พบว่าขนาดโพรงวิกฤตของคอนกรีตเป็นปัจจัยต่อการซึมของน้ำและคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต งานวิจัยที่ผ่านมาของคอนกรีต มอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกลเป็นส่วนใหญ่ แต่ยังไม่ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงเชิงกลที่เชื่อมโยงกับโครงสร้างจุลภาค การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสม เถ้าปาล์มน้ำมันมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งที่สามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อที่จะทำให้เข้าใจถึงบทบาทและอิทธิพลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในด้านกายภาพได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางของวัสดุทางเลือกใหม่และยังเป็นการลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากวัสดุเถ้าปาล์มน้ำมันที่เหลือทิ้ง

## 2. วัตถุประสงค์การศึกษา

ศึกษาผลของความละเอียดของเก้าปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเก้าปาล์มน้ำมัน ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ความไม่เป็นผลึกของเก้าปาล์มน้ำมัน ผลของความละเอียดต่อกำลังอัด ปฏิกริยาของซีเมนต์เพสต์ผสม ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโครงสร้างโพรงของเพสต์ผสม

## 3. วิธีการศึกษา

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

**3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์** ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตาม ASTM C150

**3.1.2 เก้าปาล์มน้ำมัน** ใช้เก้าปาล์มน้ำมันจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม โดยนำเก้าปาล์มน้ำมันมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และอนุภาคที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ หลังจากนั้นนำเก้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียด 2 ขนาด คือขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์เรียกว่า G1POFA และอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์เรียกว่า G2POFA

### 3.1.3 น้ำ ใช้น้ำประปา

### 3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเก้าปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วย การทดสอบการกระจายของอนุภาคของวัสดุโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser particle size analyzer) ความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C188 องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้วิธี (X-ray fluorescence) และทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลนตามมาตรฐาน ASTM C204

### 3.3 อัตราส่วนผสมและการทดสอบกำลังอัดของเพสต์

การหล่อซีเมนต์เพสต์ใช้เก้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเก้าปาล์มน้ำมันแสดงในตารางที่ 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ทุกอัตราส่วนผสม หล่อตัวอย่างเพสต์ขนาด 50x50x50 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C109 และถอดแบบตัวอย่างที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำและทดสอบกำลังอัดที่ อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเก้าปาล์มน้ำมัน

Mix No	Symbol	OPC	G1POFA	G2POFA	W/B
1	OPC	100	-	-	0.35
2	20G1POFA	80	20	-	0.35
3	40G1POFA	60	40	-	0.35
4	20G2POFA	80	-	20	0.35
5	40G2POFA	60	-	40	0.35

### 3.4 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเพสต์

การเตรียมตัวอย่างทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเพสต์ เลือกชิ้นตัวอย่างซึ่งอยู่ตรงกลางก้อนลูกบาศก์ ใช้สิ่วสกัดตัวอย่างเพสต์ให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 3-5 มม. ต่อจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปแช่ในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที เพื่อยับยั้งปฏิกริยาไฮเดรชัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างทำให้แห้งด้วยเครื่อง Freeze Dry ที่ความดันสูญญากาศ -0.5 Pa อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

และเก็บตัวอย่างไว้ในโถดูดความชื้น [13]

### 3.4.1 การทดสอบเพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน

การวิเคราะห์เพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน โดยใช้เครื่องมือ Thermogravimetric analysis (TGA) เป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นำตัวอย่างที่หยุดปฏิกริยาไฮเดรชันแล้วมาบดตัวอย่างให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 หลังจากนั้นนำตัวอย่างทดสอบ วิเคราะห์ภายใต้

บรรยากาศไนโตรเจน ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที [9]

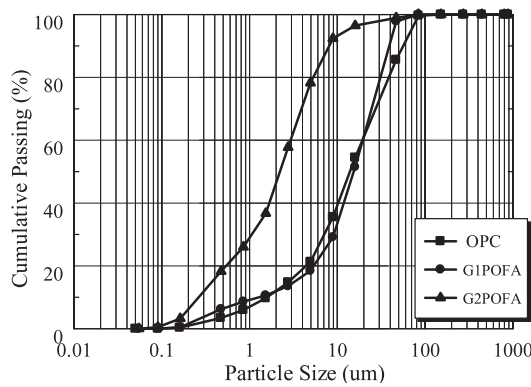
### 3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างโพรงของเพสต์

การวิเคราะห์การกระจายขนาดโพรงของเพสต์ ด้วยเครื่องมือ Mercury intrusion porosimeter (MIP) นำตัวอย่างที่ยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นเล็กน้อย ที่มีขนาดประมาณ 3-5 มม. ใส่ในแท่งใส่ตัวอย่าง (Penetrometer) แล้วติดตั้งในช่องความดันต่ำ เดินเครื่องเพื่อให้ระบบเป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นเพิ่มความดันจนถึง 30 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว และนำแท่งใส่ตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักและติดตั้งที่ช่องความดันสูงเพื่ออัดความดันจนกระทั่งถึงความดันสูงสุดที่ 33,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

## 4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

### 4.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

รูปที่ 1 แสดงการกระจายตัวของอนุภาควัสดุ พบว่าการกระจายตัวของอนุภาควัสดุสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่มีอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์อนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 ไมครอนและอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุ พบว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.14 แก้วปาล์มน้ำมัน G1POFA และ G2POFA เท่ากับ 2.36 และ 2.48 ตามลำดับ ส่วนความละเอียดของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3,600 ซม.<sup>2</sup>/ก. ขณะที่แก้วปาล์มน้ำมัน G1POFA และ G2POFA เท่ากับ 6,700 และ 14,900 ซม.<sup>2</sup>/ก. ตามลำดับ



รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาควัสดุ

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

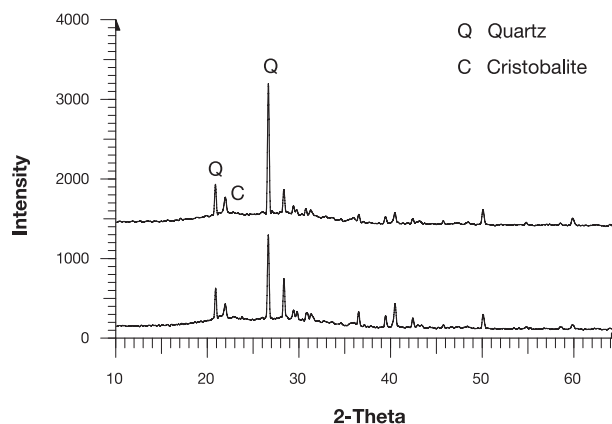
Sample	Specific gravity	Median particle size, $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Blaine fineness ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
OPC	3.14	14.6	3,600
G1POFA	2.36	15.6	6,700
G2POFA	2.48	2.1	14,900

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งแสดงในตารางที่ 3 พบว่าองค์หลักของเถ้าปาล์มน้ำมันคือซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 54.0 และ 55.7 สำหรับ G1POFA และ G2POFA ตามลำดับ ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาของ G1POFA และ G2POFA เท่ากับร้อยละ 3.7 และ 4.7 ตามลำดับ ซึ่งผลรวมของ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 70 สำหรับชั้นคุณภาพ F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [14] สำหรับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ G1POFA และ G2POFA แสดงในรูปที่ 2 พบว่าองค์ประกอบหลักคือ ควอตซ์ ( $\alpha$ -quartz)

และองค์ประกอบรอง คริสโตบาไลต์ (Cristobalite) คล้ายกับการศึกษาของ Chandara et al. [15] ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณความไม่เป็นผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธีเรียทเวลด์ (Rietveld method) พบว่าปริมาณความไม่เป็นผลึกของ G1POFA และ G2POFA มีค่าเท่ากับร้อยละ 70.2 และ 67.2 ตามลำดับ นอกจากนี้ควอตซ์และคริสโตบาไลต์ เท่ากับ ร้อยละ 65, 35 และ 73, 27 สำหรับ G1POFA และ G2POFA ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความไม่เป็นผลึกของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณร้อยละ 67-70

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical composition (%)	OPC	G1POFA	G2POFA
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	20.8	54.0	55.7
Aluminum oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.7	0.9	0.9
Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.4	2.0	2.0
Calcium oxide (CaO)	65.3	12.9	12.5
Magnesium oxide (MgO)	-	4.9	5.1
Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)	0.1	1.0	1.0
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	0.4	13.5	11.9
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	2.7	4.0	2.9
Loss on ignition (LOI)	0.9	3.7	4.7
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	56.9	58.6
Quantitative XRD, Rietveld			
Amorphous (%)	-	70.2	67.2
Crystalline (%)	-	29.8	32.8
Quartz	-	65.0	73.0
Cristobalite	-	35.0	27.0



รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ G1POFA และ G2POFA

## 4.2 กำลังอัดของเพสต์

กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC ขณะที่เพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 20G1POFA และ 40G1POFA กำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน เท่ากับ 72.0 และ 61.5 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 96 และ 82 ของซีเมนต์เพสต์ควบคุม ตามลำดับ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน พบว่ามีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 102.0 และ 88.1 เมกะปาสคาลหรือคิดเป็นร้อยละ 103 และ 89 ของซีเมนต์เพสต์ควบคุม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามร้อยละกำลังอัดของเพสต์ที่มีแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดมากขึ้น เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเกิดเนื่องจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับเพสต์ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันที่ความละเอียดสูง พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ 20G2POFA และ 40G2POFA ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 77.3, 66.5 และ 109.6, 94.1 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 103, 89 และ 111, 95 ของซีเมนต์เพสต์ควบคุม ตามลำดับ

กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มแต่จะลดลงด้วยการแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น นอกจากนี้การบดเถ้าปาล์มน้ำมัน

ให้มีความละเอียดสูงส่งผลให้กำลังอัดของเพสต์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction), Nucleation effect, การอัดแน่นของอนุภาค (Filler effect) และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ขณะที่ Nucleation effect เกิดจากอนุภาคที่เล็กของเถ้าปาล์ม น้ำมันทำให้เกิดการกระจายของเม็ดปูนซีเมนต์และทำให้เม็ดปูนซีเมนต์สัมผัสน้ำอย่างทั่วถึงส่งผลให้เกิดการเร่งปฏิกิริยา [16, 17] การอัดแน่นของอนุภาคจากอนุภาคที่เล็กของเถ้าปาล์ม น้ำมันเข้าอุดช่องว่างระหว่างเพสต์ทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวและแน่นซึ่งเป็นการปรับปรุงกำลังอัดของเพสต์ [18, 19] และปฏิกิริยาปอซโซลานเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมินาไดรอกไซด์ทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังนั้นเพสต์ที่ผสมด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมันที่มีความละเอียดมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวและแน่น ทึบซึ่งทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมันมีความละเอียดสูงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีและสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ถึงร้อยละ 20 นอกจากนี้กำลังอัดของเพสต์ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 20 ด้วยอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน เท่ากับร้อยละ 96 และ 103 ของซีเมนต์เพสต์ควบคุม ตามลำดับ

ตารางที่ 4 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

Mix	Symbol	Compressive strength (MPa)				Normalized compressive strength (%)			
		7 days	28 days	60 days	90 days	7 days	28 days	60 days	90 days
1	OPC	53.0	75.0	84.6	99.1	100	100	100	100
2	20G1POFA	48.3	72.0	84.6	102.0	91	96	100	103
3	40G1POFA	41.0	61.5	72.8	88.1	77	82	86	89
4	20G2POFA	51.9	77.3	92.2	109.6	98	103	109	111
5	40G2POFA	44.0	66.5	78.6	94.1	83	89	93	95

## 4.3 การวิเคราะห์โดยเทคนิคทางความร้อน

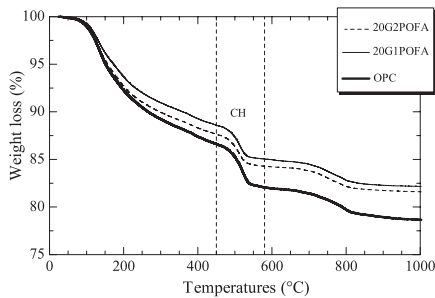
### 4.3.1. ผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (TGA) ของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงในรูปแบบที่

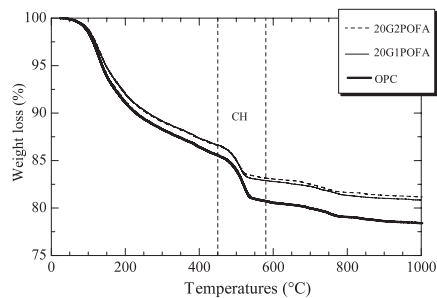
3 และ 4 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนอยู่ด้วยกัน 3 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวเนื่องจากเอทริงไจต์ (Ettringite), แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมินาซิลิเกตไฮเดรต (C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>) ที่อุณหภูมิ 105 – 450 องศาเซลเซียส [20]

ช่วงที่สอง เป็นการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ที่อุณหภูมิ 450 – 580 องศาเซลเซียส [21] และช่วงที่สามเป็นการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) ที่อุณหภูมิ 580 – 1000 องศาเซลเซียส [21] เมื่อพิจารณารูปที่ 5 และ 6 แสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ (DTG) ของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน พบว่าจุดยอดมีลักษณะคล้ายกันทุกอัตราส่วนผสม และพบอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของจุดยอดสูงสุด C-S-H, C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>, และ CaCO<sub>3</sub> ดังตำแหน่งที่อุณหภูมิ 126-134 องศาเซลเซียส, 188-194 องศาเซลเซียส, 484-520 องศาเซลเซียส และ 741-797 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ [9] จากการสังเกตพบว่าจุดยอดของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ลดลงด้วยการแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์ม น้ำมันและอายุการบ่ม นอกจากนี้ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้จุดยอดของแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ลดลงเร็วกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้จุดยอดของ C-S-H และ C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub> เพิ่มขึ้นด้วยอายุการบ่ม ทั้งนี้เพราะว่าความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้มีพื้นที่ผิวมากในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีอยู่เถ้าปาล์มน้ำมันกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งการลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์บ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของจุดยอดสูงสุด C-S-H และ C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub> ด้วยการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการบ่มส่งผลทำให้ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น

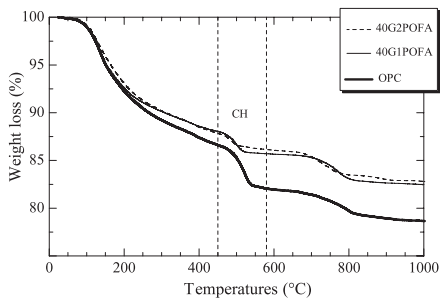


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

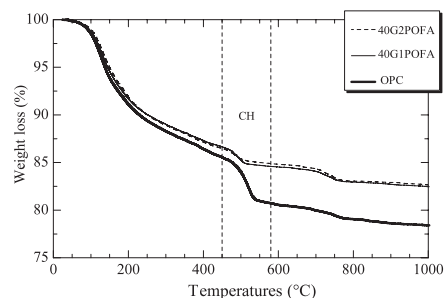


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 3 เปรอ์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20



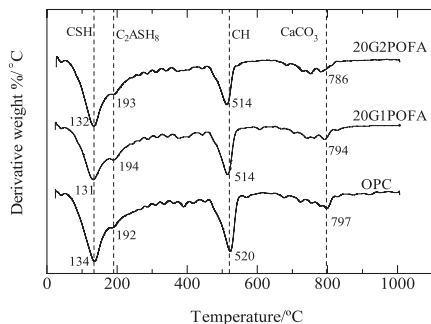
(ก) อายุการบ่ม 28 วัน



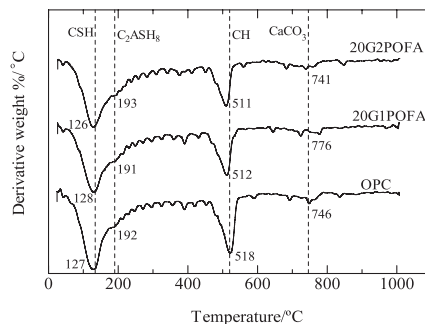
(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 4 เปรอ์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40



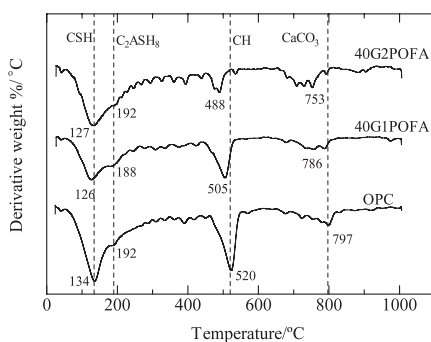


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

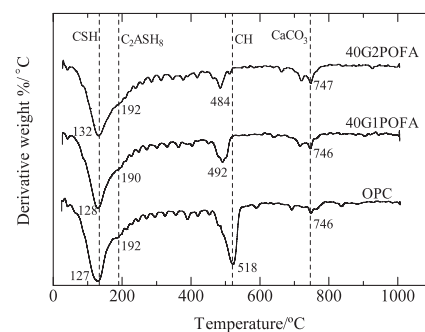


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

**รูปที่ 5** อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิของซีเมนต์เฟสดี และเฟสดีผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20



(ก) อายุการบ่ม 28 วัน



(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

**รูปที่ 6** อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิของซีเมนต์เฟสดี และเฟสดีผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40

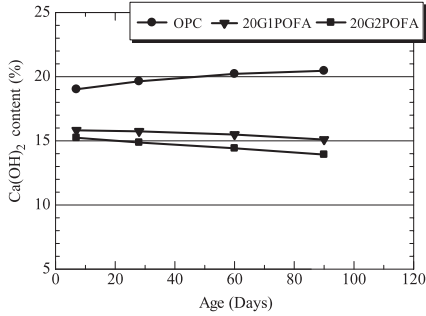
#### 4.3.2 ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเฟสดีที่อายุการบ่มต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เฟสดี OPC ที่อายุบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับร้อยละ 19.02, 19.64, 20.22 และ 20.46 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เฟสดี OPC เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเฟสดี 20G1POFA และ 20G2POFA มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 15.10–15.82 และ 13.93–15.24 หรือลดลงประมาณร้อยละ 5 และ 9 หลังจากอายุการบ่ม 7 วัน ตามลำดับ การลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นการบ่ง

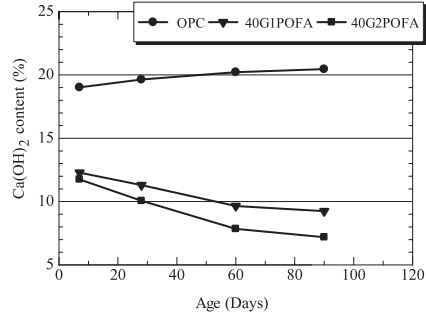
บอกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับเฟสดีที่ผสมด้วย G2POFA ซึ่งมีความละเอียดสูงทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำกว่าเฟสดีที่ผสมด้วย G1POFA เนื่องจากความละเอียดของอนุภาคและซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณร้อยละ 40 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเฟสดี 40G1POFA และ 40G2POFA มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9.24–12.18 และ 7.19–11.75 หรือลดลงประมาณร้อยละ 24 และ 39 หลังจากอายุ 7 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่มากขึ้นทำให้การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

เร็วกว่าการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่ต่ำ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้มีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้

รวดเร็วกว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ [7]



(ก) การแทนที่ร้อยละ 20



(ข) การแทนที่ร้อยละ 40

รูปที่ 7 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์

4.4 การกระจายโครงสร้างโพรงของซีเมนต์เพสต์

4.4.1 ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์

ปริมาตรโพรงของเพสต์ทั้งหมดที่อายุการบ่มต่างๆ แสดงในตารางที่ 5 พบว่าปริมาตรโพรงของเพสต์ OPC ที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 22.8, 20.1, 17.4 และ 16.6 ตามลำดับ ขณะที่เพสต์ 20G1POFA และ 40G1POFA เท่ากับร้อยละ 26.3, 21.7, 18.4, 17.4 และ 30.2, 27.5, 19.3, 18.5 ที่อายุบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาตรโพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ OPC ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าเพสต์ G1POFA มีปริมาตรโพรงทั้งหมดสูงกว่า

ซีเมนต์เพสต์ OPC สำหรับกรณีเพสต์ G2POFA เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 มีปริมาตรโพรงทั้งหมดต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC ทุกช่วงอายุการบ่ม นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าเพสต์มีปริมาตรโพรงทั้งหมดที่อายุการบ่ม 60 วันเท่ากับร้อยละ 17.3 ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC ซึ่งมีค่าร้อยละ 17.4 เพราะว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีความละเอียดทำให้มีความเร็วในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน อีกสาเหตุหนึ่งเนื่องจากอนุภาคที่เล็กทำให้อุดแทรกในช่องว่างของเพสต์ ดังนั้นทำให้โครงสร้างโพรงของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมีความแน่นทึบ [7]

ตารางที่ 5 ปริมาตรโพรงของเพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

Mix	Symbol	Total porosity (%)			
		7 days	28 days	60 days	90 days
1	OPC	22.8	20.1	17.4	16.6
2	20G1POFA	26.3	21.7	18.4	17.4
3	40G1POFA	30.2	27.5	19.3	18.5
4	20G2POFA	20.5	17.0	15.5	11.4
5	40G2POFA	23.8	19.7	17.3	15.6

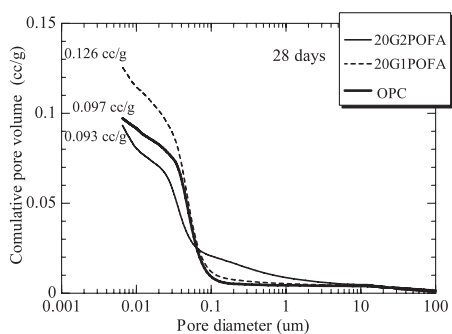
#### 4.4.2 ผลความละเอียดของเก้าปาล์มน้ำมันต่อการกระจายขนาดโพรงของเพสต์

ปริมาตรโพรงสะสมของเพสต์ผสมด้วยเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 และ 40 แสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปที่ 8 พบว่าเพสต์ 20G2POFA มีปริมาตรโพรงต่ำสุด เพราะว่าความละเอียดของเก้าปาล์มน้ำมันของ G2POFA มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี นอกจากนี้อนุภาคที่ความละเอียดสูง สามารถเข้าไปอุดช่องว่างของเพสต์ ส่งผลให้ปริมาตรความพรุนลดลงและเพสต์มีความแน่นขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 9 เพสต์ผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40 ที่อายุบ่ม 28 วันพบว่าปริมาตรโพรงสะสมสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC แต่เมื่ออายุบ่ม 90 วันปริมาตรโพรงสะสมของเพสต์ 40G2POFA มีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างโพรงของเพสต์ผสมเก้าปาล์มน้ำมันมีการเปลี่ยนแปลง [22]

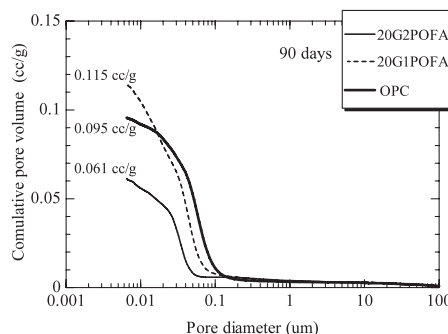
รูปที่ 10 และ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโพรงกับขนาดของโพรงของเพสต์ โดยจุดยอดสูงสุดเรียกว่า ขนาดโพรงวิกฤติ สามารถหาได้จากจุดตัดกลับของปริมาตรโพรงสะสมหรือค่าสูงสุดของ  $dv/d(\log D)$  [22, 23] เมื่อพิจารณารูปที่ 10 (ก) สำหรับซีเมนต์เพสต์ผสมเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ที่อายุบ่ม 28 วัน ของเพสต์ 20G1POFA และ 20G2POFA พบว่ามีขนาดโพรงวิกฤติเท่ากับ 45.9 และ 38.0 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งจุดยอดสูงสุดกระจายอยู่ในช่วงโพรงคาปิลารีขนาดกลาง และมีค่าต่ำกว่าเพสต์ OPC จุดยอดสูงสุดกระจายอยู่ในช่วงโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 56.1

นาโนเมตร เมื่ออายุบ่ม 90 วัน ขนาดโพรงวิกฤติของซีเมนต์เพสต์ OPC, 20G1POFA และ 20G2POFA เท่ากับ 54.6, 41.7 และ 31.0 นาโนเมตร ตามลำดับ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเก้าปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้โครงสร้างโพรงของเพสต์มีการปรับเปลี่ยนจากโพรงที่หยาบให้มีความละเอียดมากขึ้น สำหรับเพสต์ผสมด้วยเก้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40 ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าเพสต์ 40G1POFA และ 40G2POFA มีขนาดโพรงวิกฤติที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน เท่ากับ 42.1, 41.8 และ 36.8, 35.0 นาโนเมตร ตามลำดับ และจุดยอดสูงสุดกระจายในช่วงโพรงคาปิลารีขนาดกลาง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC

ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปริมาตรโพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยเก้าปาล์มน้ำมันด้วยอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์มีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม แต่ซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยเก้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม และปริมาตรโพรงทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นด้วยการแทนที่เก้าปาล์มน้ำมันในปริมาณสูงขึ้น นอกจากนี้การแทนที่ด้วยเก้าปาล์มน้ำมันส่งผลให้ขนาดโพรงวิกฤติต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC เพราะว่า Nucleation effect, การอัดแน่นของอนุภาคและปฏิกิริยาปอซโซลาน ด้วยเหตุผลดังกล่าวดังกล่าวทำให้โครงสร้างโพรงของเพสต์เปลี่ยนแปลงให้มีขนาดโพรงมีความละเอียดมากขึ้น อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัย [24] พบว่าขนาดโพรงวิกฤติเป็นปัจจัยสำคัญต่อการซึมผ่านของน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์ [12]

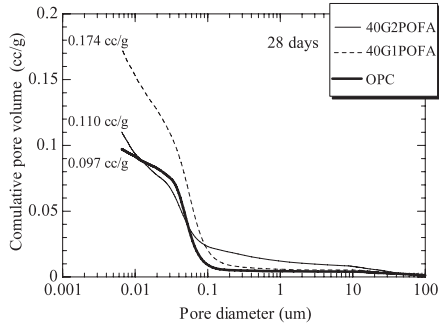


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

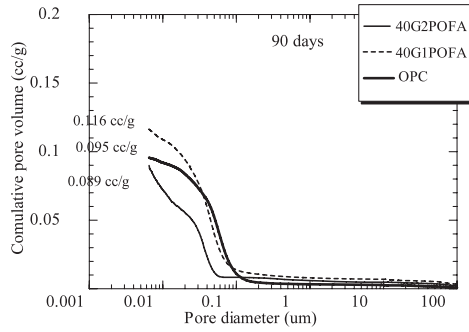


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรโพรงสะสมกับขนาดโพรงของเพสต์ 20POFA

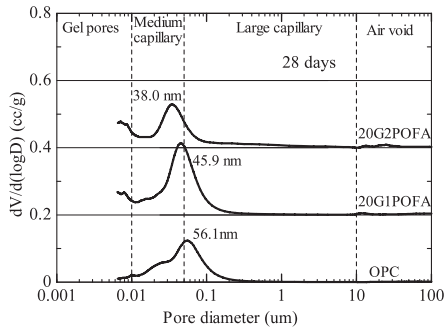


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

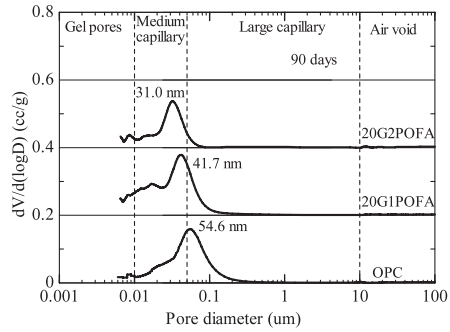


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

**รูปที่ 9** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพรงสะสมกับขนาดโพรงของเฟส 40POFA

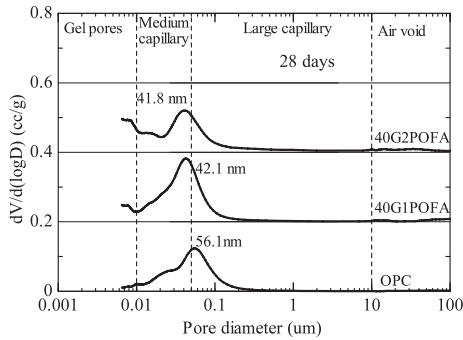


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

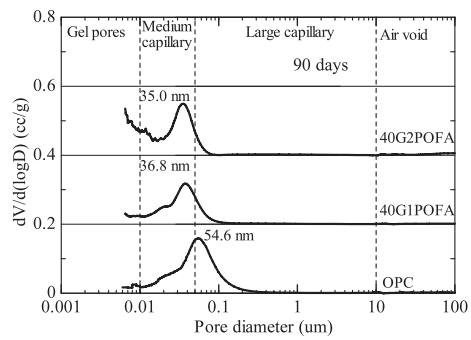


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

**รูปที่ 10** ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณของโพรงกับขนาดโพรงของเฟส 20POFA



(ก) อายุการบ่ม 28 วัน



(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

**รูปที่ 11** ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณของโพรงกับขนาดโพรงของเฟส 20POFA

## 5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

1. ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นปัจจัยต่อกำลังอัดของเพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสม นอกจากนี้เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงมีกำลังอัดสูงกว่าอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดหยาบ
2. เพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วยการแทนที่เพิ่มขึ้นและความละเอียดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้จุดยอดสูงสุดของ C-S-H และ  $C_2ASH_8$  เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม
3. การลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นผลเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานและทำให้โครงสร้างโพรงของเพสต์เปลี่ยนแปลงจากขนาดโพรงที่หยาบเป็นโพรงที่มีขนาดละเอียดมากขึ้น ดังนั้นทำให้ขนาดโพรงวิกฤติของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC
4. เถ้าปาล์มน้ำมันมีความไม่เป็นผลึกประมาณร้อยละ 67-70 การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 เป็นการปรับปรุงกำลังอัดให้สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC นอกจากนี้ทำให้ปริมาตรโพรงเพสต์ทั้งหมดต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC

## 6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ภายใต้โครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษาหลักสูตรปริญญาเอกร่วมในประเทศ-ต่างประเทศ ประจำปี 2551

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. Chindapasirt, P., Homwuttiwong, S., and Jaturapitakkul, C., 2007, "Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash," *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, pp. 1492-1499.
2. Chindapasirt, P., Rukzon, S., and Sirivivatnanon, V., 2008, "Effect of carbon dioxide on

chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar," *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 8, pp. 1701-1707.

3. Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., and Siripanichgorn, A., 2007, "Use of waste ash from palm oil industry in concrete," *Waste Management*, Vol. 27, No. 1, pp. 81-88.

4. Sata, V., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2004, "Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 623-628.

5. Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2009, "Compressive strength and expansion of blended cement mortar containing palm oil fuel ash," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 21, No. 8, pp. 426-431.

6. Chindapasirt, P., Rukzon, S., and Sirivivatnanon, V., 2008, "Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash," *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 5, pp. 932-938.

7. Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., 2007, "Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste," *Construction and Building Materials*, 2 Vol. 21, No. 7, pp. 1534-1541.

8. Barbhuiya, S.A., Gbagbo, J.K., Russell, M.I., and Basheer, P.A.M., 2009, "Properties of fly ash concrete modified with hydrated lime and silica fume." *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 10, pp. 3233-3239.

9. Chaipanich, A., and Nochaiya, T., 2010, "Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 99, No. 2,

pp. 487-493.

10. Mindress and Young, J., F., 1981, "Concrete," Prentice-Hall, Engle Cliffs.

11. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., 2005, "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 4, pp. 425-428.

12. Halamiczkova, P., Detwiler, R.J., Bentz, D.P., and Garboczi, E.J., 1995, "Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: Relationship to sand content and critical pore diameter," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 4, pp. 790-802.

13. Galle, C., 2001, "Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 10, pp. 1467-1477.

14. ASTM C 618., 2001, "A. standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete," *Annual book of ASTM standards*, Vol. 04, No. 2, pp. 310-313.

15. Chandara, C., Sakai, E., Azizli, K.A.M., Ahmad, Z.A., and Hashim, S.F.S., 2010, "The effect of unburned carbon in palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer," *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 9, pp. 1590-1593.

16. Gopalan, M.K., 1993, "Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 2, pp. 591-603.

17. Montgomery, D.G., Hughes, D.C., and Wil-

liams, R.I.T., 1981, "Fly ash in concrete - a micro-structure study," *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, No. 4, pp. 591-603.

18. Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G., and Moraes, R., 2003, "Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No. 1, pp. 69-76.

19. Mehta, P.K., and Aietcin, P.-C.C., 1990, "Principles underlying production of high-performance concrete," *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 12, No. 2, pp. 70-78.

20. Bai, J., Chaipanich, A., Kinuthia, J.M., O'Farrell, M., Sabir, B.B., Wild, S., and Lewis, M.H., 2003, "Compressive strength and hydration of wastepaper sludge ash-ground granulated blastfurnace slag blended pastes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 8, pp. 1189-1202.

21. El-Jazairi, B., and Illston, J.M., 1977, "A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement pastes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 247-257.

22. Li, Z., and Ding, Z., 2003, "Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 579-584.

23. Pipilikaki, P., and Beazi-Katsioti, M., 2009, "The assessment of porosity and pore size distribution of limestone Portland cement pastes," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 5, pp. 1966-1970.

24. Ye, G., Lura, P., and van Breugel, K., 2006, "Modelling of water permeability in cementitious materials," *Materials and Structures*, Vol. 39, No. 9, pp. 877-885.