

## วัสดุพอลิโพรพิลีนชนิดใหม่จากถั่วปาล์มน้ำมัน

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร<sup>1</sup> จตุพล ตั้งปกาศิต<sup>2</sup>

ศักดิ์สินธุ์ แววคุ้ม<sup>3</sup> และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล<sup>4</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 30 มิถุนายน 2546 ตอรับเมื่อ 13 สิงหาคม 2546

### บทคัดย่อ

ถั่วปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากการเผาเศษกะลาและเส้นใยของผลปาล์มที่อุณหภูมิประมาณ 300-400<sup>o</sup>C เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในประเทศไทยมีถั่วปาล์มน้ำมันที่ต้องนำไปทิ้งมากกว่าปีละ 100,000 ตัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีพบว่าถั่วปาล์มน้ำมันอาจนำมาใช้เป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนได้ งานวิจัยนี้จึงได้นำถั่วปาล์มน้ำมันมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.9 และ 10.1 ไมครอน จากนั้นนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 0 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อศึกษาผลกระทบต่ออัตราการก่อตัว ความต้องการน้ำ และกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน

ผลการวิจัยพบว่าการแทนที่ถั่วปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์นานขึ้น และ ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์มากขึ้น แต่เมื่อความละเอียดของถั่วปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ใช้ถั่วปาล์มน้ำมันก่อนบด และความต้องการน้ำลดลงใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์มาตรฐาน สำหรับมอร์ต้าร์ที่ใช้ถั่วปาล์มน้ำมันก่อนบดเป็นส่วนผสม ให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐาน เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่และความพรุนสูง จึงไม่เหมาะสมที่นำมาใช้เป็นวัสดุพอลิโพรพิลีน ส่วนการใช้ถั่วปาล์มน้ำมันบดละเอียด และบดละเอียดมาก (ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.9 และ 10.1 ไมครอน ตามลำดับ) เป็นส่วนผสมมอร์ต้าร์ใน อัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐาน ที่อายุ 7 และ 28 วัน นอกจากนี้การใช้ถั่วปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาก (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10.1 ไมครอน) เป็นส่วนผสมมอร์ต้าร์ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 ที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐาน โดยเท่ากับร้อยละ 104 และ 101 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าถั่วปาล์มน้ำมันบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนได้ดี

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

<sup>2</sup> นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

<sup>3</sup> ผู้ช่วยวิจัย

<sup>4</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

## A New Pozzolanic Material from Palm Oil Fuel Ash

Weerachart Tangchirapat<sup>1</sup>, Jatupol Tangpakasit<sup>2</sup>,  
Saksin Waew-kum<sup>3</sup>, and Chai Jaturapitakkul<sup>4</sup>

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

*Received 30 June 2003 ; accepted 13 August 2003*

### Abstract

Palm oil fuel ash (POFA) is a by-product from burning process in thermal power plant, which palmnut and fiber of palm are burnt at temperature about 300-400°C. Each year, more than 100,000 tons of POFA has been disposed and tended to increase annually. From the study of the chemical composition, it was found that the POFA could be used as a pozzolana. In this study, the quality of POFA was improved by grinding until the median particle sizes were 19.9 and 10.1 microns. The unground and ground POFA were used to replace Portland cement type I at 0 to 40% by weight of binder. Setting time, water requirement and compressive strength of mortars at the age of 7, 28, 60 and 90 days were investigated.

The results revealed that the replacement of POFA in Portland cement increased setting time of paste. For constant flow of 105-115, the mortar mixed with POFA required higher water than that of standard mortar. After grinding, the use of ground POFA reduced setting time as compared to that of unground POFA paste and decreased water requirement. Compressive strength of unground POFA mortars were less than those of standard mortar. The unground POFA is not suitable to use as a pozzolanic material due to large particle size and high porosity. However, mortars with ground POFA ( $d_{50} = 19.9$  and 10.1 microns) at 20% of cement replacement gives the compressive strength higher than 75% of standard mortar at the age of 7 and 28 days. In addition, the use of 10 and 20% of high fineness POFA ( $d_{50} = 10.1$  microns) gives higher compressive strength of mortar than that of standard mortar and it is 104 and 101%, respectively at the age of 90 days. The results suggest that the ground POFA can be used as a good pozzolanic material.

---

<sup>1</sup> Graduate Student, Department of Civil Engineering.

<sup>2</sup> Ph.D. Student, Department of Civil Engineering.

<sup>3</sup> Researcher Assistant.

<sup>4</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering.

## 1. บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศอุตสาหกรรมเกษตร ทำให้มีวัสดุที่เกิดจากการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรมากมาย ทั้งที่ใช้ประโยชน์ทางการค้าได้และบางส่วนเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทำให้เกิดปัญหามากมายตามมา เช่น การกำจัดทิ้งและการจัดเก็บ เป็นต้น กากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลาและเส้นใยปาล์ม (ดังแสดงในรูปที่ 1) ก็เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุเหลือทิ้งหลังสิ้นสุดกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์ [1] พบว่าในปี พ.ศ. 2544 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกลูกปาล์มประมาณ 1,457,000 ไร่ และมีผลผลิตเป็นอันดับ 4 ของโลกประมาณ 4,089,000 ตันต่อปี ทำให้กากของผลปาล์มมีปริมาณที่สูงตามผลผลิตปาล์มหรือประมาณ 2,147,000 ตันต่อปี จัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีปริมาณมาก

ปัจจุบันได้มีการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า“เชื้อเพลิงชีวมวล” โดยนำเอากากของผลปาล์มไปเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้เผาประมาณ 300-400 °ซ อย่างไรก็ตามหลังจากการเผายังคงได้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีปริมาณสูงถึงปีละ 107,000 ตันต่อปี และมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย (ดังแสดงในรูปที่ 2) ทำให้เกิดปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อมและยากต่อการกำจัดทิ้ง ดังนั้นหากสามารถนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์ก็สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้เช่นเดียวกับการใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเคยเป็นวัสดุเหลือทิ้งในอดีต นอกจากนี้การศึกษาเบื้องต้นที่ผ่านมา [2][3] พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีออกไซด์ของซิลิกอน ซึ่งเป็นออกไซด์หลักในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานในปริมาณสูง ทำให้มีแนวคิดที่จะศึกษาถึงการนำเอาเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาทำให้เกิดประโยชน์ นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าปาล์มน้ำมันด้วย



รูปที่ 1 กองกากของผลปาล์ม



รูปที่ 2 กองเถ้าปาล์มน้ำมันที่ทิ้งแล้ว

Joo-Hwa Tay [2] ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ และคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันดังกล่าวแทนที่ปูนซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 10 เป็นวัสดุประสาน กำลังอัดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน ส่วน Hussin และ Awal [3] นักวิจัย

จากประเทศมาเลเซีย ซึ่งเป็นประเทศที่ปลูกปาล์มน้ำมันมากแห่งหนึ่งของโลก ได้ศึกษาคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดจนละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ และแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในช่วงอายุก่อน 7 วัน ให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน แต่สามารถพัฒนาให้กำลังอัดให้สูงกว่าคอนกรีตดังกล่าวที่อายุ 28 วันขึ้นไป

จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีศักยภาพเพียงพอที่นำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยปัจจัยหลักที่สำคัญคือความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้งานวิจัยที่ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ในการงานคอนกรีตมีน้อยมาก และเป็นการศึกษาเริ่มต้นเท่านั้น ในขณะที่แนวโน้มของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันมีแต่จะสูงขึ้นและอาจสร้างปัญหาขึ้นได้ในอนาคตหากไม่หาวิธีการเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเถ้าปาล์มน้ำมันมาปรับปรุงคุณภาพให้มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด เพื่อศึกษาผลกระทบทางด้านระยะเวลาการก่อตัว ความต้องการน้ำและกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม รวมถึงคุณสมบัติการเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่างกัน

## 2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีความละเอียดสูงขึ้น
- 2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน

## 3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150 ทรายแม่น้ำล้างสะอาดร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 100 และเถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมันที่ศึกษาได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งในจังหวัดกระบี่โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกสิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ออก จากนั้นนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 (เรียกว่า OP) มาบดให้มีความละเอียดต่างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก เรียกว่า G1P และขนาดอนุภาคที่บดละเอียดมากจนต่างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เรียกว่า G2P

### 3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วยภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM), ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาค, ทดสอบความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ต่างบนตะแกรง

มาตรฐานเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C 430 และพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลนตามมาตรฐาน ASTM C 204 และทดสอบความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

นอกจากนี้ยังทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าปาล์มน้ำมันที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลาน เช่น  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และปริมาณ  $\text{SO}_3$  โดยใช้วิธี X-Ray Fluorescence (XRF) รวมถึงค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI)

### 3.3 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

การก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพโดยการบด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 191 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจากการทดสอบปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติตามมาตรฐาน ASTM C 187 และใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน)

### 3.4 การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์

การทดสอบกำลังอัดใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ซม.<sup>3</sup> ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน) ต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก และควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมของมอร์ตาร์ให้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 105 ถึง 115 ทำการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันทั้งสามขนาด คือ OP, G1P, และ G2P ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ภายหลังจากหลอมมอร์ตาร์จนมีอายุครบ 1 วัน จึงถอดแบบออกและนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำสะอาดเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วันตามลำดับ

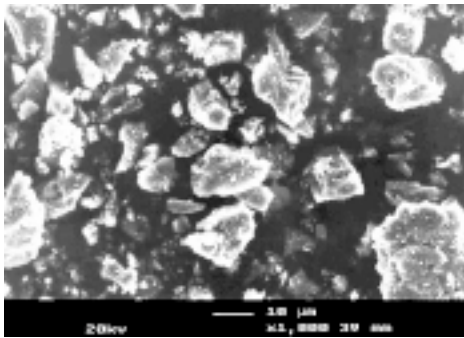
สำหรับสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย CT1 หมายถึง เพสต์หรือมอร์ตาร์มาตรฐานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว OP, G1P, และ G2P หมายถึง เถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบด, เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดละเอียด, และบดละเอียดมาก ตามลำดับ ส่วนตัวเลข 10, 20, 30 และ 40 ที่อยู่ด้านท้ายตัวอย่างแสดงถึงร้อยละการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์เช่น G2P20 หมายถึง เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมาก (G2P) แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

## 4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

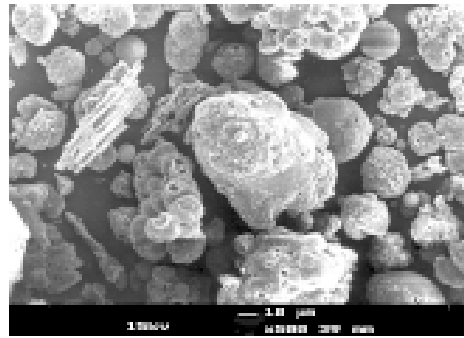
### 4.1 ลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาค

รูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพโดยการบด พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม เนื้อแน่น และมีผิวขรุขระ สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีลักษณะโดยรวมค่อนข้างหยาบ ความพรุนสูง รูปร่างกลมมนติดกันเป็นกลุ่มก้อน ขนาดไม่สม่ำเสมอ และบางส่วนมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม (ดูรูปที่ 3 ข.) ส่วนเถ้าปาล์ม

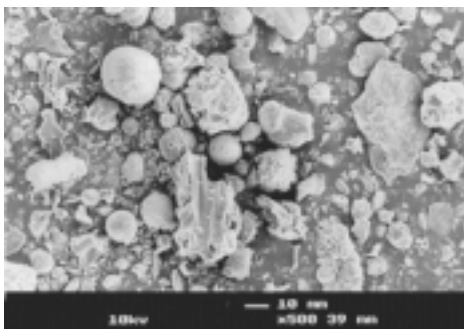
น้ำมันที่ผ่านการบดละเอียด (G1P) และบดละเอียดมาก (G2P) มีลักษณะคล้ายกัน คือ เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และอนุภาคมีรูพรุนลดลง อย่างไรก็ตามถ้าปาล์มน้ำมัน G1P (ดูรูปที่ 3 ค.) ยังมีอนุภาคบางส่วนเป็นรูปกลมมน และมีรูพรุนอยู่บ้าง ทั้งนี้เพราะว่าอนุภาคขนาดเล็กบางส่วนของถ้าปาล์มน้ำมันก่อนปรับปรุงคุณภาพอาจบดได้ไม่สมบูรณ์



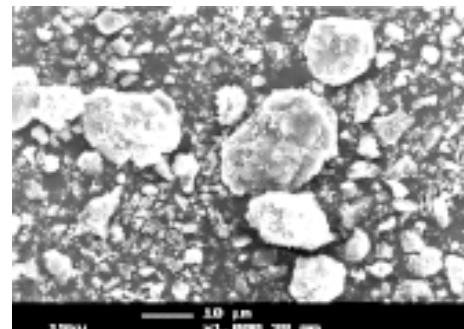
ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข. ถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP)



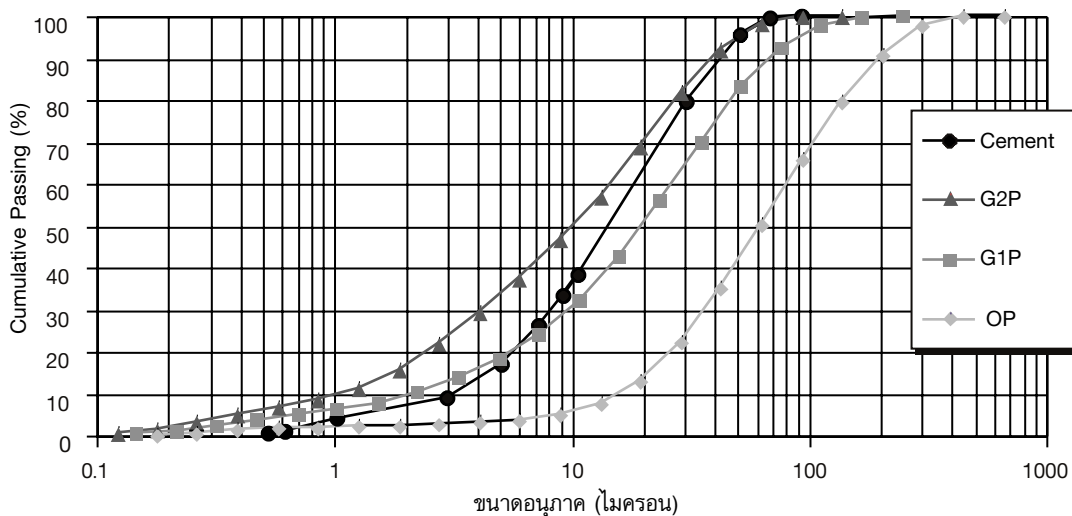
ค. ถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (G1P)



ง. ถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาก (G2P)

### รูปที่ 3 ภาพขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ และถ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังการบด

สำหรับขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 4 โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 14.6 ไมครอน และมีการกระจายตัวร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 3-40 ไมครอน ส่วนถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 62.5 ไมครอน มีการกระจายตัวร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 15-110 ไมครอน ในขณะที่ถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบด G1P และ G2P มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.9 และ 10.1 ไมครอน และมีการกระจายตัวร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 2-70 และ 1-40 ไมครอน ตามลำดับ เห็นได้ว่าถ้าปาล์มน้ำมันมีขนาดอนุภาคเล็กลงและการกระจายตัวแคบลงเมื่อบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 การกระจายตัวอนุภาคของปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังการบด

#### 4.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียด

ตารางที่ 1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P มีค่าเท่ากับ 1.97, 2.17 และ 2.33 ตามลำดับ เห็นได้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนการบดมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าหลังการบดอย่างเห็นได้ชัด และการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงขึ้นด้วย เพราะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนการบดมีความพรุนและมีโพรงอากาศภายในอนุภาคสูง เห็นได้ชัดจากภาพถ่ายขยายอนุภาคในรูปที่ 3 ข. แต่เมื่อบดแล้วทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความพรุนแตกออกและมีขนาดเล็กลง ทำให้รูพรุนน้อยลง ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเถ้ากันเตาโดยการบดของ Jaturapitakkul และ Cheerarot [4]

ความละเอียดโดยหาปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) และพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีของเบลน (แสดงในตารางที่ 1) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P มีปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐาน 325 ร้อยละ 41.2, 17.1 และ 1.5 ตามลำดับ โดยปริมาณอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 สูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้ คือ ไม่เกินร้อยละ 34 จึงไม่เหมาะสมที่นำมาใช้เป็นวัสดุป่อโซลันเนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่เกิดปฏิกิริยาได้ช้า สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะด้วย วิธีของเบลน พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3,630 ซม.<sup>2</sup>/ก. ในขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าปูนซีเมนต์ถึง 2 และ 3 เท่า คือ มีค่าเท่ากับ 6,990 และ 12,220 ซม.<sup>2</sup>/ก. ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อทำการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น นอกจากสามารถลดขนาดอนุภาคได้แล้ว ยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและลดความพรุนของวัสดุด้วย ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน OP เนื่องจากมีอนุภาคที่ใหญ่และความพรุนสูง ทำให้อากาศไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคอย่างรวดเร็ว จึงไม่เหมาะสำหรับการหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีนี้

**ตารางที่ 1** ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	ปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (%)	พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีของเบลน (ชม. <sup>2</sup> /ก.)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)
Cement	3.14	-	3,630	14.6
OP	1.97	41.2	-	62.5
G1P	2.17	17.1	6,990	19.9
G2P	2.33	1.5	12,220	10.1

### 4.3 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาก (G2P) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 65.4 และมี SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับร้อยละ 20.9, 4.7 และ 3.4 ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมัน (G2P) มี SiO<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีค่าสูงถึงร้อยละ 65.3 มี Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับร้อยละ 2.5 และ 1.9 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลรวมของ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่ามีปริมาณเท่ากับร้อยละ 69.7 มีปริมาณ SO<sub>3</sub> เพียงร้อยละ 0.4 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) เท่ากับร้อยละ 10.0 ดังนั้นเมื่อพิจารณาด้านองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันแล้วตามมาตรฐาน ASTM C 618 สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติได้ สำหรับสาเหตุที่วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P แต่ไม่วิเคราะห์ของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และ G1P เพราะการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดไม่มีผลทำให้องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเปลี่ยนแปลงมากนัก [5][6]

**ตารางที่ 2** องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน

วัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (%)								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI
Cement	20.9	4.7	3.4	65.4	1.2	0.2	0.3	2.7	0.9
G2P	65.3	2.5	1.9	6.4	3.0	0.3	5.7	0.4	10.0

### 4.4 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัว

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งมีความละเอียดและร้อยละการแทนที่ต่างกัน พบว่าซีเมนต์เพสต์มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติเท่ากับร้อยละ 25.9 มีการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายเท่ากับ 114 และ 180 นาที ตามลำดับ ส่วนเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังการบดให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติมากกว่าและการก่อตัวระยะต้น



และระยะเวลาปลายนานกว่าซีเมนต์เพสต์ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่มากขึ้น โดยเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติอยู่ในช่วงร้อยละ 29.9 ถึง 39.8 และมีการก่อดัชนีต้นนานกว่าซีเมนต์เพสต์ 14 ถึง 33 นาที เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 และ 40 ตามลำดับ ขณะที่เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติอยู่ในช่วงร้อยละ 27.3 ถึง 31.9 และ 26.6 ถึง 30.9 มีการก่อดัชนีต้นนานกว่าซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 10 ถึง 23 และ 6 ถึง 19 นาที ตามลำดับ เห็นได้ว่าเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติลดลงและการก่อดัชนีต้นเร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดสามารถลดโพรงและรูพรุนที่ดูดซึมน้ำให้น้อยลง และขนาดอนุภาคที่เล็กลงจากการบดทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

จากการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นอีก 2 ขนาดเห็นได้ว่ายังไม่สามารถขจัดเศษปริมาณ  $C_3S$  ที่ลดลงเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ จึงทำให้มีระยะเวลาการก่อดัชนีต้นนานกว่าของซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการแทนที่เดียวกัน เมื่อเพิ่มความละเอียดเถ้าปาล์มน้ำมันจาก OP ให้เป็น G1P ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าลดลงสูงกว่าเมื่อเพิ่มความละเอียดเถ้าปาล์มน้ำมันจาก G1P เป็น G2P อย่างเห็นได้ชัด ตัวอย่างเช่นเพสต์ OP40, G1P40, และ G2P40 มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติเท่ากับร้อยละ 39.8, 31.9, และ 30.9 ตามลำดับ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีความพรุนและโพรงอากาศสูง เมื่อทำการบดให้ละเอียดขึ้น (G1P) ทำให้ความพรุนลดลงอย่างมาก ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติลดลงตาม แต่เมื่อบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นอีกเป็น G2P แม้ความพรุนจะลดลงแต่พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ความต้องการปริมาณน้ำของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P น้อยกว่า G1P ไม่มากนัก อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันต้องการปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติสูงขึ้นและมีระยะเวลาการก่อดัชนีต้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์เนื่องมาจากมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ที่สูงถึงร้อยละ 10.0 ทำให้มีการดูดน้ำสูงขึ้นด้วย [7][8]

สำหรับการก่อดัชนีต้นระยะเวลาปลายพบว่าเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีการก่อดัชนีต้นเร็วที่สุด คือ G2P10 มีค่าเท่ากับ 180 นาที ในขณะที่เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีการก่อดัชนีต้นระยะเวลาปลายนานขึ้น คือ มีค่าเท่ากับ 210 ถึง 240 นาที เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 40 ตามลำดับ สำหรับเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P ทุกอัตราการแทนที่ (ร้อยละ 10 ถึง 40) มีการก่อดัชนีต้นระยะเวลาปลายไม่แตกต่างกันมากนัก คือ มีค่าระหว่าง 195 ถึง 225 และ 180 ถึง 210 นาที ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทุกขนาดความละเอียดมีการก่อดัชนีต้นระยะเวลาปลายที่นานขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทุกส่วนผสมยังมีการก่อดัชนีต้นและระยะเวลาปลายอยู่ในค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C 150 คือ ไม่น้อยกว่า 45 นาที และไม่เกิน 375 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำที่ความชันเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

ชนิดของเพสต์	ปริมาณน้ำที่ความชันเหลวปกติ (%)	เวลาก่อตัวระยะต้น (นาที)	เวลาก่อตัวระยะปลาย (นาที)
CT1	25.9	114	180
OP10	29.9	128	210
OP20	32.1	132	225
OP30	34.5	139	225
OP40	39.8	147	240
G1P10	27.3	124	195
G1P20	28.7	127	195
G1P30	30.1	131	210
G1P40	31.9	137	225
G2P10	26.6	120	180
G2P20	28.1	124	195
G2P30	29.2	130	210
G2P40	30.9	133	210

#### 4.5 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ตารางที่ 4 แสดงค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์มาตรฐานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำการควบคุมปริมาณน้ำให้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 105 ถึง 115 พบว่ามอร์ตาร์ OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีความต้องการน้ำเท่ากับร้อยละ 101, 104, 107 และ 109 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน (CT1) ตามลำดับ และมีแนวโน้มความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูงเมื่ออัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีโพรงอากาศจำนวนมากและความพรุนสูง ทำให้เกิดการดูดซึมน้ำมากขึ้น

เมื่อนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาดัดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น (G1P) พบว่ามอร์ตาร์ G1P10, G1P20, GP30 และ G1P40 มีความต้องการน้ำเท่ากับร้อยละ 99, 100, 101 และ 103 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP แต่มากกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน และมีแนวโน้มความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น เช่นเดียวกับมอร์ตาร์ G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 ซึ่งมีค่าความต้องการน้ำเท่ากับร้อยละ 99, 100, 100 และ 101 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ตามลำดับ แสดงว่ายิ่งบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น ยิ่งลดครุพูนและโพรงอากาศได้มากยิ่งขึ้น เป็นผลให้ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ต่ำกว่ากรณีที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดน้อยกว่า

#### 4.6 กำลังอัดมอร์ตาร์และดัชนีกำลัง

ตารางที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเข้าปาล์มน้ำมันทั้งก่อนและหลังการบด พบว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน (CT1) มีกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 333, 436, 499 และ 525 กก./ชม.<sup>2</sup> ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเข้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) ทุกอัตราการแทนที่และทุกอายุการทดสอบมีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน โดยมอร์ตาร์ OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 276, 248, 179 และ 133 หรือคิดเป็นร้อยละ 83, 74, 54 และ 40 ตามลำดับ เมื่อมอร์ตาร์มีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ดังกล่าวมีกำลังอัดเท่ากับ 381, 319, 289 และ 193 กก./ชม.<sup>2</sup> หรือคิดเป็นร้อยละ 87, 73, 66 และ 44 ตามลำดับ แสดงว่ากำลังอัดมีค่าลดลงเมื่ออัตราการแทนที่มากขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเข้าปาล์มน้ำมันก่อนบดส่วนมากอนุภาคมีโพรงอากาศ ความพรุนสูง และขนาดใหญ่จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานน้อย เมื่อนำมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ จึงทำให้กำลังอัดลดลง เพราะกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลด ปูนซีเมนต์ และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ OP20 ที่อายุ 7 และ 28 วัน เห็นได้ว่ามอร์ตาร์ผสมเข้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีค่าเพียงร้อยละ 74 และ 73 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ดังนั้นเข้าปาล์มน้ำมันก่อนการบดจึงไม่เหมาะสมที่นำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618

ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเข้าปาล์มน้ำมันหลังการบด (G1P) พบว่าเมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถพัฒนา กำลังอัดมอร์ตาร์ให้สูงขึ้นได้ โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 ที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 318, 298, 258, 217 และ 411, 389, 361, 309 กก./ชม.<sup>2</sup> หรือคิดเป็นร้อยละ 96, 90, 78, 65 และ 94, 89, 83, 71 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ตามลำดับ และมีแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้น โดยที่อายุ 60 วันขึ้นไปมอร์ตาร์ G1P10 มีค่ากำลังอัดมากกว่าร้อยละ 100 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเข้าปาล์มน้ำมัน G1P ที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 ที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 90 และ 89 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้คือไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน แสดงว่าเข้าปาล์มน้ำมัน G1P มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี

เมื่อบดเข้าปาล์มน้ำมันให้ละเอียดขึ้นเป็น G2P พบว่าที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน มีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้ที่ร้อยละ 75 ถึงร้อยละ 15 และเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 60 และ 90 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ G2P20 สามารถพัฒนาให้มีค่าเท่ากับหรือสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน คือ มีค่าเท่ากับ 498 และ 532 กก./ชม.<sup>2</sup> หรือคิดเป็นร้อยละ 100 และ 101 ตามลำดับ นอกจากนี้การแทนที่ร้อยละ 30 ยังทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดถึงร้อยละ 90 ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็นร้อยละ 94 ที่อายุ 60 วัน ค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์เกิดเนื่องจากความละเอียดของเข้าปาล์มน้ำมันที่สูงขึ้น ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และอนุภาคที่มีความละเอียดสูง ทำให้สามารถแทรกอุดช่องว่างของเฟสดี ส่งผลให้มอร์ตาร์มีเนื้อแน่นขึ้น กำลังอัดจึงสูงขึ้น

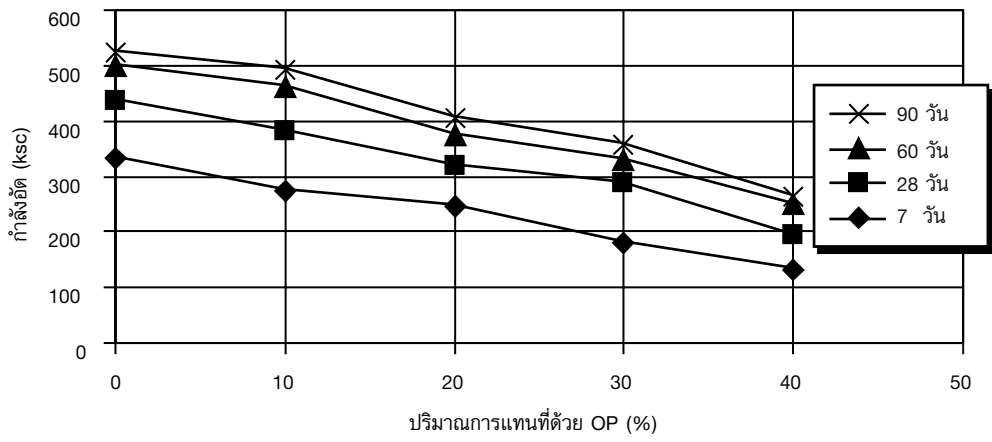
ผลกำลังอัดของมอร์ตาร์ข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพเข้าปาล์มน้ำมันโดยการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นหรือมีขนาดอนุภาคที่เล็กลงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ให้ดีขึ้น ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น เช่น การศึกษาการบดเข้าถ่านหินของ Paya และคณะ [9]

นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันหลังปรับปรุงคุณภาพทั้ง 2 ขนาด (G1P และ G2P) ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อกำลังอัดมอร์ตาร์ที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 10 ในขณะที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 40 ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นส่งผลต่อการลดลงของกำลังค่อนข้างสูง ตัวอย่างเช่นที่อายุ 90 วัน มอร์ตาร์ G1P10 และ G2P10 กำลังอัดมีค่าแตกต่างกันร้อยละ 2 ส่วนมอร์ตาร์ G1P40 และ G2P40 กำลังอัดมีค่าแตกต่างกันร้อยละ 8 แต่มอร์ตาร์ OP40 และ G2P40 มีกำลังอัดแตกต่างกันถึงร้อยละ 33

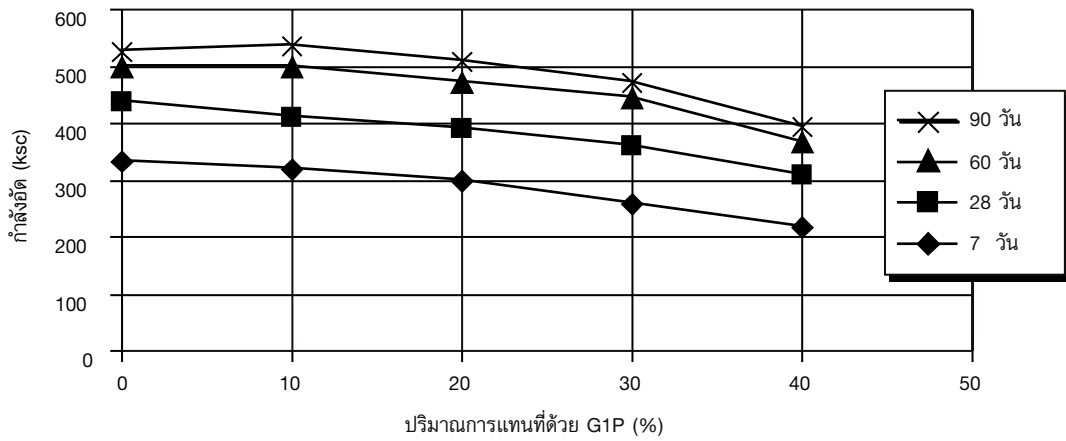
ตารางที่ 4 กำลังอัดและความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ชนิดของมอร์ตาร์	W/(C+P)	Flow	Water Requirement (%)	กำลังอัด (ksc - %)			
				7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
CT1	0.67	111	100	333 - 100	436 - 100	499 - 100	525 - 100
OP10	0.68	105	101	276 - 83	381 - 87	462 - 93	494 - 94
OP20	0.70	109	104	248 - 74	319 - 73	375 - 75	406 - 77
OP30	0.72	107	107	179 - 54	289 - 66	331 - 66	357 - 68
OP40	0.73	108	109	133 - 40	193 - 44	250 - 50	264 - 50
G1P10	0.66	107	99	318 - 96	411 - 94	498 - 100	535 - 102
G1P20	0.67	111	100	298 - 90	389 - 89	473 - 95	510 - 97
G1P30	0.68	112	101	258 - 78	361 - 83	443 - 89	473 - 90
G1P40	0.69	107	103	217 - 65	309 - 71	366 - 89	392 - 75
G2P10	0.66	107	99	325 - 98	428 - 98	510 - 102	546 - 104
G2P20	0.67	111	100	301 - 90	414 - 95	498 - 100	532 - 101
G2P30	0.67	106	100	283 - 85	394 - 90	469 - 94	501 - 95
G2P40	0.68	109	101	260 - 78	344 - 79	409 - 82	437 - 83

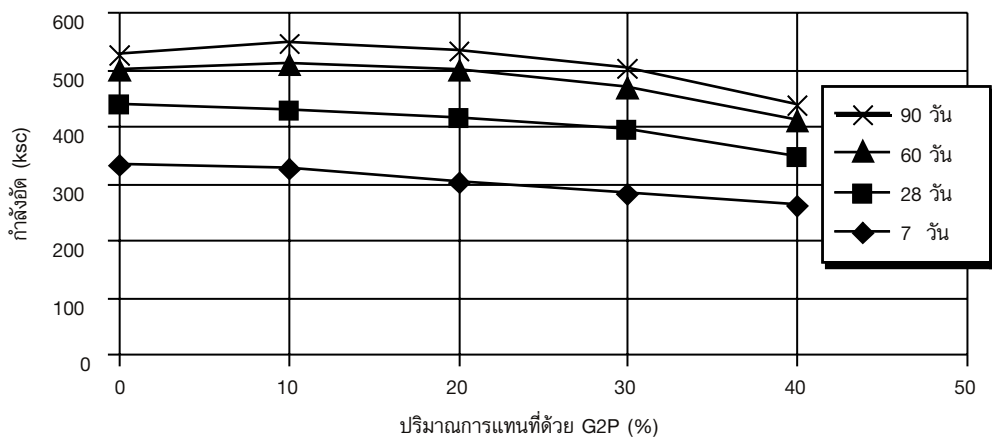
หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึงมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีกำลังอัดเท่ากับหรือมากกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน



(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณการแทนที่และกำลังอัดมอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่กับกำลังอัดของมอร์ตาร์ ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าปาล์ม น้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียด ตามรูปที่ 5 พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนปรับปรุงคุณภาพ (OP) ยิ่งเพิ่มอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น กำลังอัดยังมีค่าลดลงตลอดอายุการทดสอบ และมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วสังเกตได้จากเส้นกราฟที่มีความชันมากดังแสดงในรูปที่ 5 ก. ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังปรับปรุงคุณภาพ (G1P และ G2P) ในรูปที่ 5 ข. และ 5 ค. พบว่าการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ดีขึ้นกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมัน OP อย่างมาก และที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 10 กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับหรือสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 60 วันขึ้นไป จากนั้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการแทนที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ที่อัตราการแทนที่สูงถึงร้อยละ 30 และ 40 ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P ตามลำดับ พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ยังคงมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุตั้งแต่ 7 วันขึ้นไป แสดงให้เห็นได้ว่าการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น ทำให้สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้มากขึ้นด้วย โดยส่งผลกระทบต่อกำลังอัดไม่มากนัก

## 5. สรุปผลการวิจัย

จากการผลการวิจัยการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เพลสท์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานกว่าซีเมนต์เพลสท์ แต่ระยะเวลาการก่อตัวสามารถลดลงใกล้เคียงกับซีเมนต์เพลสท์เมื่อเถ้าปาล์มน้ำมันมีความละเอียดเพิ่มขึ้น
2. การเพิ่มร้อยละการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) ในปูนซีเมนต์ทำให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น แต่เมื่อบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นความต้องการน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากความพรุนและโพรงอากาศที่ดูดซึมน้ำในอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันลดลง
3. เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) ถึงแม้มีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงตามมาตรฐาน ASTM C 618 แต่ไม่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้เนื่องจากมีขนาดอนุภาคใหญ่ ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ช้า และอนุภาคมีความพรุนสูงทำให้การรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงมาก
4. เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ในปูนซีเมนต์ได้ โดยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 17.1 และ 1.5 สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ถึงร้อยละ 30 และ 40 ตามลำดับ โดยมีกำลังอัดมากกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุตั้งแต่ 7 วันขึ้นไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เน้นพื้นฐานต่อการพัฒนา ประจำปี 2545 ซึ่งผู้เขียนขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณ บริษัท ยูนิวานิช จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้ด้วย

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. สำนักงานสถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย ปีเพาะปลูก 2544/45, *ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร*, กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์, เล่มที่ 43, 2545.
2. Joo-Hwa Tay, 1990, "Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material," *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 2, No. 2, pp. 94-105.
3. Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A., 1996, "Palm Oil Fuel Ash - A Potential Pozzolanic Material in Concrete Construction," *Proceeding of the International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21<sup>st</sup> Century*, 20-23 November 1996, Bangkok, Thailand, pp. D361-D366.
4. Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R., 2003, "Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material," *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 15, No. 1, pp. 48-54.
5. Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S., and Chutubtim, S., 2001, "A Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Fineness from Various Sources as Pozzolanic Materials," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, No. 4-5, pp. 335-343.
6. สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2538, "การศึกษาการบดเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการเพิ่มกำลังคอนกรีต," *วารสารวิจัยและพัฒนา สจธ.*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 51-76.
7. เอนก ศิริพานิชกร, 2536, "การพัฒนาคอนกรีตซีเมนต์เถ้าลอยแม่เมาะที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี," *เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการ เรื่องศักยภาพการนำเถ้าถ่านหินลิกไนต์มาใช้ประโยชน์*, 27-28 เมษายน, สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย หน้า 8-1 ถึง 8-18.
8. Von Berg W. and Kukko H., 1991, "Fresh Mortar and Concrete with Fly Ash. In : Wesche K, Editor," *Fly Ash in Concrete Properties and Performance*, RILEM Report, Vol. 7, pp. 24-41.
9. Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Peris, E., and Gonzalez, L.E., 1997, "Mechanical Treatments of Fly Ashes Part III : Studies on Strength Development of Ground Fly Ashes (GFA)-Cement Mortars," *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 1365-1377.