คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณสูง
High-Strength Concrete Containing High Volume Ground Palm Oil Fuel Ash

เทพฤทธิ์ เจริญสุข[1] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร[2] และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล[3]

[1] *(thepparit.ch@mail.kmutt.ac.th)*
[2] *(weerachart.tan@kmutt.ac.th)*
[3] *(chai.jat@kmutt.ac.th)*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและการหดตัวรวมของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งบดจนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำหนดปริมาณวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 560 กก/ม^3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.25 และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 150-200 มม ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน และทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน นอกจากนี้ยังมีการทดสอบการหดตัวรวมของคอนกรีตที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณสูงที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดสูงถึง 82.2 เมกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน ซึ่งมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแปรผันตรงตามกำลังอัดของคอนกรีต และผลการทดสอบการหดตัวรวมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นส่งผลให้การหดตัวรวมของคอนกรีตมีค่าลดลง

คำสำคัญ: เถ้าปาล์มน้ำมัน, คอนกรีตกำลังสูง, การแทนในปริมาณสูง, วัสดุปอซโซลาน

Abstract

This research aims to study compressive strength and total shrinkage of high strength concrete containing high volume ground palm oil fuel ash. Palm oil fuel ash (POFA) was ground by grinding machine until the particles retained on a sieve No. 325 of less than 1% by weight. Then, ordinary Portland cement (OPC) was replaced by ground palm oil fuel ashes at the rates of 60, 70 and 80% by weight of binder. The total binder content of concrete was 560 kg/m^3 and water to binder ratio was set as a constant of 0.25. Superplasticizer was used to control the slump of fresh concrete between 150 to 200 mm. Compressive strength of concrete was investigated at 7, 14, 28 and 90 days, and modulus of elasticity of concrete was investigated at 28 and 90 days. The total shrinkage of concrete was determined at 1, 3, 7, 14 and 28 days. The results indicated that the use of ground POFA to replace OPC at 70% by weight of binder gave compressive strength at 90 days of 82.2 MPa which was as high as that of CT concrete. The modulus of elasticity of high volume ground POFA concretes was related to its compressive strength, i.e. the modulus of elasticity of concrete was increased with the increased compressive strength of concrete. The total shrinkage of concrete was reduced when the cement replacement level by ground POFA increased.

Keywords: Palm oil fuel ash, High-Strength concrete, High volume, Pozzolanic material

1. คำนำ

เนื่องจากทั่วโลกมีการใช้คอนกรีตในการสร้างสิ่งก่อสร้างอย่างแพร่หลายและเพิ่มจำนวนมากขึ้นในทุกปี ทำให้มีความต้องการปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของคอนกรีตในปริมาณมาก ซึ่งการผลิตปูนซีเมนต์ ไม่เพียงแต่ใช้ต้นทุนในการผลิตที่สูง มีขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อน แต่ยังส่งผลกระทบต่อการเกิดสภาวะเรือนการจก เนื่องจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตออกสู่ชั้นบรรยากาศ และเป็นที่มาของปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน นอกจากนี้ปัจจุบันที่ดินในย่านชุมชนมีมูลค่าสูง เจ้าของที่ดินจึงนิยมสร้างตึกสูงเพื่อใช้ประโยชน์ที่ดินให้ได้มากที่สุด การสร้างตึกสูงจำเป็นต้องใช้คอนกรีตกำลังสูงในการก่อสร้าง ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างแล้ว ยังช่วยลดขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้างให้เล็กลง ในขณะที่ยังมีประสิทธิภาพในการรับแรงได้อย่างดี ด้วยเหตุนี้การลดต้นทุนในการใช้

ปูนซีเมนต์โดยการใช้วัสดุทดแทนชนิดอื่นเป็นวัสดุประสานจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถลดต้นทุนในงานก่อสร้างได้

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุจากแหล่งที่มาต่างๆ หลากหลายชนิด เช่น เถ้าลอย เถ้าก้นเตา เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น [1-5] วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตเพื่อช่วยเพิ่มการรับกำลังอัดและปรับปรุงความทนทานของคอนกรีต ซึ่งวัสดุปอซโซลานที่นำมาศึกษาในวิจัยนี้คือ เถ้าปาล์มน้ำมัน โดยเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผาปาล์มน้ำมัน

อายุใช้คอนกรีต 3 ตัวอย่าง เพื่อนำผลการทดสอบมาเฉลี่ยกัน โดยแต่ละตัวอย่างต้องมีค่ากำลังอัดที่ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 10.6 ตามมาตรฐาน ASTM C39 [12] ก่อนการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทุกครั้งต้องทำการขัดผิวของคอนกรีตให้ได้ระดับก่อนการทดสอบ เช่นเดียวกับการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C469 [13] โดยทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน ในการทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีต 3 ตัวอย่าง

ทดสอบการหดตัวรวมของคอนกรีตโดย ผสมคอนกรีตและเทลงในแบบหล่อขนาด 75x75x285 มม^3 ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นถอดแบบ และนำตัวอย่างทดสอบเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 23±2 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50±4 โดยควบคุมอุณหภูมิและความชื้นตลอดระยะเวลาการทดสอบ ทำการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C157 [14] การหดตัวของคอนกรีตแต่ละอายุ 3 ตัวอย่าง เพื่อนำผลการทดสอบมาเฉลี่ยกัน

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์

Mix	Mix Proportion (kg/m^3)					SP (% of binder)	W/B	Slump (mm)
	Cement	POFA	Fine	Coarse	Water			
CT	560	-	780	1020	140	0.9	0.25	150
POFA60	224	336	760	920	140	1.1	0.25	150
POFA70	168	392	750	910	140	1.2	0.25	170
POFA80	112	448	745	900	140	1.3	0.25	180

3. ผลการทดสอบ

3.1

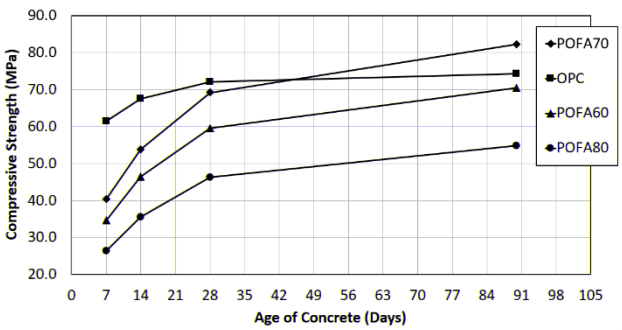
ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของ OPC และ POFA พบว่า POFA มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 0.61 โดยน้ำหนัก เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C430 [9] จากมาตรฐาน ASTM C618 [8] วัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดที่เหมาะสมต้องมีปริมาณที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หากบดจนได้ความละเอียดสูงส่งผลให้มีศักยภาพในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ความละเอียดที่สูงเป็นส่วนช่วยให้มีการทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น [15] ในขณะที่ OPC มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 11.35 โดยน้ำหนัก จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นได้ว่า เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่มีความละเอียดสูงขึ้นจะช่วยเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ [4, 16, 17] ความถ่วงจำเพาะของ OPC มีค่าเท่ากับ 3.14 ซึ่งมากกว่าความถ่วงจำเพาะของ POFA ที่มีค่าเท่ากับ 2.66

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Material	Retained on a No. 325 sieve (% by weight)	Specific gravity
OPC	11.35	3.14
POFA	0.61	2.66

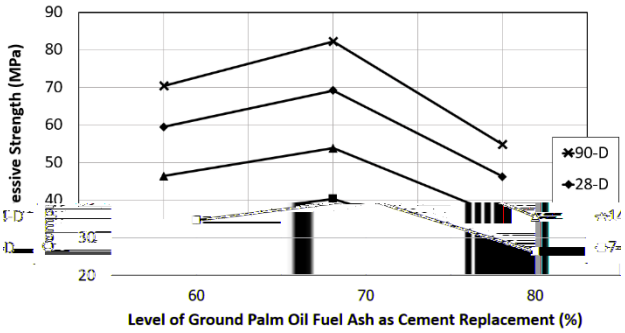
3.2

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตที่แทนที่ OPC ด้วย POFA ที่อัตราส่วนร้อยละ 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าที่อายุ 7, 14, และ 28 วัน คอนกรีตที่ผสม POFA มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีต CT ในทุกการแทนที่ โดยคอนกรีต CT มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 61.4, 67.5 และ 72.1 เมกะปาสคาล ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีต POFA60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 34.7, 46.5 และ 59.5 เมกะปาสคาล หรือคิดเป็นร้อยละ 57, 69 และ 83 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ คอนกรีต POFA70 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 40.4, 53.9 และ 69.2 เมกะปาสคาล หรือร้อยละ 66, 80 และ 96 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ และคอนกรีต POFA80 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 26.4, 35.6 และ 46.3 เมกะปาสคาล หรือร้อยละ 43, 53 และ 64 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราร้อยละ 60 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เมื่อพัฒนากำลังอัดจนถึงอายุ 28 วันสามารถจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงได้ตามมาตรฐาน ACI 363 [18]



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตกำลังสูง

เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้น (7-14 วัน) เห็นได้ว่า คอนกรีตที่ใช้ POFA แทนที่ OPC มีกำลังอัดในช่วงต้นที่ต่ำ แต่ในช่วงอายุปลายคอนกรีตมีการพัฒนาได้สูงขึ้น โดยที่อายุ 90 วัน ของคอนกรีต POFA70 มีกำลังอัดสูงถึง 82.2 เมกะปาสคาล ยิ่งไปกว่านั้นที่อายุ 90 วัน คอนกรีต POFA ที่แทนที่ในอัตราร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีค่ากำลังอัดสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีต CT การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต POFA ที่พัฒนากำลังอัดได้สูงขึ้นในช่วงอายุปลายและอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ POFA แทนที่ OPC โดยจะเห็นได้ว่าการใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีต พร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างต่อเนื่องในช่วงอายุปลาย ในขณะที่ปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียวในระบบคือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน และโดยปกติการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนจะชะลอตัวลงภายหลังอายุ 28 วัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Karim และคณะ [19] ที่ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ OPC ด้วย POFA โดยพบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดช่วยพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นในช่วงอายุปลาย อย่างไรก็ตาม Karim และคณะ [19] ได้เสนอว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเพื่อเป็นวัสดุประสานบางส่วนในงานคอนกรีตคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่มีอนุภาคที่ไม่เท่ากันส่งผลต่อความเหมาะสมของอัตราการแทนที่ต่างกัน

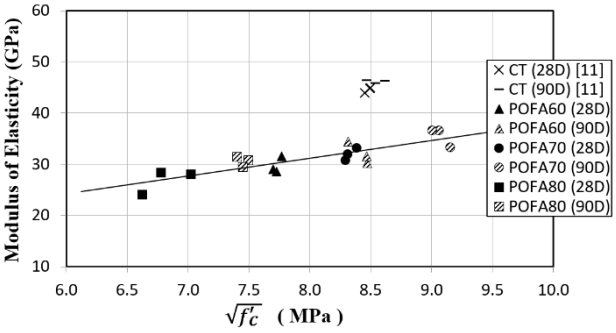


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด

พิจารณาการแทนที่ POFA ในแต่ละอัตราส่วน แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเป็นอัตราการแทนที่ที่เหมาะสม เมื่อเทียบกับคอนกรีต POFA60 และ POFA80 เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน เป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ SiO_2 ในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งได้ผลผลิตของปฏิกิริยาเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือ C-S-H โดย C-S-H ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ส่งผลให้คอนกรีตสามารถรับกำลังได้มากขึ้น และคอนกรีต POFA80 ที่มีอัตราการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่สูง ทำให้มีปริมาณ OPC ลดลงเหลือปริมาณที่น้อย ส่งผลให้เกิดสารตั้งต้น $Ca(OH)_2$ ในปริมาณที่น้อยกว่า POFA70 และมีโอกาสที่น้อยกว่าในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่ออีกลำดับหนึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล [20] และในทางกลับกัน คอนกรีต POFA60 มีปริมาณ SiO_2 ที่ต่ำกว่าคอนกรีต POFA70 เนื่องจากมีการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่น้อยกว่าทำให้มีผลผลิตจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ต่ำกว่า

3.3

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4 จากการศึกษาพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเป็นวัสดุประสานแทนที่ OPC ทั้ง 3 อัตราการแทนที่ โดยทดสอบอัตราการแทนที่ละ 3 ตัวอย่างที่อายุ 28 และ 90 วัน เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ พบว่าการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่ทำให้คอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุดคือร้อยละ 70 และรองลงมาเป็นร้อยละ 60 และ 80 ตามลำดับ ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต POFA แปรผันตรงกันกับกำลังอัด เมื่อพิจารณาคอนกรีต POFA70 ในแต่ละตัวอย่างที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 32.0, 30.8 และ 33.2 จิกะปาสคาล และที่อายุ 90 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 36.6, 36.6 และ 33.3 จิกะปาสคาล รองลงมาด้วยคอนกรีต POFA 60 ที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 31.6, 28.6 และ 29.0 จิกะปาสคาล และที่อายุ 90 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 30.2, 31.6 และ 34.4 จิกะปาสคาล และคอนกรีต POFA80 ที่อายุ 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 24.1, 28.0 และ 28.3 จิกะปาสคาล และที่อายุ 90 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 30.8, 29.5 และ 31.4 จิกะปาสคาลซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีกำลังอัดต่ำที่สุด และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำที่สุดเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตแทนที่ POFA กับ คอนกรีต CT จากงานวิจัยของ บุษรา มีนยุทธ์ และคณะ [11] พบว่าคอนกรีต POFA มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในทุกการแทนที่ที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เปรียบเทียบคอนกรีต POFA70 และ คอนกรีต CT ที่มีกำลังอัดสูงสุดทั้ง 2 อัตราส่วนที่อายุ 90 วัน (82.2 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีต POFA70 และ 74.2 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีต CT) พบว่าคอนกรีต CT มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าคอนกรีต POFA70 อยู่มาก ซึ่งนอกจากผลจากกำลังอัดของคอนกรีต CT ที่สูงกว่า ยังมีผลของคุณสมบัติของมวลรวม โดยหินที่ใช้ในการศึกษานี้แตกต่างจากหินจากการศึกษาของบุรษา มีนยุทธ์ และคณะ [11] จากผลการทดสอบจะเห็นว่าคุณภาพของหินส่งผลอย่างมากต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต



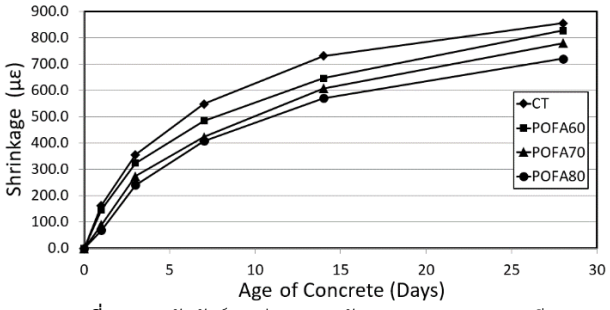
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของคอนกรีต

จากผลการทดสอบยังพบว่า การแทนที่ OPC ด้วย POFA ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยตรง แต่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น โดยสมบัติการเสียรูปของซีเมนต์เพสต์มวลรวม และการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม สมบัติดังกล่าวมีผลกระทบโดยตรงต่อการรับกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต สอดคล้องกับงานวิจัยของ บุษรา มีนยุทธ์ และคณะ [11] ที่ใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลาน พบว่าการใช้วัสดุปอซโซลานไม่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดที่สูงขึ้น

3.4

การหดตัวรวมของคอนกรีตเป็นสมบัติของคอนกรีตที่สำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจากคอนกรีตที่มีการหดตัวรวมมากจะส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ การเกิดการหดตัวรวมของคอนกรีตมีปัจจัยหลักคือการสูญเสียน้ำในช่องว่าง (Capillary pore) ซึ่งการสูญเสียน้ำจะเริ่มต้นจากช่องว่างที่ใหญ่ในช่วงอายุต้นของคอนกรีต ตามด้วยช่องว่างขนาดเล็กในช่วงอายุถัดไป ซึ่งจากรูปที่ 4 พบว่าคอนกรีต POFA80 เป็นคอนกรีตที่มีการหดตัวต่ำที่สุด โดยมีค่าการหดตัวรวมของคอนกรีต POFA80 ที่อายุ 1 และ 3 วัน เท่ากับ 68 และ 241 ไมโครสเตรน หลังจากนั้นมีอัตราการหดตัวลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 408, 571 และ 721 ไมโครสเตรน ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตควบคุม มีการหดตัวที่สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในทุกอายุการทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อายุ 14 วัน คอนกรีตควบคุมมีการหดตัวสูงถึง 731 ไมโครสเตรน แต่คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์มีการหดตัวเพียง 571-646 ไมโครสเตรนเท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้ POFA แทนที่ OPC กับคอนกรีต CT ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีต POFA60, POFA70 และ POFA80 มีค่าการหดตัวรวมเท่ากับ 827, 780 และ 721 ไมโครสเตรน ตามลำดับ และค่าหดตัวรวมของคอนกรีต CT ที่อายุเดียวกันเท่ากับ 856 ไมโครสเตรน แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีค่าการหดตัวรวมน้อยกว่าคอนกรีต CT ซึ่งเห็นได้ว่า เมื่ออัตราการแทนที่ POFA มากขึ้น ทำให้การหดตัวของคอนกรีตมีแนวโน้ม ลดลงตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Alsubari และคณะ [21] และงานวิจัยของ Hamada และคณะ [22] เนื่องจาก POFA มีขนาดอนุภาคเล็ก จึงสามารถเข้าไปอุดช่องว่างในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีช่องว่างน้อยลงและมีความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีการสูญเสียน้ำลดลง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวรวมและอายุของคอนกรีต

4. สรุปผลการทดสอบ

4.1 เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่มีความละเอียดค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ปริมาณสูง มีอัตราส่วนการแทนที่ดีที่สุด คือร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยมีกำลังอัดที่อายุ 90 วัน สูงถึง 82.2 เมกะปาสคาล จัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงได้

4.2 การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต สามารถลดต้นทุนของคอนกรีตได้สูง เนื่องจากคอนกรีต POFA70 ใช้ปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 30 ของคอนกรีต CT ซึ่งสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้สูงถึง 392 กก/ม^3 โดยมีกำลังอัดที่อายุ 90 วัน สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

4.3 การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต ไม่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะแปรผันตามกำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น

4.4 การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต ส่งผลให้ค่าการหดตัวรวมของคอนกรีตลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีขนาดเล็ก ทำให้ลดช่องว่างในคอนกรีตและทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานน้ำมันปาล์ม จังหวัดชุมพร ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Wang, Y., Tan, Y., Wang, Y. and Liu, C. (2020). Mechanical properties and chloride permeability of green concrete mixed with fly ash and coal gangue. *Construction and Building Materials*, 233, pp. 117-166.
2. Khongpermgoson, P., Boonlao, K., Ananthanet, N., Thitithananon, T., Jaturapitakkul, C., Tangchirapat, W. and Ban, C.C. (2020). The mechanical properties and heat development behavior of high strength concrete containing high fineness coal bottom ash as a pozzolanic binder. *Construction and Building Materials*, 253, pp. 119-239.
3. Loganayagan, S., Chandra Mohan, N. and Dhivyabharathi, S. *Sugarcane bagasse ash as alternate supplementary cementitious material in concrete.* Materials Today: Proceedings, 2 April 2020.

4. Jaturapitakkul, C., Tangpagasit, J., Songmue, S. and Kiattikomal, K. (2011). Filler effect and pozzolanic reaction of ground palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 25(11), pp. 4287-4293.
5. Olutoge, F.A. and Adesina, P.A. (2019). Effects of rice husk ash prepared from charcoal-powered incinerator on the strength and durability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 196, pp. 386-394.
6. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร (2562). สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี ๒๕๖๒. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, หน้า. 26.
7. Tangchirapat, W. (2007). *Effect of palm oil fuel ash and rice husk-bark ash on compressive strength and durability of concrete*. Ph.D. Dissertation, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.
8. ASTM C618 (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States of America.
9. ASTM C430 (2017). *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-μm (No. 325) Sieve*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States of America.
10. ASTM C188 (2017). *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States of America.
11. บุษรา มีนยุทธ์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2019). คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดปริมาณสูง. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 14-24.
12. ASTM C39 (2020). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States of America.
13. ASTM C469 (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States of America.
14. ASTM C157 (2017). *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States of America.
15. Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P. (2011). Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 25(11), pp. 4095-4104.
16. Mujah, D. (2016). Compressive strength and chloride resistance of grout containing ground palm oil fuel ash. *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 712-722.
17. Elbasir, O.M.M., Johari, M.A.M. and Ahmad, Z.A. (2019). Effect of fineness of palm oil fuel ash on compressive strength and microstructure of alkaline activated mortar. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23, pp. 136-152.
18. American Concrete Institute, A.C. (2010). *Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10)*, ACI Manual of Concrete Pratice, American Concrete Institute: Farmington Hills, Michigan, pp. 65.
19. Karim, R., Zain, Jamil and Islam, N. (2011). Strength of concrete as influenced by palm oil fuel ash. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5, pp. 990-997.
20. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล (2549). การศึกษาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 66-71.
21. Alsubari, B., Shafigh, P., Jumaat, M.Z. and Alengaram, J. (2014). Palm oil fuel ash as a partial cement replacement for producing durable self-consolidating high-Strength concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, pp. 8507-8516.
22. Hamada, H.M., Al-attar, A.A., Yahaya, F.M., Muthusamy, K., Tayeh, B.A. and Humada, A.M. (2020). Effect of high-volume ultrafine palm oil fuel ash on the engineering and transport properties of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 12, pp. 318