

## การใช้ประโยชน์เศษวัสดุกองทิ้งในคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

### UTILIZATION OF DISPOSED WASTE MATERIAL ON GREEN CONCRETE

สำเรจ รักร้อน<sup>1\*</sup>, อาทร ชูพลสัตย์<sup>1</sup>, ทิวา ตันสถิตย์<sup>1</sup>, ประพัฒน์ สีใส<sup>1</sup>, ปริญา จินดาประเสริฐ<sup>2</sup>

**Sumrerng Rukzon<sup>1\*</sup>, Arthorn Chuponsat<sup>1</sup>, Tiwa Tansathit<sup>1</sup>, Prapat Seesai<sup>1</sup>, Prinya Chindaprasit<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin.

<sup>2</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

<sup>2</sup>Faculty of Engineering, Khon Kaen University.

\*Corresponding author, e-mail: sumrerng.ruk@mutr.ac.th

**Received:** 14 April 2020; **Revised:** 14 September 2021; **Accepted:** 31 March 2022

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพัฒนาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดและเศษคอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุก่อสร้าง โดยศึกษากำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการต้านทานแรงดัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) และเศษคอนกรีตบล็อก (Recycle Block หรือ RCB) เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (CT) ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 ใช้อัตราของมวลรวมจากเศษคอนกรีตบล็อก (RCB) ต่อวัสดุประสาน (CT+GPOFA) เท่ากับ 2.00 และ 3.00 ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า การใช้ GPOFA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ส่งผลให้คอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ ส่วนกำลังอัดและการต้านทานแรงดัดดีขึ้น นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังชี้ให้เห็นว่าเศษคอนกรีตบล็อกสามารถใช้เป็นมวลรวมในการผลิตคอนกรีตได้เมื่อใช้อัตราส่วน RCB ต่อ CT+GPOFA เท่ากับ 3.00

**คำสำคัญ:** คอนกรีต กำลังอัด การดูดซึมน้ำ เถ้าปาล์มน้ำมัน เศษคอนกรีตบล็อก

#### Abstract

This research investigates the development for using ground palm oil fuel ash (GPOFA) and recycle block aggregate (RCB) as a construction material. This work presents a study of the compressive strength, water absorption and flexural strength of concrete containing ground palm oil fuel ash (GPOFA) and recycle block aggregate (RCB). Portland cement (CT) was partially replaced with GPOFA of 20 and 40% by weight of the binder. The concretes of GPOFA and RCB with water cement ratio of 0.40 and 0.50 and RCB aggregate to CT+GPOFA (Binder) ratio of 2.00 and 3.00 were used in this work. Superplasticizer (SP) was used to improve the workability of concretes. The test results found that the concretes with low

water absorption, good compressive and flexural strength were obtained with GPOFA of 20% by weight of the binder and water binder ratio of 0.40. In addition, the results indicated that the recycle block can be used as an aggregate in producing concrete with ratio of RCB aggregate to CT+GPOFA of 3.00.

**Keywords:** Concrete, Compressive strength, Water absorption, Palm oil fuel ash, Recycle concrete block

## บทนำ

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) คือวัสดุที่มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมกับปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ [1-5] วัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาศึกษาเป็นวัสดุซีเมนต์ในประเทศไทย คือ เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมและเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ใกล้เคียง ส่วนการกำจัดทิ้งกระทำได้ยาก และสิ้นเปลืองพื้นที่ในการกองทิ้ง ปัจจุบันนักวิจัยได้พยายามนำเถ้าลอยไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตเป็นคอนกรีตมากขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่า ในประเทศไทยยังมีวัสดุปอซโซลานบางชนิดที่มีศักยภาพสำหรับใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม [1-3]

บางพื้นที่ของประเทศไทยมีโรงงานผลิตน้ำมันจากต้นปาล์มน้ำมัน ผลพลอยได้ที่เหลือจากกระบวนการผลิต คือ เศษกะลาปาล์มและเส้นใย วัสดุส่วนที่เหลือดังกล่าวนี้ถูกไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานน้ำมันปาล์ม [1-3] จากนั้นจะได้ส่วนที่เหลือเป็นวัสดุหรือเถ้ากองทิ้ง คือ เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นวัสดุที่มีสารจำพวกซิลิกา (Silica) หรือมีสารซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ [4, 6] โดยสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ผลที่ได้คือปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวนี้สามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น [6-7]

หากมีการศึกษาและการพัฒนาต่อยอดเถ้าลอยด้วยการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) เป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถใช้เป็นวัสดุก่อสร้างใช้งานได้ ผลที่ได้จึงคาดว่าจะปอซโซลานในอุตสาหกรรมก่อสร้างของประเทศไทยเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้ จึงได้ศึกษากระบวนการผลิตคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) จากผลพลอยได้เกษตรกรรมเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและพัฒนามวลรวมจากเศษคอนกรีตบล็อกที่ใช้แล้ว (Recycle Block) สำหรับใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อศึกษาข้อมูลและเก็บข้อมูลในการใช้เป็นแนวทางพัฒนาด้านนวัตกรรมหรือด้านเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างสำหรับอาคารและงานโครงสร้างให้กับอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนผลิตคอนกรีต ศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น กำลังอัด กำลังดัด และการดูดซึมน้ำ ผลที่ได้ของงานวิจัยนี้จะนำไปสู่การใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งเป็นวัสดุก่อสร้างในงานคอนกรีตได้จริง ลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ใกล้เคียงของวัสดุกองทิ้ง ลดปริมาณของเสีย และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้ ดังนั้นวัสดุเหลือทิ้งจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับเป็นวัสดุก่อสร้างในประเทศไทย

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) และเศษคอนกรีตบล็อก (Recycle block หรือ RCB) เป็นวัสดุก่อสร้างเพื่อผลิตคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. ศึกษาอิทธิพลของความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์และใช้เป็นวัสดุโปชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
2. ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเศษคอนกรีตบล็อกต่อวัสดุประสานในการรับกำลังอัด การต้านทานแรงดัด และการดูดซึมน้ำของคอนกรีต
3. ศึกษาผลของปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัด การต้านทานแรงดัด และการดูดซึมน้ำของคอนกรีต
4. ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการรับกำลังอัด การต้านทานแรงดัด และการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

## วิธีดำเนินการวิจัย

### วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

#### เถ้าปาล์มน้ำมัน

ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) ด้วยการบดให้มีขนาดต่างกัน คือ ขนาดหยาบ (PA1) ขนาดละเอียดปานกลาง (PA2) และขนาดละเอียดที่สุด (PA3) โดยให้มีสัดส่วนค้ำบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 25-30, 10-15 และ 3-5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นศึกษาผลของความละเอียดต่อความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต

#### เศษคอนกรีตบล็อก

ใช้เศษคอนกรีตบล็อกเหลือทิ้ง (Recycle Block, RCB) ที่มีอยู่โดยทั่วไป โดยนำเศษคอนกรีตบล็อกปรับปรุงคุณภาพเป็นมวลรวมเพื่อพิจารณาให้น้ำหนักเบา ด้วยการบดและแยกขนาดให้มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด ทดสอบด้วยตะแกรงมาตรฐาน ASTM [8-9] เพื่อใช้เป็นมวลรวม มีความละเอียด ดังนี้

- 1) บดและแยกขนาดเศษคอนกรีตบล็อกให้มีขนาด เท่ากับ 1.18 มิลลิเมตร ใช้เป็นมวลรวมขนาดเล็ก
  - 2) บดและแยกขนาดเศษคอนกรีตบล็อกให้มีขนาด เท่ากับ 4.75 มิลลิเมตร ใช้เป็นมวลรวมขนาดกลาง
  - 3) บดและแยกขนาดเศษคอนกรีตบล็อกให้มีขนาด เท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร ใช้เป็นมวลรวมขนาดใหญ่
- เศษคอนกรีตบล็อกทั้ง 3 ขนาด ใช้ผสมรวมกันเป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตสัดส่วนที่เท่ากัน

#### ปูนซีเมนต์

งานวิจัยนี้ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 (CT) เป็นวัสดุประสานร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมันบด (GPOFA)

#### ส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้ส่วนผสมของคอนกรีต ประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (CT) และใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOFA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน งานวิจัยนี้ วัสดุประสาน หมายถึง CT+GPOFA ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 และ 0.50 เพื่อหลีกเลี่ยงสารเคมีเจือปนในน้ำ ในงานวิจัยนี้จึงใช้น้ำกลั่นเป็นส่วนผสมคอนกรีต ในงานวิจัยนี้ อัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสาน (RCB/CT+GPOFA) ใช้เท่ากับ 2.00 และ 3.00 ตามลำดับ โดยใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตบล็อก (RCB) ที่ได้คัดขนาดการคละไว้แล้ว [8-9] ในงานวิจัยนี้ใช้สารลดน้ำพิเศษ หรือ Superplasticizer (SP) โดยควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 50-100 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้และสามารถใช้งานคอนกรีตทั่วไปได้จริง งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบให้ส่วนผสม

คอนกรีตมีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตปกติ กล่าวคือ ออกแบบส่วนผสมให้มีหน่วยน้ำหนักเบากว่า 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้ผลที่ได้จากการศึกษาอาจนำเอาปาล์มน้ำมันและเศษคอนกรีตบล็อกพัฒนาเป็นคอนกรีตมวลเบาสำหรับใช้ในงานก่อสร้างในอนาคต ดังนั้น การออกแบบส่วนผสมใช้การออกแบบส่วนผสมคล้ายกันกับคอนกรีตมวลเบาแบบมีมวลรวมเบาเป็นส่วนผสม อย่างไรก็ตาม ส่วนผสมยังต้องใช้วัสดุประสาน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเอาปาล์มน้ำมันบดละเอียด ส่วนผสมของคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีต

	Symbols	20%GPOFA	40%GPOFA		
W/B = 0.40	CT	360	270		
	Ratio of	GPOFA	90		
	RCB/Binder = 3.00 (Density of 1800 kg/m <sup>3</sup> )	RCB	1130	1130	
		SP	3.8	4.2	
		(Superplasticizer)			
	Water	175	175		
	W/B = 0.50	CT	360	270	
		Ratio of	GPOFA	90	
		RCB/Binder = 2.00 (Density of 1600 kg/m <sup>3</sup> )	RCB	900	900
			SP	4.2	4.5
(Superplasticizer)					
Water		175	175		
W/B = 0.50		CT	360	270	
		Ratio of	GPOFA	90	
		RCB/Binder = 3.00 (Density of 1800 kg/m <sup>3</sup> )	RCB	1130	1130
			SP	3.5	4.0
	(Superplasticizer)				
	Water	210	210		
	W/B = 0.50	CT	360	270	
		Ratio of	GPOFA	90	
		RCB/Binder = 2.00 (Density of 1600 kg/m <sup>3</sup> )	RCB	900	900
			SP	4.8	4.1
(Superplasticizer)					
Water		210	210		

สัญลักษณ์ของตารางที่ 1: CT คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, GPOFA คือ เอาปาล์มน้ำมันบดละเอียด, Recycle Block หรือ RCB คือ เศษคอนกรีตบล็อกเหลือทิ้ง และ Superplasticizer หรือ SP คือ สารลดน้ำพิเศษ, RCB/Binder คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

### การทดสอบกำลังอัดและการต้านทานแรงดัด

ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C39 [10] ภายหลังก่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง ถอดแบบและบ่มในน้ำสะอาด ส่วนการทดสอบการต้านทานแรงดัด ใช้ตามมาตรฐาน ASTM C78 [11] จากนั้นนำมาทดสอบกำลังอัดการต้านทานแรงดัด ที่อายุ 28 วัน การทดสอบกำลังอัดการต้านทานแรงดัด ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ จำนวน 6 ก้อน และหาค่าเฉลี่ยของกำลังอัด ส่วนที่แตกต่างกันเกินร้อยละ 20 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

### การทดสอบการดูดซึมน้ำ

ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตแก่ปาล์มน้ำมันและเศษคอนกรีตบล็อก ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 [12] ทดสอบที่อายุ 28 วัน การทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ จำนวน 6 ก้อน และหาค่าเฉลี่ยของกำลังอัด ส่วนที่แตกต่างกันเกินร้อยละ 20 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

### ตัวอย่างสัญลักษณ์การทดสอบ

ตัวอย่างสัญลักษณ์การทดสอบ แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสัญลักษณ์การทดสอบ

สัญลักษณ์	ความหมาย
20%GPOFA	การใช้ GPOFA แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ ร้อยละ 20
40%GPOFA	การใช้ GPOFA แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ ร้อยละ 40
W/B	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
Ratio of RCB/CT+GPOFA = 2.00	อัตราส่วนของ เศษคอนกรีตบล็อกมวลรวมต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2.00
Ratio of RCB/CT+GPOFA = 3.00	อัตราส่วนของ เศษคอนกรีตบล็อกมวลรวมต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 3.00
PA1 PA2 PA3	แก่ปาล์มน้ำมันอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 25-30, 10-15 และ 3-5

### ผลการวิจัย

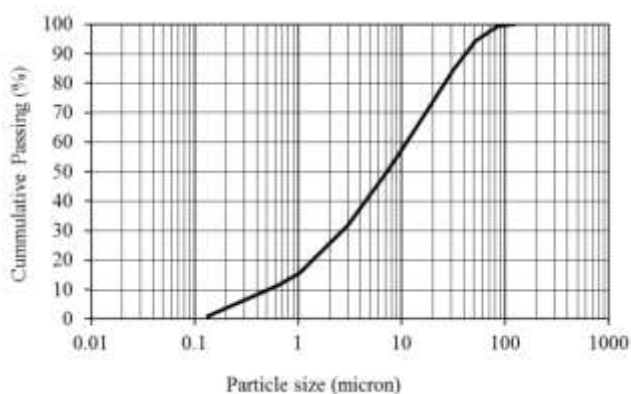
#### สมบัติพื้นฐานของแก่ปาล์มน้ำมัน

ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของแก่ปาล์มน้ำมัน แสดงไว้ในตารางที่ 3 ผลการทดสอบพบว่า แก่ปาล์มน้ำมันบดละเอียด (PA3) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 13,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และมีอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 ร้อยละ 3-5 การบดแก่ปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะและพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น [1-4], [6] ส่วนแก่ปาล์มน้ำมันก่อนบดไม่สามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีของเบลนไต์ (Blaine Fineness) เนื่องจากมีความพรุนสูงอากาศไหลผ่านรวดเร็วไม่สามารถอ่านค่าของเครื่องทดสอบได้ [13-14] ภาพที่ 1 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) การศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า ขนาดอนุภาคของแก่ปาล์มน้ำมันหรือค่าของ Median Particle Size ( $\mu\text{m}$ ) ที่เส้น  $d_{50}$  ของแก่ปาล์มน้ำมัน มีค่าเท่ากับ 7.5 ไมครอน ดังแสดงในตารางที่ 3 ส่วนแก่ปาล์มน้ำมันก่อนบดไม่สามารถหาความละเอียดโดยวิธีของเบลนไต์ เนื่องจากอากาศไหลผ่านเครื่อง

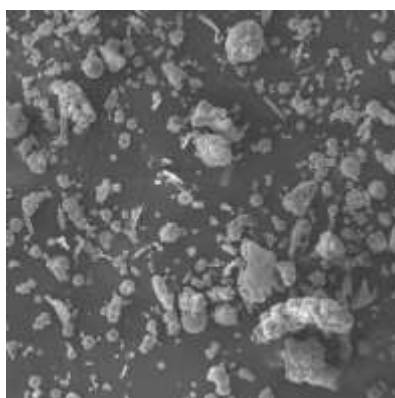
ทดสอบเร็วเกินไปจึงไม่สามารถอ่านค่าได้ การทดสอบนี้พบว่า ถ้าปาล์มน้ำมันบด (PA3) มีการกระจายตัวร้อยละ 80 อยู่ในช่วงประมาณ 1-80 ไมครอน ดังแสดงในภาพที่ 1 และ 2 ในภาพที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคเป็นรูปทรงเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน การปรับปรุงขนาดของถ้าปาล์มน้ำมัน ให้มีขนาดเล็กลงด้วยการบดละเอียด ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคลดลง เนื่องจากการบดช่วยให้รูพรุนของอนุภาคลดลง [13-14] ดังนั้นน้ำหนักต่อปริมาตรจึงเพิ่มขึ้น ดังนั้น เมื่อพิจารณาผลของการเป็นวัสดุปอซโซลานของถ้าปาล์มน้ำมัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อบดถ้าปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้มีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3-5 โดยน้ำหนัก (ดังแสดงในตารางที่ 3) ดังนั้น เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C618 [15] พบว่า ถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ เนื่องจากขนาดความละเอียดและพื้นที่ผิวที่มากขึ้นของวัสดุปอซโซลานจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี [16-18]

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของถ้าปาล์มน้ำมัน

สมบัติทางกายภาพ	ถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด	ถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด
Median particle size ( $\mu\text{m}$ ), $d_{50}$ – ไมครอน	-	7.5
Retained on a sieve No. 325 (%)	60-75	3-5
Specific Gravity	1.42	2.23
Blaine Fineness ( $\text{cm}^2/\text{gm}$ ) - ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	-	13,000



ภาพที่ 1 ขนาดการกระจายตัวของถ้าปาล์มน้ำมัน PA3



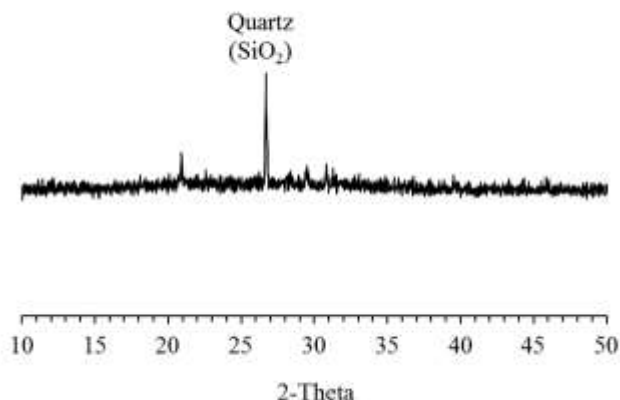
ภาพที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของถ้ำปาล์มน้ำมัน PA3

#### องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำปาล์มน้ำมัน

ผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีของถ้ำปาล์มน้ำมันแสดงไว้ในตารางที่ 4 ผลจากการทดสอบพบว่า ถ้ำปาล์มน้ำมันมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เท่ากับร้อยละ 63.4 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 4.5 ซึ่งมีค่าไม่สูงนัก แสดงว่ามีการเผาที่เหมาะสมและสมบูรณ์ ผลรวมองค์ประกอบทางเคมีของ  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  อยู่ในช่วงร้อยละ 66.5 ในภาพที่ 3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD-Pattern) ของถ้ำปาล์มน้ำมันบดละเอียด พบว่า มีองค์ประกอบหลัก คือ Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบเคมีแล้ว พบว่าถ้ำปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุพอโซซิลานชนิดทั่วไป [7, 13, 19]

#### ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำปาล์มน้ำมัน

Oxides	% ของ Oxides
$\text{SiO}_2$	63.4
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1.6
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1.5
CaO	7.6
LOI	4.5
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	66.5

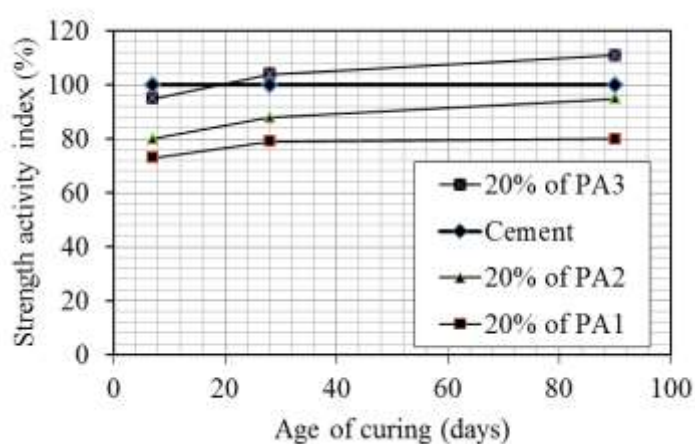


ภาพที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD-Pattern) ของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด

#### ดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ความละเอียดแตกต่าง

การศึกษานี้ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด 3 ขนาด คือ ขนาดหยาบ (PA1) ขนาดละเอียดปานกลาง (PA2) และขนาดละเอียดที่สุด (PA3) นำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และทดสอบดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์ (Strength Activity Index) จากนั้นพิจารณาในส่วนของความละเอียดที่ให้กำลังอัดที่ดีที่สุดไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมคอนกรีต ต่อไป

ดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน โดยผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ความละเอียดต่างกัน แสดงไว้ในภาพที่ 4 ซึ่งพบว่า การบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดที่มากขึ้น มีแนวโน้มให้ดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าสูงขึ้น ดังนั้น ความละเอียดของวัสดุปอซโซลานส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านบางชิ้น [20-21] ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกใช้เถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดสุด (PA3) เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมคอนกรีต



ภาพที่ 4 ดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดความละเอียด PA1, PA2 และ PA3



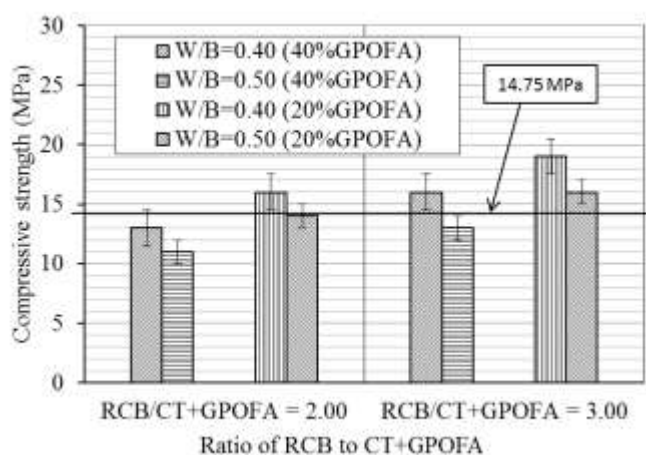
### กำลังอัดของคอนกรีต

ภาพที่ 5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดและเศษคอนกรีตบล็อกในทุกส่วนผสมของหน่วยน้ำหนักที่ออกแบบไว้

ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 มีค่ากำลังอัดสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 การใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้นอาจส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นตัวที่ต่ำและมีความพรุนสูงเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ปริมาณน้ำที่น้อยกว่า [18] ดังนั้น ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ควรพิจารณาถึงปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้ในส่วนผสมเป็นสำคัญ เนื่องจากส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต

การใช้อัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.00 และ 3.00 พบว่า ที่อัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสานในปริมาณ 3.00 (หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มปริมาณวัสดุประสาน อาจส่งผลให้ลดความสามารถในการยึดประสานและการทึบแน่น เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์และ เถ้าปาล์มน้ำมัน ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากขึ้น [7], [20-21] นอกจากนี้ การศึกษาครั้งนี้ ยังพบว่า การออกแบบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความแน่นตัวของคอนกรีต ส่งผลที่ดีต่อการรับกำลัง

ผลกระทบของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย GPOFA ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GPOFA ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า การแทนที่ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 14.75 เมกะปาสคาล (MPa) หรือประมาณ 148 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ซึ่งอาจใช้ในงานที่ไม่ต้องการการรับกำลังที่สูงมาก กล่าวคือ สามารถใช้ในงานที่กำลังต่ำหรือปานกลาง เช่น พื้นคอนกรีตลานบ้าน คอนกรีตลานจอดรถขนาดเล็ก ลานอเนกประสงค์ และอาคารพักอาศัยขนาดเล็ก เป็นต้น การเพิ่มปริมาณการแทนที่ส่งผลให้ส่วนผสมต้องการสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้น การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มากขึ้น อาจส่งผลต่อการรับกำลัง กล่าวคือ แม้ว่า การบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียด ความพรุนในตัวอย่างอาจยังมีอยู่ [19] ทั้งนี้ควรได้มีการศึกษาถึงสมบัติด้านโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุต่อไป เพื่อเป็นฐานข้อมูลการศึกษาวิจัยที่ต่อเนื่องอย่างยั่งยืนต่อไป

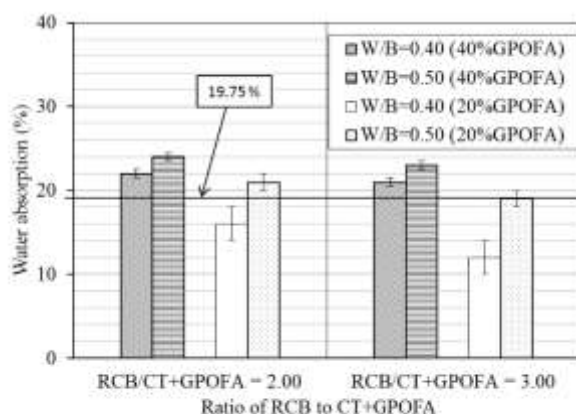


ภาพที่ 5 ผลของอัตราส่วน W/B, RCB ต่อ CT+GPOFA และปริมาณการแทนที่ GPOFA ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

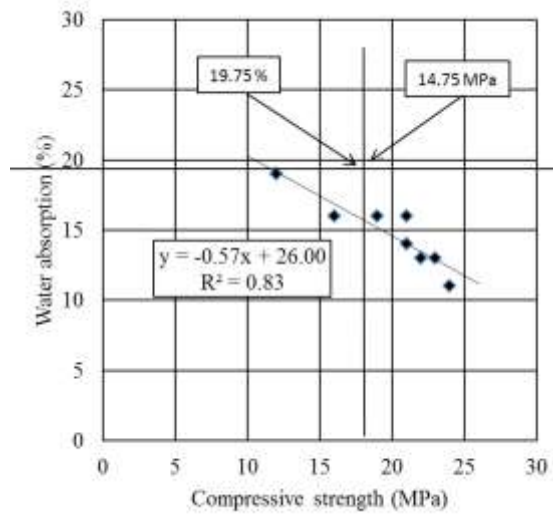
### การดูดซึมน้ำของคอนกรีต

ภาพที่ 6 แสดงผลกระทบของ W/B, RCB ต่อ CT+GPOFA และปริมาณการแทนที่ GPOFA ต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามค่าอัตราส่วนของ RCB ต่อ CT+GPOFA ที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มหน่วยน้ำหนักส่งผลให้คอนกรีตที่บดแน่น กำลังอัดสูงขึ้นจึงลดการดูดซึมน้ำ การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 มีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ในทุกส่วนผสม ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า กำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กัน โดยพบว่า เมื่อหน่วยน้ำหนักมากขึ้น กำลังอัดสูงขึ้นและค่าการดูดซึมน้ำลดลงตามไปด้วย [3] ค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าเท่ากับร้อยละ 19.75

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าน้อยให้ค่ากำลังอัดที่สูงและค่าหน่วยน้ำหนักสูง การที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นพบว่าปริมาณฟองอากาศจะมากขึ้นด้วย ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย [22] การเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ผลของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและเศษคอนกรีตบล็อกครั้งนี้ จึงควรพิจารณาถึงปริมาณการแทนที่ เนื่องจากอาจส่งผลต่อกำลังอัดที่ต้องการใช้งาน ในภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสม RCB และ GPOFA ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตอยู่ระหว่างร้อยละ 7-24 และค่ากำลังอัดของคอนกรีตอยู่ช่วงระหว่าง 8-19 เมกะปาสคาล (MPa) กำลังอัดและการซึมผ่านมีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ เมื่อการซึมผ่านน้ำลดลง ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของความแน่นตัวของคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดสูงและการซึมผ่านน้ำซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตยากขึ้นแสดงว่าคอนกรีตมีความพรุนต่ำ [7, 19, 23] เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของกำลังอัดและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตสำหรับการนำไปใช้งานจริง พบว่า กำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีตที่เหมาะสมกับการใช้งานมีค่าเท่ากับ 14.75 เมกะปาสคาล (MPa) หรือประมาณ 148 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าเท่ากับร้อยละ 19.75 (ดูภาพที่ 5-7)



ภาพที่ 6 ผลของอัตราส่วน W/B, RCB ต่อ CT+GPOFA และปริมาณการแทนที่ GPOFA ต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

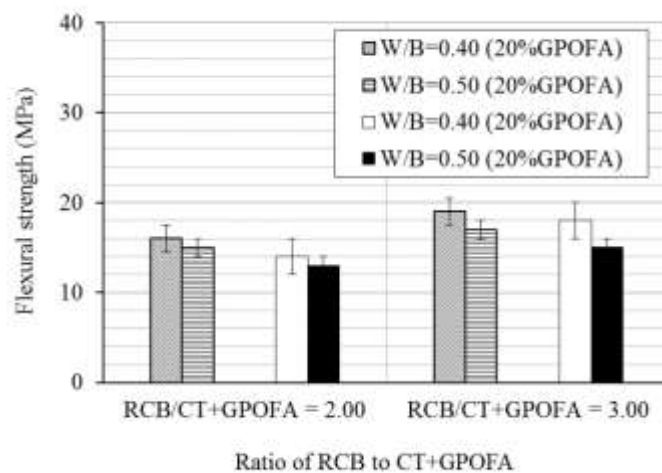


ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสม RCB และ GPOFA

#### กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน แสดงในภาพที่ 8 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของวัสดุมวลรวมต่อวัสดุประสาน ส่งผลให้ค่าการต้านทานการดัดสูงขึ้นด้วย การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในทุกส่วนผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 พบว่ามีกำลังดัดสูงกว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ในปริมาณมากขึ้น พบว่าส่งผลให้ค่ากำลังดัดลดลง ซึ่งทดสอบคล้ายกับผลการทดสอบกำลังอัดในหัวข้อข้างต้นต่างกันเพียงหน่วยของการวัดเท่านั้น เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน มีแนวโน้มส่งผลให้กำลังอัดและกำลังดัดลดลงด้วย [23-24]

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีความสำคัญต่อการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต เนื่องจากพบว่าหากปริมาณน้ำมีมากเกินไปส่งผลให้กำลังอัดลดลง และพองอากาศอาจมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ควรพิจารณาถึงปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน



ภาพที่ 8 ผลของอัตราส่วน W/B, RCB ต่อ CT+GPOFA และปริมาณการแทนที่ GPOFA ต่อแรงดัดของคอนกรีต

## สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาเพื่อพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันและเศษคอนกรีตบล็อกที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งสำหรับใช้ผลิตคอนกรีตสามารถสรุปผลให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ได้ ดังนี้

1. การปรับปรุงขนาดของเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ดีขึ้นและใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตได้

2. ในด้านของของอัตราส่วนเศษคอนกรีตบล็อกต่อวัสดุประสานพบว่า การนำเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน และใช้เศษคอนกรีตบล็อกเป็นมวลรวมไปใช้งานผลิตคอนกรีตที่ต้องการรับกำลังระดับต่ำถึงปานกลาง ลดการดูดซึมน้ำ

3. ผลของปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัด การต้านทานแรงดัด และการดูดซึมน้ำของคอนกรีต พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดและแรงดัดลดลงและค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น

4. ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการรับกำลังอัด การต้านทานแรงดัด และการดูดซึมน้ำของคอนกรีต พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้เศษคอนกรีตบล็อกต่อเถ้าปาล์มน้ำมันที่อัตราส่วน 3.00 สามารถนำส่วนผสมไปใช้งานได้จริงสำหรับงานที่ต้องการรับกำลังในระดับต่ำถึงปานกลาง

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และศูนย์วิจัยโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Rukzon, S., and Chindaprasirt, P. (2018). Strength, Chloride Penetration and Corrosion Resistance of Ternary Blends of Portland Cement Self-compacting Concrete Containing Bagasse Ash and Rice Husk-bark Ash. *Chiang Mai Journal of Sciences*, 45(4), 863-874.
- [2] Rukzon, S., and Chindaprasirt, P. (2014). Use of ternary blend of Portland cement and two pozzolans to improve durability of high-strength concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(6), 1745-1752.
- [3] Rukzon, S., and Chindaprasirt, P. (2013). Strength, porosity and chloride resistance of mortar using combination of two kinds of the pozzolanic materials. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 20(8), 808-814.
- [4] Chindaprasirt, 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*, 22(5), 932-938.
- [5] Jitchaiyaphuma, K., Sinsiri, T., and Chindaprasirt, P. (2011). Cellular lightweight concrete containing pozzolan material. *Procedia Engineering*, 14, 1157-1164.

- [6] Chindaprasirt, P., Chottitanorm, C., and Rukzon, S. (2011). Use of palm oil fuel ash to improve chloride and corrosion resistance of high-strength and high-workability concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(4), 499-503.
- [7] Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete*. 4th and Final Edition, Malaysia: Longman Group Limited.
- [8] ASTM C33. (2005). Standard Specification Concrete Aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International. Printed in Baltimore, MD, U.S.A. Vol. 04.02: 10-20.
- [9] ASTM C136. (2005). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International. Printed in Baltimore, MD, U.S.A. Vol. 04.02: 88-92.
- [10] ASTM C39. (2005). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International. Printed in Baltimore, MD, U.S.A. Vol. 04.02: 21-27.
- [11] ASTM C78. (2005). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International. Printed in Baltimore, MD, U.S.A. Vol. 04.02: 39-40.
- [12] ASTM C642. (2005). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International. Printed in Baltimore, MD, U.S.A. Vol. 04.02: 338-340.
- [13] Chindaprasirt, P., and Rukzon, S. (2015). Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing rice husk ash and ground river sand. *Materials and Structures*, 48(11), 3771-3777.
- [14] Rukzon, S., Chindaprasirt, P., and Mahachai, R. (2009). Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(2), 242-247.
- [15] ASTM C618. (2005). 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*. ASTM International. Printed in Baltimore, MD, U.S.A. Vol. 04.02: 323-325.
- [16] Rukzon, S., Chindaprasirt, P., and Mahachai, R. (2009). Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(2), 242-247.
- [17] Rukzon, S., and Chindaprasirt, P. (2010). Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(3), 253-259.
- [18] Rukzon, S., and Chindaprasirt, P. (2008). Development of classified fly ash as a pozzolanic material. *Journal of Applied Sciences*, 8(6), 1097-1102.
- [19] Rukzon, S., and Chindaprasirt, P. (2009). Pore structure changes of blended cement paste containing fly ash, rice husk ash and palm oil fuel ash caused by carbonation. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 21(11), 666-671.

- [20] Chindapasirt, P., Chottitanorm C., and Rukzon, S. (2011). Use of palm oil fuel ash to improve chloride and corrosion resistance of high-strength and high-workability concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 23(4), 499-503.
- [21] Rukzon, S., and Chindapasirt, P. (2009). Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(4), 475-481.
- [22] Posi, P., Lertnimoolchai, S., Sata, V., and Phoo-ngernkham, T. (2014). Investigation of Properties of Lightweight Concrete with Calcined Diatomite Aggregate. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(5), 1429-1435.
- [23] Rukzon, S., and Chindapasirt, P. (2009). Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and ground river sand. *Computers and Concrete*, 6(5), 391-401.
- [24] Posi, P., Kasemsiri, P., Lertnimoolchai, S., and Chindapasirt, P. (2019). Effect of fly ash fineness on compressive, flexural and shear strengths of high strength-high volume fly ash jointing mortar. *International Journal of GEOMATE*, 16(54), 36-41.