กำลังและความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้เศษขยะพลาสติกแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน
Strength and abrasion resistance of concrete using plastic waste as partially fine aggregate replacement

บรรณกร ขันตา[1] บุญเลิศ แก้วประจำ[2] อัญชนา กิจจานนท์[3] ลีน่า ปรัก[4] ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์[5] และทวีชัย สำราญวานิช[6,*]

[1, 2, 3, 5, 6] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี
[4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี
**Corresponding author; E-mail address: twc@.buu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยขยะพลาสติกต่อกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงแบบผ่าซีก ความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมมวลรวมธรรมชาติ ใช้มวลรวมเศษพลาสติก 3 ชนิด ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิโพรไพลีน (PP) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยปริมาตรมวลรวมละเอียด ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ทำการทดสอบกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงแบบผ่าซีกและความต้านทานการขัดสี จากผลการทดลองพบว่า คอนกรีตที่ใช้ขยะพลาสติก (ทั้ง PVC PP และ PET) แทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียดมีกำลังอัด กำลังดัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมมวลรวมธรรมชาติ แต่มีความต้านทานการขัดสีสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ผสมมวลรวมธรรมชาติ การเพิ่มปริมาณแทนการที่มวลรวมละเอียดด้วยขยะพลาสติกทำให้กำลังอัด กำลังดัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกลดลง แต่กลับทำให้ความต้านทานการขัดสีดีขึ้น

คำสำคัญ: กำลังอัด, กำลังดัด, กำลังดึงแบบผ่าซีก, ความต้านทานการขัดสี, เศษขยะพลาสติก

Abstract

This research aims to study the effect of plastic waste as a partial fine aggregate replacement on compressive strength, flexural strength and splitting tensile strength and abrasion resistance of concrete. There were three types of plastic waste aggregate; polyvinyl chloride (PVC), polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (PET). Fine aggregate was partially replaced by plastic waste aggregate was at 10%, 20% and 30% by volume of fine aggregate. The water to binder ratio of 0.50 was used. The compressive strength, flexural strength, and splitting tensile strength and abrasion of concrete were evaluated. The study results found that concrete using plastic wastes (PVC, PP and PET) as partial fine aggregate replacement had lower compressive strength, flexural strength and splitting tensile strength than control concrete, but had higher the abrasion than control concrete with natural aggregate. An increase in fine aggregate replacement content with plastic waste decreased compressive strength, flexural strength and splitting tensile strength; conversely, it increased abrasion resistance.

Keywords: compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength, abrasion resistance, plastic waste

1. บทนำ

เศษขยะพลาสติก (Plastic waste) เช่น พลาสติกหลังการบริโภคเป็นภาระต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมากเนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ โดยขยะพลาสติกส่วนใหญ่มาจากบรรจุภัณฑ์แบบใช้แล้วทิ้ง ได้แก่ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) พอลิโพพิลีน (PP) พอลิเอทิลีน (PE) และพอลิไวนิวคลอไรด์ (PVC) ปัจจุบันการกำจัดเศษขยะพลาสติกเหล่านี้ทำได้โดยการฝังกลบ การเผาและการรีไซเคิล จากข้อมูลทางสถิติพบว่า เศษขยะพลาสติกจำนวนประมาณ 51% ถูกฝังกลบ จำนวน 27% ถูกเผา และมีจำนวนเพียง 22% เท่านั้นที่ถูกรีไซเคิล จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความพยายามนำเศษขยะพลาสติกมาใช้ในงานคอนกรีต โดยนำมาแทนที่มวลรวมบางส่วนในคอนกรีต แต่เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของเศษขยะพลาสติกที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบมัน ทำให้การยึดเกาะระหว่างเศษขยะพลาสติกกับซีเมนต์เพสต์ไม่ดี จึงยังไม่สามารถนำมาใช้สำหรับงานคอนกรีตที่รับกำลังสูง [1] เช่น ถนนคอนกรีตหรืออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้ แต่อาจพิจารณานำมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังต่ำแทน เช่น ทางเท้าคอนกรีต [2] ซึ่งศึกษาการใช้เศษขยะพลาสติก PET ผสมรวมกับเศษแก้วบดละเอียดเป็นส่วนผสมคอนกรีต เป็นต้น แต่ยังไม่มีการศึกษาการใช้เศษขยะพลาสติกมาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตสำหรับทางจักรยานซึ่งต้องมีความทนทานต่อการขัดสีด้วย ประกอบกับยังไม่มีการศึกษาผลกระทบของประเภทของเศษขยะพลาสติกต่อความต้านทานการขัดสี

ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของการแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเศษขยะพลาสติกสามชนิด ได้แก่ เศษขยะพลาสติก PVC PP และ PET ต่อกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงแบบผ่าซีกและความต้านทานการขัดสีของคอนกรีต

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสาน

ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภท GU (general use) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2594-2556 [3] และใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [4] โดยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเถ้าลอยแสดงไว้ใน

ตารางที่ 1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเถ้าลอยในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

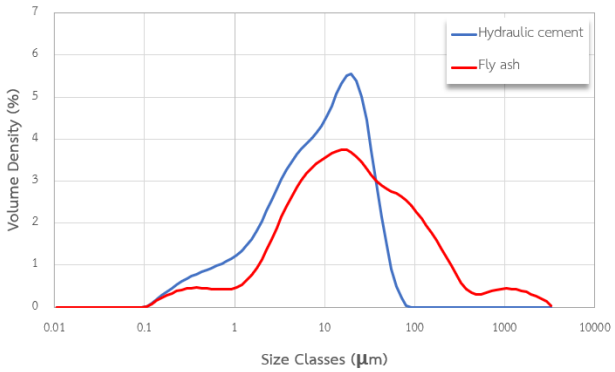
องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	เถ้าลอย
SiO_2	13.63	28.42
Al_2O_3	2.67	13.03
Fe_2O_3	3.31	14.88
CaO	66.20	27.11
MgO	1.12	1.90
SO_3	1.90	6.11
Na_2O	0.31	1.50
K_2O	0.35	2.53
LOI	6.78	3.18
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.56
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/kg)	2,543	1,563

2.2 มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ

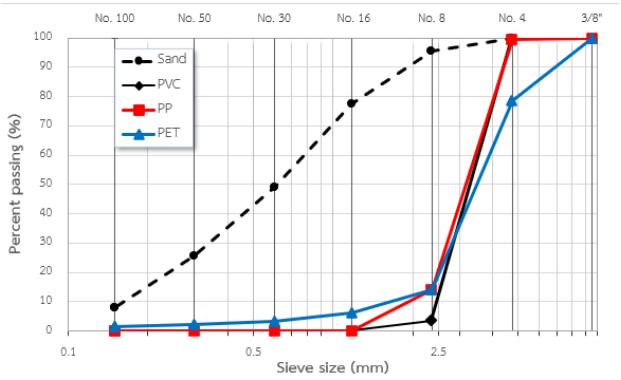
ใช้ทรายบกเป็นมวลรวมละเอียด และใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ โดยรูปที่ 2 และ 4 แสดงขนาดคละของทรายและหิน คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมสรุปไว้ในตารางที่ 2

2.3 มวลรวมเศษพลาสติก

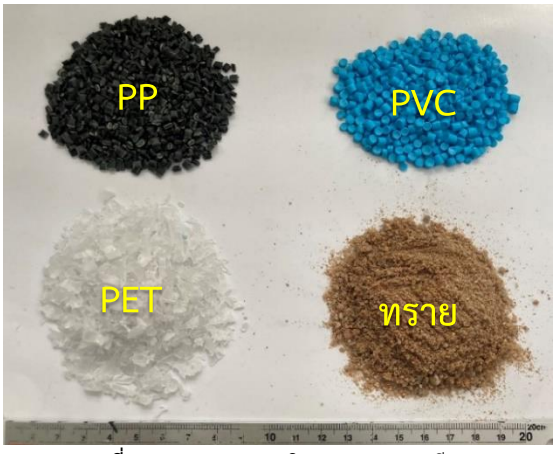
รูปที่ 3 แสดงมวลรวมเศษพลาสติกสามชนิด ได้แก่ พอลิไวนิวคลอไรด์ (PVC) พอลิโพพิลีน (PP) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โดยเศษพลาสติก PVC มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 3.0 -3.5 มม. เศษขยะพลาสติก PP มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 3.0 -3.5 มม. และเศษขยะพลาสติก PET มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 3.0 -4.0 มม. การกระจายขนาดคละของอนุภาคมวลรวมเศษพลาสติกแสดงในรูปที่ 2 ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมเศษขยะพลาสติกสรุปไว้ในตารางที่ 2 โดยใช้เศษขยะพลาสติกแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 20 และ 30 โดยปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 3



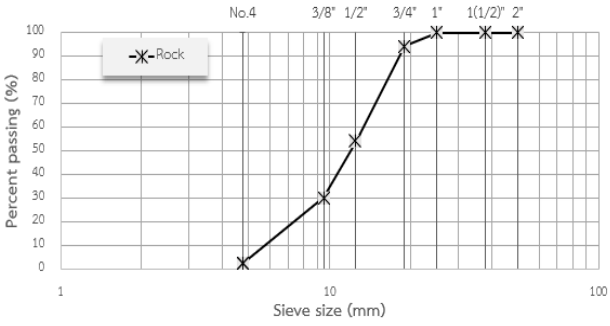
รูปที่ 1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเถ้าลอย



รูปที่ 2 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดและมวลรวมเศษขยะพลาสติก



รูปที่ 3 มวลรวมเศษพลาสติกและมวลรวมละเอียด



รูปที่ 4 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ



รูปที่ 5 มวลรวมหยาบ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมและมวลรวมเศษพลาสติก

คุณสมบัติ	มวลรวม		มวลรวมเศษขยะพลาสติก		
	ทราย	หิน	PVC	PP	PET
ความหนาแน่น	2.68	2.59	1.30 – 1.48	0.905	1.35

ขนาดอนุภาค	0 - 3	3 - 8	3 – 3.5	3 – 3.5	3.0 -4.5
รูปร่าง	angular	angular	cylindrical	cube	angular

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

รหัสส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)							
	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	น้ำ	ทราย (SSD)	มวลรวมเศษยะพลาสติก			หิน (SSD)
					PVC	PP	PET	
NC0	260	111.4	192	773	-	-	-	1020.8
PVC10	260	111.4	192	695.8	39.7	-	-	1020.8
PVC20	260	111.4	192	618.5	79.4	-	-	1020.8
PVC30	260	111.4	192	541.2	119	-	-	1020.8
PP10	260	111.4	192	695.8	-	26	-	1020.8
PP20	260	111.4	192	618.5	-	51.9	-	1020.8
PP30	260	111.4	192	541.2	-	77.9	-	1020.8
PET10	260	111.4	192	695.8	-	-	40	1020.8
PET20	260	111.4	192	618.5	-	-	79	1020.8
PET30	260	111.4	192	541.2	-	-	119.9	1020.8

2.4 การทดสอบ

2.4.1 กำลังอัด

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร^3 บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 และ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามตามมาตรฐาน BS EN 1881-116 [5]

2.4.2 กำลังดัด

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x50 เซนติเมตร^3 บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 และ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตตามตามมาตรฐาน ASTM C 293 [6]

2.4.3 กำลังดึงแบบผ่าซีก

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 10x20 เซนติเมตร^2 บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 และ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตตามตามมาตรฐาน ASTM C 496 [7]

2.4.4 ความต้านทานการขัดสี

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร^3 บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตตามตามมาตรฐาน ASTM C 944 [8]

3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 กำลังอัด

จากรูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมเศษพลาสติก PVC พบว่า กำลังอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่สูงขึ้น และที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 มีกำลังอัดสูงที่สุด เช่นเดียวกันกับคอนกรีตที่ผสมมวลรวมเศษพลาสติก PP และ PET ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ทั้งนี้อาจเนื่องจากการยึดเกาะกันที่ไม่ดีระหว่างวัสดุประสานกับมวลรวมเศษพลาสติกและอาจเนื่องจากพฤติกรรมการเกิด ITZ [9]

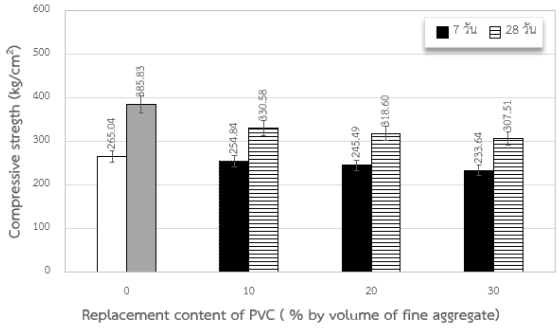
อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้ใช้ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษยะพลาสติกร้อยละ 10 20 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด ซึ่งไม่ใช่ปริมาณที่สูงมากจนเกินไป แม้ว่าทำให้กำลังอัดต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุมก็ตาม แต่ก็มีกำลังอัดมากกว่าร้อยละ 50 ของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมอยู่ (มากกว่า 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งยังเหมาะสมสำหรับคอนกรีตทางจักรยาน)

จากรูปที่ 9 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติกที่ 10% กำลังอัดของ PVC10 มีค่ากำลังอัดดีที่สุด รองลงมาเป็น PP10 และ PET10 อาจเนื่องจากค่าความแข็งแกร่ง (E) ของเศษยะพลาสติกของแต่ละชนิด [9, 12]

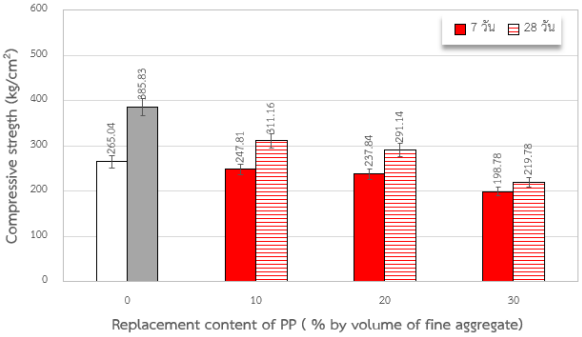
3.2 กำลังดัด

จากรูปที่ 10 กำลังดัดของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมเศษพลาสติก PVC พบว่า กำลังอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นและที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 มีกำลังดัดสูงที่สุด เช่นเดียวกันกับคอนกรีตที่ผสมมวลรวมเศษยะพลาสติก PP และ PET ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 อาจเนื่องจากความหนาแน่นของมวลรวมเศษพลาสติกที่ต่ำกว่ามวลรวมธรรมชาติ อีกทั้งการยึดเกาะกันที่ไม่ดีระหว่างวัสดุประสานกับมวลรวมเศษพลาสติกและอาจเนื่องจากพฤติกรรมการเกิด ITZ [10]

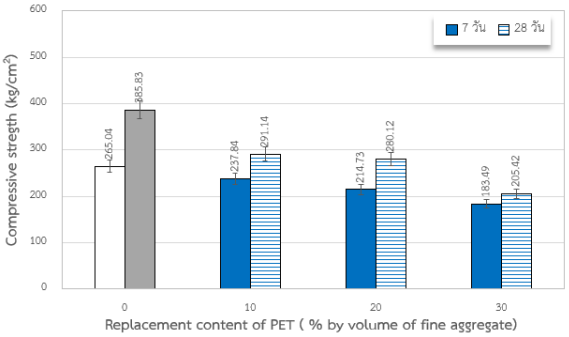
จากรูปที่ 13 กำลังดัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติกที่ 10% กำลังดัดของ PVC10 มีค่ากำลังดัดดีที่สุด รองลงมาเป็น PP10 และ PET10 อาจเนื่องจากค่าความแข็งแกร่ง (E) ของเศษยะพลาสติกของแต่ละชนิด [9, 12]



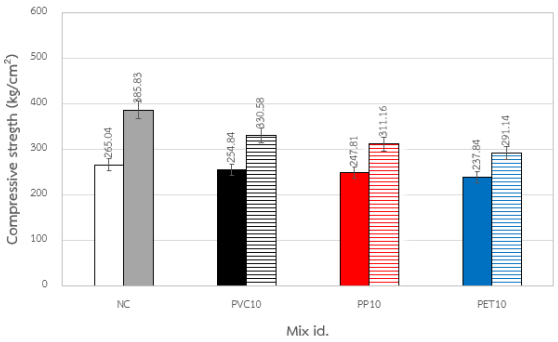
รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PVC



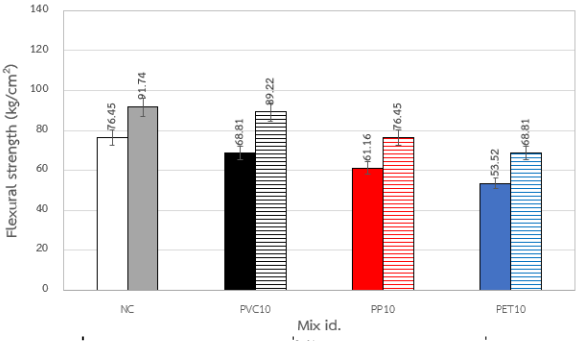
รูปที่ 7 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PP



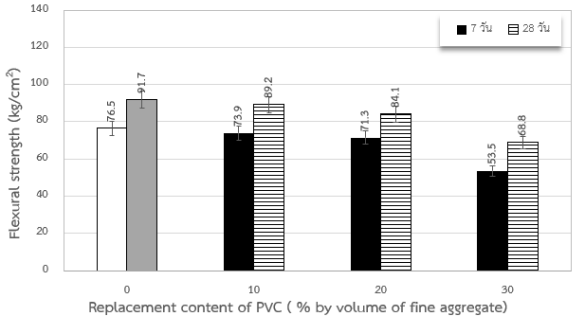
รูปที่ 8 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PET



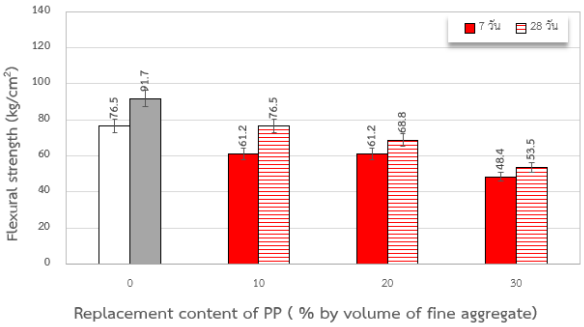
รูปที่ 9 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติกที่ 10%



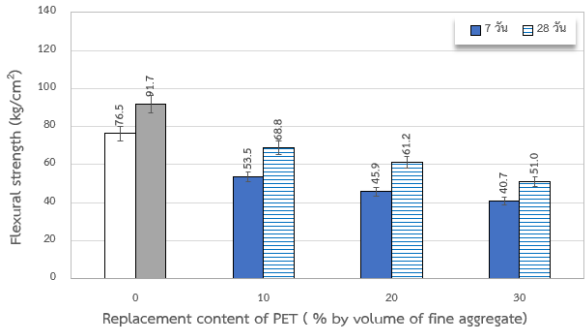
รูปที่ 13 กำลังดัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติกที่ 10%



รูปที่ 10 กำลังดัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PVC



รูปที่ 11 กำลังดัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PP

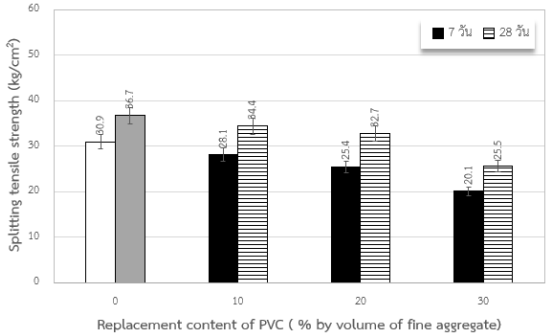


รูปที่ 12 กำลังดัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PET

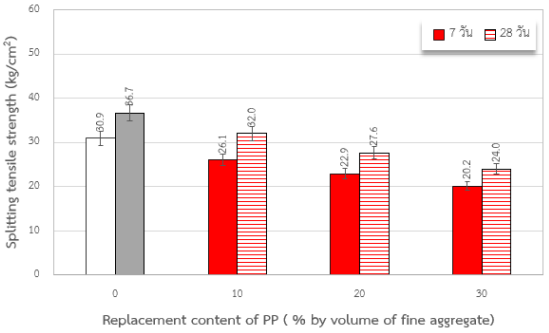
3.3 กำลังดึงแบบผ่าซีก

จากรูปที่ 14 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมเศษพลาสติก PVC พบว่า กำลังดึงแบบผ่าซีกลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นและที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 มีกำลังดึงแบบผ่าซีกสูงที่สุด เช่นเดียวกันกับคอนกรีตที่ผสมมวลรวมเศษพลาสติก PP และ PET ดังแสดงในรูปที่ 15 และ 16 อาจเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมวลรวม การกระจายตัวของอนุภาคเมื่อรวมรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยมวลรวมเศษพลาสติกและอาจเนื่องจากพฤติกรรมการเกิด ITZ [11]

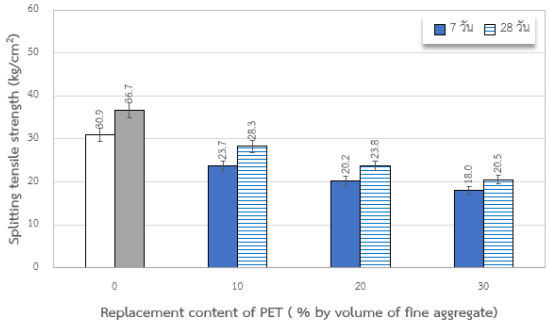
จากรูปที่ 17 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติกที่ 10% กำลังดึงแบบผ่าซีกของ PVC10 มีค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกดีที่สุด รองลงมาเป็น PP10 และ PET10 อาจเนื่องจากค่าความแข็งแกร่ง (E) ของเศษขยะพลาสติกของแต่ละชนิด [9, 12]



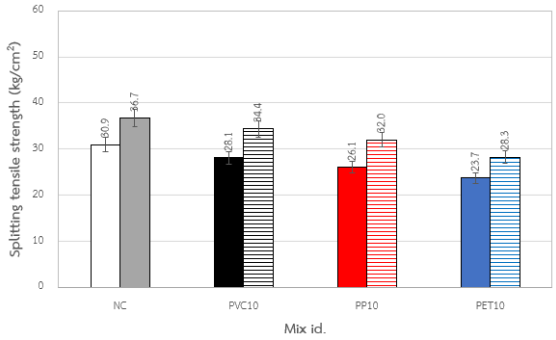
รูปที่ 14 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PVC



รูปที่ 15 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PP



รูปที่ 16 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PET

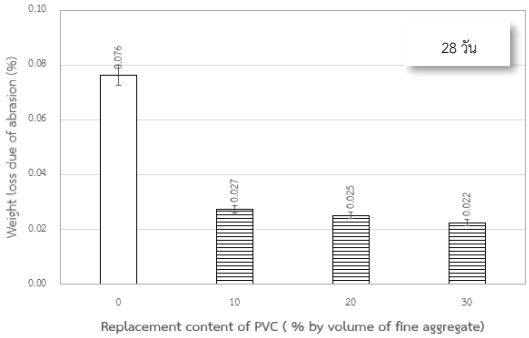


รูปที่ 17 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติกที่ 10%

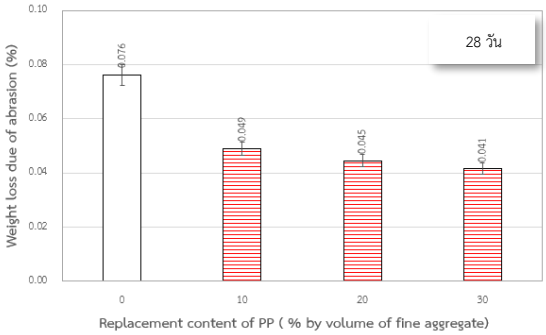
3.4 ความต้านทานการขัดสี

จากรูปที่ 18 ความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PVC มีการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นและที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ มีการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดน้อยที่สุด เช่นเดียวกันกับคอนกรีตที่ผสมมวลรวมเศษพลาสติก PP และ PET ดังแสดงในรูปที่ 19 และ 20 อาจเนื่องจากการดูดซับพลังงานควบคู่ไปกับการเพิ่มความเป็นพลาสติกและการควบคุมการแตกร้าว [11]

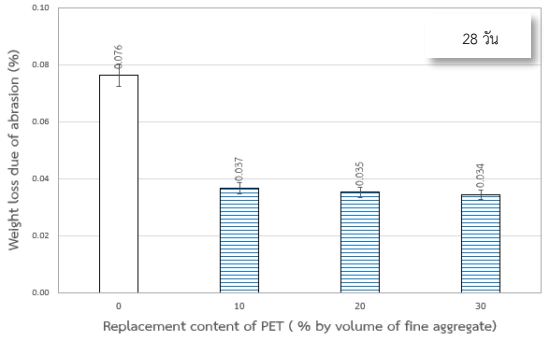
จากรูปที่ 21 ความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติกที่ 10% การสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีของ PVC10 มีการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีน้อยที่สุด รองลงมาเป็น PET10 และ PP10 อาจเนื่องจากค่าความแข็งแกร่ง (E) ของเศษขยะพลาสติกของแต่ละชนิด [9, 12]



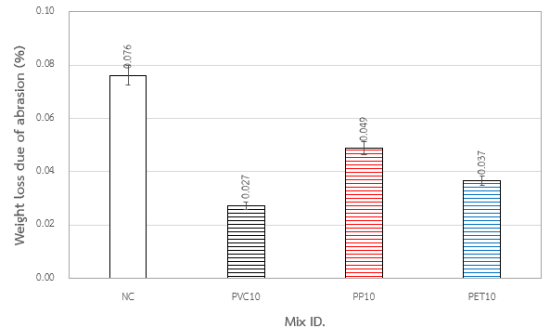
รูปที่ 18 ความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PVC



รูปที่ 19 ความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PP



รูปที่ 20 ความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PET



รูปที่ 21 ความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติกที่ 10%

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาผลกระทบเศษพลาสติกต่อกำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงแบบผ่าซีกและความต้านทานการขัดสีของคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PVC PP และ PET แทนที่มวลรวมละเอียดมีกำลังอัด กำลังดัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยมวลรวมเศษพลาสติกมากขึ้นทำให้กำลังอัด กำลังดัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกยิ่งลดต่ำลง
2. เมื่อพิจารณาชนิดของมวลรวมเศษพลาสติกที่ปริมาณการใช้มวลรวมเศษพลาสติกร้อยละ 10 เท่ากันพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PVC มีกำลังอัด กำลังดัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกมากที่สุด รองลงไปคือ PP และ PET ตามลำดับ
3. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PVC PP และ PET แทนที่มวลรวมละเอียดมีการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ และเมื่อเพิ่มปริมาณการ

แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยมวลรวมเศษพลาสติกมากขึ้นทำให้การสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสียิ่งน้อยลง

4. เมื่อพิจารณาชนิดของมวลรวมเศษพลาสติกที่ปริมาณการใช้มวลรวมเศษพลาสติกร้อยละ 10 เท่ากันพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษพลาสติก PVC มีการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีน้อยที่สุด รองลงไปคือ PET และ PP ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพา “ผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 งบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.)” เลขที่สัญญา ววน 8/2565 และขอขอบคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและการจัดการจราจร (CONTRA) มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Li, X., Ling, T.C., & Mo, K.H. (2020). Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review. Construction and Building Materials, 240, 117869.

[2] Wonga, Y.C., Perera, S., Zhang, Z., Arulrajah, A., & Mohammadinia, A. (2020). Field study on concrete footpath with recycled plastic and crushed glass as filler materials. Construction and Building Materials, 243, 118277.

[3] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2594-2556, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก.

[4] ASTM C618 – 19, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Annual Book of ASTM Standard.

[5] BS EN 12390, Testing of hardened concrete. British Standards Institution.

[6] ASTM C293, Standard test method for flexural strength of concrete. Annual Book of ASTM Standard.

[7] ASTM C496, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. Annual Book of ASTM Standard.

[8] ASTM C944, Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating cutter method. Annual Book of ASTM Standard.

[9] Belmokaddem, B., Mahi, A., Senhadji, Y., & Pekmezci, B.Y. (2020). Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. Construction and Building Materials, 257, 119559.

[10] Kangavar, M.V., Lokuge, W., Manalo, A., Karunasena, W., & Frigione, M. (2022). Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. Case Studies in Construction Materials, 16, e00934.

[11] Mohammed, A. A., Mohammed, I.I., & Mohammed, S.A. (2019). Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets. Construction and Building Materials, 201, 232–245.

[12] Jacob-Vaillancourt, C., & Sorelli, L. (2018). Characterization of concrete composites with recycled plastic aggregates from postconsumer material streams. Construction and Building Materials, 182, 561–572.