



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้เศษวัสดุเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตพรุน
(The use of recycled materials as coarse aggregate in porous concrete)

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ

มิถุนายน 2556

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้เศษวัสดุเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตพรุน
(The use of recycled materials as coarse aggregate in porous concrete)

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และมหาวิทยาลัยขอนแก่น

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. สกว. และ มข. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รหัสโครงการ: MRG5480004

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ หัวหน้าโครงการ
ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญญา จินดาประเสริฐ นักวิจัยที่ปรึกษา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อีเมล: vancsa@kku.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี (15 มิถุนายน 2554 ถึง 14 มิถุนายน 2556)

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเศษวัสดุมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตพูน โดยทำการศึกษาสมบัติของคอนกรีตพูนที่ใช้เศษวัสดุจากเศษคอนกรีต เศษคอนกรีตบด และเศษอิฐมอญเป็นมวลรวมหยาบเปรียบเทียบกับมวลรวมธรรมชาติจากหินปูนย่อย แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกศึกษาสมบัติของคอนกรีตพูนที่มีซีเมนต์พอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุแทนที่มวลธรรมชาติในอัตราร้อยละ 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ในการทำคอนกรีตพูน ส่วนที่สองศึกษาสมบัติของคอนกรีตพูนที่มีจีโอโพลิเมอร์พอร์ตแลนด์ลอยเป็นวัสดุประสาน ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุแทนมวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมด ทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10, 15 และ 20 โมลาร์ โดยสมบัติของคอนกรีตพูนที่ทำการศึกษาได้แก่ กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก, กำลังดัด, การซึมผ่านน้ำ, อัตราส่วนโพรง, ความหนาแน่น, และการสมเสียน้ำหนักจากการขัดสีที่ผิวหน้า

ผลการศึกษาพบว่ามวบรวมจากเศษคอนกรีต เศษคอนกรีตบล็อก และเศษอิฐมอญมีค่าน้ำหนักและความถ่วงจำเพาะน้อยกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ (หินปูนย่อย) ส่วนค่าร้อยละการสึกกร่อนและค่าการดูดซึมน้ำมีค่ามากกว่า และมวลรวมทุกชนิดที่นำมาศึกษาในครั้งนี้มีร้อยละการสึกกร่อนน้อยกว่า 50%

การใช้เศษคอนกรีตและเศษคอนกรีตบดลือกมาเป็นมวลรวมหยาบแทนที่มวลรวมธรรมชาติในคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสานในปริมาณต่างๆได้คอนกรีตพูนที่มีกำลังอัดสำหรับอายุการบ่ม 28 วันอยู่ระหว่าง 122-172 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร กำลังดึงแบบผ่าซีกอยู่ระหว่าง 13-24 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และกำลังดัดอยู่ระหว่าง 28-47 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โดยการแทนที่ 40-60% มีแนวโน้มให้ค่ากำลังสูงกว่าการใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติเล็กน้อย ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตพูนลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนโพรงมีค่าอยู่ระหว่าง 13-25% และการซึมผ่านของน้ำอยู่ระหว่าง 0.22-1.01 เซนติเมตร/วินาที เมื่อใช้เศษคอนกรีต

และเศษคอนกรีตบดลือคในปริมาณแทนที่ไม่เกินร้อยละ 60 พบว่าความต้านทานต่อการสึกกร่อนของผิวหน้าดีกว่าการใช้หินจากธรรมชาติเพียงอย่างเดียว

มวลรวมจากเศษคอนกรีต, เศษคอนกรีตบดลือค และเศษอิฐมอญสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนมวลรวมธรรมชาติในส่วนผสมของคอนกรีตพูนที่มีจีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุประสาน (จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน) ได้ แต่ให้ค่ากำลังต่ำกว่าการใช้มวลรวมจากธรรมชาติ โดยมีค่ากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกอยู่ในช่วง 28-103 และ 3-14 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าการซึมผ่านน้ำอยู่ในช่วง 0.7-1.8 เซนติเมตร/วินาที ความหนาแน่นระหว่าง 1420-1730 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และมีอัตราส่วนโพรงร้อยละ 22-29 โดยการใช้เศษคอนกรีตบดลือคให้กำลังรับแรงอัดต่ำแต่มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ดีที่สุด ส่วนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จากเศษอิฐมอญมีน้ำหนักที่เบากว่าคอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมจากธรรมชาติถึงร้อยละ 40 และมีค่าความทนทานต่อการสึกกร่อนค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับมวลรวมชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 15 และ 20 โมลาร์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกดีกว่าความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ ส่วนค่าการซึมผ่านของน้ำ, ค่าอัตราส่วนโพรง, ความหนาแน่น, และความทนทานต่อการสึกกร่อนที่ผิวหน้ามีค่าไม่แตกต่างกัน

คำหลัก : คอนกรีตพูน, เศษวัสดุ, มวลรวมหยาบ, กำลังอัด, การซึมผ่านของน้ำ

Abstract

Project Code : MRG5480004

Project Title : The use of recycled materials as coarse aggregate in porous concrete

Investigator :	Assist.Prof. Dr. Vanchai Sata	Leader
	Prof. Dr. Prinya Chindaprasirt	Mentor
	Faculty of Engineering, Khon Kaen University	

E-mail Address : vancsa@kku.ac.th

Project Period : 2 years (15 June 2011 - 14 June 2013)

Abstract: This research aimed to evaluate the use of recycled materials as coarse aggregates in porous concrete. The properties of porous concrete containing recycled concrete, recycled concrete block, and recycled clay brick as coarse aggregate were studied and compared with porous concrete containing natural aggregates (crushed limestone). The research consisted of two parts. The first part focused on properties of porous concrete used cement paste as cementitious material. Natural aggregate was replaced by recycled aggregates the rate of 20, 40, 60, 60, 80, and 100% by weight to make porous concrete. The second part evaluated the properties of porous concrete used fly ash geopolymer paste as cementitious material (porous geopolymer concrete). Recycle coarse aggregates were replaced natural aggregate at rate of 100%. The concentrations of sodium hydroxide solution were varied at 10, 15, and 20 molar. The compressive strength, splitting tensile strength, water permeability, porosity, density, and weight loss from surface abrasion of porous concretes were tested.

The results showed coarse aggregates from recycled concrete, recycled concrete block, and recycled clay brick had unit weight and specific gravity lower than natural aggregate, while the abrasion resistant and water absorption were higher. However, all of recycled aggregates in this study gave abrasion resistant lower than 50%.

The use of recycled concrete and recycled concrete block to replace crushed limestone in cement paste porous concrete found that theirs 28 days compressive, splitting tensile, and flexural strengths ranged from 122 to 172, 13 to 24, and 28 to 47 ksc, respectively. The replacement rate at 40-60% showed slightly higher than those of the use of

only natural aggregate. The density of porous concrete decreased as increasing the replacement rate. The void ratio and water permeability varied from 13 to 25% and 0.22 to 1.01 cm/s, respectively. At the replacement rate lower than 60%, the surface abrasion resistant of porous concrete seemed to better than the use of only natural aggregate.

Recycled concrete, recycled concrete block, and recycled clay brick could be used as coarse aggregate in porous geopolymer concrete. However, their compressive strength showed lower than porous geopolymer concrete containing natural aggregate. The compressive and splitting tensile strengths ranged from 28 to 103 and 22 to 29 ksc, respectively. The porous geopolymer concrete had water permeability, density, and void ratio varied between 0.7-1.8 cm/s, 1420-1730 kg/m³, and 22-29%, respectively. The strength of porous concrete containing recycled concrete block showed lower than that of natural aggregate, while its water permeability gave the highest. The density of porous concrete containing recycled clay brick was 40 percent less than that of natural aggregate. However, the weight loss of surface abrasion was higher than those of recycled and natural aggregates. The results also found that the use of sodium hydroxide solution at concentration of 15 and 20 molar in porous geopolymer concrete provided higher strength than that of 10 molar. However, the concentration of sodium hydroxide solution at 10, 15, and 20 molar had slightly effect on the water permeability, porosity, density, and weight loss of surface abrasion.

Keywords : Porous concrete, Recycled materials, Coarse aggregate, Compressive strength, Water permeability

บทสรุปผู้บริหาร
(Executive summary)

โครงการวิจัยเรื่อง การใช้เศษวัสดุเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตพรุน (The use of recycled materials as coarse aggregate in porous concrete) ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยขอนแก่น (มข.) ภายใต้โครงการ ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปี 2554 ซึ่งดำเนินโครงการวิจัยระหว่างวันที่ 15 มิถุนายน 2554 ถึง 14 มิถุนายน 2556 การดำเนินงานวิจัยได้เสร็จสิ้นตามระยะเวลา โดยมีผลสำเร็จจากงานวิจัยคือการเผยแพร่ผลงานวิจัยตลอดระยะเวลา 24 เดือนที่ผ่านมา ประกอบด้วยบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่มี Impact Factor จำนวน 1 เรื่อง กำลังพิจารณาอีก 1 เรื่อง และมีการนำไปเสนอในงานประชุมวิชาการในประเทศอีก 2 เรื่อง งานวิจัยโดยย่อเป็นดังนี้

การใช้เศษวัสดุหรือวัสดุเก่าซึ่งใช้ประโยชน์ไม่ได้แล้วกลับมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลวัสดุ (Material recycling) ได้รับการยอมรับมากขึ้นในปัจจุบัน เพราะนอกจากช่วยแก้ไขปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมได้ดีจากการทำให้ปริมาณขยะและสิ่งย่อยสลายยากลดลงแล้ว ยังได้วัตถุดิบที่มีราคาต่ำกว่าวัตถุดิบใหม่ ในงานก่อสร้างเองก็มีเศษวัสดุที่สามารถนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ เช่น เศษคอนกรีตโครงสร้างเก่า เศษอิฐ เศษกระเบื้อง เศษปูนจากงานก่อสร้าง เป็นต้น มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาถึงการนำเศษคอนกรีตหรือเศษวัสดุที่ไม่ได้ใช้งานหรือจากการรื้อถอนทำลายสิ่งปลูกสร้างมาย่อยเพื่อนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตและพบว่ามวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษวัสดุเหล่านี้สามารถใช้เป็นวัสดุในการทำคอนกรีตได้ แต่ไม่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตงานโครงสร้างเพราะนอกจากทำให้คอนกรีตกำลังต่ำกว่าคอนกรีตปกติแล้ว มวลรวมที่ได้ยังมีความพรุนและมีการดูดซึมน้ำสูง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษานำมวลรวมจากเศษวัสดุเหล่านี้ใช้กับคอนกรีตที่ไม่ใช้งานโครงสร้าง เช่น คอนกรีตสำหรับงานตกแต่ง เป็นต้น

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยในครั้งนี้ คือ เพื่อศึกษาการนำเศษวัสดุมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตพรุน โดยเศษวัสดุที่นำมาศึกษาคือเศษคอนกรีต เศษคอนกรีตบล็อก และเศษอิฐมอญ เปรียบเทียบกับมวลรวมธรรมชาติคือหินปูนย่อย แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกศึกษาสมบัติของคอนกรีตพรุนที่มีซีเมนต์เฟสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ส่วนที่สองศึกษาสมบัติของคอนกรีตพรุนที่มีจีโอโพลิเมอร์เฟสต์จากเถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพรุน)

ผลการศึกษาพบว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีต เศษคอนกรีตบล็อก และเศษอิฐมอญสามารถไปทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติในการทำเป็นคอนกรีตพรุนได้ โดยคอนกรีตพรุนที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานให้ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วันมากกว่า 120 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และการแทนที่ในหินปูนที่ไม่มากเกินไป 60% จะได้คอนกรีตพรุนที่เหมาะสมทั้งให้กำลังอัด กำลังดึงแบบผ่า

ซึกและความต้านทานต่อการสึกกร่อน ส่วนการใช้เศษวัสดุในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพรุนให้ค่าสมบัติ
 บัติด้านกำลังต่ำกว่าการใช้มวลรวมจากธรรมชาติเล็กน้อย ส่วนสมบัติด้านอื่นๆไม่ต่างกันมากนัก
 อย่างไรก็ตามจากสมบัติของคอนกรีตพรุนที่ใช้วัสดุประสานทั้งสองส่วนที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้
 สำหรับงานคอนกรีตสำเร็จการตกแต่งได้รูป เช่น คอนกรีตบล็อก คอนกรีตสำเร็จรูปปูทางเท้า เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำปรึกษา ขั้นตอน วิธีการศึกษา ตลอดจนคำแนะนำและแนวคิดที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ รวมถึงการอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ทำการทดสอบ ตลอดระยะเวลาในการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยขอนแก่น (มข.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ค
บทสรุปผู้บริหาร	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ซ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 คอนกรีตพูน	4
2.1.2 จีโอโพลิเมอร์	5
2.1.3 มวลรวม	6
2.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	12
2.2.1 คอนกรีตพูน	12
2.2.2 เศษวัสดุหรือมวลรวมรีไซเคิล	14
2.2.3 จีโอโพลิเมอร์	15
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	17
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	17
3.1.1 วัสดุ	17
3.1.2 อุปกรณ์	17
3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต	19
3.2.1 คอนกรีตพูนที่มีซีเมนต์เฟสเป็นวัสดุประสาน	19
3.2.2 คอนกรีตพูนที่มีจีโอโพลิเมอร์เฟสเป็นวัสดุประสาน	21
3.3 การทดสอบ	21
3.3.1 การทดสอบสมบัติของวัสดุ	21
3.3.2 การทดสอบคอนกรีตพูน	23

บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	26
4.1 ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุ	26
4.2 ผลการทดสอบสมบัติของคอนกรีตพูน	27
4.2.1 ผลการทดสอบคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์เฟสท์เป็นวัสดุประสาน	27
4.2.2 ผลการทดสอบคอนกรีตพูนที่ใช้จีโพลีเมอร์เฟสท์เป็นวัสดุประสาน	35
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการศึกษา	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุน	51

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 น้ำหนักต่ำสุดของมวลรวมหยาบในการทดสอบขนาดคละตาม ASTM D75	9
ตารางที่ 2.2 ขนาดแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของมวลรวม	10
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ	11
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตพูนที่มีซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสาน	19
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตพูนที่มีจีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุประสาน	22
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบ	26
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสาน	28
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่น อัตราส่วนโพรงและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสาน	31
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่ผิวหน้าของคอนกรีตพูน	34
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสาน	36
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำ อัตราส่วนโพรง และความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน	40

สารบัญรูปภาพ

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์	6
รูปที่ 2.2 การสัมผัสกันของมวลรวมที่มีขนาดต่างกัน	13
รูปที่ 2.3 แสดงการเชื่อมประสานและยึดกันของเพสต์ที่หุ้มมวลรวม	14
รูปที่ 3.1 มวลรวมที่ใช้ในการศึกษา	18
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสาน	20
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างคอนกรีตพูนที่ใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุประสาน	23
รูปที่ 3.4 แสดงการทดสอบกำลังของคอนกรีตพูน	23
รูปที่ 3.5 แสดงชุดทดสอบค่าความชื้นน้ำของคอนกรีตพูน	25
รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องมือและการทดสอบการสึกกร่อนของผิวหน้า	25
รูปที่ 4.1 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตพูนที่แทนที่ LS ด้วย RC	28
รูปที่ 4.2 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตพูนที่แทนที่ LS ด้วย RB	29
รูปที่ 4.3 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตพูนที่แทนที่ LS ด้วย RC และ RB	30
รูปที่ 4.4 กำลังดัดของคอนกรีตพูนที่แทนที่ LS ด้วย RC และ RB	30
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความหนาแน่นของคอนกรีตพูน	32
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและอัตราส่วนโพรงของคอนกรีตพูน	33
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ปริมาณการแทนที่ของ RC และ RB และน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการสึกกร่อนของคอนกรีตพูน	34
รูปที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 7 วัน	37
รูปที่ 4.9 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 7 วัน	38
รูปที่ 4.10 ผิวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนหลังการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก	38
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 7 วัน	39
รูปที่ 4.12 อัตราส่วนโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน	41
รูปที่ 4.13 อัตราการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน	41
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน	42
รูปที่ 4.15 ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน	43
รูปที่ 4.16 การสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนที่ผิวหน้าของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

การใช้เศษวัสดุหรือวัสดุเก่าซึ่งใช้ประโยชน์ไม่ได้แล้วกลับมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลวัสดุ (Material recycling) ได้รับการยอมรับมากขึ้นในปัจจุบัน เพราะนอกจากช่วยแก้ไขปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมได้ดีจากการทำให้ปริมาณขยะและสิ่งย่อยสลายยากลดลงแล้ว ยังได้วัตถุดิบที่มีราคาต่ำกว่าวัตถุดิบใหม่ ในงานก่อสร้างเองก็มีเศษวัสดุที่สามารถนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ เช่น เศษคอนกรีตโครงสร้างเก่า เศษอิฐ เศษกระเบื้อง เศษปูนจากงานก่อสร้าง เป็นต้น มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาถึงการนำเศษคอนกรีตหรือเศษวัสดุ ที่ไม่ได้ใช้งานหรือจากการรื้อถอนทำลายสิ่งปลูกสร้างมาย่อยเพื่อนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตและพบว่ามวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษวัสดุเหล่านี้สามารถใช้เป็นวัสดุในการทำคอนกรีตได้ (สุรศักดิ์ ภูสันติพงษ์ และคณะ, 2547; จันทร ประยูรหาญ และคณะ, 2551) แต่ไม่เหมาะสำหรับคอนกรีตงานโครงสร้างเพราะนอกจากทำให้คอนกรีตกำลังต่ำกว่าคอนกรีตปกติแล้ว มวลรวมที่ได้ยังมีความพรุนและมีการดูดซึมน้ำสูง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษานำมวลรวมจากเศษวัสดุเหล่านี้ใช้กับคอนกรีตที่ไม่ใช้งานโครงสร้าง เช่น คอนกรีตสำหรับงานตกแต่ง เป็นต้น

คอนกรีตพรุน (Porous concrete or pervious concrete) คือคอนกรีตพิเศษที่มีความพรุนและมีโพรงต่อเนื่องอยู่ภายใน ทำให้น้ำหรือของเหลวสามารถซึมผ่านได้ โดยปกติคอนกรีตคอนกรีตพรุนมีมวลรวมละเอียดน้อยมากหรืออาจไม่มีเลยในส่วนผสมเพื่อต้องการให้คอนกรีตมีความพรุน มีโพรงต่อเนื่องอยู่ภายใน ซึ่งทำให้น้ำหรือของเหลวสามารถซึมผ่านได้ โดยส่วนประกอบหลักของคอนกรีตพรุน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำ มวลรวมหยาบ และสารลดน้ำพิเศษ มีการนำคอนกรีตพรุนไปใช้ประโยชน์ เช่น ทางเดินเท้า ผิวถนน ลานจอดรถขนาดเล็ก ใช้ดาดคลองและพื้น เป็นต้น นอกจากนั้นคอนกรีตพรุนยังเป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะสัตว์หรือพืชขนาดเล็กสามารถอาศัยอยู่ในโพรงคอนกรีตได้ และยังสามารถลดความร้อนที่สะท้อนกลับจากคอนกรีตออกมาสู่บรรยากาศของโลกได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ (Yang & Jiang, 2003; Chindaprasirt et al., 2008; Cheng et al., 2011)

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีสมบัติในการเชื่อมประสานเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์เกิดจากการสังเคราะห์ของวัสดุพอลิไซลิกที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ถ้ำลอย ดินขาวเผา เป็นต้น ทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะได้วัสดุที่แข็งตัวและยึดเกาะเชื่อมประสานกันได้ที่อุณหภูมิห้องคล้ายกับปูนซีเมนต์ ซึ่งหากได้รับการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น (Somna et al., 2011)

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อการศึกษาการนำเศษวัสดุหรือมวลรวมรีไซเคิลมาประยุกต์ใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนการใช้มวลรวมธรรมชาติในงานคอนกรีตพรุน ซึ่งแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน

คือ ส่วนแรกใช้ซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสาน และส่วนที่สองใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการนำเศษวัสดุหรือวัสดุรีไซเคิลมาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตพูนแทนการใช้มวลรวมจากธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบจากเศษวัสดุ เช่น ขนาดคละ ความละเอียด ความทนทานต่อการสึกกร่อน การดูดซึมน้ำ เป็นต้น

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้มวลรวมหยาบจากเศษวัสดุต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตพูน เช่น กำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซีก กำลังดัด เป็นต้น

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้มวลรวมหยาบจากเศษวัสดุต่อสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตพูน เช่น ปริมาณโพรง การซึมผ่านของน้ำ ความต้านทานต่อการสึกกร่อน เป็นต้น

1.2.4 เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษวัสดุแทนมวลรวมธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้มวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตพูนมี 4 ชนิด คือ มวลจากธรรมชาติที่ได้จากหินปูนย่อย อีกสามชนิดเป็นมวลรวมจากเศษวัสดุมวลรวมจากเศษคอนกรีตโครงสร้างที่ผ่านการใช้งานแล้ว มวลรวมจากเศษอิฐบล็อกที่ผ่านการใช้งานแล้ว และมวลรวมจากเศษอิฐมอญ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

5.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของมวลรวมทั้งหมดที่ใช้งานวิจัย โดยสมบัติเบื้องต้นของมวลรวมศึกษา คือ หนึ่งน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ การกระจายตัวขนาดของอนุภาค ความต้านทานการสึกกร่อน เป็นต้น

5.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสาน โดยทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตพูนจากนั้นนำมวลรวมที่ได้จากเศษคอนกรีตและเศษอิฐบล็อกไปแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (หินปูนย่อย) ในส่วนผสมของคอนกรีตพูนในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด ผสมคอนกรีตพูนแล้วหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง นำไปบ่มในน้ำจนครบอายุการทำทดสอบ ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน กำลังดึงแบบผ่าซีก และกำลังดัด ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยผลการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ยจากสามตัวอย่าง และศึกษาสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตพูน คือ การทดสอบการซึมผ่านของน้ำ ปริมาณโพรงของคอนกรีตพูน และความต้านทานต่อการสึกกร่อนของผิวหน้า

5.3 ศึกษาคอนกรีตพูนที่มีจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10, 15 และ 20 โมลาร์ ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเกรดระดับ

ห้องปฏิบัติการ อัตราส่วนสารละลายต่อถ้ำลอยเท่ากับ 0.45 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 ทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง บ่มต่อที่รักษาความชื้นอุณหภูมิ 22-25 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50-55 จนถึงอายุทดสอบ ศึกษากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 7 วัน, ความหนาแน่น, อัตราส่วนโพรง, การซึมผ่านของน้ำ และการสูญเสียน้ำหนักจากการสีกกรองของผิวหน้าของคอนกรีตพรุน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงสมบัติของมวลรวมจากเศษวัสดุ

14.2 ทำให้ทราบถึงผลกระทบปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบจากเศษวัสดุในมวลรวมหยาบจากธรรมชาติต่อสมบัติของคอนกรีตพรุนที่มีซีเมนต์เฟสท์เป็นวัสดุประสาน

14.3 ทำให้ทราบถึงสมบัติต่างๆของคอนกรีตพรุนจากมวลรวมจากเศษวัสดุที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกัน

1.4.4 สามารถนำเศษวัสดุหรือมวลรวมรีไซเคิลมาใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนมวลรวมธรรมชาติในงานคอนกรีตพรุนที่มีซีเมนต์เฟสท์และจีโอโพลิเมอร์เฟสท์จากถ้ำลอยเป็นวัสดุประสานได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 คอนกรีตพูน

คอนกรีตพูน เป็นคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวต่ำ (Slump) อยู่ในช่วง 0-25 มิลลิเมตร ซึ่งคอนกรีตทั่วไปจะมีค่าการยุบตัวที่มากกว่า 25 มิลลิเมตร ได้จากการผสมของปูนซีเมนต์ น้ำ สารผสมเพิ่ม มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดหรือทรายในปริมาณที่น้อยมากหรืออาจจะไม่มีเลย จึงทำให้คอนกรีตพูนมีโพรงหรือช่องว่างขนาด 2-8 มิลลิเมตรที่ต่อเนื่องกันและไม่ต่อเนื่องกันในเนื้อคอนกรีตพูน และยอมให้น้ำหรือของเหลวสามารถไหลซึมผ่านไปได้ โดยที่ไปคอนกรีตพูนมีค่ากำลังอัดประมาณ 2.8-28 เมกะปาสคาล ค่าความพูนหรืออัตราส่วนโพรงร้อยละ 15-35 และมีความซึมผ่านน้ำประมาณ 0.14-1.22 เซนติเมตรต่อวินาที (ACI 522R-10, 2010) คอนกรีตพูนมักถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม เช่น งานด้านพื้นผิวถนน ช่วยลดหรือชะลอการไหลนองของน้ำฝนได้ ลดการปนเปื้อนของแหล่งน้ำธรรมชาติ ลดปัญหาการท่วมขังของน้ำ จึงทำให้ปัญหาของการเกิดตะไคร่น้ำลดลง และลดการสิ้นเปลืองของพื้นผิวทางเดินในขณะที่ฝนตกได้อีกด้วย

มวลรวมหยาบที่ใช้ในงานคอนกรีตพูนควรเป็นมวลรวมหยาบที่มีขนาดแบบขนาดเดียว (Single-Size) หรือมีขนาดประมาณ 19 และ 9.5 มิลลิเมตร อาจจะเป็นมวลรวมแบบก้อนกลมหรือมวลรวมที่ได้จากการบดก็สามารถใช้ได้เช่นกัน ซึ่งมวลรวมที่จะนำมาใช้ควรเป็นไปตามมาตรฐาน (ASTM D488, 2001) มวลรวมที่ใช้ในงานคอนกรีตพูนควรเป็นมวลรวมที่มีความแข็งแรงและสะอาดปราศจากการดูดซับหรือปนเปื้อนสารเคมี ซึ่งอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยวของเพสต์และมวลรวมได้ ความชื้นของมวลรวมหยาบก็มีความสำคัญต่อสมบัติของคอนกรีตพูนเช่นกัน เนื่องจากมวลรวมที่แห้งเกินไปจะดูดซับน้ำในส่วนผสม ทำให้คอนกรีตพูนมีความสามารถในการทำงานลดลงได้ ทำให้คอนกรีตพูนมีการบดอัดที่ไม่ดี ถ้ามวลรวมที่ใช้เปียกเกินไป จะทำให้เพสต์เหลวมากขึ้นและเกิดการไหลของเพสต์ไปอุดตันโพรงหรือช่องว่าง

มวลรวมละเอียดไม่ค่อยนำมาใช้ในงานคอนกรีตพูน เนื่องจากมวลรวมละเอียดจะทำให้ช่องว่างหรือความพูนมีปริมาณลดลงได้ แต่การใส่มวลรวมละเอียดจะทำให้คอนกรีตพูนมีกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น แต่การซึมผ่านน้ำจะมีค่าลดลง

วัสดุประสาน (Cementitious materials) หลักที่ใช้ในงานคอนกรีตพูนคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งควรมีสมบัติตามมาตรฐาน (ASTM C150/C150M, 2001) นอกจากนี้อาจมีวัสดุประสานเสริมซึ่งมีสมบัติเป็นปอซโซลานซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นสารเชื่อมประสานได้ เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตพูนมีสมบัติเหมือนคอนกรีตทั่วไป อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่าง 0.26-0.40 โดยปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมีความสำคัญต่อค่าการไหลของเพสต์ ซึ่ง

หากเพสต์เหลวเกินไปจะทำให้เกิดการไหลลงไปที่อุดต้นด้านล่าง และหากเพสต์มีค่าการไหลต่ำอาจทำให้มีความสามารถในการทำงานต่ำและเพสต์จะห่อหุ้มมวลรวมได้ไม่ดี อย่างไรก็ตามการใส่สารลดน้ำอาจช่วยลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลงได้

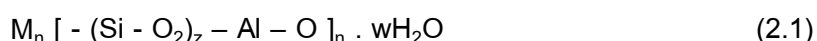
2.1.2 จีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน เป็นวัสดุที่มีสมบัติในการเชื่อมประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป ซึ่งได้จากการนำวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักโดยส่วนประกอบทางเคมีของธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน เช่น แก้วลอย ดินขาวเผา เป็นต้น มาทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้วัสดุเชื่อมประสานที่แข็งตัวและสามารถยึดเกาะกันได้ดี

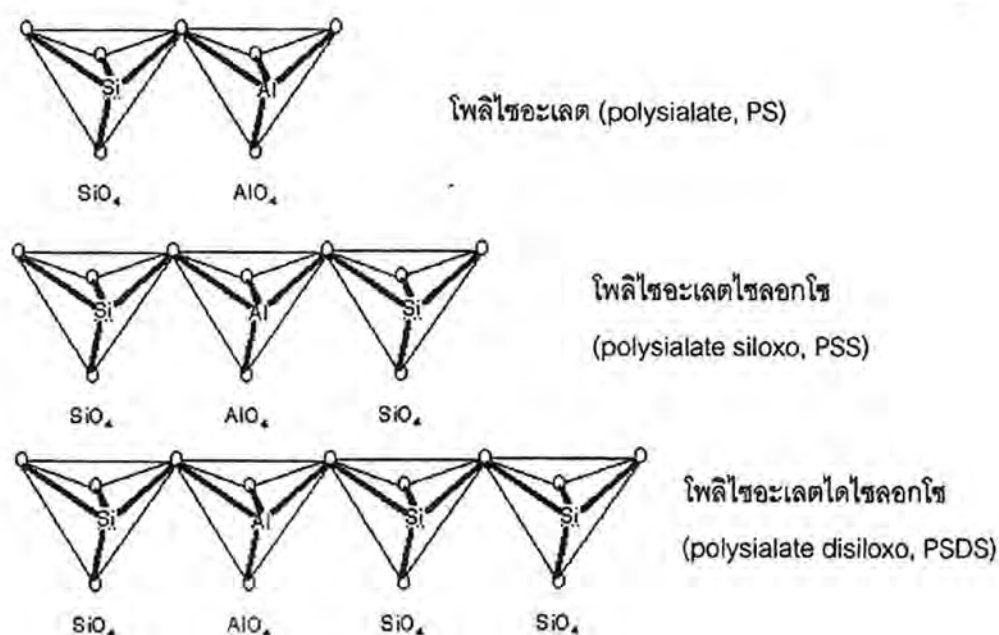
Palomo et al. (1999) ได้อธิบายว่ากระตุ้นแก้วลอยให้ทำปฏิกิริยาเชื่อมประสานสามารถทำได้สองแบบ อย่างแรกใช้สารละลายด่างเข้มข้นต่ำเมื่อใช้วัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกาและแคลเซียม ปฏิกิริยานี้จะได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) และแบบที่สองสามารถทำได้โดยใช้สารละลายด่างเข้มข้นสูงเป็นตัวกระตุ้นเมื่อวัสดุที่ใช้ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนประกอบและจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่าปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) หรือปฏิกิริยาถูกลูกโซ่

ปฏิกิริยาเคมีของจีโอโพลิเมอร์หรือปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เกิดขึ้นระหว่างซิลิกา อลูมินา และสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง โดยใช้ความร้อนไม่เกิน 100 องศาเซลเซียสเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา ในธรรมชาติมีวัสดุอยู่หลายประเภทที่สามารถเป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับใช้ผลิตเป็นวัสดุประสานจีโอโพลิเมอร์ได้ โดยจะต้องมีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาที่เหมาะสมเป็นหลัก โดยโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นี้จะแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง

กระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์นั้นจะเกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากการบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันภายใต้ปฏิกิริยาเคมีที่มีสารละลายด่างเข้มข้นเป็นตัวกระตุ้น มี Al-Si mineral มีพันธะ Si-O-Al-O ดังสมการ (2.1) และมีลักษณะยึดเหนี่ยวกันแสดงดังรูปที่ 2.1



โดย	M	เป็น	ธาตุอัลคาไลน์
	-	เป็น	การยึดเกาะ (bond)
	Z	เป็น	จำนวนโมเลกุลของ Si - O ₂ เท่ากับ 1, 2 หรือ 3
	n	เป็น	ปริมาณของการทำโมเลกุลลูกโซ่
	w	เป็น	จำนวนโมเลกุลของน้ำ



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์ (Davidovitch et al., 1999)

2.1.3 มวลรวม

มวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตอาจเกิดขึ้นจากการผลิตขึ้นหรือเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มวลรวมตามธรรมชาติเป็นที่นิยมเนื่องจากราคาที่ถูกลง หาง่ายกว่า โดยมากจะเน้นวัสดุที่มีในพื้นที่นั้นๆ ทำให้มีความหลากหลายมากขึ้นกับสภาพของพื้นที่ โดยทั่วไปผู้กำหนดมาตรฐานมักจะไม่นับถึงรายละเอียดลงไปถึงประเภทของหินที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตแต่ละประเภท แต่จะระบุกว้างๆว่า หินที่จะนำมาใช้ควรจะมีลักษณะอย่างไร อย่างไรก็ตามหินที่มีอยู่ตามธรรมชาติไม่ใช่ทุกตัวจะสามารถใช้กับงานคอนกรีตได้ บางประเภทไม่เหมาะสมเนื่องจากสาเหตุทางกายภาพ บางตัวไม่เหมาะสมเนื่องจากสมบัติทางเคมี มวลรวมแบ่งตามขนาดเป็น มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ได้แก่ หินหรือกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตรขึ้นไปหรือค้ำ ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 และ มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ หินที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือต้องค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

สมบัติของมวลรวมที่ไม่ได้มีมาจากหินต้นกำเนิดได้แก่ รูปร่าง ลักษณะเนื้อ (Surface texture) และปริมาณความชื้น ซึ่งสมบัติเหล่านี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติของคอนกรีตในการออกแบบส่วนผสมให้ได้กำลังตามที่ต้องการ ดังนี้

1. รูปร่างและลักษณะผิว

รูปร่างของมวลรวมแบ่งตามความคมของเหลี่ยมของมวลรวมได้เป็น 5 ชนิดคือ

- ก.) มนมาก (Well Rounded) ไม่มีผิวเดิมเหลืออยู่
- ข.) มน (Rounded) ผิวเดิมถูกกลบเกือบหมด

ค.) เกือบมน (Sub-Rounded) มีการสึกกร่อนพอสมควรและผิวเดิมลดลง
 ง.) เกือบเหลี่ยม (Sub-Angular) มีการสึกกร่อนนิดหน่อยที่มุม แต่ผิวเหมือนเดิม

จ.) เหลี่ยม (Angular) ไม่มีการสึกกร่อน

มวลรวมมามากที่สุดได้แก่มวลรวมก้อนกลม (Spherical Aggregate) และมวลรวมเหลี่ยมที่สุดได้แก่มวลรวมก้อนลูกบาศก์ (Cubical Aggregate) นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งมวลรวมได้อีกตามลักษณะของรูปร่างได้แก่ มวลรวมก้อนเบี้ยว (Irregular Aggregate) มวลรวมก้อนแบน (Flaky Aggregate) และมวลรวมก้อนยาว (Elongated Aggregate)

มวลรวมก้อนกลมและผิวเรียบต้องการซีเมนต์เพสต์เพื่อเคลือบผิวน้อยกว่ามวลรวมรูปร่างอื่นๆ และมีการขัดกันระหว่างมวลรวมต่ำจึงทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ดีซึ่งได้แก่การวัดและทรายตามธรรมชาติเพราะมีลักษณะกลม ส่วนหินย่อยที่เกิดจากการย่อยนั้นมีลักษณะเป็นเหลี่ยมและส่วนมากมีผิวหยาบ ทำให้มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงและต้องการซีเมนต์เพสต์มาเคลือบผิวมาก และความเหลี่ยมยังทำให้เกิดการขัดกันระหว่างมวลรวมทำให้คอนกรีตที่ได้มีความสามารถทำงานได้ต่ำ

2. ความชื้นและการดูดน้ำ

ในเนื้อของมวลรวมมีช่องว่างเล็กๆที่น้ำสามารถไหลเข้าออกได้ และยังสามารถเกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวมได้ด้วย ดังนั้นมวลรวมจึงสามารถดูดน้ำได้ การเก็บมวลรวมที่สถานที่ต่างกันไปจะทำให้ปริมาณน้ำต่างกัน ปริมาณน้ำหรือความชื้นในมวลรวมมีผลต่อปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตกล่าวคือ มวลรวมในสภาพแห้งสามารถดูดน้ำที่ใช้ในส่วนผสมเข้าไปในมวลรวมบางส่วน ทำให้น้ำที่เหลือในส่วนผสมน้อยกว่าที่ต้องการ ในทางกลับกันถ้ามวลรวมมีน้ำมากเกินไปคืออยู่ในสภาพเปียกชื้น น้ำส่วนเกินจะทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมมากกว่าที่ต้องการ สภาพความชื้นของมวลรวมแบ่งได้เป็น 4 แบบ

2.1 แห้งด้วยเตาอบ (Oven Dry) เป็นการขจัดความชื้นจากมวลรวมจนหมดด้วยความร้อนจากเตาอบ

2.2 แห้งในอากาศ (Air Dry) มวลรวมมีผิวแห้ง แต่เนื้อภายในที่ลึกจากผิวมีน้ำอยู่บ้าง

2.3 อิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) ผิวของมวลรวมแห้งแต่ภายในผิวอยู่ในสภาพอิ่มตัวมีน้ำอยู่เต็ม

2.4 ผิวเปียก (Wet) มีน้ำคลุมผิวโดยรอบ และภายในผิวมีน้ำอยู่เต็ม

ในการผสมคอนกรีตโดยใช้มวลรวมแห้ง มวลรวมแห้งจะดูดน้ำทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถทำงานได้ลดลง และภายหลัง 15 นาทีแล้วความสามารถทำงานได้จะลดลงอีกไม่มากนักเนื่องจากซีเมนต์เพสต์เคลือบผิวมวลรวมทำให้การดูดน้ำเป็นไปได้ยาก ในเวลาที่คอนกรีตก่อตัวโดยปกติแล้วจะสมมติว่ามวลรวมอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้จึงต้องปรับปริมาณน้ำของมวลรวมให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ซึ่งมวลรวมที่แห้งในอากาศสามารถดูดน้ำได้ไม่เกินร้อยละ 1 การคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องการปรับในการผสมคอนกรีตสามารถวัดและ

คำนวณตามมาตรฐาน (ASTM C127-07, 2007) สำหรับสภาพอิมมัลชันแห้งของมวลรวมหยาบทำได้ โดยการแช่มวลรวมหยาบในน้ำ 24 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำซึมเข้าสู่มวลรวมจนเต็มที่ จากนั้นนำมวลรวมออกจากน้ำแล้วเช็ดให้แห้ง โดยการกลับไปอบบนผ้าแห้งจนน้ำหมด โดยสังเกตว่าผิวของมวลรวมจะด้านขึ้นไม่สะท้อนแสง

3. ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) โดยทั่วไปหมายถึงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัตถุต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุนั้น แต่เนื่องจากมวลรวมมีโพรงที่น้ำซึมผ่านได้และน้ำซึมผ่านไม่ได้ ดังนั้นทำให้ปริมาตรของมวลรวมมีหลายความหมายและความถ่วงจำเพาะจึงมีหลายค่าเช่นกัน ซึ่งมี 3 ค่าดังนี้

3.1 ความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์ (Absolute Specific Gravity)

3.2 ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity)

3.3 ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk Specific Gravity)

โดยปกติแล้วงานคอนกรีตไม่มีความจำเป็นที่ต้องรู้ค่าความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์ เพราะความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์ต้องบดมวลรวมให้ละเอียดเพื่อกำจัดโพรง แต่ถ้ารวมปริมาตรของเนื้อมวลรวมกับโพรงที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ในการคำนวณจะได้ความถ่วงจำเพาะปรากฏ และถ้าคิดปริมาตรของเนื้อมวลรวมกับโพรงทั้งหมดจะได้ความถ่วงจำเพาะรวม

ความถ่วงจำเพาะรวมที่ใช้กันมีอยู่ 2 ค่า คือ เมื่อมวลรวมอยู่ในสภาพอบแห้งและเมื่อมวลรวมอยู่ในสภาพอิมมัลชันแห้ง ในการคำนวณส่วนผสมคอนกรีตจะใช้น้ำหนักของมวลรวมที่อิมมัลชันแห้ง ดังนั้นความถ่วงจำเพาะเมื่อมวลรวมอิมมัลชันแห้งจึงเป็นที่นิยมมากกว่า การทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบมีอยู่ในมาตรฐาน (ASTM C127-07, 2007) สามารถคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะต่างๆได้ดังนี้

ความถ่วงจำเพาะรวมที่อบแห้ง $= A / (B - C)$

ความถ่วงจำเพาะรวมที่อิมมัลชันแห้ง $= B / (B - C)$

ความถ่วงจำเพาะปรากฏ $= A / (A - C)$

เมื่อ A = น้ำหนักของมวลรวมแห้งชั่งในอากาศ

B = น้ำหนักของมวลรวมอิมมัลชันแห้งชั่งในอากาศ

C = น้ำหนักของมวลรวมอิมมัลชันในน้ำ

ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีค่าระหว่าง 2.6 ถึง 2.7 มวลรวมที่ค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่านี้จะเป็นหินที่มีเนื้อแน่นได้แก่ หินบะซอลต์ หินแกรนิต และโอไรต์ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.7 ถึง 2.9

4. หน่วยน้ำหนัก

หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ของมวลรวมคือน้ำหนักของมวลรวมที่บรรจุเต็มภาชนะหนึ่งหน่วยปริมาตร และเราใช้หน่วยน้ำหนักสำหรับเปลี่ยนน้ำหนักมวลรวมเป็นปริมาตรในการ

คำนวณสัดส่วนผสมโดยวิธีการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต หน่วยน้ำหนักขึ้นอยู่กับ การกระจายขนาด รูปร่างของมวลรวมและสภาพการอัดแน่น ในการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักต้องระบุวิธีการบรรจุว่าอยู่ในสภาพหลวมหรือกระทุ้งแน่น โดยทั่วไปแล้วในคอนกรีตมีค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมปกติมีค่าระหว่าง 1,450-1,750 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM C29/C29M-97a, 2001) หน่วยน้ำหนักในสภาพหลวมมีค่าระหว่าง 0.87-0.96 ของหน่วยน้ำหนักในสภาพกระทุ้งแน่น มวลรวมที่มีขนาดเดียวจะมีช่องว่างมาก และมวลรวมที่มีขนาดละเอียดจะมีช่องว่างน้อย การผสมมวลรวมหยาบกับมวลรวมละเอียดเข้าด้วยกันจะทำให้ช่องว่างลดลงและมีหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น ช่องว่างต่ำสุดและหน่วยน้ำหนักสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อมีมวลรวมละเอียดประมาณร้อยละ 35-40 ของมวลรวมละเอียดทั้งหมด

5. กำลังและความแข็ง

มวลรวมส่วนมากมีกำลังและความแข็งสูงกว่าซีเมนต์เพสต์มากจึงไม่ค่อยมีผลต่อกำลังของคอนกรีตมาก แต่จะมีผลต่อความมีเสถียรภาพของปริมาตรคอนกรีตมากกว่า ซึ่งได้แก่ การเสียรูปภายใต้แรงกระทำ การคืบ และการหดตัวแห้ง หินส่วนใหญ่สามารถรับแรงอัดระหว่าง 100-300 เมกะปาสคาล และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหินส่วนมากมีค่าระหว่าง 50×10^3 - 80×10^3 เมกะปาสคาล

6. ขนาดละเอียดของมวลรวม

ก.) การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างมวลรวมควรเก็บมาจากหลายๆส่วนอย่างน้อยที่สุดไม่ควรต่ำกว่า 10 ที่และมีน้ำหนักรวมกันไม่น้อยกว่าที่ระบุในตารางที่ 2.1 ตามมาตรฐาน (ASTM D75-95, 2001) เมื่อได้ตัวอย่างมาแล้วนำมาแบ่งให้เหลือปริมาณที่พอเหมาะกับการทดลอง การแบ่งตัวอย่างมวลรวมทำได้ 2 แบบคือ วิธีแบ่งสี่ส่วนและวิธีใช้เครื่องแบ่ง

การแบ่งสี่ส่วนเป็นวิธีลดตัวอย่างมวลรวมให้เหลือกึ่งหนึ่ง โดยสามารถทำได้ตามมาตรฐาน (ASTM C702-98, 2001) ส่วนการแบ่งครึ่งตัวอย่างสามารถทำได้โดยใช้เครื่องแบ่งตัวอย่าง ซึ่งวิธีการและเครื่องมือที่ใช้ทดสอบสามารถทำตามมาตรฐาน (ASTM C702-98, 2001) การทดสอบจะทำกับมวลรวมแห้ง ใส่มวลรวมในภาดให้สม่ำเสมอแล้วจึงเทลงในเครื่องแบ่งตัวอย่าง เครื่องจะแบ่งครึ่งมวลรวมออกสองข้างของเครื่องแบ่งตัวอย่าง

ตารางที่ 2.1 น้ำหนักต่ำสุดของมวลรวมหยาบในการทดสอบขนาดละเอียดตาม ASTM D75

ขนาดโตสุดของมวลรวม (นิ้ว)	ปริมาณต่ำสุดของตัวอย่าง (กิโลกรัม)
$\frac{3}{8}$ และต่ำกว่า	10
$\frac{3}{4}$	25
$1\frac{1}{2}$	75
3	150

ข.) การวิเคราะห์ขนาดคละ

ในทางปฏิบัติได้แบ่งมวลรวมออกเป็น 2 ประเภท คือ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นขนาดของแรงมาตรฐาน มาตรฐานอเมริกันเรียกแรงสำหรับมวลรวมหยาบตามขนาดของช่องเปิด เช่น แรงขนาด 3/8, 3/4, 1½, และ 3 นิ้ว เป็นต้น และเรียกแรงสำหรับมวลรวมละเอียดตามจำนวนช่องต่อความยาวหนึ่งนิ้ว เช่น แรงเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50, 100, และ 200 เป็นต้น การวิเคราะห์ทำได้โดยการเก็บตัวอย่างมวลรวมมาปริมาณหนึ่งแล้วทำการแยกขนาดโดยการร่อนผ่านแรงขนาดมาตรฐานที่วางเรียงซ้อนกันตามขนาดให้แรงใหญ่สุดอยู่ด้านบนและขนาดเล็กสุดอยู่ด้านล่าง รายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมมีอยู่ในมาตรฐาน (ASTM C136-06, 2006) ผลการวิเคราะห์ขนาดคละโดยมากแสดงเป็นร้อยละของน้ำหนักค้างสะสม (Cumulative Percentage Retained) หรือร้อยละน้ำหนักผ่านสะสม (Cumulative Percentage Passing) ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของมวลรวม

มาตรฐานอังกฤษ		มาตรฐานอเมริกา			
ขนาดแรงใหม่		แรงเก่า	แรง	นิ้ว	มิลลิเมตร
มิลลิเมตร	นิ้ว				
75	3	3 นิ้ว	3 นิ้ว	3	75.0
37.5	1.5	1½ นิ้ว	1½ นิ้ว	1.5	37.5
20.0	0.786	¾ นิ้ว	¾ นิ้ว	0.75	19.0
10.0	0.393	⅜ นิ้ว	⅜ นิ้ว	0.375	9.5
5.0	0.196	3/16 นิ้ว	เบอร์ 4	0.187	4.75
2.36	0.0937	เบอร์ 7	เบอร์ 8	0.0937	2.36
1.18	0.0469	เบอร์ 14	เบอร์ 16	0.0469	1.18
600µm	0.0234	เบอร์ 25	เบอร์ 30	0.0234	600µm
300 µm	0.0117	เบอร์ 52	เบอร์ 50	0.0117	300 µm
150 µm	0.0059	เบอร์ 100	เบอร์ 100	0.0059	150 µm
75 µm	0.0029	เบอร์ 200	เบอร์ 200	0.0029	75 µm

ค.) โมดูลัสความละเอียด

โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) เป็นตัวเลขที่บอกถึงขนาดโดยประมาณของมวลรวม มวลรวมที่ละเอียดจะมีค่าโมดูลัสความละเอียดต่ำ ส่วนมวลรวมที่มีความหยาบจะมีค่าโมดูลัสความละเอียดสูง โมดูลัสความละเอียดหาได้จากผลรวมของค่าร้อยละค้างสะสมบนแรงมาตรฐานหารด้วย 100 แรงมาตรฐานประกอบด้วยแรงเบอร์ 100, 50, 30, 16, 8, 4 และแรงขนาด ¾, ¾, 1½, 3 นิ้ว และขนาดใหญ่กว่าโดยมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นสองเท่าของแรงก่อนหน้า ตาม

มาตรฐาน (ASTM C33/C33M-11, 2011) กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดควรอยู่ระหว่าง 2.3 ถึง 3.2 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบแสดงดังตารางที่ 2.3

7. ความคงทนของมวลรวม

ความคงทนของมวลรวมมีความสำคัญต่อสมบัติของคอนกรีตมากเพราะมวลรวมเป็นส่วนประกอบที่ใหญ่ที่สุดในคอนกรีต ความคงทนแบ่งออกได้เป็นความคงทนทางกายภาพและทางเคมี และมีรายละเอียดต่อไปนี้

7.1 ความคงทนทางกายภาพ

ก.) การคงตัว

การไม่คงตัวของมวลรวมสามารถทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดจากการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันภายในมวลรวม ส่วนใหญ่เกิดที่คอนกรีตที่ทำเป็นห้องเย็น การทดสอบความคงตัวของมวลรวมสามารถทำได้โดยวิธีการแช่ตัวอย่างลงในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อิ่มตัว

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ

ขนาดร่ง	น้ำหนักค้าง (กรัม)	ร้อยละค้าง	ร้อยละค้างสะสม	ร้อยละผ่านสะสม
3 นิ้ว	0	0	0	100
1½ นิ้ว	400	4	4	96
¾ นิ้ว	3,900	39	43	57
⅜ นิ้ว	3,500	35	78	22
เบอร์ 4	2,200	22	100	0
8	0	0	100	0
16	0	0	100	0
30	0	0	100	0
50	0	0	100	0
100	0	0	100	0
น้ำหนักมวลรวมหยาบ 10,000 กรัม			รวม = 725	
โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ			$725/100 = 7.25$	

ข.) ความคงทนต่อการขัดสี

การทดสอบความทนทานต่อการขัดสีมีอยู่หลายวิธีส่วนมากเป็นการขัดสีมวลรวมด้วยวัตถุอื่น วิธีที่นิยมใช้กันวิธีหนึ่งคือ การทดสอบความคงทนต่อการสึกกร่อนด้วยเครื่องลอสแอน

เจลลิส (Los Angeles abrasion machine) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ทั้งการตกกระทบและการขัดสี วิธีนี้จัดเป็น การวัดความทนทานต่อการขัดสีของมวลรวมโดยทางอ้อมแต่สามารถให้ข้อมูลเพื่อการตัดสินใจได้ดี วิธีทดสอบมวลรวมหยาบขนาดเล็ก (เล็กกว่า $1\frac{1}{2}$ นิ้ว) มีอยู่ในมาตรฐาน (ASTM C131-96, 2001) และมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ (ใหญ่กว่า $\frac{3}{4}$ นิ้ว) มีอยู่ในมาตรฐาน (ASTM C535-96, 2001)

7.2 ความคงทนทางเคมี

ก.) ปฏิกริยาอัลคาไลกับซิลิกา

ปฏิกริยาระหว่างอัลคาไลในปูนซีเมนต์กับซิลิกาในมวลรวมเป็นสาเหตุที่ทำให้ เกิดการแตกร้าวอย่างมากในคอนกรีตและนำไปสู่การวิบัติ ซิลิกาในมวลรวมที่ว่องไวในการทำ ปฏิกริยาจะทำปฏิกริยากับอัลคาไลได้อัลคาไลซิลิกาเจล (Alkali-Silica gel) ซึ่งสามารถดูดน้ำและ ขยายตัวได้มาก ถ้ามีมากจะทำให้ซีเมนต์เพสต์โดยรอบมวลเกิดการแตกร้าว การควบคุมปฏิกริยานี้ ทำได้โดยการลดความเข้มข้นของอัลคาไลในส่วนผสมคอนกรีตด้วยการใช้ปูนที่มีอัลคาไลต่ำกว่าร้อยละ 0.6 ของ Na_2O เทียบเท่า (โดยคิดจาก $\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O}$) นอกจากนี้ยังสามารถผสมวัสดุปอซ โซลานเช่น เถ้าหินในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อช่วยลดปฏิกริยานี้ได้

ข.) ปฏิกริยาอัลคาไลคาร์บอเนต

ปฏิกริยาอัลคาไลคาร์บอเนต (Alkali-Carbonate Reaction) เป็นปฏิกริยา ระหว่างอัลคาไลกับคาร์บอเนต ในมวลรวมที่เป็นหินปูนบางชนิด เป็นปฏิกริยาที่ทำให้เกิดการ ขยายตัวและทำให้คอนกรีตเกิดการเสียหายได้ ยังไม่สามารถบอกปฏิกริยาที่แน่ชัดได้ แต่การควบคุม ทำได้โดยใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำ และควรต่ำกว่าร้อยละ 0.4 ของ Na_2O เทียบเท่า

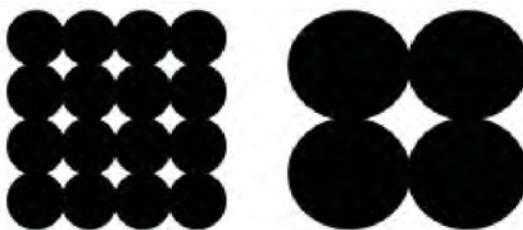
2.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

2.2.1 คอนกรีตพรุน

คอนกรีตพรุน เป็นคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวต่ำ (Low Slump) อยู่ในช่วง 0-25 มิลลิเมตร ซึ่ง คอนกรีตทั่วไปจะมีค่าการยุบตัวที่มากกว่า 25 มิลลิเมตร ได้จากการผสมของมวลรวมหยาบ ปูนซีเมนต์ น้ำ สารผสมเพิ่ม และทรายในปริมาณที่น้อยมากหรืออาจจะไม่มีเลย จึงทำให้คอนกรีตพรุน มีโพรงหรือช่องว่างขนาด 2-8 มิลลิเมตรที่ต่อเนื่องกันและไม่ต่อเนื่องกันในเนื้อคอนกรีตพรุน จึงยอม ให้น้ำหรือของเหลวสามารถไหลซึมผ่านไปได้ มีค่ากำลังอัดประมาณ 28-280 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร ค่าความพรุนหรืออัตราส่วนโพรงร้อยละ 15-35 และมีความซึมผ่านน้ำประมาณ 0.14-1.22 เซนติเมตรต่อวินาที (ACI 522R-10, 2010)

มวลรวมที่นำไปใช้งานคอนกรีตพรุนนั้น ส่วนใหญ่เป็นมวลรวมแบบธรรมดาทั่วไปที่มีขนาด ไกล่เคียงกัน หรือมีขนาดแบบขนาดเดียว (Single-Size) (ACI 522R-10, 2010) โดยงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ขนาดของมวลรวมหยาบจะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตพรุน ซึ่งการใช้มวลรวม หยาบที่มีขนาดเล็กลงในการทำคอนกรีตพรุนนั้น จะส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมหยาบมี มากขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.2 ทำให้เพสต์ที่เคลือบผิวมวลรวมมีโอกาสในการเชื่อมประสานและ ยึดติดกันได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นการใช้มวลรวมขนาดเล็กลงจะสามารถทำให้คอนกรีตพรุนมีสมบัติทางด้าน

กำลังที่ดียิ่งขึ้น (Yang & Jiang, 2003; Chindaprasirt et al., 2009; Huang et al., 2010; Cheng et al., 2011; ยุกดี หิรัญ และคณะ, 2554)



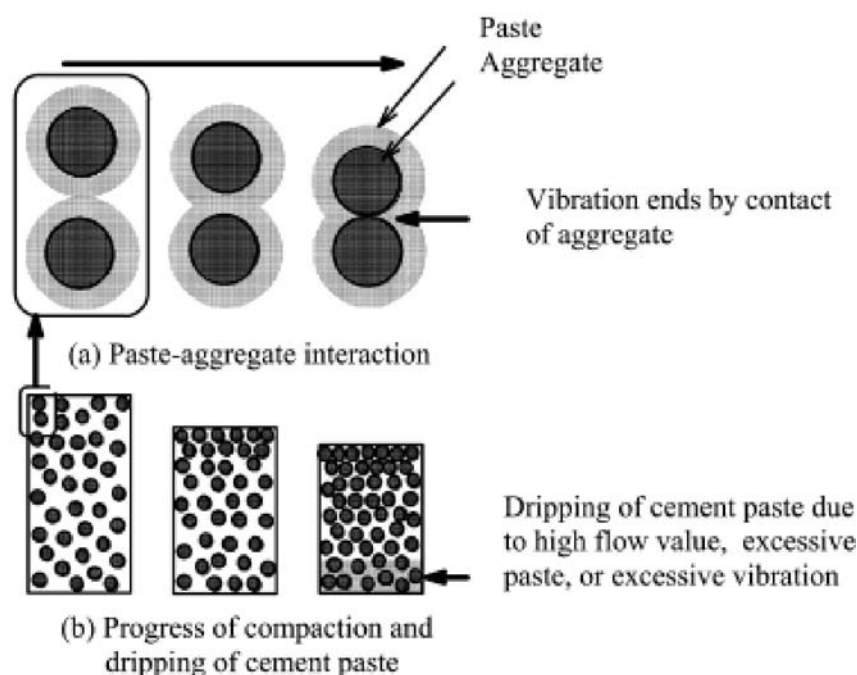
รูปที่ 2.2 การสัมผัสกันของมวลรวมที่มีขนาดต่างกัน (ยุกดี หิรัญ และวัจนวงศ์ กลีฟละ, 2554)

เพสต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานยึดเกาะกันของมวลรวมในคอนกรีตพูน ถือเป็น ส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตพูน เนื่องจากมวลรวม หยาบที่ใช้ในการทำคอนกรีตพูนจะมีความแข็งแรงในตัวเองสูง อีกทั้งเพสต์ที่ทำหน้าที่เชื่อมประสาน ก็มีลักษณะค่อนข้างบาง จึงทำให้การวิบัติส่วนใหญ่ของคอนกรีตพูนเกิดขึ้นที่บริเวณเพสต์เป็นหลัก การปรับปรุงให้เพสต์ที่เชื่อมประสานมวลรวมมีกำลังรับแรงอัดมากขึ้น อาจส่งผลให้คอนกรีตพูนมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย (Yang & Jiang, 2003) เพสต์ที่ใช้ในการทำคอนกรีตพูนควรมี ความเหนียวหนืดและค่าการไหลสูงอยู่ระหว่าง 150-230 มิลลิเมตร สามารถเคลือบและยึดเกาะผิว มวลรวมได้ดี โดยทั่วไปเพสต์ที่ดีจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ สารลดน้ำ การผสม และ ระยะเวลาในการผสม โดยความเหมาะสมของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าระหว่าง 0.22-0.24 และ ใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ (Chindaprasirt et al., 2008) สารลดน้ำพิเศษที่ใช้ ในคอนกรีตพูนจะสามารถเพิ่มกำลังให้กับซีเมนต์เพสต์ได้ เนื่องจากสารลดน้ำพิเศษนี้จะทำให้ ปริมาณของน้ำที่ใช้ในส่วนผสมมีปริมาณลดลง อีกทั้งยังทำให้เพสต์มีค่าการไหลที่ดีขึ้น ส่งผลดีต่อ ความสามารถในการเคลือบผิวมวลรวมและเกิดการอัดแน่นที่ดีของคอนกรีตพูนอีกด้วย (ยุกดี หิรัญ และวัจนวงศ์ กรีฟละ, 2554)

เพสต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานคอนกรีตพูน นอกเหนือจากซีเมนต์เพสต์ที่ได้จาก ปูนซีเมนต์แล้ว จากงานวิจัยในปัจจุบันพบว่า จีโอโพลิเมอร์เพสต์สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานใน คอนกรีตพูนได้เช่นกัน ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Tho-in et al. (2012) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับจีโอ โพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จากการผสมกันของเถาถ่านหินที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมสูง สาย ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และมวลรวม ซึ่งผลการทดสอบพบว่า จีโอโพลิ เมอร์เพสต์จากเถาถ่านหินที่มีธาตุแคลเซียมสูง สามารถนำมาใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พูนได้

การทำให้ตัวอย่างคอนกรีตพูนเกิดการอัดแน่นสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับขนาดมวล รวมหยาบ ปริมาณคอนกรีตพูนและพลังงานที่ใช้ในการทำให้แน่น ซึ่งเป็นการอัดแน่นโดยใช้ การใช้ลูกทุ้ง การเขย่าสั่นที่ผิวบน (Surface Vibrating Compaction) การสั่นบนโต๊ะเขย่า การใช้รถบด

อัด ตามลำดับ การอัดแน่นที่เหมาะสมจะทำให้เฟสท์ที่เคลือบผิวของมวลรวมสามารถเชื่อมประสานกันได้ดีและส่วนผสมจะเกิดการอัดแน่นยิ่งขึ้น ซึ่งการเชื่อมประสานและยึดกันของเฟสท์ที่หุ้มมวลรวมนั้นแสดงดังรูปที่ 2.3 หากคอนกรีตพูนได้รับการอัดแน่นหรือพลังงานในการสั่นที่มากเกินไป อาจทำให้เกิดการจมลงของซีเมนต์เฟสท์ที่ด้านล่างได้ (Chindaprasirt et al., 2008; ทัศนกิจ ชาริรัตน์ และคณะ, 2551)



รูปที่ 2.3 แสดงการเชื่อมประสานและยึดกันของเฟสท์ที่หุ้มมวลรวม (Chindaprasirt et al., 2008)

2.2.2 เศษวัสดุหรือมวลรวมรีไซเคิล

เศษวัสดุที่เหลือจากการใช้งานในงานก่อสร้างหรือได้จากการรื้อถอนสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ นั้น ปัจจุบันมีการทำวิจัยนำเศษวัสดุมหาหมุนเวียนใช้ใหม่เป็นมวลรวมจากเศษวัสดุมากขึ้น เพื่อทดแทนการใช้มวลรวมจากธรรมชาติ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้เศษวัสดุมีประโยชน์มากกว่าการนำไปใช้เป็นวัสดุถมที่อีกด้วย

ACI Education Bulletin E1-07 (2007) ได้กล่าวว่าคอนกรีตเก่าที่เกิดจากการรื้อถอนโครงสร้าง พื้นผิวทาง ทางเดินเท้า หรือท่อระบายน้ำนั้นเป็นที่มาของขยะที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่สามารถนำมาผ่านกระบวนการบดเพื่อหมุนเวียนกลับมาใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตใหม่ได้ การบดแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ถือว่าเป็นผลดีเนื่องจากการลดปริมาณขยะและลดความต้องการในการใช้มวลรวมจากธรรมชาติได้ มวลรวมจากเศษวัสดุอาจจะมีคุณภาพที่ดีกว่ามวลรวมจากธรรมชาติบางชนิด

เศษคอนกรีตหรือคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้จากซากสิ่งก่อสร้างที่ถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องย่อย แล้วทำการคัดขนาดพบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะและค่าหน่วยน้ำหนักที่น้อยกว่ามวลรวม

จากธรรมชาติ แต่มีค่าการดูดซึมน้ำและค่าร้อยละการสึกกร่อนที่มากกว่า (Cheng et al., 2011) เมื่อนำคอนกรีตจากเศษวัสดุนี้ไปใช้เป็นมวลรวมหยาบในการผสมคอนกรีตพูน พบว่าลักษณะรูปร่างที่ค่อนข้างกลมของคอนกรีตจากเศษวัสดุจะทำให้คอนกรีตพูนมีความสามารถในการทำงานได้ดีกว่าคอนกรีตพูนจากมวลรวมธรรมชาติ ในส่วนของกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดพบว่า คอนกรีตพูนจากมวลรวมธรรมชาติจะมีค่ามากกว่า (Park et al., 2005) เนื่องจากมวลรวมธรรมชาติมีผิวที่หยาบและมีรูปร่างที่สามารถยึดเกาะกันได้ดีกว่าคอนกรีตจากเศษวัสดุ อีกทั้งยังสอดคล้องกับค่าร้อยละการสึกกร่อนของมวลรวมธรรมชาติที่ต่ำกว่าคอนกรีตจากเศษวัสดุอีกด้วย ส่วนค่าความพูนและค่าความซึมผ่านน้ำมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากมวลรวมที่ใช้มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน

เศษคอนกรีตบดที่ผ่านการย่อยและคัดให้มีขนาด 4.8-9.5 มิลลิเมตร มีค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักที่น้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติ แต่มีลักษณะผิวที่ขรุขระและมีรูพรุนในเนื้อมาก ทำให้มีค่าการดูดซึมน้ำและค่าร้อยละการสึกกร่อนที่มากกว่ามวลรวมธรรมชาติ เมื่อนำเศษคอนกรีตบดกลามาใช้เป็นมวลรวมหยาบในการผสมคอนกรีตพูน โดยใช้เศษคอนกรีตบดแทนที่มวลรวมธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.24 และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.75 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ แล้วทดสอบสมบัติทางกายภาพพบว่า คอนกรีตพูนมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นตามร้อยละการแทนที่ของคอนกรีตบดกรีไชเคิลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 40 และ 60 จากนั้นจะลดต่ำลง เนื่องจากคอนกรีตบดกรีไชเคิลเกิดการแตกหักระหว่างขั้นตอนการผสมและการอัดแน่น ทำให้มีขนาดเล็กลงและเข้าแทรกอยู่ระหว่างช่องว่าง ทำให้มีจุดเชื่อมต่อสัมผัสระหว่างมวลรวมเพิ่มมากขึ้นและคอนกรีตพูนมีความแน่นขึ้น ส่งผลให้ค่าความพูนและค่าการซึมผ่านน้ำมีค่าลดลงตามร้อยละของการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น (ยุวดี หิรัญ และคณะ , 2554)

เศษอิฐหรืออิฐรีไชเคิลที่ผ่านการบดและคัดขนาดให้เป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด มีค่าหน่วยน้ำหนักที่ต่ำกว่าและค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งการนำอิฐรีไชเคิลมาใช้เป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในการทำคอนกรีต โดยทำการแทนที่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจากธรรมชาติร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดที่อายุ 90 วัน อัตราส่วนโพรง การดูดซึมน้ำ ค่าการซึมผ่านน้ำ และค่าการหดตัวของคอนกรีต จากการทดสอบพบว่า เศษอิฐหรืออิฐรีไชเคิลสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในคอนกรีตได้ ซึ่งร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ของการแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดตามลำดับ ถือเป็นร้อยละของการแทนที่ของอิฐรีไชเคิลในส่วนผสมที่จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดียอมรับได้ (Debieb & Kenai, 2008)

2.2.3 จีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีสมบัติในการเชื่อมประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป ซึ่งได้จากการนำวัสดุที่มีธาตุซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ถ้ำลอย ดินขาว ถ้ำกลบ เป็นต้น มาทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างจะได้วัสดุเชื่อมประสานที่แข็งตัวและสามารถยึดเกาะกันได้ดี จากหลายงานวิจัยทำให้เห็นว่า คุณสมบัติต่างๆของจีโอโพลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยดังต่อไปนี้

การใช้สารละลายต่างหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น จะสามารถทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้นด้วย (Somna et al., 2011; Topark-Ngarm et al., 2011; เจริญชัย ฤทธิรุทธ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2554)

การใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยที่มากขึ้น จะทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงและเวลาก่อตัวสูงขึ้น (Topark-Ngarm et al., 2011; สกลวรรณ ห่านจิตรสุวรรณ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553; เจริญชัย ฤทธิรุทธ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2554)

การใช้อุณหภูมิในการบ่มเพิ่มขึ้น จะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและเวลาในการก่อตัวลดลง (Topark-Ngarm et al., 2011; สกลวรรณ ห่านจิตรสุวรรณ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553; เจริญชัย ฤทธิรุทธ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2554)

การใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติต่างกันด้วย ซึ่งอัตราส่วน 0.50-1.00 จะมีความเหมาะสมและทำให้มีกำลังอัดที่ดี (Topark-Ngarm et al., 2011)

การใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดแตกต่างกัน จะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดที่ต่างกันด้วย (เจริญชัย ฤทธิรุทธ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2554; วัชรปัญญา พรหมแสน และคณะ, 2555)

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการนำเศษวัสดุได้แก่ เศษคอนกรีต, เศษคอนกรีตบล็อก และเศษอิฐมอญมาย่อยและคัดเลือกให้มีขนาดเท่ากับ 4.5-9.5 มิลลิเมตรมาใช้เป็นมวลรวมหยาบจากเศษวัสดุแทนการใช้มวลรวมธรรมชาติในงานคอนกรีตพูน ซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. การศึกษาสมบัติของคอนกรีตพูนจากมวลรวมหยาบจากเศษวัสดุที่มีซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน
2. การศึกษาสมบัติของคอนกรีตพูนจากมวลรวมหยาบจากเศษวัสดุที่มีอีโพลิเมอร์เพสต์จากถั่วลันเตาเป็นวัสดุเชื่อมประสาน

ทำการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ, การดูดซึมน้ำ, โมดูลัสความละเอียด, หน่วยน้ำหนักแห้งกระทุ้งแน่น และการสึกกร่อนของมวลรวม ทดสอบสมบัติของคอนกรีตพูน ได้แก่ กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก, ความหนาแน่น, อัตราส่วนโพรง, การซึมผ่านของน้ำ, และการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนของผิวหน้าของคอนกรีตพูน

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุ

1. มวลรวมธรรมชาติหรือหินปูนย่อย (LS), เศษคอนกรีต (RC) จากเศษคอนกรีตโครงสร้าง, เศษคอนกรีตบล็อก (RB) จากการรื้อถอนกำแพง และเศษอิฐมอญ (RCB) ที่เหลือจากงานก่อสร้าง ที่ผ่านการย่อยและคัดให้มีขนาด 4.5-9.5 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{8}$ นิ้ว ค้างตะแกรงเบอร์ 4) ดังรูปที่ 3.1
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1
3. น้ำประปา
4. สารลดน้ำพิเศษกลุ่มเมลามีน (FF)
5. ถั่วลันเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ความเข้มข้น 10, 15 และ 20 โมลาร์
7. สารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS)
8. น้ำกลั่น

3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก
2. ตะแกรงขนาดมาตรฐาน
3. อุปกรณ์หาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และถั่วลันเตา

4. อุปกรณ์หาค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ
5. เครื่องมือทดสอบการขัดสี (Los Angeles)
6. เครื่องมอร์ตาร์
7. เครื่องผสมคอนกรีตพูน
8. แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.
9. แบบหล่อตัวอย่างแผ่นพื้นจัตุรัสขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร หยา 3 เซนติเมตร
10. โต๊ะสั่นสะเทือน
11. ตู้อบความร้อน
12. ตู้รักษาความชื้น
13. เครื่องทดสอบกำลัง
14. เครื่องทดสอบค่าความซึมผ่านของน้ำ
15. เครื่องมือทดสอบค่าความทนทานต่อการสึกกร่อน



ก. หินปูนย่อย (LS)



ข. มวลรวมจากเศษคอนกรีต (RC)



ค. มวลรวมจากเศษคอนกรีตบดละเอียด (RB)



ง. มวลรวมจากเศษอิฐมอด (RCB)

รูปที่ 3.1 มวลรวมที่ใช้ในการศึกษา

3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต

3.2.1 คอนกรีตพูนที่มีซีเมนต์เฟสท์เป็นวัสดุประสาน

สัดส่วนผสมคอนกรีตพูนที่มีซีเมนต์เฟสท์เป็นวัสดุประสาน ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 316.0 kg/m³ น้ำ 75.8 kg/m³ สารลดน้ำพิเศษ 2.37 kg/m³ และมวลรวมหยาบ 1436.4 kg/m³ ทุกส่วนผสมมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.24 และปริมาณปูนซีเมนต์ต่อน้ำหนักมวลรวมหยาบเท่ากับ 0.22 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.75 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และมวลรวมหยาบที่ใช้คือหินปูน (LS) โดยทำการแทนที่ปริมาณหินปูนด้วยมวลรวมจากเศษคอนกรีต (RC) และมวลรวมจากเศษคอนกรีตบล็อก (RB) ในปริมาณ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตพูนแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตพูนที่มีซีเมนต์เฟสท์เป็นวัสดุประสาน

Mixes	Replacement (%)	Proportions (kg/m ³)					
		Cement	Water	Super P.	LS	RC	RB
LS100	0	316.0	75.8	2.37	1436.4	0.0	0.0
RC20	20	316.0	75.8	2.37	1149.1	287.3	0.0
RC40	40	316.0	75.8	2.37	861.8	574.6	0.0
RC60	60	316.0	75.8	2.37	574.6	861.8	0.0
RC80	80	316.0	75.8	2.37	287.3	1149.1	0.0
RC100	100	316.0	75.8	2.37	0.0	1436.4	0.0
RB20	20	316.0	75.8	2.37	1149.1	0.0	287.3
RB40	40	316.0	75.8	2.37	861.8	0.0	574.6
RB60	60	316.0	75.8	2.37	574.6	0.0	861.8
RB80	80	316.0	75.8	2.37	287.3	0.0	1149.1
RB100	100	316.0	75.8	2.37	0.0	0.0	1436.4

LS คือ มวลรวมธรรมชาติ หรือหินปูน

RC คือ เศษคอนกรีต หรือคอนกรีตรีไซเคิล

RB คือ เศษคอนกรีตบล็อก หรือคอนกรีตบล็อกรีไซเคิล

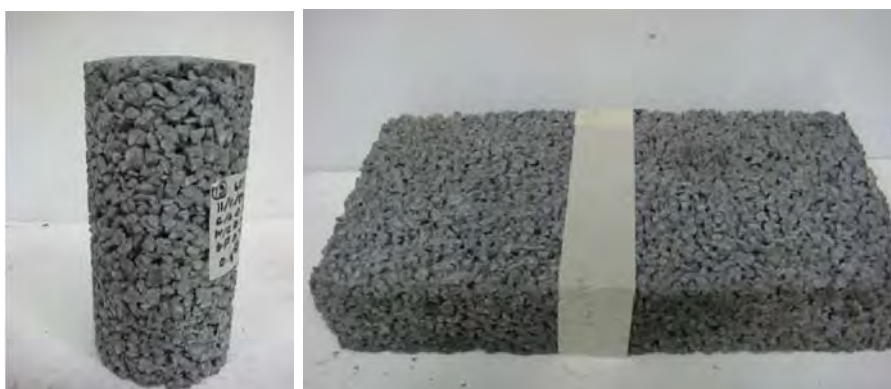
RB80 หมายถึง คอนกรีตพูนที่ใช้เศษคอนกรีตบล็อกแทนที่หินปูนร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก

สำหรับขั้นตอนการผสมและอัดแน่นตัวอย่างทำโดยผสมซีเมนต์เฟสท์จนเนื้อซีเมนต์เฟสท์เข้ากันได้ดีใช้เวลา 5 นาที ใส่มวลรวมหยาบที่เตรียมไว้ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งลงในส่วนผสมผสมต่อไปเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำส่วนผสมที่ได้เทลงในแบบหล่อ โดยแบ่งเป็น 2 ชั้น แต่ละชั้นทำการกระทุ้งชั้นละ 10 ครั้ง จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 10 วินาที โดยกดทับผิวหน้าตัวอย่างด้วยน้ำหนักขนาด 1.5 กก. เพื่อให้คอนกรีตอัดแน่นและทิ้งให้คอนกรีตแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถอดแบบ

และบ่มขึ้นจนครบอายุการทดสอบ ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. และสูง 20 ซม. สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก การซึมผ่านน้ำ อัตราส่วนโพรง และความหนาแน่น และตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 40 ซม. และสูง 7 ซม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด ตัวอย่างของคอนกรีตพูนที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.2



ก. คอนกรีตพูนที่มวลรวมจากหินปูนย่อย



ข. คอนกรีตพูนจากเศษคอนกรีต



ค. คอนกรีตพูนจากเศษคอนกรีตบดละเอียด

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์เฟสค์เป็นวัสดุประสาน

3.2.2 คอนกรีตพูนที่มีจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน

ส่วนผสมคอนกรีตพูนที่มีจีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน มวลรวมหยาบที่ใช้คือ หินปูน (LS) มวลรวมจากเศษคอนกรีต (RC) มวลรวมจากเศษคอนกรีตบล็อก (RB) และมวลรวมจากเศษอิฐมวล (RCB) ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุ แทนที่มวลรวมธรรมชาติหรือหินปูนย่อยร้อยละ 100 ของมวลรวมหยาบที่ใช้ในส่วนผสม ทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) เป็น 10, 15 และ 20 โมลาร์ มีอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.45 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 มีปริมาณจีโอโพลิเมอร์เพสต์อยู่ในช่วงร้อยละ 13-15 โดยปริมาตรส่วนผสม ซึ่งสัดส่วนผสมของคอนกรีตพูนที่มีจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสานแสดงดังตารางที่ 3.2 ทำการผสมโดยผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยการนำเถ้าลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำการผสมกันในเครื่องผสมเพสต์โดยใช้ความเร็วรอบต่ำเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นใช้ความเร็วรอบสูงผสมต่อจนครบเวลา 5 นาที นำมวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาพอัมตัวผิวแห้งและจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ได้เตรียมไว้มาผสมในเครื่องผสมคอนกรีตพูนเป็นเวลา 4 นาที เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต แล้วผสมต่อเป็นเวลา 1 นาที บรรจุส่วนผสมใส่แบบหล่อโดยแบ่งออกเป็น 2 ชั้น แต่ละชั้นทำการกระทุ้งบนโต๊ะเขย่า 25 ครั้งในเวลา 30 วินาที ปาดแต่งผิวหน้าให้ได้ระดับตามปริมาตรของแบบหล่อ ทำการหุ้มปากแบบหล่อด้วยพลาสติกใสเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของคอนกรีตพูน แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำแบบหล่อที่มีตัวอย่างเข้าตู้อบปรนึ่งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แกะแบบหล่อ แล้วนำตัวอย่างเข้าตู้เก็บความชื้นอุณหภูมิ 22-25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50-55 จนตัวอย่างมีอายุครบตามการทดสอบ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนแสดงดังรูปที่ 3.3

3.3 การทดสอบคอนกรีต

3.3.1 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ สามารถทำได้โดยวิธีแทนที่น้ำมันก๊าดด้วยเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ ในขวดแก้วเลอชาเตอลิเอร์ (Le Chaterlier) ซึ่งเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM C188-09, 2009)

2) การขนาดคละและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบด้วยตะแกรงวิเคราะห์

การทดสอบหาค่าขนาดคละและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ สามารถทำได้โดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ซึ่งเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM C136, 2006)

3) ความต้านทานการสึกกร่อนของวัสดุผสมหยาบ

การทดสอบค่าการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ ทดสอบโดยเครื่องทดสอบการขัด (Los Angeles) ตามมาตรฐาน (ASTM C131-96, 2001)

4) การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ

การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ ทดสอบด้วยอุปกรณ์หาค่าหน่วยน้ำหนักมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน (ASTM C29/C29M-97a)

5) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ

การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบตามมาตรฐาน (ASTM C127-07, 2007)

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตพูนที่มีจีโอโพลิเมอร์เฟสค์เป็นวัสดุประสาน

Mixes	Coarse aggregates (kg/m ³)				Fly ash (kg/m ³)	NH (kg/m ³)			NS (kg/m ³)
	LS	RC	RB	RCB		10M	15M	20M	
GLS10	1527	-	-	-	191	57	-	-	29
GLS15	1527	-	-	-	191	-	57	-	29
GLS20	1527	-	-	-	191	-	-	57	29
GRC10	-	1457	-	-	182	54	-	-	27
GRC15	-	1457	-	-	182	-	54	-	27
GRC20	-	1457	-	-	182	-	-	54	27
GRB10	-	-	1397	-	175	52	-	-	26
GRB15	-	-	1397	-	175	-	52	-	26
GRB20	-	-	1397	-	175	-	-	52	26
GRCB10	-	-	-	1196	199	60	-	-	30
GRCB15	-	-	-	1196	199	-	60	-	30
GRCB20	-	-	-	1196	199	-	-	60	30

LS คือ มวลรวมธรรมชาติ หรือหินปูน

RC คือ เศษคอนกรีต หรือคอนกรีตรีไซเคิล

RB คือ เศษคอนกรีตบล็อก หรือคอนกรีตบล็อกรีไซเคิล

RCB คือ เศษอิฐมอญ หรืออิฐมอญรีไซเคิล

GRB20 หมายถึง คอนกรีตพูนที่มีจีโอโพลิเมอร์เฟสค์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ใช้ RB เป็นมวลรวมหยาบและใช้ NH ที่ความเข้มข้น 20 M



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างคอนกรีตพูนที่ใช้โพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุประสาน

3.3.2 การทดสอบคอนกรีตพูน

1) การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ทำการเคลือบหัวและท้ายตัวอย่างด้วยกาวมะกอก ทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM C39-10, 2010) แสดงดังรูปที่ 3.2 (ก) ใช้ตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสมเพื่อหาค่าเฉลี่ย

2) การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength)

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตพูน ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM C496-96, 2001) แสดงดังรูปที่ 3.4 (ข) ใช้ตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสมเพื่อหาค่าเฉลี่ย



ก. การทดสอบกำลังอัด



ข. การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก

รูปที่ 3.4 แสดงการทดสอบกำลังของคอนกรีตพูน

3) การทดสอบหาค่าอัตราส่วนโพรง (Porosity)

การทดสอบหาค่าอัตราส่วนโพรงของคอนกรีตพูน ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ทดสอบตามคำแนะนำของ มาตรฐาน ชาร์ริตัน และคณะ (2551) ซึ่งทำการทดสอบโดยนำตัวอย่างมาวัดขนาดเพื่อหาปริมาตรรวม (V_1) จากนั้นนำตัวอย่างแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวอย่างอิ่มตัวไปด้วยน้ำก่อนนำมาชั่งน้ำหนักในน้ำ (W_1) นำตัวอย่างตากให้แห้งในอากาศให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) มาชั่งน้ำหนักในอากาศ (W_2) ทำการคำนวณอัตราส่วนโพรงตามสมการที่ 3.1

$$\text{อัตราส่วนโพรง(\%)} = V = \left(1 - \frac{(W_2 - W_1)}{V_1}\right) \times 100 \quad (3.1)$$

4) การทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Water Permeability)

การทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูน จะใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยอาศัยหลักการวัดค่าการซึมผ่านน้ำของดินที่มีเม็ดขนาดใหญ่ คือ การทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำแบบแรงดันคงที่ (Constant Head Test) ทดสอบโดยนำตัวอย่างทรงกระบอกมาใส่ในแบบที่สามารถป้องกันการไหลซึมด้านข้างได้ จากนั้นนำตัวอย่างติดตั้งเข้ากับชุดทดสอบดังรูปที่ 3.5 ปล่อยน้ำเข้าสู่ชุดทดสอบโดยน้ำจะไหลเข้ากระบอกด้านบนเหนือตัวอย่างและไหลผ่านตัวอย่างไปสู่กระบอกอีกด้าน ไหลลงอ่างที่อยู่ในตัวอย่างออก ปรับปริมาณน้ำไหลเข้าให้ระดับน้ำที่ทางออกทั้งสองคงที่แล้ววัดปริมาณน้ำเทียบกับเวลาด้วยการชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณหาปริมาตรน้ำ ค่าการซึมผ่านน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

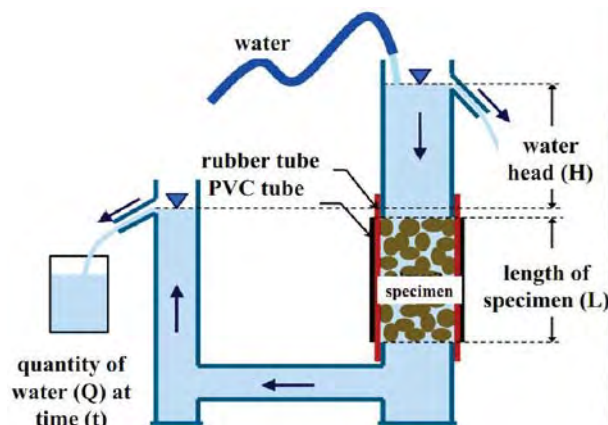
$$k = \frac{QL}{H A t} \quad (3.2)$$

- Q คือ ปริมาตรน้ำ (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ที่วัดในเวลา t (วินาที)
- k คือ ค่าการซึมผ่านน้ำ (เซนติเมตร/วินาที)
- A คือ ขนาดหน้าตัดตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)
- L คือ ความสูงของตัวอย่าง (เซนติเมตร)
- H คือ ระยะระหว่างระดับน้ำที่ทางออกทั้งสองทาง (เซนติเมตร)

5) การทดสอบการสึกกร่อนของผิวหน้า (Surface abrasion)

ทำการทดสอบหาค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนของผิวหน้าโดยวิธี Rotating-cutter ตามมาตรฐาน (ASTM C 944, 2001) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ใช้ตัวอย่างขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และหนา 3 เซนติเมตรโดยนำตัวอย่างออกจากห้องบ่มและทิ้งให้แห้งเป็นเวลา 1 วัน (สภาพแห้งในอากาศ) นำตัวอย่างที่จะทดสอบเป่าด้วยลม เพื่อกำจัดเศษฝุ่นต่างๆออก แล้วชั่งน้ำหนัก

ตัวอย่างก่อนทดสอบ นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ แล้วทำการทดสอบขัดผิวหน้าเป็นเวลา 2 นาที ใช้ น้ำหนักในการขัด 98 นิวตัน จากนั้นนำตัวอย่างเป่าทำความสะอาดอีกครั้ง แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่าง หลังทดสอบ ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนของผิวหน้า คือ ค่าผลต่างของน้ำหนักก่อนและ หลังทดสอบ



รูปที่ 3.5 แสดงชุดทดสอบค่าความซึมน้ำของคอนกรีตพรุน



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องมือและการทดสอบการสึกกร่อนของผิวหน้า

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุ

4.1.1 ผลการทดสอบมวลหยาบ

ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่ามวลรวมหยาบที่ใช้มีค่าโมดูลัสความละเอียดที่ใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 5.83-6.21 เนื่องจากมวลรวมหยาบทั้ง 4 ชนิดผ่านการคัดให้มีขนาดเดียวกันอยู่ในช่วง 4.5-9.5 มิลลิเมตร ค่าหน่วยน้ำหนักและค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมจากเศษวัสดุมีค่าน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติ เนื่องจาก RC และ RB เป็นมวลรวมที่มีมอร์ตาร์จากคอนกรีตเก่าเป็นส่วนประกอบและมีรูพรุนในตัวเองสูง ส่วน RCB เป็นมวลรวมที่ได้จากการเผาของดินเหนียวเป็นหลัก ส่งผลให้มวลรวมจากเศษวัสดุมีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากกว่ามวลรวมธรรมชาติ โดยเฉพาะ RCB มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุดร้อยละ 16.2 แสดงลักษณะของมวลรวมแต่ละชนิด ค่าการสึกกร่อนของ LS, RC, RB และ RCB มีค่าร้อยละ 23.8, 30.1, 46.4 และ 46.9 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 50 ตามที่มาตรฐาน (ASTM C131-96, 2001) กำหนดไว้สำหรับสมบัติของมวลรวมหยาบที่จะใช้ในงานคอนกรีต

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบ

สมบัติพื้นฐาน	LS	RC	RB	RCB
โมดูลัสความละเอียด	6.04	5.97	5.83	6.21
หน่วยน้ำหนักแห้งกระทุ้งแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	1550	1340	1240	950
ความถ่วงจำเพาะ (อิมพัลฟ์เวนท์)	2.72	2.53	2.49	2.02
การดูดซึมน้ำ (%)	0.21	4.58	4.77	16.2
การสึกกร่อน (Los angeles) (%)	23.8	30.1	46.4	46.9

4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตพูน เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1 ที่มีความค่าละเอียดตามวิธีของเบลนและค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3120 ตารางเซนติเมตร/กรัม และ 3.15 ตามลำดับ เถ้าลอยจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 50 ไมโครเมตร, ค่าความละเอียดตามวิธีของเบลนเท่ากับ 2250 ตารางเซนติเมตร/กรัม

และค้ำตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 ไมโครเมตร) ประมาณร้อยละ 45 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและเปรียบเทียบกับมาตรฐาน (ASTM C618-00, 2000) พบว่าเถ้าลอยที่ใช้เป็นเถ้าลอยชนิด C เนื่องจากมีผลรวมของซิลิกา (Silica, SiO_2), อลูมินา (Alumina, Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide, Fe_2O_3) ร้อยละ 71.7 และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงถึงร้อยละ 19.4

4.2 ผลการทดสอบคอนกรีตพูน

4.2.1 ผลการทดสอบคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสาน

1. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน กำลังดึงแบบผ่าซีกและกำลังดัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ของคอนกรีตพูนควบคุม (LS100) และคอนกรีตพูนที่ใช้ RC และ RB แทนที่ LS ในปริมาณ 20, 40, 60, 80, และ 100% พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มเหมือนคอนกรีตทั่วไป ค่ากำลังอัดของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ระหว่าง 122-172 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดที่มากพอสำหรับนำคอนกรีตพูนที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานวัสดุก่อสร้างอื่นๆได้ เช่น ประยุกต์ใช้ในก่ออิฐและคอนกรีตบล็อก เป็นต้น

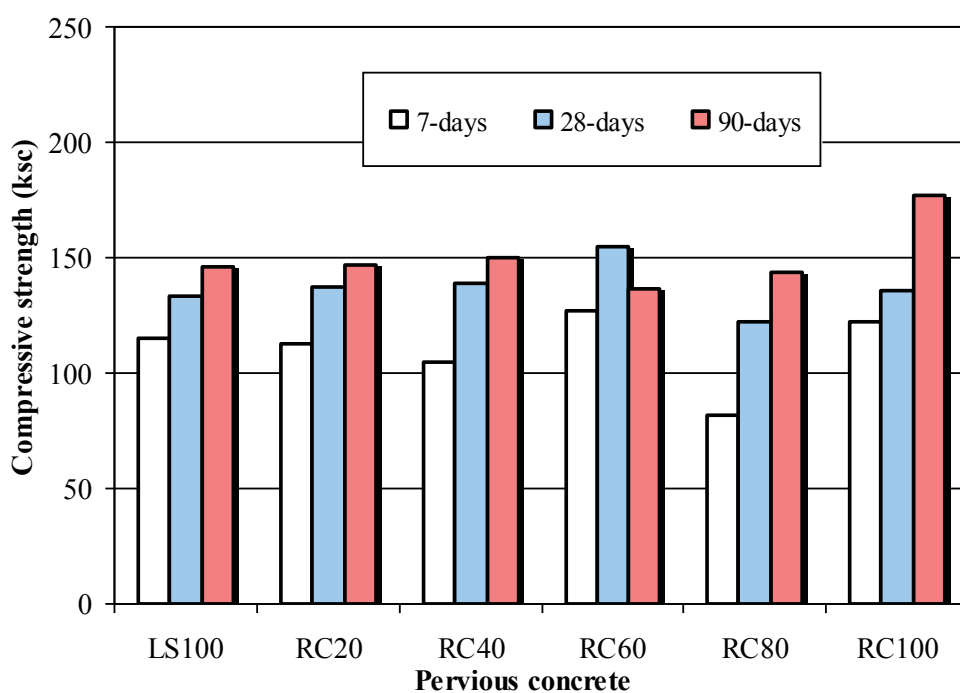
ถึงแม้ว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการทดสอบการสึกกร่อนด้วยเครื่อง Los Angeles ของ RC และ RB มีค่ามากกว่าของ LS แต่กำลังอัดของคอนกรีตพูนที่ใช้ RC และ RB มีนัยสำคัญสูงกว่าคอนกรีตควบคุม โดยกำลังอัดที่การบ่ม 28 วัน ของคอนกรีต RC (ยกเว้น RC80 คอนกรีต) มีค่าเท่ากับ 136-155 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม (134 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) และกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ในคอนกรีต RB มีค่าอยู่ระหว่าง 131-172 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ทั้งนี้การเพิ่มเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวม RC และ RB เนื่องจากการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวที่ขรุขระและมีรูพรุนสูงของมวลรวมจากเศษวัสดุและซีเมนต์เพสต์เมื่อเทียบกับการใช้มวลรวมปกติ (Moriconi et al, 2003; Xiao et al, 2011.) นอกจากนั้นเป็นที่รู้กันดีว่าผิวซีเมนต์เพสต์รอบมวลรวมในคอนกรีตพูนค่อนข้างที่จะบาง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมอ่อนแอกว่าความแข็งแรงของมวลรวมคอนกรีตพูนจึงวิบัติที่ชั้นรอยต่อระหว่างเพสต์และมวลรวม (Yang and Jiang, 2003) และนักวิจัยหลายคน (Otsuki et al, 2003; Qzturan and Cecen, 1997; Zhenshuang et al, 2011) พบว่าสมบัติของมวลรวมหยาบไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงในคอนกรีตกำลังปกติหรือคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง นอกจากนั้น Yang and Jiang (2003) และ Chindaprasirt et al. (2008) ยังพบว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็กสามารถปรับปรุงความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ดังนั้นการใช้มวลรวมจากเศษวัสดุแทนที่มวลรวมปกติในคอนกรีตพูนจึงได้ค่ากำลังอัดที่ไม่ต่างกัน และมีแนวโน้มให้กำลังมากกว่าเล็กน้อยจากแรงยึดเหนี่ยวที่ดีกว่า

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงการพัฒนากำลังดัดของคอนกรีตพูนที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน เมื่อแทนที่มวลรวม LS ด้วย RC และ RB ในปริมาณต่างๆกัน พบว่าคอนกรีตพูนที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น

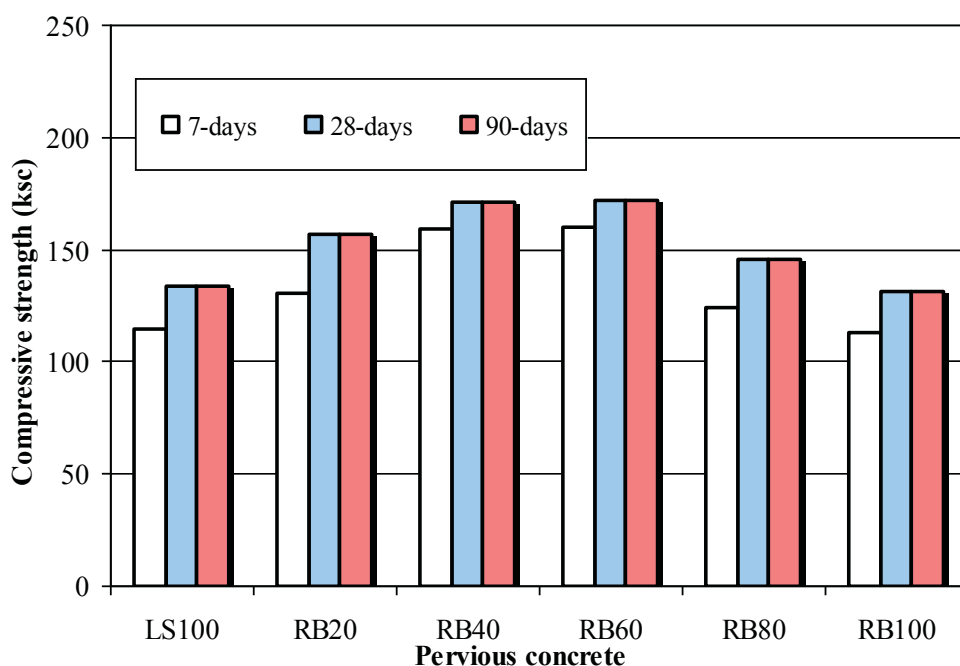
อายุการทดสอบการใช้ RC แทนที่ LS บางส่วนให้ค่ากำลังอัดไม่ต่างกันมาก ส่วนการใช้ RB ให้ค่าสูงกว่า โดยการแทนที่ที่ 40-60% ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันสูงถึง 171-172 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีตพอร์นที่ใช้ซีเมนต์เฟสท์เป็นวัสดุประสาน

Mixes	กำลังอัด (kg/cm ² ,ksc)			กำลังดึงแบบผ่าซีก (kg/cm ² ,ksc)	กำลังดัด (kg/cm ² ,ksc)
	7 วัน	28 วัน	90 วัน	28 วัน	28 วัน
LS100	115	134	145	16.7	41.2
RC20	113	138	146	19.6	43.2
RC40	104	139	150	19.6	42.2
RC60	127	155	137	21.6	38.3
RC80	122	122	144	12.8	28.4
RC100	115	136	177	16.7	28.4
RB20	130	157	137	24.5	40.2
RB40	159	171	137	22.6	38.3
RB60	160	172	184	19.6	37.3
RB80	125	146	198	18.6	47.1
RB100	113	132	184	18.6	40.2



รูปที่ 4.1 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตพอร์นที่แทนที่ LS ด้วย RC

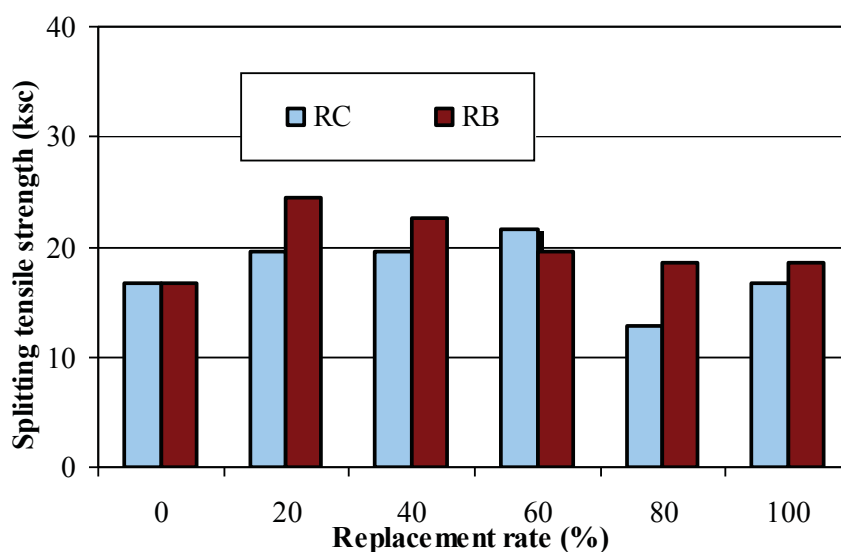


รูปที่ 4.2 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตพรุนที่แทนที่ LS ด้วย RB

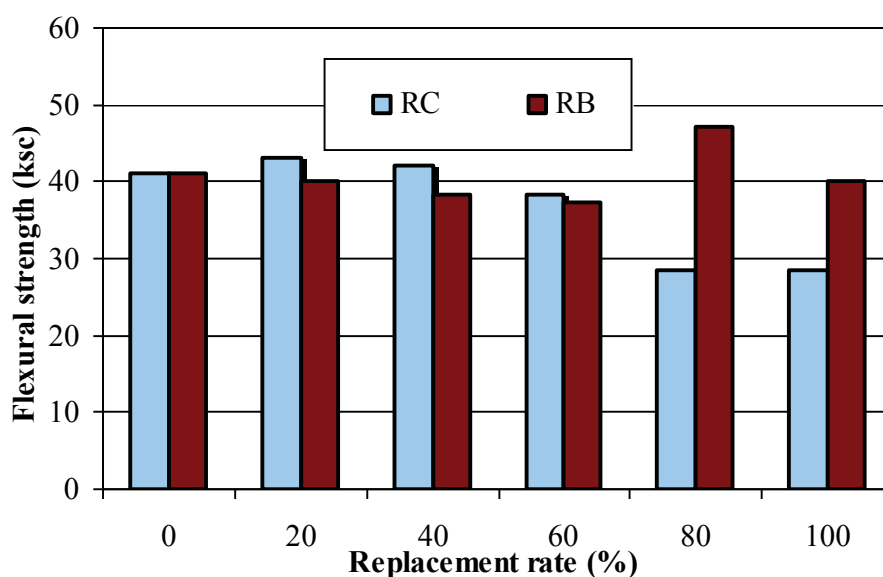
2. ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและกำลังดัด

ผลการทดสอบของกำลังดึงแบบผ่าซีกและกำลังดัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตพรุนรวมในตารางที่ 4.1 ส่วนรูปที่ 4.3-4.4 เป็นการเปรียบเทียบกำลังดึงแบบผ่าซีกและกำลังดัดที่ปริมาณการแทนที่ต่างกัน พบว่า การแทนที่ด้วย RC และ RB ในคอนกรีตพรุนมีแนวโน้มต่างกันเล็กน้อย ที่ปริมาณการแทนที่ 20-40% กำลังมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตัวอย่างเช่นกำลังดึงแบบผ่าซีกและกำลังดัดของคอนกรีต RC20 เป็น 19.6 และ 43.2 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เทียบกับ 16.7 และ 41.2 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ในคอนกรีต LS100 ในขณะที่คอนกรีต RB20 มีค่าเป็น 24.5 และ 40.2 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการทดแทนมวลรวมในปริมาณที่น้อยและการที่ผิวที่มีรูพรุนและขรุขระทำให้การยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เฟสและมวลรวมดีขึ้น แต่เมื่อการแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นกำลังมีแนวโน้มลดลง เช่น กำลังดึงแบบผ่าซีกและกำลังดัดของคอนกรีต RC100 ลดลงเป็น 16.7 และ 28.4 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และในคอนกรีต RB100 มีค่าเป็น 18.6 และ 40.2 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

นอกจากนั้นยังพบว่าอัตราส่วนของกำลังดึงแบบผ่าซีกต่อกำลังอัดของคอนกรีตพรุนที่ศึกษามีค่าอยู่ระหว่าง 10.5-15.6% โดยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.1% อัตราส่วนที่ได้ค่าสูงกว่า 10% ในคอนกรีตกำลังปกติ แต่ก็อยู่ในช่วง 9-14% ของคอนกรีตพรุนที่ได้จากมวลรวมทั่วไป (Ghafoori and Dutta, 1995; Kevern et al, 2010)



รูปที่ 4.3 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตพูนที่แทนที่ LS ด้วย RC และ RB



รูปที่ 4.4 กำลังดัดของคอนกรีตพูนที่แทนที่ LS ด้วย RC และ RB

3. ผลการทดสอบความหนาแน่น อัตราส่วนโพรงและการซึมผ่านของน้ำ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่น อัตราส่วนโพรงและการซึมผ่านของน้ำที่อายุการบ่ม 28 วัน คอนกรีตควบคุม (LS100) มีค่าหน่วยน้ำหนัก, อัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ $1,920 \text{ kg/m}^3$, 25% และ 1.01 เซนติเมตร/วินาที ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมเศษคอนกรีต (RC) ทดแทนหินปูนพบว่าความหนาแน่นคอนกรีตพูนมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราส่วนโพรงอยู่ระหว่าง 23-25% และการซึมผ่านของน้ำอยู่ระหว่าง 0.89-1.01 เซนติเมตร/วินาที ซึ่งไม่มีต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคหินปูนและเศษคอนกรีตมี

ลักษณะคล้ายกัน สำหรับการใช้มวลรวมจาเศษคอนกรีตบด (RB) จะให้ค่าความหนาแน่นมากกว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวม RC ทั้งนี้เพราะขนาดของ RB เล็กกว่าขนาดของ LS และ RC (โมดูลัสความละเอียดของ RB, LS และ RC คือ 5.83, 5.95 และ 5.97 ตามลำดับ) นอกจากนั้นขนาดของอนุภาค RB จะเล็กลงเมื่อทำการผสมคอนกรีตพูน เพราะ RB มีค่า Los Angeles abrasion มาก อนุภาคที่เล็กของ RB ทำให้เนื้อคอนกรีตพูนที่ได้แน่นกว่าปกติ ความหนาแน่นของคอนกรีตจึงมากขึ้น ในขณะที่ค่าอัตราส่วนโพรงลดลงเป็น 13-23% และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลงเป็น 0.22-0.80 เซนติเมตร/วินาที

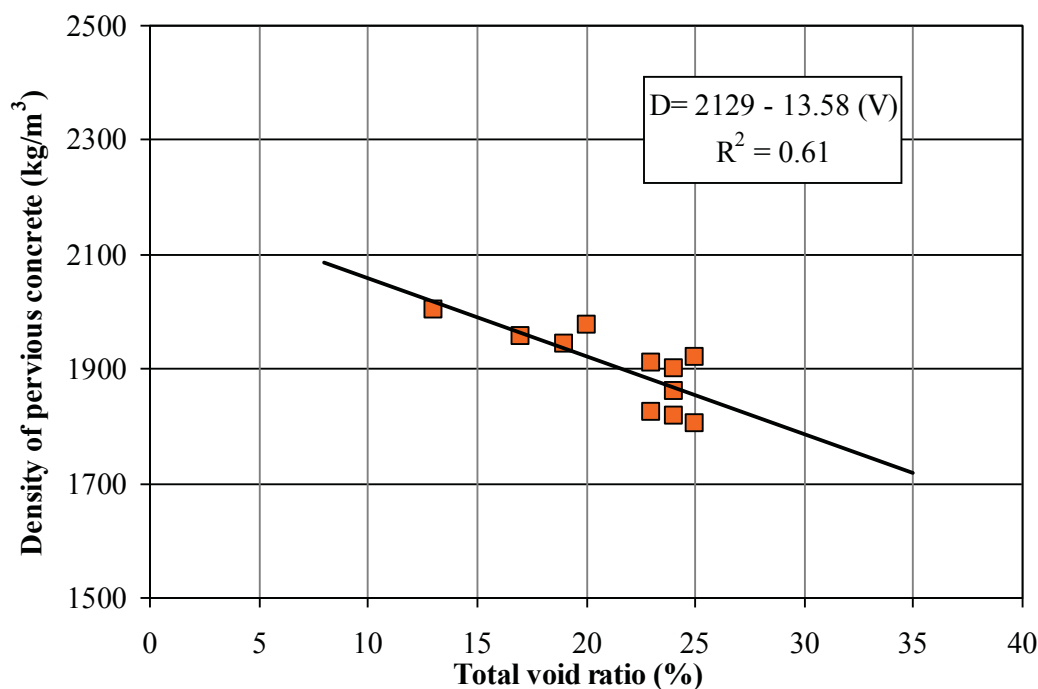
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่น อัตราส่วนโพรงและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์โพสท์เป็นวัสดุประสาน

Mixes	ความหนาแน่น (kg/m ³)	อัตราส่วนโพรง (%)	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (เซนติเมตร/วินาที)
LS100	1,920	25	1.01
RC20	1,900	24	0.95
RC40	1,860	24	0.98
RC60	1,820	24	0.89
RC80	1,800	25	0.91
RC100	1,830	23	1.01
RB20	1,910	23	0.79
RB40	1,980	20	0.80
RB60	1,940	19	0.56
RB80	1,960	17	0.36
RB100	2,000	13	0.22

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและอัตราส่วนโพรงของคอนกรีตพูนที่ศึกษาได้ดังรูปที่ 4.5 และสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4.1) ซึ่งพบว่าค่าความหนาแน่นของคอนกรีตพูนจะลดลงเมื่ออัตราส่วนโพรงเพิ่มขึ้น (Chindaprasirt et al., 2008)

$$D = 2194 - 13.58(V) \quad (4.1)$$

เมื่อ D คือความหนาแน่นของคอนกรีตพูน (kg/m³)
 V คืออัตราส่วนโพรง (%)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและความหนาแน่นของคอนกรีตพรุน

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนโพรงมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (4.2) และรูปที่ 4.6 นอกจากนั้นผลการทดสอบนี้พบว่าคอนกรีตพรุนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยที่สุด (RB100) มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่มีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุด (RC80) ไม่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมากที่สุด ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตพรุนไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับสมบัติอื่นๆด้วย เช่น โพรงที่ต่อเนื่องกัน การกระจายตัวของโพรงในเนื้อคอนกรีต และลักษณะของโพรง เป็นต้น (Neithalath et al., 2010, Tho-in et al., 2012)

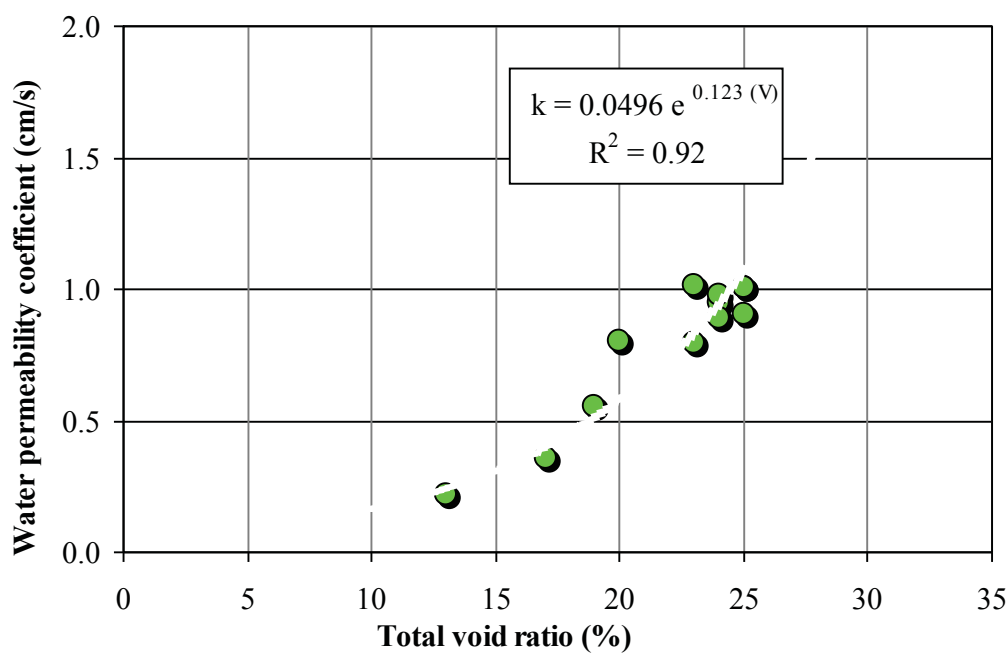
$$k = 0.0496 e^{0.123(V)} \quad (4.2)$$

เมื่อ k คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (เซนติเมตร/วินาที)
 V คืออัตราส่วนโพรง (%)

4. ผลการทดสอบความต้านทานต่อการสึกกร่อนของคอนกรีตพรุน

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการสึกกร่อนของคอนกรีตพรุนพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของการสูญเสียน้ำหนักในเวลารทดสอบ 2 นาที ของ 2 ตัวอย่าง แสดงผลดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 ซึ่งค่าคอนกรีตควบคุม (LS100) มีค่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่ที่ 8.20 g สำหรับการใช้เศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยพบว่าการแทนที่ในอัตรา 40% (RC40) ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดคือ 5.33 g ขณะที่การใช้เศษคอนกรีตบดลือคพบว่าการแทนที่ในอัตรา 20% (RB20) ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนัก

น้อยที่สุดคือ 7.37 การที่คอนกรีตพูนมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนมากขึ้นเมื่อใช้เศษคอนกรีตและเศษคอนกรีตบดในปริมาณแทนที่ไม่มากนักเพราะเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เฟสและมวลรวม แต่เมื่อแทนที่ที่ปริมาณเกิน 60% พบว่าค่าความต้านทานต่อการสึกกร่อนลดลงทำให้ค่าสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น โดยค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต RB60, RB80 และ RB100 มีค่าสูงถึง 11.93, 12.50 และ 14.40 g ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะอนุภาคของมวลรวม RB มีความแข็งแรงน้อยกว่า LS โดย RB มีค่าสูญเสียน้ำหนักในการทดสอบความต้านทานแบบ Los Angeles abrasion มากกว่า

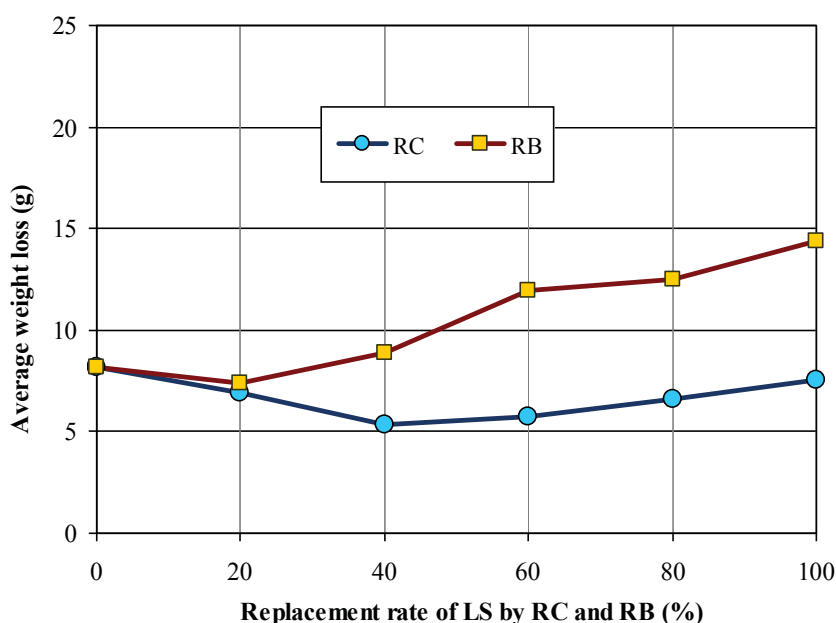


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและอัตราส่วนโพรงของคอนกรีตพูน

สำหรับคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวม RC เป็นส่วนผสม พบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มค่าสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากขึ้นซึ่งก็คือความต้านทานต่อการสึกกร่อนน้อยลงแต่ก็ยังคงมีความทนทานต่อการสึกกร่อนมากกว่าคอนกรีตควบคุม (LS100) โดยคอนกรีต RC60, RC80 และ RC100 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ 5.7, 6.6 และ 7.6 g ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะว่าผิวอนุภาคของมวลรวม RC มีความขรุขระและหยาบทำให้การยึดเกาะกับซีเมนต์เฟสได้จึงได้คอนกรีตพูนที่มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่ผิวหน้าของคอนกรีตพูน

Mixes	น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการสึกกร่อน (g)
LS100	8.20
RC20	6.90
RC40	5.33
RC60	5.70
RC80	6.63
RC100	7.57
RB20	7.37
RB40	8.90
RB60	11.93
RB80	12.50
RB100	14.40



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ปริมาณการแทนที่ของ RC และ RB และน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการสึกกร่อนของคอนกรีตพูน

จากผลการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและเศษคอนกรีตบล็อกให้ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วันมากกว่า 120 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถนำคอนกรีตที่ได้ไปประยุกต์ใช้สำหรับงานคอนกรีตสำเร็จรูปหรือคอนกรีตบล็อกได้ และการแทนที่ในหินปูนที่ไม่มากเกินไป 60% จะได้คอนกรีตพูนที่เหมาะสมทั้งให้กำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซีกและความต้านทานต่อการสึกกร่อน

4.2.2 ผลการทดสอบคอนกรีตพูนที่ใช้จีโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุประสาน

1. กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 7 วันแสดงดังตารางที่ 4.4 จากรูปที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมต่างชนิดกันพบว่า จีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนจากมวลรวมจากเศษวัสดุมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จาก LS ซึ่งสัมพันธ์กับความแข็งแรงของมวลรวมแต่ละชนิดซึ่งจะเห็นได้จากค่าร้อยละการสึกกร่อน (Los Angeles) ของมวลรวม โดยจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จาก LS มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 119-136 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ในขณะที่จีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RC, RB และ RCB เป็นมวลรวมหยาบมีค่าเท่ากับ 70-103, 28-32 และ 29-66 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เท่ากันจะเห็นว่าจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RB และ RCB มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RC และ LS เป็นมวลรวมหยาบค่อนข้างมาก เนื่องจาก RB เป็นมวลรวมที่มีรูพรุนในตัวเอง และค่าการสึกกร่อนของมวลรวมค่อนข้างมาก จึงเกิดการแตกหักในระหว่างขั้นตอนของการผสมและการอัดแน่นได้ง่าย ทำให้มวลรวมมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง พื้นที่ผิวจึงมากขึ้น และด้วยลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระมาก ทำให้ RB มีความต้องการจีโพลิเมอร์เพสต์ในการห่อหุ้มพื้นผิวที่ขรุขระและการยึดเกาะเชื่อมประสานกันระหว่างมวลรวมในปริมาณที่มากกว่ามวลรวมชนิดอื่น แต่ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดให้ใช้จีโพลิเมอร์เพสต์ในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำและใกล้เคียงกัน จีโพลิเมอร์เพสต์ที่ยึดเหนี่ยวกันระหว่างมวลรวม RB จึงห่อหุ้มอนุภาคของมวลรวมได้น้อยกว่ามวลรวมชนิดอื่นๆ ส่วน RCB เป็นมวลรวมที่ได้จากดินเหนียวเผาเป็นองค์ประกอบหลัก น้ำหนักเบา และมีค่าการสึกกร่อนของมวลรวมค่อนข้างสูงเช่นเดียวกับ RB ส่งผลให้จีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RB และ RCB มีความแข็งแรงลดลงมากสำหรับจีโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ RC เป็นมวลรวมหยาบนั้น เนื่องจาก RC เป็นมวลรวมจากเศษวัสดุที่มีมอร์ต้าจากคอนกรีตเก่าซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่ามวลรวมจากธรรมชาติรวมอยู่ด้วย จึงทำให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงจากจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จาก LS และอาจมีสาเหตุจากปริมาณของจีโพลิเมอร์เพสต์ที่ค่อนข้างต่ำและแตกต่างกันเล็กน้อยในส่วนผสม โดยคอนกรีตพูนที่ใช้ LS, RC, RB และ RCB มีปริมาณจีโพลิเมอร์เพสต์เป็นส่วนผสมประมาณร้อยละ 15, 14, 13 และ 15 ตามลำดับ การวัดจึงอาจเกิดขึ้นที่จีโพลิเมอร์เพสต์เป็นหลัก ทำให้จีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุเป็นมวลรวมหยาบมีกำลังรับแรงอัดลดลงจากจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จาก LS อย่างเห็นได้ชัด

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุเป็นมวลรวมหยาบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของจีโพลิเมอร์เพสต์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารละลายต่างสูงที่ทำหน้าที่ในการกระตุ้นเถ้าลอยให้เกิด

การทำปฏิกิริยา ดังนั้นสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงๆจะมีความสามารถในการชะละลายซิลิกาและอลูมินาที่เป็นองค์ประกอบหลักของแก้วลอยออกมาทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ยกตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่มี RC เป็นมวลรวมหยาบ เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10, 15 และ 20 โมลาร์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 70, 100 และ 103 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีและเหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีค่าเท่ากับ 15-20 โมลาร์ อย่างไรก็ตามสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเพิ่มสูงมากๆ สามารถเกิดออลอนของไฮดรอกไซด์ส่วนเกิน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดอลูมิโนซิลิเกตเจล (Aluminosilicate gel) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วระหว่างออลอนของไฮดรอกไซด์ส่วนเกินกับซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในแก้วลอย ทำให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีกำลังที่ลดต่ำลง (Lee & Van, 2002; Somna et al., 2011) จะเห็นได้จากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ LS เป็นมวลรวมหยาบมีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 20 โมลาร์

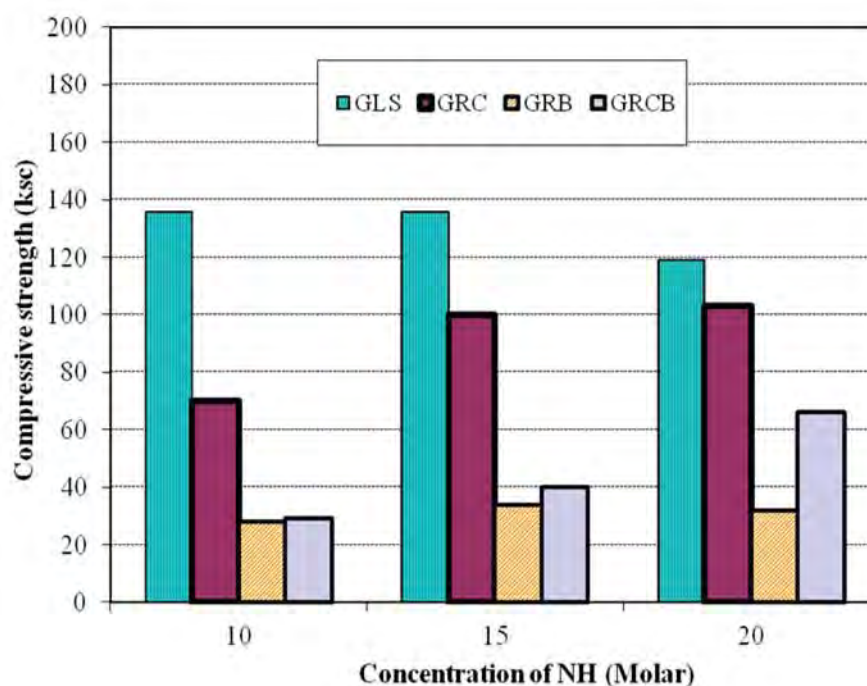
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีตพูนที่ใช้ซีเมนต์เพสต์เป็นวัสดุประสาน

Mixes	กำลังอัด (kg/cm ² , ksc)	กำลังดึงแบบผ่าซีก (kg/cm ² , ksc)
	7 วัน	7 วัน
GLS10	136	16.3
GLS15	136	17.8
GLS20	119	15.4
GRC10	70	13.2
GRC15	100	14.1
GRC20	103	14.0
GRB10	28	3.2
GRB15	34	5.1
GRB20	32	5.4
GRCB10	29	4.4
GRCB15	40	7.0
GRCB20	66	7.4

2. กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 7 วันแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกอยู่ในช่วง 3.2-17.8

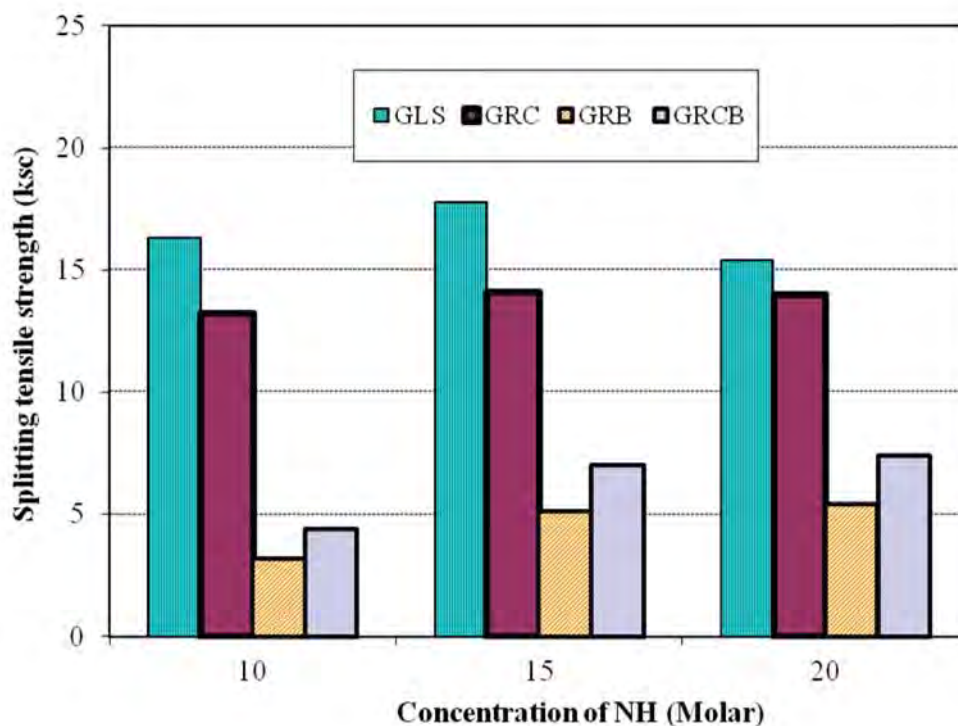
กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าการทดสอบกำลังรับแรงอัด กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมต่างชนิดกัน จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมจากเศษวัสดุจะมีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกลดลงจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จาก LS โดยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จาก RB และ RCB จะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 3.2-7.4 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรและมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ LS และ RC ส่วนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RC มีค่าลดลงจาก LS เพียงเล็กน้อย เนื่องจากมวลรวมจากเศษวัสดุเป็นมวลรวมที่ได้จากมอร์ต้าจากคอนกรีตเก่าที่มีความแข็งแรงน้อย มีความพรุนในตัวเองสูง และมีค่าการสึกกร่อนของมวลรวมที่มากกว่า LS หรือมวลรวมธรรมชาติ จึงส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมจากเศษวัสดุมีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกลดต่ำลง และอาจมีสาเหตุจากปริมาณของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่แตกต่างกันในส่วนผสมด้วย ซึ่งได้กล่าวไว้ในผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน



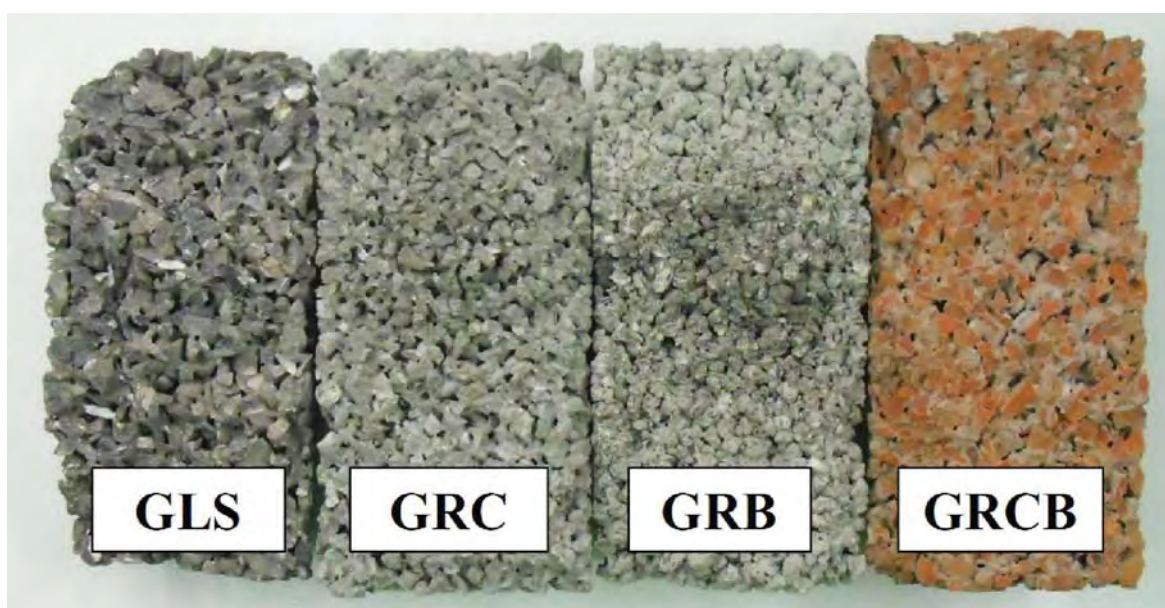
รูปที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 7 วัน

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น พบว่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุเป็นมวลรวมหยาบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ยกตัวอย่าง จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RCB เป็นมวลรวมหยาบ เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10, 15 และ 20 โมลาร์จะมีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเท่ากับ 4.4, 7.0 และ 7.4 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ แต่ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 20 โมลาร์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ LS เป็น

มวลรวมหยาบมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นไปตามทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น รูปที่ 4.10 แสดงพื้นผิวตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ผ่านการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก



รูปที่ 4.9 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่อายุ 7 วัน

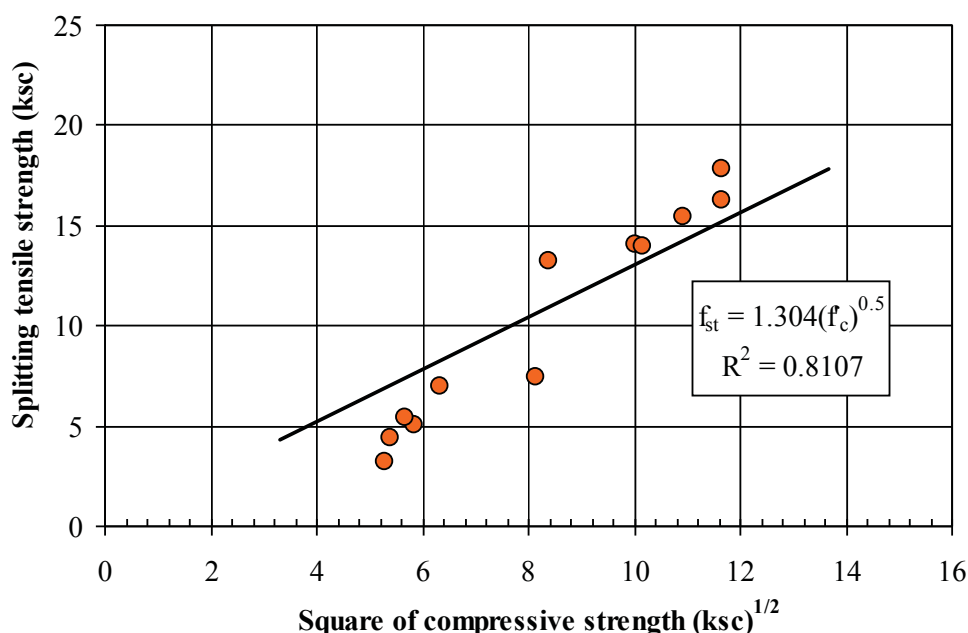


รูปที่ 4.10 ผิวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนหลังการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนแสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกจะเพิ่มขึ้นด้วย ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.3 ซึ่งมีค่า R^2 สูงถึง 0.8107

$$f_{st} = 1.3042(f'_c)^{0.50} \quad (4.3)$$

โดยที่ f_{st} คือ กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)
 f'_c คือ กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 7 วัน

3. การซึมผ่านของน้ำ อัตราส่วนโพรง และความหนาแน่น

ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ อัตราส่วนโพรงและความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนแสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีค่าการซึมผ่านน้ำอยู่ในช่วง 0.7-1.8 เซนติเมตร/วินาทีและค่าอัตราส่วนโพรงอยู่ในช่วง 21.7-29.0% เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของคอนกรีตพูนจาก ACI 522R-10 (2010) ซึ่งมีค่าการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรงเท่ากับ 0.14-1.22 เซนติเมตรต่อวินาทีและร้อยละ 15-35 ตามลำดับ พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีค่าการซึมผ่านน้ำสูงกว่าเล็กน้อย ส่วนค่าอัตราส่วนโพรงมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนเพิ่มขึ้นเป็น 10, 15 และ 20 โมลาร์ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ LS และ RB มีแนวโน้มของค่าอัตราส่วนโพรงเพิ่มขึ้น ส่วน RC จะให้ค่าอัตราส่วนโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใกล้เคียงกันร้อยละ 26.8, 26.9 และ

26.4 ตามลำดับ ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RCB จะมีค่าอัตราส่วนโพรงที่อยู่ในช่วงร้อยละ 21.7-23.7 ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมชนิดอื่นๆ

ค่าการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนสอดคล้องและสัมพันธ์กันกับค่าอัตราส่วนโพรง เมื่อค่าอัตราส่วนโพรงมากขึ้น นั้นหมายถึงปริมาณโพรงหรือช่องว่างในโครงสร้างของเนื้อคอนกรีตพูนจะมีมากขึ้น ทำให้น้ำสามารถไหลผ่านได้ดียิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RB เป็นมวลรวมหยาบ เมื่อมีค่าอัตราส่วนโพรงร้อยละ 26.9, 29.0 และ 29.0 จะมีค่าการซึมผ่านน้ำเท่ากับ 1.3, 1.8 และ 1.8 เซนติเมตร/วินาที ตามลำดับ ซึ่งจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RCB จะมีค่าการซึมผ่านน้ำต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.7-1.1 เซนติเมตร/วินาทีซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนโพรงที่ต่ำที่สุดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่มีค่า R^2 สูงถึง 0.8877 แสดงดังสมการที่ 4.4

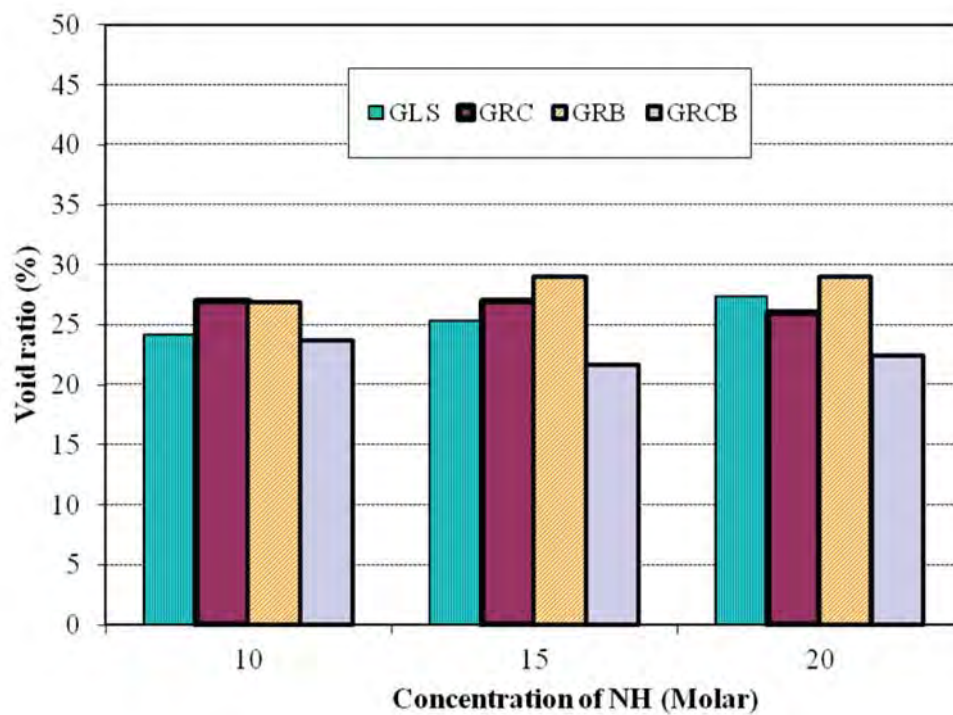
$$k = 0.0589e^{0.1203(V)} \quad (4.9)$$

โดยที่ k คือ การซึมผ่านของน้ำ (เซนติเมตรต่อวินาที)

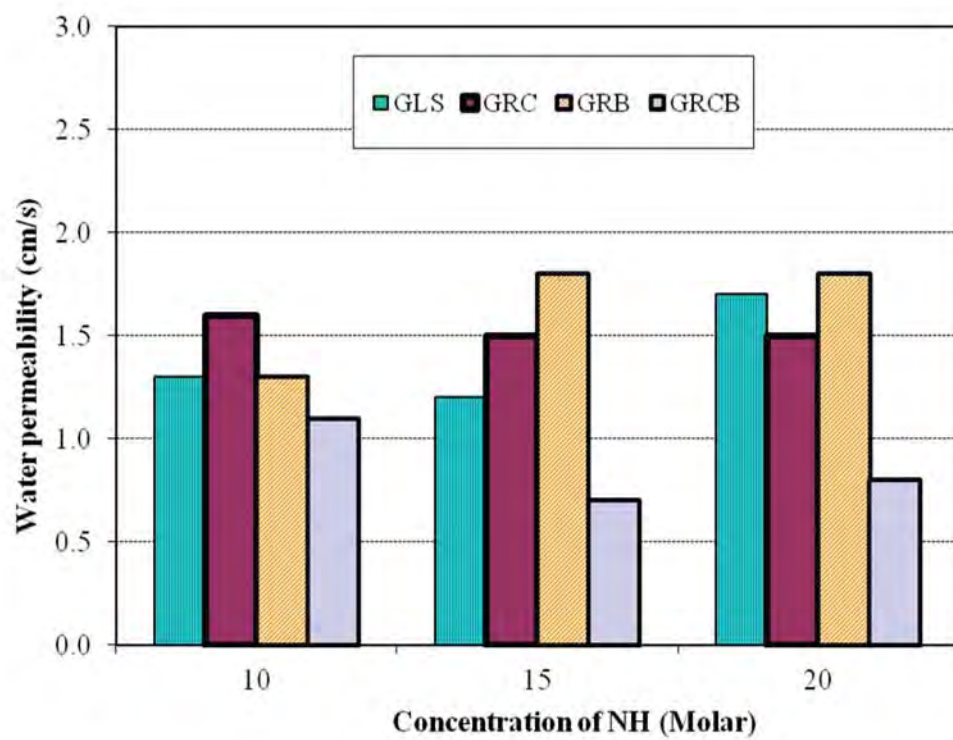
V คือ อัตราส่วนโพรง (%)

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำ อัตราส่วนโพรง และความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน

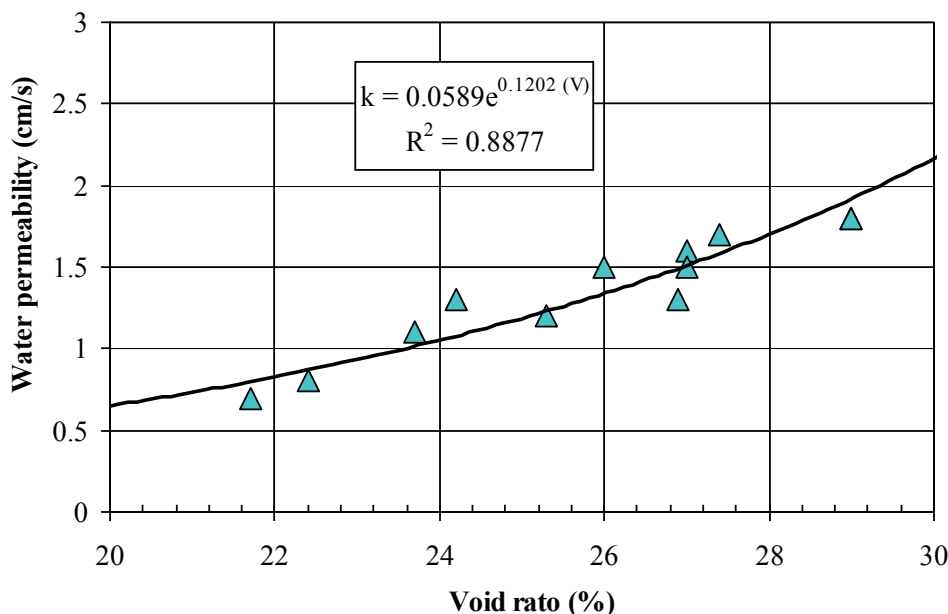
Mixes	การซึมผ่านของน้ำ (cm/s)	อัตราส่วนโพรง (%)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
GLS10	1.3	24.2	1840
GLS15	1.2	25.3	1760
GLS20	1.7	27.4	1810
GRC10	1.6	27.0	1727
GRC15	1.5	27.0	1710
GRC20	1.5	26.0	1724
GRB10	1.3	26.9	1671
GRB15	1.8	29.0	1636
GRB20	1.8	29.0	1645
GRCB10	1.1	23.7	1419
GRCB15	0.7	21.7	1516
GRCB20	0.8	22.4	1520



รูปที่ 4.12 อัตราส่วนโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน



รูปที่ 4.13 อัตราการซึมผ่านน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน



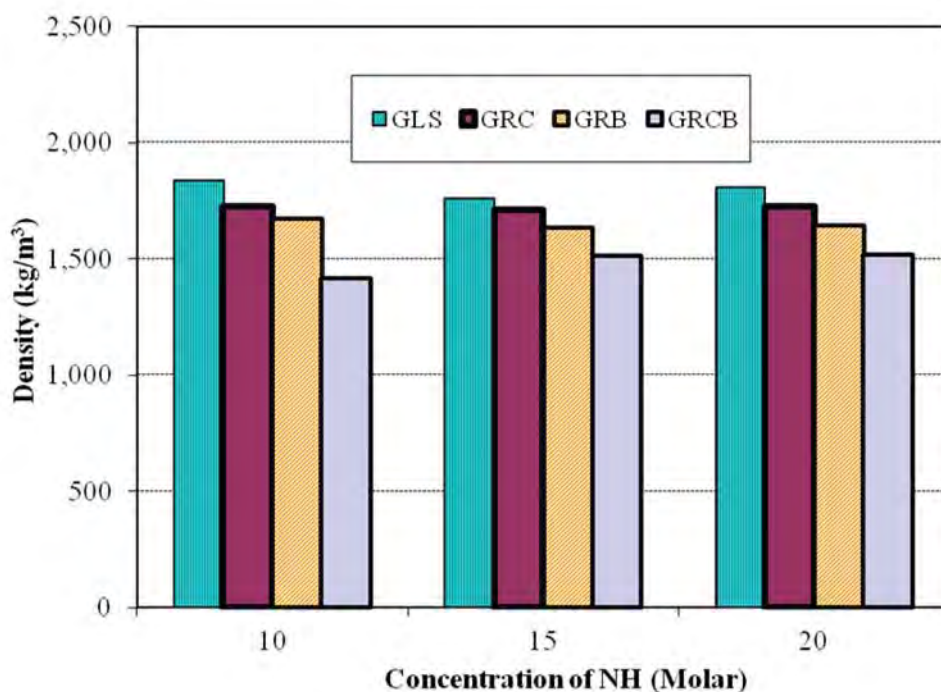
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน

ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนแสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.15 พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1420-1840 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากโพรงหรือช่องว่างที่มีอยู่ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน ส่งผลให้มีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไปร้อยละ 25-40 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนจากมวลรวมจากเศษวัสดุจะมีค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จาก LS โดย RCB จะทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1419-1520 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับมวลรวมชนิดอื่นๆ และสอดคล้องกับค่าหน่วยน้ำหนักแห้งกระทุ้งแน่นของมวลรวมหยาบ นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน ยกตัวอย่างเช่น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จาก RC เมื่อมีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10, 15 และ 20 โมลาร์ จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1727, 1710 และ 1724 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

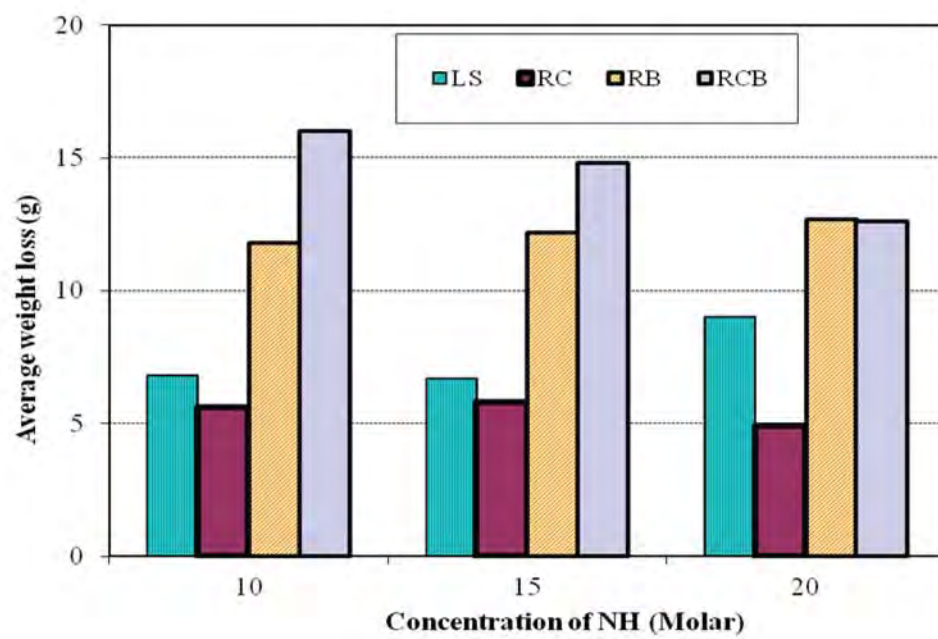
4. การสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนของผิวหน้า

ผลการทดสอบการขัดสีของคอนกรีตพูนสามารถวิเคราะห์ได้จากน้ำหนักที่สูญเสียไปจากการขัดสีที่ผิวหน้าของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนที่ผิวหน้าอยู่ในช่วง 4.9-16.0 กรัม มีค่าต่ำกว่าซีเมนต์มอร์ต้าซึ่งมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนที่ผิวหน้าประมาณ 17.2 กรัม (Shi & Chung, 1977) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RC เป็นมวลรวมหยาบจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนของผิวหน้าที่น้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ LS เนื่องจาก LS เป็นมวลรวมธรรมชาติที่มีความแข็งแรงในตัวเองสูงมากและมีความแข็งแรงมากกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เมื่อทำการทดสอบการขัดสี LS จะเกิดการหลุดร่อนเป็นชั้นเนื้อหินขนาดเล็กและเม็ดหินที่เกิดจากการแตกหัก

และหลุดร่อนของ LS แตกต่างจากการหลุดร่อนของ RC ซึ่งมีการหลุดร่อนแบบผกขนาดเล็กที่เกิดจากการขัดของหัวขัด ส่งผลให้ LS มีการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนที่ผิวหน้ามากกว่า RC ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RB และ RCB เป็นมวลรวมหยาบ จะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนของผิวหน้าที่มากกว่าเมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ LS และ RC เป็นมวลรวมหยาบ เนื่องจาก RB เป็นมวลรวมที่มีความพรุนภายในเนื้อมวลรวมสูงจึงมีความทนทานต่อการขัดสีลดลง ส่วน RCB เป็นมวลรวมที่มีดินเหนียวเผาเป็นองค์ประกอบหลัก จึงไม่ทนทานต่อการขัดสี ทำให้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนของผิวหน้าที่ค่อนข้างสูงและสูงที่สุดเมื่อเทียบกับมวลรวมชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการสึกกร่อน (Los Angeles) ของมวลรวม เมื่อพิจารณาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกัน พบว่าผลกระทบเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการขัดสีของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนยังไม่ชัดเจน เนื่องจากแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนที่ผิวหน้าของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนจากมวลรวมแต่ละชนิดมีค่าไม่สอดคล้องและไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 10, 15 และ 20 โมลาร์ การสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนที่ผิวหน้าของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RB มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.8, 12.2 และ 12.7 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้ RCB มีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.0, 14.8 และ 12.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน



รูปที่ 4.16 การสูญเสียน้ำหนักจากการสีกกร่อนที่ผิวหน้าของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 มวลรวมหยابจากเศษคอนกรีต เศษคอนกรีตบล็อก และเศษอิฐมอญมีค่าหน่วยน้ำหนักและความถ่วงจำเพาะน้อยกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ (หินปูนย่อย) ส่วนค่าร้อยละการสึกกร่อนและค่าการดูดซึมน้ำมีค่ามากกว่า และมวลรวมทุกชนิดที่นำมาศึกษาในครั้งนี้มีร้อยละการสึกกร่อนน้อยกว่า 50%

5.1.2 คอนกรีตพูนที่มีซีเมนต์เฟสท์เป็นวัสดุประสาน

5.1.2.1 การใช้มวลรวมหยابจากเศษคอนกรีตและเศษคอนกรีตบล็อกแทนที่มวลรวมหยابจากธรรมชาติปริมาณ 20, 40, 60, 80, และ 100% ในคอนกรีตพูนให้ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วันมีค่าอยู่ระหว่าง 122-172 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร กำลังดึงแบบผ่าซีกอยู่ระหว่าง 13-24 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และกำลังดัดอยู่ระหว่าง 28-47 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โดยการแทนที่ที่ 40-60% มีแนวโน้มให้ค่ากำลังสูงกว่าการใช้มวลรวมหยابจากธรรมชาติเล็กน้อย

5.1.2.2 คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมเศษคอนกรีตและเศษคอนกรีตบล็อกแทนที่หินปูนย่อยพบว่าความหนาแน่นคอนกรีตพูนมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนโพรงมีค่าอยู่ระหว่าง 13-25% และการซึมผ่านของน้ำอยู่ระหว่าง 0.22-1.01 เซนติเมตร/วินาที

5.1.2.3 การใช้มวลรวมหยابจากเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยพบว่าการแทนที่ในอัตรา 40% ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนที่ผิวหน้าน้อยที่สุด ขณะที่การใช้เศษคอนกรีตบล็อกพบว่าการแทนที่ในอัตรา 20% ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด การที่คอนกรีตพูนมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนมากขึ้นเมื่อใช้เศษคอนกรีตและเศษคอนกรีตบล็อกในปริมาณแทนที่ไม่มากนักเพราะเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เฟสท์และมวลรวม แต่เมื่อแทนที่ที่ปริมาณเกิน 60% พบว่าค่าความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่ผิวหน้ามีแนวโน้มลดลง

5.1.3 คอนกรีตพูนที่มีจีโอโพลิเมอร์เฟสท์เป็นวัสดุประสาน

5.1.3.1 มวลรวมหยابจากเศษคอนกรีต, เศษคอนกรีตบล็อก และเศษอิฐมอญสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมหยابแทนมวลรวมธรรมชาติในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนได้ แต่ให้ค่ากำลังต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมจากธรรมชาติ

5.1.3.2 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมหยابจากเศษวัสดุมีค่ากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกอยู่ในช่วง 28-103 และ 3-14 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 0.7-1.8 เซนติเมตร/วินาที ความหนาแน่นระหว่าง 1420-1730 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และมีอัตราส่วนโพรงร้อยละ 22-29

5.1.3.3 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ได้จากเศษคอนกรีตบล็อกมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ แต่มีความสามารถในการระบายน้ำได้ดีที่สุด ส่วนคอนกรีตพูนที่ได้จากเศษอิฐมอญมีน้ำหนักที่เบา กว่าคอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมปกติธรรมชาติถึงร้อยละ 40 และมีค่าความทนทานต่อการสึกกร่อน ก่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับมวลรวมชนิดอื่นๆ

5.1.3.4 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนที่ 15 และ 20 โมลาร์จะให้ค่ากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกดีกว่าความเข้มข้น 10 โมลาร์ ส่วนค่าการซึมผ่านน้ำ, ค่าอัตราส่วนโพรง, ความหนาแน่น, และความทนทานต่อการสึกกร่อนมีค่าไม่แตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 คอนกรีตพูนทั้งสองส่วนควรศึกษาเพิ่มเติมโดยการปรับส่วนผสมให้มีมวลรวมละเอียด หรือใช้มวลรวมหยาบที่มีการคละขนาดเพื่อกำลังของคอนกรีตพูน

5.2.3 เนื่องจากมวลรวมจากเศษวัสดุมีความแข็งแรงน้อยกว่ามวลรวมปกติจากธรรมชาติ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดี จึงควรทำการศึกษาสมบัติด้านความทนทานต่างๆของคอนกรีตพูนและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนด้วย

5.2.3 เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีปริมาณจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในส่วนผสมค่อนข้างต่ำ จึงควรทำการศึกษาการเพิ่มปริมาณจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูน

5.2.4 เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีระยะเวลาในการก่อตัวค่อนข้างเร็ว เพื่อความสะดวกในการทำงาน จึงควรศึกษาเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนมีระยะเวลาในการก่อตัวมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- เจริญชัย ฤทธิรุท และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2554). การศึกษาระยะเวลาก่อตัวของวัสดุจีโอโพลีเมอร์จากถ้ำลอย. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16**; 18-20 พฤษภาคม 2554; โรงแรมเดอะชาयน์ พัทยา ชลบุรี.
- ฉัตร ประยูรหาญ, รัชพงศ์ ทองเฉลิม และพิทักษ์ สิมมา. (2551). **คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐบดลอกแทนมวลรวมหยาบ**. รายงานโครงการหมายเลข CE2007-12 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- ถนัดกิจ ชาริรัตน์, ปริญญา จินดาประเสริฐ และShigemitsu Hatanaka. (2551). คอนกรีตพูน: คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13**; 14-16 พฤษภาคม 2551; โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา.
- ยุวดี หิรัญ และวัจน์วงศ์ กริพละ. (2554). การเพิ่มกำลังของคอนกรีตที่น้ำซึมผ่านได้ด้วยสารลดน้ำพิเศษ. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16**; 18-20 พฤษภาคม 2554; โรงแรมเดอะชาयน์ พัทยา ชลบุรี.
- ยุวดี หิรัญ, อัมพล วงศ์ษา, วันชัย สะตะ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2554). ศึกษาแรงดันน้ำจากคอนกรีตไร้เหล็กและคอนกรีตบล็อกไร้เหล็ก. **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7**; 19-21 ตุลาคม 2554; โรงแรมระยองรีสอร์ท ระยอง.
- วัชรปัญญา พรหมแสน, ธวัชชัย ไทอินทร์, วันชัย สะตะ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2555). ผลของความละเอียดของถ้ำลอยที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17**; 9-11 พฤษภาคม 2555; โรงแรมเซ็นทารา แอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์ อุดรธานี.
- สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2553). ผลของอุณหภูมิมีต่อกำลังรับแรงอัดของถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์เฟสดี. **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6**; 20-22 ตุลาคม 2553; โรงแรมแกรนด์ แปซิฟิก ซอฟเวอร์น รีสอร์ท แอนด์ สปา เพชรบุรี.
- สุรศักดิ์ ภูสันติพงษ์, รัช บวรณสิงห์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). การใช้คอนกรีตที่ทดสอบกำลังอัดแล้วเพื่อเป็นมวลรวมของคอนกรีต. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา**, 15(3).
- American Concrete Institute. (2007). **ACI Education Bulletin E1-07: Aggregates for concrete**. Michigan, Farmington Hill.
- American Concrete Institute. (2010). **ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete**. Michigan, Farmington Hill.
- American Society for Testing and Materials. (2001). Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate. ASTM C29/C29M-97a. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.

- American Society for Testing and Materials. (2011). Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM C33/C33M-11. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2010). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39-10. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2007). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM C127-07. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2001). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM C131-96. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2006). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM C136-06. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2011). Standard Specification for Portland Cement. ASTM C150/C150M. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2009). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. ASTM C188-09. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.01.
- American Society for Testing and Materials. (2001). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C496-96. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2001). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM C535-96. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2000). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. ASTM C618-00. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2001). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregates to Testing Size. ASTM C702-98. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.

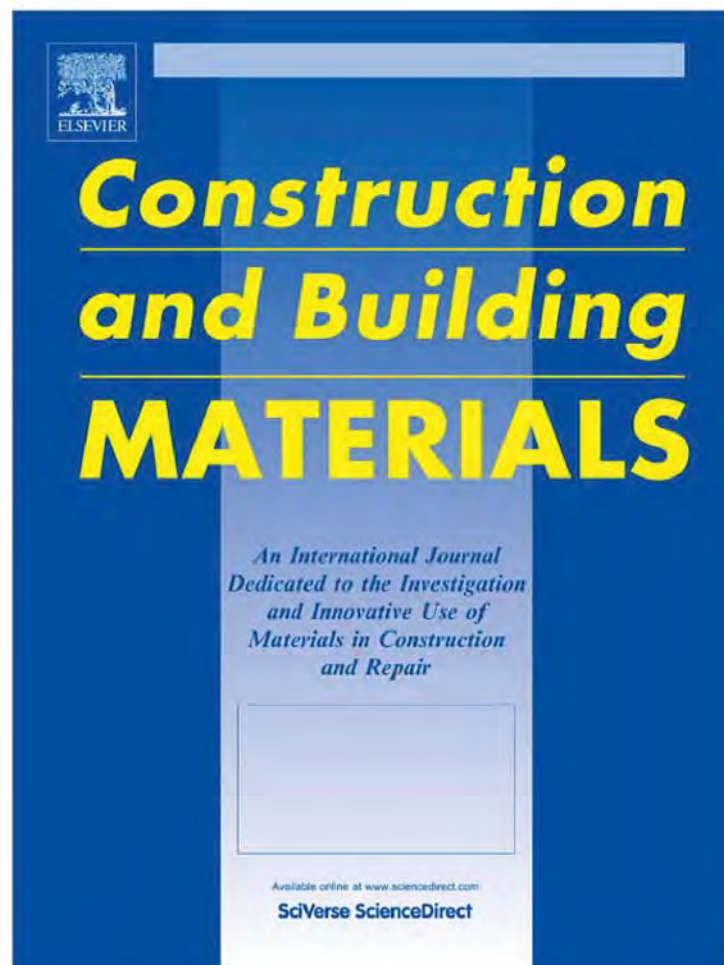
- American Society for Testing and Materials. (2001). Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method. ASTM C944. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2001). Standard Practice for Sampling Aggregate. ASTM D75-95. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.03.
- American Society for Testing and Materials. (2001). Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction. ASTM D448. **Annual Book of ASTM Standard**, Vol.04.03.
- Cheng, A., Hsu, H., Chao, S., & Lin, K. (2011). Experimental Study on Properties of Pervious Concrete Made with Recycled Aggregate. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 4(2), 104-110.
- Chindaprasirt, P., Hatanaka, S., Chareerat, T., Mishima, N., & Yuasa, Y. (2008). Cement paste characteristics and porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, 22(5), 894–901.
- Davidovit, J., Davidovit, R., & Jame, C. (1999). **Chemistry of Geopolymeric System, Terminology**. Geopolymer'99 International Conference.
- Debieb, F., & Kenai, S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, 22(5), 886-893.
- Ghafoori, N., and Dutta, S. (1995). "Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials." **Journal of Materials in Civil Engineering**, 7(3), 183-191.
- Huang, B., Wu, H., Shu, X., & Burdette, E. (2010). Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, 24(5), 818–823.
- Kevern, J. T., Wang, K., and Schaefer, V. R. (2010). "Effect of coarse aggregate on the freeze-thaw durability of pervious concrete." **Journal of Materials in Civil Engineering**, 22(5), 469-475.
- Neithalath, N., Sumanasooriya, M. S., and Deo, O. (2010). "Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction." **Materials Characterization**, 61(8), 802-813.
- Moriconi, G., Corinaldesi, V., and Antonucci, R. (2003). "Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick." **Materials and Structures**, 36(10), 702-708.

- Otsuki, N., Miyazato, S. I., and Yodsudjai, W. (2003). "Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete." **Journal of Materials in Civil Engineering**, 15(5), 443-451.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco M. T. (1999). Alkali-activated fly ash : A cement for the future. **Cement and Concrete Research**. 29(8), 1323-1329.
- Park, S., Seo, D., & Lee, J. (2005). Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio. **Cement and Concrete Research**, 35(9), 1846-1854.
- Qzturan, T., and Cecen, C. (1997). "Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths." **Cement and Concrete Research**, 27(2), 165-170.
- Shi, Q-Z. & Chung, D.D.L. (1997). Improving the abrasion resistance of mortar by adding latex and carbon fibers. **Cement and Concrete Research**, 27(8), 1149-1153.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., & Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. **Fuel**, 90(6), 2118-2124.
- Tho-in, T., Sata, V., Chindaprasirt, P., & Jaturapitakkul, C. (2012). Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, 30(0), 366–371.
- Topark-Ngarm, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2011). Workability and Strength of High Calcium Geopolymer Concrete Cured at Room Temperature. การประชุมวิชาการ คอมนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7; 19-21 ตุลาคม 2554; ระยองรีสอร์ท ระยอง.
- Xiao, Z., Ling, T.-C., Kou, S.-C., Wang, Q., and Poon, C.-S. (2011). "Use of wastes derived from earthquakes for the production of concrete masonry partition wall blocks." **Waste Management**, 31(8), 1859-1866.
- Yang, J., & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, 33(3), 381-386.
- Zhenshuang, W., Lijiu, W., Zhenglong, C., and Mei, Z. (2011). "Effect of recycled coarse aggregate on compressive strength." **Transactions of Tianjin University**, 17, 229-234.

ภาคผนวก

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุน

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI, SCOPUS และมี Impact Factor
 - **Vanchai Sata***, Ampol Wongsas, and Prinya Chindaprasirt, 2013, "Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates", **Construction and Building Materials**, Vol. 42, No. 5, pp. 33-39. (Impact Factor 2011 = 1.834)
 - Yuwadee Zaetang, Ampol Wongsas, Tawatchai To-in, **Vanchai Sata***, and Prinya Chindaprasirt , "Recycling of concrete blocks for use in pervious concrete", **Cement and Concrete Composites**, (Submitted)
2. ผลงานการเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการในประเทศ
 - ยุวดี หิรัญ, อำพล วงศ์ษา, วันชัย สะตะ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2554, "ศิลาแลงประดิษฐ์จากคอนกรีตรีไซเคิลและคอนกรีตบล็อกรีไซเคิล" *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7*, ระยอง, MAT85-MAT93.
 - อำพล วงศ์ษา, ยุวดี แซ่ตั้ง, วันชัย สะตะ, และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2555, "คอนกรีตพูนจากมวลรวมรีไซเคิล" *การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18*, เชียงใหม่, หน้า MAT147-MAT153.



(This is a sample cover image for this issue. The actual cover is not yet available at this time.)

This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates

Vanchai Sata*, Ampol Wongsai, Prinya Chindaprasirt

Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

HIGHLIGHTS

- Recycled aggregates (RAs) were used to make pervious geopolymer concrete (PGC).
- PGCs were prepared from high-calcium fly ash geopolymer binder and two different types of RA.
- Mechanical properties, total void ratio, and water permeability were tested.
- These RA could be used as coarse aggregates to produce PGC with acceptable properties.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 October 2012

Received in revised form 27 December 2012

Accepted 27 December 2012

Keywords:

Recycled aggregate

Geopolymer

Pervious concrete

High-calcium

Fly ash

ABSTRACT

In this paper, the use of recycled aggregates (RAs) for making pervious geopolymer concrete (PGC) was studied. PGCs were prepared from high-calcium fly ash (FA), sodium silicate (Na_2SiO_3) solution, sodium hydroxide (NaOH) solution, and two different types of RA viz., crushed structural concrete member (RC) and crushed clay brick (RB). The results were also compared with those of natural coarse aggregate (NA). Compressive strength, splitting tensile strength, total void ratio, and water permeability coefficient of the PGCs were determined. The results indicate that both RC and RB can be used as recycled coarse aggregates for making PGC with acceptable properties.

Crown Copyright © 2013 Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Pervious concrete is a special concrete that contains continuous voids and possesses high water permeability compared to normal concrete. It has been developed as an environmentally friendly material for use in water purification, permeable pavement, acoustic absorption, thermal insulation, and other applications in civil engineering and architecture [1–3]. Generally, the sizes of connected pore in pervious concrete range from 2 to 8 mm in diameter with void content between 15% and 35% and compressive strength between 2.8 and 28.0 MPa [4]. Typically, pervious concrete consists of binder, coarse aggregates, water, and admixture.

It is generally known that cement manufacturing is an energy intensive process and releases a large amount of green house gas to the atmosphere. The cement industry contributes about 7% by weight of the total carbon dioxide emissions [5]. Therefore, the use of supplementary materials to partially replace Portland cement and alternative cementing materials should be developed in order to reduce the use of Portland cement [6–8]. Geopolymer

binder is one such alternative cement which is synthesized by mixing aluminosilicate material and high alkali solutions [9]. It utilizes by-products such as fly ash or metakaolin as aluminosilicate source to react with high alkali solutions of sodium or potassium based. Fly ash geopolymers have been studied by several researchers and were found to have high early strength, high later age strength, and excellent resistance to sulfate and acid attack [9–12].

In addition, the use of waste such as recycled aggregate in concrete is beneficial for the environment. The use of these materials can reduce wastes to landfill and reduce consumption of natural material resources. The studies with respect to the applicability of recycled aggregate in concrete have been conducted around the world [13–16]. However, most researchers have focused on the mechanical properties of recycled aggregate as a test element and its application in normal cement concrete. The study on the use of recycled aggregate in pervious concrete especially that made with fly ash geopolymer binder is now at the very beginning.

The strength and void ratio of pervious geopolymer concrete were studied with high-calcium fly ash as a source material [17]. Pervious fly ash geopolymer concretes (PGCs) were prepared with Na_2SiO_3 and NaOH solutions, and natural coarse aggregate with FA

* Corresponding author. Tel.: +66 4320 2846x127; fax: +66 4320 2846x102.

E-mail address: vancsa@kku.ac.th (V. Sata).

to coarse aggregate ratio of 1:8 by weight and constant $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 0.50. The results indicate that the high-calcium fly ash geopolymer binder could be used to produce pervious concrete with satisfactory mechanical properties. In this study, recycled coarse aggregates from crushed structural concrete members and crushed clay bricks were used to replace natural coarse aggregate for PGC. The effects of NaOH concentrations on the properties of PGC were evaluated. The results were also compared with PGC containing natural coarse aggregate.

2. Materials and methods

2.1. Materials

High-calcium fly ash (FA) was procured from Mae Moh Electricity Power Station in northern Thailand. The FA had a median particle size of 50 μm , a Blaine fineness of 2250 cm^2/g , and 45% (by weight) retained on 45 μm sieve. SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 made up 71.7% of the FA whereas the CaO content was 19.4%. It can be classified as Class C pozzolan according to ASTM C618 [18]. Three concentrations of sodium hydroxide solution (NaOH) at 10, 15, and 20 M, and a commercial grade sodium silicate solution (Na_2SiO_3) with 15.32% Na_2O , 32.87% SiO_2 and 51.81% water were used. The NaOH solution was prepared by dissolving NaOH pellets in distilled water. For example, 10 M NaOH was obtained from 400 gm of NaOH pellets and 1 l of distilled water. Sodium silicate solution was used without any modification.

Three types of single-size coarse aggregates with 4.5–9.5 mm diameter were used in this study. The first was natural coarse aggregate from crushed limestone (NA), the second was a recycled aggregate from crushed structural concrete (RC) ob-

tained from the strength test in laboratory, and the last was a recycled aggregate from crushed broken clay brick obtained from construction site (RB). RC was from the concretes with compressive strengths of 30–40 MPa and RB was from local clay bricks with compressive strengths of 5.0–9.0 MPa. Fig. 1 shows the coarse aggregates used in this study and their properties are shown in Table 1. The specific gravity (SG) of NA was 2.72 and the dry-rodded density was 1550 kg/m^3 . The SG slightly RC was slightly lower at 2.53 as it contained NA and some adhered mortar. The SG of RB was significantly lower at 2.02 reflecting the different material from NA and RB altogether. The dry-rodded density of RC and RB were lower than that of NA while the water absorptions were higher as expected. The mortar content of RC was 65%. The Los Angeles abrasion loss of NA, RC, and RB were 30.2%, 43.3%, and 42.4%, respectively. The high water absorption and high Los Angeles abrasion loss of RC and RB were due to the residues of cement mortar attached on aggregate surface and the high porosity of the recycled aggregate [16,19].

2.2. Mix proportions, mixing, casting, and curing

All pervious geopolymer concretes (PGCs) were produced with FA to coarse aggregate ratio of 1–8 by weight. The $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ and alkali liquid (LA)/FA ratios were kept constant at 0.50 and 0.45, respectively. The typical mixture consisted of 221 kg/m^3 FA, 33 kg/m^3 Na_2SiO_3 , 66 kg/m^3 NaOH, and 1768 kg/m^3 of coarse aggregate. The parameters of this study were the types of coarse aggregates (NA, RC, and RB) and the NaOH concentrations (10, 15, and 20 M). The mix proportions of PGC are shown in Table 2. The symbol RC10 means the PGC with RC as coarse aggregate and 10 M NaOH.

The mixing of PGC was done in an air conditioned room at 25 °C. FA and NaOH were mixed in a pan-type mixer for 5 min. Coarse aggregate was then added and mixed for 4 min. Finally, Na_2SiO_3 solution was added and mixed for another minute. The total mixing time was 10 min.

After mixing, PGC were cast in 100 × 200 mm cylindrical molds and compacted on a vibrating table. The specimens were immediately wrapped with vinyl sheet to protect from moisture loss and kept in the controlled 25 °C room for 1 h. After that, they were placed in an oven for heat curing at 60 °C for 48 h. After the heat curing, the specimens were put in the laboratory to cool down and demoulded the next day. The specimens were then wrapped with vinyl sheet and stored in the controlled room at 23 ± 2 °C and 50% RH until the testing age. Fig. 2 shows the specimens of PGC containing NA, RC, and RB.

2.3. Testing methods

The compressive and splitting tensile strengths of PGC were determined at the age of 7 days in accordance with ASTM C39 [20] and ASTM C496 [21]. The results were presented as the average value of three specimens.

The total void ratio and water permeability coefficient of PGC were tested using 100 × 200 mm cylindrical specimen. The total void ratio was calculated using Eq. (1) [22] and the reported values were the average of three specimens

$$V = \left(1 - \frac{(W_2 - W_1)}{\rho_w \text{Vol}} \right) \times 100 \quad (1)$$

where V is the total void ratio (%), W_1 is the weight of specimen under water (g), W_2 is the saturated weight of specimen (g), ρ_w is the density of water (g/cm^3), and Vol is the volume of specimen (cm^3).

After the total void ratio test, the specimen was placed in the water permeability test set-up as shown in Fig. 3. The water permeability coefficient of PGC was tested using the constant head method and carried out when a steady state flow was reached. The coefficients of water permeability (k) were the averages of three specimens and calculated following Darcy's law [4,23,24] as shown in following equation:

$$k = \frac{QL}{HAt} \quad (2)$$

where k is the coefficient of water permeability (cm/s), Q is the quantity of water collected (cm^3) over time t (s), L is the length of specimen (cm), H is the water head (cm), and A is the cross sectional area of specimen (cm^2).

3. Results and discussions

3.1. Density, compressive strength, and splitting tensile strength

The results of density, compressive strength, and splitting tensile strength tests of PGC are shown in Table 3. The densities of PGCs were between 1420 and 1840 kg/m^3 which were lower than that of the conventional concrete (about 2400 kg/m^3) due to the high void of pervious concrete. The NaOH concentration had no effect on the density of PGC. For example, the densities of RC10, RC15, and RC20 concretes were 1720, 1710, and 1730 kg/m^3 ,



(a) NA



(b) RC



(c) RB

Fig. 1. Comparison of coarse aggregates.

Table 1
Properties of coarse aggregates (NA, RC, and RB).

Aggregates	Specific gravity	Dry-rodded density (kg/m ³)	Absorption (%)	Los Angeles abrasion loss (%)
NA	2.72	1590	0.21	30.2
RC	2.53	1340	4.58	43.3
RB	2.02	950	16.2	42.5

Table 2
Mix proportions of pervious geopolymer concretes (PGCs).

Mixes	Mix proportion (kg/m ³)					Coarse aggregates		
	FA	Na ₂ SiO ₃	NaOH (10 M)	NaOH (15 M)	NaOH (20 M)	NA	RC	RB
NA10	221	33	66	–	–	1768	–	–
NA15	221	33	–	66	–	1768	–	–
NA20	221	33	–	–	66	1768	–	–
RC10	221	33	66	–	–	–	1768	–
RC15	221	33	–	66	–	–	1768	–
RC20	221	33	–	–	66	–	1768	–
RB10	221	33	66	–	–	–	–	1768
RB15	221	33	–	66	–	–	–	1768
RB20	221	33	–	–	66	–	–	1768

Note: Na₂SiO₃/NaOH = 0.50.



Fig. 2. Specimens of PGC containing NA, RC, and RB after demoulding.

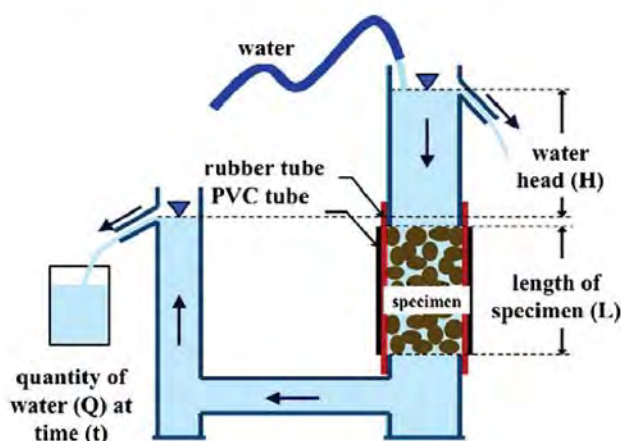


Fig. 3. Test set-up of water permeability.

respectively. The density of PGC containing RB as coarse aggregate was lowest with the average value of 1480 kg/m³, while the densities of PGCs containing NA, and RC were higher at 1800 and 1720 kg/m³. The dry-rodded density of aggregate and the density of PGC containing NA, RC, and RB were plotted in Fig. 4. As expected, the density of PGC increased as the dry-rodded density of

aggregate increased. The relationship was a linear correlation with high R^2 value of 0.93 as shown in Eq. (3). This equation gives a prediction of the density of PGC based on a known dry-rodded density of aggregate

$$D = 0.51(D_r) + 1010 \quad (3)$$

where D is the density of pervious concrete (kg/m³) and D_r is the dry-rodded density of aggregate (kg/m³).

The compressive strengths of PGC containing NA were between 11.9 and 13.6 MPa and similar to the PGC containing a slightly larger aggregate with similar alkali liquid to fly ash ratio [17]. The use of recycled aggregate reduced the compressive strengths of PGC. The compressive strengths of PGC containing RC and RB were between 7.0–10.3, and 2.9–6.6 MPa, respectively. The highest compressive strength of 13.6 MPa occurred with NA10 and NA15 concretes, while the RB10 concrete showed the lowest compressive strength of 2.9 MPa. However, their compressive strengths were within the typical strength distribution reported [4].

At the same NaOH concentration, the compressive strengths of PGC containing NA were higher than those of RC and RB. For example, the compressive strength of NA15 was 13.6 MPa, while those of RC15 and RB15 were 10.0 and 4.0 MPa, respectively. The reduction in strength was due to the weakness of the attached mortar in recycled aggregate [25]. In addition, the low dry-rodded density and abrasion resistance of RC and RB also contributed to the low compressive strength [26]. The compressive strength of PGC was plotted as a function of dry-rodded density of aggregate as shown in Fig. 4. By linear regression, the empirical relationship with R^2 of 0.87 was derived as

$$f'_c = 0.0132(D_r) - 8.19 \quad (4)$$

where f'_c is the compressive strength of PGC (MPa) and D_r is the dry-rodded density of aggregate (kg/m³).

The results also indicated that the optimum NaOH concentration to produce good strength PGC was 15–20 M. Since the formation of gel depended on the concentration of alkali OH ion, the low NaOH concentration resulted in a weak chemical reaction and slightly decreased compressive strength. The compressive strength increased with an increase in NaOH concentration mainly through the leaching of silica and alumina with high NaOH concentration

Table 3
Density, compressive strength, and splitting tensile strength of PGC at the age of 7 days.

Mixes	Density (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	Splitting tensile strength (MPa)
NA10	1840	13.6	1.6
NA15	1760	13.6	1.8
NA20	1810	11.9	1.5
RC10	1730	7.0	1.3
RC15	1710	10.0	1.4
RC20	1720	10.3	1.5
RB10	1420	2.9	0.4
RB15	1510	4.0	0.7
RB20	1520	6.6	0.9

[27]. However, an increase in alkali concentration enhanced strength development of geopolymer, but excess hydroxide ion concentration caused aluminosilicate gel precipitation at early stage and resulted also in low strength geopolymer [28,29]. The reduction of strength due to the increased in NaOH concentration from 15 M to 20 M could be observed in the NA aggregate. Similar to conventional concrete, the compressive strength of PGC improved when the density increased as shown in Fig. 5. The relationship between density and compressive strength of PGC was linear with R^2 equal to 0.84 and the function can be written as

$$f'_c = 0.0245(D) - 31.97 \quad (5)$$

where f'_c is the compressive strength (MPa) and D is the density of PGC (kg/m³).

The splitting tensile strength of PGC ranged from 0.4 to 1.8 MPa. The results followed the same trend as those of the compressive strength. The splitting tensile strength values of PGC containing NA aggregate were higher than those of RC and RB aggregates. NA15 concrete gave the maximum splitting tensile strength of 1.8 MPa while RB10 concrete gave the lowest strength of 0.4 MPa. The average ratio of splitting tensile to compressive strengths of PGC was 14.4% which was slightly higher than 8–14% for conventional concrete and Portland cement concrete containing recycled aggregate [16,30,31] as shown in Fig. 6. This was due to the denser and stronger interfacial transition zone between aggregates and geopolymer binder compared with that of cement binder as a result of the use of soluble silicate [32].

The relationship between compressive strength and splitting tensile strength of PGC compared with the value suggested by ACI 318 [33] is shown in Fig. 7. The results showed that as compressive strength increased, the splitting tensile strength also increased. The

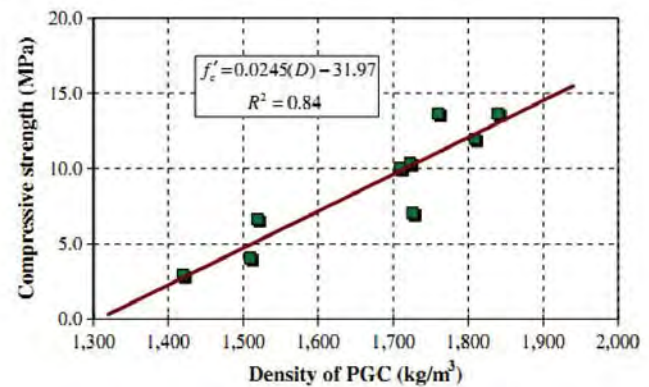


Fig. 5. Relationship between compressive strength at the age of 7 days and density of PGC.

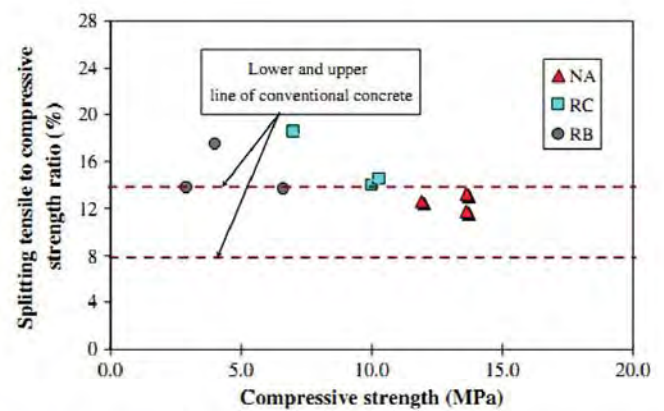


Fig. 6. Splitting tensile to compressive strength ratios and compressive strength of PGC at the age of 7 days.

splitting tensile strengths of PGC were slightly lower than that predicted by ACI 318 [33]. Eq. (6) was used for prediction the splitting tensile strength of PGC

$$f_{st} = 0.44(f'_c)^{0.50} \quad (6)$$

where f_{st} is the splitting tensile strength (MPa) and f'_c is the compressive strength of PGC (MPa).

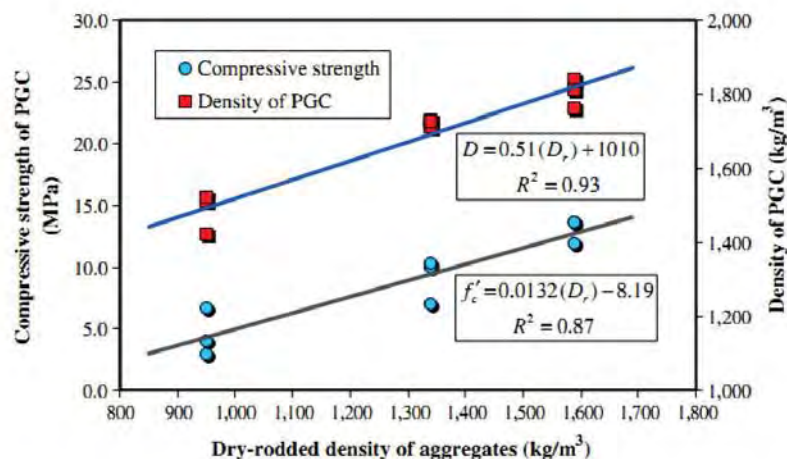


Fig. 4. Relationship between compressive strength at the age of 7 days, density of PGC and dry-rodded density of aggregates.

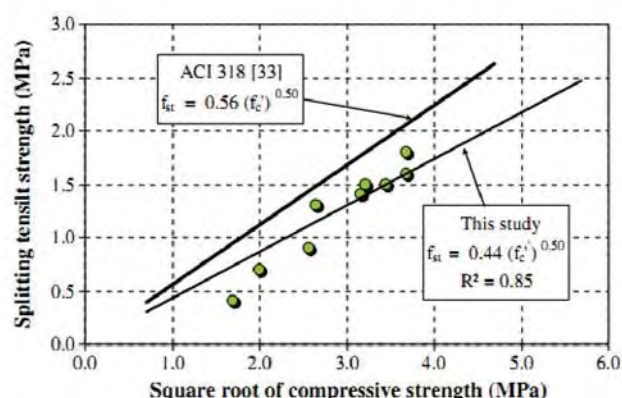


Fig. 7. Relationship between compressive strength and splitting tensile strength of PGC at the age of 7 days.

3.2. Fracture surfaces

Fig. 8 compares the PGC failure patterns of various aggregates and Figs. 9–11 show the fracture surfaces of PGC specimens after splitting tensile test. The majority of failure of PGC with NA aggregate occurred at the interface between geopolymer paste and aggregate. However, for RC aggregate, the fractures were at the attached mortar. As compare to normal aggregate and geopolymer paste, the poor quality due to its high porosity of the attached mortar had created the weak zones in PGC. When the PGC approached the ultimate load, the cracks passed through these zones instead of paste and coarse aggregate [25,34]. The failure surface of PGC containing RB showed fracture through the recycled aggregate particles indicating that RB aggregate was the weakest point. The RC and RB aggregate particles were not strong as suggested by their high Los Angeles abrasion losses (43.2% and 42.5%).

3.3. Total void ratio and water permeability coefficient

Table 4 shows the results of total void ratios and water permeability coefficient of PGC. The total void ratios of all PGC varied between 21.7% and 27.4% which were typical values of ACI 522 (15–35%). It was reported that PGCs with high total void ratios of 28.7–30.4% were successfully made with the use of a relatively large coarse aggregate of 12.5–20.0 mm [17]. The total void ratios of PGC containing NA slightly increased with the increasing NaOH concentrations. They were 24.2%, 25.3%, and 27.4% for NA10, NA15, and NA20 concretes, respectively. The use of RC in PGC at various NaOH concentrations showed nearly the same total void ratios of 26.8%, 26.9%, and 26.4% for RC10, RC15, and RC20, respectively. In the case of using RB in PGC, the total void ratios ranged from

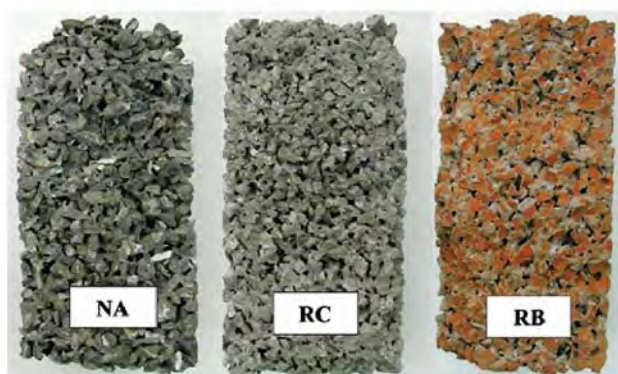


Fig. 8. Failure surface of PGC by splitting tensile strength.

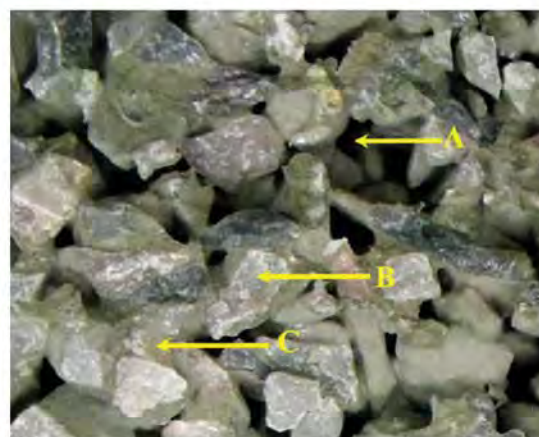


Fig. 9. Fracture surface of PGC containing NA; (A) void; (B) failure at bond; and (C) geopolymer paste.

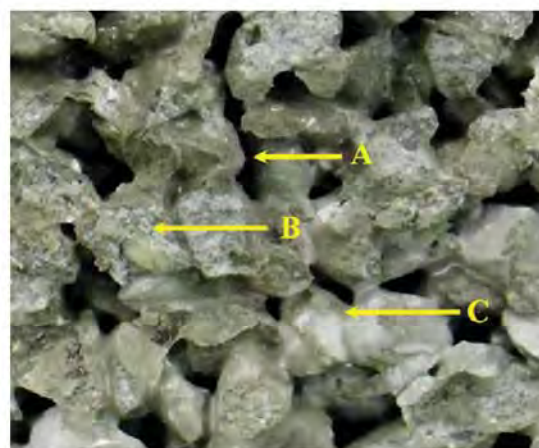


Fig. 10. Fracture surface of PGC containing RC; (A) void; (B) fractured RC at attached mortar; and (C) geopolymer paste.

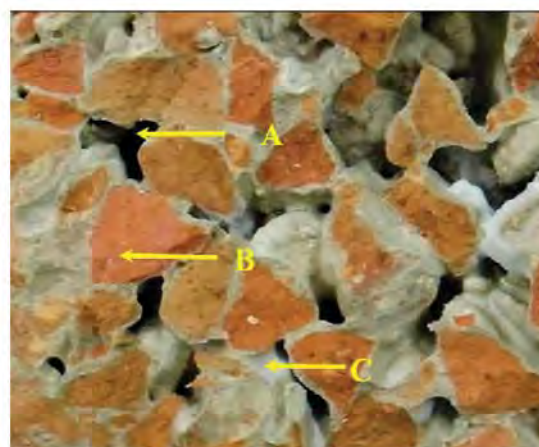


Fig. 11. Fracture surface of PGC containing RB; (A) void; (B) fractured RB; and (C) geopolymer paste.

21.7% to 23.7% which were lower than those of NA and RC. It could, therefore, be concluded that the total void ratios of the PGC with different NaOH concentrations but the same aggregate and geopolymer paste content were not very different.

With regard to the water permeability coefficient of PGC, the trend of the results was similar to that of the total void ratio. The low values of water permeability coefficients of 0.71–1.2 cm/s

Table 4
Total void ratio and water permeability coefficient of PGC at the age of 7 days.

Mixes	Total void ratio (%)	Water permeability coefficient (cm/s)
NA10	24.2	1.25
NA15	25.3	1.18
NA20	27.4	1.71
RC10	26.8	1.56
RC15	26.9	1.46
RC20	26.4	1.47
RB10	23.7	1.12
RB15	21.7	0.71
RB20	22.4	0.80

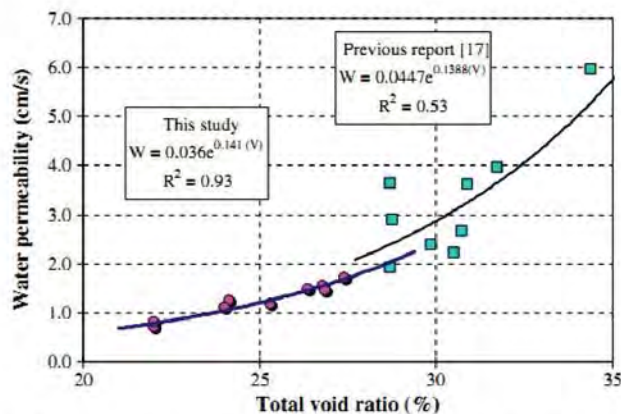


Fig. 12. Relationship between water permeability coefficient and total void ratio of PGC.

were achieved with PGC using RB aggregate. Also, the water permeability coefficient values of PGC with the same aggregate varied in a narrow range with different NaOH concentrations. Thus, the relationship between water permeability coefficient and total void ratio of all PGCs could be fitted as Eq. (7) as shown in Fig. 12. The R^2 value of 0.93 indicated a relatively strong relation between water permeability coefficient and total void ratio

$$k = 0.036e^{0.141(V)} \quad (7)$$

where k is coefficient of water permeability coefficient (cm/s) and V is total void ratio (%).

Similar trend of results was reported by the previous work [17] as shown in Fig. 12. The permeability of PGC increased exponentially with the void content similar to normal Portland cement pervious concrete [23].

4. Conclusions

The recycled aggregate from crushed structural concrete member (RC) and crushed clay bricks (RB) could be used as coarse aggregates for making pervious geopolymer concrete (PGC) using high-calcium fly ash as a source material. PGCs containing RC and RB gave lower compressive strengths than those containing natural aggregate (NA). However, the obtained compressive strengths of 2.9–10.3 MPa were within the typical strength distribution reported [4]. The relationships of density and compressive strength, splitting tensile and compressive strength, and total void ratio and water permeability coefficient in pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete incorporating recycled coarse aggregates were similar to those of conventional pervious concrete. The total void ratio and water permeability coefficient of the PGCs with different NaOH concentrations but the same aggregate and geopolymer paste content were not very different. For the effect of NaOH

concentrations, the high concentration 15–20 M NaOH gave PGC with higher strength than the low concentration 10 M NaOH.

The overall results indicate that it is feasible to use RC and RB as recycled coarse aggregates with high-calcium fly ash geopolymer binder for making pervious concrete with acceptable properties. However, the using RC and RB resulted in significant losses in strength as compared to a NA pervious concrete.

Acknowledgements

This work was supported by the Higher Education Research Promotion and National Research University Project of Thailand, Office of the Higher Education Commission, through the Advanced Functional Materials Cluster of Khon Kaen University. The authors also would like to acknowledge the support of the Thailand Research Fund (TRF) under TRF New Researcher Scholar Contact No. MRG5480004 and TRF Senior Research Scholar Grant No. RTA5480004.

References

- [1] Kim HK, Lee HK. Acoustic absorption modeling of porous concrete considering the gradation and shape of aggregate and void ratio. *J Sound Vib* 2010;329(7):866–79.
- [2] Chindaprasit P, Hatanaka S, Chareerat T, Mishima N, Yuasa Y. Cement paste characteristics and porous concrete properties. *Constr Build Mater* 2008;22(5):894–901.
- [3] Kevern JT, Schaefer VR, Wang K. Evaluation of pervious concrete workability using gyratory compaction. *J Mater Civil Eng* 2009;12(12):764–70.
- [4] ACI committee 522. Pervious concrete, Report no. 522R-10, American Concrete Institute, Detroit, USA; 2010. p. 38.
- [5] Ali MB, Saidur R, Hossain MS. A review on emission analysis in cement industries. *Renew Sust Energy Rev* 2011;15(5):2252–61.
- [6] Slanička Š. The influence of fly ash fineness on the strength of concrete. *Cem Concr Res* 1991;21(2–3):285–96.
- [7] Sata V, Jaturapitakkul C, Rattanashotinunt C. Compressive strength and heat evolution of concretes containing palm oil fuel ash. *J Mater Civil Eng* 2010;22(10):1033–8.
- [8] Chindaprasit P, Homwuttiwong S, Sirivivatnanon V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cem Concr Res* 2004;34(7):1087–92.
- [9] Davidovits J. Geopolymer: inorganic polymeric new materials. *J Therm Anal* 1991;37:1633–56.
- [10] Temuujin J, Minjigmaa A, Lee M, Chen-Tan N, van Riessen A. Characteristic of class F fly ash geopolymer pastes immersed in acid and alkaline solutions. *Cem Concr Compos* 2011;33(10):1086–91.
- [11] Sata V, Sathonsaowaphak A, Chindaprasit P. Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cem Concr Compos* 2012;34(5):700–8.
- [12] Chindaprasit P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cem Concr Compos* 2007;29(3):224–9.
- [13] Poon CS, Shui ZH, Lam L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Constr Build Mater* 2004;18(6):461–8.
- [14] Etxeberria M, Mari A, Vázquez E. Recycled aggregate concrete as structural material. *Mater Struct* 2007;40(5):529–41.
- [15] Limbachiya M, Meddah MS, Ouchagour Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Constr Build Mater* 2012;27(1):439–49.
- [16] Tangchirapat W, Buranasing R, Jaturapitakkul C, Chindaprasit P. Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates. *Constr Build Mater* 2008;22(8):1812–9.
- [17] Tho-in T, Sata V, Chindaprasit P, Jaturapitakkul C. Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Constr Build Mater* 2012;30:366–71.
- [18] American Society for Testing and Materials (ASTMs) C 618-03. Standard test method for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete; 2003.
- [19] de Juan MS, Gutiérrez PA. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr Build Mater* 2009;23(2):872–7.
- [20] American Society for Testing and Materials (ASTMs) C 39/C 39M-01. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens; 2003.
- [21] American Society for Testing and Materials (ASTMs) C 496-96. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens; 2003.
- [22] Park AB, Tia M. An experimental study on the water-purification properties of porous concrete. *Cem Concr Res* 2004;34:177–84.
- [23] Neithalath N, Sumanasooriya MS, Deo O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Mater Character* 2010;61:802–13.
- [24] Japan Concrete Institute. In: Proceedings of the JCI symposium on design, construction and recent applications of porous, concrete; 2004. p. 1–10.

- [25] Etxeberria M, Vázquez E, Marí A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem Concr Res* 2007;37(5):735–42.
- [26] Tu T-Y, Chen Y-Y, Hwang C-L. Properties of HPC with recycled aggregates. *Cem Concr Res* 2006;36(5):943–50.
- [27] Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Chalee W, Rattanasak U. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Manage* 2009;29(2):539–43.
- [28] Somna K, Jaturapitakkul C, Kajitvichyanukul P, Chindaprasirt P. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel* 2011;90:2118–24.
- [29] Lee WK, van Deventer JSJ. The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymer. *Colloids Surf A* 2002;211(2–3):115–26.
- [30] Sagoe-Crentsil KK, Brown T, Taylor AH. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cem Concr Res* 2001;31(5):707–12.
- [31] Mindess S, Young JF, Darwin D. *Concrete*. 2nd ed. Prentice Hall; 2003.
- [32] Sarker P. Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer concrete. *Mater Struct* 2011;44(5):1021–30.
- [33] ACI committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-99) and commentary (ACI 318R-99). American Concrete Institute, Detroit, USA1999; p. 391.
- [34] Kwan WH, Ramli M, Kam KJ, Sulieman MZ. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Constr Build Mater* 2012;26(1):565–73.

Manuscript Number:

Title: Recycling of concrete blocks for use in pervious concrete

Article Type: Research Paper

Keywords: Recycled aggregate; porous concrete; abrasion resistance; thermal conductivity

Corresponding Author: Dr Vanchai Sata, Ph.D.

Corresponding Author's Institution: Khon Kaen University

First Author: Yuwadee Zaetang

Order of Authors: Yuwadee Zaetang; Ampol Wongsu; Tawatchai To-in; Vanchai Sata, Ph.D.; Prinya Chindaprasit

Abstract: The use of recycled coarse aggregates from hollow concrete blocks (RAB) in pervious concrete was presented. Natural aggregate was replaced by RAB at the levels 0, 20, 40, 60, 80, and 100% by weight of aggregate to produce pervious concrete. Their physical and mechanical properties were studied. The results were compared to those of pervious concrete containing recycled concrete aggregate (RAC). It was showed that RAB and RAC could be used as recycled coarse aggregates in pervious concrete. Total void ratios of 13-25%, water permeability coefficients of 0.22-1.01 cm/s, density of 1800-2000 kg/m³, 28-days compressive strengths of 12.2-17.2 MPa, and thermal conductivity of 0.78-0.99 W/mK were obtained. The surface abrasion resistances of pervious concretes containing RAC were slightly better than that of the control concrete due to the better aggregate-cement bond. However, the surface abrasion resistances of pervious concretes containing RAB more than 60% replacement was significantly lower than those of the control.

Recycling of concrete blocks for use in pervious concrete

Yuwadee Zaetang, Ampol Wongsu, Tawatchai To-in, Vanchai Sata*, and

Prinya Chindaprasirt

*Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Dept. of Civil Engineering, Faculty of
Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand.*

Abstract

The use of recycled coarse aggregates from hollow concrete blocks (RAB) in pervious concrete was presented. Natural aggregate was replaced by RAB at the levels 0, 20, 40, 60, 80, and 100% by weight of aggregate to produce pervious concrete. Their physical and mechanical properties were studied. The results were compared to those of pervious concrete containing recycled concrete aggregate (RAC). It was showed that RAB and RAC could be used as recycled coarse aggregates in pervious concrete. Total void ratios of 13-25%, water permeability coefficients of 0.22-1.01 cm/s, density of 1800-2000 kg/m³, 28-days compressive strengths of 12.2-17.2 MPa, and thermal conductivity of 0.78-0.99 W/mK were obtained. The surface abrasion resistances of pervious concretes containing RAC were slightly better than that of the control concrete due to the better aggregate-cement bond. However, the surface abrasion resistances of pervious concretes containing RAB more than 60% replacement was significantly lower than those of the control.

Keywords: Recycling; porous concrete; aggregate; abrasion resistance; thermal conductivity

*Corresponding author. Tel: +66-4320-2846 (127), Fax: +66-4320-2846(102).

E-mail address: vancsa@kku.ac.th (Vanchai Sata)

ศิลาแลงประดิษฐ์จากคอนกรีตรีไซเคิลและคอนกรีตบล็อกรีไซเคิล

Synthetic laterite made of recycled aggregate from normal concrete and concrete block

ยุวดี หิรัญ (Yuwadee Hirun)¹

อำพล วงศ์ษา (Ampol Wongsas)²

วันชัย สะตะ (Vanchai Sata)³

ปริญญ์ จินดาประเสริฐ (Prinya Chindaprasirt)⁴

¹นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มข., ju130@yahoo.com

²นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มข., tam_hatori@hotmail.com

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มข., vancsa@kku.ac.th

⁴ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มข., prinya@kku.ac.th

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำศิลาแลงประดิษฐ์จากคอนกรีตพูนซึ่งใช้มวลรวมหยาบเป็นคอนกรีตรีไซเคิลและคอนกรีตบล็อกรีไซเคิลแทนที่การใช้หินปูน งานวิจัยประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนแรกทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก การซึมผ่านน้ำ อัตราส่วนโพรง และหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพูนโดยมวลรวมหยาบที่ใช้เป็นหินปูนถูกแทนที่ด้วยคอนกรีตรีไซเคิลและคอนกรีตบล็อกรีไซเคิลในปริมาณ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ ผลการวิจัยพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนมีค่ามากที่สุด เมื่อหินปูนถูกแทนที่ด้วยคอนกรีตบล็อกรีไซเคิลในปริมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการแทนที่หินปูนด้วยคอนกรีตรีไซเคิลให้ผลกำลังรับแรงอัดไม่แตกต่างกัน และการซึมผ่านของน้ำอยู่ระหว่าง 0.22 - 1.01 ซม./วินาที ส่วนที่สองทำการหล่อคอนกรีตพูนที่ได้เป็นก้อนศิลาแลงทำการทดสอบกำลังรับแรงดัด ความพูนและหน่วยน้ำหนัก ผลการวิจัยพบว่า ศิลาแลงประดิษฐ์มีกำลังรับแรงดัดและค่าความพูนมากกว่าศิลาแลงจากธรรมชาติและยังมีหน่วยน้ำหนักที่น้อยกว่า

ABSTRACT : This research aimed to study the synthetic laterite using of recycled concrete and recycled concrete block as coarse aggregate. The research consisted of two parts. The first focused on compressive strength, splitting tensile strength, water permeability, void ratio, and unit weight of porous concrete that coarse aggregate was replaced by recycled concrete and recycled concrete blocks at the level of 0, 20, 40, 60, 80 and 100 % by weight of coarse aggregate. The results showed that compressive strengths of porous concrete were optimum at 40-60 % of replacement of recycled concrete block but replacement of recycled concrete provided compressive strength results were similar in all mixtures and water permeability coefficient varied between 0.22 - 1.01 cm/s. The second part, synthetic laterite was made of recycled aggregate porous concrete. The flexural strength, porosity, and unit weight were tested. The results showed that the flexural strength and porosity of synthetic laterite were higher than natural laterite and a unit weight was lower.

KEYWORDS : Synthetic laterite, Porous concrete, Recycled aggregate

1. ที่มาและวัตถุประสงค์

ปัจจุบันการพัฒนาวัสดุก่อสร้างได้คำนึงถึงผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น มีการพัฒนาวัสดุต่างๆ เพื่อทดแทนการใช้วัสดุที่ส่งผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อม รวมถึงการนำวัสดุเก่ากลับมาใช้ใหม่ คอนกรีตรีไซเคิลหรือคอนกรีตบล็อกรีไซเคิลคือการนำเอาคอนกรีตหรือคอนกรีตบล็อกที่ถูกทุบทิ้งมาใช้ประโยชน์ใหม่ มีงานวิจัยที่ทำการศึกษานำคอนกรีตรีไซเคิลกลับมาใช้ใหม่ เช่น

ในปี พ.ศ. 2547 สุรศักดิ์ และคณะ [1] ได้ศึกษาการนำตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการมาทุบและใช้ทดแทนมวลรวมตามธรรมชาติ พบว่าคอนกรีตที่ได้จะมีระยะเวลาการสูญเสียค่าการยุบตัวลดลง และคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลแทนมวลรวมหยาบจะให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม 13-15 เปอร์เซ็นต์ และคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลแทนทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมไม่เกิน 22 เปอร์เซ็นต์ ในปีเดียวกัน รัชย์ [2] ได้ศึกษาการใช้เถาถ่านหินที่ผ่านการบดละเอียดเพื่อเพิ่มการยุบตัวและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิลทดแทนมวลรวม พบว่าการใช้เถาถ่านหินที่ผ่านการบดละเอียดทดแทนปูนซีเมนต์ 20-35 เปอร์เซ็นต์และใช้มวลรวมหยาบเป็นคอนกรีตรีไซเคิลจะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

ในปี 2551 ฉัตร และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตบล็อกรีไซเคิลแทนมวลรวมหยาบ พบว่ากำลังรับแรงอัดที่มีค่าน้อยกว่าที่ออกแบบ ยกเว้นที่ กำลังรับแรงอัดที่ออกแบบไว้ 150 กก./ชม.² เท่านั้นที่ให้ค่าสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตบล็อกรีไซเคิลเบาและดูดน้ำมากทำให้ต้องเพิ่มน้ำในส่วนผสม สำหรับกำลังรับแรงดึงแยกและกำลังรับแรงคดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบตามธรรมชาติ

คอนกรีตพรุนคือคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะมีโพรงต่อเนื่องที่น้ำสามารถซึมผ่าน ทำให้น้ำซึมสู่ชั้นดินได้ ช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนความชื้นระหว่างพื้นดินและอากาศในฤดูกาลต่างๆ, กักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้น้อยกว่าคอนกรีต [4] สามารถใช้เป็นวัสดุปูพื้นผิวตกแต่งสวนได้เช่นเดียวกับศิลาแลง ศิลาแลงหรือแม่รังเป็นวัสดุในธรรมชาติอย่างหนึ่ง มีลักษณะคล้ายกับหินสีแดงส้มหรือน้ำตาลเข้ม มีรูพรุนทั่วไป การผลิตศิลาแลงนั้นต้องมีการเปิดชั้นหน้าดินไปจนถึงชั้นแม่รัง ซึ่งส่งผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำคอนกรีตพรุนมาทำเป็นศิลาแลงประดิษฐ์ โดยใช้วัสดุรีไซเคิลจากคอนกรีตและคอนกรีตบล็อกเป็นส่วนผสม งานวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกทำการศึกษาคูณสมบัติของคอนกรีตพรุนที่ถูกแทนที่ด้วยวัสดุรีไซเคิล โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก การซึมผ่านน้ำ อัตราส่วนโพรง และหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพรุนโดยมวลรวมหยาบที่ใช้เป็นหินปูนจะถูกแทนที่ด้วยคอนกรีตรีไซเคิลและคอนกรีตบล็อกรีไซเคิลในปริมาณ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ ส่วนที่สองทำการหล่อคอนกรีตพรุนที่ได้เป็นก้อนศิลาแลงซึ่งเรียกว่าศิลาแลงประดิษฐ์ (SL) ทำการทดสอบกำลังรับแรงคด ความพรุน และหน่วยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับศิลาแลงธรรมชาติ (NL) ตัวอย่างศิลาแลงแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ศิลาแลงธรรมชาติ (NL)
และศิลาแลงประดิษฐ์ (SL)

2. วัสดุ, การเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบ

2.1 วัสดุ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I
- สารลดน้ำพิเศษ Type FF (เมลามีน)
- มวลรวมหยาบได้แก่ หินปูน (LS), คอนกรีตบล็อกรีไซเคิล (RB) และคอนกรีตรีไซเคิล (RC) ซึ่งได้จากเศษคอนกรีตของท่อคสล.ที่มีกำลังอัดประมาณ 300-350 กก./ซม.² การเตรียมวัสดุรีไซเคิลทั้งสองชนิดทำโดยการทุบด้วยค้อนและร่อนคัดขนาดให้มีช่วงขนาดหินอยู่ระหว่าง 4.8-9.5 มม. (Single size) โดยทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 136 [6], หน่วยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C 29 [7], ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C 127 [8] และค่าการสึกกร่อนตามมาตรฐาน ASTM C 131 [9]

- สีลาแสงธรรมชาติ ขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 40 ซม. และสูง 7 ซม.

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตพูน

2.2.1 ขนาดตัวอย่าง

ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. และสูง 20 ซม. สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก การซึมผ่านน้ำ อัตราส่วนโพรงและหน่วยน้ำหนัก และตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 40 ซม. และสูง 7 ซม. สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด

2.2.2 ส่วนผสม

ทุกส่วนผสมมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.24 และปริมาณปูนซีเมนต์ต่อน้ำหนักมวลรวมหยาบเท่ากับ 0.22 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.75 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และมวลรวมหยาบที่ใช้คือหินปูน โดยทำการแทนที่ปริมาณหินปูนด้วยคอนกรีตรีไซเคิลและคอนกรีตบล็อกรีไซเคิลในปริมาณ 0, 20, 40, 60, 80

และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ ส่วนผสมของตัวอย่างกริตพูนแสดงในตารางที่ 1

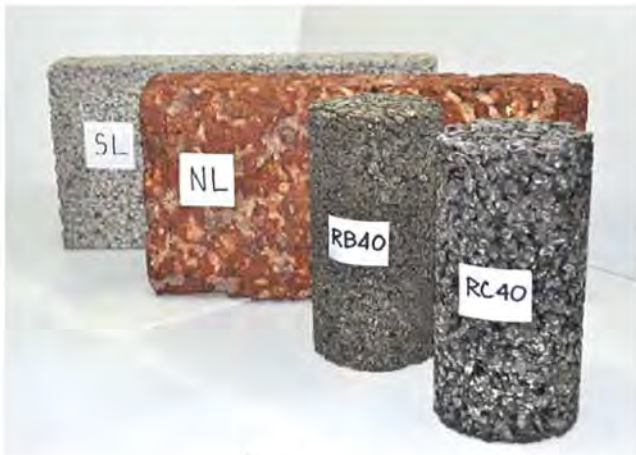
ตารางที่ 1 ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตพูน

Sample	Replacement of RC, RB (%)	Coarse Aggregate (kg/m ³)			Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Superplasticizer (kg/m ³)
		LS	RC	RB			
LS100,							
RC0,	0	1436.4	-	-	316.0	75.8	2.37
RB0							
RC20	20	1149.1	287.3	-	316.0	75.8	2.37
RC40	40	861.8	574.6	-	316.0	75.8	2.37
RC60	60	574.6	861.8	-	316.0	75.8	2.37
RC80	80	287.3	1149.1	-	316.0	75.8	2.37
RC100	100	-	1436.4	-	316.0	75.8	2.37
RB20	20	-	1149.1	287.3	316.0	75.8	2.37
RB40	40	-	861.8	574.6	316.0	75.8	2.37
RB60	60	-	574.6	861.8	316.0	75.8	2.37
RB80	80	-	287.3	1149.1	316.0	75.8	2.37
RB100	100	-	-	1436.4	316.0	75.8	2.37

2.2.3 ขั้นตอนการผสมและการอัดแน่น

สำหรับขั้นตอนการผสมและอัดแน่นตัวอย่างทำโดยผสมซีเมนต์เพสต์จนเนื้อซีเมนต์เพสต์เข้ากันได้ดีใช้เวลา 5 นาที ใส่มวลรวมหยาบที่เตรียมไว้ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งลงในส่วนผสมผสมต่อไปเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำส่วนผสมที่ได้เทลงในแบบหล่อ โดยแบ่งเป็น 2 ชั้น แต่ละชั้นทำการกระทุ้งชั้นละ 10 ครั้ง จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 10 วินาที โดยกดทับผิวหน้าตัวอย่างด้วยน้ำหนักขนาด 1.5 กก. เพื่อให้คอนกรีตอัดแน่น และทิ้งให้คอนกรีตแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถอดแบบ

และบ่มขึ้นจนครบอายุ 28 วัน ภาพที่ 2 แสดงตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 2 ตัวอย่างทดสอบ

2.3 การทดสอบ

2.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

เคลือบหัวและท้ายตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่บ่มครบอายุ 28 วันด้วยกัมมะถันแล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 [10]

2.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

ทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่บ่มครบอายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 496 [11]

2.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

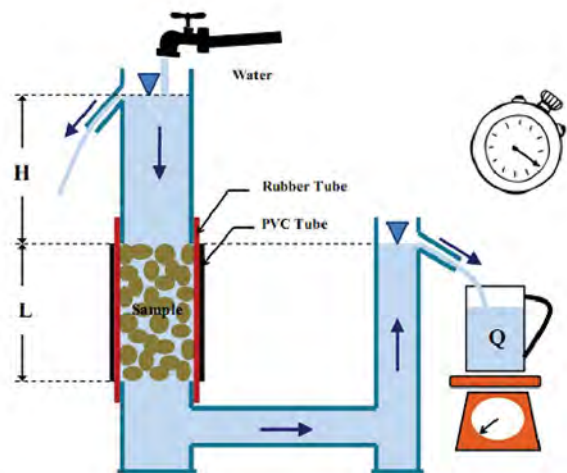
ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างคอนกรีตพูนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่บ่มครบอายุ 28 วัน และฉีลาแสงธรรมชาติ ขนาดกว้าง 20 cm ยาว 40 cm และสูง 7 cm โดยวิธี Center-Point Loading ตามมาตรฐาน ASTM C 293 [12]

2.3.4 การทดสอบการซึมผ่านน้ำ

การวัดค่าการซึมผ่านน้ำของตัวอย่างทำได้โดยอาศัยหลักการวัดค่าการซึมผ่านน้ำของดินที่มีเม็ดขนาดใหญ่ คือการทดสอบหาการซึมผ่านน้ำแบบแรงดันคงที่ (Constant Head Test) โดยทำการจำลองการทดสอบได้

ดังแสดงในภาพที่ 3 เริ่มต้นจากการนำตัวอย่างทรงกระบอกมาใส่ในแบบที่สามารถป้องกันการไหลซึมด้านข้างได้ จากนั้นนำตัวอย่างติดตั้งเข้ากับชุดทดสอบปล่อยน้ำเข้าสู่ชุดทดสอบโดยน้ำจะไหลเข้ากระบอกด้านบนเหนือตัวอย่างและไหลผ่านตัวอย่างไปสู่กระบอกอีกด้าน ไล่ฟองอากาศที่อยู่ในตัวอย่างออก ปรับปริมาณน้ำไหลเข้าให้ระดับน้ำที่ทางออกทั้งสองคงที่แล้ววัดปริมาณน้ำด้วยการชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณหาปริมาตรน้ำ (Q, ลบ.ซม.) โดยจับเวลา (t, วินาที) ค่าการซึมผ่านน้ำ (k, ซม./วินาที) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 เมื่อ A คือขนาดหน้าตัดตัวอย่าง (ตร.ซม.), L คือความสูงของตัวอย่าง (ซม.) และ H คือระยะระหว่างระดับน้ำที่ทางออกทั้งสองทาง (ซม.) ภาพที่ 4 แสดงชุดทดสอบค่าความซึมผ่านน้ำของตัวอย่าง

$$k = (Q.L)/(t.H.A) \quad (1)$$



ภาพที่ 3 แบบจำลองการวัดค่าการซึมผ่านน้ำ

2.3.5 การทดสอบหาอัตราส่วนโพรง (Void ratio)

ทดสอบหาอัตราส่วนโพรงโดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างในน้ำ โดยแช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวอย่างอิ่มน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักในน้ำค่าที่ได้คือ w_1 (กรัม) ทั้งตัวอย่างให้แห้งในอากาศในห้องที่มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60



ภาพที่ 4 ชุดทดสอบค่าความชื้นน้ำ

เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตัวอย่างที่ได้จะอยู่ในสภาพพร้อมตัวผิวแห้ง ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างค่าที่ได้คือ W_2 (กรัม) ทำการวัดขนาดตัวอย่างเพื่อคำนวณหาปริมาตรตัวอย่าง V_1 (ลบ.ซม.) และค่าอัตราส่วนโพรงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 [4]

$$\text{Void ratio (\%)} = [1 - (W_2 - W_1) / V_1] \times 100 \quad (2)$$

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม หยาบพบว่า มวลรวมหยาบมีค่าโมดูลัสความละเอียดใกล้เคียงกันทั้งนี้เนื่องจากผ่านการคัดขนาดให้มีช่วงขนาดหินอยู่ระหว่าง 4.8-9.5 มม. โดย RC และ RB มีค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักน้อยกว่า LS และมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า LS ประมาณ 10-11 เท่าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรักษ์ [2] ทั้งนี้เนื่องจาก RC และ RB มีซีเมนต์เพสต์ที่ยึดเกาะระหว่างมวลรวมเดิมผสมอยู่ ซึ่งเนื้อซีเมนต์เพสต์ดังกล่าวมีรูพรุน โดยเฉพาะ RB จะมีความพรุนสูงกว่า RC เพราะ RB เกิดจากการนำคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวต่ำมาอัดขึ้นรูปบล็อก (ดังแสดงในภาพที่ 5) ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักและความถ่วงจำเพาะของ RC น้อยกว่า RB นอกจากนี้ RC และ RB ยังมีความแข็งแรงน้อยกว่า LS เพราะมีค่าการสึกกร่อน

มากกว่าและเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 31 [13] พบว่า RC มีค่าการสึกกร่อนได้มาตรฐาน แต่ RB มีค่าการสึกกร่อนมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ซึ่งไม่ได้มาตรฐาน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม

Properties	LS	RC	RB
Fineness Modulus	5.95	5.57	5.83
Dry-Rodded Weight (kg/m ³)	1,399	1,294	1,242
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.70	2.53	2.49
Absorption (%)	0.46	4.58	5.18
Abrasion Loss (%)	30.2	43.2	52.0



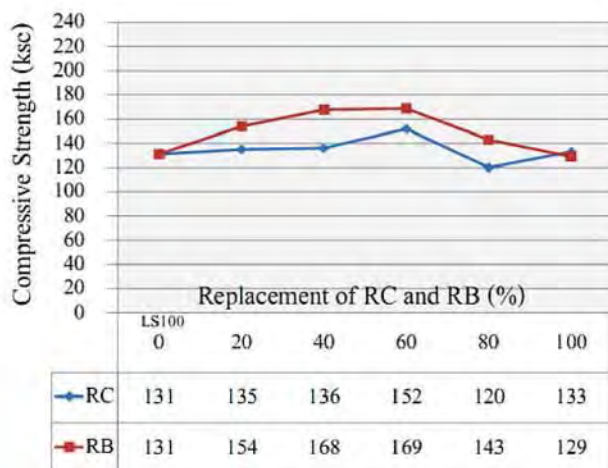
รูปที่ 5 ลักษณะของมวลรวม

3.2 ผลการทดสอบคอนกรีตพูน

3.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันแสดงในภาพที่ 6 พบว่า สำหรับตัวอย่างที่มวลรวมถูกแทนที่ด้วย RB จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าตัวอย่าง LS100 และ

เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของ RB และสูงสุดที่ปริมาณการแทนที่ระหว่าง 40- 60 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นกำลังรับแรงอัดจึงลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่อง RB เกิดการแตกหักระหว่างขั้นตอนการผสมและการอัดแน่นทำให้ RB มีขนาดเล็กและเข้าแทรกอยู่ระหว่าง LS ทำให้มีจุดเชื่อมต่อสัมผัสระหว่างมวลรวมเพิ่มมากขึ้นกำลังรับแรงอัดจึงค่อยๆพัฒนาสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มมากขึ้น และตัวอย่าง RB60 เป็นตัวอย่างที่ทำให้มวลรวมมีสัดส่วนเหมาะสมที่สุดจึงให้กำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด จากนั้นเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์กำลังรับแรงอัดจึงเริ่มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงของ RB น้อยกว่า LS แต่อย่างไรก็ตามตัวอย่าง RB80 ยังคงให้กำลังที่สูงกว่าตัวอย่าง LS100 ทั้งนี้เนื่องจาก RB ที่มีขนาดเล็กทำให้เกิดจุดสัมผัสกันระหว่างมวลรวมมากกว่าตัวอย่าง LS100 และตัวอย่าง RB100 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกับตัวอย่าง LS100



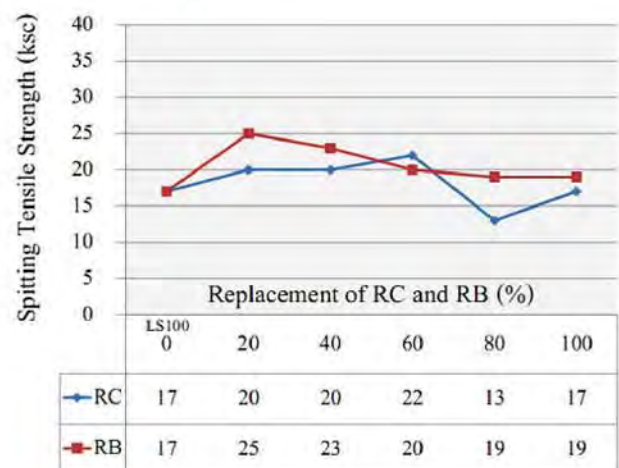
ภาพที่ 6 กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

สำหรับตัวอย่างที่มวลรวมถูกแทนที่ด้วย RC จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกับตัวอย่าง LS100 ทั้งนี้เนื่องจาก RC มีความแข็งแรงมากกว่า RB ทำให้ระหว่างขั้นตอนการผสมและการอัดแน่นเกิดการแตกหักเพียงเล็กน้อย ดังจุดสัมผัสระหว่างมวลรวมจึงยังคงใกล้เคียงกับตัวอย่าง LS100 โดยกำลังรับแรงอัดเป็นผลจากความ

แข็งแรงของจุดสัมผัสระหว่างมวลรวมดังนั้นจึงให้กำลังที่ใกล้เคียงกัน

3.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วันแสดงในภาพที่ 7 พบว่ากำลังรับแรงดึงของตัวอย่างที่มวลรวมถูกแทนที่ด้วย RC และ RB นั้นจะมีค่ามากกว่าตัวอย่าง LS100 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ จิระศักดิ์ และคณะ [14] และงานวิจัยของ ฉัตร และคณะ [3] เนื่องจาก RC และ RB มีเนื้อพรุนกว่า LS ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่ากำลังรับแรงดึงจึงเพิ่มขึ้น และตัวอย่างที่มวลรวมถูกแทนที่ด้วย RB มีแนวโน้มที่ให้กำลังรับแรงดึงสูงกว่า RC ทั้งนี้เนื่องจากการแตกหักของ RB ทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น จึงมีจุดสัมผัสระหว่างมวลรวมมากกว่ากำลังจึงสูงกว่า

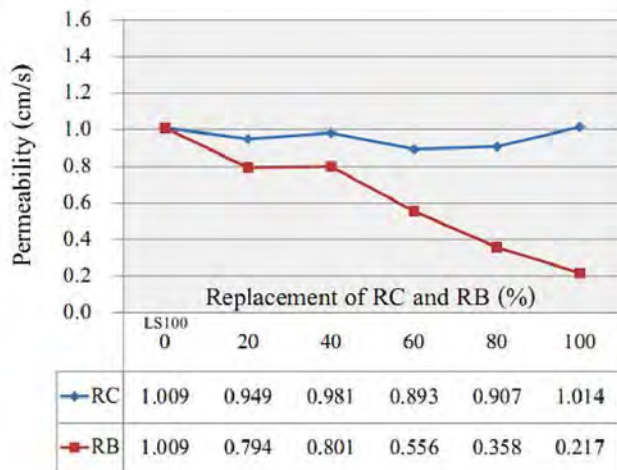


ภาพที่ 7 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน

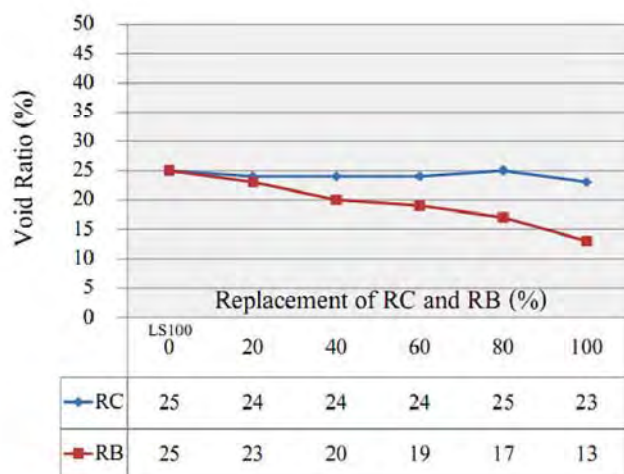
3.2.3 การทดสอบค่าความชื้นน้ำและอัตราส่วนโพรง

ภาพที่ 8 และภาพที่ 9 แสดงผลการทดสอบความชื้นผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรงตามลำดับพบว่า ตัวอย่างที่ถูกแทนที่ด้วย RC ทุกปริมาณการแทนที่มีค่าการซึมผ่านน้ำที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักซึ่งสอดคล้องกับผลของอัตราส่วนโพรง โดยมีค่าการซึมผ่านน้ำอยู่ระหว่าง 0.893-1.014 ซม./วินาที และอัตราส่วนโพรง 23-25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่าง LS100 สำหรับตัวอย่างที่มวลรวมถูกแทนที่ด้วย RB จะมีค่าการซึมผ่านน้ำและ

อัตราส่วนโพรงลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นทั้ง เนื่องจากการแตกหักของ RB ในระหว่างการผสมและการอัดแน่น ทำให้ RB เล็กกลงเข้าไปแทรกระหว่างโพรง ทำให้ช่องว่างลดลง



ภาพที่ 8 การซึมผ่านน้ำ

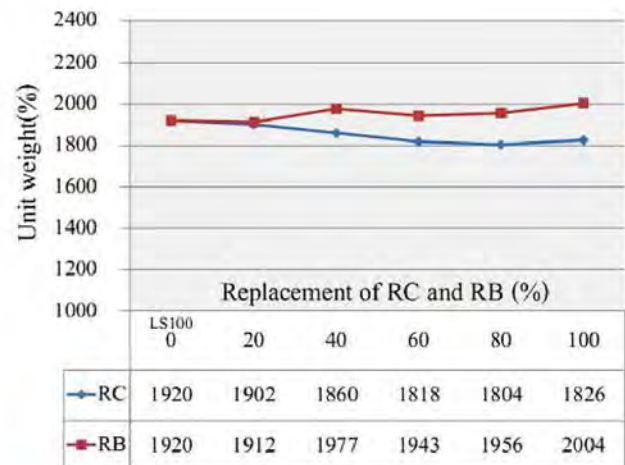


ภาพที่ 9 อัตราส่วนโพรง

3.2.4 การทดสอบหน่วยน้ำหนัก

ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักพบว่า หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน โดยตัวอย่างที่มวลรวมถูกแทนที่ด้วย RC จะมีหน่วยน้ำหนักลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งหน่วยน้ำหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 1,804-1,920 กก./ม.³ ทั้งนี้เนื่องจาก RC มีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่า LS เมื่อตัวอย่างมีอัตราส่วนโพรงใกล้เคียงกัน หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างที่มวลรวมถูกแทนที่ด้วย RC จึงน้อยกว่า สำหรับตัวอย่างที่มวลรวม

ถูกแทนที่ด้วย RB จะให้หน่วยน้ำหนักที่มากขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1,912 - 2,004 กก./ม.³ ทั้งนี้เนื่องจากการแตกหักของ RB ในระหว่างการผสมและการอัดแน่นทำให้ RB มีขนาดเล็กลง เปอร์เซ็นต์อัตราส่วนโพรงจึงลดลงทำให้หน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 10 หน่วยน้ำหนัก

3.3 ผลการทดสอบศิลาแลง

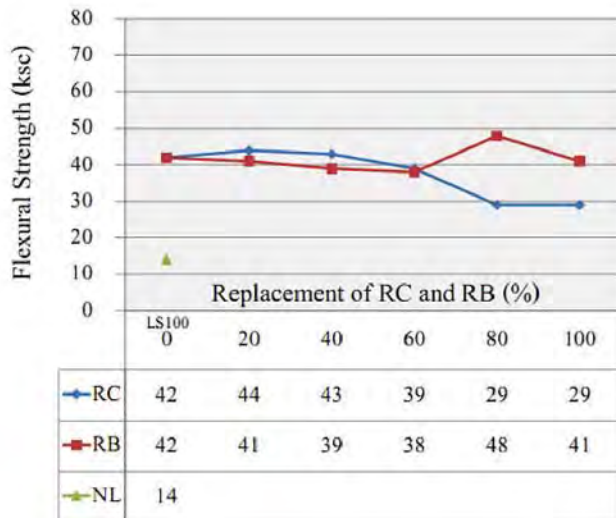
3.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วันของก้อนศิลาแลงประดิษฐ์แสดงในภาพที่ 11 พบว่า กำลังรับแรงดัดของก้อนศิลาแลงประดิษฐ์ทุกส่วนผสมมีค่าสูงกว่าศิลาแลงธรรมชาติ (NL) มาก 2.0-3.5 เท่า โดยตัวอย่างที่มวลรวมถูกแทนที่ด้วย RB มีแนวโน้มที่กำลังรับแรงดัดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้ยังคงเป็นผลจากการแตกหักของ RB สำหรับตัวอย่างที่มวลรวมถูกแทนที่ด้วย RC มีแนวโน้มที่กำลังรับแรงดัดจะลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นเพราะ RC มีความแข็งแรงน้อยกว่า LS

3.3.2 การทดสอบหาอัตราส่วนโพรงและหน่วยน้ำหนักของศิลาแลง

ผลการทดสอบอัตราส่วนโพรงและหน่วยน้ำหนักของก้อนศิลาแลงประดิษฐ์และศิลาแลงธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าศิลาแลงประดิษฐ์จะมีหน่วยน้ำหนัก

น้อยกว่าศิลาแลงธรรมชาติ และมีความอัตราส่วนโพรงมากกว่า ดังนั้น โครงสร้างของศิลาแลงประดิษฐ์จะให้ค่าการซึมผ่านน้ำที่สูงกว่าและมีความแข็งแรงมากกว่าศิลาแลงธรรมชาติ



ภาพที่ 11 กำลังรับแรงดัด

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอัตราส่วนโพรงและหน่วยน้ำหนักของศิลาแลง

Properties	Synthetic Laterite	Natural Laterite
Void Ratio (%)	13-25	4
Unit weight (kg/m ³)	1,804-2,004	2,233

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

4.1.1 สรุปผลของการแทนที่ LS ด้วย RC และ RB ของคอนกรีตพูน

ตัวอย่างคอนกรีตพูนที่ LS ถูกแทนที่ด้วย RB จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกสูงขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนโพรงและค่าการซึมผ่านน้ำจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก RB เกิดการแตกหักระหว่างผสมทำให้มีขนาดเล็กลง เข้าแทรกตัวอยู่ระหว่าง LS ทำให้จุดสัมผัสระหว่างมวลรวมเพิ่มมากขึ้น และโพรงช่องว่างลดลง สำหรับส่วนผสมคอนกรีตพูนที่ LS ถูกแทนที่ด้วย RC

พบว่าปริมาณการแทนที่มีผลเล็กน้อยต่อค่ากำลังรับแรงอัด อัตราส่วนโพรงและหน่วยน้ำหนัก แต่จะมีผลต่อกำลังดึงแบบผ่าซีก ทั้งนี้เนื่องจากกำลังของคอนกรีตพูนเกิดจากความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์ที่ยึดเกาะระหว่างมวลรวม ซึ่งมวลรวมทั้ง LS และ RC มีขนาดเดียวกันทำให้กำลังอัดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

4.1.2 สรุปผลการทดสอบศิลาแลง

ศิลาแลงประดิษฐ์ที่ได้จะมีกำลังรับแรงดัดที่สูงกว่าศิลาแลงธรรมชาติและยังมีหน่วยน้ำหนักที่น้อยกว่า

4.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาถึงการพัฒนาลีและความพูนให้ใกล้เคียงกับศิลาแลงธรรมชาติ ดังนั้นควรมีการพัฒนาด้านลีและการเติมปริมาณทรายละเอียดเข้าไปในส่วนผสมเพื่อให้มีโครงสร้างใกล้เคียงศิลาแลงตามธรรมชาติมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนานักวิจัยใหม่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปี 2553, ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานของอาจารย์รุ่นใหม่ สกว. (MRG5480004) ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และบริษัท ชีก้า (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุศักดิ์ ภู่อันติพงษ์, รักษ์ บุณณสิงห์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547. การใช้คอนกรีตที่ทดสอบกำลังอัดแล้วเพื่อเป็นมวลรวมของคอนกรีต. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, กันยายน, หน้า 22-31.
- [2] รักษ์ บุณณสิงห์, 2547. การศึกษาการรับกำลังของคอนกรีตเมื่อใช้ มวลรวมจากเศษคอนกรีตรวมกับเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้. วิทยานิพนธ์ระดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- [3] ฉัตร ประยูรหาญ, รัชพงศ์ ทองเฉลิม และพิทักษ์ สิมมา, 2551. คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เสริมอิฐบล็อกแทนมวลรวมหยาบ. รายงานโครงการหมายเลข CE2007-12 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [4] ถนัดกิจ ชาริรัตน์, ปริญา จินดาประเสริฐ และ Shigemitsu Hatanaka, 2551. คอนกรีตพูน: คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, จอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา จ. ชลบุรี.
- [5] นท แสงเทียน, ภัทราวรรณ พันธุ์สุวรรณ นรินทร์ สนุกพันธ์ และกิตติศักดิ์ ขันติวิชัย, 2548. ศิลาลงเทียม. วิศวกรรมสาร มข., ปีที่ 32, ฉบับที่ 4 (577-584), กรกฎาคม-สิงหาคม.
- [6] ASTM C 136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- [7] ASTM C 29. Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate.
- [8] ASTM C 127. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- [9] ASTM C 131. Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- [10] ASTM C 39. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [11] ASTM C 496. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [12] ASTM C 293. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading).
- [13] ASTM C 31. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.
- [14] จิระศักดิ์ จันทร์คำ, ฉัตรชัย ส่วงวิสุทธิ, ณัฐวุฒิ ศรีวิรัมย์ และภาณุพันธ์ ไชแสงจันทร์, 2543. การนำเศษคอนกรีตเก่ากลับมาใช้ใหม่. รายงานโครงการหมายเลข CE99-2 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

คอนกรีตพรุนจากมวลรวมรีไซเคิล Porous Concrete with Recycled Aggregate

อำพล วงศ์ษา¹, ยุวดี แซ่ตั้ง², วันชัย สะตะ³ และ ปริญญ์ จินดาประเสริฐ⁴

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

E-mail: ¹ tam_hatori@hotmail.com, ² ju130@yahoo.com, ³ vancsa@kku.ac.th, ⁴ prinya@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำมวลรวมรีไซเคิลมาใช้ในการงานคอนกรีตพรุน โดยทำการศึกษสมบัติของคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตรีไซเคิล คอนกรีตบล็อกรีไซเคิล และอิฐมวลยวรีไซเคิล เปรียบเทียบกับมวลรวมธรรมชาติคือหินปูน ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโพรงโดยปรับเปลี่ยนปริมาณของเพลสต์ที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานมวลรวมหยาบเป็น 14, 18 และ 22 เปอร์เซ็นต์ของส่วนผสม โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก ค่าการซึมผ่านของน้ำ ค่าอัตราส่วนโพรง ค่าหน่วยน้ำหนัก และค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีของผิวหน้า ผลการวิจัยพบว่า คอนกรีตพรุนที่ได้จากมวลรวมรีไซเคิลให้กำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตพรุนที่ได้จากมวลรวมธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตพรุนที่ได้จากคอนกรีตรีไซเคิลมีแนวโน้มในการปรับปรุงกำลังดึงแยกดีขึ้น คอนกรีตพรุนที่ได้จากคอนกรีตบล็อกรีไซเคิลมีแนวโน้มในการปรับปรุงการซึมผ่านน้ำ และคอนกรีตพรุนที่ได้จากอิฐมวลยวรีไซเคิลจะให้หน่วยน้ำหนักที่ลดลงน้อยที่สุด นอกจากนี้ปริมาณเพลสต์ที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมยังสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: คอนกรีตพรุน, มวลรวมรีไซเคิล, ความซึมผ่านของน้ำ

Abstract

This research aimed to study the use of recycled aggregate in porous concrete. The properties of porous concrete containing recycled aggregates as coarse aggregates were evaluated and compared with porous concrete containing natural aggregates (Limestone) in order to examine the effect of paste volume on properties, the paste volumes were varied at 14, 18 and 22 percent. The compressive strength, splitting tensile strength, water permeability, porosity, unit weight, and surface abrasion resistance of porous concrete were tested. The results showed that the porous concrete containing recycled aggregate tended to decrease in compressive strength. However, the porous concrete containing recycled concrete tended to improve splitting tensile strength, the porous concrete containing recycled concrete block tended to improve water permeability, and the porous concrete containing recycled clay brick were reached the lowest unit weight. In addition, an increase of paste volume significantly improved the mechanical properties.

Keywords: Porous concrete, Recycled aggregate, Water permeability

1. บทนำ

คอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตที่มีโพรงหรือช่องว่างจำนวนมากภายในโครงสร้างของเนื้อคอนกรีต ซึ่งได้จากการผสมระหว่างหินกับซีเมนต์เพลสต์ในปริมาณที่เพียงพอต่อการเชื่อมประสานกัน โดยไม่ใช้ทรายเป็นวัสดุในส่วนผสมของคอนกรีตพรุน จึงยอมให้น้ำและอากาศสามารถไหลผ่านเข้าออกได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ทำให้ปัญหาการท่วมขังของน้ำลดลงได้ คอนกรีตพรุนจึงเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้งานพื้นผิวทางที่ไม่ได้รับน้ำหนักมากนัก เช่น พื้นทางเดินในสวนสาธารณะ พื้นซอกข้างในครัวเรือน ลานจอดรถ เป็นต้น ปัจจุบันคอนกรีตพรุนมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในต่างประเทศอาทิเช่น ญี่ปุ่น อังกฤษ อเมริกา และออสเตรเลีย [1-2] แต่สำหรับประเทศไทยแล้วคอนกรีตพรุนยังถือเป็นวัสดุที่ใหม่มีการนำมาประยุกต์ใช้น้อย เนื่องจากยังไม่มีมาตรฐานการทดสอบและการออกแบบส่วนผสมที่แน่นอน คอนกรีตพรุนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจที่จะทำการศึกษาและพัฒนาให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานให้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

มวลรวมรีไซเคิลเป็นมวลรวมที่ได้จากการนำเศษวัสดุที่เหลือทิ้งจากการใช้งานก่อสร้างหรือเกิดจากการรื้อถอนสิ่งปลูกสร้างที่มีสภาพทรุดโทรมหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่แทนการใช้มวลรวมธรรมชาติ โดยทั่วไปเศษวัสดุเหล่านั้นมักถูกนำไปใช้เป็นวัสดุถมที่หรือถูกกองทิ้งไว้ไม่ได้ นำมาใช้ประโยชน์ การนำเศษวัสดุมาใช้ประโยชน์เป็นมวลรวมรีไซเคิลแทนการใช้มวลรวมจากธรรมชาตินั้น ถือได้ว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุให้มากขึ้นและเป็นการลดปริมาณของขยะที่ย่อยสลายยากลงได้อีกด้วย ปัจจุบันได้มีการศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวกับมวลรวมรีไซเคิลกันอย่างแพร่หลาย จึงทำให้พบว่าเศษวัสดุสามารถนำกลับมาใช้ใหม่เป็นมวลรวมรีไซเคิลแทนการใช้มวลรวมจากธรรมชาติเช่น เศษคอนกรีตจากห้องปฏิบัติการที่ผ่านการทดสอบแล้ว สามารถนำมาทุบหรือย่อยให้มีขนาดเล็กลงและใช้ทดแทนมวลรวมธรรมชาติได้ จะทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดลดลงจากคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 13-15 [3] เศษคอนกรีตบล็อกเมื่อใช้เป็นมวลรวมรีไซเคิลในคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตที่ได้มีกำลังดึงและกำลังดึงแยกที่สูงกว่าคอนกรีตที่ได้จากมวลรวมธรรมชาติ [4] เศษอิฐหรืออิฐรีไซเคิลสามารถนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในคอนกรีตได้ไม่เกินร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ของการแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดตามลำดับ จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดียอมรับได้ [5]

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเศษคอนกรีต เศษคอนกรีตบล็อก และเศษอิฐมวลยวสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมรีไซเคิลในงานคอนกรีตแทนมวลรวมจากธรรมชาติได้ ทำให้ทรัพยากรธรรมชาติถูกรับร่นน้อยลง

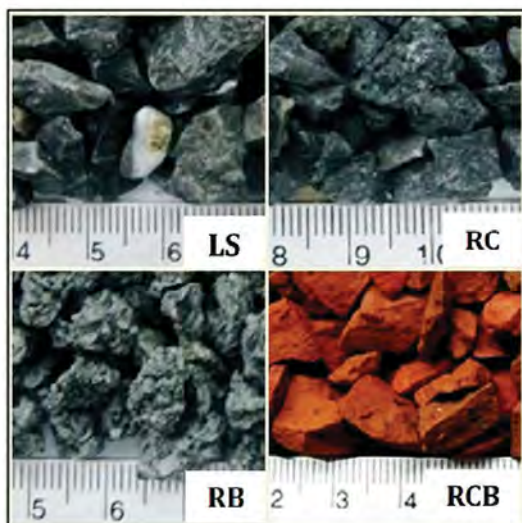
และส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้นอีกด้วย อีกทั้งในปัจจุบันพบว่า การศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวกับการนำมวลรวมรีไซเคิลมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตพูนยังมีอยู่เพียงเล็กน้อย ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษากับการนำมวลรวมรีไซเคิลซึ่งได้แก่ คอนกรีตรีไซเคิล (RC) คอนกรีตบล็อกรีไซเคิล (RB) และอิฐมวลเบารีไซเคิล (RCB) มาใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนมวลรวมธรรมชาติ (LS) ในการผลิตคอนกรีตพูน ทำการศึกษาสมบัติทางกำลังและทางกายภาพของคอนกรีตพูน ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก อัตราส่วนโพรง ค่าการซึมผ่านของน้ำ ค่าหน่วยน้ำหนัก และค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการชดเชยของผิวหน้าของคอนกรีตพูน

2. วัสดุทดสอบ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- สารลดน้ำพิเศษ Type FF (เมลามีน)
- มวลรวมหยาบ ได้แก่ คอนกรีตรีไซเคิล (RC), คอนกรีตบล็อกรีไซเคิล (RB), อิฐมวลเบารีไซเคิล (RCB) และหินปูน (LS) ที่ผ่านการย่อยและคัดขนาดอยู่ระหว่าง 4.5 – 9.5 มิลลิเมตรดังรูปที่ 1 โดยทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 136 [6], หน่วยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C 29 [7], ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C 127 [8] และค่าการสึกกร่อนตามมาตรฐาน ASTM C131 [9] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติจำเพาะของมวลรวมหยาบ

สมบัติจำเพาะ	LS	RC	RB	RCB
โมดูลัสความละเอียด	6.06	5.57	5.80	6.21
หน่วยน้ำหนักกระทุ้งแน่น (กก/ม ³)	1549	1342	1242	948
ความถ่วงจำเพาะ (อิมตัวผิวแห้ง)	2.72	2.53	2.49	2.02
การดูดซึมน้ำ (%)	0.21	4.58	5.18	16.2
การสึกกร่อน (Los Angeles) (%)	23.8	30.1	46.4	46.9



รูปที่ 1 ลักษณะของมวลรวมหยาบ

3. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตพูน

3.1 ขนาดตัวอย่าง

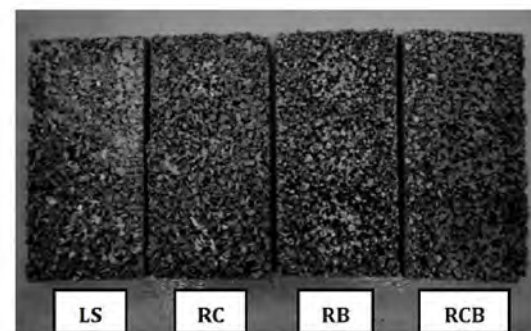
ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึงแยก, อัตราส่วนโพรง, ค่าการซึมผ่านของน้ำ และค่าหน่วยน้ำหนัก ดังรูปที่ 2 และใช้ตัวอย่างปริซึมขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และหนา 3 เซนติเมตร สำหรับทดสอบค่าการสูญเสีย น้ำหนักจากการชดเชยของผิวหน้า ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ตัวอย่างทรงกระบอก

3.2 ส่วนผสม

ส่วนผสมคอนกรีตพูนใช้มวลรวมรีไซเคิล 3 ชนิดได้แก่ คอนกรีตรีไซเคิล (RC), คอนกรีตบล็อกรีไซเคิล (RB) และอิฐมวลเบารีไซเคิล (RCB) มาใช้เป็นมวลรวมหยาบในการผลิตคอนกรีตพูน เปรียบเทียบกับคอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมธรรมชาติหรือหินปูน (LS) และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณซีเมนต์เพสต์เป็น 14, 18 และ 22 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของส่วนผสม ใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.24 และสารลดน้ำพิเศษ Type FF เท่ากับ 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อควบคุมค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 170-180 มิลลิเมตร [10] ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตพูนแสดงดังตารางที่ 2 ตัวอย่างการใช้สัญลักษณ์ เช่น LS14 คือส่วนผสมคอนกรีตพูนที่ใช้ LS เป็นมวลรวมหยาบและมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 14 โดยปริมาตรของส่วนผสม



รูปที่ 3 ตัวอย่างแผ่นปูทางเดิน

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตพรุน (1 ลูกบาศก์เมตร)

Sample	Coarse Aggregate (kg/m ³)				Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
	LS	RC	RB	RCB			
LS14	1521	-	-	-	251	60	3.1
LS18	1521	-	-	-	323	77	4.0
LS22	1521	-	-	-	395	95	4.9
RC14	-	1298	-	-	251	60	3.1
RC18	-	1298	-	-	323	77	4.0
RC22	-	1298	-	-	395	95	4.9
RB14	-	-	1228	-	251	60	3.1
RB18	-	-	1228	-	323	77	4.0
RB22	-	-	1228	-	395	95	4.9
RCB14	-	-	-	1133	251	60	3.1
RCB18	-	-	-	1133	323	77	4.0
RCB22	-	-	-	1133	395	95	4.9

3.3 ขั้นตอนการผสมและการเตรียมตัวอย่าง

การผสมและการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตพรุนเริ่มจากการผสมซีเมนต์เพสต์โดยนำปูนซีเมนต์ น้ำ และสารผสมลดน้ำพิเศษ มาผสมรวมกันในเครื่องผสมคอนกรีตพรุน จนส่วนผสมทั้งหมดมีความเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำมวลรวมทรายในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งที่ได้เตรียมไว้ ผสมรวมกับซีเมนต์เพสต์ในเครื่องผสมคอนกรีตพรุน จนคอนกรีตพรุนมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ทำการตักส่วนผสมคอนกรีตพรุนใส่ในแบบหล่อขนาดต่างๆให้ได้น้ำหนักของส่วนผสมตามที่ออกแบบไว้ แล้วทำการอัดแน่นตัวอย่างโดยใช้ตะขี่ยาให้ได้ระดับตามปริมาตรของแบบหล่อ หุ้มปากแบบหล่อด้วยพลาสติกใสเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของคอนกรีตพรุน แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการแกะแบบหล่อ แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตพรุนเข้าห้องบ่มแบบบ่มชื้น จนตัวอย่างมีอายุครบตามการทดสอบ

4. การทดสอบคอนกรีตพรุน

4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

นำตัวอย่างที่บ่มรักษาความชื้นจนอายุทดสอบครบ 28 วัน มาเคลือบหัวและท้ายด้วยกัมมะถัน แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 [11]

4.2 การทดสอบกำลังดึงแยกแบบผ่าซีก

ทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของตัวอย่างทรงกระบอกที่บ่มรักษาความชื้นจนอายุทดสอบครบ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 496 [12]

4.3 การทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ

การทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำตัวอย่างทรงกระบอกโดยใช้หลักการของ Darcy's Law ซึ่งทดสอบโดยวิธีแรงดันคงที่ (Constant Head Method) [13] โดยทำการจำลองการทดสอบได้ดังรูปที่ 4 เริ่มจากนำตัวอย่างติดตั้งเข้ากับชุดทดสอบ ปลอยน้ำไหลเข้าสู่ชุดทดสอบ โดยน้ำไหลจะผ่านตัวอย่างไป ควบคุมระดับน้ำที่ไหลออกจากชุดทดสอบทั้ง

สองให้คงที่ แล้ววัดปริมาณน้ำด้วยการชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณหาปริมาตรน้ำ เทียบกับเวลา ซึ่งค่าการซึมผ่านน้ำสามารถคำนวณได้สมการ (1) รูปที่ 5 แสดงชุดทดสอบค่าความซึมผ่านของตัวอย่าง

$$k = (Q.L)/(t.H.A) \quad (1)$$

k คือ ค่าการซึมผ่านน้ำ (ซม./วินาที)

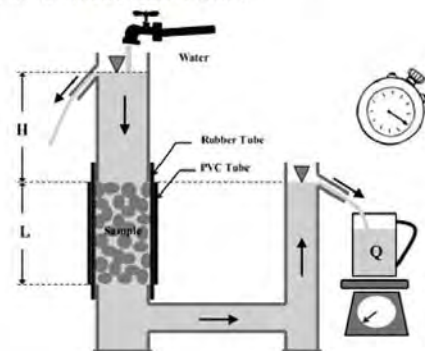
Q คือ ปริมาตรน้ำ (ซม.³)

L คือ ความสูงของตัวอย่าง (ซม.)

t คือ เวลา (วินาที)

H คือ ระยะห่างของระดับน้ำทางออกทั้งสองข้าง (ซม.)

A คือ ขนาดหน้าตัดของตัวอย่าง (ซม.²)



รูปที่ 4 แบบจำลองการวัดค่าการซึมผ่านน้ำ



รูปที่ 5 ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ

4.4 การทดสอบหาอัตราส่วนโพรง

นำตัวอย่างที่ผ่านการแช่น้ำแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมงชั่งน้ำหนักในน้ำ ค่าที่ได้คือ W_1 (กรัม) ทั้งตัวอย่างให้แห้งในอากาศหรืออุณหภูมิห้อง จนตัวอย่างที่ได้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่าง ค่าที่ได้คือ W_2 (กรัม) ทำการวัดขนาดตัวอย่างเพื่อคำนวณหาปริมาตรตัวอย่าง V (ซม.³) และค่าอัตราส่วนโพรงสามารถคำนวณได้จากสมการ (2) [14]

$$\text{Void ratio}(\%) = [1 - (W_2 - W_1)/V] \times 100 \quad (2)$$

4.5 การทดสอบการขัดสีของผิวหน้า

ทำการทดสอบหาการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนของผิวหน้าโดยวิธี Rotating cutter ตามมาตรฐาน ASTM C 944 [15] ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ

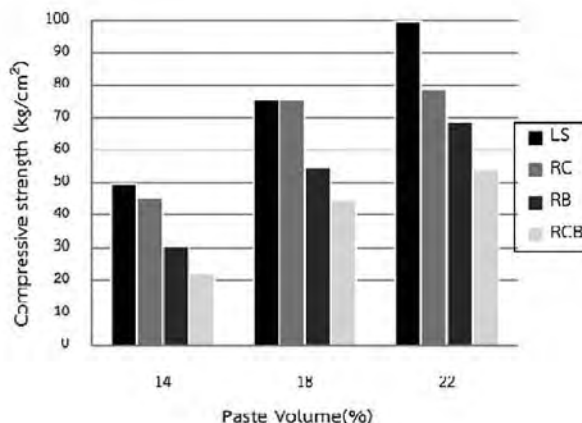
โดยนำตัวอย่างออกจากห้องบ่มและทิ้งให้แห้งเป็นเวลา 1 วัน (สภาพแห้งในอากาศ) นำตัวอย่างที่จะทดสอบเป่าด้วยลม เพื่อกำจัดเศษฝุ่นต่างๆออก แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนทดสอบ นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ แล้วทำการทดสอบวัดผิวหน้าเป็นเวลา 2 นาที ใช้น้ำหนักในการกด 98 นิวตัน จากนั้นนำตัวอย่างเป่าทำความสะอาดอีกครั้ง แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบ ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการสึกกร่อนของผิวหน้า คือ ค่าผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังทดสอบ

5. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันแสดงดังรูปที่ 7 พบว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์โพสท์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่ใช้น้ำมวลรวมรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบจะมีกำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำมวลรวมหยาบ เนื่องจาก LS เป็นหินปูนจากธรรมชาติที่มีความแข็งแรงมากกว่าและค่าการสึกกร่อนที่น้อยกว่ามวลรวมรีไซเคิลนั่นเอง โดยคอนกรีตที่ใช้น้ำมวลรวมรีไซเคิล (RC) จะให้กำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำมวลรวมหยาบ (RB และ RCB) เนื่องจาก RB มีรูพรุนมากและลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ จึงต้องการปริมาณโพสท์ในการยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมที่มากกว่ามวลรวมชนิดอื่น ทำให้กำลังรับแรงอัดของ RB มีค่าลดลง ส่วน RCB จะมีค่ากำลังที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับหินชนิดอื่น เนื่องจาก RCB เป็นอิฐมวลเบาที่ได้จากการนำดินเหนียวมาเผา ซึ่งในขั้นตอนของการผสม เนื้อดินเหนียวบริเวณผิวของ RCB จะเกิดการหลุดร่อนออกมาได้ตลอดเวลาเนื่องจากการขัดสีกันระหว่างมวลรวม จึงทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์โพสท์กับ RCB ที่ไม่แข็งแรงเมื่อเทียบกับหินชนิดอื่น ส่งผลให้ RCB มีกำลังรับแรงอัดที่น้อยที่สุด

เมื่อปริมาณของซีเมนต์โพสท์ในส่วนผสมมากขึ้น คอนกรีตที่ใช้น้ำมวลรวมรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบจะมีกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีเมนต์โพสท์ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตที่ได้จาก LS เนื่องจากปริมาณซีเมนต์โพสท์ที่เพิ่มขึ้นนั้น จะทำให้การยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมดีขึ้น คอนกรีตที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ช่องว่างหรืออัตราส่วนโพรงลดลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงอัดได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้น การเพิ่มปริมาณของซีเมนต์โพสท์ในส่วนผสมจะทำให้คอนกรีตจากมวลรวมรีไซเคิลมีกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นด้วย

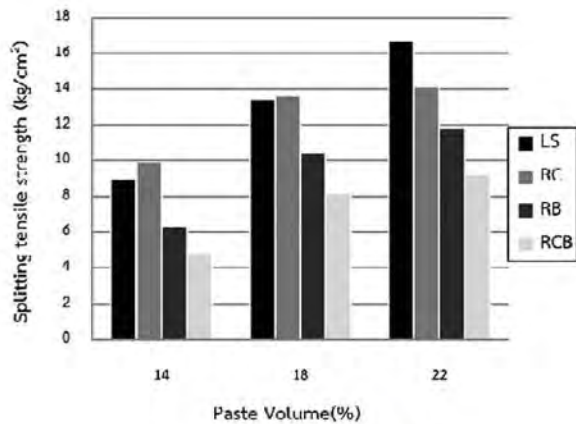


รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัด

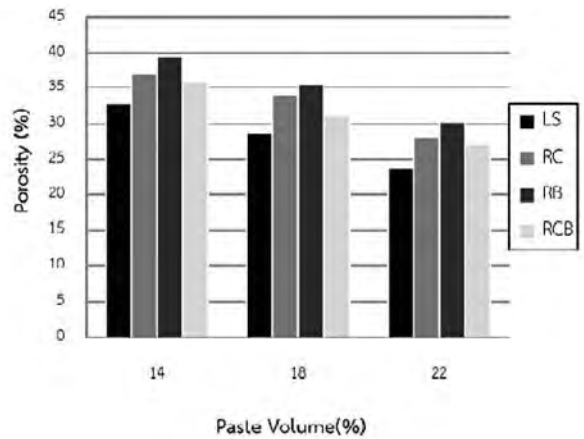
5.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วันแสดงดังรูปที่ 8 พบว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์โพสท์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่ใช้น้ำมวลรวมรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบจะมีกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่มากกว่าคอนกรีตที่ได้จาก LS ยกเว้นที่ปริมาณซีเมนต์โพสท์ 22 % จะมีค่าน้อยกว่า ส่วนคอนกรีตที่ใช้น้ำมวลรวมหยาบ (RB และ RCB) เป็นมวลรวมหยาบ จะมีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้น้ำมวลรวมรีไซเคิล (RC) ซึ่งสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในหัวข้อที่ 5.1 คือ RB มีรูพรุนมากและผิวสัมผัสที่ค่อนข้างขรุขระ จึงต้องการปริมาณโพสท์เพื่อเชื่อมประสานที่มากกว่ามวลรวมชนิดอื่น ส่วน RCB เป็นมวลรวมที่มีดินเหนียวเผาเป็นองค์ประกอบหลัก มักเกิดการหลุดร่อนได้ตลอดเวลาที่เกิดการขัดสี และมีการยึดเกาะกันที่ไม่แข็งแรงระหว่างซีเมนต์โพสท์กับมวลรวม ส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้น้ำมวลรวมรีไซเคิล (RB และ RCB) เป็นมวลรวมหยาบมีค่ากำลังรับแรงดึงที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้น้ำมวลรวมรีไซเคิล (LS และ RC)

เมื่อปริมาณของซีเมนต์โพสท์เพิ่มขึ้น พบว่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีเมนต์โพสท์ เนื่องจากปริมาณโพสท์ที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมจะทำให้คอนกรีตมีการยึดเกาะกันดีขึ้น โพรงหรือช่องว่างลดลง ความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีต ทำให้สามารถรับแรงดึงแบบผ่าซีกได้มากขึ้น ดังนั้น การเพิ่มปริมาณของซีเมนต์โพสท์ในส่วนผสมจะทำให้คอนกรีตจากมวลรวมรีไซเคิลมีกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 8 กำลังรับแรงดึงแยกแบบผ่าซีก

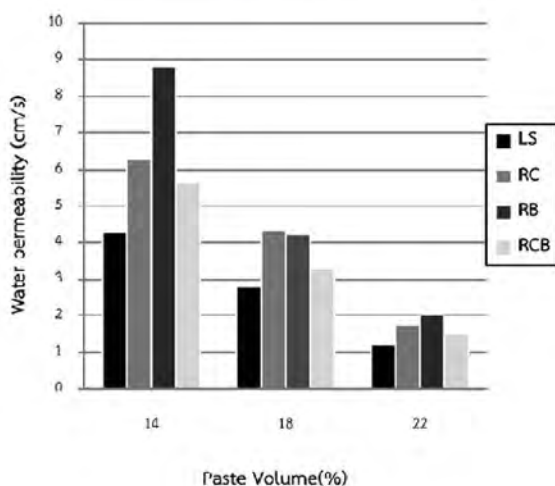


รูปที่ 10 อัตราส่วนโพรง

5.3 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรง

ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรงแสดงดังรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์เฟสที่เท่ากัน คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบ จะมีค่าการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรงที่มากกว่าคอนกรีตพูนที่ได้จาก LS หรือมวลรวมธรรมชาติเป็นมวลรวมหยาบ โดยคอนกรีตพูนที่ใช้ RB จะมีการซึมผ่านน้ำที่ต่ำและมากที่สุด เนื่องจาก RB เป็นมวลรวมที่ได้จากคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวต่ำ มีรูพรุนในตัวเองสูง และมีผิวสัมผัสที่ค่อนข้างขรุขระมาก จึงทำให้มีโพรงช่องว่างหรือค่าอัตราส่วนโพรงที่มากกว่ามวลรวมชนิดอื่น ด้วยโพรงหรือช่องว่างที่มากขึ้นจะให้น้ำหรืออากาศสามารถไหลผ่านเข้าออกได้ดี ส่งผลให้มีการซึมผ่านน้ำที่มากขึ้นนั่นเอง

เมื่อปริมาณของซีเมนต์เฟสที่เพิ่มขึ้น คอนกรีตพูนจากมวลรวมรีไซเคิลและมวลรวมธรรมชาติจะมีการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรงที่ลดลงตามปริมาณของซีเมนต์เฟสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณซีเมนต์เฟสที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมจะทำให้คอนกรีตพูนมีโพรงหรือช่องว่างที่ลดลง คอนกรีตพูนมีความทึบและความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านน้ำจึงลดลงด้วย ดังนั้น การเพิ่มปริมาณซีเมนต์เฟสในส่วนผสมจะทำให้ความสามารถในการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรงของคอนกรีตพูนลดลง

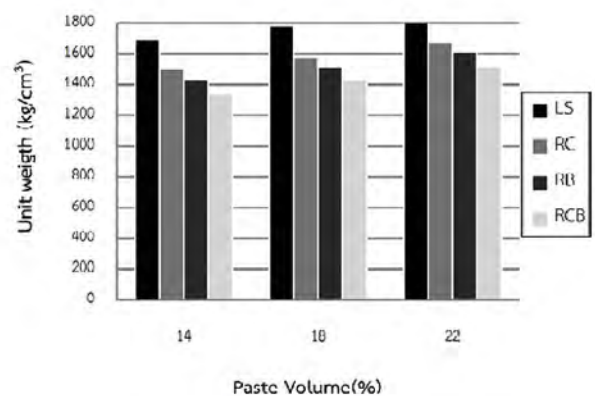


รูปที่ 9 การซึมผ่านของน้ำ

5.4 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักแสดงดังรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบจะมีน้ำหนักที่เบา กว่าคอนกรีตพูนที่ได้จาก LS เป็นมวลรวมหยาบ ซึ่งคอนกรีตพูนที่ใช้ RC, RB และ RCB เป็นมวลรวมหยาบจะมีหน่วยน้ำหนักลดลง 11-12%, 14-16% และ 19-21% เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตพูนที่ได้จาก LS ซึ่งผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพูนจะสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าหน่วยน้ำหนักกระทุ้งแน่นของมวลรวม

เมื่อปริมาณของซีเมนต์เฟสเพิ่มขึ้น พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพูนจากมวลรวมรีไซเคิลและมวลรวมจากธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเฟส จะเกิดการแทนที่ของเฟสในช่องว่าง ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนโพรงที่ลดลง จึงทำให้คอนกรีตพูนมีค่าหน่วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง



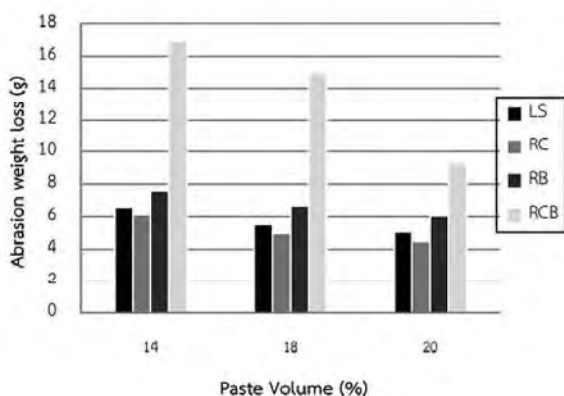
รูปที่ 11 หน่วยน้ำหนัก

5.5 ผลการทดสอบการขัดสีของผิวหน้า

ผลการทดสอบการขัดสีของผิวหน้าคอนกรีตพูนสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีของผิวหน้าของคอนกรีตพูน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 12 จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตพูนที่ใช้ RB และ RCB เป็นมวลรวมหยาบ จะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีของ

ผิวหน้าที่มากกว่าคอนกรีตพูนที่ใช้ LS เป็นมวลรวมหยาบเนื่องจาก RB เป็นมวลรวมที่มีรูพรุนในตัวเองมาก ไม่แข็งแรง ความทนทานต่อการขัดสีจึงลดลง ส่วน RCB เป็นมวลรวมที่มีดินเหนียวเฝือเป็นองค์ประกอบหลัก จึงไม่ทนทานต่อการขัดสี ทำให้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีผิวหน้าที่ค่อนข้างสูงและสูงที่สุดเมื่อเทียบกับมวลรวมชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการสึกกร่อน (Los Angeles) ของมวลรวม แต่คอนกรีตพูนที่ใช้ RC เป็นมวลรวมหยาบจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีของผิวหน้าที่ต่ำกว่าคอนกรีตพูนที่ใช้ LS เป็นมวลรวมหยาบเนื่องจาก LS เป็นมวลรวมธรรมชาติที่มีความแข็งแรงในตัวเองสูงมาก เมื่อทำการทดสอบการขัดสี LS จะมีลักษณะของการหลุดร่อนเป็นชิ้นเนื้อหินขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการแตกหักของ LS แตกต่างจากการหลุดร่อนของ RC ซึ่งมีการหลุดร่อนแบบผ่นผูดที่เกิดจากการขัดของหัวขัด LS จึงมีการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีที่ผิวหน้ามากกว่า RC

เมื่อปริมาณของซีเมนต์เพิ่มขึ้น พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีของผิวหน้าของคอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมรีไซเคิลและมวลรวมจากธรรมชาติมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมนั้นจะสามารถทำหน้าที่ในการเคลือบผิวมวลรวมได้ดีขึ้น ทำให้คอนกรีตพูนมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้ความทนทานต่อการขัดสีของคอนกรีตพูนดียิ่งขึ้น ดังนั้น การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมจะทำให้คอนกรีตพูนมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีที่ผิวหน้าลดลง



รูปที่ 12 การสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีของผิวหน้า

6. สรุป

มวลรวมรีไซเคิลได้แก่ คอนกรีตรีไซเคิล (RC) คอนกรีตบล็อกรีไซเคิล (RB) และอิฐมวลเบา (RCB) สามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในการผลิตคอนกรีตพูนได้ดังนี้คือ

คอนกรีตพูนที่ใช้คอนกรีตรีไซเคิล (RC) เป็นมวลรวมหยาบจะมีค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังดึงแยกที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตพูนจากมวลรวมธรรมชาติ (LS) มีน้ำหนักที่เบากว่า การซึมผ่านของน้ำและความทนทานต่อการขัดสีได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมธรรมชาติ

คอนกรีตพูนที่ใช้คอนกรีตบล็อกรีไซเคิล (RB) เป็นมวลรวมหยาบจะมีความสามารถในการซึมผ่านน้ำที่ต่ำที่สุด น้ำหนักเบาที่ 14-16% เมื่อเทียบกับคอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมธรรมชาติ

คอนกรีตพูนที่ใช้อิฐมวลเบา (RCB) เป็นมวลรวมหยาบจะมีน้ำหนักที่เบาที่ 20% สามารถซึมผ่านน้ำได้ดีกว่า แต่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีที่ผิวหน้าที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตพูน

ที่ใช้หินปูน (LS), คอนกรีตรีไซเคิล (RC) และคอนกรีตบล็อกรีไซเคิล (RCB) เป็นมวลรวมหยาบ

ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตพูนจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก หน่วยน้ำหนัก และความทนทานต่อการขัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนโพรงและการซึมผ่านน้ำจะมีแนวโน้มลดลง

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาภายใต้คณบดีอาวุโสที่พิเศษชั้นสูงมหาวิทยาลัยขอนแก่น, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานของอาจารย์รุ่นใหม่ สกว. (MRG5480004)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang J, Jiang G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and Concrete Research*, 2003(33), 381-386.
- [2] Chindaprasit P, Hatanaka S, Chareerat T, Mishima N, Yuasa Y. (2008). Cement paste characteristics and porous concrete properties. *Construction and Building Materials*, 2008(22), 894-901.
- [3] สุรศักดิ์ ภูสันติพงษ์, รัชช บวรณสิงห์, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. การใช้คอนกรีตที่ทดสอบกำลังอัดแล้วเพื่อเป็นมวลรวมของคอนกรีต. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*. ปีที่ 15, ฉบับที่ 3, กันยายน 2547.
- [4] ฉัตร ประยูรหาญ, อังพงค์ ทองเฉลิม, พิทักษ์ ลิ้มมา. คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐบล็อกแทนมวลรวมหยาบ. รายงานโครงการหมายเลข CE2007-12. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2551.
- [5] Debieb F, Kenai S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 2008(5), 886-893.
- [6] ASTM C 136. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- [7] ASTM C 29. *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*.
- [8] ASTM C 127. *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*.
- [9] ASTM C 131. *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*.
- [10] JIS R 5201. *Physical Testing Methods for Cement*.
- [11] ASTM C 39. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- [12] ASTM C 496. *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- [13] American Concrete Institute. ACI 522R-10 : Report on Pervious Concrete. Michigan: Farmington Hill 2010.

- [14] ถนัดกิจ ขาริรัตน์, ปริญา จินดาประเสริฐ และ Shigemitsu Hatanaka, 2551. คอนกรีตพูน: คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, จอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา จ. ชลบุรี.
- [15] ASTM C 944, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method.