http://journal.rmutp.ac.th/

สมบัติทางวิศวกรรมของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนจากผิวทางแอสฟัลต์เก่านำมาใช้ใหม่โดยการแทนที่มวลรวมหยาบ

เฉลิมพล ไชยแก้ว[1] และ กฤษดา เสือเอี่ยม[2]*

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

[2] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

[1] ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

[2] 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 20 พฤศจิกายน 2563 แก้ไขบทความ 7 มิถุนายน 2564 ตอบรับบทความ 7 กรกฎาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำหินที่ได้จากการรื้อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าและนำกลับมาใช้ใหม่ในงานบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุน โดยทำการย่อยและแยกขนาดหินด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน โดยการเลือกใช้ขนาดหินที่ผ่านตะแกรงขนาด 1/2 นิ้ว และค้างบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว กับหินที่ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว และค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 นำมาผสมร่วมกันในสัดส่วนร้อยละ 50 : 50 เพื่อแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ โดยกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 18 และ 20 โดยน้ำหนักหิน รวมถึงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังดัดและอัตราการซึมผ่านน้ำ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณซีเมนต์เพสต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีอิทธิพลต่อสมบัติด้านกำลังและอัตราการซึมผ่านน้ำของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุน โดยบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ผสมร่วมปริมาณปูนซีเมนต์สูงกว่า (ร้อยละ 20) จะมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 16-24 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำกว่า (ร้อยละ 18) ในทางกลับกันอัตราการซึมผ่านน้ำลดลงร้อยละ 5.1-8.1

คำสำคัญ : บล็อคปูพื้น; คอนกรีตพรุน; ผิวทางแอสฟัลต์นำมาใช้ใหม่; การซึมผ่านน้ำ; มวลรวมหยาบ

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9985 5852, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: gritsada.s@rmutp.ac.th*

http://journal.rmutp.ac.th/

Engineering Properties of Porous Concrete Paving Blocks from Recycled Asphalt Pavement as Coarse Aggregate Replacement

Chalermphol Chaikaew[1] and Gritsada Sua-iam[2]*

[1] Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

[2] Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

[1] Phetchakaseam Road Nhong-kea, Hua-Hin, Prachuapkhirikhan 77110

[2] 1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok 10800

Received 20 November 2020; Revised 7 June 2021; Accepted 7 July 2021

Abstract

This research aimed to study the use of coarse aggregate obtained from removing old recycled asphalt pavement (RAP) in the production of the porous concrete paving block. Crushing and size separation of the coarse aggregate by using standard sieve size by selected the gradation size of the coarse aggregate that passed to sieve size 1/2" and retained on sieve size 3/8" and other that passed to sieve size 3/8" and retained on sieve size No.4 by mixing ratio 50 : 50 of the mass as replaced natural coarse aggregate. Portland cement quantity about 18% and 20% by weight of the aggregate. The water to cement ratio was 0.30 and 0.35 respectively. Compressive strength, flexural strength, and water permeability were investigated. The results showed that the cement content and water to cement ratio was influenced the strength properties and water permeability rate of the porous concrete paving block. The porous concrete paving block mixed with higher cement content (20%) had the compressive strength at the age of 28 days increased by 16-24% when compared with lower cement content (18%). On the other hand, the water permeability rate decreased by 5.1-8.1%.

Keywords : Paving Blocks; Porous Concrete; Recycle Asphalt Pavement; Water Permeability; Coarse Aggregate

** Corresponding Author. Tel.: +668 9985 5852, E-mail Address: gritsada.s@rmutp.ac.th*

1. บทนำ

การเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาทำให้พื้นที่ในเมืองรอง (Sub-urban) หลายแห่งกลายเป็นเมืองที่พลุกพล่าน ซึ่งเกิดจากผลกระทบของการขยายตัวของเมืองที่ไม่สามารถคาดเดาได้ ควบคู่ไปกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก และปริมาณของจำนวนถนนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวซับน้ำที่ลดลง ส่งผลให้มีปริมาณน้ำที่ไหลบ่าและน้ำท่วมฉับพลันเพิ่มขึ้นบนพื้นผิวทางมากขึ้น โดยปริมาณน้ำที่ท่วมขังและไหลบ่าในปริมาณที่มากนี้ส่งผลกระทบต่อทั้งผู้ใช้รถและคนเดินถนน สร้างความเสียหายให้แก่ชีวิตและทรัพย์สิน รวมทั้งความไม่สะดวกในการดำรงชีวิต [1], [2] จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่แนวคิดการทำให้คอนกรีตพรุน (Porous Concrete) ซึ่งเป็นคอนกรีตรูปแบบหนึ่งที่มีคุณสมบัติพิเศษโดยต้องการให้ภายในมีโพรงหรือความพรุนอย่างต่อเนื่อง ยอมให้น้ำซึมผ่านได้สูงเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติซึ่งถูกคิดค้นและพัฒนาในประเทศอังกฤษและสหรัฐอเมริกามากว่า 30 ปี [3] ถือได้ว่าเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับใช้ในงานผิวทางหรือทางเท้าที่น้ำซึมได้ ทั้งยังช่วยในการดูดซับเสียงและเป็นฉนวนกันความร้อนบนผิวทาง รวมถึงยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรมโยธาและสถาปัตยกรรมได้อีกด้วย โดยทั่วไปขนาดของช่องว่างหรือรูพรุนที่เชื่อมต่อกันในคอนกรีตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 8 มิลลิเมตร มีปริมาตรโพรงช่องว่างโดยประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 และมีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 2.8 ถึง 28.0 เมกะปาสคาล [4]

บล็อคปูพื้นคอนกรีต (Paving Concrete Blocks) เป็นหนึ่งในรูปแบบการนำแนวคิดคอนกรีตพรุนเข้ามาประยุกต์ใช้ เนื่องจากทางเดินเท้าที่สร้างจากกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นโดยทั่วไปส่วนใหญ่ มักจะมีลักษณะทึบน้ำสูง น้ำจึงไม่สามารถซึมผ่านไปสู่ชั้นดินได้ ก่อให้เกิดปัญหาน้ำท่วมขังบนพื้นผิวทางเดินเท้า ส่งผลต่ออุปสรรคการใช้ทางเดินเท้าและอันตรายจากการลื่นล้มได้ง่าย ทั้งนี้ในปัจจุบันบล็อคปูพื้นคอนกรีตอาจมีทั้งรูปแบบทึบตันและแบบมีช่องเปิด ถึงแม้ว่าบล็อคปูพื้นคอนกรีตแบบมีช่องเปิดจะมีความสามารถในการระบายน้ำได้ดีแต่ความแตกต่างของเนื้อวัสดุบล็อคปูพื้นคอนกรีตทั้งสองชนิดซึ่งได้แก่คอนกรีตและดินที่อยู่ในช่องเปิด ส่งผลให้พื้นผิวไม่เรียบเป็นอุปสรรคต่อการเดินเท้าและการวิ่ง เป็นต้น [5] งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับบล็อคปูพื้นคอนกรีตพบว่าเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นจะมีความสามารถในการอัดขึ้นรูปบล็อคปูพื้นคอนกรีตได้ดี [5] หรือศึกษาอิทธิพลจากขนาดของมวลรวมหยาบที่แตกต่างกันพบว่ามวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีกำลังอัดที่สูงกว่า ในทางกลับกันการต้านทานต่อการลื่นไถลของผิวหน้าลดลง [6] ในขณะที่มวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีอัตราการซึมผ่านน้ำที่สูงกว่า [1]

ปัจจุบันแนวโน้มการนำวัสดุในกระบวนการก่อสร้างกลับมาใช้ใหม่ถือได้ว่าเป็นแนวคิดในการรักษาสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตวัสดุใหม่และลดการทำลายทรัพยากรธรรมชาติ ผิวทางแอสฟัลต์เก่าเมื่อถูกรื้อออกเนื่องจากการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานและมักถูกนำไปกองไว้เป็นขยะของเสียที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี เนื่องจากถนนที่อยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงซึ่งเป็นสายทางหลักมากกว่าร้อยละ 90 เป็นถนนผิวทางลาดยาง [7] ดังนั้นแนวคิดในการนำมวลรวมซึ่งยังคงอยู่ในสภาพที่ดีอยู่กลับมาใช้ใหม่หรือที่เรียกว่า “ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement, RAP)” มาใช้ในงานคอนกรีตเริ่มมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย [8] โดยยังสามารถนำมาเป็นวัสดุทดแทนมวลรวมหยาบในงานบล็อคปูพื้นคอนกรีตทางเดินได้อีกด้วย [9] ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเอาผิวทางแอสฟัลต์เก่ากลับมาใช้ใหม่ในการทดแทนมวลรวมหยาบสำหรับประยุกต์ใช้ในการผลิตบล็อคปูพื้นในรูปแบบ

คอนกรีตพรุน เพื่อศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมและอัตราการซึมผ่านน้ำจากการนำแอสฟัลต์เก่ามาใช้แทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) ตามมาตรฐาน มอก. 15 หรือ ASTM C150

2.1.2 หินจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์ (Recycled Asphalt Pavement) เก่ากลับมาใช้ใหม่ โดยการรื้อทิ้งผิวทางที่เสื่อมสภาพเนื่องจากอายุการใช้งานที่ยาวนานมากกว่า 20 ปี ในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงประจวบคีรีขันธ์ดังแสดงในรูปที่ 1 มีปริมาณยางแอสฟัลต์ร้อยละ 4.85 โดยน้ำหนักของผิวทางแอสฟัลต์

รูปที่ 1 หินจากรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่า

ตารางที่ 1 สมบัติของหินจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่ากลับมาใช้ใหม่

สมบัติที่ทดสอบ	ค่าเฉลี่ย
ความถ่วงจำเพาะรวม	2.54
หน่วยน้ำหนักแห้ง (kg/m^3)	1,608
การดูดซึมน้ำ (%)	0.91
โมดูลัสความละเอียด	5.94
การต้านทานการสึกกร่อน (%)	27.8
ปริมาณยางแอสฟัลต์ (%)	4.85

จากนั้นทำการบดย่อยผิวทางแอสฟัลต์เก่าและแยกขนาดหินโดยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน โดยแบ่งเป็น 2 ขนาดได้แก่ ขนาดที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1/2 นิ้ว ค้างบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว และขนาดที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งเป็นขนาดส่วนใหญ่ที่ใช้บนผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่ทำการศึกษา เป็นการแยกมวลรวมขนาดเดี่ยวเพื่อเตรียมสำหรับการผลิตคอนกรีตพรุน ซึ่งหินหรือมวลรวมหยาบที่ได้จัดเตรียมจากการร่อนผ่านตะแกรง ทำการล้างน้ำก่อนทำการผสมและทุกการผสมจะอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) ซึ่งเป็นสภาพที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต และเนื่องจากมีส่วนผสมของยางจากแอสฟัลต์เคลือบบริเวณผิวของหินไว้ทำให้มีค่าการดูดซึมที่ต่ำ สมบัติของหินจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์ดังแสดงในตารางที่ 1

2.1.3 น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตใช้น้ำประปา

2.2 การออกแบบอัตราส่วนผสม

ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุน โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 18 และ 20 โดยน้ำหนักมวลรวม สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าที่พบว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนโดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในช่วงร้อยละ 18-22 โดยน้ำหนักของมวลรวม [5] มวลรวมหยาบทั้งหมด (ทดแทนการใช้หินจากธรรมชาติ) มาจากการคละกันระหว่างหินจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1/2 นิ้ว ค้างบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว และที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ในอัตราส่วนร้อยละ 50 : 50 เนื่องจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าเมื่อไม่มีส่วนผสมของมวลรวมละเอียด การผสมร่วมอัตราส่วนดังกล่าวมวลรวมมีความหนาแน่นมากที่สุดหรือมีปริมาณช่องว่างน้อยที่สุดซึ่งจะส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้น และยังคงสภาพของมวลรวมหยาบที่มีขนาดไม่ต่อเนื่อง (Open Grade) ไว้อีกด้วยซึ่งเป็นข้อกำหนดสำคัญของ

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตพรุน และมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ มอก. 378-2531 ระบุอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไม่เกิน 0.55 [10] โดยใช้สัญลักษณ์แทนในแต่ส่วนผสมเป็น wx/cy โดย x หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และ y หมายถึง ร้อยละปริมาณปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมหยาบ อาทิเช่น w0.30/c18 หมายถึง ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 18 ต่อน้ำหนักของมวลรวม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	มวลรวม		ปูนซีเมนต์ต่อน้ำหนักมวลรวม	w/c
	1/2"-3/8"	3/8"-No.4		
w0.30/c18	50	50	18	0.30
W0.30/c20	50	50	20	0.30
w0.35/c18	50	50	18	0.35
w0.35/c20	50	50	20	0.35

2.3 กระบวนการทดสอบ

ทำการผสมบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนตามสัดส่วนที่กำหนด จากนั้นเทลงแบบตัวอย่างทดสอบรอจนแข็งตัว ทำการบ่มน้ำจนถึงอายุทดสอบ ทำการทดสอบสมบัติของคอนกรีตแข็งตัวประกอบไปด้วย

2.3.1 การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นแห้งหรือหน่วยน้ำหนักแห้งทำได้โดยการนำตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร ที่อายุทดสอบ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2 มาทำการวัดขนาดจริงหลังจากถอดแบบหล่อพร้อมชั่งน้ำหนักเพื่อทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของคอนกรีตจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักที่ได้จากการชั่งต่อปริมาตรในแต่ละของก้อนตัวอย่าง

2.3.2 การทดสอบกำลังอัด

นำตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อน ซึ่งทำการบ่มน้ำตลอดอายุการทดสอบกำหนด 3, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 2 ก้อนตัวอย่างการทดสอบความหนาแน่นและกำลังอัด

ทำการทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน BS-1881 โดยสามารถหาค่ากำลังอัด (CS) ได้จากสมการที่ (1)

$$CS = P/A \quad (1)$$

เมื่อ P คือแรงกดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ (นิวตัน) และ A คือพื้นที่หน้าตัดรับแรง (ตารางเมตร)

รูปที่ 3 เครื่องขึ้นรูปบล็อคปูพื้นคอนกรีต

2.3.3 การทดสอบกำลังดัด

การทดสอบกำลังดัดโดยการขึ้นรูปตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนขนาด 40x40x4 เซนติเมตร ด้วยเครื่องขึ้นรูปบล็อคปูพื้นคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3

จากกระบวนการขึ้นรูปจนได้บล็อคปูพื้นคอนกรีตตามขนาดกำหนด (40x40x4 เซนติเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4 หลังจากคอนกรีตแข็งตัวทำการถอดบล็อคปูพื้นคอนกรีตออกจากแบบ ทำการบ่มน้ำตลอดอายุการทดสอบกำหนด 3, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4

รูปที่ 4 แผ่นตัวอย่างการทดสอบกำลังดัด

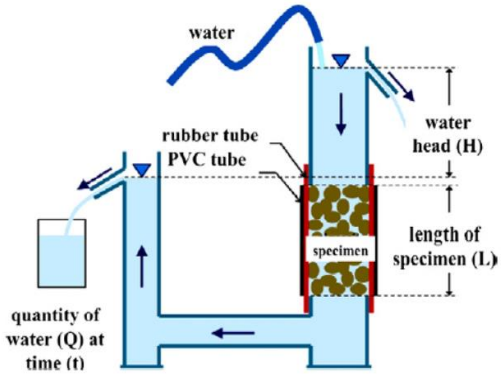
การทดสอบกำลังดัดของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนโดยการนำบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนขึ้นจากน้ำใช้ผ้าซับผิวภายนอกให้แห้ง วางบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนบนฐานรองรับของเครื่องทดสอบ โดยให้น้ำหนักกระทำที่จุดกึ่งกลางของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุน การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 378-2531:กระเบื้องคอนกรีตปูพื้น [10] หรือตามมาตรฐาน ASTM 293 โดยสามารถหาค่ากำลังดัด (R) ได้จากสมการที่ (2)

$$R = 3PL/2bd^2 \quad (2)$$

เมื่อ P คือแรงกดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ (นิวตัน), L คือความยาวของแผ่นทางเท้า (เมตร), b คือความกว้างของแผ่นทางเท้า (เมตร) และ d คือความหนาของแผ่นทางเท้า (เมตร) ตามลำดับ

2.3.4 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ

การทดสอบหาอัตราการซึมผ่านน้ำในบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุน ซึ่งใช้ชุดทดสอบการซึมผ่านน้ำด้วยท่อพีวีซี ขนาด 4 นิ้ว มีฝาครอบด้านบนและล่างต่อด้วยก๊อกน้ำขนาด 1/4 นิ้ว และมีความสูงของน้ำวัดจากด้านบนถึงก๊อกด้านล่าง 155 เซนติเมตร ด้วยวิธีความดันคงที่ (Constant Head) โดยจับเวลาเมื่อน้ำซึมผ่านตัวอย่างคอนกรีตพรุน แล้วนำไปคำนวณหาอัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ [4]

โดยสามารถหาค่าอัตราการซึมผ่านน้ำ (P) ได้จากสมการที่ (3)

$$P = Q/t \quad (3)$$

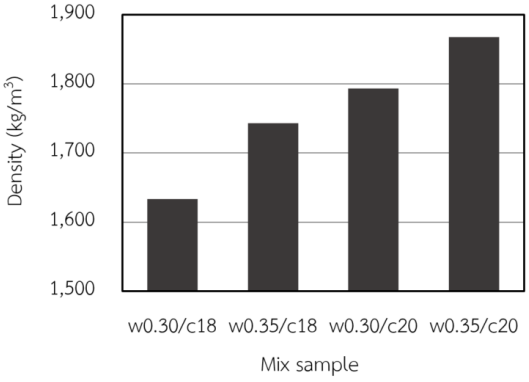
เมื่อ Q คือปริมาตรน้ำที่ซึมผ่าน (ลิตร) และ t คือเวลาที่ใช้การซึมผ่านตัวอย่างคอนกรีตพรุน (วินาที) ตามลำดับ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่อายุทดสอบ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุน

ที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าเมื่อผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 18 มีความหนาแน่นเท่ากับ 1,633 และ 1,743 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 20 ความหนาแน่นเท่ากับ 1,792 และ 1,867 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ

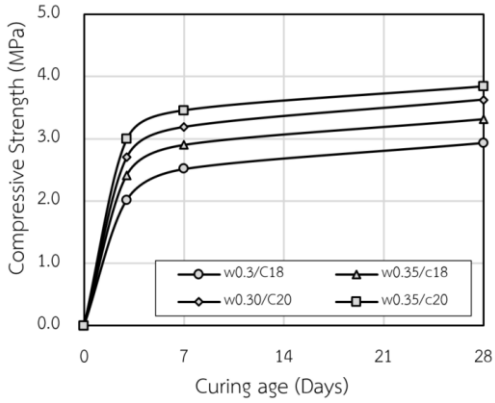


รูปที่ 6 ความหนาแน่นของตัวอย่างทดสอบอายุ 28 วัน

จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าความหนาแน่นของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้จากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่ามีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อผสมร่วมปริมาณปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น เนื่องจากปริมาณช่องว่างที่ลดลงจากปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มสูง [2], [5], [9] นอกจากนี้ความพรุนมีแนวโน้มลดลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ N. Saboo et al. [9]

3.2 กำลังอัด

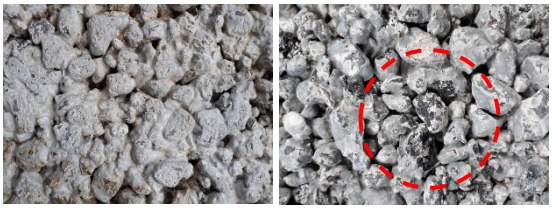
ผลการทดสอบกำลังอัดของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่อายุทดสอบ 3, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการนำผิวทางแอสฟัลต์เก่ามาใช้ใหม่มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น พิจารณาที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าเมื่อผสมร่วมปริมาณปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 18 มีกำลังอัดเท่ากับ 2.9 และ 3.3 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ หรือคิดเป็นกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 13.8 ในขณะที่เมื่อผสมร่วมปริมาณปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 20 มีกำลังอัดเท่ากับ 3.6 และ 3.8 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ หรือคิดเป็นกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 9.1



รูปที่ 7 การพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตพรุนที่อายุทดสอบ 3, 7 และ 28 วัน

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบในสัดส่วนผสมที่แตกต่างกันเมื่ออายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ [8] ตัวอย่างส่วนผสมที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักของมวลรวมมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าตัวอย่างส่วนผสมที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ที่น้อยกว่า (ร้อยละ 18) ทั้งนี้เมื่อปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้บล็อคปูพื้นคอนกรีต

พรุนมีสมบัติทางด้านกำลังรับแรงอัดมากขึ้นเนื่องจากซีเมนต์เพสต์ที่ห่อหุ้มมวลรวมมีความหนามากขึ้น ทำให้มวลรวมมีการยึดเกาะกันดียิ่งขึ้นส่งผลให้เกิดการเติมเต็มช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ทำให้โพรงมีปริมาณและขนาดลดลง บล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนจึงมีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น [2], [5], [6], [9] ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบปริมาณปูนซีเมนต์คงที่บล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงกว่า (w/c = 0.35) จะให้ค่ากำลังอัดที่มากกว่าบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่า (w/c = 0.30) เนื่องจากในส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำน้อยส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนืดและทำการเคลือบผิวมวลรวมได้ไม่สม่ำเสมอทำให้การยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมได้ไม่ดี [5], [9] ดังแสดงในรูปที่ 8



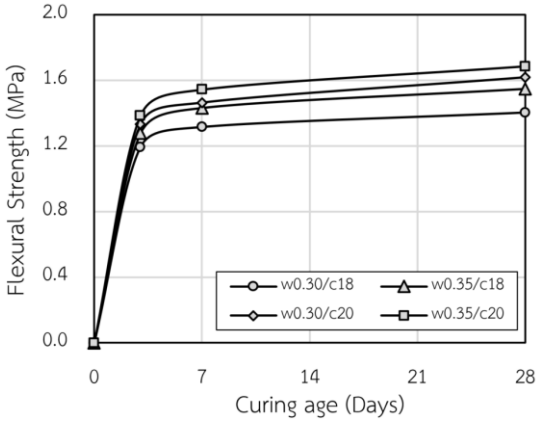
(ก) (ข)

รูปที่ 8 (ก) ซีเมนต์เพสต์ที่ห่อหุ้มมวลรวมได้ทั่วถึง และ (ข) ซีเมนต์เพสต์ที่ห่อหุ้มมวลรวมได้ไม่ดี

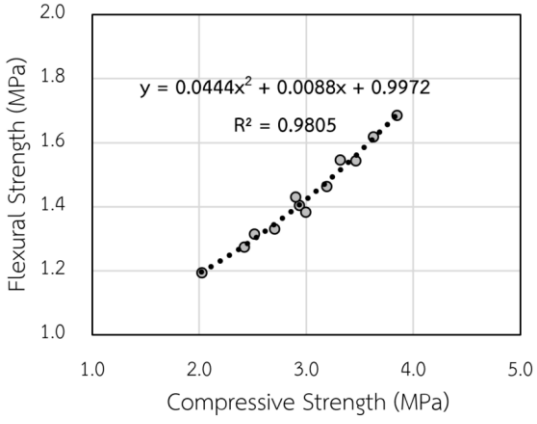
3.3 กำลังดัด

การพัฒนากำลังดัดของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น และการพัฒนากำลังดัดของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนมีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกับการพัฒนากำลังอัด ผลการทดสอบกำลังดัดของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนแทนที่มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่อายุทดสอบ 3, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 9

พิจารณาผลการทดสอบกำลังดัดที่อายุ 28 วัน พบว่า ตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่า



รูปที่ 9 การพัฒนากำลังดัดของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่อายุทดสอบ 3, 7 และ 28 วัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังดัดของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุน

เมื่อผสมร่วมปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 18 ต่อน้ำหนักของมวลรวม ค่ากำลังดัดเท่ากับ 1.40 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และค่ากำลังดัดเท่ากับ 1.55 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 ซึ่งคิดเป็นกำลังดัดที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 10.7 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 ในขณะผสมร่วมปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักของมวลรวม ค่ากำลังดัดเท่ากับ 1.62 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ

0.30 และค่ากำลังดัดเท่ากับ 1.69 เมกะปาสคาล เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 คิดเป็นกำลังดัดที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณปูนซีเมนต์คงที่บล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงกว่าจะมีแนวโน้นให้ค่ากำลังดัดที่มากกว่าบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่าเนื่องจากซีเมนต์เพสต์มีความข้นเหลวที่เพียงพอต่อการเคลือบผิวมวลรวมได้อย่างสม่ำเสมอ สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังดัดของตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนดังแสดงในรูปที่ 10

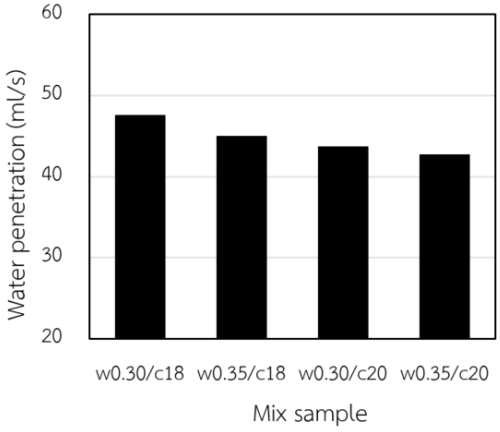
ซึ่งเห็นได้ว่ากำลังดัดของตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดสูงขึ้น เป็นความสัมพันธ์เชิงแปรผันตามในลักษณะโพลีโนเมียล (Polynomial) ดังสมการที่ (4)

$$y = 0.0444x^2 + 0.0088x + 0.9972 \quad (4)$$

เมื่อ y คือกำลังดัด และ x คือกำลังอัด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดและกำลังอัดของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของสมบัติด้านกำลัง ได้แก่ ปริมาณเพสต์และการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม (Interfacial Transition Zone, ITZ) [9] เมื่อนำผลกำลังดัดมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 378-2531: กระเบื้องคอนกรีตปูพื้น ซึ่งกำหนดค่ามาตรฐานกำลังรับแรงดัดตามขวางของกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 3 เมกะปาสคาล พบว่าบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่นำหินที่ได้จากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่ามาแทนที่มวลรวมหยาบมีค่ากำลังดัดที่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด เนื่องจากบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนมีค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่าและมีปริมาตรโพรงที่สูงกว่าบล็อคคอนกรีตปูพื้นทั่วไป

3.3 อัตราการซึมผ่านน้ำ

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้มาจากการ รีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่อายุทดสอบ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า ตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้จากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าเมื่อผสมร่วมปูนซีเมนต์ปริมาณอัตราส่วนร้อยละ 18 มีอัตราการซึมผ่านน้ำเท่ากับ 47.6 และ 45.0 มิลลิลิตรต่อวินาที เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ หรือคิดเป็นอัตราการซึมผ่านน้ำลดลงร้อยละ 5.42 ในขณะที่เมื่อผสมร่วมปริมาณปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 20 มีอัตราการซึมน้ำเท่ากับ 43.8 และ 42.7 มิลลิลิตรต่อวินาที เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ หรือคิดเป็นอัตราการซึมผ่านน้ำลดลงร้อยละ 2.32



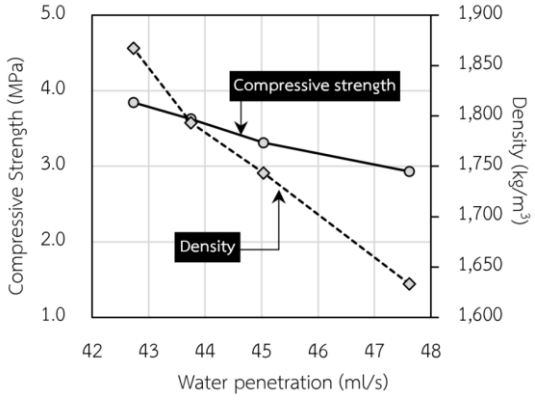
รูปที่ 11 การซึมผ่านน้ำในบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุน

จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินที่ได้จากการรีไซเคิลผิวทางแอสฟัลต์เก่าเมื่อผสมร่วมปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 18 ของน้ำหนักมวลรวมที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 (w0.30/c18) มีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำสูงที่สุด ทั้งนี้เมื่อผสมร่วมปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น (w0.30/c20) ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของ

ตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนมีแนวโน้มลดลงร้อยละ 8.1 ในขณะเดียวกันเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์คงที่พบว่าอัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ N.Saboo et al. [9] พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ความพรุนหรือช่องว่างในคอนกรีตพรุนลดลง เนื่องจากปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นจะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างมวลรวม ในขณะเดียวกันปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดลดลงและซีเมนต์เพสต์ทำการเคลือบผิวมวลรวมได้ดีขึ้น [5], [9] รวมถึงการผสมร่วมมวลรวมหยาบต่างขนาดนั้นมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กกว่าจะเข้าไปอุดช่องว่าง [1] นอกจากนี้อัตราการซึมผ่านน้ำไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาตรโพรงเพียงอย่างเดียวแต่ขึ้นอยู่กับขนาดและความต่อเนื่องของโพรงอีกด้วย [2]

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ความหนาแน่น และอัตราการซึมผ่านน้ำ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด ความหนาแน่นและค่าอัตราการซึมผ่านน้ำในตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของกำลังอัด ความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำในบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการซึมผ่านน้ำลดลง และอัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ T. Kamon and T. Ronnakorn [2] หรือกล่าวได้ว่ากำลังอัดมีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับความพรุนนั่นคือความพรุนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดลดลง [1] เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับความหนาแน่นของตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการซึมผ่านน้ำมากขึ้น เนื่องจากอัตราการซึมผ่านน้ำที่สูงขึ้นมีความสัมพันธ์กับปริมาตรโพรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่สูงขึ้นตามไปด้วย [4] ปริมาตรโพรงหรือความพรุนที่สูงนี้ส่งผลให้บล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนมีค่าความหนาแน่นลดลงและความสามารถในการรับกำลังอัดที่ต่ำ [3] จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วันอยู่ในช่วง 2.9-3.6 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับบล็อคคอนกรีตปูพื้นทางเท้าทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่มีปริมาตรโพรงที่มากกว่า และการนำหินที่ได้จากผิวทางแอสฟัลต์เก่านำมาใช้ใหม่เพื่อแทนที่มวลรวมหยาบยังมีปัญหาที่การยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับผิวสัมผัสของมวลรวมอีกด้วย [7]-[9] แต่จุดเด่นของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนได้แก่ ความสามารถในการระบายน้ำที่ดีในช่วงที่มีฝนตกหรือน้ำท่วมขังเมื่อเปรียบเทียบกับบล็อคคอนกรีตปูพื้นทางเท้าทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 13

รูปที่ 13 ความสามารถในการระบายน้ำของบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนจากการนำผิวทางแอสฟัลต์เก่ามาใช้ใหม่

4. สรุป

จากการศึกษาแนวทางความเป็นไปได้ของการนำหินหรือมวลรวมหยาบที่ได้จากการนำผิวทางแอสฟัลต์เก่ากลับมาใช้ใหม่ในการผลิตบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. บล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้การคละขนาดของมวลรวมจากผิวทางแอสฟัลต์เก่านำมาใช้ใหม่ ที่ผสมร่วมปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงกว่าจะมีแนวโน้มความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางกลับกันอัตราการซึมผ่านน้ำลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผสมร่วมปูนซีเมนต์ในปริมาณที่น้อยกว่า

2. บล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักมวลรวม ให้กำลังอัดและกำลังดัดที่สูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 18 ต่อน้ำหนักมวลรวม โดยปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยพัฒนาสมบัติด้านกำลัง เนื่องจากซีเมนต์เพสต์สามารถห่อหุ้มมวลรวมได้อย่างสม่ำเสมอทำให้มีการยึดเกาะกันดียิ่งขึ้น

3. บล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนที่นำหินจากผิวทางแอสฟัลต์เก่ามาใช้ใหม่โดยเป็นการผสมระหว่างขนาดคละที่กำหนดนั้นมีค่ากำลังอัดและกำลังดัดที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบล็อคคอนกรีตปูพื้นทั่วไป แต่ในขณะเดียวกันเห็นได้ชัดว่าบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนมีความสามารถในการไหลซึมผ่านน้ำได้ดีกว่า ทั้งยังเป็นการนำของเหลือทิ้งจากการก่อสร้างผิวทางกลับมาใช้ใหม่ เป็นการช่วยลดการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อีกทางหนึ่งด้วย

4. เมื่อพิจารณาสมการหาค่ากำลังดัดเห็นได้ว่าขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของบล็อคปูพื้นคอนกรีต ดังนั้นควรศึกษาขนาดและความหนาของบล็อคปูพื้นคอนกรีตที่หลากหลายมากขึ้นตามที่ได้ระบุไว้ใน มอก. 378-2531 ซึ่งมีขนาดแนะนำถึง 7 ขนาด

5. ควรทำการศึกษาเปรียบเทียบถึงผลกระทบของสมบัติทางวิศวกรรมเมื่อผลิตบล็อคปูพื้นคอนกรีตพรุนจากการนำหินธรรมชาติที่มีขนาดคละตามเกณฑ์มาตรฐาน หรือขนาดคละทั้งแบบที่มีขนาดไม่ต่อเนื่อง (Open Grade) หรือที่มีขนาดเดียว (Single Grade)

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ หน่วยงานที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน รวมถึงสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ และขอขอบคุณแขวงทางหลวงประจวบคีรีขันธ์ (หัวหิน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ผิวทางแอสฟัลต์ของเก่าที่ได้จากการรื้อทิ้งในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] N. H. Abd Halim, H. Md. Nor, R. P. Jaya, A. Mohamed, M. H. W. Ibrahim, N. I. Ramli and F. M. Nazri, “Permeability and Strength of Porous Concrete Paving Blocks at Different Sizes Coarse Aggregate,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1049, 2018.

[2] T. Kamon and T. Ronnakorn, “A Study of Water Permeability on Porous Concrete Using Recycled Coarse Aggregates,” in *Proceeding of the 25th National Convention on Civil Engineering*, Chonburi, Thailand, 2020, pp. MAT13-1-MAT13-7.

[3] C. Nantachai, “Unit Weight and Compressive Strength of Pervious Concrete mixed with Oil Palm Shell,” *Journals of Community Development and life Quality,* vol. 1, pp. 97-106, 2013.

[4] V. Sata, A. Wongsa and P. Chindaprasirt, "Properties of Pervious Geopolymer Concrete Using Recycled Aggregate," *Construction and Building Materials,* vol. 42, pp. 33-39, 2013.

[5] Y. Hirun, T. Tanchaisawat, P. Mulrungsee, V. Bumlungam and A. Peasura, "The Pervious Concrete Paving Blocks," in *Proceeding of the 4th Annual Concrete Conference*, Ubon Ratchathani, Thailand, 2008.

[6] A. H. Nur. Hidayah, Md. Nor. Hasanan and P. J. Ramadhansyah, "Porous Concrete Paving Blocks Using Coarse Aggregate," *Applied Mechanics and Materials,* vol. 554, pp. 111-115, 2014.

[7] J. Suebsuk, K. Chaiyadechakorn, P. Panpipat and T. Poongernkham, "Compressive and Splitting Tensile Strengths of Concrete Using Recycled Pavement Waste as Coarse Aggregate," *SWU Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 125-132, 2016.

[8] J. Suebsuk, K. Chaiyadechakorn and P. Panpipat, "Mix Design of Portland Cement Concrete using Recycled Asphalt Pavement (RAP) as Coarse Aggregate in Highway Applications," in *Proceeding of the 24th National Convention on Civil Engineering*, Udonthani, Thailand, 2019.

[9] N. Saboo, A. N. Prasad, M. Sukhija, M. Chaudhary and A. K. Chandrappa, "Effect of the use of recycled asphalt pavement (RAP) aggregates on the performance of pervious paver blocks (PPB)," *Construction and Building Materials*, vol. 262, pp. 120581, 2020.

[10] Thai Industrial Standard (TIS) 378-2531, Concrete flooring tiles, Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, 1988.