การศึกษาการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุนโดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล

A Study of Water Permeability on Porous Concrete Using Recycled Coarse Aggregates

กมล ตรีผอง[1*] รณกร เทพวงษ์[2]

[1]นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตศาลายา จ.นครปฐม
[2]อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตศาลายา จ.นครปฐม
*Corresponding author Email: kamon.tre@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุนโดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล จากการนำเศษวัสดุคอนกรีตเก่าเหลือทิ้งมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตพรุนแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ โดยการนำคอนกรีตเก่า(ลูกปูน) มาย่อยและคัดแยกขนาดเดียว (Single Grade) ได้มวลรวมหยาบรีไซเคิล 3 ขนาด ได้แก่ หินขนาด 1/2 นิ้ว, 3/8 นิ้ว และหินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C Ratio) เท่ากับ 0.30 หล่อเป็นก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับขนาดหินและปริมาณซีเมนต์เพสต์ โดยคอนกรีตพรุนจะมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 23-95 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากช่องว่างในมวลรวมหยาบของหินขนาดเดียวกัน อีกทั้งมีเพสต์เก่าและมอร์ตาร์เกาะติดอยู่ จึงทำให้ต้องใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เคลือบผิวมากขึ้นและการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่มีช่องว่างของอัตราส่วนโพรงที่ดีซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 25 - 37 ทำให้มีค่าการซึมผ่านน้ำได้มาก โดยมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 1/2 นิ้ว มีค่าการซึมผ่านน้ำได้มากที่สุดเท่ากับ 0.989 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากัน

คำสำคัญ: คอนกรีตพรุน, มวลรวมหยาบรีไซเคิล, การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุน, กำลังอัด

Abstract

This paper presents the study of the leftover concrete for recycling by being an ingredient in the porous concrete instead of natural mineral aggregate tested in physical and mechanical properties by subdividing the leftover concrete and grading to 3 sizes; the rock which was left on a sieve 1/2 inches, 3/8 inches and number 4. The ingredient which was suitable for compressive strength and the water permeability of the porous concrete was determined by using cement paste 10, 15 and 20 percent capacity and the water cement ratio (W/C Ratio) of 0.30 was used for making an example cylindrical block with a diameter of 10 x 20 centimeter. The results showed that the compressive strength of recycled porous concrete depends on the stone size and the amount of cement paste. The recycled porous concrete will have compressive strength in the range of 23-95 kg/square cm. It is the result of the gaps in the coarse aggregate of rocks of the same size, including the old paste and mortar. Therefore, it has to require a large amount of coated cement paste and increased water absorption but there is a gap between the good cavity ratio in the range of 25 - 37 percent. As a result in a large value of water permeability the recycled coarse aggregate size 1/2 inch, which has the highest value equal to 0.989 cm/s, with the same amount of cement paste.

Keywords: porous concrete, recycled coarse aggregate, water permeability of porous concrete, compressive strength

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังเผชิญกับวิกฤตปัญหา ในเรื่องการบริหารจัดการน้ำเป็นอย่างมาก โดยมีสาเหตุอันเนื่องมาจาก การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการขยายตัวของสิ่งก่อสร้างในเขตเมือง ส่งผลต่อการไหลซึมผ่านของน้ำจากชั้นผิวดินไปยังชั้นใต้ดินในทางอุทกวิทยา ซึ่งทำให้ทิศทางและปริมาณการไหลของน้ำเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะเมื่อเวลาเกิดพายุฝนตกหนัก ประสิทธิภาพในการรับน้ำและระบายน้ำได้ไม่ดี เกิดน้ำท่วมขังสูงในพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง สร้างความเสียหายให้แก่ชีวิตและทรัพย์สิน รวมทั้งความไม่สะดวกในการดำรงชีวิต คอนกรีตพรุน (Porous Concrete) เป็นวัสดุที่ยั่งยืนมีลักษณะของโครงสร้างที่มีรูพรุนที่เชื่อมต่อกันซึ่งช่วยให้น้ำไหลผ่านได้ดี รูพรุนในคอนกรีตสามารถทำได้โดยการลดหรือขจัดมวลรวมละเอียดในคอนกรีต คงเหลือแต่ซีเมนต์เพสต์และมวลรวมหยาบ ซึ่งสามารถที่จะออกแบบคุณสมบัติได้อย่างหลากหลาย แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ

วัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น ในด้านความแข็งแรง ความสามารถในการระบายน้ำ ความสามารถในการอุ้มน้ำและการนำความร้อนได้ต่ำซึ่งจะเป็นฉนวนได้ดี นอกจากนี้คอนกรีตพรุนยังถูกนำมาใช้งานในคอนกรีตสีเขียว (Green Concrete) ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับงานปูผิวถนน ลานจอดรถ ดาดคลองและพื้นรางระบายน้ำ งานกรองตะกอนในระบบระบายน้ำเสีย รวมทั้งในงานก่อสร้างทางวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมอื่น ๆ

งานวิจัยนี้ เป็นการทดลองสมบัติการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุน โดยใช้เศษวัสดุมวลรวมหยาบรีไซเคิลจากคอนกรีตที่แข็งตัว (Hardened Concrete) ซึ่งเกิดจากการเก็บตัวอย่างลูกปูนที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยการนำมวลรวมหยาบจากคอนกรีตที่แข็งตัวเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ (Recycled Aggregate) ผ่านกระบวนการย่อยด้วยเครื่องย่อยจะได้หิน (มวลรวมหยาบ) คัดแยกขนาดต่าง ๆ ได้ประมาณ 75% ส่วนที่เหลือจะเป็นหินขนาดเล็ก (มวลรวมละเอียด) อีกประมาณ 25% และหาส่วนผสมของมวลรวมหยาบรีไซเคิลและปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เหมาะสม ควบคุมปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วน 0.30 จากนั้นทำการทดสอบตัวอย่างแล้วนำผลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าการซึมผ่านน้ำและกำลังอัด เพื่อให้ได้คอนกรีตพรุนที่มีช่องว่างในการระบายน้ำได้มากที่สุดและมีกำลังรับแรงได้ตามการใช้งาน อีกทั้งเป็นการลดปัญหาการกองของวัสดุเหลือทิ้ง ที่ส่งผลเสียต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อม

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีตพรุน

คอนกรีตพรุน (Porous Concrete, Pervious Concrete หรือ no-fines concrete) คือคอนกรีตมวลเบาชนิดหนึ่งที่มีลักษณะพิเศษแตกต่างจากคอนกรีตทั่วไป คือภายในเนื้อคอนกรีต มีรูพรุนและโพรงที่ต่อเนื่องในปริมาณมาก ซึ่งยอมให้อากาศหรือน้ำไหลผ่านได้ จากที่มีโพรงในเนื้อคอนกรีตมาก ทำให้คอนกรีตพรุนมีน้ำหนักที่เบาและกำลังต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปในต่างประเทศ เช่น อังกฤษ อเมริกาและญี่ปุ่น มีการนำคอนกรีตพรุนมาใช้งานก่อสร้างมากกว่า 40 ปี [1-2] ลักษณะทั่วไปของคอนกรีตพรุนคือคอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียด หรือมีในปริมาณเล็กน้อยซึ่งจะอยู่ในส่วนผสมของเพสต์ โดยเพสต์นี้จะทำหน้าที่เชื่อมประสานมวลรวมหยาบเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นคอนกรีตพรุนจึงประกอบด้วย 3 ส่วน โดยส่วนแรกคือมวลรวมหยาบที่มีขนาดไม่ต่อเนื่อง (Open Grade) หรือขนาดเดียว (Single Grade) ได้แก่ หิน กรวด มวลรวมรีไซเคิล หรือวัสดุอื่น ๆ มีปริมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ส่วนที่สอง คือส่วนที่เป็นเพสต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานมวลรวมหยาบเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์และน้ำ เป็นหลัก แต่อาจมีส่วนผสมเพิ่ม เช่น สารลดน้ำพิเศษ สารผสมเพิ่ม (Admixture) หรือวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) เข้าไปเล็กน้อย คอนกรีตพรุนมีปริมาณเพสต์ 15-25 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และส่วนสุดท้าย คือโพรงช่องว่าง (Pore Size) ของคอนกรีตพรุนที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้

คอนกรีตพรุน เป็นคอนกรีตที่ออกแบบมาให้มีช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ซึ่งได้จากการผสมของ ปูนซีเมนต์ น้ำ สารผสมเพิ่ม มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดหรือทรายในปริมาณที่น้อยมาก หรืออาจจะไม่มีเลย จึงทำให้คอนกรีตพรุนมีโพรงหรือช่องว่างขนาด 2-8 มิลลิเมตร ที่ต่อเนื่องกันและไม่ต่อเนื่องกันในเนื้อคอนกรีตพรุน และยอมให้น้ำหรือของเหลวสามารถไหลซึมผ่านไปได้ โดยทั่วไปคอนกรีตพรุนมีค่ากำลังอัดประมาณ 28-280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความพรุนหรืออัตราส่วนโพรงร้อยละ 15-35 และมีค่าการซึมผ่านน้ำประมาณ 0.14-1.22 เซนติเมตรต่อวินาที [1] คอนกรีตพรุนมักถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม เช่น งานด้านพื้นผิวถนน ช่วยลดหรือชะลอการไหลนองของน้ำฝนได้ ลดปัญหาการท่วมขังของน้ำ จึงทำให้ปัญหาของการเกิดตะไคร่น้ำลดลง และลดการลื่นไถลของพื้นผิวทางเดิน ในขณะที่ฝนตกได้อีกด้วย

คอนกรีตพรุนในงานวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม เช่น คอนกรีตทางเดินเท้า คอนกรีตลานจอดรถหรือถนนที่การจราจรไม่หนาแน่นมาก พื้นสนามเทนนิส พื้นเรือนเพาะชำ ใช้ในงานตกแต่งภูมิทัศน์ งานดาดผิวคลองระบายน้ำ คอนกรีตปูพื้นทางเท้า ที่ไม่ต้องการให้น้ำขังหรือปลูกหญ้าได้ เป็นต้น นอกจากนั้นความพรุนในเนื้อคอนกรีตยังช่วยเพิ่มการดูดซับเสียง ค่าการนำความร้อนต่ำและระบายความร้อนได้ดี ดังนั้นจึงถือได้ว่าคอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2.2 คอนกรีตเหลือทิ้ง

2.2.1 การนำเศษคอนกรีตเหลือทิ้งมาแปรรูปใช้ในประโยชน์ด้านอื่น ๆ

คือการนำคอนกรีตที่เหลือไปใช้งานด้านอื่น ๆ ที่เป็นประโยชน์และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น คอนกรีตสดเหลือทิ้งที่นำมาใช้เทปรับปรุงพื้นที่ในหน่วยผลิต หรือนำมาเทใส่แบบหล่อเพื่อประยุกต์ให้เป็นชิ้นงานคอนกรีต ที่นำไปทำประโยชน์ได้ เศษซากคอนกรีตจากการรื้อถอนก็อาจจะนำไปใช้ถมที่ หรือเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) เป็นต้น

2.2.2 การแยกวัตถุดิบในคอนกรีตสดเหลือทิ้งออกจากกันเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

การรีไซเคิลลักษณะนี้ จะเป็นการจัดการกับเศษคอนกรีตสด (Fresh Concrete) ที่เหลือจากการเท โดยทำการแยกวัตถุดิบในคอนกรีตออกจากกันและนำกลับไปใช้ใหม่ ซึ่งโดยปกติแล้วเศษคอนกรีตสดเหล่านี้จะไม่สามารถคายทิ้งโดยปกติได้ เพราะเศษคอนกรีตเหล่านี้มีค่า pH ที่สูง อีกทั้งยังมีเศษมวลรวมปะปนอยู่ ซึ่งจะก่อให้เกิดมลพิษกับแหล่งน้ำได้ กระบวนการที่ทำโดยทั่วไปก็คือ การฉีดน้ำเจือจางเศษคอนกรีตก่อนทำการคายลงบ่อคายกากคอนกรีต ส่วนที่ทำการแยกได้ก็คือ ส่วนของมวลรวมหยาบและน้ำคายกากที่จะต้องรอกระบวนการตกตะกอนของกากปูน โดยน้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนแล้วสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในหน่วยผลิตได้ เช่น ใช้ในการฉีดล้างทำความสะอาดรถโม่ กรณีที่จะนำมวลรวมหยาบและน้ำรีไซเคิล (Recycled Aggregate and Recycled Water) กลับมาใช้ใหม่ในการผลิตคอนกรีต จะต้องมีการควบคุมคุณภาพตามมาตรฐาน วสท. 1014 “ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต” เพื่อให้มั่นใจว่ามวลรวมหยาบและน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่ไม่มีวัสดุเจือปน ที่เป็นอันตรายต่อคุณภาพของคอนกรีต โดยในส่วนของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้แล้ว จะมีข้อกำหนดคุณภาพ การแบ่งแยกชั้นคุณภาพของมวลรวมหยาบที่ใช้แล้ว รวมไปถึงขอบเขตของการนำไปใช้งาน

ส่วนน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่จะต้องมีการควบคุมปริมาณสารแขวนลอย คลอไรด์ ซัลเฟต และความเป็นด่าง ไม่ให้มีมากเกินข้อกำหนดที่ระบุไว้

2.2.3 การนำเศษซากคอนกรีตมาทำเป็นวัตถุดิบมวลรวมรีไซเคิล

กระบวนการนี้เป็นการนำเศษซากอาคารหรือสิ่งก่อสร้าง ที่ถูกรื้อถอนมาทำการคัดแยกให้เหลือเฉพาะส่วนที่เป็นเศษซากคอนกรีต เพื่อนำมาผ่านกระบวนการบดย่อยและคัดแยกขนาด และนำมาใช้เป็นวัตถุดิบมวลรวมในคอนกรีตใหม่อีกครั้ง การรีไซเคิลรูปแบบนี้เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพมากในการกำจัดเศษซากคอนกรีตรื้อถอน เพราะเป็นการกำจัดขยะคอนกรีตที่เกิดขึ้นได้เกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ จึงมีความสำคัญมากในประเทศที่มีทรัพยากรอยู่น้อย หรือมีพื้นที่อยู่อย่างจำกัด เช่น ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้ [3]

1. การรื้อถอนทำลายและเคลื่อนย้ายเศษซากอาคารที่ทุบทิ้ง
2. การบดย่อยเศษซากอาคารถูกส่งมา
3. การคัดแยกวัสดุแปลกปลอมอื่น ๆ นอกจากเศษคอนกรีต เช่น เหล็กหรือไม้
4. การล้างและคัดแยกขนาด
5. การแยกเก็บตามขนาดเพื่อเตรียมนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบมวลรวมต่อไป

2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตพรุน

คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของคอนกรีตพรุน ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเนื้อคอนกรีต คอนกรีตพรุนมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากคอนกรีตทั่วไป เนื่องจากคอนกรีตพรุนมีปริมาณโพรงที่มากกว่าคอนกรีตทั่วไป ดังนั้นคุณสมบัติของคอนกรีตพรุนจึงมักสัมพันธ์กับปริมาณโพรงอย่างเด่นชัด นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ การอัดแน่น ขนาดคละและความแข็งแรงของมวลรวม

2.3.1 ปริมาณโพรงและความหนาแน่น

คอนกรีตพรุนทั่วไป จะมีปริมาณโพรงอยู่ระหว่าง 15-35 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดคละของมวลรวม ปริมาณปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และการอัดแน่น เป็นต้น โดยความพรุนในเนื้อคอนกรีตพรุนประกอบด้วยโพรง 3 ชนิด ได้แก่ โพรงในเนื้อเพสต์ (Pores) โพรงในเนื้อมวลรวม (Voids in Aggregate) และโพรงช่องว่าง (Voids) โดยโพรงในเนื้อเพสต์ ซึ่งเป็นโพรงขนาดเล็กประกอบด้วยโพรงเจล (Gel Pores) และโพรงคาปิลารี (Capillary Pores) ซึ่งมีผลต่อกำลังของเพสต์ โดยโพรงส่วนนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเพสต์ [4] โพรงในเนื้อวัสดุมวลรวมหยาบ คือโพรงอากาศที่อยู่ในเนื้อมวลรวมหยาบซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ และสุดท้ายคือโพรงช่องว่าง คือโพรงที่อยู่ระหว่างมวลรวมหยาบซึ่งเหลือจากการเข้าแทนที่ของเพสต์ ซึ่งในการหาปริมาณโพรง (Void Content) ในคอนกรีตพรุน คือการหาปริมาณโพรงช่องว่างในส่วนนี้และมีอิทธิพลมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพรุน หากคอนกรีตพรุนที่ใช้เพสต์และมวลรวมชนิดเดียว แต่มีปริมาณโพรงช่องว่างที่แตกต่างกัน ก็ย่อมส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพรุนที่แตกต่างกัน ปริมาณโพรงช่องว่างนี้มีทั้งโพรงที่ต่อเนื่อง (Connected Voids) และโพรงไม่ต่อเนื่อง (Unconnected Voids) ปริมาณโพรงต่อเนื่องมีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านน้ำ ส่วนผสมคอนกรีตพรุนที่มีปริมาณเพสต์มาก หรือที่ใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กลง จะมีผลทำให้ความต่อเนื่องของโพรงลดลง [5]

การอัดแน่นในคอนกรีตพรุน นอกจากส่งผลต่อปริมาณโพรงในเนื้อคอนกรีตแล้วยังมีผลต่อความหนาแน่นของคอนกรีตพรุนด้วย โดยคอนกรีตพรุนที่ได้รับการอัดแน่นต่าง ๆ กัน มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1,680 ถึง 1,920 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [6] อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใช้มวลรวมเบาในการทำคอนกรีตพรุน เช่น ไดอะตอมไมต์ หินภูเขาไฟ หรือเศษคอนกรีตมวลเบา ทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตพรุนมีค่าต่ำลงถึง 558-775 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [7]

2.3.2 การซึมผ่านน้ำ

การซึมผ่านน้ำเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของคอนกรีตพรุน ที่ยอมให้น้ำหรืออากาศไหลผ่านเนื้อคอนกรีตได้ โดยการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนมีความสัมพันธ์กับปริมาณโพรงและขนาดรูพรุนของคอนกรีต คอนกรีตพรุนที่มีปริมาณโพรงมากจะให้ค่าการซึมผ่านน้ำที่มาก อย่างไรก็ตามค่าการซึมผ่านน้ำไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณโพรงเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับขนาดของโพรงและความต่อเนื่องของโพรง ปริมาณเพสต์ที่มากขึ้นมีผลให้ความต่อเนื่องของโพรงลดลง การให้มวลรวมขนาดเล็กลงก็มีผลให้ความต่อเนื่องของโพรงและการซึมผ่านน้ำลดลงเช่นกัน นอกจากนั้นพฤติกรรมของปริมาณโพรง ขนาดโพรง ความต่อเนื่องของโพรงสำหรับคอนกรีตพรุน เพื่อทำนายค่าการซึมผ่านน้ำ มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านน้ำและปริมาณโพรง เป็นสมการแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล [8] ตัวอย่างเช่น สมการที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.88 โดยที่ k คือ การซึมผ่านน้ำ (เซนติเมตรต่อวินาที) และ v คือ อัตราส่วนโพรง (เปอร์เซ็นต์) ได้จากสมการที่ (1)

$$k = 0.0589e^{0.1202(v)} \quad (1)$$

เนื่องจากการซึมผ่านน้ำมีค่าเพิ่มเมื่อปริมาณโพรงเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันกำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลง ดังนั้นในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตพรุนสิ่งที่ต้องพิจารณา คือปริมาณโพรงต้องทำให้ค่าการซึมผ่านน้ำต้องไม่มากเกินไปและต้องเหมาะสมกับค่ากำลังอัดที่ต้องการ การทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนทดสอบโดยอาศัยหลักการวัดค่าการซึมผ่านน้ำของดินที่มีเม็ดขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นการทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำแบบแรงดันคงที่ (Constant Head Test) โดยทำการจำลองการทดสอบได้ในการทดสอบ เริ่มต้นจากการนำตัวอย่างรูปทรงกระบอกมาใส่ในแบบที่สามารถป้องกันการไหลซึมด้านข้างได้ จากนั้นนำตัวอย่างติดตั้งเข้ากับชุดทดสอบ ปล่อยน้ำเข้าสู่ชุดทดสอบโดยน้ำจะไหลเข้ากระบอกด้านบนเหนือตัวอย่าง และไหลผ่านตัวอย่างไปสู่กระบอกอีกด้าน ไล่ฟองอากาศที่อยู่ในตัวอย่างออก ปรับปริมาณน้ำไหลเข้าให้ระดับน้ำที่ทางออกทั้งสองคงที่ วัดปริมาณน้ำด้วยการชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาค่าการซึมผ่านน้ำ

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

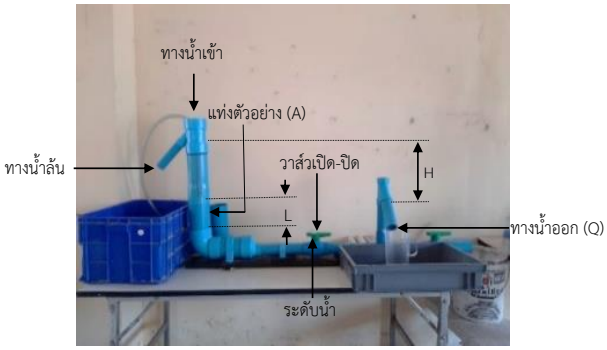
1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิคประเภท GU ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2594-2556) โดยเป็นปูนซีเมนต์ที่ใหม่ ไม่จับตัวเป็นก้อน บรรจุในถุงพลาสติกอย่างดี

2. หิน (มวลรวมหยาบรีไซเคิล) ใช้หิน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาด 1/2 นิ้ว, 3/8 นิ้ว และเบอร์ 4 ดังแสดงในรูปที่ 1

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 1 มวลรวมหยาบรีไซเคิล (ก) หินขนาด1/2 นิ้ว (ข) หินขนาด 3/8 นิ้ว (ค) หินเบอร์ 4

3. เครื่องทดสอบการซึมผ่านน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบการซึมผ่านน้ำ

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

1. ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิคประเภท GU ทดสอบความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐานทดสอบวัสดุ ASTM C 188

2. ทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C127-88 Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate โดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลตัวอย่างที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD)

3. ทดสอบหน่วยน้ำหนักและช่องว่างของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C29 Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Void in Aggregate

3.3 การทดสอบตัวอย่าง

1. การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดโดยวิธี Slump Test ตามมาตรฐาน ASTM C143-89 Standard Test Method for Portland Cement Concrete

2. การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C39 โดยทำการทดสอบที่อายุ 7 วัน และที่อายุ 28 วัน ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร เมื่อ σmax หมายถึง กำลังรับแรงอัดสูงสุด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) $Pmax$ คือแรงอัดสูงสุด (กิโลกรัม) และ A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\sigma max = \frac{Pmax}{A} \quad (2)$$

3. การทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D2434 เป็นการทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำแบบแรงดันคงที่ (Constant Head Test) เมื่อ k หมายถึง ค่าการซึมผ่านน้ำ (เซนติเมตรต่อวินาที), Q คืออัตราการไหล (ลูกบาศก์เซนติเมตร), L คือความสูงของตัวอย่าง (เซนติเมตร), H คือระยะห่างระหว่างระดับน้ำล้นของทางออกทั้งสอง (เซนติเมตร), A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร) และ t คือเวลา (วินาที) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$k = \frac{QL}{HAt} \quad (3)$$

4. การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุน โดย ACI 522R-10 [1] ได้เสนอแนะวิธีการออกแบบคอนกรีตพรุนปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วยมวลรวมหยาบที่อยู่ชิดกัน ในสภาพที่หลวมกว่าสภาพอัดแน่นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณเพสต์เข้าไปเคลือบผิวมวลรวมและแทรกตัวอยู่ในช่องว่าง ทั้งนี้สภาพการอยู่ชิดกันของมวลรวมในคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติของเพสต์ ปริมาณเพสต์ และพลังงานที่ใช้ในการอัดแน่น เพสต์ที่มีค่าการไหลสูงจะเคลือบผิวมวลรวมได้บางกว่า ทำให้มวลรวมอยู่ชิดกันมากกว่า แต่จะไม่สามารถใช้ในปริมาณมากได้ เนื่องจากจะเกิดการไหลของเพสต์ไปอุดตันด้านล่าง ในขณะที่เพสต์มีค่าการไหลต่ำจะเคลือบมวลรวมได้หนากว่า ส่งผลให้มวลรวมอยู่ห่างกันมากขึ้น และพลังงานในการอัดแน่นที่สูงขึ้นจะทำให้มวลรวมอยู่ชิดกันมากขึ้น โดยทั่วไปปริมาณเพสต์ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 15-25 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของมวลรวม โดยที่มวลรวมขนาดเล็กหรือมีผิวหยาบ จะมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมขนาดใหญ่หรือผิวเรียบ ดังนั้น จึงต้องการปริมาณเพสต์ในการเคลือบผิวมากกว่า และปริมาณเพสต์ยังขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการอัดแน่น หากพลังงานอัดแน่นสูงปริมาณเพสต์ที่ใช้ไม่ควรมาก ทั้งนี้เพื่อป้องกันการไหลลงด้านล่างของเพสต์ การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพรุนเบื้องต้นจึงต้องทำการทดลองหาปริมาณมวลรวมหยาบและปริมาณเพสต์ที่เหมาะสมกับระดับพลังงานที่ใช้ในการอัดแน่น เมื่อ Vp หมายถึงปริมาณของซีเมนต์เพสต์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร), C คือปริมาณปูนซีเมนต์ (กิโลกรัม), W คือปริมาณน้ำ (กิโลกรัม) และ w/c คืออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ สามารถคำนวณหาปริมาณต่าง ๆ ได้ [9] ตามสมการที่ (4) - (6)

$$Vp = (C / (3.15 * 1{,}000)) + (W/(1{,}000) \quad (4)$$

$$W = (w/c) * C \quad (5)$$

$$C = (Vp * 1{,}000)/(0.315 + (w/c) \quad (6)$$

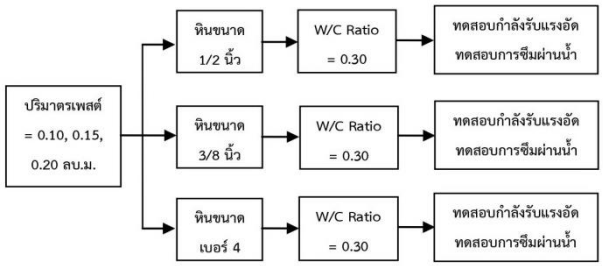
3.4 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนโพรง (Porosity)

การทดสอบหาค่าอัตราส่วนโพรงของคอนกรีตพรุนรีไซเคิล ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร ซึ่งทำการทดสอบโดยนำตัวอย่างมาวัดขนาดเพื่อหาปริมาตรรวม จากนั้นนำตัวอย่างแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อชั่งน้ำหนักในน้ำ ต่อจากนั้นนำตัวอย่างทำให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง มาชั่งน้ำหนักในอากาศ เมื่อ V หมายถึงอัตราส่วนโพรง (เปอร์เซ็นต์), W_1 คือน้ำหนักก้อนตัวอย่างชั่งในน้ำ (กิโลกรัม), W_2 คือน้ำหนักก้อนตัวอย่างชั่งในอากาศ (กิโลกรัม) และ V_1 คือปริมาตรของก้อนตัวอย่าง (ลูกบาศก์เมตร) สามารถคำนวณหาอัตราโพรง ตามคำแนะนำของ ถนัดกิจ ชารีรัตน์ และคณะ [10] ได้จากสมการที่ (7)

$$V = (1 - \left(\frac{W_2 - W_1}{V_1}\right) * 100 \quad (7)$$

3.5 แผนผังแสดงการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตพรุน

การออกแบบส่วนผสมจะใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วน 0.10, 0.15 และ 0.20 ลูกบาศก์เมตร โดยปริมาตร ที่มีปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 ตามแผนผัง ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังการออกแบบส่วนผสมและการทดสอบของคอนกรีตพรุน

4. ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

4.1 ผลการทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านกายภาพ

1. ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ได้ผลจากการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย คือ 3.11 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อยู่ระหว่าง 3.05-3.20 ซึ่งค่าจะมากหรือน้อยโดยทั่วไปขึ้นอยู่ส่วนประกอบของเนื้อซีเมนต์และความละเอียดของซีเมนต์ (ASTM C 188)

2. ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบรีไซเคิล ได้ผลจากการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาด 1/2 นิ้ว, 3/8 นิ้ว และเบอร์ 4 ได้ค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละขนาด คือ 2.58, 2.56 และ 2.47 ตามลำดับ ซึ่งความถ่วงจำเพาะของมวลรวมทั่วไป ที่ใช้ในประเทศไทยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.65 ถึง 2.70 จะเห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งที่ได้มีค่าต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะมวลรวมทั่วไป และค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบของแต่ละขนาดมีค่าเท่ากับ 2.80, 3.37 และ 4.58 โดยพบว่ามวลรวมหยาบรีไซเคิลมีการดูดซึมน้ำมากกว่าค่าการดูดซึมน้ำของหินย่อยหรือมวลรวมหยาบธรรมชาติที่ใช้กันอยู่ทั่วไป (ASTM C 128) เนื่องจากมีปริมาณเพสต์เก่าหรือมอร์ต้าเกาะอยู่ที่ผิวมวลรวมหยาบรีไซเคิล จึงทำให้มีการดูดซึมน้ำมากขึ้น

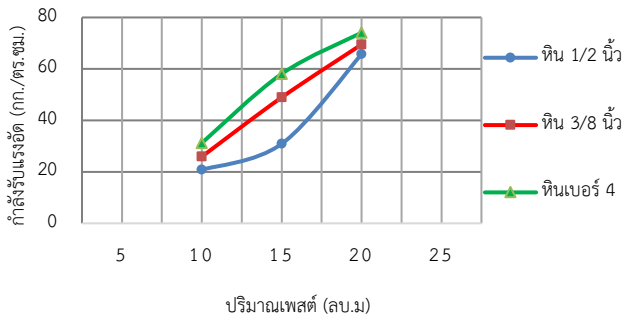
4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 1 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 7 วัน และตารางที่ 2 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยมีค่าของปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และในแต่ละซีเมนต์เพสต์มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 มีขนาดของมวลรวมที่ต่างกัน พบว่าคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบขนาดเล็ก ให้ความสามารถในการเทเข้าแบบได้ง่ายกว่าคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่และลักษณะของก้อนตัวอย่างมีความสม่ำเสมอหรือมีการกระจายตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ดีกว่าด้านบนของก้อนตัวอย่างมีการยึดเกาะกันดีไม่หลุดร่อนง่ายเหมือนคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบขนาดใหญ่

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนของแต่ละปริมาตรเพสต์ W/C Ratio เท่ากับ 0.30 ที่อายุ 7 วัน

ขนาดหิน	กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน		
	เพสต์ 0.10 (กก./ตร.ซม.)	เพสต์ 0.15 (กก./ตร.ซม.)	เพสต์ 0.20 (กก./ตร.ซม.)
1/2 นิ้ว	20.822	30.895	65.736
3/8 นิ้ว	25.904	48.940	69.495
เบอร์ 4	31.193	58.079	74.069

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีความหนาขึ้น และทำให้ขนาดของความโพรงภายในเนื้อคอนกรีตพรุนลดลง ส่งผลให้การรับกำลังอัดของคอนกรีตพรุนเพิ่มมากขึ้น สามารถนำผลมาสร้างกราฟระหว่างปริมาตรเพสต์กับกำลังอัด ดังแสดงในรูปที่ 4

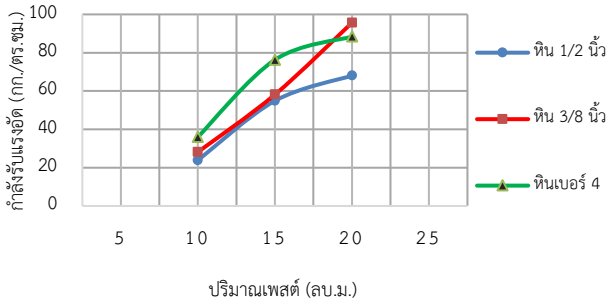


รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์เพสต์กับค่ากำลังอัดที่อายุ7วัน

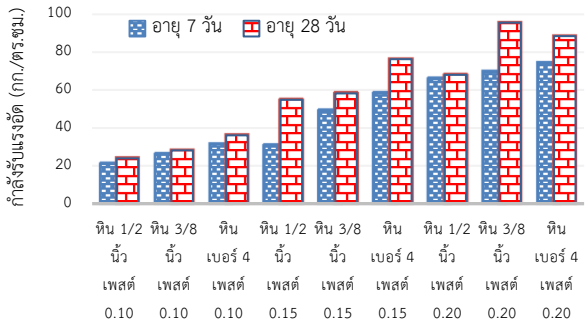
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนของแต่ละปริมาตรเพสต์ W/C Ratio เท่ากับ 0.30 ที่อายุ 28 วัน

ขนาดหิน	กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน		
	เพสต์ 0.10 (กก./ตร.ซม.)	เพสต์ 0.15 (กก./ตร.ซม.)	เพสต์ 0.20 (กก./ตร.ซม.)
1/2 นิ้ว	23.840	54.889	68.025
3/8 นิ้ว	28.174	58.139	95.633
เบอร์ 4	36.007	76.299	88.401

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตพรุนที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดประลัยเพิ่มขึ้น โดยแต่ละปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การรับกำลังอัดของคอนกรีตพรุนมากขึ้นด้วย สามารถนำผลมาสร้างกราฟระหว่างปริมาตรเพสต์กับค่ากำลังอัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 5 และนำผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน กับที่อายุ 28 วัน มาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์เพสต์กับค่ากำลังอัดที่อายุ28วัน



รูปที่ 6 แผนภูมิความสัมพันธ์กำลังอัดคอนกรีตพรุนที่อายุ 7 วัน และที่อายุ 28 วัน ของแต่ละซีเมนต์เพสต์

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตพรุนที่อายุ 7 วันและที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดประลัยเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ค่าเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นต่างกัน เช่น หินขนาด 1/2 นิ้ว ที่ซีเมนต์เพสต์ 0.10 ลูกบาศก์เมตร มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดร้อยละ 8.76 ส่วนหินขนาด 3/8 นิ้ว ที่ซีเมนต์เพสต์ 0.20 ลูกบาศก์เมตร มีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ร้อยละ 37.61

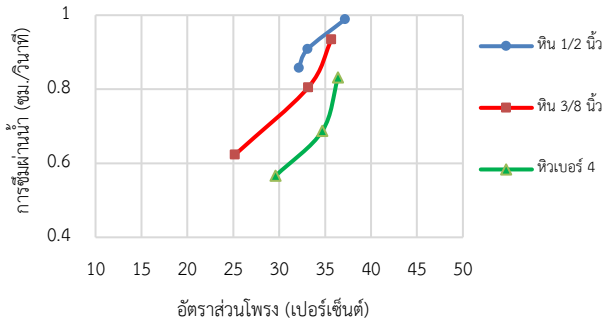
4.3 การทดสอบการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุนรีไซเคิล

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุน ที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาดเล็ก ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่มีค่าต่ำที่สุด และคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบรีไซเคิลขนาดใหญ่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่มีค่ามากที่สุด โดยตารางที่ 3 จะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านน้ำกับขนาดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ใช้อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C Ratio) เท่ากับ 0.30 โดยหินขนาด 1/2 นิ้ว ที่ปริมาณซีเมนต์เพสต์ 0.10 ลูกบาศก์เมตร ได้ค่าการซึมผ่านน้ำมากที่สุดเท่ากับ 0.989 เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนหินขนาดเบอร์ 4 ที่ปริมาณซีเมนต์เพสต์ 0.20 ลูกบาศก์เมตร ได้ค่าการซึมผ่านน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 0.566 เซนติเมตรต่อวินาที

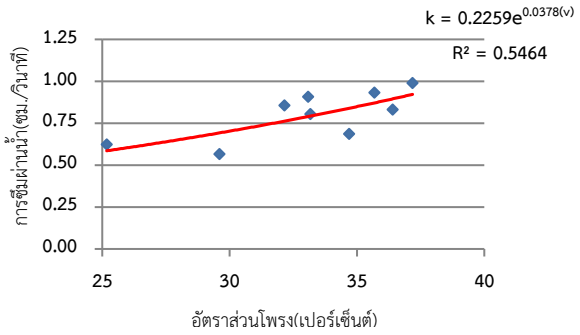
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำ อัตราส่วนโพรง และความหนาแน่นของคอนกรีตพรุน ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C Ratio) เท่ากับ 0.30

Mixes	การซึมผ่านน้ำ (ซม./วินาที)	การดูดซึมน้ำหลังแช่ 24 ชม. (%)	อัตราส่วนโพรง (%)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
CPM0.1(1/2)	0.989	5.25	37.183	1,513.347
CPM0.1(3/8)	0.934	6.33	35.687	1,543.143
CPM0.1(No.4)	0.831	8.61	36.398	1,519.160
CPM0.15(1/2)	0.908	6.67	33.081	1,610.763
CPM0.15(3/8)	0.805	2.46	33.165	1,603.547
CPM0.15(No.4)	0.687	3.55	34.686	1,564.890
CPM0.2(1/2)	0.857	2.29	32.150	1,633.120
CPM0.2(3/8)	0.623	2.30	25.174	1,797.687
CPM0.2(No.4)	0.566	3.08	29.604	1,692.917

จากตารางที่ 3 ค่าการซึมผ่านน้ำแยกตามขนาดของหินที่ใช้เท่ากับ 1/2 นิ้ว, 3/8 นิ้ว และเบอร์ 4 อัตราส่วนโพรงหาได้จากสมการที่ (7) ยกตัวอย่าง เช่น อัตราส่วนผสมของหินขนาด 1/2 นิ้ว ซีเมนต์เพสต์ 0.10 ลูกบาศก์เมตร คือ [CMP0.1(1/2)] แทนค่า [1- (2.385-2.38401) / (0.001576)] x 100 ได้เท่ากับ 37.183 เปอร์เซ็นต์

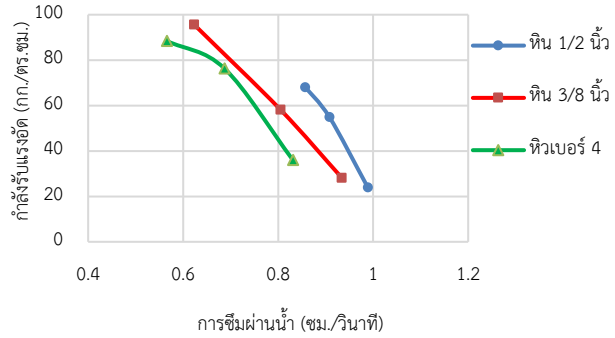


รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงกับการซึมผ่านน้ำ



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำกับอัตราส่วนโพรง

สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำกับอัตราส่วนโพรง ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 พบว่าเมื่อการซึมผ่านน้ำมีค่าสูง เนื่องจากมีค่าอัตราส่วนโพรงมาก จึงทำให้เกิดการไหลซึมผ่านของน้ำได้ดี และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ลดลง



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำกับกำลังอัดของคอนกรีตพรุน

จากรูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำกับกำลังอัด โดยกำลังรับแรงอัดมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าการซึมผ่านน้ำน้อยลง จึงทำให้เกิดการไหลซึมผ่านของน้ำได้ต่ำ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณซีเมนต์เพสต์เพิ่มมากขึ้น

5. บทสรุป

การศึกษาการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุนโดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล จากผลการทดลองพบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าต่ำกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติทั่วไป แต่มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่มากกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติ ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนมีค่ามากขึ้น เมื่อขนาดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลเล็กลง เนื่องจากมวลรวมขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับซีเมนต์เพสต์น้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก ดังนั้นปริมาตรซีเมนต์เพสต์ที่ผสมจะมีส่วนสำคัญต่อค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตพรุนโดยตรง จากพื้นที่ผิวสัมผัสของมวลรวมหยาบรีไซเคิลมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เคลือบมวลรวมหยาบรีไซเคิลแต่ละขนาดหรือรูปร่างจึงมีค่าไม่เท่ากันด้วย

ค่าการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น ลักษณะพื้นผิวของมวลรวมหยาบรีไซเคิล ความต่อเนื่องของโพรง และปริมาณซีเมนต์เพสต์ เป็นต้น จากผลการทดลองพบว่า หินขนาด 1/2 นิ้ว ที่ปริมาณซีเมนต์เพสต์ 0.10 ลูกบาศก์เมตร ให้ค่าการซึมผ่านน้ำสูงสุดได้เท่ากับ 0.989 เซนติเมตรต่อวินาที

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้สนับสนุนการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ รวมทั้งอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ ทำให้งานวิจัยเรื่อง “การศึกษาการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพรุนโดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล” สำเร็จและเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] American Concrete Institute (ACI) Committee 522, (2010). *Report on Pervious Concrete : ACI 522R-10.* Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

[2] American Concrete Institute (ACI) Committee 522, (2006). *Report on Pervious Concrete : ACI 522R-06*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

[3] O' Mahony, M., (1990). *Recycling of Materials in Civil Engineering*. Doctoral Thesis, University of Oxford, USA.

[4] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, (2556). ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต. *สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, พิมพ์ครั้งที่ 7, กรุงเทพมหานคร

[5] Sumanasooriya, M.S. and Neithalath, N., (2011). Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. *Cement and Concrete Composites*, Vol.33, No.8, pp.778-787.

[6] Richard, C., (1988). No-fines pervious concrete for paving. *Concrete International*, No.10, pp.20-27.

[7] Zaetang, Y., Wongsa, A., Sata, V. and Chindaprasirt, P., (2013). Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, Vol.48, pp.585-591.

[8] วันชัย สะตะ และปริญญา จินดาประเสริฐ, (2556). โครงการ การใช้เศษวัสดุเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตพรุน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[9] วันชัย สะตะ และปริญญา จินดาประเสริฐ, (2559). คอนกรีตพรุน : คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. *วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, ฉบับที่ 29 ธันวาคม 2559

[10] ถนัดกิจ ชารีรัตน์, ปริญญา จินดาประเสริฐ, และShigemitsu Hatanaka, (2551). คอนกรีตพรุน : คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่13*, จอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา ชลบุรี