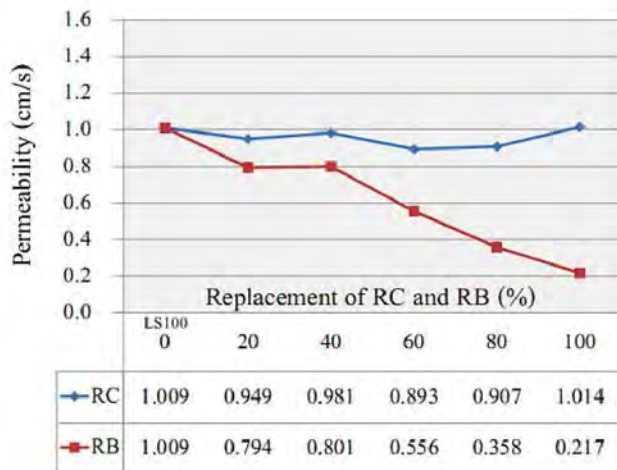
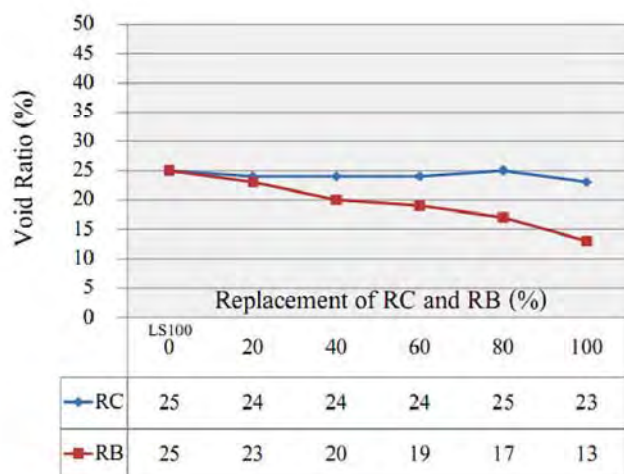


อัตราส่วนโพรงลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นทั้ง เนื่องจากการแตกหักของ RB ในระหว่างการผสมและการอัดแน่น ทำให้ RB เล็กกลงเข้าไปแทรกระหว่างโพรง ทำให้ช่องว่างลดลง



ภาพที่ 8 การซึมผ่านน้ำ

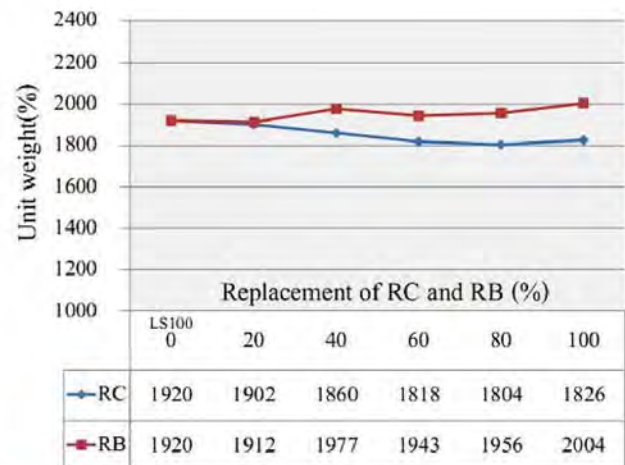


ภาพที่ 9 อัตราส่วนโพรง

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 ผลการทดสอบคิลาแลง

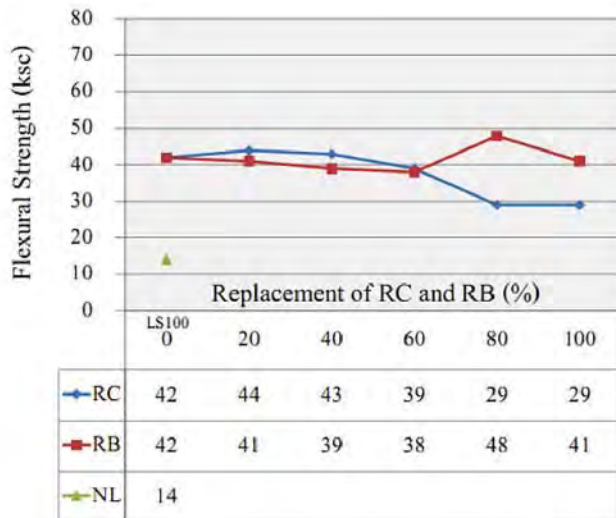
3.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

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

3.3.2 การทดสอบหาอัตราส่วนโพรงและหน่วยน้ำหนักของคิลาแลง

ผลการทดสอบอัตราส่วนโพรงและหน่วยน้ำหนักของก๊อนคิลาแลงประดิษฐ์และคิลาแลงธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าคิลาแลงประดิษฐ์จะมีหน่วยน้ำหนัก

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 ทั้งนี้ เนื่องจาก 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

งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาถึงการพัฒนาศีลาและความพูนให้ใกล้เคียงกับศิลาแลงธรรมชาติ ดังนั้นควรมีการพัฒนาด้านสีและการเติมปริมาณทรายละเอียดเข้าไปในส่วนผสมเพื่อให้มีโครงสร้างใกล้เคียงศิลาแลงตามธรรมชาติมากยิ่งขึ้น

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 และค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการดูดซึมของผิวหน้า 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] เศษคอนกรีตบล็อกเมื่อใช้เป็นมวลรวมรีไซเคิลในคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตที่ได้มีกำลังดัดและกำลังดึงแยกที่สูงกว่าคอนกรีตที่ได้จากมวลรวมธรรมชาติ [4] เศษอิฐหรืออิฐรีไซเคิลสามารถนำกลับมาใช้เป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในคอนกรีตได้ไม่เกินร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ของการแทนที่ด้วยมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดตามลำดับ จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดียอมรับได้ [5]

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเศษคอนกรีต เศษคอนกรีตบล็อก และเศษอิฐมวลยวสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมรีไซเคิลในงานคอนกรีตแทนมวลรวมจากธรรมชาติได้ ทำให้ทรัพยากรธรรมชาติถูกรับร่นน้อยลง

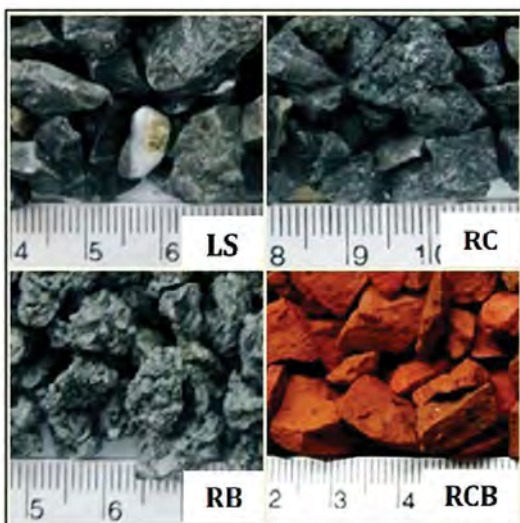
และส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้นอีกด้วย อีกทั้งในปัจจุบันพบว่า การศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวกับการนำมวลรวมรีไซเคิลมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตพูนยังมีอยู่เพียงเล็กน้อย ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาศึกษาเกี่ยวกับการนำมวลรวมรีไซเคิลซึ่งได้แก่ คอนกรีตรีไซเคิล (RC) คอนกรีตบดสีกีรีไซเคิล (RB) และอิฐมวลเบารีไซเคิล (RCB) มาใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนมวลรวมธรรมชาติ (LS) ในการผลิตคอนกรีตพูน ทำการศึกษาสมบัติทางกำลังและทางกายภาพของคอนกรีตพูน ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก อัตราส่วนโพรง ค่าการซึมผ่านของน้ำ ค่าหน่วยน้ำหนัก และค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการชดสีของผิวหน้าของคอนกรีตพูน

2. วัสดุทดสอบ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- สารลดน้ำพิเศษ Type FF (เมลามีน)
- มวลรวมหยาบ ได้แก่ คอนกรีตรีไซเคิล (RC), คอนกรีตบดสีกีรีไซเคิล (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

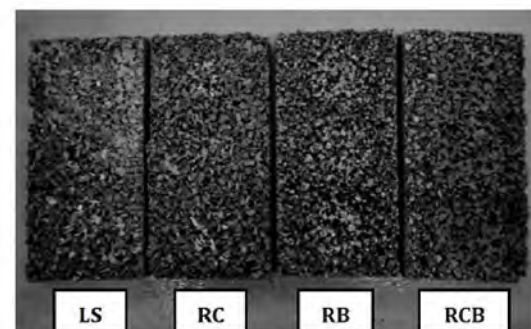
ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึงแยก, อัตราส่วนโพรง, ค่าการซึมผ่านของน้ำ และค่าหน่วยน้ำหนัก ดังรูปที่ 2 และใช้ตัวอย่างปริซึมขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และหนา 3 เซนติเมตร สำหรับทดสอบค่าการสูญเสีย น้ำหนักจากการชดสีของผิวหน้า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



รูปที่ 2 ตัวอย่างทรงกระบอก

3.2 ส่วนผสม

ส่วนผสมคอนกรีตพูนใช้มวลรวมรีไซเคิล 3 ชนิดได้แก่ คอนกรีตรีไซเคิล (RC), คอนกรีตบดสีกีรีไซเคิล (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 จากนั้นนำมวลรวมหยาบในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งที่ได้เตรียมไว้ ผสมรวมกับซีเมนต์เพสต์ในเครื่องผสมคอนกรีตพรุน จนคอนกรีตพรุนมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ทำการตักส่วนผสมคอนกรีตพรุนใส่ในแบบหล่อขนาดต่างๆ ให้ได้น้ำหนักของส่วนผสมตามที่ออกแบบไว้ 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)

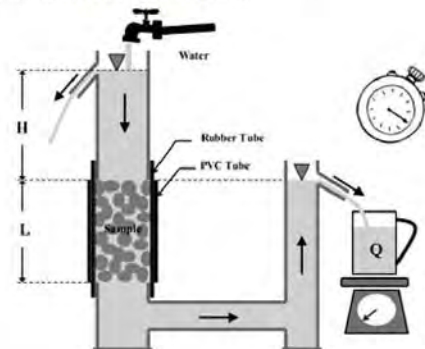
Q คือ ปริมาตรน้ำ (ซม.³)

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

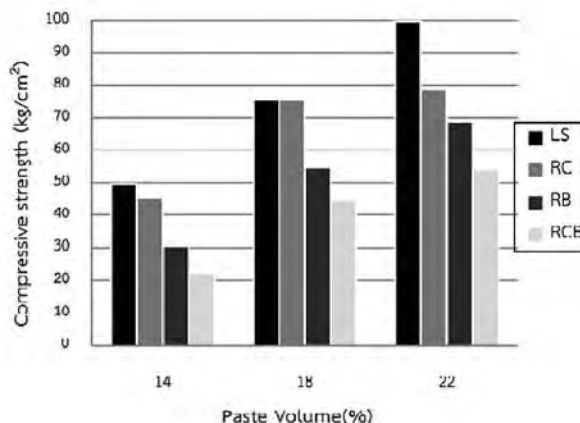
โดยนำตัวอย่างออกจากห้องบ่มและทิ้งให้แห้งเป็นเวลา 1 วัน (สภาพแห้งในอากาศ) นำตัวอย่างที่จะทดสอบเป่าด้วยลม เพื่อกำจัดเศษฝุ่นต่างๆออก แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนทดสอบ นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ แล้วทำการทดสอบขัดผิวหน้าเป็นเวลา 2 นาที ใช้น้ำหนักในการขัด 98 นิวตัน จากนั้นนำตัวอย่างเป่าทำความสะอาดอีกครั้ง แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบ ค่าการสูญเสีย น้ำหนักจากการสึกกร่อนของผิวหน้า คือ ค่าผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังทดสอบ

5. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

5.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนที่อายุ 28 วันแสดงดังรูปที่ 7 พบว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์เพลสต์ที่เท่ากันคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบจะมีกำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าคอนกรีตพูนที่ใช้ LS เป็นมวลรวมหยาบ เนื่องจาก LS เป็นหินปูนจากธรรมชาติที่มีความแข็งแรงมากกว่าและค่าการสึกกร่อนที่น้อยกว่ามวลรวมรีไซเคิลนั่นเอง โดยคอนกรีตพูนที่ใช้ RC จะให้กำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตพูนที่ใช้ RB และ RCB เนื่องจาก RB มีรูพรุนมากและลักษณะพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างขรุขระ จึงต้องการปริมาณเพลสต์ในการยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมที่มากกว่ามวลรวมชนิดอื่น ทำให้กำลังรับแรงอัดของ RB มีค่าลดลง ส่วน RCB จะมีค่ากำลังที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับหินชนิดอื่น เนื่องจาก RCB เป็นอิฐมอญที่ได้จากการนำดินเหนียวมาเผา ซึ่งในขั้นตอนของการผสม เนื้อดินเหนียวบริเวณผิวของ RCB จะเกิดการหลุดร่อนออกมาได้ตลอดเวลาเนื่องจากการขัดสีกันระหว่างมวลรวม จึงทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพลสต์กับ RCB ที่ไม่แข็งแรงเมื่อเทียบกับหินชนิดอื่น ส่งผลให้ RCB มีกำลังรับแรงอัดที่น้อยที่สุด

เมื่อปริมาณของซีเมนต์เพลสต์ในส่วนผสมมากขึ้น คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบจะมีกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีเมนต์เพลสต์ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตพูนที่ได้จาก LS เนื่องจากปริมาณซีเมนต์เพลสต์ที่เพิ่มขึ้นนั้น จะทำให้การยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมดีขึ้น คอนกรีตพูนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ช่องว่างหรืออัตราส่วนโพรงลดลง ส่งผลให้คอนกรีตพูนมีความสามารถในการรับแรงอัดได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้น การเพิ่มปริมาณของซีเมนต์เพลสต์ในส่วนผสมจะทำให้คอนกรีตพูนจากมวลรวมรีไซเคิลมีกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นด้วย

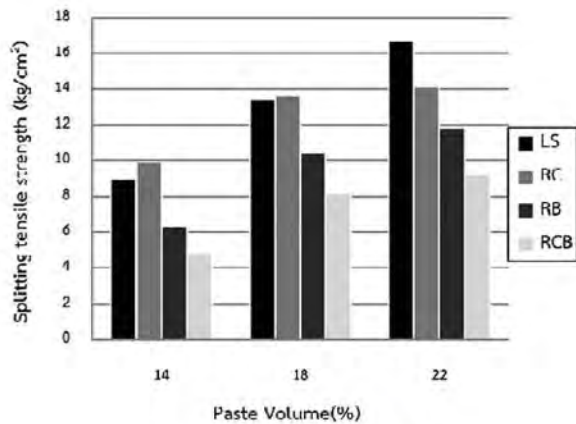


รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัด

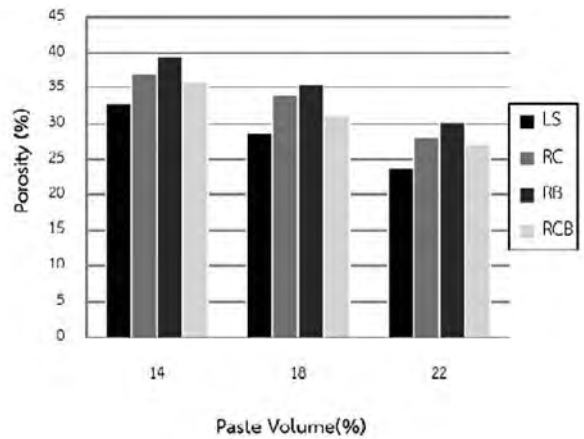
5.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกแบบผ่าซีก

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วันแสดงดังรูปที่ 8 พบว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์เพลสต์ที่เท่ากัน คอนกรีตพูนที่ใช้ RC เป็นมวลรวมหยาบจะมีกำลังรับแรงดึงแยกแบบผ่าซีกที่มากกว่าคอนกรีตพูนที่ได้จาก LS ยกเว้นที่ปริมาณซีเมนต์เพลสต์ 22 %จะมีค่าน้อยกว่า ส่วนคอนกรีตพูนที่ใช้ RB และ RCB เป็นมวลรวมหยาบ จะมีค่ากำลังรับแรงดึงแยกแบบผ่าซีกที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตพูนจาก LS และ RC ซึ่งสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนในหัวข้อที่ 5.1 คือ RB มีรูพรุนมากและผิวสัมผัสที่ค่อนข้างขรุขระ จึงต้องการปริมาณเพลสต์เชื่อมประสานที่มากกว่ามวลรวมชนิดอื่น ส่วน RCB เป็นมวลรวมที่มีดินเหนียวเผาเป็นองค์ประกอบหลัก มักเกิดการหลุดร่อนได้ตลอดเวลาที่เกิดการขัดสี และมีการยึดเกาะกันที่ไม่แข็งแรงระหว่างซีเมนต์เพลสต์กับมวลรวม ส่งผลให้คอนกรีตพูนที่ใช้ RB และ RCB เป็นมวลรวมหยาบมีค่ากำลังรับแรงดึงแยกที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตพูนจาก LS และ RC

เมื่อปริมาณของซีเมนต์เพลสต์เพิ่มขึ้น พบว่ากำลังรับแรงดึงแยกแบบผ่าซีกของคอนกรีตพูนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีเมนต์เพลสต์ เนื่องจากปริมาณเพลสต์ที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมจะทำให้คอนกรีตพูนมีการยึดเกาะกันดียิ่งขึ้น โพรงหรือช่องว่างลดลง ความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตพูน ให้สามารถรับแรงดึงแยกแบบผ่าซีกได้มากขึ้น ดังนั้น การเพิ่มปริมาณของซีเมนต์เพลสต์ในส่วนผสมจะทำให้คอนกรีตพูนจากมวลรวมรีไซเคิลมีกำลังรับแรงดึงแยกแบบผ่าซีกที่เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 8 กำลังรับแรงดึงแยกแบบผ่าซีก

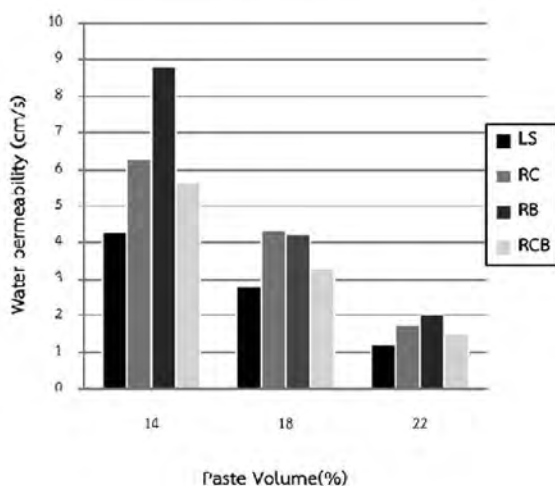


รูปที่ 10 อัตราส่วนโพรง

5.3 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรง

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

เมื่อปริมาณของซีเมนต์เฟสที่เพิ่มขึ้น คอนกรีตพูนจากมวลรวมรีไซเคิลและมวลรวมธรรมชาติจะมีการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรงที่ลดลงตามปริมาณของซีเมนต์เฟสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณซีเมนต์เฟสที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมจะทำให้คอนกรีตพูนมีโพรงหรือช่องว่างที่ลดลง คอนกรีตพูนมีความทึบและความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านน้ำจึงลดลงด้วย ดังนั้น การเพิ่มปริมาณซีเมนต์เฟสในส่วนผสมจะทำให้ความสามารถในการซึมผ่านน้ำและอัตราส่วนโพรงของคอนกรีตพูนลดลง

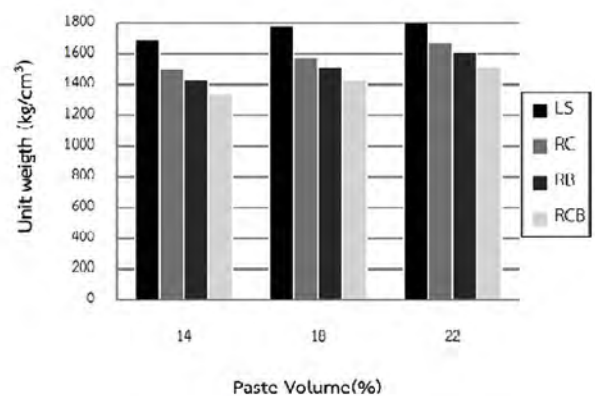


รูปที่ 9 การซึมผ่านของน้ำ

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



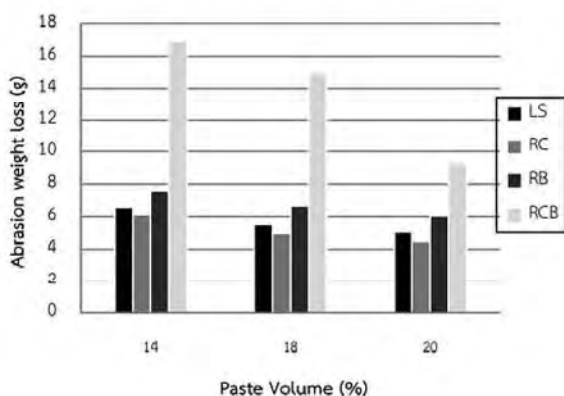
รูปที่ 11 หน่วยน้ำหนัก

5.5 ผลการทดสอบการขัดสีของผิวหน้า

ผลการทดสอบการขัดสีของผิวหน้าคอนกรีตพูนสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีของผิวหน้าของคอนกรีตพูน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 12 จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตพูนที่ใช้ RB และ RCB เป็นมวลรวมหยาบ จะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีของ

ผิวหน้าที่มากกว่าคอนกรีตพูนที่ใช้ LS เป็นมวลรวมหยาบเนื่องจาก RB เป็นมวลรวมที่มีรูพรุนในตัวเองมาก ไม่แข็งแรง ความทนทานต่อการขัดสีจึงลดลง ส่วน RCB เป็นมวลรวมที่มีดินเหนียวเกาะเป็นองค์ประกอบหลัก จึงไม่ทนทานต่อการขัดสี ทำให้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีผิวหน้าที่ค่อนข้างสูงและสูงที่สุดเมื่อเทียบกับมวลรวมชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการสึกกร่อน (Los Angeles) ของมวลรวม แต่คอนกรีตพูนที่ใช้ RC เป็นมวลรวมหยาบจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีของผิวหน้าที่ต่ำกว่าคอนกรีตพูนที่ใช้ LS เป็นมวลรวมหยาบเนื่องจาก LS เป็นมวลรวมธรรมชาติที่มีความแข็งแรงในตัวเองสูงมาก เมื่อทำการทดสอบการขัดสี LS จะมีลักษณะของการหลุดร่อนเป็นชิ้นเนื้อหินขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการแตกหักของ LS แตกต่างจากการหลุดร่อนของ RC ซึ่งมีการหลุดร่อนแบบผ่นขนาดที่เกิดจากการขัดของหัวขัด 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 น้ำหนักเบากว่า 14-16% เมื่อเทียบกับคอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมธรรมชาติ

คอนกรีตพูนที่ใช้อิฐมวลเบา (RCB) เป็นมวลรวมหยาบจะมีน้ำหนักที่เบากว่า 20% สามารถซึมผ่านน้ำได้ดีกว่า แต่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีที่ผิวหน้าที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตพูน

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

ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตพูนจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก หน่วยน้ำหนัก และความทนทานต่อการขัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนโพรงและการซึมผ่านน้ำจะมีแนวโน้มลดลง

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาภายใต้คณบดีอาวุโสที่พิเศษชั้นสูง มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 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 ประยูรชาญ, 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.