



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การปรับปรุงบล็อกคอนกรีตพูนด้วยลวดอะลูมิเนียมเป็นวัสดุเสริมแรง

Porous concrete block improvement with reinforced material

ก้องรัฐ นกแก้ว¹ วชิรกรณ์ เสนาวัง^{1*} ภักดี คบกลาง²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม อำเภอเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม 48000

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

Kongrat Nokkeaw¹ Wachirakorn Senawang^{1*} Pakdee Khobklang²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom 48000

² Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Science and Engineering at Chulalongkornrajavidyalaya University, Sakon Nakhon Province Campus, Kasetsart University, Sakon Nakhon 47000

* Corresponding author.

E-mail: wachirakorn@npu.ac.th; Telephone: 0 95939 3598

วันที่รับบทความ 23 พฤศจิกายน 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 20 เมษายน 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 2 มิถุนายน 2565

วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 3 1 กันยายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ 13 ตุลาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการรับแรงอัด การรับแรงดัด และการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูน โดยมีรูปแบบการเสริมลวด 2 แบบ ใช้ลวดอะลูมิเนียมชนิดเส้นกลมจำนวน 2 ขนาด ได้แก่ ขนาด 2 มม. และ 4 มม. ผสมปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมทรายในอัตราส่วน 1:25 หินปูนค้างตะแกรงเบอร์ 4 และผสมสารลดน้ำพิเศษ ชนิด F ตัวอย่างบล็อกคอนกรีตพูนมีขนาด กว้าง 20 ซม. ยาว 52 ซม. และสูง 7.5 ซม. ผลการวิจัยพบว่าการเสริมลวดอะลูมิเนียมขนาด 2 มม. และ 4 มม. ในคอนกรีตพูนไม่ส่งผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัด แต่ส่งผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนเพิ่มขึ้น ผลของขนาดลวดอะลูมิเนียมที่เสริมในคอนกรีตพูนส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงดัดได้มากกว่าผลที่เกิดจากรูปแบบการเสริมลวด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูน (k) เท่ากับ 1.99 ซม./วินาที ที่อายุ 28 วัน ระยะเวลาการบ่มไม่ส่งผลต่อค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูน

คำสำคัญ

บล็อกคอนกรีต คอนกรีตพูน กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ

Abstract

This research focused on the compressive strength, flexural strength, and water permeability of porous concrete. Round aluminum wire in two diameters of 2 mm and 4 mm, was combined with cement to coarse aggregate in a ratio of 1:25, limestone in which retained on sieve No. 4, and superplasticizer. The sample of porous concrete blocks sizing 52x20x7.5 (length x width x depth/ height) cm was used in this whole experiment. The addition of 2 mm and 4 mm aluminum wires in two forms of wire reinforcement in porous concrete was studied. According to the results, sizing of aluminum wire revealed an impact on the increase in flexural strength of porous concrete than compressive strength. The sizing of an aluminum wire affected to the obtained flexural strength than reinforcing form. The water permeability of porous concrete (k) was 1.99 cm/s at the age of 28 days. The water permeability of porous concrete was not significantly affected by the curing time.

Keywords

concrete block; porous concrete; compressive strength; flexural strength; water permeability coefficient

1. บทนำ

ปัญหาการกัดเซาะลาดดิน และปัญหาดินถล่มเป็นปัญหาสำคัญที่สร้างผลกระทบให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก ปัจจุบันพบว่าเกิดขึ้นบ่อยครั้งและรุนแรงยิ่งขึ้น ทั้งจากปัจจัยความแปรปรวนของสภาพอากาศในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การกัดเซาะด้วยฝน หรือลมในบริเวณที่ขาดพืชคลุมดิน การกัดเซาะของกระแสน้ำ ทำให้เกิดการพังทลายของตลิ่ง ทั้งนี้ สาเหตุของการกัดเซาะหรือพังทลายของหน้าดินจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความลาดเอียงของพื้นดินและชนิดของดินที่แตกต่างกัน จากปัญหาดังกล่าววิธีช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินได้ คือการประยุกต์เทคโนโลยีบล็อกคอนกรีตพรุนเพื่อป้องกันแนวการพังทลายของลาดดิน

คอนกรีตพรุนคือคอนกรีตที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ต่อเนื่องกัน แม้มีความพรุนสูงแต่ยังมีความสามารถในการยึดเกาะกันของมวลรวมในคอนกรีต โดยปริมาณเพสต์มีเพียงพอสำหรับเคลือบผิวและเชื่อมระหว่างมวลรวมเท่านั้น ทำให้เกิดโพรงช่องว่างจำนวนมากในเนื้อคอนกรีต อาจกล่าวได้ว่าคอนกรีตพรุนประกอบด้วยส่วนหลัก 3 ส่วน ได้แก่ มวลรวมหยาบซึ่งมีปริมาณมากที่สุด วัสดุประสาน(เพสต์)ทำหน้าที่เชื่อมมวลรวมหยาบเข้าไว้ด้วยกัน และส่วนสุดท้ายคือปริมาณโพรงช่องว่างที่ส่วนมากจะเป็นโพรงที่ต่อเนื่องกัน [1] ซึ่งมีผลให้น้ำและอากาศสามารถผ่านคอนกรีตพรุนได้ดี

คอนกรีตพรุนแต่ละรูปแบบให้คุณสมบัติของคอนกรีตพรุนที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านความแข็งแรง การระบายน้ำ การอุ้มน้ำ และคุณสมบัติอื่นๆ ทั้งนี้คอนกรีตพรุนได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในวงการวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมทั่วโลก นอกจากนี้คอนกรีตพรุนที่ถูกออกแบบตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ในปัจจุบันถูกนำมาใช้งานในคอนกรีตสีเขียว (Green concrete) ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับงานปูผิวถนน ลานจอดรถ ดาดคลองและพื้นรางระบายน้ำ งานกรองตะกอนในระบบระบายน้ำเสีย รวมทั้งในงานก่อสร้างทางวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมอื่น ๆ อีกด้วย [2]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของลวดอะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้าน

กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนโดยเสริมลวดอะลูมิเนียม จำนวน 2 ขนาด ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีคุณสมบัติเพิ่มการยึดเหนี่ยว แต่ไม่ลดอัตราการซึมผ่านน้ำและไม่ลดกำลังของคอนกรีตพรุน

1.1 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวกับคอนกรีตบล็อก

รูปที่ 1(ก) แสดงรูปแบบลักษณะของบล็อกคอนกรีตแบบต่างๆ โดยทั่วไปคอนกรีตบล็อกทำมาจากส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ หิน และทราย ซึ่งสามารถรับแรงอัดได้ดี นิยมใช้ปูพื้นและทำทางเท้า ทั้งนี้ขนาดและรูปแบบก็แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน คอนกรีตบล็อกที่มีคุณสมบัติที่ดีจะมีความคงทน แข็งแรง หากสามารถประยุกต์เป็นบล็อกปูหญ้าที่มีลักษณะเป็นช่องว่างดังรูปที่ 1(ข) ที่เพิ่มช่องว่างของบล็อกให้สามารถปลูกวัชพืชได้ ก็จะสามารถป้องกันการพังทลายของหน้าดิน โดยรากของพืชคลุมทำให้ดินแตกเป็นก้อนเล็กๆ ทำให้ดินมีความพรุนมากขึ้นส่งผลให้ดินมีความร่วนซุยมากขึ้น รากของพืชคลุมจะช่วยยึดเกาะอนุภาคบริเวณผิวดิน ซึ่งจะทำให้หน้าดินถูกชะล้างพังทลายได้น้อยลง เนื่องจากคอนกรีตพรุนมีการไหลซึมของน้ำจากผิวคอนกรีตสู่ผิวดินมากกว่าคอนกรีตทั่วไปสะดวกต่อการเก็บน้ำฝนของพืช จึงถือเป็นทางเลือกที่ดีในการควบคุมอุทกภัย [3]



ก) บล็อกปูพื้นแบบต่างๆ

ข) บล็อกปูหญ้า

รูปที่ 1 รูปแสดงบล็อกปูพื้นและบล็อกปูหญ้า

ทฤษฎีการวิบัติของลาดดินมีทั้งแบบทรุดตัวและการไหลลงของพื้นดิน (Slump - earth flow) โดยมีลักษณะการเคลื่อนตัวแบบหมุน (Rotational slides) มีส่วนประกอบหลักๆ ที่สำคัญประกอบด้วย ผาชัน (Scarp) รอยแตกผิวดิน (Tension cracks) ผิวพิบัติการเฉือน (Surface of rupture) และส่วนฐานล่าง (Toe) [4] โดยปกติความลาดดินตามธรรมชาติจะปรับสภาพเพิ่มให้เกิดสมดุลด้วยตัวเองหากไม่มีแรงกระทำจากภายนอกหรือมีปัจจัยที่ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินลดลง เช่น ความชื้นของดิน แรงกระทำภายนอกที่มาจากการเพิ่มความชันของลาดดิน และปัจจัยจากภายในที่เกิดจากการลดลงของกำลังต้านทานแรงเฉือนซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความดันโพรง [5]

โดยทั่วไปกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนจะมีค่าอยู่ในช่วง 28 – 280 ksc [6] การพัฒนากำลังรับแรงอัดสามารถทำได้หลายแนวทาง เช่น การลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ การบดอัดแต่จะทำให้คอนกรีตมีความพูนลดลง การเพิ่มกำลังของซีเมนต์เพสต์หรือเพิ่มปริมาณของซีเมนต์เพสต์ในส่วนผสม การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสโดยการลดขนาดของมวลรวมหรือขนาดคละของมวลรวม อีกแนวทางหนึ่งคือการผสมวัสดุเพิ่มเข้าไปในส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ เช่น การเสริมเส้นใยจากเศษวัสดุ [7] การผสมผงอะลูมิเนียม [8] และการผสมวัสดุใยสังเคราะห์ประเภท Fiber glass [9] นอกจากนี้การปรับปรุงกำลังของซีเมนต์เพสต์ด้วยการผสมซิลิกาฟูมและสารลดน้ำพิเศษร่วมกับการใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กก็สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนได้มากกว่า 500 ksc [10] ขนาดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน โดยการใช้มวลรวมที่มีขนาดเล็กลงจะทำให้กำลังรับแรงอัดคอนกรีตพูนสูงขึ้นและผลที่เกิดจากอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณน้ำในส่วนผสมที่น้อยจะทำให้ซีเมนต์เพสต์หนืดกว่าและเคลือบผิวมวลรวมได้ไม่ดี ทำให้เกิดความพูนสูง [11]

รูปแบบการเสริมลวดอะลูมิเนียม และการเพิ่มขนาดของลวดอะลูมิเนียมก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูน โดยคุณสมบัติของลวดอะลูมิเนียมเส้นกลมรีดแข็งที่ขายตามท้องตลาดมีกำลังรับแรงดึงอยู่ในช่วง (1,300 - 2,000 กก./ตร.ซม.) ในงานวิจัยนี้ใช้ส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 395 กก./ลบ.ม. หินธรรมชาติที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว และค้ำงบน

ตะแกรงเบอร์ 4 เท่ากับ 1,534 กก./ลบ.ม. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.24 ผสมร่วมกับสารลดน้ำพิเศษชนิด F เพื่อให้ส่วนผสมเข้าแบบได้ง่าย โดยแสดงส่วนผสมของบล็อกคอนกรีตพูนในตารางที่ 1

2. วิธีการทดลอง

กระบวนการทดสอบแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ขั้นตอนแรกกระบวนการเตรียมชิ้นตัวอย่างบล็อกคอนกรีตพูน และขั้นตอนที่สองการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตพูน โดยมีตัวแปรคงที่ดังนี้

2.1 ส่วนผสมและการทดสอบบล็อกคอนกรีตพูน

-อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมหยาบ 1:25

-ลวดอะลูมิเนียมขนาด 2 มม. และ 4 มม. แสดงในรูปที่ 2 ปริมาณในอัตราส่วนร้อยละ 1.7 และ 3.4 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ เช่น ในตัวอย่าง 1 บล็อก ใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณ 1,620 กรัม ต้องผสมลวดอะลูมิเนียม ขนาด 2 มม. ปริมาณ $1,620 \times 0.017$ เท่ากับ 6.71 กรัม เป็นต้น

-อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.24 (W/B) ของปูนซีเมนต์ ผสมสารลดน้ำพิเศษชนิด F อัตราส่วนร้อยละ 4 ของปริมาณปูนซีเมนต์

-นำตัวอย่างคอนกรีตบล็อกไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด ทดสอบกำลังรับแรงดัดและค่าการซึมผ่านน้ำ ที่อายุ 7 และ 28 วัน



รูปที่ 2 ลวดอะลูมิเนียม

2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างบล็อกคอนกรีตพูน

-เตรียมส่วนผสมที่ทำการชั่งน้ำหนักไว้แล้วได้แก่ ปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบ จากนั้นนำปูนซีเมนต์เทลงในเครื่องผสมคอนกรีต

-ผสมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ ชนิด F เทผสมเข้าด้วยกัน แล้ว เทลงในเครื่องผสมโดยใช้ความเร็วต่ำ (140 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นปิดเครื่องผสมสังเกตสีผิวและความข้นเหลวของซีเมนต์เพสต์ ก่อนที่จะเทมวลรวมหยาบลงไป ซีเมนต์เพสต์ควรจะมีลักษณะเหลว และสีผิวมีความมันวาว

-นำมวลรวมหยาบเทลงไปในเครื่องผสมคอนกรีตโดยใช้ความเร็วปานกลาง (280 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที (มวลรวมหยาบจะต้องอยู่ในสภาพอิมัลชันผิวแห้ง) เมื่อซีเมนต์เพสต์ เกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบ ผิวของมวลรวมหยาบมีความเป็นมันวาวจากซีเมนต์เพสต์

-หยุดเครื่องผสมและพักไว้ 2 นาที ก่อนนำส่วนผสมบล็อก คอนกรีตพูนเทเข้าแบบ และเตรียมลวดอะลูมิเนียมเพื่อใส่ใน ตัวอย่างบล็อกคอนกรีตพูน แบ่งเทชั้นแรก จากนั้นนำลวด อะลูมิเนียมในรูปที่ 2 ที่ตัดเป็นเส้นใส่ตามปริมาณดังแสดงใน ตารางที่ 1 จากนั้นวางลวดอะลูมิเนียมตามรูปแบบ 1 (P1) และ แบบที่ 2 (P2) ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ก่อนเท คอนกรีตทับให้เต็มแบบ จากนั้นทำให้แน่นโดยใช้แท่งเหล็ก กระทุ้ง และเทคอนกรีตทับอีกชั้นจนเต็มแบบแล้วปาดหน้าให้ เรียบ

-เมื่อครบ 24 ชม. แกะตัวอย่างคอนกรีตพูนออกจากแบบ และนำไปบ่มในน้ำสะอาด ก่อนนำตัวอย่างมาทดสอบให้น้ำ ตัวอย่างขึ้นมาจากน้ำ พักไว้ 1 วัน เพื่อให้ตัวอย่างแห้งและ พร้อมสำหรับการทดสอบ

-ตัวอย่างขนาด 52×20×7.5 ซม. บล็อกคอนกรีตพูน แสดงในรูปที่ 5 และปริมาตร 1 บล็อก ใช้ส่วนผสมแสดงใน ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของบล็อกคอนกรีตพูน

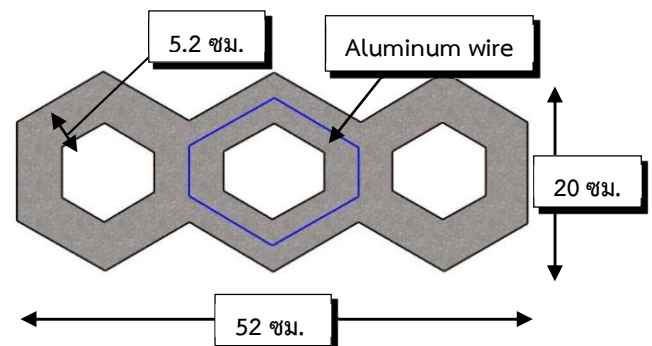
ส่วนผสม (กิโลกรัม/ลบ.ม.)	อะลูมิเนียม 2 มม.	อะลูมิเนียม 4 มม.
ซีเมนต์	395	395
หิน (ค้ำตะแกรง เบอร์ 4)	1534	1534
น้ำ	95	95
ลวดอะลูมิเนียม	6.7	13.4
สารลดน้ำพิเศษ ชนิด F (SP)	16	16

หมายเหตุ

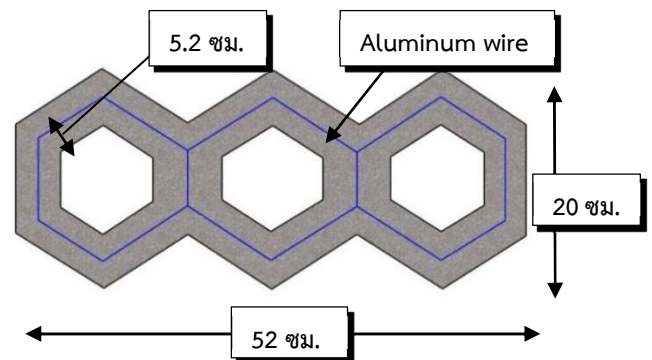
-ลวดอะลูมิเนียมตัดให้มีความยาวเท่ากันก่อนนำไปผสมในตัวอย่าง
-สารลดน้ำพิเศษ ชนิด F (SP) ชนิดแนฟทาไลน์ (Sulphonated Naphthalene Formaldehyde)

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของบล็อกคอนกรีตพูนต่อ 1 บล็อก (8,392-8,419 กรัม/บล็อก)

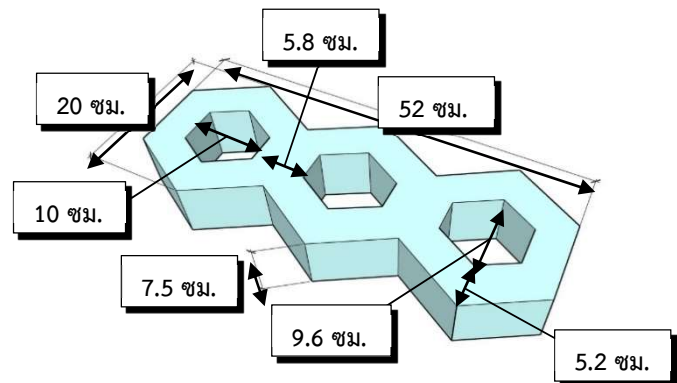
ส่วนผสม (กรัม)	อะลูมิเนียม 2 มม.	อะลูมิเนียม 4 มม.
ซีเมนต์	1,620	1,620
หิน (ค้ำตะแกรง เบอร์ 4)	6,289	6,289
น้ำ	390	390
ลวดอะลูมิเนียม	27	54
สารลดน้ำพิเศษ ชนิด F	66	66



รูปที่ 3 การเสริมลวดอะลูมิเนียมรูปแบบที่ 1 (P1)



รูปที่ 4 การเสริมลวดอะลูมิเนียมรูปแบบที่ 2 (P2)



รูปที่ 5 ขนาดของบล็อกคอนกรีตพูน

2.3 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนโพรง

การทดสอบหาค่าอัตราส่วนโพรงของคอนกรีตพูนใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ทดสอบโดยนำตัวอย่างมาวัดขนาดเพื่อหาปริมาตร จากนั้นนำตัวอย่างแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำทำให้อยู่ในสภาพแห้งในอากาศ 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราส่วนโพรง ตามคำแนะนำซึ่งปรับปรุงจาก มาตรฐาน ชาร์ริตัน และคณะ [12] ได้จากสมการที่ (1)

$$V = \left[1 - \frac{(w_2 - w_1) / \rho_w}{V_I} \right] * 100 \quad (1)$$

โดย V คือ อัตราส่วนโพรง (เปอร์เซ็นต์); W_1 คือ น้ำหนักก้อนตัวอย่างชั่งในน้ำ (กก.); W_2 คือ น้ำหนักก้อนตัวอย่างชั่งในอากาศ (กก.); V_I คือ ปริมาตรของก้อนตัวอย่าง (ลบ.ม.) และ ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำที่ใช้ทดสอบ (กก./ลบ.ม.)

2.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 [13] โดยหล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. แบ่งเป็น ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีลวดอะลูมิเนียมผสม ตัวอย่างที่ผสมลวดอะลูมิเนียมขนาด 2 มม. และตัวอย่างที่ผสมลวดอะลูมิเนียมขนาด 4 มม. ตัดลวดให้มีความยาวเท่ากับ 3.5 ซม. โดยผสมให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่มีทิศทางที่ไม่แน่นอนในตัวอย่างคอนกรีต ปริมาณลวดอะลูมิเนียมที่ผสมแสดงในตารางที่ 1 เมื่อครบอายุการบ่มในน้ำ 28 วัน ทำความสะอาดตัวอย่างและทำให้ตัวอย่างแห้งในอุณหภูมิห้อง วัดขนาดพร้อมชั่งน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีตพูน จากนั้นนำตัวอย่างเคลือบหุ้มด้วย กำมะถันเพื่อให้หน้าสัมผัสของแท่งตัวอย่างทดสอบเรียบและรับแรงกดอัดจากเครื่องทดสอบได้อย่างสม่ำเสมอ ทดสอบโดยการเพิ่มแรงกดด้วยความเร็วสม่ำเสมอ (3.5 ksc/s) กดจนกระทั่งแท่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบได้จากค่าเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่าง การทดสอบคำนวณได้จากสมการที่ (2) ดังนี้

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

โดย σ คือ กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.); P คือ แรงกด (กก.); A คือ พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างทดสอบ (ตร.ซม.)

2.5 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

ตัวอย่างคอนกรีตพูนรูปคานขนาดหน้าตัด กว้าง 20 ซม. สูง 7.5 ซม. ยาว 52 ซม. เมื่อครบอายุการบ่มที่อายุ 28 วัน จึงนำคอนกรีตพูนรูปคานมาขึ้นจากน้ำเพื่อทำให้แห้งในอากาศ และทำความสะอาด จากนั้นวัดขนาดของตัวอย่างคอนกรีตพูนรูปคานโดยประยุกต์จากการทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบกดสองจุด (Third-point loading) ตามมาตรฐาน ASTM C78 [14] ที่ระยะจุดรองรับ 40 ซม. วางคานตัวอย่างลงบนฐานรองรับคานวางหักัด ให้ตำแหน่งของหักัดคานและฐานรองรับคานอยู่ตามระยะที่กำหนด เมื่อติดตั้งคานตัวอย่างได้แล้วปรับอัตราการกดเครื่องทดสอบให้แรงกดต่อเนื่องจนกระทั่งคานตัวอย่างวิบัติ วัดด้านกว้างและความลึกของคานที่บริเวณที่มีรอยแตกด้านละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของขนาดหน้าตัด ค่ากำลังรับแรงดัดได้จากค่าเฉลี่ยของจำนวน 3 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ คำนวณได้จากสมการที่ (3) ดังนี้

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (3)$$

โดย R คือ กำลังรับแรงดัด (กก./ตร.ซม.); P คือ แรงกดสูงสุด (กก.); L คือ ช่วงคานระหว่างจุดรองรับ (ซม.); b คือ ความกว้างเฉลี่ยของคานบริเวณรอยแตก (ซม.); d คือ ความลึกเฉลี่ยของคานบริเวณรอยแตก (ซม.)

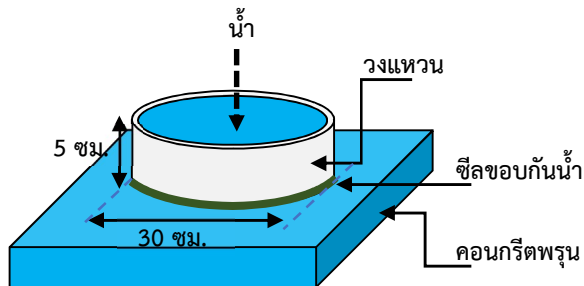
2.6 การทดสอบการซึมผ่านน้ำ

การทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนมีทั้งแบบทดสอบในสนาม (Field test) ตามมาตรฐานของ ASTM C1701 [15] และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory test) แบบแรงดันคงที่ (Constant head) โดยวิธีทดสอบในสนามจะกำหนดพื้นที่หรือขอบเขตเดียวกันที่ต้องการทดสอบค่าซึมผ่านน้ำของพื้นผิวคอนกรีตพูน ใช้วงแหวนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. ความสูงของวงแหวนเท่ากับ 5 ซม. นำวงแหวนที่เตรียมไว้วางลงบนพื้นผิวของคอนกรีตพูนใช้ดินน้ำมันหรือวัสดุป้องกันน้ำรั่วซึมออกด้านล่างของวงแหวนตลอดแนวที่วงแหวนสัมผัสคอนกรีตพูน ดังแสดงในรูปที่ 6 หลังจากติดตั้งชุดทดสอบเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงกำหนดน้ำหนักของน้ำที่

จะทะลุเข้าไปในวงแหวน จากนั้นทดลองจับเวลาที่น้ำซึมผ่านสู่ผิวของคอนกรีตพรุนพร้อมจดบันทึกค่าไว้ โดยหาค่าเฉลี่ยของการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนในสนามคำนวณได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$I = \frac{KM}{D^2 t} \quad (4)$$

โดย I คือ ค่าการซึมผ่านน้ำ (ซม./วินาที); M คือ น้ำหนักของน้ำ (กก.); D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตัวอย่าง (ซม.); t คือ ช่วงเวลาในการวัด (วินาที) และ K คือ ค่าคงที่ 322,249.8 (ซม.).



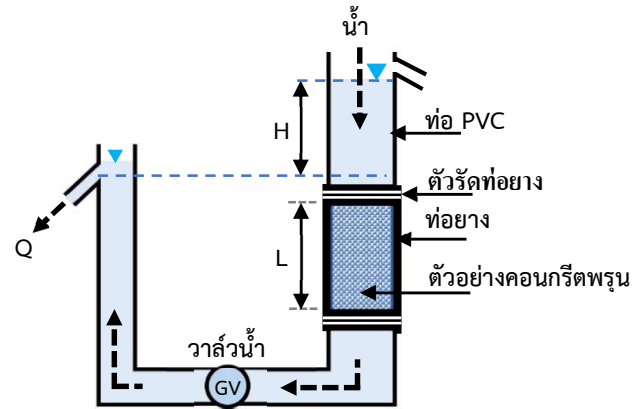
รูปที่ 6 การติดตั้งชุดทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ

ส่วนวิธีทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนในห้องปฏิบัติการแบบแรงดันคงที่ (Constant head) นิยมแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k) ทั้งนี้ สามารถทำได้โดยการติดตั้งตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. x 10 ซม. ในชุดอุปกรณ์ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7 โดยตัวอย่างในชุดทดสอบจะต้องมีการป้องกันการไหลของน้ำบริเวณขอบด้านข้าง จากนั้นไล่ฟองอากาศจากตัวอย่างออกให้หมด โดยปล่อยน้ำเข้าเครื่องทดสอบให้ไหลผ่านตัวอย่างและไหลไปสู่อีกฝั่ง ทำการปรับระดับน้ำให้คงที่ในจุดที่กำหนดเมื่อระดับน้ำคงที่แล้วจึงเริ่มจับเวลาเพื่อหาปริมาณของน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่าง ณ ช่วงเวลาที่กำหนดไว้ [10] คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k) ที่ได้จากเวลาและปริมาณน้ำที่ใช้ จากสมการที่ (5) ดังนี้

$$k = \frac{QL}{tHA} \quad (5)$$

โดย k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k) (ซม./วินาที); Q คือ ปริมาตรของน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต (ซม.³); L คือ ความ

สูงของตัวอย่าง (ซม.); t คือ เวลาที่ต้องการสำหรับการออกแบบปริมาตรน้ำที่ซึมผ่านก่อนตัวอย่าง (วินาที); H คือ ระยะระหว่างระดับน้ำที่ทางออกทั้งสอง (ซม.) และ A คือ ขนาดหน้าตัดของตัวอย่าง (ซม.²)



รูปที่ 7 การติดตั้งชุดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k)

3. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

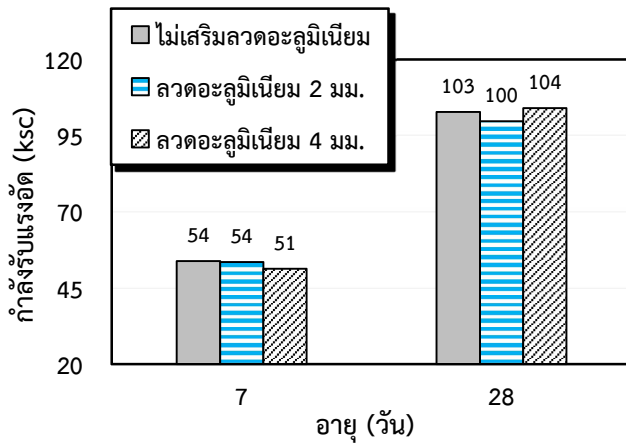
3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงในรูปที่ 8 ที่อายุ 7 วัน คอนกรีตพรุนที่ไม่เสริมลวดอะลูมิเนียม ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 54 ksc เมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นคอนกรีตพรุนมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 103 ksc สำหรับคอนกรีตพรุนที่เสริมลวดอะลูมิเนียม 2 และ 4 มม. ในอัตราส่วนร้อยละ 1.7 และ 3.4 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีค่ากำลังรับแรงอัดเทียบเท่าคอนกรีตพรุนที่ไม่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียม โดยคอนกรีตพรุนที่เสริมลวดอะลูมิเนียมขนาด 2 มม. มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 54 และ 100 ksc ขณะคอนกรีตพรุนที่เสริมลวดอะลูมิเนียมขนาด 4 มม. มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 51 และ 104 ksc ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

โดยทั่วไปกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนจะพัฒนาไปตามส่วนผสม ระยะเวลาการบ่มคอนกรีตพรุน [15] ในการเสริมลวดอะลูมิเนียมมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่แตกต่างกัน การเสริมลวดอะลูมิเนียมที่มีขนาดต่างกันเมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนที่ไม่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียมและคอนกรีตพรุนที่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียมในขนาด 2 มม. และ 4 มม. มี

ค่าใกล้เคียงกัน การเสริมลวดอะลูมิเนียมส่งผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่มที่อายุ 7 และ 28 วัน

3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดแสดงในตารางที่ 3 ที่อายุ 7 วัน คอนกรีตพูนที่ไม่เสริมลวดอะลูมิเนียมผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดมีค่าเท่ากับ 40 ksc เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น คอนกรีตพูนมีการพัฒนากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าเท่ากับ 48 ksc ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chandrappa and Biligiri [16] ที่พบว่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่บ่มคอนกรีตที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน มีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนคอนกรีตพูนที่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียมแบบที่ 1 ขนาด 2 มม. ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดมีค่าเท่ากับ 44 ksc เมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นคอนกรีตพูนมีการพัฒนากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 52 ksc สำหรับคอนกรีตพูนที่เสริมลวดอะลูมิเนียม 4 มม. มีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 69 ksc และ 72 ksc ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการเสริมเหล็กในรูปแบบที่ 1 กับการเสริมเหล็กแบบที่ 2 พบว่าการเสริมเหล็กแบบที่ 2 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงกว่าการเสริมเหล็กแบบที่ 1 เล็กน้อย โดยคอนกรีตพูนที่เสริมลวดอะลูมิเนียมขนาด 2 มม. มีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 45 ksc และ 53 ksc ส่วนคอนกรีตพูนที่เสริมลวดอะลูมิเนียมขนาด 4 มม. มีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 72 ksc และ 74 ksc ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ โดยสรุป เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการ

เสริมลวดอะลูมิเนียมที่มีขนาดเท่ากัน พบว่า ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

โดยทั่วไปกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนจะพัฒนาไปในทิศทางเดียวกันกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนที่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียมทำให้มีค่ากำลังรับแรงดัดมากขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตพูนที่ไม่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียมเนื่องจากการเสริมลวดอะลูมิเนียมสามารถช่วยรับแรงดึงซึ่งเกิดจากโมเมนต์ดัดและการเสริมลวดอะลูมิเนียมที่มีขนาดใหญ่จะช่วยในการพัฒนากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนได้ดียิ่งขึ้นโดยกำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเสริมลวดอะลูมิเนียมในคอนกรีตพูน ทั้งนี้ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตพูนแสดงในรูปที่ 9 ตัวอย่างทดสอบเกิดการหักที่บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียมรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตพูนนั้นส่วนมากจะเกิดบริเวณผิวหน้าระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวม ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญของสมบัติทางกลของคอนกรีตพูน [17]

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูน

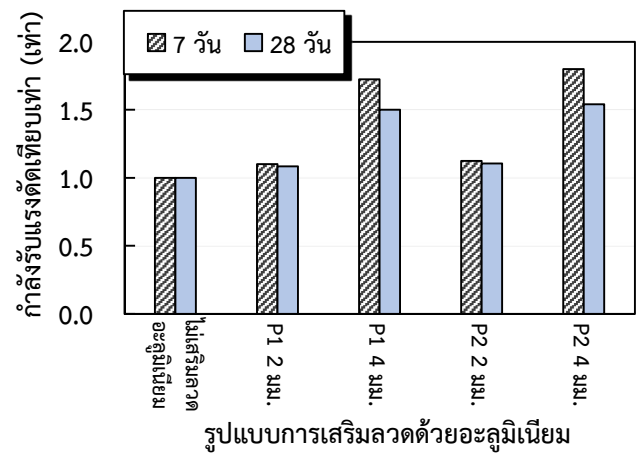
ส่วนผสม	กำลังรับแรงดัด, (ksc)(จำนวนเท่าสัมพันธ์กับส่วนผสมที่ไม่เสริมลวดอะลูมิเนียม)	
	7 วัน	28 วัน
ไม่เสริมลวดอะลูมิเนียม	40(1.00)	48(1.00)
P1 2 มม.	44(1.10)	52(1.08)
P1 4 มม.	69(1.73)	72(1.50)
P2 2 มม.	45(1.13)	53(1.10)
P2 4 มม.	72(1.80)	74(1.54)



รูปที่ 9 การวิบัติของคอนกรีตในการทดสอบแรงดัด

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดกับรูปแบบการเสริมลวดอะลูมิเนียม ขนาด 2 มม. และ 4 มม. เทียบกับคอนกรีตพูนที่ไม่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียม พบว่าการเสริมลวดอะลูมิเนียมรูปแบบที่ 1 มีค่ากำลังรับแรงดัดคิดเป็น 1.08-1.73 เท่า โดยการเสริมลวดที่ขนาด 2 มม. มีค่ากำลังรับแรงดัดร้อยละ 1.10 และ 1.08 เท่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ เทียบกับคอนกรีตพูนที่ไม่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียม นอกจากนี้การเสริมลวดที่มีขนาด 4 มม. คอนกรีตพูนมีค่ากำลังรับแรงดัดคิดเป็น 1.73 และ 1.50 เท่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ เทียบกับคอนกรีตพูนที่ไม่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียม ส่วนการเสริมลวดอะลูมิเนียมรูปแบบที่ 2 มีค่ากำลังรับแรงดัดคิดเป็น 1.10-1.80 เท่า การเสริมลวดอะลูมิเนียมขนาด 2 มม. มีค่ากำลังรับแรงดัดคิดเป็น 1.13 และ 1.10 เท่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ เทียบกับคอนกรีตพูนที่ไม่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียม ส่วนการเสริมลวดอะลูมิเนียมขนาด 4 มม. คอนกรีตพูนมีค่ากำลังรับแรงดัดคิดเป็น 1.80 และ 1.54 เท่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ เทียบกับคอนกรีตพูนที่ไม่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียม แสดงให้เห็นว่าการใช้ขนาดลวดอะลูมิเนียมที่ใหญ่ขึ้นจาก 2 มม. เป็น 4 มม. ค่ากำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสริมลวดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ตัวอย่างคอนกรีตพูนด้านทานแรงดัดได้เพิ่มมากขึ้น

การเสริมลวดอะลูมิเนียมแบบที่ 1 และ แบบที่ 2 ของคอนกรีตพูนที่เสริมลวดอะลูมิเนียมขนาด 2 มม. มีค่ากำลังรับแรงดัดคิดเป็น 1.10 และ 1.13 เท่า เทียบกับคอนกรีตพูนที่ไม่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียม ที่อายุการบ่ม 7 วัน และที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่ากำลังรับแรงดัดคิดเป็น 1.08 และ 1.10 เท่า เทียบกับคอนกรีตพูนที่ไม่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียม นอกจากนี้คอนกรีตพูนที่เสริมลวดอะลูมิเนียมขนาด 4 มม. การเสริมลวดอะลูมิเนียมแบบที่ 1 และ แบบที่ 2 มีค่ากำลังรับแรงดัดคิดเป็น 1.73 และ 1.80 เท่า ที่อายุการบ่ม 7 วัน และที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดัดคิดเป็น 1.50 และ 1.54 เท่า เทียบกับคอนกรีตพูนที่ไม่มีการเสริมลวดอะลูมิเนียม แสดงให้เห็นว่าผลของขนาดลวดอะลูมิเนียมที่เสริมในคอนกรีตพูนส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงดัดได้มากกว่าผลที่เกิดจากรูปแบบการเสริมลวดอะลูมิเนียม



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ค่ามาตรฐานระหว่างกำลังรับแรงดัดกับระยะเวลาบ่ม 7 วัน และ 28 วัน

ตารางที่ 4 แสดงค่าอัตราส่วนโพรง ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูน (I) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k) ของคอนกรีตพูน ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตพูนที่มีส่วนผสมของหินค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าความหนาแน่น 1920 กก./ลบ. ในขณะที่อัตราส่วนโพรงมีค่า 19 และ 21 เปอร์เซ็นต์ ค่าการซึมของน้ำ (I) เท่ากับ 12.36 ซม./วินาที และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k) เท่ากับ 1.99 ซม./วินาที ที่อายุ 7 วัน เมื่ออายุของคอนกรีตพูนเพิ่มขึ้น ที่อายุ 28 วัน ค่าการซึมของน้ำ (I) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับ 12.79 ซม./วินาที ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k) เท่ากับ 2.06 ซม./วินาที

ค่าที่แตกต่างกันของ (I) และ (k) มาจากตัวอย่างที่ทำการทดสอบ การทดสอบหาค่า (I) ตัวอย่างมีผิวหน้าทีน้ำซึมผ่านได้มากกว่าเนื่องจากมีผิวหน้าขนาดใหญ่กว่าโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดที่น้ำไหลลงเท่ากับ 30 ซม. และความหนาไม่เกิน 10 ซม. นอกจากนี้เมื่อน้ำไหลลงสู่ตัวอย่างคอนกรีตพูนแล้วสามารถกระจายออกด้านข้างได้ ซึ่งต่างกับการทดสอบหาค่า (k) ที่ใช้ตัวอย่างผิวหน้าเล็กกว่าคือเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ซม. ทั้งยังมีการปิดผิวด้านข้างไว้ น้ำจึงไม่สามารถไหลออกด้านข้างได้ โดยจะสามารถไหลจากบนลงล่างได้ทางเดียว นอกจากนี้ตัวอย่างคอนกรีตพูนยังมีความหนามากกว่าทำให้น้ำที่ไหลลงมาโดนถูกขัดขวาง และระยะเวลาไหลมากกว่าการทดสอบหาค่า (I) จึงส่งผลให้ค่า (k) ที่ได้มีค่าน้อยกว่า

จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาการบ่มของคอนกรีตพูนไม่ส่งผลต่อค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนมากนัก อย่างไรก็ตามค่า

การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนโพรงและขนาดรูพูน คอนกรีตพูนที่มีอัตราส่วนโพรงมากจะให้ค่าการซึมผ่านน้ำที่มาก ทั้งนี้ค่าการซึมผ่านน้ำไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโพรงเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นกับขนาดช่องว่างของโพรงและความต่อเนื่องของโพรง ส่วนการอัดแน่น (Compaction) นอกจากจะส่งผลต่อปริมาณโพรงในเนื้อคอนกรีตพูนแล้วยังมีผลต่อความหนาแน่น (Density) ของคอนกรีตพูนอีกด้วย ซึ่งอัตราส่วนโพรงและความหนาแน่นของคอนกรีตพูนมีความสัมพันธ์กัน คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงมีแนวโน้มของอัตราส่วนโพรงในเนื้อคอนกรีตพูนลดลง โดยทั่วไปคอนกรีตพูนที่ได้รับการอัดแน่นต่าง ๆ กันมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1,680 ถึง 1,920 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร [18, 19] เพื่อยังคงกำลังรับแรงอัดที่ดีและยังมีค่าการซึมผ่านน้ำที่สูง กล่าวคือมีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปประมาณราว 22% [20]

ตารางที่ 4 อัตราส่วนโพรงและค่าการซึมผ่านน้ำที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

	อายุ (วัน)	ความ หนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	อัตราส่วน โพรง (%)	ค่าการซึมผ่านน้ำ (ชม./วินาที)	
				(J)	(K)
เบอร์ 4	7	1,920	19	12.36	1.99
	28	1,920	21	12.79	2.06

4. สรุปผล

1. ขนาดลวดอะลูมิเนียมไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนไม่เพิ่มขึ้นตามขนาดลวดอะลูมิเนียมเสริมแรงที่เพิ่มขึ้น

2. การเสริมลวดอะลูมิเนียมในคอนกรีตพูนทำให้คอนกรีตพูนมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มสูงขึ้น กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนจะเพิ่มขึ้นตามขนาดลวดอะลูมิเนียมเสริมแรงที่ใหญ่ขึ้น

3. อายุการบ่มคอนกรีตพูนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ เปอร์เซ็นต์ปริมาณโพรงเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านน้ำ (J) เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (K) มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่ออัตราส่วนโพรงเพิ่มมากขึ้น น้ำจะสามารถไหลซึมผ่านได้ดีขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายประพัฒน์พงษ์ พวงมาลัย, นายศรณรงค์ โชคจิตต์พิทักษ์ และนายเอกราช ศิริสวัสดิ์ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมโยธา และ สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ที่ได้รวบรวมข้อมูลสำหรับงานวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม สำหรับสถานที่ในการรวบรวมงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] บริญญา จินดาประเสริฐ, ยุติ แซ่ตั้ง. เทคโนโลยีคอนกรีตพูน. *ราชบัณฑิตยสถาน*. 2557; 39(2): 61.
- [2] กมล ตรีพอง, รณกร เทพวงษ์. การศึกษาการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพูนโดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*. 2563. วันที่ 15-17 กรกฎาคม. จ.ชลบุรี. 2563; MAT 13-20.
- [3] Bhutta MAR, Tsuruta K, Mirza J. Evaluation of high-performance porous concrete properties. *Construction and Building Materials*. 2012; 31: 67-73.
- [4] ประเมธี เดชปะตังเวสา, โกมลย์ ชัยรัตนงานเดช, พงศกร พวงชมพู. การวิเคราะห์สาเหตุการวิบัติเชิงลาด และแนวทางการปรับปรุงแก้ไข: กรณีศึกษา ทางหลวงหมายเลข 1194 ตอน แม่สะเรียง – แม่สามแลบ ที่ กม. 21+150. *วารสารวิจัย มช. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*. 2562; 19(4): 127-138.
- [5] Horpibulsuk S. *Foundation Engineering*. Institute of Engineering, Suranaree University of Technology. 2012.
- [6] American Concrete Institute. *ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete*. ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, USA. 2010.
- [7] Zaetang Y, Wongsra A, Sata V, Chindaprasirt P. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2013; 48: 585-591.
- [8] ประชุม คำพุด. คอนกรีตพูนโดยวิธีผสมผงอะลูมิเนียม. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี*. 2545; 1(2): 46-51.

- [9] ยุทธนา บุญสินชัย, ศุภกิจ นนทนันทน์, อภินิติ โชติสังกาศ. กำลังรับแรงดัดและพฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูนโดยการประยุกต์ใช้วัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51*. 2556; 102-109.
- [10] วันชัย สะตะ, ปริญญา จินดาประเสริฐ. คอนกรีตพูน : คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. *วารสารคอนกรีตสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*. 2560; 29(4): 11-28.
- [11] ยุวดี หิรัญ, ธวัชชัย ต้นชัยสวัสดิ์, พลยุทธ์ มุลรัมย์, วิชัย บำรุงนาม, อัญชลี เพ็ญสุระ. บล็อกปูถนนคอนกรีตพูน. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4*, 20-22 ตุลาคม 2551, อุบลราชธานี. 2551.
- [12] ถนัดกิจ ชาริรัตน์, ปริญญา จินดาประเสริฐ, Hatanaka S. คอนกรีตพูน: คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13*, จอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยาชลบุรี. 2551.
- [13] ASTM International. ASTM C39 - 10. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, American Society for Testing and Materials. West Conshohocken; 2015.
- [14] ASTM International. ASTM C78 / C78M-15. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. West Conshohocken; 2015.
- [15] ASTM International. ASTM C1701/C1701M-17a. *Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete*. West Conshohocken; 2017.
- [16] Chandrappa AK, Biligiri KP. Pervious concrete as a sustainable pavement material Research findings and prospects: A state of the art review. *Construction and Building Materials*. 2016; 111: 262-274.
- [17] Yu F, Daquan S, Jue W, Minjun H. Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2019; 209: 463-475.
- [18] Meininger RC. No-fines pervious concrete for paving. *Concrete International*. 1988; 10: 20-27.
- [19] ธนกร ทวีวุฒิ, นท แสงเทียน, วิวัฒน์ พัทธานนท์ สถาพร โภคา. ผลของความหนาแน่นและอัตราส่วนที่มีต่อปริมาณช่องว่างอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.*, 2561; 11(2): 1-12.
- [20] Prahara E, Meilani M. Compressive strength and water absorption of pervious concrete that using the fragments of ceramics and roof tiles. *The EPJ Web of Conferences*. 2014; 68.