

การพัฒนาบล็อกปูพื้นทางเดินเท้าคอนกรีตพรุนจากหินกรวดและ กะลาปาล์มน้ำมัน

Development of Permeable Pavement Concrete Block from Gravel and Oil Palm Shells

ฐิติรักษ์ เชื้อเมืองพาน* ณฏรี ศรีदारานนท์* และ โสภา วิศิษฐ์ศักดิ์**

Thisirak Chueamueangphan*, Nattaree Sridaranon* and Sopa Visitsak**

Received : December 7, 2021

Revised : March 1, 2022

Accepted : March 2, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาบล็อกคอนกรีตพรุนที่น้ำซึมผ่านได้สำหรับปูพื้นทางเดินเท้า เพื่อแก้ปัญหา น้ำท่วมขังและเพิ่มความชุ่มชื้นให้กับพื้นที่ บล็อกคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของซีเมนต์ น้ำ หินกรวด และกะลาปาล์มน้ำมัน ถูกผลิตในอัตราส่วนต่างๆ และนำไปทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต อัตราการซึมผ่านของน้ำ การนำความร้อน การดูดซึมน้ำ ปริมาณความชื้น และความหนาแน่น ผลการทดสอบพบว่าบล็อกคอนกรีตพรุนมีค่ากำลังต้านทานแรงอัด อัตราการซึมผ่านของน้ำ และความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ACI522R-10 โดยค่าการนำความร้อนและความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกะลาปาล์มลดลง ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำและความชื้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกะลาปาล์มเพิ่มขึ้น บล็อกคอนกรีตพรุนนับเป็นวัสดุสีเขียวที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุปูพื้นทางเดินเท้าเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวซึมน้ำและลดปัญหาน้ำท่วม ตลอดจนช่วยลดการสะสมความร้อนของวัสดุและช่วยลดอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมลงได้

Abstract

This research aims to develop a porous concrete paving block to solve flooding problems and increase moisture to the area. The porous concrete; which the mixture consisted of cement, water, gravel and oil palm shells; were produced using different mixing ratios and tested the performances of the compressive strength, drainage rate, thermal conductivity, water absorption, moisture content, and density. The results showed that the porous concrete had compressive strength, drainage rate, and density were correlated with ACI 522R-10 standard. The thermal

* ภาควิชาวิศวกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

** ภาควิชาวิศวกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900 และผู้รับผิดชอบบทความ

* Department of Building Innovation and Technology, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 10900

** Department of Building Innovation and Technology, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 10900 and Corresponding Author

Corresponding Author E-mail : sopa.v@ku.th

conductivity and density of the porous concrete increased when oil palm shell ratio decreased whereas the water absorption and moisture content increased when oil palm shell ratio increased. The Porous concrete blocks is accounted as a green material that is environmentally friendly which has potential to be developed as a permeable pavement concrete block to increase seepage surface area and flooding as well as helps to reduce material heat build-up and temperature of the environment.

คำสำคัญ: กะลาปาล์มน้ำมัน, หินกรวด, คอนกรีตพรุน, บล็อกปูพื้นทางเดินเท้า, วัสดุสีเขียว

Keywords: Oil palm shell, Gravel, Porous concrete, Permeable pavement block, Green material

บทนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างพื้นลาดเชิงนิคมใช้หินจากโรงโม่หินกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งนอกจากจะเป็นการทำลายทรัพยากรธรรมชาติแล้วยังก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ การแพร่กระจายของฝุ่นจากการระเบิดและย่อยหิน ตลอดจนส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนในพื้นที่ นอกจากนี้ การขนส่งหินไปยังพื้นที่การผลิตวัสดุก่อสร้างที่ห่างไกล นำไปสู่การสิ้นเปลืองพลังงาน และการเพิ่มมลพิษจากการขนส่ง รวมถึงต้นทุนของวัสดุก่อสร้างที่เพิ่มมากขึ้น

เกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อม (Thai's Rating of Energy and Environmental Sustainability: TREES) ของสถาบันอาคารเขียวในประเทศไทย ได้กำหนดแนวทางการลดปัญหาน้ำท่วมจากการพัฒนาโครงการโดยการลดพื้นที่ผิวที่บดน้ำ (Impervious Surface) ของพื้นที่โครงการและเพิ่มพื้นที่ผิวซึมน้ำเพื่อชะลอน้ำก่อนปล่อยออกสู่พื้นที่นอกโครงการ ด้วยการเลือกใช้วัสดุปูพื้นที่มีช่องหรือรูให้รองรับน้ำฝนไหลผ่านลงสู่ดินได้มากขึ้น (สถาบันอาคารเขียวไทย, 2563)

จากการตรวจสอบเอกสารพบว่ามีการวิจัยที่พัฒนาวัสดุปูพื้นคอนกรีตพรุน เช่น บล็อกปูถนนคอนกรีตพรุน (ยุวดี หิรัญ และคณะ, 2552; สุธิดา ถิ่นจันทร์, 2557; กมล ตรีทอง และ รณกร เทพวงษ์, 2563; ชัดติย ชมพวงค์ และคณะ, 2563) บล็อกคอนกรีตสำหรับก่อกองที่มีส่วนผสมของกะลาปาล์มน้ำมัน (กิตติ เดิมมธูรพจน์, โสภา วิศิษฎ์ศักดิ์ และ โจเซฟ เคดารี, 2554) การศึกษาหน่วยน้ำหนักและกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตพรุนผสมกะลาปาล์มน้ำมัน (นันทชัย ชูศิลป์, 2556) และอิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมแกลบและกะลาปาล์มน้ำมัน (จรรยา เจริญเนตรกุล, 2557) อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบว่ามีงานนำหินกรวดซึ่งมีจำนวนมากและมีคุณสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงมาใช้ร่วมกับกะลาปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีน้ำหนักเบาและมีความคงทน เพื่อพัฒนาบล็อกคอนกรีตพรุน

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและหาอัตราส่วนในการผลิตบล็อกคอนกรีตพรุนสำหรับปูพื้นทางเดินเท้าที่มีส่วนผสมของหินกรวดและกะลาปาล์มน้ำมัน ตลอดจนทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังต้านทานแรงอัด อัตราการซึมผ่านของน้ำ การนำความร้อน การดูดซึมน้ำ ปริมาณความชื้น และความหนาแน่น โดยมวลรวมหยาบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหินกรวดภูเขา (จังหวัดอุทัยธานี) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีปริมาณมากและหาได้ง่าย โดยเลือกใช้ขนาด 4.75-9.50 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8" และค้างตะแกรงเบอร์ 4) ซึ่งเป็นขนาดที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป และกะลาปาล์มน้ำมันพันธุ์เทโอน่าจากโรงสกัดน้ำมันปาล์มแบบไม่ใช้น้ำ (สกัดด้วยวิธีอบแห้ง) เนื่องจากเป็นพืชเศรษฐกิจและเป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกเป็นการค้าจึงมีปริมาณมากและหาได้ง่าย โดยเลือกใช้ขนาด 4.75-9.50 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8" และค้างตะแกรงเบอร์ 4)

วิธีการวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตบล็อกคอนกรีตพรุนตัวอย่างเพื่อการทดสอบ ประกอบด้วย 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.80-2517 2) หินกรวด ขนาด 4.75-9.50 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8” และค้างตะแกรงเบอร์ 4) ที่ผ่านการทำความสะอาด (ภาพที่ 1) 3) น้ำสะอาด และ 4) กะลาปาล์ม ขนาด 4.75-9.50 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8” และค้างตะแกรงเบอร์ 4) ที่ผ่านการทำความสะอาด (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 หินกรวดและกะลาปาล์ม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตบล็อกคอนกรีตพรุน ประกอบด้วย 1) แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร 2) แบบหล่อรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 20 x 20 x 5 เซนติเมตร และ 3) เครื่องร่อนคัดแยกขนาดวัสดุ ถาดกลม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบบล็อกคอนกรีตพรุนที่ทำการพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 1) เครื่องทดสอบกำลังอัด Compression Machine รุ่น 1568-6-1464 CM4 (ภาพที่ 2 ก) 2) ชุดทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ (ภาพที่ 3) 3) เครื่อง Ceramic Top Hotplate Stirrer รุ่น ZNCLBS1280 (ภาพที่ 2 ข) และ 4) ตู้อบความร้อน (ภาพที่ 2 ค)



(ก) Compression Testing Machine



(ข) Ceramic Top Hotplate Stirrer



(ค) Incubator

ภาพที่ 2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงานบล็อกปูพื้นทางเดินเท้าที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัย

1. การผลิตและหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตพรุน

1.1 การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์เพื่อการขึ้นรูปบล็อก

การเตรียมหินกรวด: ทำการคัดแยกหินกรวดออกจากดินลูกรัง จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดจนกว่า น้ำที่ใช้ล้างจะใส และตากแดดให้แห้งสนิท แล้วจึงนำไปร่อนผ่านเครื่องร่อนวัสดุโดยใช้ตะแกรงเบอร์ 3/8” และเบอร์ 4 เพื่อคัดขนาดของหินกรวดให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ (4.75-9.50 มิลลิเมตร)

การเตรียมกลาปาล์ม: นำกลาปาล์มไปร่อนผ่านเครื่องร่อนวัสดุโดยใช้ตะแกรงเบอร์ 3/8” และเบอร์ 4 เพื่อคัดขนาดของกลาปาล์มให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ (4.75-9.50 มิลลิเมตร) โดยคัดแยกเฉพาะส่วนที่เป็นกลาออกมา จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำสะอาด 1 รอบ ก่อนนำไปแช่โซดาไฟผสมน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำสะอาดอีก 1 รอบแล้ว จึงนำไปตากแดดให้แห้งสนิท

1.2 การกำหนดอัตราส่วนผสมในการขึ้นรูปบล็อก

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตพูนสามารถประยุกต์จากหลักการผลิตคอนกรีตทั่วไป หรือตามมาตรฐานคอนกรีตพูน ACI 522R-10 แต่การผลิตคอนกรีตพูนโดยใช้วัสดุธรรมชาติเป็นส่วนผสมยังไม่มีอัตราส่วนที่เป็นมาตรฐาน จึงมีการออกแบบส่วนผสมจากการดัดแปลงหลักการผลิตคอนกรีตทั่วไป ประกอบกับมาตรฐานคอนกรีตพูน ให้ได้สูตรการผลิตที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณโพรงที่เหมาะสม และสัดส่วนการผลิตคอนกรีตพูน (หินกรวด:กลาปาล์ม) โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อกำลังและปริมาณโพรงของคอนกรีตพูน เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากเกินไป ส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างมวลรวมได้ไม่ดี เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำเกินไปส่งผลให้การผสมเข้ากันได้ไม่ดี ทำให้ได้คอนกรีตพูนที่มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดและความทนทานต่ำ ตามมาตรฐาน (ACI 522R-10) สำหรับคอนกรีตพูน ACI 522R-10 ระบุว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ พอเหมาะควรอยู่ระหว่าง 0.26 ถึง 0.40 โดยน้ำหนัก ขนาดมวลรวมหยาบที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 2 ถึง 8 มิลลิเมตร และปริมาณโพรงอากาศที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่างร้อยละ 15 ถึง 35 โดยสัมพันธ์กับมาตรฐาน ASTM C138 (2015) ซึ่งแนะนำว่าไม่ควรออกแบบคอนกรีตพูนที่มีปริมาณโพรงอากาศที่น้อยกว่าร้อยละ 15 เพราะอาจทำให้โพรงที่ได้ไม่มีความต่อเนื่องได้ ดังนั้น การวิจัยเชิงทดลองนี้จึงกำหนดอัตราส่วนผสมคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.4:1 เพื่อให้วัสดุสามารถผสมเข้ากันได้ดี และกำหนดปริมาณโพรงอากาศที่ร้อยละ 15 เพื่อลดผลกระทบด้านความแข็งแรง และใช้อัตราส่วนของหินกรวดต่อกลาปาล์มโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน คือ 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการพัฒนาบล็อกคอนกรีตพูน

อัตราส่วน (โดยน้ำหนัก) หินกรวด : กลาปาล์ม	อัตราส่วน (โดยน้ำหนัก) น้ำ : ปูนซีเมนต์	ขนาดมวลรวม (มิลลิเมตร)	น้ำ (กรัม)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	หินกรวด (กรัม)	กลาปาล์ม (กรัม)
100 : 0	0.4:1	4.75-9.50	190	475	1,380	-
90 : 10					1,242	58.56
80 : 20					1,104	117.00
70 : 30					966	176.00

1.3 วิธีการผลิตบล็อกตัวอย่างคอนกรีตพูน

การผลิตบล็อกตัวอย่างคอนกรีตพูนทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร เพื่อการทดสอบจำนวน 3 ก้อนต่อหนึ่งอัตราส่วน โดยทำการผสมหินกรวดต่อกลาปาล์มในอัตราส่วนดังตารางที่ 1 แล้วเทลงแบบหล่อ โดยแบ่งเข้าแบบเป็น 3 ชั้น กระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งชั้นละ 35 ครั้ง เมื่อตักคอนกรีตชั้นสุดท้ายแล้วเสร็จ ทำการปาดผิวหน้าให้เรียบ ใช้แผ่นพลาสติกคลุม เพื่อป้องกันน้ำระเหยออก ทั้งคอนกรีตไว้ในแบบประมาณ 48 ชั่วโมง จากนั้นถอดแบบออก และนำก้อนตัวอย่างไปบ่มด้วยการแช่น้ำ ทดสอบที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน แล้วนำไปทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตต่อไป

การผลิตต้นแบบบล็อกคอนกรีตพรุนสำหรับปูพื้นทางเดินเท้ารูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 20 x 20 x 5 เซนติเมตร ทำการตักหินกรวดและกะลาปาล์มตามอัตราส่วนดังตารางที่ 1 แล้วเทลงแบบหล่อและกระทุ้งด้วยเหล็ก กระทุ้ง 10 ครั้ง ทำการปาดผิวหน้าให้เรียบ ใช้แผ่นพลาสติกคลุมเพื่อป้องกันน้ำระเหยออก ทั้งคอนกรีตไว้ในแบบ ประมาณ 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นถอดแบบออก และนำก้อนตัวอย่างไปบ่มด้วยการแช่น้ำ ทดสอบที่อายุ 28 วัน แล้วนำไปทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ การนำความชื้น การดูดซึมน้ำ ปริมาณความชื้น และความหนาแน่นต่อไป

2. ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพบล็อกคอนกรีตพรุน

2.1 ด้านกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ทำการทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 12390-3 (The British Standard Institution, 2019) โดยหล่อตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

2.2 ด้านอัตราการซึมผ่านของน้ำ ทำการทดสอบโดยดัดแปลงหลักการตามมาตรฐาน ASTM C1701 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนแบบหล่อในที่ และคำนวณหาค่าการซึมผ่านน้ำ คอนกรีตพรุน (I) จากสมการที่ (1)

$$I = \frac{KM}{(D^2 \times t)} \quad (1)$$

เมื่อ I คือ ค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำ (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)

K คือ ค่าคงที่ 458366000

M คือ มวลของน้ำที่ซึมผ่าน (กิโลกรัม)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวนสำหรับการซึมผ่านของน้ำ (มิลลิเมตร)

t คือ เวลาที่ต้องใช้ในการวัดปริมาณน้ำที่แทรกซึมผ่านชิ้นงานคอนกรีต (วินาที)

ที่มา: American Society for Testing and Materials (2009)

เริ่มทำการทดสอบโดยการจัดเตรียมวงแหวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 มิลลิเมตร ความสูง 150 มิลลิเมตร ทำเครื่องหมายโดยขีดเส้นระดับน้ำ 2 เส้น ในระยะความสูง 10 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร จากขอบล่างสุดของวงแหวนก่อนการติดตั้งวงแหวนทดสอบให้ทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบคอนกรีตพรุน ขนาด 20 x 20 x 5 เซนติเมตร ต่อมาใช้วัสดุอุดรอยรั่ว เช่น ดินน้ำมัน เป็นต้น ยาแนวร่องระหว่างขอบด้านล่างของวงแหวน และพื้นผิวคอนกรีตพรุนโดยกดให้รอบแนบสนิทและสามารถกั้นน้ำได้ เทน้ำลงในวงแหวนในอัตราที่พอเหมาะและรักษาระดับน้ำให้อยู่ระหว่างเส้น 2 เส้นที่ทำเครื่องหมายไว้ โดยใช้ปริมาณน้ำ 3.628 ± 0.001 กิโลกรัม เริ่มจับเวลาทันทีเมื่อน้ำกระทบพื้นผิวคอนกรีตและหยุดเวลาทันทีเมื่อไม่มีน้ำอยู่บนพื้นผิวชิ้นงานคอนกรีต โดยบันทึกด้วยนาฬิกาจับเวลาให้ใกล้เคียงหน่วย 0.1 วินาที มากที่สุด จากนั้นทำการทดสอบการเทน้ำรอบที่ 1 เพื่อชะล้างฝุ่นภายในชิ้นงาน และต้องไม่มีน้ำรั่วซึมจากขอบยาแนว (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 การติดตั้งวงแหวนที่ทำการทดสอบการซึมผ่านน้ำ

2.3 ด้านการนำความร้อน ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง Ceramic Top Hotplate Stirrer รุ่น ZNCLBS1280 ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 1\%$ ตามมาตรฐาน ASTM-C518

2.4 ด้านการดูดซึมน้ำ นำชิ้นงานตัวอย่างวัสดุ ขนาด $20 \times 20 \times 5$ เซนติเมตร เข้าตู้อบความร้อนไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก (W_1) นำชิ้นงานตัวอย่างแช่ในภาชนะที่ใส่น้ำสะอาดให้ท่วมชิ้นงานตัวอย่าง เป็นเวลา 1, 3 และ 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้นำชิ้นงานตัวอย่างออกจากน้ำและเช็ดให้แห้งหมาด นำไปชั่งน้ำหนัก (W_2) บันทึกค่าน้ำหนักและคำนวณหาการดูดซึมน้ำโดยใช้สมการที่ (2)

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \left[\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right] \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากแช่น้ำ (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างหลังอบลมร้อนไล่ความชื้น (กรัม)

ที่มา: American Society for Testing and Materials (1997)

2.5 ด้านความหนาแน่น นำชิ้นงานตัวอย่างวัสดุ ขนาด $20 \times 20 \times 5$ เซนติเมตร ชั่งน้ำหนัก (M) บันทึกค่าน้ำหนัก วัดขนาดของชิ้นงาน กว้าง $\times$ ยาว $\times$ สูง เพื่อหาปริมาตร (V) และคำนวณหาความหนาแน่นโดยใช้สมการที่ (3)

$$D = \frac{M}{V} \quad (3)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

M คือ มวลของชิ้นงานตัวอย่าง (กิโลกรัม)

V คือ ปริมาตรของชิ้นงานตัวอย่าง (ลูกบาศก์เมตร)

ที่มา: Hawkes (2004)

2.6 ด้านปริมาณความชื้น นำชิ้นงานตัวอย่างวัสดุ ขนาด $20 \times 20 \times 5$ เซนติเมตร ไปชั่งน้ำหนัก (M_1) บันทึกค่าน้ำหนัก นำชิ้นงานเข้าเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกมาวางพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง บันทึกข้อมูล ชั่งน้ำหนัก (M_2) คำนวณหาปริมาณความชื้นโดยใช้สมการที่ (4)

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \left[\frac{M_1 - M_2}{M_2} \right] \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ M_1 คือ มวลชิ้นทดสอบก่อนอบลมร้อนไล่ความชื้น (กรัม)

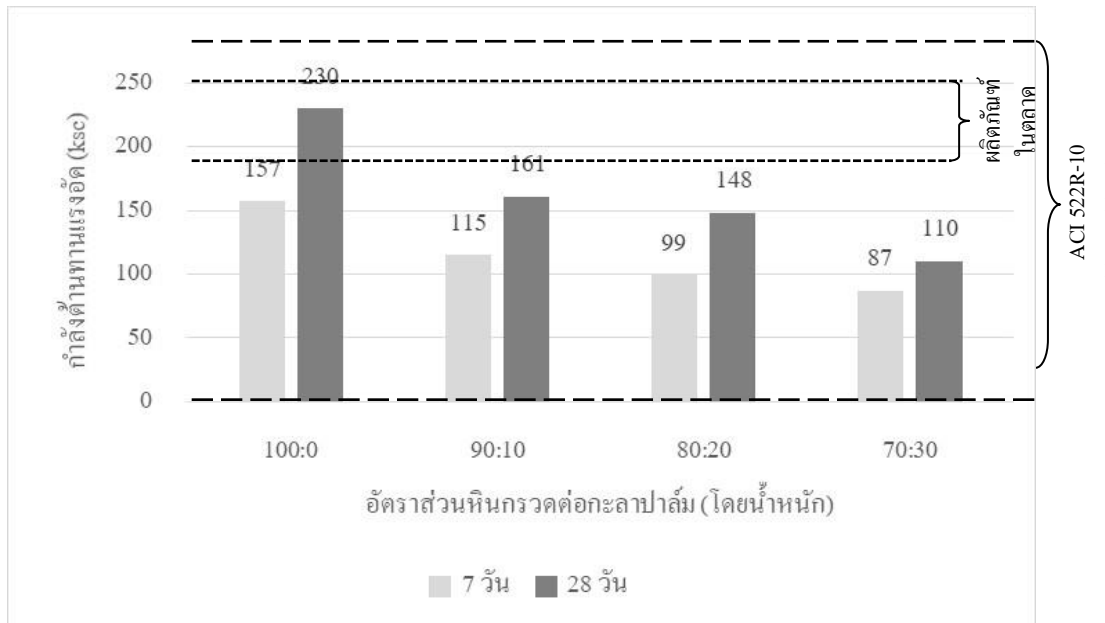
M_2 คือ มวลชิ้นทดสอบหลังอบลมร้อนไล่ความชื้น (กรัม)

ที่มา: American Society for Testing and Materials (1997)

ผลการทดสอบ

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตพูนที่มีอัตราส่วนหินกรวดผสมต่อกะลาปาล์มโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 ที่ระยะเวลา 28 วัน สูงกว่าที่ระยะเวลา 7 วัน ในทุกอัตราส่วน ซึ่งเป็นไปตามความคาดหมาย โดยมีค่าเท่ากับ 230, 161, 148 และ 110 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ภาพที่ 4) ตามลำดับ และค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตพูนมีค่าลดลงสัมพันธ์กับอัตราส่วนกะลาปาล์มที่เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตพูนมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดตามมาตรฐาน ACI 522R-10 ซึ่งอยู่ระหว่าง 28.55 - 285.52 ksc (American Concrete Institute, 2010) และหากไม่ผสมกะลาปาล์ม (230 ksc) จะมีค่าใกล้เคียงผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนในท้องตลาดซึ่งเหมาะสำหรับการใช้ปูพื้นทางเดินเท้าที่มีการรับน้ำหนักไม่มากนัก จึงมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม 827-2531 (407.8 ksc) สำหรับคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นทั่วไปซึ่งเหมาะกับการใช้ปูพื้นที่ต้องรับน้ำหนักมาก เช่น ถนนและลานจอดรถ เป็นต้น (150 ksc)



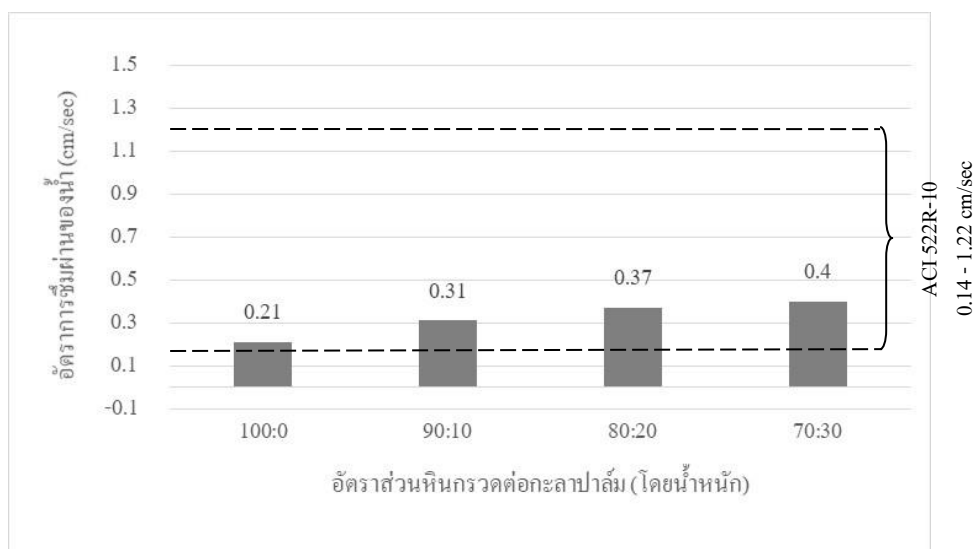
---- กำลังต้านทานแรงอัดของผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นคอนกรีตพูนในประเทศไทย 200-250 ksc

— — — กำลังต้านทานแรงอัดตามเกณฑ์ ACI 522R-10

ภาพที่ 4 กำลังต้านทานแรงอัดของบล็อกคอนกรีตพูนที่มีส่วนผสมของหินกรวดและกะลาปาล์มในอัตราส่วนต่าง ๆ

2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพอัตราการซึมผ่านของน้ำ

จากการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยอัตราการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตพูนที่มีอัตราส่วนหินกรวดต่อกะลาปาล์มโดยน้ำหนัก คือ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 เท่ากับ 0.40, 0.37, 0.31 และ 0.21 cm/sec ตามลำดับ (ภาพที่ 5) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ACI 522R-10 (0.14 - 1.22 cm/sec)



ภาพที่ 5 อัตราการซึมผ่านของน้ำของบล็อกคอนกรีตพ่นที่มีส่วนผสมของหินกรวดและกะลาปาล์มในอัตราส่วนต่าง ๆ

3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพด้านการนำความร้อน

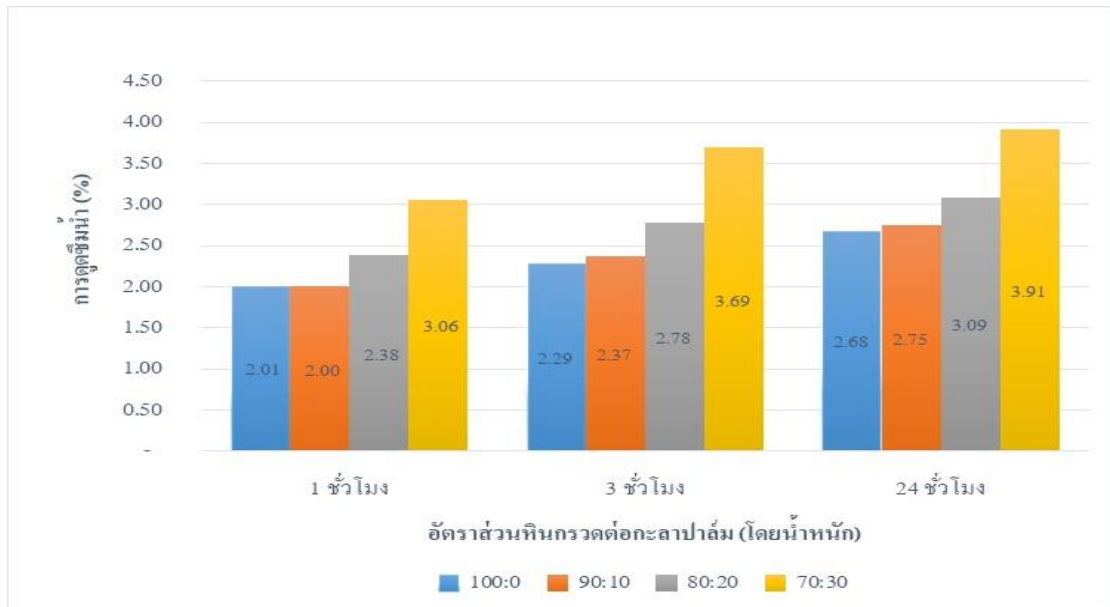
ผลการทดสอบ พบว่าค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของคอนกรีตพ่นที่มีอัตราส่วนหินกรวดต่อกะลาปาล์มโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 มีค่าเท่ากับ 0.2915, 0.2912, 0.2798 และ 0.2647 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ตามลำดับ (ตารางที่ 2) แสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนของคอนกรีตพ่นหินกรวดผสมกะลาปาล์มมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตบล็อกทั่วไป (1.02 W/m.K) (สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน, 2553) ซึ่งหมายถึงมีประสิทธิภาพในการลดความร้อนหรือมีความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี โดยค่า k จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนกะลาปาล์มลดลง

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบการนำความร้อนของชิ้นงานบล็อกปูพื้นทางเดินเท้าที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัย

อัตราส่วน หินกรวด : กะลาปาล์ม	ลำดับ	ค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน)	ค่าเฉลี่ย (วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน)	ค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
100:0	1	0.3210	0.2915	0.04
	2	0.3014		
	3	0.2522		
90:10	1	0.2964	0.2912	0.02
	2	0.2738		
	3	0.3033		
80:20	1	0.2570	0.2798	0.04
	2	0.2560		
	3	0.3266		
70:30	1	0.2536	0.2647	0.01
	2	0.2591		
	3	0.2814		

4. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการดูดซึมน้ำ

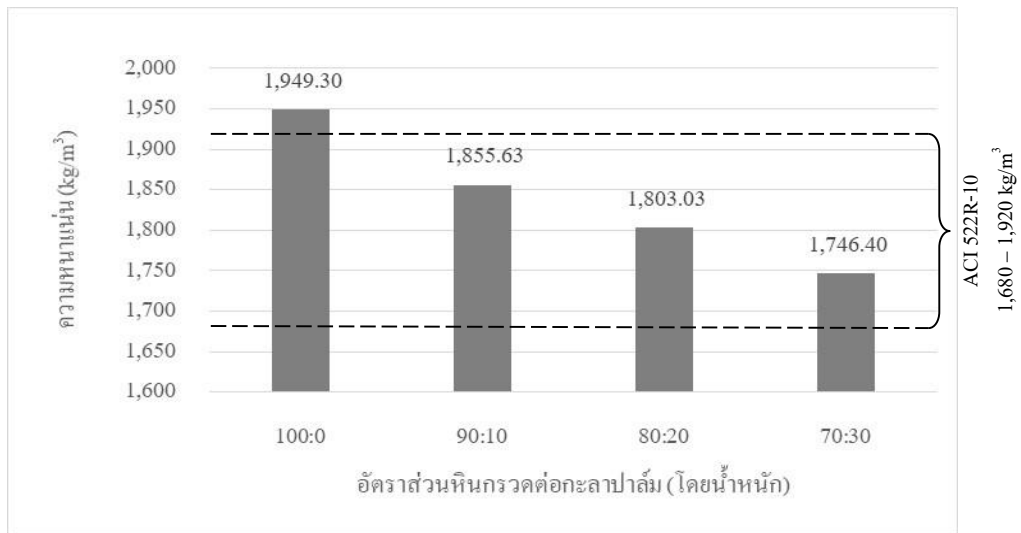
ผลการทดสอบประสิทธิภาพด้านการดูดซึมน้ำของคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของหินกรวดและกะลาปาล์มในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และระยะเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าระหว่างร้อยละ 2.01-3.91 แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตพรุนหินกรวดผสมกะลาปาล์มจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและอัตราส่วนของกะลาปาล์มเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 6 การดูดซึมน้ำของบล็อกคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของหินกรวดและกะลาปาล์มในอัตราส่วนต่าง ๆ

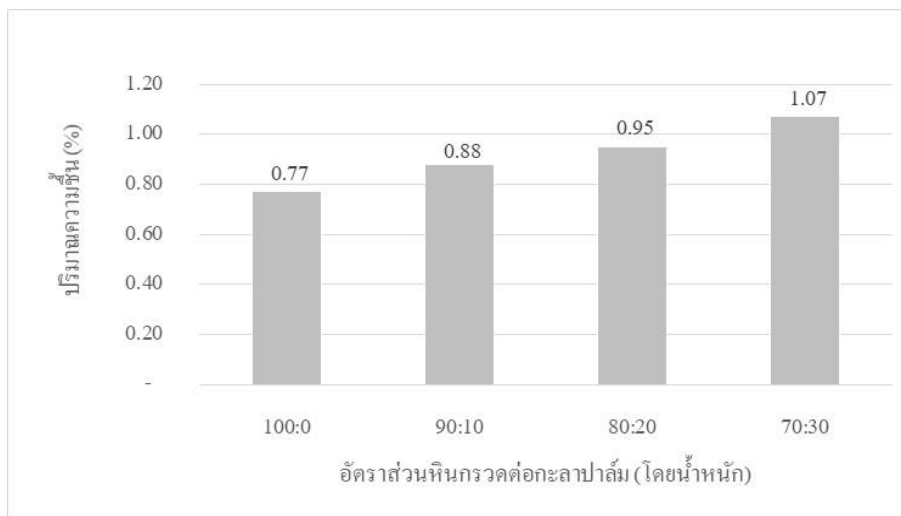
5. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของหินกรวดผสมกะลาปาล์มโดยน้ำหนักที่ 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 ตามลำดับ พบว่ามีความหนาแน่นเฉลี่ย เท่ากับ 1,949.30, 1,855.63, 1,803.03 และ 1,746.40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (ภาพที่ 7) แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของคอนกรีตพรุนหินกรวดผสมกะลาปาล์มจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนกะลาปาล์มลดลง ซึ่งตามมาตรฐาน ACI 522R-10 กำหนดค่ามาตรฐานอยู่ระหว่าง 1,680-1,920 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



ภาพที่ 7 ค่าความหนาแน่นของบล็อกคอนกรีตพ่นที่มีส่วนผสมของหินกรวดและกะลาปาล์มในอัตราส่วนต่าง ๆ

6. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านปริมาณความชื้น



ภาพที่ 8 ปริมาณความชื้นของบล็อกคอนกรีตพ่นที่มีส่วนผสมของหินกรวดและกะลาปาล์มในอัตราส่วนต่าง ๆ

จากภาพที่ 8 แสดงผลการทดสอบปริมาณความชื้นของคอนกรีตพ่นที่มีส่วนผสมของหินกรวดผสมกะลาปาล์ม เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย คือ อัตราส่วนหินกรวดต่อกะลาปาล์ม โดยน้ำหนักที่ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.07, 0.95, 0.88 และ 0.77 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นของคอนกรีตพ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนกะลาปาล์มเพิ่มขึ้น

การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

การพัฒนาบล็อกปูพื้นทางเดินเท้าคอนกรีตพรุนที่มีส่วนผสมของหินกรวดภูเขา จังหวัดอุทัยธานี ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง และกะลาปาล์มพันธุ์เทเนอรา ที่ได้จากโรงสกัดน้ำมันปาล์มแบบไม่ใช้น้ำ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีน้ำหนักเบาและมีความคงทน ในการผลิตใช้อัตราส่วนหินกรวดต่อกะลาปาล์มโดยน้ำหนักที่ 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก เท่ากับ 0.4:1 โดยมีปริมาณความโปร่งร้อยละ 15 และผลการทดสอบคุณสมบัติของบล็อกคอนกรีตพรุนตัวอย่าง พบว่า

1. ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของบล็อกคอนกรีตพรุนจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนกะลาปาล์มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการวิจัยของนันทชัย ชูศิลป์ (2556) ที่พบว่าการผสมกะลาปาล์มเพื่อไปแทนที่หินในอัตราส่วนร้อยละที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดของคอนกรีตพรุนผสมกะลาปาล์มมีค่าลดลงตามอัตราส่วนร้อยละการแทนที่ เนื่องจากความสามารถในการรับกำลังอัดของกะลาปาล์มมีค่าน้อยกว่าหิน ประกอบกับรูปทรงของกะลาปาล์มมีลักษณะโค้งเว้าส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสมีค่าน้อยลง อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของชิ้นงานเป็นไปตามมาตรฐาน ACI 522R-10 สามารถนำไปใช้ปูพื้นทางเดินเท้าได้ แต่ไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องรับน้ำหนักมากตามเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม 827-2531

2. อัตราการซึมผ่านของน้ำของบล็อกคอนกรีตพรุนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนกะลาปาล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกะลาปาล์มมีอัตราส่วนความพรุนสูงกว่าหินกรวด จึงยอมให้น้ำหรืออากาศไหลผ่านเนื้อคอนกรีตพรุนได้ดีกว่า ทั้งนี้ ประสิทธิภาพด้านอัตราการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตพรุนหินกรวดผสมกะลาปาล์มดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับมาตรฐาน ACI 522R-10 ที่กำหนดไว้ว่าคอนกรีตพรุนต้องมีอัตราการซึมผ่านของน้ำควรอยู่ระหว่าง 0.14 - 1.22 ksc

3. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของบล็อกคอนกรีตพรุนจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนกะลาปาล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกะลาปาล์มมีคุณสมบัติเด่นด้านการซึมผ่านน้ำและเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ จึงเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ส่งผลให้ช่วยลดการสะสมความร้อนของวัสดุและลดอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมลงได้ (ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน, รัฐศักดิ์ พรหมมาศ และ ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์วิกุล, 2558)

4. การดูดซึมน้ำของบล็อกคอนกรีตพรุนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนกะลาปาล์มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการวิจัยของนันทชัย ชูศิลป์ (2556) ที่พบว่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตพรุนจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอในช่วงของการแทนที่ด้วยกะลาปาล์ม เนื่องจากอนุภาคที่มากขึ้นของกะลาปาล์มสามารถลดช่องว่างภายในทำให้ความชื้นไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปได้อย่างสะดวก

5. ค่าความหนาแน่นของบล็อกคอนกรีตพรุนจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนกะลาปาล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของกะลาปาล์มในอัตราส่วนที่สูงขึ้น จะทำให้ชิ้นงานมีค่าความพรุน (ช่องว่าง) สูงขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงานจึงลดลง

6. ปริมาณความชื้นของบล็อกคอนกรีตพรุนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนกะลาปาล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกะลาปาล์มมีคุณสมบัติเด่นด้านการซึมผ่านน้ำซึ่งส่งผลให้ระดับความชื้นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน, รัฐศักดิ์ พรหมมาศ และ ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์วิกุล, 2558)

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพบล็อกปูพื้นคอนกรีตพรุน แสดงให้เห็นว่าการใช้กะลาปาล์มในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านการดูดซึมน้ำ ค่าความชื้น และด้านการป้องกันความร้อน แต่จะทำให้ประสิทธิภาพด้านกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตและค่าความหนาแน่นลดลง คุณสมบัติด้านการซึมผ่านน้ำยังสามารถประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ ได้อีกอย่างกว้างขวาง เช่น งานพื้นทาง ทางเดินเท้า ขอบสระว่ายน้ำ ลานกลางแจ้ง แปลงปลูกพืชสวยงาม

ขนาดเล็ก ตัวกรองในระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะในการนำคอนกรีตพ่นไปใช้จากงานวิจัยของ
ณัดกิจ ชาริรัตน์ และคณะ (2560) ที่เสนอแนะว่าคอนกรีตพ่นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุชั้นผิวทางและ
ชั้นรองผิวทางร่วมกับการจัดการระบายน้ำ และสามารถช่วยลดปัญหาการไหลนองของน้ำฝนและลดขนาดของระบบ
ระบายน้ำลงได้ โดยน้ำสามารถซึมลงสู่ชั้นดิน ด้านล่าง ทำให้คุณภาพของน้ำที่ไหลลงสู่ระบบแม่น้ำดีขึ้น รวมถึงใช้เป็น
พื้นทางบริเวณเขตเมืองร่วมกับการปลูกต้นไม้ เพื่อเป็นพื้นที่สีเขียวได้ นอกจากนั้นแล้ว ยังช่วยลดการสะสมความร้อน
ในวัสดุและลดอุณหภูมิให้กับสภาพแวดล้อมได้

ในการพัฒนาล็อกปูพื้นทางเดินเท้าคอนกรีตพ่นที่ช่วยลดพื้นที่ผิวที่น้ำและเพิ่มพื้นที่ผิวที่น้ำตามแนวทาง
การออกแบบอาคารเพื่อลดปัญหาน้ำท่วม ควรใช้กะลาปาล์มในอัตราส่วนที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม หากจะนำไปใช้กับ
บริเวณที่ต้องการรับแรงมาก ควรทำการพัฒนาด้านกำลังต้านทานแรงอัดเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม
827-2531

เอกสารอ้างอิง

- กฎกระทรวง ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2527. (2549, 5 กรกฎาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 123 ตอนที่ 70ก.
กมล ตรีพงษ์ และ รณกร เทพวงษ์. (2563). การศึกษาการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตพ่นโดยใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล.
ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 วิศวกรรมโยธากับโครงการเขตพัฒนาพิเศษ
ภาคตะวันออกเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน (น. MAT13-1-MAT13-7). ชลบุรี: วิศวกรรมสถานแห่ง
ประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
กิตติ เต็มมธุรพจน์, โสภะ วิศวกรรมศาสตร์ และ โจเซฟ เคดารี. (2554). การพัฒนากะลาปาล์มบล็อกน้ำหนักเบาที่มี
ประสิทธิภาพในการลดความร้อนเข้าสู่อาคาร. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์
ครั้งที่ 49 เทิดพระเกียรติ 84 พรรษา กับเศรษฐกิจการเกษตร (น. 96-103). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์.
ชัตติย ชมพวงค์ และคณะ. (2563). คุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพ่นจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสม
กากแคลเซียมคาร์ไบด์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 30(2), 280-290.
จรรยา เจริญเนตรกุล. (2557). อิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมเถ้าและกะลาปาล์มน้ำมัน. วารสารการพัฒนาชุมชน
และคุณภาพชีวิต, 2(1), 103-112.
ณัดกิจ ชาริรัตน์ และคณะ. (2560). แบบจำลองทางกายภาพการประยุกต์ใช้คอนกรีตพ่นเพื่องานอาคารเขียว
ตามหลักเกณฑ์ของ TREES-NC. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย, 31(2), 37-44.
ทวีชัย สำราญวานิช, บุญไชย สถิตมั่นในธรรม และ ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์. (2559). การประเมินสัดส่วนผสมของ
คอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว. ชลบุรี: คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา.
นันทชัย ชูศิลป์. (2556). หน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพ่นผสมกะลาปาล์มน้ำมัน.
วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต, 1(1), 97-106.
ปิยะพงศ์ กีสวัสดิ์คอน, รัฐศักดิ์ พรหมมาศ และ ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล. (2558). อัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตผสม
เถ้าทลายปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นแทนทรายที่บ่มด้วยคลีนไมโครเวฟ. นครปฐม: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลรัตนโกสินทร์.

- ยุวดี หิรัญ และคณะ. (2552). บล็อกปูถนนคอนกรีตพรุน. ใน *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4* (น. 13-18). อุบลราชธานี: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- สถาบันอาคารเขียวไทย. (2563). *เกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สำหรับ การก่อสร้างและปรับปรุงโครงการใหม่*. กรุงเทพฯ: สถาบันอาคารเขียวไทย.
- สุธิดา ถิ่นจันทร์. (2557). การพัฒนาบล็อกคอนกรีตปูพื้นชนิดน้ำซึมผ่านได้ผสมยางรถยนต์ใช้แล้ว. (การค้นคว้าอิสระปริญญาโท). สาขาวิชาวิศวกรรมอาคาร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. (2553). *คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (อาคาร) พ.ศ. 2553*. กรุงเทพฯ: สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน.
- American Concrete Institute. (2010). *ACI 522R-10*. Farmington, MI: American Concrete Institute.
- American Society for Testing and Materials. (1997). *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. West Conshohocken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2009). *Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete*. West Conshohocken: ASTM International.
- Hawkes, S. J. (2004). The concept of density. *Journal of Chemical Education*, 81(1), 14-15.
- The British Standard Institution. (2019). *Testing hardened concrete: Part 3 compressive strength of test specimens*. London: BSI Standards Limited 2019.

เอกสารอ้างอิง (แปลภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษ)

- American Concrete Institute. (2010). *ACI 522R-10*. Farmington, MI: American Concrete Institute.
- American Society for Testing and Materials. (1997). *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. West Conshohocken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2009). *Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete*. West Conshohocken: ASTM International.
- Bureau of Energy Human Resource Development. (2010). *Energy responsible person (building) manual B.E. 2553*. Bangkok: Bureau of Energy Human Resource Development.
- Chareerat, T. et al. (2017). Physical model of porous concrete in green building according to TREES-NC. *Thai Environmental Engineering Journal*, 31(2), 37-44.
- Charoennatkul, C. (2014). Interlocking blocks containing oil palm ash and shells waste. *Journal of Community Development and Life Quality*, 2(1), 103-112.
- Chompoovong, K. et al. (2563). Properties of pervious geopolymer concrete made from high-calcium fly ash containing calcium carbide residue. *The Journal of KMUTNB*, 30(2), 280-290.
- Chusilp, N. (2013). Unit Weight and Compressive Strength of Pervious Concrete Mixed with Oil Palm Shell. *Journal of Community Development and Life Quality*, 1(1), 97-106.
- Hawkes, S. J. (2004). The concept of density. *Journal of Chemical Education*, 81(1), 14-15.

- Hirun, Y. et al. (2009). Porous concrete paving block. In *Annual Concrete Conference 4* (pp. 13-18). Ubon Ratchathani: Thailand Concrete Association.
- Kesawadkorn, P., Prommas, R., & Rungsakthaweekul, T. (2015). *Water permeability of concrete mixing palm oil regionalism ash and crushed dust replaced sand using microwave curing*. Nakhon Pathom: Rajamangala University of Technology Rattanakosin.
- Ministerial Regulation No.6, B.E.2527. (2003, July 5), Royal Thai Government Gazette, 123, 70a.
- Sumranwanich, T., Stitmannaitum, B., & Chuosavasdi, T. (2016). *Determination of mix proportion of hardened concrete containing fly ash or limestone powder*. Chonburi: Burapha University.
- Termmathurapoj, K., Visitsak, S., & Khedari, J. (2011). The development of lightweight oil palm kernel shell block for enhancing heat gain reduction through buildings. In *The 49th Kasetsart University Annual Conference: Celebrating His Majesty the King 7th Cycle Birthday and Expressing Our Humble Gratitude Towards His Royal Support for Agricultural Economics* (pp. 96-103). Bangkok: Kasetsart University.
- Thai Green Building Institute. (2020). *Thai's rating of energy and environmental sustainability for new construction and major renovation*. Bangkok: Thai Green Building Institute.
- The British Standard Institution. (2019). *Testing hardened concrete: Part 3 compressive strength of test specimens*. London: BSI Standards Limited 2019.
- Thinjun, S. (2014). *The development of a porous concrete block from recycled rubber crumb*. (Master' s Independent Study). Department of Building, Innovation, and Technology, Kasetsart University.
- Treephong, K., & Thep Wong, R. (2020). A study of water permeability on porous concrete using recycled coarse aggregates. In *The 25th National Convention on Civil Engineering: Civil Engineering and Eastern Economic Corridor for Sustainable Development* (pp. MAT13-1-MAT13-7). Chonburi: The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage.