

การศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อผลิตแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า A Study of Palm oil fuel Ash in Manufacturing in Production Footpaths Concrete Stabs

เตือนใจ ปิยัง^{1*} กัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์¹ และ อเนก สาวะอินทร์¹
Tuanjai Piyang^{1*}, Kattinat Sagulsawasdiapan¹ and Aneak Sawain¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันต่อคุณสมบัติของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า (ขนาด $11.3 \times 19.3 \times 6.0$ เซนติเมตร) ซึ่งออกแบบการทดลอง 6 ชุดการทดลอง โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันวัสดุเศษเหลือจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบแทนที่ปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน อัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าคุณสมบัติของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าอื่นๆ เช่น ขนาด และน้ำหนักของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าทุกอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นคอนกรีตปูทางเท้าอัตราส่วนที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมากมีแนวโน้มการดูดซึมน้ำขึ้นสูงกว่า สำหรับความต้านทานแรงอัด ระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 วัน ความต้านทานแรงอัดของแผ่นคอนกรีตปูทางเท้าที่มีส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันลดลงเมื่ออัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มมากขึ้น และพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ต้นทุนการผลิตแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าลดลง เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว

คำสำคัญ: เถ้าปาล์มน้ำมัน แผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า

¹ หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

* Corresponding author email: tuanjai2527@gmail.com

Abstract

The object of this research was to determine the effects of palm oil fuel ash as cement substitution on flooring paving slabs (size 11.3 × 19.5 × 6.0 cm.) properties. The palm oil fuel ash is a byproduct from palm oil industry. The experiment consisted of 6 treatments which were different palm oil fuel ash ration: 0, 10, 20, 30, 40 and 50 percent by weight. The results showed that properties of cement flooring paving slabs e.g. size and weight of all rations were similar. Water absorption percentage of the palm oil fuel ash concrete mixtures were higher. The results showed that the replacing cement with palm oil fuel ash content decrease the cost of cement flooring paving slabs. When replacing cement with palm oil ash at a ratio of 10 percent the cost of production was that of using cement alone.

Keywords: Palm oil fuel ash, Footpaths concrete slabs

บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเพื่อนำวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตและช่วยรักษาสีสิ่งแวดล้อมในการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตันตลอดจนการขนส่งปูนซีเมนต์ไปยังผู้จัดจำหน่าย มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา 973-980 กิโลกรัม ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 909 กิโลกรัม เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้ปูนเม็ด แสดงให้เห็นว่าการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์เป็นกระบวนการที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศมากที่สุด (พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์ อธิวัตร จิรจรรยาเวช วัชรพงษ์ ศิลาเลิศรักษา และวุฒิพงษ์ ปรีดาภักทรพงษ์, 2548) ซึ่งเมื่อพิจารณาทิศทางอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากอัตราการผลิตและจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดมลภาวะที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม ซึ่งปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ปรากฏขึ้นได้แก่กระบวนการผลิตต้องใช้น้ำและพลังงานมาก ทำให้เกิดน้ำเสียและวัสดุเศษเหลือ จากกระบวนการผลิตทั้งในรูปของทะลายเปล่า (Empty fruit bunches) เส้นใยปาล์ม (Palm pericarp fiber) กากเนื้อผลปาล์ม (Palm kernel cake) กะลาปาล์ม (Palm shell) และตะกอนสลัดจ์ (Sludge) เป็นปริมาณมาก และส่วนที่เป็นของเหลว คือน้ำทิ้ง (Palm oil mill effluent, POME) (Chavlaparit, O., Rulkens, W. H., Mol, A. P. J. & Khaodhair, S., 2006) สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมัน (palm oil fuel ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทะลายปาล์มเปล่าของผลปาล์ม เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553) ซึ่งปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันทุกวันปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นทุกวัน แต่มีการนำไปใช้ประโยชน์น้อยกว่าที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ต้องการพื้นที่ในการจัดเก็บ หากสามารถนำวัสดุดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุแทนปูนซีเมนต์ในการผลิต

คอนกรีตได้ โดยยังสามารถคงคุณภาพที่ได้มาตรฐานก็จะเป็นการช่วยลดปัญหาการจัดการพื้นที่ในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปทิ้ง อีกทั้งช่วยลดค่าขนส่งไปยังสถานที่จัดทิ้งลงไป

ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งจะเป็นการนำวัสดุผลพลอยได้อย่างเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ให้เกิดประโยชน์ อีกทั้งเป็นการช่วยลดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้อีกด้วย (ปัญหานัน ต่อกิตติกุล, 2551) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานด้านคอนกรีตต่อไปในอนาคต เพื่อผลิตแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ประกอบการและคนในท้องถิ่น ได้นำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ให้เกิดประโยชน์มากกว่าจะนำไปทิ้งให้ก่อมลภาวะต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์

การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย เหล็กแผ่นสำหรับออกแบบบล็อก น้ำมันดำ ปูนซีเมนต์ ทราย หินคลุก จอบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เกียงก่ออิฐ ตาชั่ง คีม ถังปูน ตะแกรงร่อน น้ำ กระเบื้องแผ่นเรียบ และเหล็กวัด

2. วิธีการวิจัย

2.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ตัวแปรต้น ปูนซีเมนต์ เถ้าปาล์มน้ำมัน

2.1.2 ตัวแปรตาม แผ่นคอนกรีตปูทางเท้า

2.1.3 ตัวแปรควบคุม ทราย หิน และน้ำ

2.2 การออกแบบส่วนผสม แผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าทำการศึกษาปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันปริมาณที่แตกต่างกัน โดยวางแผนการทดลอง 6 ชุดการทดลอง แต่ละชุดการทดลองมี 3 ซ้ำ คือ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 40 และ 50 ตามลำดับ รายละเอียดสัดส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับหล่อตัวอย่างแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า ดังตารางที่ 1

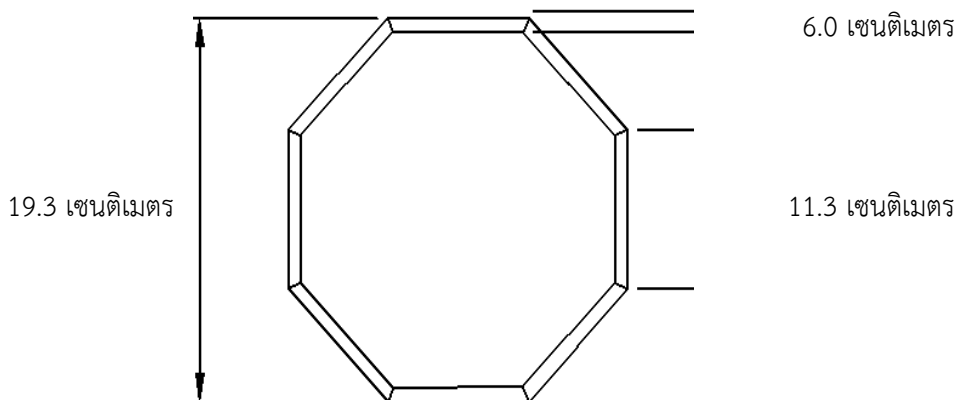
ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมในการผลิตแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า

ชุดการทดลอง	สัดส่วนการแทนที่ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		อัตราส่วนผสม (กรัม)				
	ปูนซีเมนต์	เถ้าปาล์ม น้ำมัน	ปูนซีเมนต์	เถ้าปาล์ม น้ำมัน	ทราย	หิน	น้ำ
1 (ชุดควบคุม)	100	-	1,282	-	1,328	1,390	400
2	90	10	1,154	128	1,328	1,390	400
3	80	20	1,026	256	1,328	1,390	400
4	70	30	896	386	1,328	1,390	400
5	60	40	770	512	1,328	1,390	400
6	50	50	640	642	1,328	1,390	400

หมายเหตุ: น้ำหนักต่อแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า 4.4 กิโลกรัม

2.3 การเตรียมตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษานี้ นำมาจากบริษัทโรงปาล์มน้ำมัน จำกัด โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกสิ่งเจือปนอนุภาคใหญ่ และนำมาร้อนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ให้มีความละเอียด

2.4 เตรียมตัวแม่พิมพ์หรือตัวบล็อก ภาพที่ 1 ตัวอย่างแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า ขนาด $11.3 \times 19.3 \times 6.0$ เซนติเมตร (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ หนา) สำหรับทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ และทดสอบความต้านทานรับแรงอัด



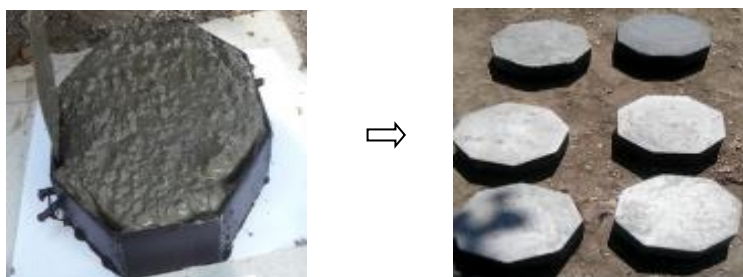
ภาพที่ 1 ตัวอย่างแม่พิมพ์แผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าขนาด $11.3 \times 19.3 \times 6.0$ เซนติเมตร

2.5 ขั้นตอนการผลิตแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า สำหรับการผลิตแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าจากเถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อหาปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เหมาะสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

2.5.1 นำส่วนผสมตามชุดการทดลองทั้งหมดที่เตรียมไว้ในภาชนะคลุกเคล้าให้เนื้อเข้ากันเป็นหนึ่งเดียว

2.5.2 นำส่วนผสมทั้งหมดเทลงบนบล็อกที่เตรียมไว้ให้ทั่ว ใช้เกรียงเหล็กเกลี่ยให้ทั่วทั้งบล็อก

2.5.3 รอให้แห้งแข็งทำการแกะแบบออกจากนั้นเอาออกจากบล็อก ดังภาพที่ 2 นำไปแช่น้ำ



ภาพที่ 2 ตัวอย่างแม่พิมพ์แผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า

2.6 การศึกษาคุณสมบัติทั่วไป

2.6.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมัน การศึกษาเริ่มจากการนำเถ้าปาล์มน้ำมันนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 หลังจากนั้นทำการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 โดยการบดให้มีความละเอียดมากขึ้นอีก 2 ขนาด คือขนาดอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ในช่วงร้อยละ 15 - 20 และน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก รวมขนาดที่ไม่ได้บดเป็น 3 ขนาดแล้วจึงทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ละขนาด ได้แก่ ลักษณะความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน

2.6.2 ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า ศึกษาคุณสมบัติที่ต้องการตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นทางเท้า รูปร่างแบบศิลาหกเหลี่ยม (มอก. 827-2531) ซึ่งคุณสมบัติที่ต้องการประกอบด้วย การวัดขนาดแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า การแข็งตัวของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า ค่าการดูดซึมน้ำ และกำลังต้านทานแรงอัด โดยมีรายละเอียดวิธีการทดสอบดังนี้

1) การวัดขนาดแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า การวัดขนาดของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า โดยวิธีทดสอบว่าอยู่ในสภาพสมบูรณ์หรือไม่แตกหักจำนวนทั้งหมดและทดสอบโดยวัดความกว้าง ความยาว และความหนาของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า

2) การแข็งตัวของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า การแข็งตัวของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าจะทำการศึกษาโดยการจับเวลาในการแข็งตัวของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าในแต่ละชุดการทดลอง

3) การดูดซึมน้ำ ในการทดสอบการดูดซึมน้ำนี้ผู้วิจัยได้มีการใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นทางเท้า (มอก. 827-2531) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ โดย เมื่อนำตัวอย่างแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่ระยะเวลาบ่ม 24 ชั่วโมง มาล้างทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่อาจติดอยู่ที่ผิวออกเช็ดด้วยผ้าให้ผิวแห้ง และนำไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้น หลังจากนั้นนำตัวอย่างแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าไปตากแดดให้แห้งเสร็จแล้วนำไปชั่งน้ำหนักสุดท้าย โดยค่าร้อยละของการดูดซึมน้ำสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

เมื่อ	M_1	คือ	น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)
	M_2	คือ	น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)

4) ความต้านทานแรงอัด ในการทดสอบหาความต้านทานแรงอัดของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้านี้จะกระทำโดยการนำตัวอย่างไปมีระยะเวลาในการบ่ม 7 14 และ 28 วัน จึงนำชิ้นตัวอย่างเช็ดให้ผิวแห้ง แล้วนำตัวอย่างทดสอบกับเครื่อง Compression machine โดยนำแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าวางบนแท่นกดสัมผัสหน้าแท่นทดสอบตั้งเกย Compression machine ไว้ที่ขีด 0 แล้วจึงเดินเครื่องอย่างสม่ำเสมอในอัตราประมาณ 1.43 – 3.47 กิโลกรัมต่อเซนติเมตร 2 วินาที บันทึกค่าต่างๆ ไว้เพื่อนำไปพล็อต Stress-strain curves ต่อไปเมื่อกดแท่งทดสอบจนถึง Yield point แล้วให้ถอดเครื่อง Compression machine ออกแล้วค่อยๆ เพิ่ม

น้ำหนักจนแตก บันทึกน้ำหนักสูงสุดที่แท่งทดสอบสามารถรับได้ ลักษณะการแตกแท่งทดสอบด้วย เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C31 (ชนกัญจน์ สำเภาลอย, 2559)

2.7 การวิเคราะห์ผลจากการทดลอง

วิเคราะห์ข้อมูลการวัดขนาด ระยะเวลาการก่อตัว ค่าความต้านทานแรงอัด และทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ ในการวิเคราะห์ หาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลในการ วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และมีการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทำการ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในแต่ละชนิดด้วยวิธี Duacan's New Multiple Rang Test โดยใช้โปรแกรม สำเร็จรูป SPSS เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติจากอัตราส่วนต่างๆ

ผลการวิจัย

การศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของเถ้าปาล์ม น้ำมัน สำหรับการผลิตแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมัน และ คุณสมบัติแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า เช่นการวัดขนาด น้ำหนัก ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความต้านทาน รับแรงอัดของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าในการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์ม น้ำมันทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเปรียบกับชุดควบคุมที่ไม่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน ผลจากการศึกษาแสดง ต่อไปนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ผิวขรุขระ ความพรุนสูง รูปร่างกลมมน ติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดมีลักษณะอนุภาคเป็น เหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

ลักษณะเถ้าปาล์มน้ำมัน	ลักษณะเถ้าปาล์มน้ำมัน
ก่อนร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325	หลังร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325
- ขนาดใหญ่ความพรุนสูง	- ลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม
- บางส่วนกลมมนติดกันเป็นกลุ่มก้อน	- รูปร่างไม่แน่นอน
- ขนาดไม่สม่ำเสมอ	- ขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับก่อนบด

2. ลักษณะทางกายภาพของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า

ลักษณะทางกายภาพของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า จากการทดลองใช้ปริมาณของ เถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วน ร้อยละ 0 10 20 30 40 และ 50 ตามลำดับ ซึ่งลักษณะกายภาพของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า มีลักษณะแตกต่างกัน คือชุดการทดลองที่ 1 (ชุดควบคุม) แผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าอัตราส่วนร้อยละ 100 มีความแข็งแรงมากที่สุด เพราะมีใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมอย่างเดียว ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้า

ปาล์มน้ำมัน ซึ่งปูนซีเมนต์มีความละเอียดจึงส่งผลให้มีความแข็งแรง และมีผลต่อสีแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า มีลักษณะเป็นสีเทา รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่ 2 เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ร้อยละ 10 จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่าชุดการทดลองที่ 1 เพราะว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีความพรุนน้อยจึงส่งผลให้การก่อตัวไม่แข็งแรงเท่ากับปูนซีเมนต์ และลักษณะแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าสีเทา รองลงมาชุดการทดลองที่ 3 มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ร้อยละ 20 30 40 และ 50 ตามลำดับ ความแข็งแรงน้อย และมีการแตกได้ง่ายยิ่งมีปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันมากแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าก็ยิ่งมีความแข็งแรงน้อยลง และสีแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าเป็นสีเทาสีเหมือนกับเถ้าปาล์มน้ำมัน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่ใช้ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

ชุดการทดลอง ปูนซีเมนต์: เถ้าปาล์มน้ำมัน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ลักษณะทางกายภาพ	ผลการทดลอง
ชุดการทดลองที่ 1 : 100 : 0		- มีสีเทาเข้ม - แข็งแรงมาก - ไม่เปราะ
ชุดการทดลองที่ 2 : 90 : 10		- มีลักษณะสีเทา - แข็งแรง - ไม่เปราะ
ชุดการทดลองที่ 3 : 80 : 20		- มีลักษณะสีเทาเข้ม - แข็งแรง - ไม่เปราะ
ชุดการทดลองที่ 4 : 70 : 30		- มีลักษณะสีน้ำตาลเงินเทาจาง - เปราะ
ชุดการทดลองที่ 5 : 60 : 40		- มีลักษณะสีกลมดำเข้ม - เปราะ

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชุดการทดลอง ปูนซีเมนต์: เถ้าปาล์มน้ำมัน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ลักษณะทางกายภาพ	ผลการทดลอง
ชุดการทดลองที่ 6 : 50 : 50		- มีลักษณะสีน้ำเงินเข้ม - เปราะ - แตกหักง่าย

3. ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า

คุณสมบัติของตัวอย่างแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า เช่น การวัดขนาดแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า และระยะเวลาในการแข็งตัวของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า นอกจากนี้ทำการศึกษา ค่าการดูดซึมน้ำ และกำลังต้านทานหรือแรงอัด ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปร่างแบบศิลาหกเหลี่ยม (มอก.827-2531) ผลการศึกษาพบว่า

3.1 น้ำหนักและขนาดแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า พบว่าในแต่ละชุดการทดลองมีน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งชุดการทดลองที่ 1 (ควบคุม) แผ่นคอนกรีตปูทางเท้าที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์อย่างเดียว มีน้ำหนักมากที่สุดคือ 4.80 ± 0.06 เพราะว่ามีส่วนผสมของปูนซีเมนต์อยู่จึงทำให้แผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้ามีน้ำหนักมากที่สุด เนื่องจากมีอัตราส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียว รองลงมา คือชุดการทดลองที่ 2 มีน้ำหนัก 4.67 ± 0.06 และชุดการทดลองที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด คือชุดการทดลองที่ 6 มีน้ำหนัก คือ 4.20 ± 0.00 เห็นได้ว่าปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีผลต่อน้ำหนักแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า ยิ่งใส่ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันมากส่งผลให้น้ำหนักแผ่นปูพื้นเท้าน้ำหนักลดลง สำหรับขนาดของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าชุดการทดลองที่ 1 มีขนาดเท่ากับมาตรฐาน ซึ่งมีขนาด $11.3 \times 19.3 \times 6.0$ เซนติเมตร ส่วนชุดการทดลองที่ 2 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ มีขนาดใกล้เคียงกันซึ่งไม่ต่างกันมากกับมาตรฐาน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 น้ำหนักและขนาดแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า

ชุดการทดลอง ปูนซีเมนต์ : เถ้าปาล์มน้ำมัน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	น้ำหนักแผ่นคอนกรีต ปูพื้นทางเท้า (กิโลกรัม)	ขนาดแผ่นคอนกรีต ปูพื้นทางเท้า (เซนติเมตร)
ชุดการทดลองที่ 1 : 100 : 0	4.80 ± 0.06	$11.3 \times 19.3 \times 6.0$
ชุดการทดลองที่ 2 : 90 : 10	4.67 ± 0.06	$11.2 \times 19.5 \times 6.0$
ชุดการทดลองที่ 3 : 80 : 20	4.50 ± 0.00	$11.3 \times 19.4 \times 6.0$
ชุดการทดลองที่ 4 : 70 : 30	4.40 ± 0.00	$11.4 \times 19.6 \times 6.0$
ชุดการทดลองที่ 5 : 60 : 40	4.27 ± 0.00	$11.3 \times 19.5 \times 6.0$
ชุดการทดลองที่ 6 : 50 : 50	4.20 ± 0.00	$11.4 \times 19.3 \times 6.0$

หมายเหตุ : มาตรฐานกำหนด (มอก. 827-2531) น้ำหนักต่อแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า 4.4 กิโลกรัม ซึ่งมีขนาด $11.3 \times 19.3 \times 6.0$ เซนติเมตร

3.2 การแข็งตัวของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า พบว่าชุดการทดลองที่ 1 (ควบคุม) แผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า ที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์อย่างเดียวยังส่งผลให้การก่อตัวในการแข็งตัวเร็วที่สุดใช้ระยะเวลาในการแข็งตัว 10 นาที รองลงมา คือ ชุดการทดลองการที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 ตามลำดับ ซึ่งใช้เวลาในการก่อตัวในการแข็งตัว 15 20 40 60 และ 1 ชั่วโมง 15 นาที ตามลำดับ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระยะเวลาการแข็งตัวของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า

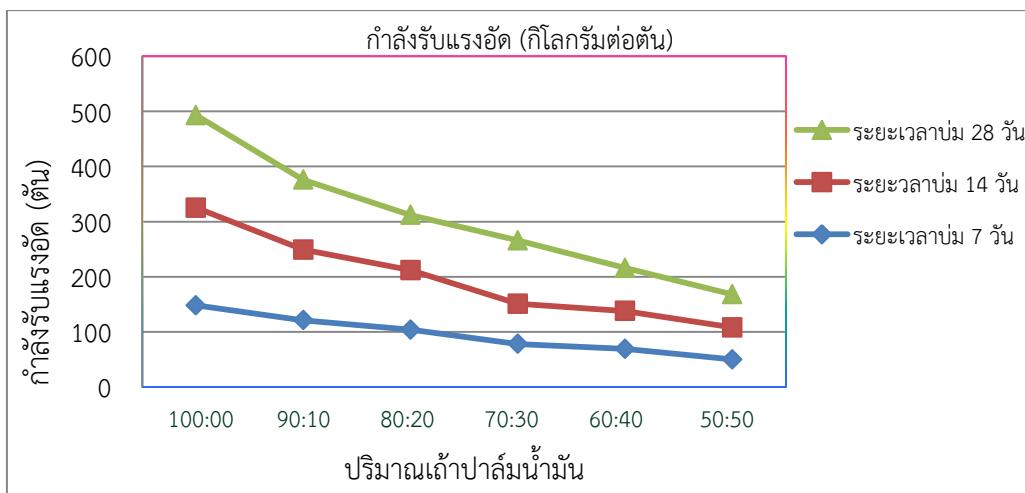
ชุดการทดลอง ปูนซีเมนต์ : เถ้าปาล์มน้ำมัน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	การแข็งตัวของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า (ชั่วโมง)
ชุดการทดลองที่ 1 : 100 : 0	10 นาที
ชุดการทดลองที่ 2 : 90 : 10	15 นาที
ชุดการทดลองที่ 3 : 80 : 20	20 นาที
ชุดการทดลองที่ 4 : 70 : 30	40 นาที
ชุดการทดลองที่ 5 : 60 : 40	60 นาที
ชุดการทดลองที่ 6 : 50 : 50	1 ชั่วโมง 15 นาที

3.3 การดูดซึมน้ำ พบว่าแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า ชุดการทดลองที่ 6 อัตราส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 50 มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุด รองลงมา คือ ชุดการทดลองการที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 40 และ 30 ตามลำดับ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การทดสอบการดูดซึมน้ำแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าระยะเวลา 24 ชั่วโมง

ชุดการทดลอง ปูนซีเมนต์ : เถ้าปาล์มน้ำมัน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	การดูดซึมน้ำ 24 ชั่วโมงคอนกรีตปูพื้นทางเท้า		
	น้ำหนักก่อนบ่ม (กิโลกรัม)	น้ำหนักหลังบ่ม (กิโลกรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์)
ชุดการทดลองที่ 1 : 100 : 0	4.80 ± 0.06	4.90 ± 0.00	2.04
ชุดการทดลองที่ 2 : 90 : 10	4.67 ± 0.06	4.73 ± 0.06	1.27
ชุดการทดลองที่ 3 : 80 : 20	4.50 ± 0.00	4.57 ± 0.06	1.53
ชุดการทดลองที่ 4 : 70 : 30	4.40 ± 0.00	4.50 ± 0.10	2.22
ชุดการทดลองที่ 5 : 60 : 40	4.27 ± 0.00	4.43 ± 0.06	3.61
ชุดการทดลองที่ 6 : 50 : 50	4.20 ± 0.00	4.40 ± 0.00	4.54
ช่วงการดูดซึม	1.27 - 4.54		

3.4 ความต้านทานแรงอัด จากการทดสอบค่าความต้านทานรับแรงอัดของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าจากการทดลองใช้ปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 วัน ทั้งนี้ทดสอบค่าความต้านทานรับแรงอัดแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่บ่มไว้เป็นระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน พบว่า (ชุดควบคุม) แผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์อย่างเดียวมีค่าความต้านทานแรงอัดมากที่สุด เพราะไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันจึงทำให้มีความแข็งแรงมาก รองลงมาชุดการทดลองที่ 2 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งความต้านทานแรงอัดลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มที่ผสมยิ่งผสมมากความต้านทานแรงอัดจะลดลง ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความต้านทานรับแรงอัดแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าระยะเวลาบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน

3.4 ราคาต้นทุนการผลิต ต้นทุนการผลิตของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าขึ้นอยู่กับราคาวัสดุที่ใช้ในการผลิตซึ่งราคาวัสดุแต่ละชนิดต่อแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า 1 แผ่น และราคาต้นทุนรวมมีรายละเอียดดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ราคาต้นทุนแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า

รายการ	ราคา : แผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า 1 แผ่น (บาท)					
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6
ปูนซีเมนต์	4.02	3.50	3.00	2.50	2.00	1.50
เถ้าปาล์มน้ำมัน	-	-	-	-	-	-
ทรายหยาบ	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
หิน	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
น้ำ	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
น้ำมันดำ	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
รวมราคาวัสดุ	7.00	6.48	5.98	5.48	4.98	4.48

การอภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การผลิตแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าโดยการทดลอง 6 ชุดการทดลอง แต่ละชุดการทดลองมี 3 ซ้ำ ใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ เถ้าปาล์ม น้ำมัน 100 : 0 90 : 10 80 : 20 70 : 30 60 : 40 และ 50 : 50 ตามลำดับ สมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันและคุณสมบัติต่างๆ แผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้า ลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์ม

น้ำมันก่อนและหลังบด พบว่าถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีลักษณะรูปร่างโดยรวมค่อนข้างหยาบความพรุนสูงรูปร่างกลมมนติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อนและขนาดไม่สม่ำเสมอส่วนถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดมีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมรูปร่างไม่แน่นอนอนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลง เมื่อเทียบกับถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของลดาวลัย สิ้นสุพรรณ วริญญา ใจใส และทิพนาทองโชติ (2556) ถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีความละเอียดต่ำและมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่มาก ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย การบดจึงเป็นการเพิ่มความละเอียดของถ้าปาล์มน้ำมัน และเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของถ้าปาล์มน้ำมัน การบดไม่เพียงเพิ่มความละเอียดของถ้าปาล์มน้ำมันแต่ยังเป็นการลดความพรุนของถ้าปาล์มน้ำมันด้วย

คุณสมบัติของตัวอย่างแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าผสมถ้าปาล์มน้ำมันในการศึกษาค้นคว้านี้ ได้ทำการศึกษาค้นสมบัติที่ต้องการตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปร่างแบบศิลาแปดเหลี่ยม (มอก.827-2531) พบว่าแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์อย่างเดียว มีการแข็งตัวเร็วกว่าเพราะว่าปูนซีเมนต์จะช่วยเสริมช่องว่างระหว่างมวลให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ส่วนแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าปาล์มน้ำมัน มีการแข็งตัวของแผ่นคอนกรีตช้ากว่าแผ่นคอนกรีตที่ไม่ผสมถ้าปาล์มน้ำมัน เนื่องจากถ้าปาล์มน้ำมันเป็นตัวแทรกประสานราคาถูกที่กระจายไปทั่วซีเมนต์เฟสต์ ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน และปริมาณไม่เปลี่ยนแปลงมาก (แสงอรุณวัสดุก่อสร้าง, 2552) สำหรับคุณสมบัติที่ต้องการประกอบด้วยค่าการดูดซึมน้ำ เมื่อพิจารณาค่าค่าการดูดซึมน้ำ ในระยะเวลาการบ่มอายุ 28 วัน พบว่า การดูดซึมน้ำของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่มีการแทนที่ด้วยถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าน้อยกว่าแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์อย่างเดียว เนื่องจากเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าปาล์มน้ำมัน (วีรชาติ ตั้งจิรภัทร จตุพล ตั้งปกาศิต ศักดิ์สินธุ์ แววคุ้ม และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2546) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ถึงแม้ว่าถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้านี้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานแต่ด้วยระยะเวลาบ่มเพียง 24 ชั่วโมง จึงอาจยังไม่เพียงพอทำให้ผลผลิตของปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากจนทดแทนปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีปริมาตรโพรงน้อยลงจึงมีค่าการดูดซึมน้ำน้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่แทนที่ด้วยถ้าปาล์มน้ำมันจะมีค่าการดูดซึมน้ำน้อยลงตามอัตราส่วนการแทนที่ของถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะเมื่อแทนที่ถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดน้อยลง นอกจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างนี้อาจมีผลจากอนุภาคของถ้าปาล์มน้ำมันมีความพรุนน้อย จึงทำให้ปริมาณน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงส่งผลให้ปริมาตรโพรงลดลงอีก เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่ไม่มีการแทนที่ของถ้าปาล์มน้ำมันกับแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าที่มีการแทนที่ด้วยถ้าปาล์มน้ำมันกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 827 - 2531) พบว่าแผ่นคอนกรีตทุกชุดการทดลองมีค่าการดูดซึมน้ำน้อยกว่าที่มาตรฐานกำหนด สำหรับค่าความต้านทานรับแรงอัด เมื่อเพิ่มปริมาณถ้าปาล์มน้ำมันตามชุดการทดลองที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าจะมีคุณสมบัติที่เป็นตัวประสานได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ ชุดการทดลองที่ศึกษาพบว่าที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการแทนที่ กับชุดควบคุมที่ไม่มีส่วนผสมของถ้าปาล์มน้ำมัน คือชุดการทดลองที่ 2 ปูนซีเมนต์ : ถ้าปาล์มน้ำมัน (โดยน้ำหนัก) คือ 90 : 10 และกำลังอัดที่ช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีต

ควบคุม อย่างไรก็ตาม Hussin, M. W., & Awal, A. S. M. A. (1996) ได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุพอลิโซลันโดยบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์และแทนที่ในอัตราร้อยละ 10-60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ และกำลังอัดในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่หลังจากนั้นความต้านทานรับแรงอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมได้ และเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานรับแรงอัดจะลดต่ำลงเรื่อยๆ จากการใส่ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษา วีระชาติ ตั้งจิรภัทร จตุพล ตั้งปกาศิต ศักดิ์สินธุ์ แวคุ้ม และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2546) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงไม่เหมาะสมนำมาใช้เป็นวัสดุพอลิโซลัน เนื่องจากให้ค่าความต้านทานรับแรงอัดที่ต่ำส่วนการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียด มีปริมาณค่าบดตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 90 วัน โดยมีค่าเท่า 104 และ 101 ตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับการศึกษา

เมื่อพิจารณาด้านต้นทุนการผลิต พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ราคาคำนวณต้นทุนการผลิตแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าถูกลง โดยอัตราส่วนที่ประหยัดที่สุดและเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ได้แก่อัตราส่วนผสมที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ซึ่งมีต้นทุนถูกกว่าการใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว

ข้อเสนอแนะ

1. เถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้ควรเป็นเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดและมีความพรุนน้อย เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาพอลิโซลันของเถ้าปาล์มน้ำมัน
2. ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันก็เป็นปัจจัยหลักที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย รวมถึงความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ เพราะอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีต

เอกสารอ้างอิง

- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2553). เถ้าปาล์มน้ำมัน: วัสดุพอลิโซลันในอนาคตสำหรับคอนกรีต. *วารสารคอนกรีต*, (9), 1-8.
- ธนาภรณ์ สำเภาลอย. (2559). *ทดสอบการหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต*. ค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2559, จาก: <http://mixdesign.cmtc.ac.th/project10/index.html>.
- ปัญหานันต์ ต่อภักดีกุล. (2551). *การพัฒนาคอนกรีตต้นทุนต่ำและพลังงานต่ำจากวัสดุผลพลอยได้และวัสดุเหลือใช้*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์ อธิวัตร จิรจิรายเวช วัชรพงษ์ ศิลาเลิศรักษา และวุฒิพงษ์ ปรีดาภิทรพงษ์. (2548). *การจัดทำฐานข้อมูล การประเมินวัฏจักรชีวิตการผลิตปูนซีเมนต์และเหล็กกล้าเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อม*. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.827-2531. (2531). *คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น*. ค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2560, จาก: <https://www.nqi.go.th/nqi/standard.php?item=1244>.
- ลดาวัลย์ สีนสุพรรณ วริญญา ใจใส และทิพนภา ทองโชติ. (2556). *เถ้าปาล์มน้ำมันเถ้าชานอ้อย และวัสดุปอชโซลานชนิดอื่น*. วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม.
- วีระชาติ ตั้งจิรภัทร จตุพล ตั้งปกาศิต ศักดิ์สินธุ์ แววคุ้ม และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2546). วัสดุปอชโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 26(4), 459-479.
- แสงอรุณวัสดุการก่อสร้าง. (2552). *การผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ*. ค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2560, จาก: <http://www.sangaroon.com/index.php?lite=article&qid=324000>.
- Chavlaparit, O., Rulkens, W. H., Mol, A. P. J., & Khaodhair, S. (2006). Options for environmental sustainability of the crude palm oil Industry in Thailand though enhancement of industrial ecosystems. *Environment, Development and Sustainability*. 8(2), 271-287.
- Hussin, M. W., & Awal, A. S. M. A. (1996). Palm oil fuel ash - a potential pozzolanic material in concrete construction. In *Proceedings of the International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21st Century* 20-23 November 1996 (pp. D.361-D.366) Bangkok, Thailand.