

ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผลของเถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีต

วชิรกรณ์ เสนาวัง¹ โยชัย ชินบุตร²

มหาวิทยาลัยนครพนม ต.หนองญาติ อ.เมือง จ.นครพนม 48000

ศตวรรษ หลุทธิพงษ์^{3*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร⁴ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล⁵

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

* Corresponding Author: sattawat_ha@rmutto.ac.th

¹ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นักศึกษาปริญญาโท สาขาบริหารงานก่อสร้างและโครงสร้างพื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

⁴ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁵ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 30 มิถุนายน 2564

แก้ไข : 23 กันยายน 2565

ตอบรับ : 28 กันยายน 2565

DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.23

คำสำคัญ : แฟกเตอร์ประสิทธิผล

/ เถ้าปาล์มน้ำมัน / กำลังอัด

บทความนี้รายงานผลการศึกษาค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผล (k) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยประยุกต์จากมาตรฐานอังกฤษที่แนะนำให้ใช้ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผล หรือค่าเทียบเท่าปริมาณซีเมนต์ k (k -value) ในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งมีประสิทธิผลเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ เพื่อเป็นการส่งเสริมการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมของคอนกรีตให้เหมาะสม งานวิจัยนี้หาค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผลของเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยรวบรวมส่วนผสมจากงานวิจัยอื่น พิจารณาค่าความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน อัตราส่วนการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ และอายุการบ่มของคอนกรีต โดยดัดแปลงมาจากสมการของ Abrams และ Bolomey จากนั้น วิเคราะห์สมการเชิงเส้นแบบถดถอยหลายตัวแปร โดยแบ่งอายุของคอนกรีตที่ศึกษาออกเป็น 7, 28 และ 90 วัน สำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต จากการศึกษา พบว่า ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผล (k_p) ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 7 วัน มีค่า k_7 เท่ากับ 0.75 โดยค่า R^2 เท่ากับ 0.99 เมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 28 วัน มีค่า k_{28} เท่ากับ 0.73 ค่า R^2 เท่ากับ 0.96 และค่า k ที่อายุ 90 วัน มีค่า k_{90} เท่ากับ 0.81 โดยค่า R^2 เท่ากับ 0.95 นอกจากนี้ ยังได้แนะนำการใช้สมการในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต รวมถึงเปรียบเทียบผลของค่ากำลังอัดที่คำนวณได้จากสมการกับผลการทดสอบค่ากำลังอัดจากงานวิจัย ซึ่งพบว่า ผลการคำนวณค่า k_{28} ที่อายุ 28 วัน มีความคลาดเคลื่อน 7.5%

Efficiency Factor of Palm Oil Fuel Ash in Concrete

Wachilakorn Sanawang¹ Yochai Chinnabut²,

Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom, 48000

Sattawat Haruehansapong^{3,*},

Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus, Bangkok 10330

Weerachart Tangchirapat⁴ and Chai Jaturapitakkul⁵

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

* Corresponding Author: sattawat_ha@mutto.ac.th

¹ Lecturer, Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Master's Student, Engineering Program in Construction and Infrastructure Management, Faculty of Engineering.

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.

⁴ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

⁵ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Article History:

Received: June 30, 2021

Revised: September 23, 2022

Accepted: September 28, 2022

DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.23

Keywords : Efficiency Factor
/ Compressive Strength
/ Palm Oil Fuel Ash

Abstract

This article reports the results on the determination of the efficiency factor (k) of palm fuel oil ash (POFA), which can be used for the design of concrete mixture. The method was applied from the British Standard that recommends the calculation of the k -value, so as to be able to determine the content of POFA as an ingredient in Portland cement that exhibits equivalent efficiency as sole Portland cement. Such use would clearly lead to the promoted use of POFA in concrete mixture. The research aimed to determine the efficiency factor of POFA by collecting data from other research studies, taking into account the fineness, percent replacement of POFA and curing age of concretes containing POFA as adapted from the Abrams' law and Bolomey's law equations. Multi-linear regression analysis was then performed to determine the k -value of POFA when the concretes were aged at 7, 28 and 90 days. The results indicated the k -value (K_g) of POFA at 7 days (k_7) was 0.75, $R^2=0.99$. When the age increased to 28 days, k_{28} was 0.73, $R^2=0.96$, while k_{90} was 0.81 with $R^2=0.95$. In addition, use of the equations in the design of concrete mixes was introduced. The results of the compressive strength as calculated by the equation were compared with those from the research. The results on k_{28} at 28 days exhibited percent error of 7.5%.

1. บทนำ

ถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า โดยได้จากการนำทะลาย และเปลือกของปาล์มน้ำมันมาเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งใน พ.ศ. 2562 ประเทศไทยผลิตปาล์มน้ำมันประมาณ 16.4 ล้านตัน (ข้อมูลล่าสุด พ.ศ. 2564) [1] หลังจากผลิตน้ำมันปาล์มแล้ว จึงนำผลผลิตที่เหลือ (ทะลายปาล์ม ใบจากเปลือก และกะลาปาล์ม น้ำมัน) ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผา ภายหลังจากการเผาได้ ถ้าปาล์มน้ำมันประมาณ 4 แสนตันหรือคิดเป็นร้อยละ 2.6 โดยน้ำหนักของผลผลิตจากปาล์มน้ำมัน [2] ปัจจุบัน ถ้าปาล์มน้ำมันมีการนำไปใช้ในงานคอนกรีตมีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่กองทิ้ง เนื่องจากก่อนนำมาใช้งานต้องมีการปรับปรุงคุณภาพ ปริมาณถ้าปาล์มน้ำมันที่เก็บได้ในแต่ละรอบในโรงงานมีปริมาณน้อยต้องกองทิ้งให้มีจำนวนที่มากพอ ก่อนนำมาใช้งานยังต้องอบให้แห้งก่อนนำไปบด ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนให้สูงขึ้น เมื่อเทียบกับถ้าถ่านหินที่สามารถเก็บจากโรงงานเดียวได้ในปริมาณที่สูงและไม่ต้องบดก่อนนำไปใช้งาน นอกจากนี้ การเสียพื้นที่เพื่อกองทิ้งถ้าปาล์มน้ำมันเป็นปัญหาในเรื่องการกำจัดตลอดจนก่อมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น หากสามารถนำถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในปริมาณที่มากขึ้น ก็จะสามารถลดปัญหาดังกล่าวเพราะเป็นการนำสิ่งที่ไม่มีความคุ้มค่าให้เกิดประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง

ปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับถ้าปาล์มน้ำมันเป็นจำนวนมาก จากงานวิจัยต่าง ๆ ทั้งในประเทศไทย และต่างประเทศ พบว่า ถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีสมบัติที่ดีขึ้น โดยสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ดีหากมีความละเอียดสูง [3-6] ช่วยลดความร้อนของคอนกรีต [7-8] สำหรับสมบัติด้านกำลังอัด พบว่าคอนกรีตที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถพัฒนากำลังอัดมากกว่าร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม [9] นอกจากนี้ ถ้าปาล์มน้ำมันยังสามารถใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงได้อีกด้วย [10] และไม่กี่ปีที่ผ่านมากระทรวงอุตสาหกรรมยังได้ออกเกณฑ์มาตรฐานสำหรับใช้ถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุผสมคอนกรีตใน พ.ศ. 2561 [11] เพื่อส่งเสริมให้นำถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ในงานคอนกรีตมากยิ่งขึ้น แต่เป็นที่น่าเสียดายที่ปัจจุบันนำถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้จริงในงานคอนกรีตยัง

น้อยมาก อาจเนื่องมาจากผู้ใช้อย่างขาดความรู้ ความเข้าใจในการนำไปใช้งาน และยังคงขาดความมั่นใจในด้านคุณภาพของถ้าปาล์มน้ำมัน

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2888-2561 [11] กำหนดสมบัติของถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีตตามความร่วมมือด้านการมาตรฐานระหว่างสำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ กำหนดโดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ครอบคลุมการใช้ถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อให้เกิดการประสานในเนื้อคอนกรีตหรือปฏิกิริยาปอซโซลานหรือเกิดได้ทั้งสองอย่าง รวมถึงให้ได้สมบัติอื่นที่ต้องอาศัยความละเอียดของถ้าปาล์มน้ำมัน เช่น เมื่ออยู่ในรูปผงละเอียดและมีความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ เกิดเป็นสารซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยแบ่งชั้นคุณภาพออกเป็น ชั้นคุณภาพที่ 1 สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป สำหรับชั้นคุณภาพที่ 2 สำหรับงานคอนกรีตที่ไม่ใช่โครงสร้าง

ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (efficiency factor หรือ k) สำหรับงานคอนกรีต เป็นหนึ่งในส่วนประกอบสำคัญสำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต โดยการเทียบค่าน้ำหนักของวัสดุปอซโซลานที่ผสมในคอนกรีตที่มีผลต่อกำลังอัดเปรียบเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในส่วนผสม โดยค่า k เท่ากับ 1 หมายความว่าวัสดุปอซโซลานที่นำมาแทนที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าปูนซีเมนต์ (น้ำหนักเท่ากับปูนซีเมนต์ได้ค่ากำลังอัดเท่ากัน) เพื่อทำนายผลของค่ากำลังอัดโดยพิจารณาจากปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อวัสดุปอซโซลาน ปริมาณน้ำในส่วนผสม อายุของการบ่มคอนกรีต ข้อดีของการทราบค่า k คือ ทำให้ประหยัดเวลาในการออกแบบส่วนผสม ผู้ใช้งานสามารถกำหนดส่วนผสมจากค่า k ทำให้ทราบปริมาณส่วนผสมเบื้องต้น เพื่อนำไปทำนายผลของค่ากำลังอัด หรือกำหนดค่ากำลังอัดเพื่อหาอัตราส่วนผสมก่อนที่จะนำคอนกรีตไปทดสอบค่ากำลังอัดสำหรับนำไปใช้งาน

เพื่อส่งเสริมให้มีการใช้ถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีตอย่างเหมาะสม และเป็นแนวทางสำหรับผู้ที่ต้องการ

นำไปใช้เป็นข้อมูล งานวิจัยนี้จึงรวบรวมข้อมูลของเถ้าปาล์ม น้ำมันที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต โดยพิจารณาถึงความละเอียด, อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ และอายุในการบ่มคอนกรีต ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นแนวทางในการหาค่า (k) ของเถ้าปาล์มน้ำมันสำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต เพื่อนำเสนอวิธีการหาค่า (k) มาใช้งานและหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่ากำลังอัดจากสมการกับผลการทดสอบค่ากำลังอัดจากงานวิจัยอื่น

2. วิธีการวิจัย

แนวทางการหาค่า k ใช้ทฤษฎีและสมการจากงานวิจัยของปัญญาและปริญญา [12] ที่ศึกษาค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผล (k) จากการออกแบบคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โดยได้แนะนำว่าแนวทางดังกล่าวยังสามารถนำไปใช้ได้กับสารปอซโซลานชนิดอื่น ๆ เช่น เถ้าแกลบ ดินขาวเผา ตะกรัน เตาถลุง สำหรับใช้เป็นแนวทางในการทำนายกำลังอัด และกำหนดอัตราส่วนผสมได้

2.1 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผล (efficiency factor) หรือ k คือ ค่าที่อธิบายถึงน้ำหนักของวัสดุปอซโซลานที่แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเทียบให้มีค่าผลกำลังอัดเท่ากับปูนซีเมนต์ ค่า k ในงานวิจัยนี้นิยามว่าเป็นน้ำหนักของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีค่าเทียบเท่ากับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ 1 หน่วย โดยที่ค่า k ของปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 1.0 ในงานวิจัยที่ผ่านมาเถ้าถ่านหินได้แนะนำค่า k สำหรับนำไปใช้งานที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 0.30 [13]

ทฤษฎีและสมการต่าง ๆ อันได้แก่ ทฤษฎีของ Abrams Law [14] และ Bolomey Law [15] เสนอว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c') ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) และระดับของการทำให้แน่น (Degree of Compaction) ต่อมา Hedegaard และ Hansen [16] ได้ดัดแปลงสมการจากแนวคิดดังกล่าวมาอธิบายความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตกับปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ และเถ้าถ่านหินเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ดังสมการที่ (1), (2) และ (3) แนวคิดดังกล่าวมีความสอดคล้องกันระหว่างเถ้าถ่านหินและเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งจัด

เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยพิจารณาเฉพาะปริมาณในส่วนผสม ผู้วิจัยจึงได้ดัดแปลงสมการดังนี้

$$s_p = A \frac{c}{w} + B \frac{p}{w} + E \quad (1)$$

$$s_p = A \left(\frac{c+k_a p}{w} \right) + E \quad (2)$$

$$g(x) = Ax_1 + Bx_2 + E \quad (3)$$

โดยที่ S_p = กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุใด ๆ (เมกะปาสคาล); c = ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม (กก./ม³); p = ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสม (กก./ม³); w = ปริมาณน้ำในส่วนผสม (กก./ม³); k_a = ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผลที่อายุใด ๆ (B/A); A, B, E = ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรขึ้นกับชนิดวัสดุ อายุ (วัน) และวิธีการบ่ม; x_1 = อัตราส่วนระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำ (C/W); x_2 = อัตราส่วนระหว่างปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันและน้ำ (P/W);

ข้อมูลที่รวบรวมได้จากงานวิจัยที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในคอนกรีต อันได้แก่ กำลังอัด (S), อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำ (c/w) และอัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันต่อน้ำ (p/w) ที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน (เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณโดยปกติในงานวิศวกรรมโยธาจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เมื่อกล่าวถึงส่วนผสมและผลกระทบต่อกำลังอัด) จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาค่าคงที่ A, B, E และ k_a จากสมการที่ (1), (2) และ (3) โดยใช้วิธีวิเคราะห์เชิงเส้นถดถอยแบบหลายตัวแปร (Multi-Linear Regression Analysis) ตัวแปรที่ควบคุมคือ c/w และ p/w แล้วเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์

2.2 ข้อมูลและแนวคิดในการวิเคราะห์หาค่าแฟกเตอร์ประสิทธิผล (k)

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันจากงานวิจัยที่ผ่านแสดงใน ตารางที่ 1 โดยมีข้อแตกต่างด้านแหล่งที่มาของเถ้าปาล์มน้ำมัน องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันในแต่ละแหล่ง ผลรวมของซิลิกา, อะลูมินาและเหล็กออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) ของเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าระหว่างร้อยละ 42.5 ถึง 75

ปริมาณผลรวมของซิลิกา, อะลูมินาและเหล็กออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีผลรวมสูงส่งผลให้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

Ref.	POFA Year.	Chemical compositions (%)									SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	
Tay [3]	POFA 1990	34.3	24.6	14.9	37.8	21.1	-	2.3	-	18.2	73.8
Awal and Hussin [33], [34]	POFA 1997	43.6	11.4	4.7	8.4	4.8	2.8	0.39	3.5	18	59.7
	POFA 2013	59.6	2.54	5.02	4.92	4.52	1.28	0.76	7.52	8.25	67.2
Bamaga et al. [17]	BIPOFA 2012	40.8	2.9	5.5	25.2	2.3	1.1	-	5.1	15.6	51.5
	KLPOFA 2012	49.2	5.5	5.7	17.5	3.5	1.7	-	9.5	7.6	60.4
	RAPOFA 2012	56.7	7.8	11.4	6.8	3.3	0.9	-	7.8	4.8	75.9
Jaturapitakkul et al. [35]	POFA 2007	57.7	4.5	3.3	6.6	4.2	0.2	0.5	8.2	10.5	57.7
Sata et al. [36], [18]	POFA 2007	65.3	2.6	2	6.4	3.1	0.5	0.3	5.7	10.1	65.3
	POFA 2010	42.5	0.9	2.4	11	7.1	2.2	0.4	7	20.9	42.5
Chindaprasirt et al. [37], [38]	POFA 2007	57.8	4.6	3.3	6.6	4.2	0.3	0.5	8.3	10.1	65.7
	POFA 2008	63.6	1.6	1.4	7.4	3.9	0.2	0.1	6.9	9.6	66.6
Tangchirapat et al. [9], [39]	POFA 2007	57.7	4.6	3.3	6.6	4.2	0.5	0.52	8.3	10.5	57.7
	POFA 2009	65.3	2.5	1.9	6.4	3	0.4	0.3	5.7	10	69.7
Kroehong et al. [40]	POFA 2011	54	0.90	2	12.9	4.9	4	1	13.5	3.7	56.9
Ratanashotinunt [7]	POFA-PC 2005	49.4	1.65	5.69	9.6	7.84	1.05	0.49	8.98	6.8	56.7
	POFA-PS 2005	42.5	0.93	2.37	11.02	7.14	2.21	0.43	7.14	20.9	45.8
Sanawung [30]	POFA 2012	55.4	9.1	5.5	12.4	4.6	2.3	-	-	7.9	70.0

ค่ากำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีผลรวมดังกล่าวน้อยกว่า ในงานวิจัยของ Bamaga และคณะ [17] ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันจาก 3 แหล่ง (RAPOFA, KLPOFA และ BIPOFA) ซึ่งอยู่บริเวณรอบชายฝั่งตะวันตกตอนกลางของคาบสมุทรมาเลเซีย (Peninsular Malaysia) และบริเวณใกล้เคียง มีผลรวมของ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 75.9, 60.4 และ 51.5 ตามลำดับ มีค่าความละเอียดข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 9.4, 16 และ 6.2 ตามลำดับ อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 คอนกรีต RAPOFA มีค่ากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 104-119 และคอนกรีต KLPOFA มีค่ากำลังอัดร้อยละ 100-110 เทียบกับคอนกรีตควบคุม แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต RAPOFA ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันชนิดที่มีผลรวมของ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 75.9 ซึ่งมากกว่าคอนกรีต

KLPOFA (ร้อยละ 60.4) สามารถพัฒนากำลังได้เทียบเท่าหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และสูงกว่าคอนกรีต KLPOFA ขณะที่คอนกรีต BIPPOFA มีกำลังอัดต่ำกว่าทั้งคอนกรีต RAPOFA และคอนกรีต KLPOFA นอกจากนี้ค่ากำลังอัดยังคิดเป็นร้อยละ 64-86 ของคอนกรีตควบคุม

ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ และร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเทียบกับคอนกรีตควบคุม ในงานวิจัยของ Sata และคณะ [18, 36] ผลรวม SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ ของเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับร้อยละ 42.5 และ 65.3 (ค่าความละเอียดข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 1.2 และ 1.5) ตามลำดับ คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังอัดได้เทียบเท่าหรือมากกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ในประเทศไทย Tunsathien และคณะ [19] ทดลองหล่อมอร์ตาร์โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันจาก 3 แหล่ง (JS, SF และ AI)

ซึ่งมาจากจังหวัดปราจีนบุรี ชลบุรี และชุมพร มีผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับร้อยละ 80.9, 70.7 และ 64.4 ตามลำดับ แต่ละแหล่งบดให้มีความละเอียดข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนัก จากนั้นแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์เทียบเท่าหรือต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเถ้าปาล์มน้ำมันมีความละเอียดเท่ากัน นอกจากนี้มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 5 จาก 3 แหล่ง มีค่ากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม ตั้งแต่อายุ 7 วัน

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันมีผลต่อกำลังอัดน้อยกว่าผลที่เกิดจากความละเอียด กล่าวคือ เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงแนวโน้มกำลังอัดสูงกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่หยาบกว่าหรือไม่ผ่านการบด แม้ว่าผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ จะมากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสูงกว่าและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีตค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงเนื่องจากใส่วัสดุปอซโซลาน (ปริมาณ CSH ช่วงต้นลดลง) นอกจากนี้ยังมีวิธีการจัดเก็บเถ้าปาล์มน้ำมันที่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตดังเช่น ในงานวิจัยของ Ratanashotinunt [7] ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน PC มีปริมาณน้ำมันที่เผาไหม้ไม่หมดสูงหรือน้ำหนักที่หายไปจากการเผา (LOSS ON IGNITION; LOI) ค่า LOI ที่สูง (มากกว่าร้อยละ 3 ตาม ASTM C618 [20]) ส่งผลให้น้ำมันที่มีอยู่ในเถ้าปาล์มน้ำมัน PC ไปเคลือบผิวของวัสดุในส่วนผสม ทำให้การยึดเกาะระหว่างส่วนผสมเสียไป ส่งผลให้การพัฒนา กำลังอัดต่ำทุกอายุการทดสอบ ค่า LOI ในชั้นคุณภาพที่ 1 และ ชั้นคุณภาพที่ 2 มีค่าไม่เกินร้อยละ 12 และ 15 ตามลำดับ [11] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้เถ้าปาล์มน้ำมันจากหลายแหล่งที่มีผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 และค่า LOI ไม่เกินร้อยละ 15

แนวคิดของการใช้วัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูงค่า k มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Sadudee [21] ที่ใช้คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียด (ข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 39.5) มีการยุบตัวอยู่ระหว่าง

3-18 ซม. พบว่าค่า k อยู่ระหว่าง 0.435-0.440 โดย R^2 เท่ากับ 0.93-0.94 (อายุ 28-90 วัน) ในงานวิจัย Khammathit [22] ที่ใช้ข้อมูลของ Songpiriyakij [23] ที่แบ่งกลุ่มเถ้าถ่านหินแม่เมาะออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกละเอียดสูง (ข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 0) มีค่า k อยู่ระหว่าง 0.61-0.70 โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.94-0.98 ส่วนกลุ่มที่สองเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า (ข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 31) มีค่า k อยู่ระหว่าง 0.12-0.17 โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.98-0.99 ค่า k ที่สูงกว่าของเถ้าถ่านหินเป็นผลมาจากของเถ้าถ่านหินที่ใช้มีความละเอียดสูงจึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่า ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลจึงทำให้ค่า k สูงขึ้น และงานวิจัยของ Hedegaard และ Hansen [16] ที่ใช้เถ้าถ่านหินจาก 2 แหล่ง (ข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 ร้อยละ 47 และ 57) มีการยุบตัวอยู่ระหว่าง 3-9 ซม. ค่า k อยู่ระหว่าง 0.160-0.367 โดย R^2 เท่ากับ 0.94-0.98 (อายุ 14-112 วัน) อย่างไรก็ตามค่า k เปลี่ยนแปลงตามความละเอียดของวัสดุปอซโซลาน

การแบ่งกลุ่มตามขนาดของวัสดุปอซโซลานในงานวิจัยนี้นำเสนอข้อมูลค่าความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403 [24] วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากวิธีการทดสอบง่าย และไม่ซับซ้อนสามารถประยุกต์ใช้เพื่อหาความละเอียดของวัสดุผงชนิดอื่น ๆ จำพวกวัสดุปอซโซลาน โดยปกติการทดสอบนี้เป็นอีกหนึ่งวิธีในการทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์ ซึ่งใช้ตะแกรงมาตรฐานที่มีขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร หรือ ตะแกรงเบอร์ 325 เป็นการหาร้อยละของปริมาณของอนุภาคปูนซีเมนต์ที่ค้างบนตะแกรง

ในงานวิจัยที่รวบรวมได้ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดให้มีความละเอียดข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ชั้นคุณภาพที่ 1 ตามเกณฑ์ชั้นคุณภาพ [11] ที่ระบุ ความละเอียดข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ของเถ้าปาล์มน้ำมันไม่เกินร้อยละ 10 จัดอยู่ในชั้นคุณภาพที่ 1 และชั้นคุณภาพที่ 2 ความละเอียดข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 20

แนวคิดของการเลือกอัตราส่วนการแทนที่วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของคอนกรีต และค่าการยุบตัวของคอนกรีต

การเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่วัสดุพอลิโพรพิลีนในส่วนผสมของคอนกรีตส่งผลให้ค่า k ลดลง โดย Jirasit และคณะ [25] ใช้เถ้านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ความละเอียดวัดโดยวิธีของเบลนแอร์เพอร์มีเอบิลิตี (Blaine air permeability) มีค่าเท่ากับ 3,332 ซม²/ก. ค่าการยวบตัวของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 5-10 ซม. พบว่าค่า k_{28} เท่ากับ 0.41 โดย R^2 เท่ากับ 0.93 ซึ่งงานวิจัยของ Masruksa [26] ที่ใช้เถ้านหิน (ค้ำจุนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 37.5) แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15, 25 และ 35 ค่าการยวบตัวของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 8-10 ซม. พบว่าค่า k ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 0.51 โดย R^2 เท่ากับ 0.99 และ ค่า k ที่อายุ 91 วัน เท่ากับ 0.85 โดย R^2 เท่ากับ 0.97 นอกจากนี้ Wattanachai [27] ใช้เถ้านหินแม่เกาะแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15, 25 และ 35 (ค้ำจุนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 37.5) กำหนดค่าการยวบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 0 (ไม่มีการยวบตัว) ส่งผลให้ค่า k มีค่าสูงขึ้น โดยอายุ 28 วัน เท่ากับ 0.89 โดย R^2 เท่ากับ 0.81 และ ค่า k ที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 1.04 โดย R^2 เท่ากับ 0.79 เห็นว่าค่า k ที่อายุ 28 วัน สูงกว่าค่า k ที่ศึกษาโดย Jirasit และคณะ [25] และ Masruksa [23] ดังนั้นอัตราส่วนการแทนที่และค่าการยวบตัวของคอนกรีตจากงานวิจัยที่นำมาพิจารณาข้างต้นมีผลทำให้ค่า k สูงขึ้น [22] เพราะฉะนั้นการกำหนดให้คอนกรีตมีช่วงของค่าการยวบตัว จะทำให้สอดคล้องกับเงื่อนไข และช่วยลดข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์

แนวคิดการเลือกอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำ (c/w) ซึ่งเป็นตัวแปรในสมการที่ได้นำเสนอ โดยทั่วไปในงานวิศวกรรมโยธาจะนิยมใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/B) และจำนวนของส่วนผสมคอนกรีต (Concrete Mixture) มีผลต่อการวิเคราะห์หาค่า k ด้วย โดย Hedegaard และ Hansen [16], Papadakis และ Tsimas [28] แนะนำว่าสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ที่ผสมเถ้านหินที่ไม่มีการคัดขนาด (Original) แนะนำให้ใช้ส่วนผสมอย่างต่ำ 27 ส่วนผสม (จำนวนของส่วนผสมหมายถึง จำนวนนับที่เรียกส่วนผสม เช่น คอนกรีตควบคุมนับว่าเป็น 1 ส่วนผสม คอนกรีตที่แทนที่เถ้านหินร้อยละ 20 นับเป็น 1 ส่วนผสม) ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำ (c/w) และอัตราส่วนเถ้านหินต่อน้ำ (f/w) ในช่วง 0.2-2.60 และ 0-2.00 ตามลำดับ ค่า

การยวบตัวระหว่าง 3-9 ซม. ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงรวบรวมข้อมูลส่วนผสมของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำ (c/w) ระหว่าง 0.6-2.53 และอัตราส่วนเถ้านหินต่อน้ำ (p/w) อยู่ในช่วง 0 (ไม่มีเถ้านหิน) -1.26, ส่วนผสมคอนกรีตจำนวน 25 ส่วนผสม สำหรับ k ที่อายุ 7 และ 90 วัน ส่วนอายุ 28 วัน สามารถรวบรวมได้ 40 ส่วนผสม คอนกรีตผสมเถ้านหินบดละเอียดที่มีปริมาณค้ำจุนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 (เนื่องจากงานวิจัยที่รวบรวมได้ส่วนใหญ่นิยมใช้ไม่เกินร้อยละ 5) และมีค่าการยวบตัวอยู่ในช่วง 5-22 ซม. ข้อมูลจำนวนส่วนผสมทั้งหมดที่ได้รวบรวมมาแสดงในตารางที่ 2, 3 และ 4

จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดของคอนกรีตที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน มาทำการวิเคราะห์หาค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (k) ตามวิธีของปัญญา และปริญญา [12] โดยใช้ค่าตัวแปร ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นหาค่าสัมประสิทธิ์ โดยในงานวิจัยนี้ค่าสัมประสิทธิ์จะใช้สัญลักษณ์ (k) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ที่ระบุเฉพาะอายุจะใช้สัญลักษณ์ (k_d) ซึ่งประกอบไปด้วย k_7 , k_{28} และ k_{90} ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของ k_7 , k_{28} และ k_{90} แสดงในตารางที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ตัวอย่างวิธีการคำนวณและระบุตัวแปรทั้งหมดของ k_{28} แสดงในส่วนท้ายในหมายเหตุของตารางที่ 4

3. ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล

ผลการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (k) และค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ A, B และ E แสดงในตารางที่ 5 ที่อายุ 7 วัน เถ้านหินบดมีค่า k_7 เท่ากับ 0.75 โดยค่า R^2 เท่ากับ 0.99 ค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ A, B และ E เท่ากับ 21.31, 15.99 และ -8.17 ตามลำดับ เมื่ออายุเพิ่มขึ้นค่า k_{28} เท่ากับ 0.73 โดยค่า R^2 เท่ากับ 0.96 ค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ A, B และ E เท่ากับ 20.72, 15.06 และ -0.61 ตามลำดับ และค่า k มีค่าเพิ่มขึ้น ที่อายุ 90 วัน ค่า k_{90} เท่ากับ 0.81 โดยค่า R^2 เท่ากับ 0.95 ค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ A, B และ E เท่ากับ 23.85, 19.41 และ 0.77 ตามลำดับ ค่า k มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น แต่ค่า k_{28} มีค่าต่ำกว่าค่า k_7 เล็กน้อย อาจเกิดจากการใช้จำนวนส่วนผสมที่นำมาวิเคราะห์ต่างกัน คือ 25 และ 40 ส่วนผสม ตามลำดับ

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์โดยวิธีเชิงเส้นแบบถดถอยหลายตัวแปรที่อายุ 7 วัน

Ref.	Mix no.	Cement (C)	POFA (P)	Water (W)	X_{1i} (C/W)	X_{2i} (P/W)	Y_i	$X_{1i} X_{1i}$	$X_{1i} X_{2i}$	$X_{2i} X_{2i}$	$X_{1i} Y_i$	$X_{2i} Y_i$	$Y_i + Y_{avg}$	$(Y_i + Y_{avg})^2$	$g(x)$	$Y_i - g(x)$	$(Y_i - g(x))^2$					
Chindaprasirt et al. [37]	1	300	0	210	1.43	0.00	32.5	2.0	0.0	0.0	46.43	0.00	-6.67	44.52	28.99	3.51	12.29					
	2	270	30	204	1.32	0.15	32.5	1.8	0.2	0.0	43.01	4.78	-6.67	44.52	29.03	3.47	12.03					
	3	240	60	210	1.14	0.29	32.2	1.3	0.3	0.1	36.80	9.20	-6.97	48.62	27.38	4.82	23.28					
	4	210	90	213	0.99	0.42	30.7	1.0	0.4	0.2	30.27	12.97	-8.47	71.78	26.18	4.52	20.40					
Kankong et al. [5]	5	180	120	216	0.83	0.56	28.1	0.7	0.5	0.3	23.42	15.61	-11.07	122.60	25.02	3.08	9.46					
	6	300	0	213	1.41	0.00	20.1	2.0	0.0	0.0	28.3	0.0	-10.7	115.18	21.84	-1.74	3.02					
	7	240	60	220	1.09	0.27	17.1	1.2	0.3	0.1	18.7	4.7	-13.7	188.57	19.43	-2.33	5.45					
	8	180	120	222	0.81	0.54	15.6	0.7	0.4	0.3	12.6	8.4	-15.2	232.01	17.75	-2.15	4.62					
Ratanashotinunt [7]	9	135	155	225	0.60	0.69	12.6	0.4	0.4	0.5	7.6	8.7	-18.2	332.41	15.63	-3.03	9.19					
	10	350	0	175	2.00	0.00	34	4.0	0.0	0.0	68.0	0.0	3.2	10.04	34.44	-0.44	0.20					
	11	315	35	175	1.80	0.20	33.3	3.2	0.4	0.0	59.9	6.7	2.5	6.09	33.38	-0.08	0.01					
	12	280	70	175	1.60	0.40	32.6	2.6	0.6	0.2	52.2	13.0	1.8	3.13	32.32	0.28	0.08					
Sata et al. [18]	13	245	105	175	1.40	0.60	30.6	2.0	0.8	0.4	42.8	18.4	-0.2	0.05	31.25	-0.65	0.43					
	14	350	0	193	1.82	0.00	31	3.3	0.0	0.0	56.4	0.0	0.2	0.03	30.57	0.43	0.19					
	15	315	35	193	1.64	0.18	30.7	2.7	0.3	0.0	50.2	5.6	-0.1	0.02	29.60	1.10	1.21					
	16	280	70	193	1.45	0.36	29.8	2.1	0.5	0.1	43.3	10.8	-1.0	1.07	28.64	1.16	1.35					
Chindaprasirt et al. [41]	17	245	105	193	1.27	0.55	28.2	1.6	0.7	0.3	35.9	15.4	-2.6	6.93	27.67	0.53	0.28					
	18	350	0	210	1.67	0.00	26.6	2.8	0.0	0.0	44.3	0.0	-4.2	17.91	27.34	-0.74	0.55					
	19	315	35	210	1.50	0.17	26.4	2.3	0.3	0.0	39.6	4.4	-4.4	19.64	26.45	-0.05	0.00					
	20	280	70	210	1.33	0.33	26.1	1.8	0.4	0.1	34.8	8.7	-4.7	22.39	25.57	0.53	0.28					
SUM	21	245	105	210	1.17	0.50	24.5	1.4	0.6	0.3	28.6	12.3	-6.3	40.09	24.68	-0.18	0.03					
	22	600	0	180	3.33	0.00	60.5	11.1	0.0	0.0	201.7	0.0	29.7	880.19	62.85	-2.35	5.52					
	23	540	60	180	3.00	0.33	61	9.0	1.0	0.1	183.0	20.3	30.2	910.11	61.08	-0.08	0.01					
	24	480	120	180	2.67	0.67	60	7.1	1.8	0.4	160.0	40.0	29.2	850.77	59.31	0.69	0.48					
	25	420	180	180	2.33	1.00	58.5	5.4	2.3	1.0	136.5	58.5	27.7	765.52	57.54	0.96	0.93					
SUM												4788.35	265.4	1434.17	4.40	12.3	770.8	73.3	39.6	8.2	50.84	50.84

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์โดยวิธีเชิงเส้นแบบถดถอยหลายตัวแปรที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Ref.	Mix no.	Cement (C)	POFA (P)	Water (W)	X_{1i} (C/W)	X_{2i} (P/W)	Y_i	$X_{1i} X_{1i}$	$X_{1i} X_{2i}$	$X_{2i} X_{2i}$	$X_{1i} Y_i$	$X_{2i} Y_i$	$Y_i + Y_{avg}$	$(Y_i + Y_{avg})^2$	$g(x)$	$Y_i - g(x)$	$(Y_i - g(x))^2$
Kan-mankong et al. [5]	25	350	0	192.5	1.82	0.00	36.5	3.3	0.0	0.0	66.36	0.00	-2.67	7.14	37.07	-0.57	0.32
	26	315	35	192.5	1.64	0.18	37.6	2.7	0.3	0.0	61.53	6.84	-1.57	2.47	36.04	1.56	2.44
	27	280	70	192.5	1.45	0.36	36.9	2.1	0.5	0.1	53.67	13.42	-2.27	5.16	35.01	1.89	3.58
	28	245	105	192.5	1.27	0.55	34.3	1.6	0.7	0.3	43.65	18.71	-4.87	23.74	33.98	0.32	0.10
	29	350	0	210	1.67	0.00	32	2.8	0.0	0.0	53.33	0.00	-7.17	51.44	33.93	-1.93	3.71
	30	315	35	210	1.50	0.17	33.4	2.3	0.3	0.0	50.10	5.57	-5.77	33.32	32.98	0.42	0.17
	31	280	70	210	1.33	0.33	32.7	1.8	0.4	0.1	43.60	10.90	-6.47	41.89	32.04	0.66	0.44
	32	245	105	210	1.17	0.50	30.2	1.4	0.6	0.3	35.23	15.10	-8.97	80.51	31.10	-0.90	0.80
Chindaprasit et al. [37]	33	300	0	213	1.41	0.00	26.1	2.0	0.0	0.0	36.76	0.00	-13.07	170.89	28.58	-2.48	6.13
	34	240	60	220	1.09	0.27	23.9	1.2	0.3	0.1	26.07	6.52	-15.27	233.25	26.10	-2.20	4.86
	35	180	120	222	0.81	0.54	20.7	0.7	0.4	0.3	16.78	11.19	-18.47	341.23	24.33	-3.63	13.19
	36	135	155	225	0.60	0.69	18.1	0.4	0.4	0.5	10.86	12.47	-21.07	444.05	22.20	-4.10	16.79
Chindaprasit et al. [41]	37	600	0	180	3.33	0.00	65	11.1	0.0	0.0	216.67	0.00	25.83	667.06	68.46	-3.46	11.99
	38	540	60	180	3.00	0.33	67.5	9.0	1.0	0.1	202.50	22.50	28.33	802.45	66.57	0.93	0.86
	39	480	120	180	2.67	0.67	67	7.1	1.8	0.4	178.67	44.67	27.83	774.37	64.69	2.31	5.35
	40	420	180	180	2.33	1.00	65.5	5.4	2.3	1.0	152.83	65.50	26.33	693.14	62.80	2.70	7.30
				SUM		64.7	1566.9	117.9	24.3	11.40	2768.8	664.7	26.33	5268.28	62.80	2.70	7.30
															$S_e = 220.10$		

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์โดยวิธีเชิงเส้นแบบถดถอยหลายตัวแปรที่อายุ 90 วัน

Ref.	Mix no.	Cement (C)	POFA (P)	Water (W)	X_{-1i} (C/W)	X_{2i} (P/W)	Y_i	$X_{-1i} X_{-1i}$	$X_{-1i} X_{2i}$	$X_{2i} X_{2i}$	$X_{-1i} Y_i$	$X_{2i} Y_i$	$Y_i + V_{avg}$	$(Y_i + V_{avg})^2$	$g(x)$	$Y_i - g(x)$	$(Y_i - g(x))^2$
Chindaprasit et al. [37]	1	300	0	210	1.43	0.00	37.8	2.0	0.0	0.0	54.0	0.0	-7.1	50.6	34.83	2.97	8.81
	2	270	30	204	1.32	0.15	39.7	1.8	0.2	0.0	52.5	5.8	-5.2	27.2	35.18	4.52	20.43
	3	240	60	210	1.14	0.29	39.4	1.3	0.3	0.1	45.0	11.3	-5.5	30.4	33.56	5.84	34.07
	4	210	90	213	0.99	0.42	37.5	1.0	0.4	0.2	37.0	15.8	-7.4	54.9	32.48	5.02	25.24
	5	180	120	216	0.83	0.56	32.8	0.7	0.5	0.3	27.3	18.2	-12.1	146.7	31.42	1.38	1.91
	6	350	0	175	2.00	0.00	49.4	4.0	0.0	0.0	98.8	0.0	4.5	20.1	48.46	0.94	0.89
	7	315	35	175	1.80	0.20	50.5	3.2	0.4	0.0	90.9	10.1	5.6	31.2	47.57	2.93	8.59
	8	280	70	175	1.60	0.40	50.1	2.6	0.6	0.2	80.2	20.0	5.2	26.9	46.68	3.42	11.68
	9	245	105	175	1.40	0.60	46.2	2.0	0.8	0.4	64.7	27.7	1.3	1.7	45.79	0.41	0.16
	10	350	0	193	1.82	0.00	43.4	3.3	0.0	0.0	78.9	0.0	-1.5	2.3	44.12	-0.72	0.52
Ratanashotinunt [7]	11	315	35	193	1.64	0.18	45.1	2.7	0.3	0.0	73.8	8.2	0.2	0.0	43.31	1.79	3.19
	12	280	70	193	1.45	0.36	44.7	2.1	0.5	0.1	65.0	16.3	-0.2	0.0	42.51	2.19	4.81
	13	245	105	193	1.27	0.55	41.2	1.6	0.7	0.3	52.4	22.5	-3.7	13.8	41.70	-0.50	0.25
	14	350	0	210	1.67	0.00	38.1	2.8	0.0	0.0	63.5	0.0	-6.8	46.4	40.51	-2.41	5.80
	15	315	35	210	1.50	0.17	39.6	2.3	0.3	0.0	59.4	6.6	-5.3	28.2	39.77	-0.17	0.03
	16	280	70	210	1.33	0.33	38.9	1.8	0.4	0.1	51.9	13.0	-6.0	36.1	39.03	-0.13	0.02
	17	245	105	210	1.17	0.50	35.8	1.4	0.6	0.3	41.8	17.9	-9.1	83.0	38.29	-2.49	6.20
	18	600	0	180	3.33	0.00	75	11.1	0.0	0.0	250.0	0.0	30.1	905.3	80.25	-5.25	27.57
Sata et al. [18]	19	540	60	180	3.00	0.33	79	9.0	1.0	0.1	237.0	26.3	34.1	1162.0	78.77	0.23	0.05
	20	480	120	180	2.67	0.67	78	7.1	1.8	0.4	208.0	52.0	33.1	1094.8	77.29	0.71	0.50
Chindaprasit et al. [41]	21	420	180	180	2.33	1.00	77	5.4	2.3	1.0	179.7	77.0	32.1	1029.6	75.81	1.19	1.41
	22	600	0	180	3.33	0.00	75	11.1	0.0	0.0	250.0	0.0	30.1	905.3	80.25	-5.25	27.57
	23	540	60	180	3.00	0.33	79	9.0	1.0	0.1	237.0	26.3	34.1	1162.0	78.77	0.23	0.05
	24	480	120	180	2.67	0.67	78	7.1	1.8	0.4	208.0	52.0	33.1	1094.8	77.29	0.71	0.50
	25	420	180	180	2.33	1.00	77	5.4	2.3	1.0	179.7	77.0	32.1	1029.6	75.81	1.19	1.41
				SUM	39.6	8.2	770.8	73.3	12.3	4.40	1434.17	265.4	S _t = 4788.35		S _r = 50.84		

หมายเหตุ : Mix no. คือ จำนวนส่วนผสมที่รวบรวมได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง; C คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม³); P คือ ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม³); W คือ ปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม³); x_{1i} คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำ (C/W); x_{2i} คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันและน้ำ (P/W); y_i คือ ค่ากำลังอัดจากส่วนผสมคอนกรีต (เมกะปาสคาล); y_{avg} คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดจากส่วนผสมคอนกรีตที่รวบรวมได้ในแต่ละอายุ (เมกะปาสคาล); การแก้สมการเพื่อหาค่า k_{28} โดยจัดความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ $Ax = B$ ดังนี้

$$\begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_{1i} & \sum_{i=1}^n X_{2i} \\ \sum_{i=1}^n X_{1i} & (\sum_{i=1}^n X_{1i})^2 & \sum_{i=1}^n X_{1i} \sum_{i=1}^n X_{2i} \\ \sum_{i=1}^n X_{2i} & \sum_{i=1}^n X_{1i} \sum_{i=1}^n X_{2i} & (\sum_{i=1}^n X_{2i})^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{1i} Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{2i} Y_i \end{pmatrix}$$

แทนค่าต่าง ๆ จากตารางที่ 3

$$\begin{pmatrix} 40 & 64.7 & 16.6 \\ 64.7 & 117.9 & 24.3 \\ 16.6 & 24.3 & 11.4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1556.90 \\ 2768.79 \\ 664.65 \end{pmatrix}$$

แก้สมการจาก $x = A^{-1}B$ และจะได้ค่าคงที่ ๆ ต้องการคือ

$$\begin{matrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{matrix} = \begin{pmatrix} 0.360 & -0.159 & -0.185 \\ -0.159 & 0.086 & 0.050 \\ -0.185 & 0.050 & 0.252 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1556.90 \\ 2768.79 \\ 664.65 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.61 \\ 20.72 \\ 15.06 \end{pmatrix}$$

จากสมการที่ 3 $Y = g(x) = Ax_1 + Bx_2 + E$

โดย $A = a_1 = 20.72$

$B = a_2 = 15.06$

$E = a_0 = -0.61$

แทนค่า $Y = 20.72x_1 + 15.06x_2 - 0.61$

ดังนั้นจะได้ค่า $k_{28} = B/A = 15.06/20.72 = 0.727$

$$R^2 = ((S_y - S_f) / S_f) = (5268.28 - 220.1) / 5268.28 = 0.96$$

3.1 เปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (k) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

ผลการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (k) ของเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Masruksa [26] ซึ่งใช้เถ้าถ่านหิน (ค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 37.5) ค่า k ที่อายุ 91 วัน เท่ากับ 0.85 โดยมีค่า R² (R-squared; Correlation of determination) เท่ากับ 0.99 ค่าการยุบตัวที่ใช้อายุระหว่าง 8-10 ซม. แต่ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ค่า k มีค่าอยู่ระหว่าง 0.29-0.51 (7-28 วัน) โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.97-0.99 ซึ่งน้อยกว่าในงานวิจัยนี้ ค่า k ของเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าสูงกว่าเถ้าถ่านหิน ที่อายุ 7 และ 28 วัน เนื่องจากการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดที่ละเอียดกว่าเถ้าถ่านหิน (ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5) จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาในช่วงต้นได้ดีในส่วนผสมคอนกรีตแม้เถ้าถ่านหินจะมีปริมาณซิลิกาสูงกว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน แต่ที่อายุ 90 วัน ค่า k ของเถ้าปาล์มน้ำมันจากงานวิจัยนี้ต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งค่า k มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของการบ่มที่เพิ่มขึ้น เห็นได้ว่าแนวโน้มของค่า k ในช่วงต้นของเถ้าปาล์มน้ำมันสูงกว่าค่า k ของเถ้าถ่านหิน ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Homwuttiwong [29] ที่ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยทดลองผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน (ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 32.1) เทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมัน (ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 1) ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสาน ที่พบว่าที่อายุ 7 และ 28 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน แต่ที่อายุ 90 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

3.2 ตัวอย่างการนำสมการไปใช้ออกแบบส่วนผสม

ตัวอย่างส่วนผสมหากต้องการคอนกรีตที่มีกำลังอัด 28 เมกะปาสคาล (280 กก/ซม²) ที่อายุ 28 วัน ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ในคอนกรีตอัตราส่วนร้อยละ 20 และปริมาณน้ำ สามารถคำนวณโดยแทนค่า A, B และ E เท่ากับ 20.72, 15.06 และ

-0.61 ตามลำดับจากข้อมูลค่าตัวแปรต่าง ๆ ของ k_{28} แสดงในตารางที่ 5 จากนั้นทดลองแทนค่าปูนซีเมนต์ (c) เท่ากับ 245 กก./ม³, ค่าปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน (p) เท่ากับ 62 กก./ม³, ปริมาณน้ำ (w) เท่ากับ 210 กก./ม³ และค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (k_{28}) ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 0.73 แทนค่าตัวแปรที่กล่าวมาในสมการ (1) และในสมการ (2) เพื่อให้ค่ากำลังอัด (S_p) เท่ากับ 28 เมกะปาสกาล หลังจากทดลองแทนค่าสมการจะทำให้ได้ค่าตัวแปรที่ทำให้สมการสมดุล ดังนี้

$$28 = 20.72 \left(\frac{245}{210} \right) + 15.06 \left(\frac{62}{210} \right) - 0.61 \quad (1)$$

$$28 = 20.72 \left(\frac{245 + 0.73 \times 62}{210} \right) - 0.61 \quad (2)$$

แสดงให้เห็นว่าหากต้องการส่วนผสมของคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 28 เมกะปาสกาล จะต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 245 กก/ม³, ปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเท่ากับ 62 กก/ม³ กรณีแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 และปริมาณน้ำในส่วนผสมเท่ากับ 210 กก/ม³

3.3 เปรียบเทียบผลจากสมการกับผลการทดสอบจริง
 ผู้วิจัยได้ทดลองใช้สมการที่วิเคราะห์โดย แทนค่าตัวแปรในสมการที่ (2) ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ k_p , ตัวแปร A และ E ที่คำนวณได้ในแต่ละอายุ ดังแสดงในตารางที่ 5 (แสดงการคำนวณแปร A, B และ E ที่อายุ 28 วัน ในส่วนท้ายหมายเหตุของตารางที่ 4) นำมาเทียบค่ากำลังอัดในงานวิจัย Sanawung [30] ที่มีจำนวนส่วนผสมของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันรวมทั้งหมด 12 ส่วนผสมโดยมีผลการทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ค่าการยุบตัว 7.5-9.0 ซม. แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดในคอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 0-35 รายละเอียดข้อมูลส่วนผสมดังกล่าวแสดงในตารางที่ 6 สมการแทนค่าตัวแปรแยกตามอายุได้ดังนี้

$$S_p = 21.31 \left(\frac{c + 0.75p}{w} \right) - 8.17 \text{ อายุ 7 วัน}$$

$$S_p = 20.72 \left(\frac{c + 0.73p}{w} \right) - 0.61 \text{ อายุ 28 วัน}$$

$$S_p = 23.85 \left(\frac{c + 0.81p}{w} \right) - 0.77 \text{ อายุ 90 วัน}$$

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์การหาค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (k) และค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์

วัสดุประสาน		จำนวนชุดข้อมูล	อายุการบ่ม (วัน)	A	B	E	R ²	$k_d = B/A$
OPC	POFA	25	7	20.31	15.99	-8.17	0.99	0.75
		40	28	20.72	15.06	-0.61	0.96	0.73
		25	90	23.85	19.41	0.77	0.95	0.81

หมายเหตุ : ค่า R² หมายถึง ค่า Correlation of determination = $(S_t - S_r) / S_t$; ค่า $S_t = \sum (y_i - y_{avg})^2$ และ $S_r = \sum (y_i - g(x))^2$; จำนวนชุดข้อมูล 25, 40 และ 25 มาจากจำนวนส่วนผสมของคอนกรีตที่รวบรวมได้โดยแบ่งตามอายุ แสดงในตารางที่ 2, 3 และ 4 ในคอลัมน์ Mix no.

ตารางที่ 6 ส่วนผสมของคอนกรีตจากงานวิจัย Sanawung [30]

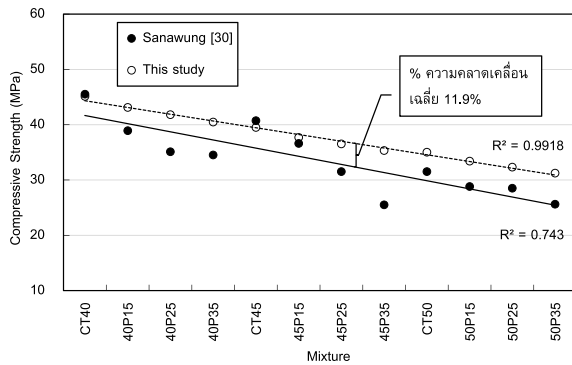
	No	Mixes	Mix Proportions (kg/m ³)						W/B	Slump (cm)	7 Day (MPa)	28 Day (MPa)	90 Day (MPa)
			Cement	POFA	Fine Agg.	Coarse Agg.	Water	Super P.					
Sanawung [30]	1	CT40	475	0	767	935	190	2.38	0.40	85	45.5	50.2	55.9
	2	40P15	404	71	767	910	190	2.85	0.40	80	38.9	46.2	52.8
	3	40P25	357	118	767	894	190	3.09	0.40	65	35.1	43.3	50.9
	4	40P35	309	166	767	875	190	3.33	0.40	80	34.5	40	45.8
	5	CT45	425	0	767	979	190	1.28	0.45	80	40.7	45.1	51.2
	6	45P15	360	65	767	957	190	1.70	0.45	75	36.6	44.3	48.5
	7	45P25	318	107	767	938	190	1.91	0.45	70	31.5	40.7	45.9
	8	45P35	276	149	767	925	190	2.13	0.45	90	25.5	35	42.8
	9	CT50	385	0	767	1012	190	0.39	0.50	85	31.5	39.6	41.9
	10	50P15	327	58	767	990	190	0.58	0.50	75	28.8	36.4	39.5
	11	50P25	289	96	767	978	190	0.77	0.50	80	28.5	34.6	35.5
	12	50P35	250	135	767	964	190	1.16	0.50	85	25.6	31.7	33.9

หมายเหตุ : Super P. หมายถึง สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer)

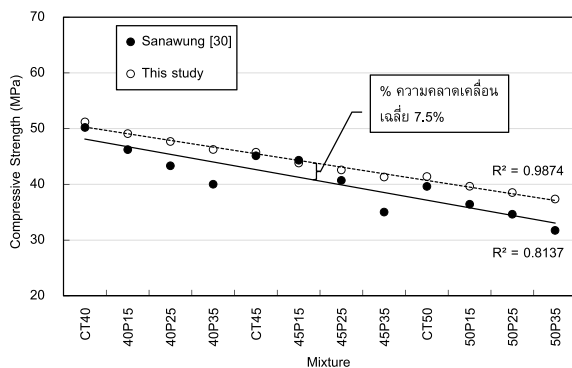
ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดจากการทดสอบค่ากำลังอัดในงานวิจัย Sanawung [30] กับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวแปรโดยแทนค่าเพก เตอร์ประสิทธิภาพ k ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน แสดงในรูปที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 11.9% ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 7.5% และที่อายุ 90 วัน ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 14.17% เหตุที่เป็นเช่นนี้ส่วนหนึ่งมาจากจำนวนส่วนผสมที่รวบรวมในการหาค่า k ในอายุ 7 และ 90 วัน มีค่าจำนวน 25 ส่วนผสม ซึ่งน้อยกว่า 27 ส่วนผสม ตามคำแนะนำ [16], [31] เมื่อเทียบกับอายุ 28 วัน ที่ใช้จำนวน 40 ส่วนผสม การใช้ส่วนผสมที่มากกว่าในการวิเคราะห์หาค่า k มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนลดลง ทั้งนี้ยังมีตัวแปรควบคุมอื่น ๆ ที่ยังไม่ถูกนำมาวิเคราะห์ หากนำมาพิจารณาก็มีแนวโน้มของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนลดลง ทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้ใกล้เคียงค่าการทดสอบจริง เช่น ตัวแปรเรื่องการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer; Super P.) สำหรับควบคุมค่าการ

ยุบตัวของคอนกรีต (Slump) การจำกัดอัตราส่วนการแทนที่ การควบคุมคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนนำมาผสมคอนกรีต หรือการผสมร่วมกันของวัสดุพอซโซลานมากกว่า 1 ชนิด ในคอนกรีต รวมถึงการรวบรวมส่วนผสมที่นำมาวิเคราะห์ให้มีจำนวนมากขึ้น ทั้งนี้ใน astm c39 [32] ระบุความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10.6 สำหรับค่าเฉลี่ยกำลังอัด 3 ตัวอย่าง หากพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีเพียงผลจากคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10.6 แต่ที่อายุ 7 และ 90 วัน ค่าที่ได้จากสมการมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าร้อยละ 10.6 และค่ากำลังอัดจากสมการยิ่งมากกว่าผลการทดสอบจากงานวิจัยหรือสูงกว่าค่ากำลังอัดจริงเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Sanawung [30] ดังนั้นสิ่งสำคัญที่สุดในงานวิจัยนี้เพียงเสนอแนวทางในการวิเคราะห์ โดยได้มีการเปรียบเทียบผลกับเถ้าถ่านหิน และเปรียบเทียบผลจากสมการกับผลการทดสอบจริงกับคอนกรีตที่ได้ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดในงานวิจัยอื่น ท่านที่ต้องการนำสมการนี้ไปใช้พึงระลึกเสมอว่า ค่า k เป็นค่า

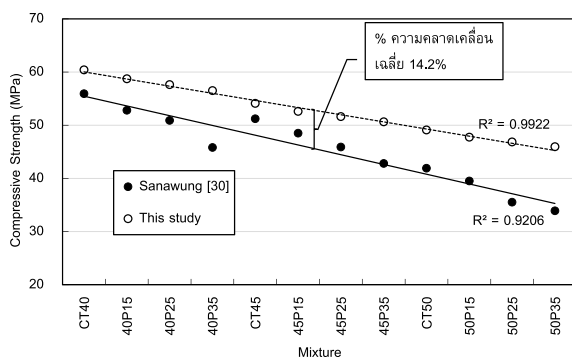
ที่ไม่คงที่ ต้องมีการตรวจสอบส่วนผสมทุกครั้งก่อนนำไปใช้อ้างอิง หรือทำการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการก่อนจะนำข้อมูลไปใช้งาน



รูปที่ 1 ค่ากำลังอัดในงานวิจัยเทียบกับค่าที่ได้จากสมการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (k_7) ที่อายุ 7 วัน



รูปที่ 2 ค่ากำลังอัดในงานวิจัยเทียบกับค่าที่ได้จากสมการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (k_{28}) ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 3 ค่ากำลังอัดในงานวิจัยเทียบกับค่าที่ได้จากสมการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (k_{90}) ที่อายุ 90 วัน

4. สรุปผลการศึกษา

1. ค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (k) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน มีค่าเท่ากับ 0.75, 0.73 และ 0.81 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ
2. เปรียบเทียบค่ากำลังอัดจากการทดสอบจริงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หัตถ์แปร ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 11.9% ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 7.5% และที่อายุ 90 วัน ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 14.17%
3. ก่อนนำข้อมูลในงานวิจัยนี้ไปใช้งาน แนะนำให้มีการตรวจสอบก่อนโดยอ้างอิงจากข้อมูลที่นำเชื่อถือ หรือทำการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการก่อนเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการนำไปใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณโยชัย ชินบุตร นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาบริหารงานก่อสร้างและโครงสร้างพื้นฐาน ที่ได้รวบรวมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ผลงานวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม สำหรับสถานที่ในการค้นหาข้อมูลเพื่อรวบรวมงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Office of Agricultural Economics Ministry of Agriculture and Cooperatives. 2019, Page [Online system], Available : <http://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/oilpalm%2062.pdf>. [25 May 2021] (In Thai)
2. Charoennatkul, C., 2014, "Interlocking Blocks Containing Oil Palm Ash and Shells Waste," *Journal of Community Development and Life Quality*, 2 (1), pp. 103-112.
3. Tay, J.H., 1990, "Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2, pp. 94-105.
4. Seeting, T., 2004, "Development of Palm Oil Fuel Ash for Use as Pozzolanic Material in Concrete," *Annual Concrete Conference 2*, 26-27 October 2004, Plaza Hotel Chiangmai, pp. 17-22. (In Thai)

5. Kanmankong, J., Suena, D. and Choksawangnate, T., 2003, Study of Potential Palm Oil Ash for Use as Pozzolan Material, Bachelor of Engineering Project, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 59 p. (In Thai)
6. Sukanpee, S., Namarak, C. and Jatarupitukkul, C., 2002 "Use of Calcium Carbide Residue and Palm Oil Fuel Ash in Concrete," *Engineering Conference*, 20-23 June 2002, Bangkok, Thailand, pp. 191-199. (in Thai)
7. Chaiyanunt Ratanashotinunt, 2005, A Study of Compressive Strength and Heat Evolution of Concrete Mixed with Palm Oil Fuel Ashes, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 101 p. (In Thai)
8. Awal, A.S.M.A., 2013, "Evaluation of Heat of Hydration of Concrete Containing High Volume Palm Oil Fuel Ash," *Fuel*, 105, pp. 728-731.
9. Tangchirapat, W., Seating, T., Jaturapitakul, C., Kiattikomol, K. and Siripanichgorn, A., 2007, "Use of Waste Ash from Palm Oil Industry in Concrete," *Waste Management*, 27 (1), pp. 81-88.
10. Sata, V., Jaturapitakul, C. and Kiattikomol, K., 2004, "Utilization of Palm Oil Fuel Ash in High-Strength Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16 (6), pp. ASCE 0899-1561.
11. TSI 2888-61, 2018, "Palm Oil Ash for Use as an Admixture in Concrete," Thai Industrial Standard, ISBN 978-616475-909-0, 15 p.
12. Khammathit, P. and Chindaprasirt, P., 2004, "Evaluation of Efficiency Factor of Mae Moh Fly Ash," *The 9th National Convention on Civil Engineering*, 19-21 May 2004, Cha am, Petchaburi, pp. MAT 77-82. (In Thai)
13. Smith, I.A., 1967, "The Design of Fly Ash Concrete," *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, London, pp. 769-790.
14. Abrams, D.A., 1918, Design of Concrete Mixtures Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, Revised Edition, 20 p.
15. Bolomey, J., 1927, "Durcissement des Mortiers et Bétons," *Bulletin Technique de la Suisse Romande* 16, pp. 262-268.
16. Hedegaard, S.E. and Hansen, T.C., 1992, "Modified Water/Cement Ratio Law for Compressive Strength of Fly Ash Concrete," *Materials and Structures*, 25 (5), pp. 273-283.
17. Bamaga, S.O., Ismail, M.A., Majid, Z.A., Ismail, M. and Hussin, M.W., 2013, "Evaluation of Sulfate Resistance of Mortar Containing Palm Oil Fuel Ash from Different Sources," *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38 (9), pp. 2293-2301.
18. Sata, V., Jaturapitakul, C. and Rattanashotinunt, C., 2010, "Compressive Strength and Heat Evolution of Concretes Containing Palm Oil Fuel Ash," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 22 (10), pp. 1033-1038.
19. Tunsathien, P., Tangchiraphat, W. and Jaturapitukkul, C., 2014, "A Study of Properties of Palm Oil Fuel Ash from Various Sources for Use in Concrete," *Annual Concrete Conference 9*, 21-31 October 2014, Topland Hote, Phitsanulok, pp. STR34-40. (In Thai)
20. ASTM Standard C618, 2012, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia.
21. Sadudee, B., 2001, Mix Design of Mae Moh Fly Ash Concrete, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering (International Graduate) Program,

Department of Civil Engineering, Kasetsart University, Thailand, 127 p.

22. Khammathit, P., 2005, Evaluation of Efficiency Factor of Mae Moh Fly Ash, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Graduate School, Khon Kaen University, 139 p. (In Thai)

23. Songpiriyakij, S., 2002, Influence of Particle Size of Fly Ash on Compressive Strength of Fly Ash Concrete, Philosophy of Doctoral Dissertation, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,

24. ASTM Standard C403, 2008, "Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μm (No. 325) Sieve," ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia.

25. Jirasit, F., Jaturapitakkul, C., Siripanichgorn, A. and Kiattikomol, K., 1999, "Effects of Cement and Fly Ash Contents in Concrete Against Sulfuric Acid Attack," *KMUTT Research and Development Journal*, 22 (2), pp. 27-45. (In Thai)

26. Masruksa, P., 2001, A Proposed Modified ACI Mix Design Method for Mea-Moh Fly Ash Concrete, Master of Engineering Thesis Civil Engineering Program, Graduate School, Chiang Mai University, 127 p. (In Thai)

27. Pitiwat Wattanachai, 2001, A Proposed Modified ACI Mix Design Method for No-Slump Concrete with Mea-Moh Fly Ash, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Graduate School, Chiang Mai University, 124 p. (In Thai)

28. Papadakis, V.G. and Tsimas, S., 2002, "Supplementary Cementing Materials in Concrete Part I: Efficiency and Design," *Cement and Concrete Research*, 32 (10), pp. 1525-1532.

29. Homwuttiwong, S., 2006, Study of Strength and Water Permeability of Concrete Containing

Various Pozzolanic Materials, Philosophy of Doctoral Dissertation, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 123 p.

30. Sanawung, W., 2011, Effect of Palm Oil Fuel Ash on Compressive Strength, Water Permeability and Chloride Penetration of Concrete, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 164 p. (In Thai)

31. Papadakis, V.G., Antiohos, S. and Tsimas, S., 2002, "Supplementary Cementing Materials in Concrete Part II: A Fundamental Estimation of The Efficiency Factor," *Cement and Concrete Research*, 32 (10), pp. 1533-1538.

32. ASTM Standard C39, 2012, "ASTM C 39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia.

33. Awal, A.S.M.A. and Hussin, M.W., 1999, "Durability of High Performance Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash," *Proceedings of the 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, National Research Council Canada, 30 May -3 June 1999, pp. 465-474.

34. Awal, A.S.M.A. and Hussin, M.W., 1997, "The Effectiveness of Palm Oil Fuel Ash in Preventing Expansion due to Alkali-Silica Reaction," *Cement and Concrete Composites*, 19 (4), pp. 367-72.

35. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W. and Saeting, T., 2007, "Evaluation of the Sulfate Resistance of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash," *Construction and Building Materials*, 21 (7), pp. 1399-1405.

36. Sata, V., Jaturapitakkul C. and Kiattikomol, K., 2007, "Influence of Pozzolan from Various By-Product Materials on Mechanical Properties of

High-Strength Concrete,” *Construction and Building Materials*, 21 (7), pp. 1589-1598.

37. Chindapasirt, P., Homwuttiwong, S. and Jaturapitakkul, C., 2007, “Strength and Water Permeability of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk-Bark Ash,” *Construction Building Materials*, 21 (7), pp. 1492-1499.

38. Chindapasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivanon, V., 2008, “Resistance to Chloride Penetration of Blended Portland Cement Mortar Containing Palm Oil Fuel Ash, Rice Husk Ash and Fly Ash,” *Construction and Building Materials*, 22 (5), pp. 932-938.

39. Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C. and Chindapasirt, P., 2009, “Use of Palm Oil Fuel Ash as a Supplementary Cementitious Material for Producing High-Strength Concrete,” *Construction and Building Materials*, 23 (7), pp. 2641-2646.

40. Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindapasirt, P., 2011, “Effect of Palm Oil Fuel Ash Fineness on the Microstructure of Blended Cement Paste,” *Construction and Building Materials*, 25 (11), pp. 4095-4104.

41. Chindapasirt, P., Chotetanorm, C. and Rukzon, S., 2011, “Use of Palm Oil Fuel Ash to Improve Chloride and Corrosion Resistance of High-Strength and High-Workability Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (4).

42. Tieng Cheewaket, 2012, Long-Term Properties of Fly Ash and Palm Oil Fuel Ash Concretes in Marine Environment, Philosophy of Doctoral Dissertation, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 162 p.