

การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Comparative Study on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Cast by Using Hydraulic Cement and Ordinary Portland Cement

ชาญชัย เงาะปก¹, จักรกมล ชำรงวุฒิ^{1,*}, นำชัย จ้อยสูงเนิน², เชดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์¹ และ สัทธชัย แสงอาทิตย์³

¹สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ในเมือง เมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

²วิทยาลัยนวัตกรรมการศึกษา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ในเมือง เมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

³สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุรนารี เมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

Chanchai Ngohpok¹, Jaksada Thumrongvut^{1,*}, Namchai Joysoongnern², Cherdasak Suksiripattanapong¹

and Sittichai Seangatith³

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology

Isan, Nai-Muang, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

²College of Innovative Skills, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan,

Nai-Muang, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

³School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Suranaree, Muang

Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: jaksada.th@rmuti.ac.th

Received: Sep 27, 2023; Revised: Mar 24, 2024; Accepted: Apr 01, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับการประยุกต์ในงานก่อสร้าง ตัวแปรหลักในงานวิจัยได้แก่ ชนิดของปูนซีเมนต์ กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต และอายุบ่มของคอนกรีต ปูนซีเมนต์มี 2 ประเภทได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) ใช้สำหรับกำลังรับแรงอัดประลัยเท่ากับ 18 MPa 25 MPa และ 32 MPa ที่อายุบ่มของคอนกรีตเท่ากับ 28 วัน และ 90 วัน อัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/h) ของคานมีค่า 8.0 จากผลการทดสอบพบว่า พฤติกรรมรับแรงกระทำและลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะใกล้เคียงกัน คานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 2 ประเภทมีพฤติกรรมรับแรงแบบเชิงเส้นถึงค่าประมาณร้อยละ 80 ถึง 90 ของแรงกระทำสูงสุด จากนั้น คานจะมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น การแอ่นตัวของคานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ นอกจากนี้ สมการออกแบบคานตามมาตรฐานของ ACI สามารถทำนายแรงกระทำที่ออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สุดท้าย จากการเปรียบเทียบ

ระหว่างปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างเทียบเท่า ดังนั้น การประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกนี้จึงเป็นหนึ่งในการดำเนินการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมสังคมคาร์บอนต่ำอีกด้วย

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, แรงคด, เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Abstract

This paper is a comparative study of the flexural behavior of reinforced concrete beams cast by using hydraulic cement and ordinary Portland cement for construction applications. The main variables used in this research comprise of type of cement, ultimate compressive strength of concretes, and curing time. Two different types of cement, including hydraulic cement and ordinary Portland cement, were used at three different ultimate compressive strengths of 18 MPa, 25 MPa, and 32 MPa with the curing times of 28 and 90 days. The beams' nominal span-to-depth (L/h) ratio is 8.0. The results showed that the reinforced concrete beams cast by using hydraulic cement and ordinary Portland cement had similar flexural behavior and failure patterns. Both types of the reinforced concrete beams exhibit linear elastic behavior up to approximately 80–90% of their maximum applied load. Then, the behavior of the beams is nonlinear in that the deflection increased rapidly with a slight increase in the applied load until reaching their failure. In addition, based on the experimental results obtained from this study, it was found that the ACI design equations are acceptable for predicting the design strength of the reinforced concrete beams cast by using hydraulic cement and the hydraulic cement can be an equivalent substitute for ordinary Portland cement for the reinforced concrete beams used in this study. Therefore, this application of the hydraulic cement is not only the environmentally friendly practices, but also promoting low-carbon society as well.

Keywords: Reinforced Concrete Beam, Hydraulic Cement, Flexure, Environmentally Friendly

1. บทนำ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีวัสดุทางวิศวกรรมและระบบการก่อสร้างขึ้นอยู่กับบริบทและลักษณะของโครงสร้างอาคาร คานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นชิ้นส่วนที่มีบทบาทสำคัญในการกระจายน้ำหนักบรรทุกจากแผ่นพื้นลงสู่เสา และเป็นองค์ประกอบพื้นฐานในการก่อสร้างต่าง ๆ เช่น อาคารที่พักอาศัยและโครงสร้างพื้นฐาน เป็นต้น [1] พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักบรรทุกขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น รูปทรงหน้าตัด การจัดเรียงของเหล็กเสริม และสมบัติของวัสดุ เป็นต้น ดังนั้นการเข้าใจหลักการและพฤติกรรมทางโครงสร้างของคานคอนกรีตเสริมเหล็กถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับวิศวกร สถาปนิก และผู้เชี่ยวชาญด้านการก่อสร้างที่เกี่ยวข้อง [2],[3] ข้อดีของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีหลายประการ เช่น สามารถออกแบบเพื่อรองรับน้ำหนักของโครงสร้างใน

รูปแบบต่าง ๆ ภายใต้วงความยาวที่แตกต่างกัน เป็นวัสดุที่สามารถหาได้ทั่วไปและมีราคาไม่สูงมากนัก รวมถึงทนทานต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานในโครงสร้างที่ต้องการความคงทนในระยะยาว [4] ด้วยความได้เปรียบทางสถาปัตยกรรมและความอนอกประสงค์นี้ ส่งผลให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กเหมาะสำหรับการใช้งานที่หลากหลาย ตั้งแต่การก่อสร้างที่พักอาศัยไปจนถึงโครงสร้างพื้นฐานที่ซับซ้อน [5]

อย่างไรก็ตาม คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในปัจจุบันผลิตจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในระดับสูง และก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก [6] ประสิทธิภาพของการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน

1 ต้นต่อการผลิตปูนซีเมนต์แต่ละตัน หรือมากกว่าร้อยละ 5 ของอุตสาหกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก [5],[7] ในปัจจุบัน กระแสโลกได้เปลี่ยนมาประยุกต์ใช้วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยเฉพาะการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ทางเลือกที่สามารถช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) [8] ดังนั้น การเปลี่ยนวัสดุเชื่อมประสานในอุตสาหกรรมก่อสร้างเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ น่าจะเป็นกลไกที่สามารถช่วยลดก๊าซเรือนกระจก อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ของไทยได้วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ รวมถึงนำเทคโนโลยีมาใช้ในการขั้นตอนการผลิตจนได้ผลิตภัณฑ์ เรียกว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) โดยปูนซีเมนต์ดังกล่าวมีสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594-2556 [9] และมีความใกล้เคียงกับมาตรฐาน ASTM C1157 [10] ของสหรัฐอเมริกา ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีจุดเด่นคือใช้พลังงานต่ำในกระบวนการผลิต ปล่อยปล่อยก๊าซ CO_2 ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตลอดจนใช้วัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Eco-Friendly Production Process) [11] อย่างไรก็ตาม การใช้งานปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกอาจไม่ได้รับการยอมรับในช่วงแรก โดยหน่วยงานภาครัฐและผู้ประกอบการเอกชนหลายรายยังขาดความเชื่อมั่นเกี่ยวกับการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสำหรับงานก่อสร้าง เนื่องจากยังขาดผลการตรวจสอบพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปแบบต่าง ๆ ที่ผ่านงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในงานโครงสร้างมีจำนวนไม่มากนัก โดย Joysoongnem และคณะ [12] ทดสอบเสาท่อนเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกภายใต้แรงอัด และเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาของ AISC-LRFD จากการเปรียบเทียบพฤติกรรมทางโครงสร้างและประสิทธิภาพพบว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างเทียบเท่า ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมรับแรงคดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ต

แลนด์ ซึ่งคาดว่าจะเป็นการเสริมสร้างความเข้าใจและความเชื่อมั่น รวมถึงส่งเสริมการใช้งานปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกต่อไปในอนาคต

2. วัสดุตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ

คอนกรีตที่ใช้ศึกษาผลิตจากปูนซีเมนต์ 2 ประเภท ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU) ตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556 [9] และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15-2562 [13] ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) แสดงในตารางที่ 1 จากตารางพบว่า ผลรวมของออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) ออกไซด์อะลูมินา (Al_2O_3) และออกไซด์เหล็ก (Fe_2O_3) ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเท่ากับร้อยละ 34.31 และ 30.22 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีผลรวมอัตราส่วนออกไซด์ทั้งสามชนิดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 13.5

คอนกรีตที่ใช้ศึกษามีกำลังรับแรงอัดประลัยตามเป้าหมาย 3 ค่า ได้แก่ 18 MPa 25 MPa และ 32 MPa (ประมาณ 180 kg/cm^2 250 kg/cm^2 และ 320 kg/cm^2 ตามลำดับ) ของแท่งรูปทรงกระบอกมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 m สูง 0.20 m ที่อายุบ่ม 28 วัน การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.1 [14] ตารางที่ 2 แสดงปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 [15] ที่อายุบ่ม 7 วัน 28 วัน และ 90 วัน

เหล็กเสริมหลัก (Main Reinforcement) ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm (DB12) ชั้นคุณภาพ SD40 และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนหรือเหล็กปลอก (Stirrup) ใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm (RB6) ชั้นคุณภาพ SR24 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมกระทำตามมาตรฐาน ASTM A615 [16] จากผลการทดสอบ

พบว่า กำลังรับแรงดึงที่จุดครากมีค่าเฉลี่ยของเหล็กเสริม MPa ตามลำดับ และความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริม DB12 DB12 เท่ากับ 560.8 MPa และเหล็กเสริม RB6 เท่ากับ 447.7 มีค่าเท่ากับ 0.0012 mm/mm

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Chemical composition	Hydraulic cement, HC (%)	Portland cement, PC (%)
Calcium Oxide (CaO)	58.55	61.61
Silicon Dioxide (SiO ₂)	25.58	22.30
Aluminium (III) Oxide (Al ₂ O ₃)	4.95	4.23
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃)	3.78	3.69
Magnesium Oxide (MgO)	2.38	2.21
Sulphate Trioxide (SO ₃)	2.95	3.50
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.00	0.42
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.34	0.39
Loss of Ignition	1.47	1.65

ตารางที่ 2 ปฏิภาณส่วนผสมคอนกรีตต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

Mixes	HC (kg)	PC (kg)	W (kg)	CA (kg)	FA (kg)
HC-18	264	0	201	1,008	896
HC-25	308	0	201	1,008	857
HC-32	370	0	201	1,008	808
PC-18	0	264	201	1,008	896
PC-25	0	308	201	1,008	857
PC-32	0	370	201	1,008	808

หมายเหตุ HC = Hydraulic cement, PC = Portland cement, W = Water, CA = Coarse aggregate, FA = Fine aggregate

2.2 ตัวอย่างทดสอบ

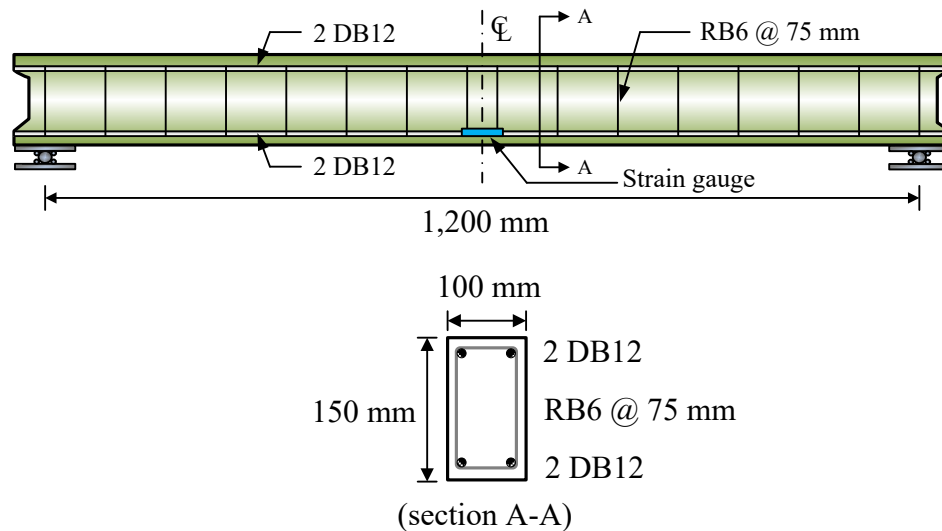
ตัวอย่างทดสอบเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (คานอ้างอิง) ออกแบบโดยวิธีกำลัง (strength design method) ตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ American Concrete Institute (ACI 318-14) [17] ตัวอย่างคานมีขนาดหน้าตัดกว้าง (b) เท่ากับ 100 mm ความลึก (h) เท่ากับ 150 mm และความยาว (L) เท่ากับ 1,200 mm ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีจำนวน 24 ตัวอย่าง ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (คาน HC) และกลุ่มที่ 2 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (คาน PC) ถูกใช้เป็นคานอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบแรงกระทำกับตัวอย่างคานในกลุ่มที่ 1 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3 โดยในแต่ละตัวอย่างคานทั้ง 2 กลุ่ม จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 อายุบ่มคอนกรีตได้แก่ ที่อายุบ่ม 28 วัน จำนวน 2 ตัวอย่าง และที่อายุบ่ม 90 วัน จำนวน 2 ตัวอย่าง การศึกษานี้ ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึก 8.0 ซึ่งมากกว่า 5.0 ($L/h > 5.0$) เพื่อศึกษาผลของแรงดัด (flexural) ที่กระทำต่อคาน [5] เหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัดเป็นเหล็กข้ออ้อย (2-DB12) เหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลม (RB6) มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 75 mm นอกจากนี้ ปลายทั้งสองด้านของคานถูก

บากเพื่อจำลองลักษณะเดือยสี่เหลี่ยมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 1 นอกจากนี้ ที่กึ่งกลางความยาวของเหล็กเสริมรับแรงดึง ได้ติดมาตรวัดความเครียด (Strain Gauge) เพื่อตรวจสอบความเครียดของเหล็กเสริมหลักภายใต้แรงดัด

สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูปแบบ AA-BB โดยใช้หลักการต่อไปนี้ AA หมายถึง ประเภทของ

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ HC หมายถึง คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และ PC หมายถึง คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ BB หมายถึง กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต ในหน่วย MPa ตัวอย่างเช่น HC-25 หมายถึง คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยเท่ากับ 25 MPa



Reinforced Concrete Beam with Hydraulic Cement

รูปที่ 1 รายละเอียดหน้าตัดของตัวอย่างคาน

ตารางที่ 3 รายละเอียดของตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

Specimen	Types of Cement	Ultimate Strength (MPa)	Curing Time (days)	Number (28d, 90d)
HC-18	Hydraulic Cement	18	28, 90	2, 2
HC-25	Hydraulic Cement	25	28, 90	2, 2
HC-32	Hydraulic Cement	32	28, 90	2, 2
PC-18	Portland Cement	18	28, 90	2, 2
PC-25	Portland Cement	25	28, 90	2, 2
PC-32	Portland Cement	32	28, 90	2, 2

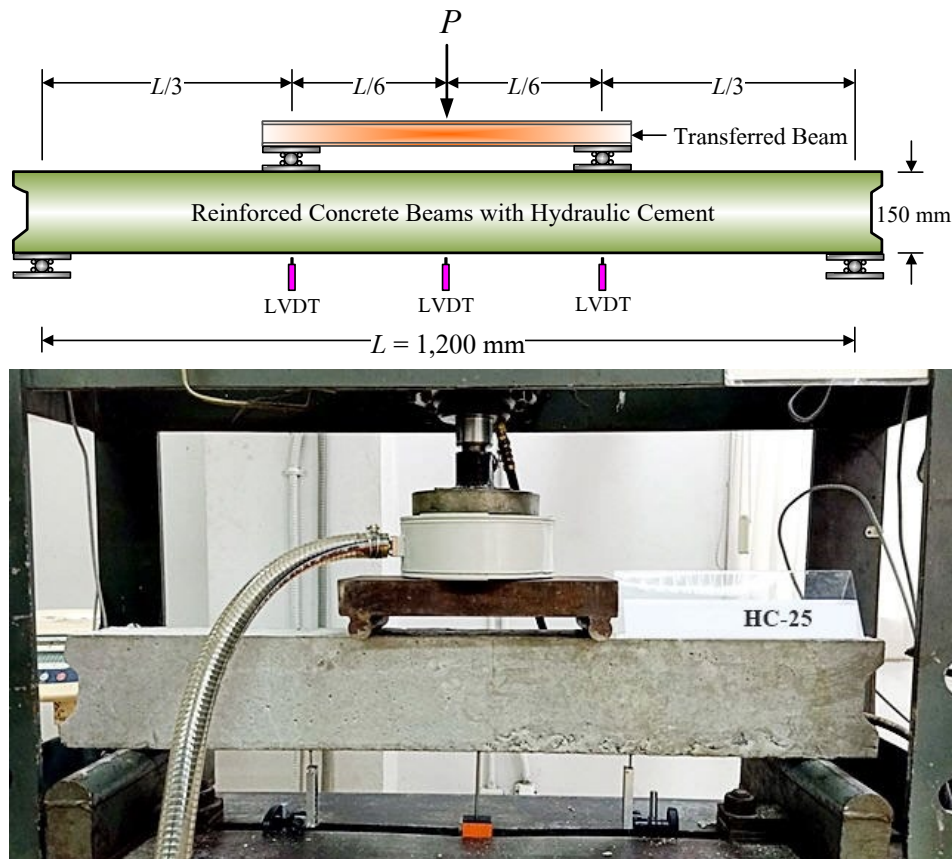
2.3 วิธีการทดสอบ

ตัวอย่างคานถูกติดตั้งกับเครื่องทดสอบ Flexural Frame Machine โดยมีจุดรองรับเป็นแบบจุดรองรับอย่างง่าย (Simple Supported Beam) จากนั้น ติดตั้งคานถ่ายแรง (Transfer Beam) บนตัวอย่างคานเพื่อถ่ายแรงจากหัวกดลง

บนตัวอย่างในลักษณะแรงกระทำแบบ 4 จุด (Four-Point Loading Test) รวมถึงติดตั้ง Load Cell บริเวณกึ่งกลางด้านบนของคานถ่ายแรงเพื่อบันทึกค่าแรงกระทำ จากนั้น ติดตั้ง Linear Variable Differential Transducers (LVDT) บริเวณกึ่งกลางความยาวคานจำนวน 1 ตัว และที่ระยะ

เท่ากับ $L/6$ ถัดจาก LVDT ตัวแรกไปทางด้านซ้ายและขวา จำนวนด้านละ 1 ตัว เพื่อวัดระยะการแอ่นตัว (Deflection) ของคานดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการ Pre-loading ตัวอย่างคาน โดยเพิ่มแรงกระทำประมาณ 5 kN (ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 10 ของค่าการันตีกำลังรับแรงสูงสุดของคาน ซึ่งคานมีพฤติกรรมในช่วง Linear elastic และยังไม่มีแตกร้าวเกิดขึ้นในคาน) เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์และลดแรงเสียดทาน

ระหว่างจุดถ่ายแรงและหน้าสัมผัสของตัวอย่างคาน [18] จากนั้น เพิ่มแรงกระทำต่อตัวอย่างคานอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราส่วน 1 mm/min [5] จนระยะการแอ่นตัวสูงสุดที่กึ่งกลางความยาวคาน (Midspan Deflection) มีค่าเท่ากับ ความยาวคานประสิทธิผลหาร 100 ($L/100$) พร้อมสังเกตและบันทึกพฤติกรรมทางโครงสร้างจนตัวอย่างคานเกิดการวิบัติ



รูปที่ 2 การติดตั้งตัวอย่างคาน

3. ผลทดสอบและอภิปรายผล

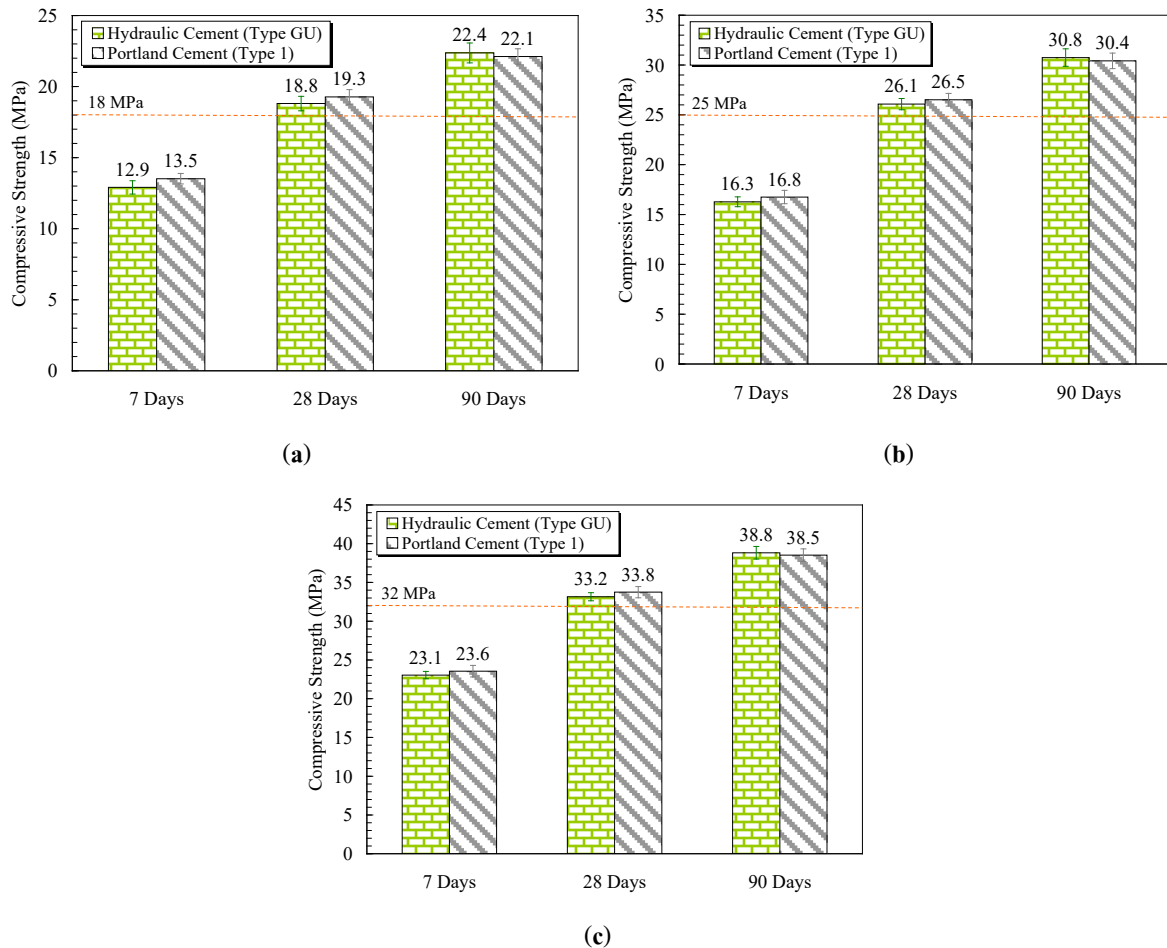
3.1 กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต

รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยตามเป้าหมายเท่ากับ 18 MPa 25 MPa และ 32 MPa ที่อายุบ่ม 28 วัน โดยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) มีกำลังรับแรงอัดประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 18.8 MPa 26.1 MPa และ 33.2 MPa ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (PC) มีกำลังรับแรงอัดประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 19.3 MPa 26.5 MPa และ 33.8 MPa

ตามลำดับ จากผลทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเห็นได้ว่า (1) คอนกรีตที่ออกแบบมีกำลังรับแรงอัดประลัยผ่านเกณฑ์ตามเป้าหมายที่กำหนด และ (2) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีกำลังรับแรงอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเล็กน้อย เนื่องจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีส่วนประกอบของปูนเม็ด (Clinker) ในอัตราส่วนที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 10 ของปริมาณทั้งหมด [19] โดยใช้วัสดุอื่นผสมทดแทน เช่น ส่วนประกอบแคลเซียม แก้วลอย

หินปูน และวัสดุปอซโซลาน เป็นต้น [20] และยังสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดประลัยที่อายุบ่ม 7 วัน อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 90 วัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีกำลังรับแรงอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เล็กน้อย เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีส่วนประกอบของวัสดุปอซโซลาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น [21],[22]

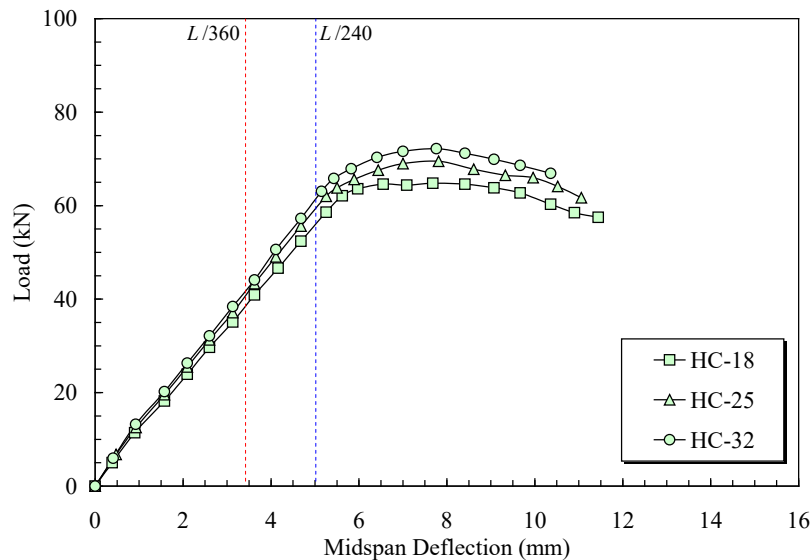


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (a) 18 MPa (b) 25 MPa (c) 32 MPa

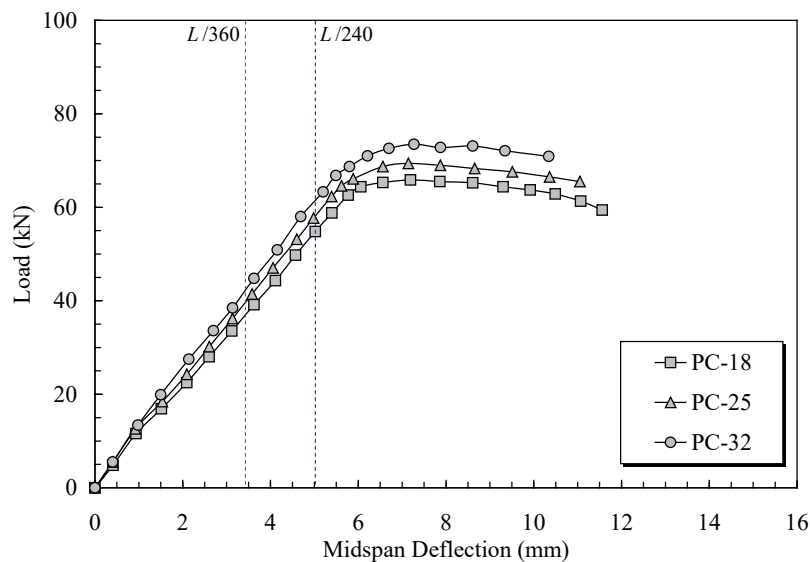
3.2 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การศึกษานี้ กำหนดให้สัญลักษณ์ $P_{L/360}$ และ $P_{L/240}$ เป็นแรงกระทำที่สภาวะใช้งานของคาน ซึ่งคานสามารถรับได้ที่ระยะการแอ่นตัวกึ่งกลางคานเท่ากับ $L/360$ และ $L/240$ ตามลำดับ สัญลักษณ์ P_{test} เป็นแรงกระทำที่คานสามารถต้านทานได้ เมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงของคานเกิดการคราก (Yielding) หรือเรียกว่า แรงกระทำที่จุดครากของ

คาน และสัญลักษณ์ P_{max} เป็นแรงกระทำสูงสุดของคานที่รับได้ก่อนการวิบัติ รูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (load) และระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน (Midspan Deflection) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (คาน HC) และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (คาน PC) ตามลำดับ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคาน HC



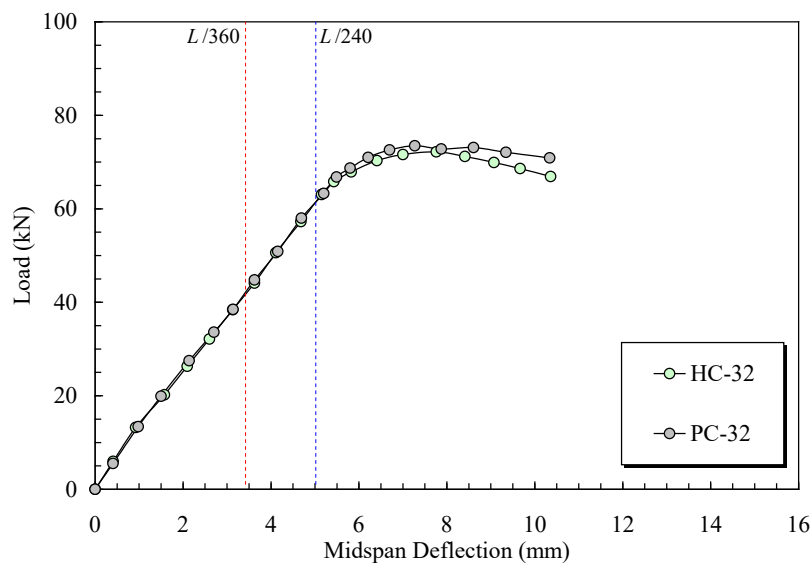
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคาน PC

จากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 พบว่า พฤติกรรมรับแรงกระทำของคานแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรกตัวอย่างคานทั้งสองประเภทมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (linear) โดยคอนกรีตและเหล็กเสริมจะร่วมกันรับแรงจนกระทั่งแรงกระทำมีค่าประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 ของแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) คานจะเริ่มเกิดรอยร้าวขนาดเล็กใต้ท้องคานบริเวณกึ่งกลางความยาวคาน และเริ่มเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้น เมื่อถึงจุดที่แรงกระทำมีค่าประมาณร้อยละ 80 ถึง 90 ของแรงกระทำสูงสุด เหล็กเสริมรับแรงดึงด้านล่างจะเกิดการคราก (Yielding Stage) ที่ความเครียดประมาณ

0.0012 ถึง 0.0014 mm/mm โดยมีค่าใกล้เคียงกับความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมจากการทดสอบแรงดึง [1],[18] แรงกระทำที่ทดสอบได้ที่ตำแหน่งนี้ ถูกนิยามให้เป็นแรงกระทำที่คานสามารถรับได้เมื่อเหล็กเสริมของคานเกิดการคราก [3] และถูกกำหนดให้เป็นแรงกระทำที่สามารถหาได้จากสมการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานของ American Concrete Institute (ACI 318-14) [17] ภายหลังจากการครากของเหล็กเสริม (P_{test}) จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างคานเข้าสู่ช่วงที่ 2 ความชันของเส้นกราฟมีค่าลดลง เนื่องจากคอนกรีตส่วนล่างของ

คานเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและขยายตัวสูงขึ้น รวมถึงเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการคราก การแตกร้าวของคอนกรีตจะขยายตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ระยะการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากจนกระทั่งตัวอย่างคานวิบัติ [23] สังเกตได้ว่าพฤติกรรมการรับแรงกระทำเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (Progressive Behavior) ซึ่งเป็นสัญญาณเตือน ก่อนที่โครงสร้างจะเกิดการวิบัติได้ดี นอกจากนี้ จากการเปรียบเทียบ

พฤติกรรมทางโครงสร้างของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (คานอ้างอิง) พบว่า คานทั้งสองประเภทมีพฤติกรรมทางโครงสร้างที่ใกล้เคียงกันดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6 ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้ทดแทนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคาน HC และคาน PC

จากการสังเกตพบว่า การวิบัติคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีลักษณะแบบ Flexural failure ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยช่วงเริ่มต้นของการเพิ่มแรงกระทำคอนกรีตที่ผิวล่างบริเวณกึ่งกลางคานเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural Crack) ในแนวตั้งกระทำตั้งฉากกับแนวแกนของคาน จากนั้นรอยแตกร้าวจะเพิ่มจำนวนและขยายตัวตามขนาดของแรงกระทำ ดังแสดงในรูปที่ 7(a) ขณะที่ระยะการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งตัวอย่างคานเกิดการวิบัติ [5] โดยพฤติกรรมการวิบัติแบบ Flexural failure มักเกิดขึ้นกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบให้มีอัตราส่วนเหล็กเสริมต่ำกว่าอัตราส่วนเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล (Under-Reinforcement) และยังสอดคล้องกับลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ศึกษาโดย Mohammed [24] และ Fuzail Hashmi et al. [25]

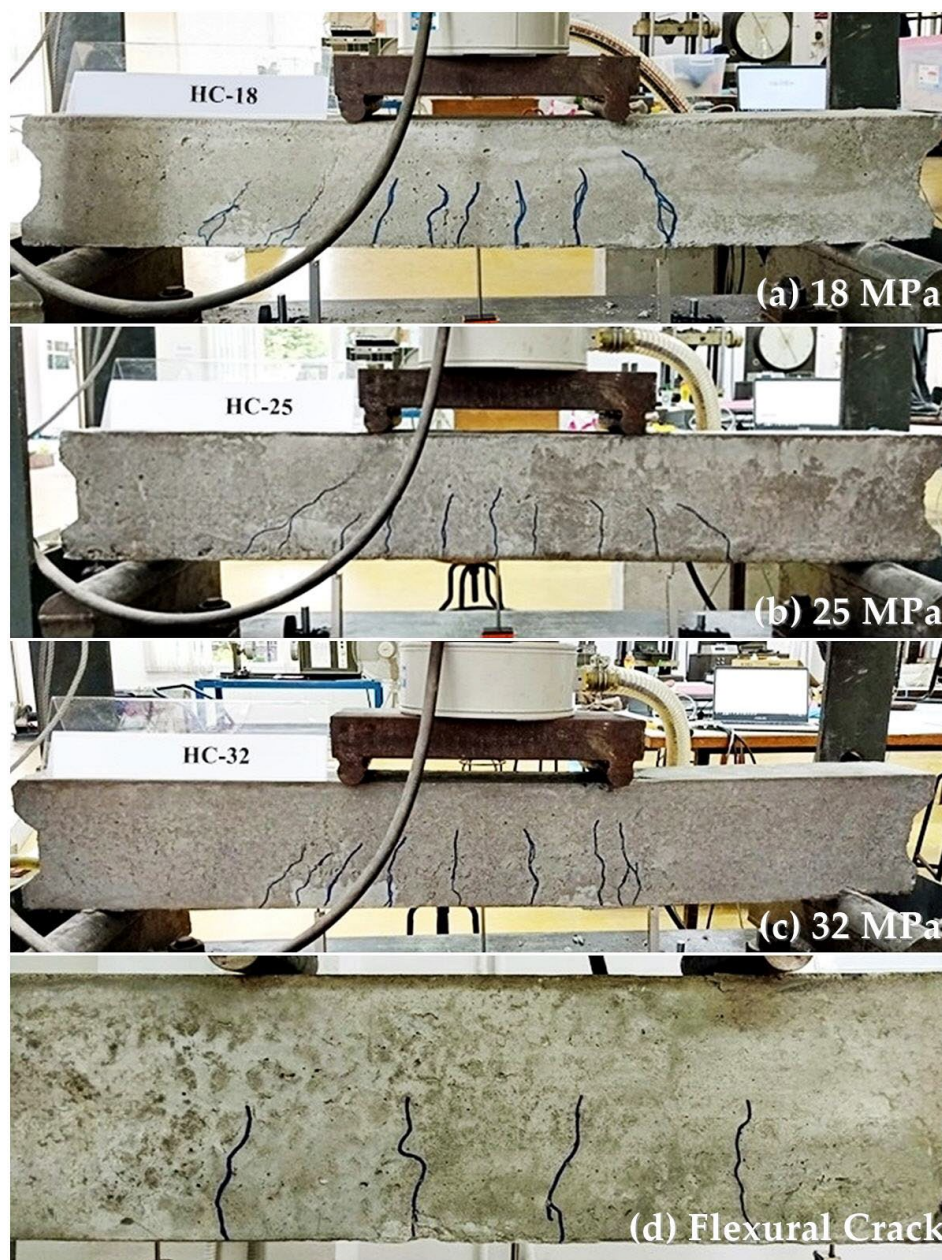
3.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการออกแบบคานตามมาตรฐาน ACI

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกระทำที่จุดครากของคานที่ทดสอบได้ ที่อายุบ่มเท่ากับ 28 วัน ($P_{test,28D}$) และ 90 วัน ($P_{test,90D}$) ตามลำดับ และแรงกระทำที่จุดครากของคานที่คำนวณได้จากสมการออกแบบคานตามมาตรฐานของ ACI ($P_{n,ACI}$) จากตารางพบว่า ที่อายุบ่มคานเท่ากับ 28 วัน $P_{test,28D}$ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าต่ำกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 2) สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต ในทางกลับกัน ที่อายุบ่มคานเท่ากับ 90 วัน คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่า $P_{test,90D}$ สูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมี

ส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อคานมีอายุบ่มเพิ่มขึ้น [26]

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกระทำที่จุดครากของคานที่ทดสอบได้กับแรงกระทำที่คำนวณได้จากสมการออกแบบคานตามมาตรฐาน ACI ที่อายุบ่มเท่ากับ 28 วัน ($P_{\text{test},28\text{D}} / P_{n,\text{ACI}}$) พบว่า อัตราส่วน $P_{\text{test},28\text{D}} / P_{n,\text{ACI}}$ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.04 ถึง 1.05 และอัตราส่วน $P_{\text{test},28\text{D}} / P_{n,\text{ACI}}$ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

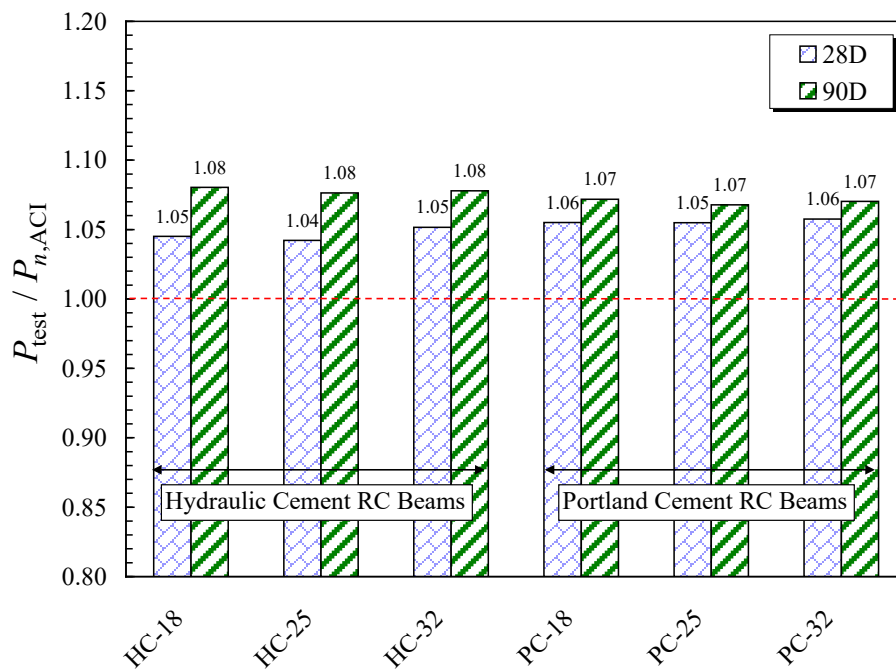
(คานอ้างอิง) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.05 ถึง 1.06 ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยอัตราส่วน $P_{\text{test}} / P_{n,\text{ACI}}$ ดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1.0 แสดงให้เห็นว่า สมการออกแบบคานโดยวิธีกำลังตามมาตรฐานของ ACI สามารถประเมินแรงกระทำที่จุดคราก (แรงกระทำที่ใช้ออกแบบ) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ที่อายุบ่มเท่ากับ 90 วัน อัตราส่วน $P_{\text{test},90\text{D}} / P_{n,\text{ACI}}$ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 1.08 โดยมีค่าต่างเพิ่มขึ้นจากที่อายุบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 2 ถึง 3



รูปที่ 7 การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบแรงกระทำที่จุดครากจากผลการทดสอบและสมการออกแบบของ ACI

Sample	Binder	$P_{test,28D}$ (kN)	$P_{test,90D}$ (kN)	$P_{n,ACI}$ (kN)	$\frac{P_{test,28D}}{P_{n,ACI}}$	$\frac{P_{test,90D}}{P_{n,ACI}}$
HC-18	Hydraulic Cement	62.3	64.4	59.6	1.05	1.08
HC-25		64.0	66.1	61.4	1.04	1.08
HC-32		65.9	67.6	62.7	1.05	1.08
PC-18	Portland Cement	63.0	64.0	59.7	1.06	1.07
PC-25		64.9	65.7	61.5	1.05	1.07
PC-32		66.4	67.2	62.7	1.06	1.07



รูปที่ 8 เปรียบเทียบผลการทดสอบและสมการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ ACI

ดังนั้น จากการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมและประเมินกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกแสดงให้เห็นว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเท่า และการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกนอกจากมีประโยชน์ในด้านสิ่งแวดล้อมและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ยังสอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยปี พ.ศ. 2564 ถึง 2573 และตอบโจทย์การพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างยั่งยืนได้เป็นอย่างดี

4. สรุปผล

จากการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า

1) พฤติกรรมการรับแรงกระทำและลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยช่วงแรกตัวอย่างคานทั้งสองประเภทมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น โดยคอนกรีตและเหล็กเสริมร่วมกันรับแรงจนกระทั่งแรงกระทำมีค่าประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 ของแรงกระทำสูงสุด เมื่อถึงจุดที่แรงกระทำมี

ค่าประมาณร้อยละ 80 ถึง 90 ของแรงกระทำสูงสุด จุดนี้พบว่าเหล็กเสริมเกิดการคราก จากนั้น พฤติกรรมจะเข้าสู่ช่วงที่ 2 ความชันของเส้นกราฟมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากคอนกรีตส่วนล่างของคานเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและขยายตัวสูงขึ้น เมื่อถึงแรงกระทำสูงสุด การแตกร้าวของคอนกรีตจะขยายตัวมากขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ

2) การวิบัติคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีลักษณะแบบ Flexural failure เริ่มต้นจากคอนกรีตที่ผิวล่างบริเวณกึ่งกลางคานเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงคดในแนวตั้งกระทำตั้งฉากกับแนวแกนของคาน จากนั้น รอยร้าวจะขยายตัวและเพิ่มจำนวนมากขึ้นตามขนาดของแรงกระทำ

3) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าแรงกระทำที่จุดครากต่ำกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 2 อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 90 วัน แรงกระทำที่จุดครากของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าสูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อคานมีอายุบ่มเพิ่มขึ้น

4) สมการออกแบบคานตามมาตรฐานของ ACI สามารถประเมินแรงกระทำที่จุดครากหรือแรงกระทำที่ใช้ออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกได้อย่างถูกต้อง

5) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างเทียบเท่า ดังนั้น การประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในรูปแบบที่เสนอในการศึกษานี้จึงเป็นหนึ่งในการดำเนินการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมสังคมคาร์บอนต่ำอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่สัญญา FF66-P2-004

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Thumrongvut, S. Seangatith and K. Kumlue, "Effects of Flexural Strengthening with Non-Prestressed Wires on Precast Partially-Prestressed Concrete Beams," *RMUTI Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 16–33, 2014. (in Thai)
- [2] M. Lehmann and W. Glodkowska, "Shear Capacity and Behaviour of Bending Reinforced Concrete Beams Made of Steel Fibre-Reinforced Waste Sand Concrete," *materials*, vol. 14, no. 11, 2021, Art. no. 2996, doi: 10.3390/ma14112996.
- [3] J. Thumrongvut, S. Seangatith and K. Kumlue, "Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints," *RMUTI Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 15–30, 2013. (in Thai)
- [4] T. Bobalo, Y. Blikharsky, J. Selejdak, N. Kapiika and Z. Blikharsky, "Concrete Beams Reinforced with High Strength Rebar in Combination with External Steel Tape," *applied sciences*, vol. 13, no. 7, 2023, Art. no. 4528, doi: 10.3390/app13074528.
- [5] J. Thumrongvut, S. Seangatith, C. Phetchuay and C. Suksiripattanapong, "Comparative Experimental Study of Sustainable Reinforced Portland Cement Concrete and Geopolymer Concrete Beams Using Rice Husk Ash," *sustainability*, vol. 14, no. 16, 2022, Art. no. 9856, doi: 10.3390/su14169856.
- [6] T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, S. Detphan, J. Thumrongvut, C. Suksiripattanapong, N. Damrongwiriyapap, P. Chindaprasirt and S. Hatanaka, "Shear Bond Strength of FA-PC Geopolymer under Different Sand to Binder Ratio and Sodium Hydroxide Concentration," *International Journal of Geomate*, vol. 14, no. 42, pp. 52–57, 2018, doi: 10.21660/2018.42.7152.
- [7] N. Bokkhumthod, J. Thumrongvut, J. Supromwan and S. Seangatith, "Experimental Study of Cellular Lightweight Concrete-Filled Steel Tube Columns

- Using Hydraulic Cement,” *Key Engineering Materials*, vol. 922, pp. 147–152, 2022, doi: 10.4028/p-3zquh9.
- [8] M. Ghrici, S. Kenai and M. Said–Mansour, “Mechanical Properties and Durability of Mortar and Concrete Containing Natural Pozzolana and Limestone Blended Cements,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 7, pp. 542–549, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009.
- [9] *Hydraulic cement*, TIS 2594–2556, Thai Industrial Standards Institute, Bangkok, Thailand, May. 2013
- [10] *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*, ASTM C1157–17, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- [11] J. Thumrongvut, P. Khamphay, S. Seangathith, S. Pantawee and J. Supromwan, “Axial Load Performance of Concrete–Filled Steel Tube Columns with Hydraulic Cement and Strengthened by Steel Bars,” *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 40, no. 2, pp. 117–127, 2023. (in Thai)
- [12] N. Joysoongnern, J. Thumrongvut, C. Suksiripattanapong and S. Seangathith, “Behavior and Strength of Circular Hydraulic Cement Concrete–Filled Steel Tube Columns,” *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 348–360, 2023. (in Thai)
- [13] *Portland Cement*, TIS 15–2562, Thai Industrial Standards Institute, Bangkok, Thailand, 2019.
- [14] *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, ACI 211.1–91, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2009.
- [15] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen*, ASTM C39–18, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2018.
- [16] *Standard Specification for Deformed and Plain Carbon–Steel Bars for Concrete Reinforcement*, ASTM A615, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2018.
- [17] *Building Code Requirements for Structural Concrete*, ACI 318–19, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2019.
- [18] J. Thumrongvut and S. Seangathith, “Effect of Embedded Length Steel Channel Sections on Precast Reinforced Concrete Beams,” *Suranaree Journal of Science and Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 11–19, 2006. (in Thai)
- [19] A. R. Mazumdar and T. Pheeraphan, “Comparative Study of Properties of Concrete Made of Hydraulic Cement (TIS 2594) and Ordinary Portland Cement (TIS 15),” *Journal of Thailand Concrete Association*, vol. 9, no. 1, pp. 1–6, 2021.
- [20] S. Pantawee, J. Thumrongvut, J. Supromwan, C. Suksiripattanapong, N. Joysoongnern and W. Chupkhunthod, “Axial Compression Performance of Rectangular Concrete–Filled Steel Tubular Columns Using Environmentally Friendly Hydraulic Cement,” *RMUTI Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 66–77, 2023. (in Thai)
- [21] G. L. Golewski, “The Role of Pozzolanic Activity of Siliceous Fly Ash in the Formation of the Structure of Sustainable Cementitious Composites,” *sustainable chemistry*, vol. 3, no. 4, pp. 520–534, 2022, doi: 10.3390/suschem3040032.
- [22] G. du Toit, E. M. van der Merwe, R. A. Kruger, J. M. McDonald and E. P. Kearsley, “Characterisation of the Hydration Products of a Chemically and Mechanically Activated High Coal Fly Ash Hybrid Cement,” *minerals*, vol. 12, no. 2, 2022, Art. no. 157, doi: 10.3390/min12020157.
- [23] M. Alhassan, R. Al-Rousan and A. Ababneh, “Flexural Behavior of Lightweight Concrete Beams

- Encompassing Various Dosages of Macro Synthetic Fibers and Steel Ratios. Case Studies in Construction Materials,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 7, pp. 280–293, 2017, doi: 10.1016/j.cscm.2017.09.004.
- [24] A. A. Mohammed, “Flexural Behavior and Analysis of Reinforced Concrete Beams Made of Recycled PET Waste Concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 155, pp. 593–604, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.096.
- [25] A. Fuzail Hashmi, M. Shariq and A. Baqi, “Flexural performance of high volume fly Ash reinforced concrete beams and slabs,” *Structures*, vol. 25, pp. 868–880, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.03.071.
- [26] A. Naqi and J.G. Jang, “Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low–Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review,” *sustainability*, vol. 11, no. 2, 2019, Art. no. 537, doi: 10.3390/su11020537.