

กำลังดัดของคานคอนกรีตผสมเถ้าลอยหลังเพลิงไหม้และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว

Post-Fire Flexural Strength of The Fly Ash Concrete Beams and Rapid Cooling Down

วรัญ วงศ์ประชุม¹ และ เฉลิมพล ไชยแก้ว^{2,*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
บางกระสอ เมือง นนทบุรี 11000

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
หนองแก หัวหิน ประจวบคีรีขันธ์ 77110

Warun Wongprachum¹ and Chalermphol Chaikaew^{2,*}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Bang Krasor, Nonthaburi, 11000, Thailand

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Wang Klai Kangwon Campus, Nong Kae, Hua Hin, Prachuap Khiri Khan, 77110, Thailand

*Corresponding Author E-mail: chalermphol.c@rmutr.ac.th

Received: Aug 27, 2021; Revised: Oct 25, YEAR; Accepted: Oct 29, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีตผสมเถ้าลอยหลังสภาวะเพลิงไหม้และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว และผลกระทบของระยะเวลาที่สัมผัสความร้อน ตัวอย่างทดสอบ คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยขนาด 10×10×35 เซนติเมตร แบ่งออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ 1) คานคอนกรีตผสมเถ้าลอย 2) คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เผาไหม้และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (ด้วยการแช่น้ำ) 3) คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เผาไหม้และเย็นตัว (ในอากาศ) กระบวนการทดสอบ คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะถูกนำไปเผาไฟอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที จากนั้นจึงนำไปทดสอบการรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C78/C78M ผลการทดสอบ พบว่า ค่ากำลังดัดสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะที่สัมผัสความร้อนในระยะเวลาที่นานขึ้น และตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการแช่น้ำจะสูญเสียค่ากำลังดัดน้อยกว่าตัวอย่างที่เย็นตัวในอากาศ เนื่องจากการปล่อยให้เย็นตัวในอากาศนั้น คานคอนกรีตจะมีความร้อนสะสมในอุณหภูมิที่สูงอยู่ ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในคานคอนกรีตผสมเถ้าลอยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ค่ากำลังดัดลดลงตามไป และการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อายุต้นกำลังของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย จะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน แต่การพัฒนากำลังที่อายุปลายของตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน แต่หากเมื่อถูกเผาไหม้ในอุณหภูมิสูงจะสูญเสียค่ากำลังอย่างมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากความพูนในเนื้อคอนกรีตลดลง

คำสำคัญ: สมรรถนะการรับแรงดัด, กำลังดัดคอนกรีตผสมเถ้าลอย, คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยในสภาวะเพลิงไหม้

Abstract

The purpose of this research is to test the post-fire flexural strength of the fly ash concrete beams and its rapid cooling down, as well as the effect of its exposure to heat. The test samples are three sets of 10×10×35 cm fly ash concrete beams which are 1) fly ash concrete beams, 2) fire-burnt of the fly ash concrete beams which cooled down rapidly (by soaking in the water), and 3) fire-burnt of the fly ash concrete beams which cooled down (in the air). For the experimental process, the fly ash concrete beams will be fire-burnt at the temperature of 400 degrees Celsius for 15, 30, and 45 minutes respectively. After that, the items will be brought to the standard flexural strength test of C78/C78M. The test results reveal that the flexural strength rate will decrease if the sample is being exposed to heat for a longer period of time, and the sample which is cooling down rapidly by soaking in the water will lose its flexural strength rate less than the sample which is left to be cooled down in the air. The reason was, leaving the items to cool down in the air, the item will have a rather high accumulated heat, resulting in a water evaporation in the fly ash concrete beams to occur continuously, leading to the subsiding of its flexural strength rate. The early age fly ash concrete is strength less valuable than concrete without fly ash, but at the long term it is strength higher than concrete without fly ash. However, if at high temperatures residual strength of due primarily to the reduced porosity.

Keywords: Flexural strength performance, Flexural strength of the fly ash concrete, Post-Fire flexural strength of the fly ash concrete beams

1. บทนำ

คุณสมบัติการทนความร้อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนับเป็นคุณสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับความปลอดภัยของการใช้งาน เนื่องจากในปัจจุบันมีอาคารที่เกิดเหตุเพลิงไหม้ และได้รับความเสียหายอยู่มาหลาย การวิเคราะห์เบื้องต้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะนำมาซึ่งการตรวจสอบเชิงวิศวกรรม เมื่อคอนกรีตถูกเพลิงไหม้หรืออยู่ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นกำลังของคอนกรีตจะมีค่าลดลงส่งผลต่อคุณสมบัติของเหล็กเสริม ซึ่งคอนกรีตมีคุณสมบัติการทนไฟได้ดีในช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น [1] แต่ในอุณหภูมิที่สูงถึง 300 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลง ส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์จะหดตัว ขณะที่มวลรวมมีการหดตัวน้อยกว่า เพราะเป็นวัสดุเนื้อ ซึ่งการหดตัวภายในของคอนกรีตที่ไม่สัมพันธ์กันนี้ ทำให้โครงสร้างภายในคอนกรีตเกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้น [2] และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 400–600 องศาเซลเซียส แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) ในคอนกรีตจะแตกตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ประกอบกับมีการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้น

และมวลรวมเปลี่ยนสถานะเกิดเป็นการขยายตัว ดังนั้นคอนกรีตจึงเกิดการแตกร้าวมากขึ้น [3]

ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุปอซโซลานกันอย่างแพร่หลายในการเพิ่มคุณสมบัติด้านการทนความร้อนของคอนกรีต ซึ่งวัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดก็คือ เถ้าลอย (Fly Ash) เนื่องจากมีราคาถูก เถ้าลอยจะเข้าไปปรับปรุงความทึบแน่นของโครงสร้างภายในคอนกรีต (Filling Effect) และผลิตสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก [4] และการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตก็เป็นที่ยอมรับอย่างมาก ยิ่งหากเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณของแคลเซียมสูงด้วยนั้น จะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อคอนกรีตได้รับการปรับปรุงและมีที่หนาแน่นกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติที่ไม่ได้รับการผสมเถ้าลอย [5] แต่จากคุณสมบัติที่กล่าวมาเมื่อคอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากถูกเผาไหม้ในอุณหภูมิสูงจะสูญเสียค่ากำลังอย่างมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า เนื่องจากความพรุนในเนื้อคอนกรีตมีผลต่อสถานะขยายตัวของน้ำในช่วงว่าง [6] และการรับกำลังของคอนกรีตหลังถูกเผาไหม้จะเปลี่ยนไปตามระยะเวลา และอุณหภูมิที่ถูกเผาไหม้กำลังที่ลดลงจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น [7]

จากข้อมูลดังกล่าวเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะเพลิงไหม้ โดยที่โครงสร้างขององค์อาคารได้รับผลกระทบหลายส่วน ได้แก่ พื้น คาน เสา ในองค์ประกอบของโครงสร้างที่ถูกเผาไหม้ภายในอาคารส่วนใหญ่บริเวณพื้นและคานจะเป็นจุดเริ่มที่ได้รับความเสียหายส่วนแรก ถึงแม้คอนกรีตจะมีคุณสมบัติที่ดีต่อการทนไฟ มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อย มีกำลังอัดและกำลังดัดที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก หรืออาจกลับสูงขึ้นเมื่อได้รับความร้อนเพียงเล็กน้อย แต่ข้อด้อยของคอนกรีตตรงที่เป็นวัสดุประณีตมีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำ เมื่อคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (Concrete Covering) ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างและเป็นส่วนแรกที่ได้รับความร้อนและความเสียหายจากการเผาไหม้ ได้หลุดร่อนกะเทาะออกจากกลไกการเกิด Spalling ของคอนกรีตที่ถูกเผาไหม้ในอุณหภูมิสูงส่งผลให้เหล็กเสริมล่งหลุดห้อย โครงสร้างจะสูญเสียคุณสมบัติของเหล็กเสริมรับกำลังดึงไม่คงสภาพเป็นโครงสร้างคอมโพสิต เมื่อกำลังของคอนกรีตส่วนที่เหลืออยู่สูญเสียกำลังดัดในเวลาต่อมา โครงสร้างพื้นและคานจะเกิดการวิบัติ ซึ่งโครงสร้างพื้นและคานจะเกิดการวิบัติในรูปแบบเดียวกัน คือ จากค่ากำลังดัดที่ลดลง แต่อย่างไรก็ตามคานก็เป็นโครงสร้างหลักที่มีความสำคัญในการรับกำลังมากกว่าเมื่อเทียบกับพื้น เมื่อคานเกิดการวิบัติพื้นก็จะวิบัติตามไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลกระทบของเพลิงไหม้ที่มีผลต่อการสูญเสียกำลังดัดของคอนกรีต โดยเป็นการทดลองคานคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมเหล็ก เพื่อแสดงพฤติกรรมของวัสดุคอนกรีตเพียงอย่างเดียว จากข้อมูลดังกล่าวจึงสนใจที่จะศึกษาพฤติกรรมของวัสดุคอนกรีตส่วนที่เหลืออยู่ หลังจากคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมหลุดร่อนเป็นส่วนแรกจาก Spalling Zone ไปแล้ว และนอกจากนี้ยังสนใจศึกษาในผลกระทบหลังสภาวะเพลิงไหม้ที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วของคอนกรีต (เป็นการจำลองลักษณะการใช้น้ำในการดับเพลิงทำให้อุณหภูมิของโครงสร้างลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเหตุเพลิงไหม้อาคารส่วนใหญ่การระงับเหตุ หรือการดับเพลิงจะอาศัยการใช้น้ำเข้าดับ)

2. วัสดุ และวิธีการวิจัย

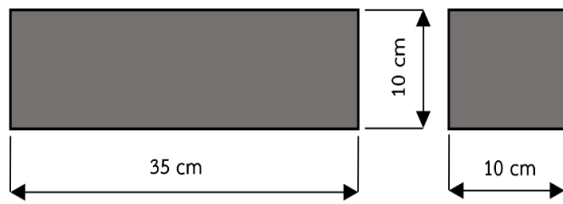
2.1. สัดส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

การออกแบบสัดส่วนผสมคานคอนกรีต โดยกำหนดค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วัน เท่ากับ 28 MPa ทรงกระบอกอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.55 ค่าการยุบตัวอยู่ที่ 7.5–12.5 เซนติเมตร โดยวัสดุประสานที่ใช้จะประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย ประเภท C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซังบิโหมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 [8] ตลอดจนการวิจัย และส่วนผสมคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยกำหนดชื่อเรียกตัวอย่างและสัญลักษณ์ ดังนี้ OPC หมายถึง คานคอนกรีตควบคุม CFA หมายถึง คานคอนกรีตผสมเถ้าลอย และในส่วนสัญลักษณ์ที่ต่อท้าย 15 30 45 หมายถึง เเผาไหม้ที่เวลา 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที ความคุมอุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส A ปลอ่ยให้เย็นตัวในอากาศ และ W เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยน้ำ โดยแต่ละชุดการทดสอบจะใช้คานคอนกรีตจำนวน 5 ตัวอย่างในการหาค่าเฉลี่ยผลทดสอบ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีต

Name	Mix Proportion (kg/m ³)			
	Cement	Fly Ash	Water	Aggregate
		30%		Fine Coarse
OPC	342	-	188	770 1,080
CFA	239	103	188	770 1,080

การทดสอบกำลังดัดจะใช้คานคอนกรีตขนาด 10×10×35 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ในขั้นตอนการหล่อตัวอย่างคานคอนกรีตนั้น จะเริ่มต้นโดยผสม วัสดุประสาน ทราซ น้ำ หิน ลงในโม่ผสมให้เข้ากันก่อน คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดโดยใช้เวลาประมาณ 3–5 นาที จากนั้นทำการเทคอนกรีตลดลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ภายหลังจากหล่อคอนกรีตจะทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออก นำตัวอย่างคานคอนกรีตบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน



รูปที่ 1 ตัวอย่างคานคอนกรีต

2.2. ขั้นตอนการเผาไฟและทดสอบกำลังดัด

การเผาไฟจะใช้คานคอนกรีต โดยผ่านการเผาที่ระยะเวลา 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยควบคุมให้เปลวไฟลุกไหม้อยู่ที่ผิวด้านล่างของตัวอย่างคานเท่านั้น และควบคุมความรุนแรงของไฟให้อยู่ในระดับเดียวกันตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2 การควบคุมความรุนแรงของไฟนั้นทำได้โดยการปรับความแรงของวาล์วแต่ละเตาให้มีอุณหภูมิที่เท่า ๆ กัน และทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของระดับอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตในแต่ละจุด ทุกๆ 1 นาที ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอัตโนมัติ (IR Thermometer) เพื่อเปรียบเทียบกันในการเผาแต่ละครั้ง เนื่องจากการจำลองสภาวะการเกิดเพลิงไหม้เสมือนจริง การทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยความร้อน เมื่อเกิดความร้อนสูงถึง 400 องศาเซลเซียส ที่เวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม กรณีไม่ได้ออกแบบให้เพียงพอต่อการทนไฟ จะเริ่มกะเทาะออกมอร์ตาร์เริ่มเปลี่ยนสภาพเป็น Quicklime จึงเป็นกรณีในการเลือกเวลาและอุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบ และเป็นการจำลองให้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของไฟที่เกิดเพลิงไหม้อาคารในแต่ละช่วงเวลา เช่น ช่วงการก่อตัวของไฟ (Growth Period) จะใช้เวลาประมาณ 15-20 นาที ความร้อนยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไปก็จะเข้าสู่ ช่วงการเผาไหม้ (Burning Period) จะใช้เวลาประมาณ 30-45 นาที และช่วงนี้เองถือว่าการพัฒนาตัวของไฟได้เกิดขึ้นเต็มที่อุณหภูมิในห้องจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเมื่อเวลาผ่านไปวัสดุได้ติดไฟและเผาไหม้จนหมด หรือมีขั้นตอนการดับเพลิงเกิดขึ้นอัตราการเผาไหม้จะลดลงซึ่งจะทำให้เข้าสู่ ช่วงการสลายตัว (Decay Period) [9] และการลดอุณหภูมิหลังการเผาไฟที่ใช้ในการทดสอบนี้ก็เป็นจำลองลักษณะเข้าสู่ช่วงสลายตัว การลดอุณหภูมิหลังการเผาไฟ โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ชุด 1) การเย็นตัวด้วยการแช่น้ำ ดัง

แสดงในรูปที่ 3 (ก) และ 2) การเย็นตัวในอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3(ข)



รูปที่ 2 การเผาไฟคานคอนกรีต



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 การลดอุณหภูมิหลังการเผาไฟ

(ก) เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยน้ำ (ข) ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

การทดสอบกำลังดัดสูงสุด (Maximum Flexural Strength) ได้ทำตามมาตรฐาน ASTM C78/C78M [10] โดยใช้เครื่อง UTM ขนาด 1,500 kN ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4 ค่าแรงดัดสูงสุด (P_{max}) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง

UTM จะถูกนำมาคำนวณหาค่าการรับกำลังดัดสูงสุด (f_{max}) ของคานคอนกรีตในงานวิจัยนี้ ตามสมการที่ (1)

$$f_{max} = \frac{P_{max}L}{bd^2} \quad (1)$$

โดย f_{max} หมายถึง กำลังดัดสูงสุด (MPa)

P_{max} หมายถึง แรงดัดสูงสุดจากการทดสอบ (kN)

L หมายถึง ความยาวช่วงพาดคาน (30 cm)

b หมายถึง ความกว้างคานทดสอบ (10 cm)

d หมายถึง ความสูงคานทดสอบ (10 cm)



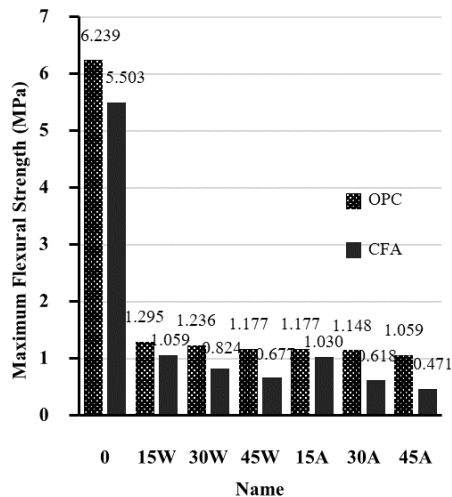
รูปที่ 4 การทดสอบกำลังดัด

3. ผลการทดลอง

3.1. ค่ากำลังดัดสูงสุดของคานคอนกรีต

ค่าเฉลี่ยกำลังดัดสูงสุดของคานคอนกรีตผสมเถ้าลอย (CFA) ที่ไม่ได้เผาไฟ มีค่าเท่ากับ 5.503 MPa คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เผาไฟและเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการแช่น้ำ (W) ที่ระยะเวลา 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที มีค่าเท่ากับ 1.059 MPa, 0.824 MPa และ 0.677 MPa ตามลำดับ คานคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เผาไฟและเย็นตัวในอากาศ (A) ที่ระยะเวลา 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที มีค่าเท่ากับ 1.030 MPa, 0.618 MPa และ 0.471 MPa ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า ในระยะเวลาช่วงต้นที่ 15 นาทีแรก คานคอนกรีตที่ถูกเผาไฟค่ากำลังดัดสูงสุดจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากคอนกรีตยังมีปริมาณน้ำหรือความชื้นในช่องว่างเนื้อคอนกรีตค่อนข้างสูง เมื่อถูกเผาไฟพฤติกรรมที่น้ำในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนสภาพเป็นไอแล้วดันตัวออกมาเกิดการระเหย รวดเร็วในช่วงต้น

ส่งผลต่อการเกิดการแตกร้าวและแตกร่อน (Spalling) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนสภาพน้ำในช่องว่างและความแตกต่างกันของอุณหภูมิในเนื้อคอนกรีต [11] และคานคอนกรีตที่ถูกเผาไฟเป็นระยะเวลาที่นานขึ้นจะทำให้ค่ากำลังดัดสูงสุดลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากคอนกรีตสัมผัสความร้อนในระยะเวลาที่นานขึ้นปริมาณน้ำในเนื้อโครงสร้างคอนกรีตจะระเหยออกไปเรื่อย ๆ ส่งผลต่อการหดตัวของผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผลึกแคลเซียมซลิเกตไฮเดรต อีกทั้งจะเกิดการแตกตัวเปลี่ยนสภาพอยู่ในรูปแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) พร้อมทั้งเกิดการขยายตัวของมวลรวม ก่อให้เกิดแรงดึงในคอนกรีตส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมลดน้อยลงจึงเกิดช่องว่างเล็ก ๆ ขึ้นมากมาย มีผลทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-Crack) ขึ้นภายในโครงสร้างคอนกรีต และขยายไปเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ (Macro-Crack) ต่อไป [12] และค่า Modulus of Elasticity ซึ่งเป็นคุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่คอนกรีตสูญเสียออกเนื่องจากด้านกำลังเมื่อถูกเผาไฟ และการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ จะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ด้วยเหตุนี้ที่อยู่ต้นกำลังของคานคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (CFA) จึงมีค่าต่ำกว่าคานคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC) ทุกระยะเวลา 15 นาที 30 นาที 45 นาที ทั้งสภาวะเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการแช่น้ำ (W) เย็นตัวในอากาศ (A) และกำลังของคอนกรีตที่อยู่ต้นมีค่าน้อยลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเถ้าลอย แต่อย่างไรก็ตาม การพัฒนากำลังที่อยู่ปลายของตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอย จะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอายุปลาย ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในสถานะบ่มน้ำ จะมีการพัฒนากำลังจากอายุ 28 วัน จนถึงอายุ 91 วัน สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน [13] แต่ในทางกลับกันปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อคอนกรีตได้รับการปรับปรุงและมีที่หนาแน่นมาก หากเมื่อถูกเผาไหม้ในอุณหภูมิสูงจะสูญเสียค่ากำลังอย่างมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า เนื่องจากความร้อนในเนื้อคอนกรีตมีผลต่อสภาวะการขยายตัวของน้ำในช่วงว่าง พฤติกรรมที่น้ำในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนสภาพเป็นไอแล้วดันตัวออกมาเกิดการระเหยส่งผลต่อการแตกร้าวเสียหายได้



รูปที่ 5 กำลังดัดของคานคอนกรีต

จากการทดสอบกำลังดัดสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC) และคานคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (CFA) สามารถนำค่าที่ได้มาทำการเปรียบเทียบในรูปแบบอัตราส่วนกำลังดัด ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ค่าอัตราส่วนกำลังดัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และค่าอัตราส่วนกำลังดัดจะมีค่าลดลงเมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะที่สัมผัสความร้อนในระยะเวลาที่นานขึ้น โดยค่ากำลังที่ลดลงเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่ดึงดูดระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ไฮดรอกไซด์ระเหยออกไป ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีที่เป็นกำลังหลักของซีเมนต์เจล เมื่อคอนกรีตสัมผัสความร้อนในระยะเวลาที่นานขึ้น ปริมาณน้ำระเหยออกไปอย่างต่อเนื่อง ส่งผลต่อการหดตัวของผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ จึงเกิดการแตกร้าวขนาดเล็กในโครงสร้างคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณการสูญเสีย [14] และจะเกิดการแตกตัวเปลี่ยนสภาพเป็นแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ซึ่งไม่อยู่ในสถานะเป็นวัสดุเชื่อมประสาน และตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการแช่น้ำ ความชื้นและน้ำจะเข้าไปเปลี่ยนสารประกอบแคลเซียมออกไซด์บางส่วนให้กลับไปอยู่ในรูปสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์อีกครั้ง [15] และตัวอย่างที่ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศนั้น คานคอนกรีตจะมีความร้อนสะสมในอุณหภูมิที่สูงอยู่ ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนกำลังดัดลดลงมากกว่าตัวอย่างที่เย็นตัวในน้ำ และแนวโน้ม

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC) และคานคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (CFA) และระยะเวลาที่เผาไหม้ 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที ดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อใช้เวลาในการเผาไหม้สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังดัดลดลง โดยสามารถแสดงสมการแนวโน้มความสัมพันธ์นี้ โดย x คือ เวลาที่อยู่ในช่วง 15 นาที ถึง 45 นาที และ y คือ กำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตผสมเถ้าลอย (MPa) ดังแสดงในสมการที่ (2) ถึง (5) คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC) กรณีตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการแช่น้ำ

$$y = -0.0039x + 1.3538 \quad (2)$$

กรณีตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

$$y = -0.0039x + 1.2459 \quad (3)$$

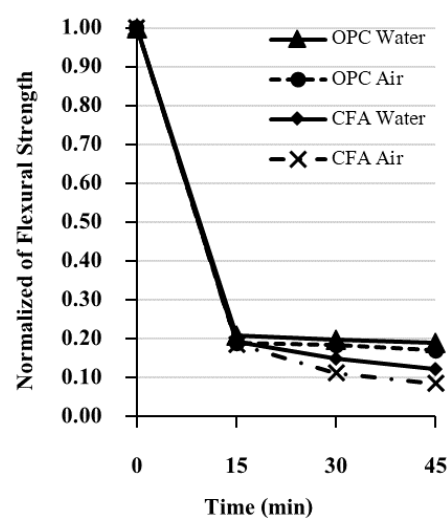
คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (CFA)

กรณีตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการแช่น้ำ

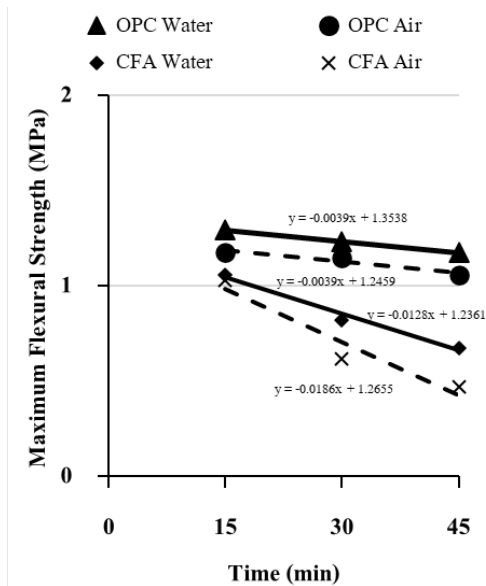
$$y = -0.0128x + 1.2361 \quad (4)$$

กรณีตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

$$y = -0.0186x + 1.2655 \quad (5)$$



รูปที่ 6 อัตราส่วนกำลังดัด



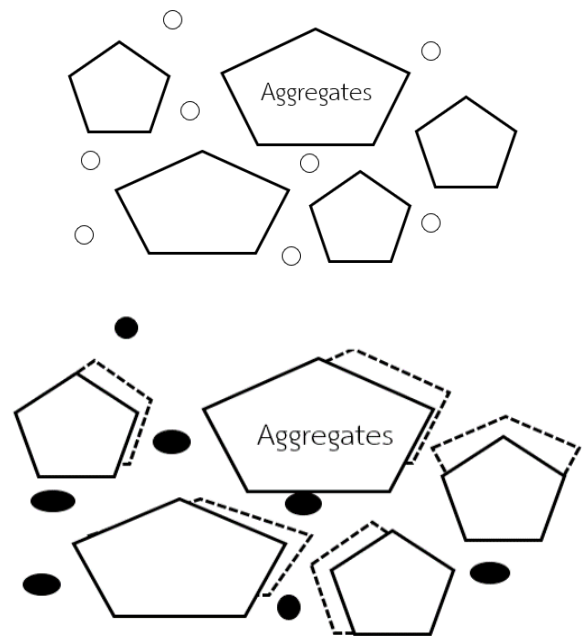
รูปที่ 7 แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดสูงสุด และระยะเวลาที่เผาไหม้

3.2.แบบจำลองการแสดงผลพฤติกรรมของคอนกรีตขณะเกิด

การเผาไหม้ และสภาพภายหลังการเผาไหม้

เมื่อคอนกรีตต้องสัมผัสกับความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะเกิดการขยายตัวของมวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 8 ทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็ก (Void Coalescence) มีการเชื่อมรวมตัวกันกลายเป็นรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-Crack) และขยายไปเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ (Macro-Crack) จนเกิดการแตกหักในที่สุด [3] และจากรูปที่ 9 การละลายตัวของมวลของคราบหินปูนสีขาวตามรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต เกิดจากการที่แคลเซียมออกไซด์ ละลายตัวในน้ำ ขณะที่มีการเผาไหม้ด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสอย่างต่อเนื่อง และยังพบการเปลี่ยนสีที่เนื้อคอนกรีตบริเวณนั้นจากสีเทา กลายเป็นสีน้ำตาลไหม้ โดยการเปลี่ยนสีของเนื้อคอนกรีตดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนสีอย่างถาวร

สภาพหลังจากทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีตที่ถูกเผาไหม้ พบว่าใน บริเวณใต้ท้องคานที่สัมผัสกับเปลวเพลิงโดยตรง เนื้อคอนกรีตจะหลุดร่อน กะเทาะออกมาในตำแหน่งที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบกำลังดัด ดังแสดงในรูปที่ 10 เนื่องมาจากบริเวณที่สัมผัสกับเปลวเพลิงโดยตรงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมมีกำลังลดลงอย่างมาก



รูปที่ 8 กลไกของคอนกรีตเมื่อถูกไฟไหม้



รูปที่ 9 รอยร้าวที่พบบนผิวคานคอนกรีตหลังเผาไหม้



รูปที่ 10 สภาพหลังจากทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีตที่ถูกเผาไหม้

4. อภิปรายผลและสรุป

ค่ากำลังคัดสูงสุดจะมีค่าลดลง เมื่อตัวอย่างอยู่ในสภาวะที่สัมผัสความร้อนในระยะเวลาที่นานขึ้น ส่งผลต่อการหดตัวของผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผลึกแคลเซียม ซิลิเกตไฮเดรต เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่ระเหยออกไป และตัวอย่างที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการแช่น้ำจะมีค่ากำลังคัดที่ลดลงน้อยกว่าตัวอย่างที่เย็นตัวในอากาศ เนื่องจากการปล่อยให้เย็นตัวในอากาศนั้น คานคอนกรีตจะมีความร้อนสะสมในอุณหภูมิที่สูงอยู่ ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่ากำลังคัดลดลงตามไป และการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ จะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ด้วยเหตุนี้ที่อายุคานกำลังของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย (CFA) จึงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC) และการพัฒนากำลังที่อายุปลายของตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอายุปลาย แต่หากเมื่อถูกเผาไหม้ในอุณหภูมิสูงจะสูญเสียค่ากำลังอย่างมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า เนื่องจากความพรุนในเนื้อคอนกรีตลดลงซึ่งมีผลต่อสภาวะการขยายตัวของน้ำในช่วงว่าง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่งานทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Botte and R. Caspee, "Post-Cooling Properties of Concrete Exposed to Fire," *Fire Safety Journal*, vol. 92, no. 3, pp. 142–150, Sep., 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.06.010.
- [2] C. S. Poon, S. Azhar, M. Anson and Y. L. Wong. "Strength and Durability Recovery of Fire-Damaged Concrete After Post-Fire-Curing," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 9, pp.1307–1318, Sep., 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00582-8.
- [3] O. Arioz, "Effects of Elevated Temperatures on Properties of Concrete," *Fire Safety Journal*, vol. 42, no. 8, pp. 516–522, Nov., 2007, doi: 10.1016/j.firesaf.2007.01.003.
- [4] Q. Li, X. Huang, Z.Huang and G. Yuan, "Bond Characteristics Between Early Aged Fly Ash Concrete and Reinforcing Steel Bar After Fire," *Construction and Building Materials*, vol. 147, no. 8, pp. 701–712, Aug., 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.184.
- [5] P. Nuaklong, P. Jongvivatsakul, T. Pothisiri, V. Sata and P. Chindaprasit, "Influence of Rice Husk Ash on Mechanical Properties and Fire Resistance of Recycled Aggregate High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 252, Apr., 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119797.
- [6] B.Zegardło, M.Szeląg and P. Ogrodnik, "Concrete Resistant to Spalling Made with Recycled Aggregate From Sanitary Ceramic Wastes – The Effect of Moisture and Porosity on Destructive Processes Occurring in Fire Conditions," *Construction and Building Materials*, vol. 173, pp. 58–68, Jun., 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.030.
- [7] F. Tariqa and P. Bhargava, "Flexural Behaviour of Corroded RC Beams Exposed to Fire," *Structures*, vol. 33, pp. 1366–1375, Oct., 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.05.025.
- [8] Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM C618-19
- [9] G.J. Langdon-Thomas, "Fire and Buildings," in *Fire Safety In Buildings*, 1st ed. London, United Kingdom : A & C Black, 1972, ch. 5, pp. 58–86.
- [10] Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM C78 / C78M – 21

- [11] M. Ozawa S. Uchida T. Kamada and H. Morimoto, "Study of Mechanisms of Explosive Spalling in High-Strength Concrete at High Temperatures Using Acoustic Emission," *Construction and Building Materials*, vol. 37, no. 8, pp.621–628, Dec, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.070.
- [12] V.Sairam, Pallapu B. J. N.Satish, K. Hemanth and K. Reddy, "Mechanical and Micro Structural Properties of Concrete Subjected to Elevated Temperature," *Materials Today: Proceedings*, vol.33, no.1, pp.626–631, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.606.
- [13] T. Srichan, B.Chatveera, P. Choktaweekarn and S. Tangtermsirikul, "A Study on Curing Sensitivity of Concrete with Different Cement Types and Mineral Admixtures," *KMUTT Research and Development Journal*, vol.34, no.4, pp. 383–394, 2011.
- [14] A. Lau and M. Anson, "Effect of High Temperatures on High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete," *Cement and Concrete Research*, vol.36, no.9, pp. 1698–1707, Sep., 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.03.024.
- [15] M. Malik, S. K. Bhattacharyya and S. V. Barai, "Microstructural Changes in Concrete: Postfire Scenario," *Journal of American Society of Civil Engineers*, vol.33, no.2, pp. 1–13, Feb., 2021, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003449.