

การศึกษาการลดคาร์บอนของคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยใช้เถ้าลอย เป็นส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

Study on carbon reduction of Ultra High-Performance Concrete using fly ash as an admixture instead of hydraulic cement

วรัญญู เอี่ยมพานิช¹ และ นันทวัฒน์ ขมหวาน^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address; fengnwk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของ คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีความแข็งแรงและความทนทานสูงกว่าแบบทั่วไป อย่างไรก็ตาม UHPC มีต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง เนื่องจากใช้ปูนซีเมนต์และซิลิกาฟุ่มในปริมาณมาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนา UHPC โดยลดการใช้ปูนซีเมนต์ผ่านการแทนที่ด้วย เถ้าลอย (Fly Ash) ในอัตราส่วน 0, 10, 20, 30 และ 40% พร้อมกับใช้ ซิลิกาฟุ่ม (Silica Fume) และ โยเหล็กเสริมคอนกรีต (Steel Fiber) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ผลการทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่าค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตอยู่ที่ 1631 กก./ตร.ซม. โดยคอนกรีตที่มี Fly Ash 40% ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 1480 กก./ตร.ซม. ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนประมาณ 20.41% อย่างไรก็ตาม ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและสามารถนำไปใช้งานทางวิศวกรรมโยธาได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การใช้ Fly Ash แทนปูนซีเมนต์ใน UHPC ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากอุตสาหกรรมก่อสร้างได้อย่างมีนัยสำคัญ พร้อมทั้งลดของเสียจากอุตสาหกรรมพลังงาน ทั้งนี้ UHPC มีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 100 ปี ลดความจำเป็นในการซ่อมแซมและใช้วัสดุใหม่ ส่งเสริมแนวทางการก่อสร้างที่ยั่งยืน

คำสำคัญ: คอนกรีตกำลังสูงพิเศษ, เถ้าลอย, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

ซิลิกาฟุ่ม, โยเหล็กเสริมคอนกรีต, กำลังอัด

Abstract

This research investigates the properties of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC), which exhibits superior strength and durability compared to conventional concrete. However, UHPC has higher costs and environmental impacts due to the significant use of cement and silica fume. Therefore, this study focuses on developing UHPC by reducing cement consumption through partial replacement with fly ash at 0%, 10%, 20%, 30%, and 40%. Additionally, silica fume and steel fibers were incorporated to enhance strength. The compressive strength test results at 28 days revealed an average compressive strength of 1,631 kg/cm². The UHPC mix with 40% fly ash replacement achieved the highest compressive strength of 1,480 kg/cm²,

which is approximately 20.41% lower than that of the control mix containing only cement. However, the strength remains within acceptable standards, making it suitable for civil engineering applications. Furthermore, replacing cement with fly ash in UHPC significantly reduces carbon dioxide (CO₂) emissions from the construction industry while minimizing industrial waste from power generation. Additionally, UHPC has a service life exceeding 100 years, reducing the need for repairs and new materials, thereby promoting sustainable construction practices.

Keywords: UHPC, Fly Ash, Hydraulic Cement, Steel Fiber, Compressive Strength

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้มากที่สุดในโลก แต่การผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก [1] โดยปล่อย CO₂ คิดเป็น 5-8% ของการปล่อยทั้งหมดจากกิจกรรมมนุษย์ การลดผลกระทบนี้ทำได้โดยลดปริมาณซีเมนต์และใช้วัสดุทดแทน เช่น Fly Ash ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหิน [2] การใช้ Fly Ash ช่วยลด CO₂ และเป็นแนวทางจัดการของเสียอย่างยั่งยืน ทั้งยังช่วยพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่ปล่อยคาร์บอนต่ำ ทำให้การก่อสร้างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

UHPC เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความแข็งแรงและทนทานสูง ซึ่งสามารถช่วยลดคาร์บอนในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ เนื่องจากมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 100 ปี ลดความจำเป็นในการซ่อมแซมและใช้วัสดุใหม่ นอกจากนี้ การใช้ Fly Ash หรือวัสดุทดแทนอื่น ๆ แทนปูนซีเมนต์ ยังช่วยลดการปล่อย CO₂ จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3]

อย่างไรก็ตาม UHPC ยังมีการปล่อยคาร์บอนในกระบวนการผลิต เนื่องจากต้องใช้พลังงานสูง [4] โดยเฉพาะการผลิตปูนซีเมนต์และการใช้สารเติมแต่งต่าง ๆ ถึงแม้ว่าการผลิต UHPC จะมีการปล่อย CO₂ มากกว่าคอนกรีตทั่วไปในระยะเริ่มต้น แต่ในระยะยาว การลดความต้องการซ่อมแซมและอายุการใช้งานที่ยาวนาน ทำให้ UHPC เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น แม้ว่า UHPC จะมีการปล่อยคาร์บอนในกระบวนการผลิต แต่ประโยชน์ด้านความทนทานและการ

ลดการใช้ทรัพยากรในระยะยาว ทำให้เป็นวัสดุที่สามารถช่วยลดคาร์บอนโดยรวมในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้

ดังนั้นจากการวิจัยโดยการใช้ Fly Ash แทนปูนซีเมนต์ใน UHPC เป็นแนวทางสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง [5] เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์เป็นแหล่งปล่อย CO₂ จำนวนมาก การนำ Fly Ash ซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหิน มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 10-40% สามารถช่วยลดการปล่อย CO₂ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ Fly Ash ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของ UHPC โดยเพิ่มความหนาแน่น ลดการซึมผ่านของน้ำ และเพิ่มความทนทานต่อสารเคมี คอนกรีตที่ใช้ Fly Ash แทนปูนซีเมนต์สามารถรักษากำลังอัดสูง ลดการแตกร้าว เหมาะสำหรับงานที่ต้องการอายุการใช้งานยาวนาน เช่น สะพาน อาคารสูง และโครงสร้างทางทะเล การใช้ Fly Ash แทนปูนซีเมนต์ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ทำให้ UHPC เป็นวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืนมากขึ้น

2. ตัวอย่างและขั้นตอนการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 1 อุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

คอนกรีต CT เป็นคอนกรีตที่ใช้ Cement Hydraulic เป็นวัสดุประสานหลัก โดยไม่มีการใช้ Fly Ash เป็นส่วนผสม เสริมความแข็งแรงด้วย Silica Fume ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีต นอกจากนี้ ยังมีการเติม สารลดน้ำพิเศษ เพื่อเพิ่มการไหลตัวของคอนกรีต ลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม ส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ดี องค์ประกอบอื่น ๆ ได้แก่ ทรายละเอียด ที่ช่วยเพิ่มความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีต และ Steel Fiber เหล็ก ซึ่งช่วยเสริมแรง ลดการแตกร้าว และเพิ่มความทนทาน

ให้กับโครงสร้างคอนกรีต CT โดยอัตราส่วนผสมเรียงตามลำดับดังนี้ Cement Hydraulic : Fly Ash : Silica Fume : Superplasticizer : Water : Fine sand : Steel fiber (1 : 0 : 0.14 : 0.02 : 1 : 0.16) ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

และทำการแทนที่ Cement Hydraulic ด้วย Fly Ash ในสัดส่วน 10 – 40 %

ส่วนประกอบอื่น เช่น Silica Fume, Superplasticizer, Water, Fine Sand และ Steel Fiber คงที่ เพื่อรักษาสสมบัติของคอนกรีตไว้

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติของวัสดุในงานวิจัย

(1) Fly-Ash มีอนุภาคละเอียดกว่า 45 ไมโครเมตร ความกว้างจำเพาะค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.2 (2) Cement Hydraulic มีขนาดเฉลี่ยอยู่ 0.2 มม. ความกว้างจำเพาะอยู่ในช่วง 6 - 20 มม. (3) Silica fume มีอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2 ไมโครเมตร ความกว้างจำเพาะค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.2 (4) Fine Sand มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม. ความกว้างจำเพาะค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.7 (5) Steel Fiber เส้นผ่านศูนย์กลางคือ 0.2 มม. ความยาวอยู่ในช่วง 2 - 5 มม.

2.3 ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่าง

2.3.1 เตรียมวัตถุดิบและวัสดุสำหรับงานวิจัย

2.3.2 ทำการปั่นแห้งวัตถุดิบทั้งหมดยกเว้น Steel fiber



2.3.3 นำสารละลายที่ผสมระหว่าง Superplasticizer ผสมกับน้ำตามอัตราส่วน

2.3.4 เติมน้ำสารละลายลงในวัตถุดิบที่ทำการบินแห้งหลังจากผ่านไป 5 นาที

2.3.5 เติมน้ำ Steel Fiber ลงไปหลังจากตัวอย่างมีลักษณะเหนียวแบบเห็นได้ชัด



2.3.6 ทำการเช็ค Flow ที่ Flow Table



2.3.7 นำตัวอย่างที่โดลงในแบบที่จัดเตรียมไว้ ในงานวิจัยนี้ใช้แบบหล่อซีเมนต์มอร์ต้าขนาด 5x5



2.3.8 ถอดแบบออกจากแบบหล่อและนำมาทดสอบกำลังอัด

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1 การวิเคราะห์อัตราส่วนผสม

การปรับอัตราส่วนของ Fly Ash และซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตนั้นส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลศาสตร์และความทนทานของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเพิ่มอัตราส่วนของ Fly Ash และลดอัตราส่วนของซีเมนต์จะช่วยเพิ่มความทนทานของคอนกรีตในระยะยาว แม้ว่าอัตราส่วนของซีเมนต์ที่ลดลงอาจทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้น แต่ในระยะยาวคอนกรีตจะมีความทนทานที่ดีกว่าและสามารถรับแรงดึงได้ดีขึ้น

การใช้ Fly Ash ในคอนกรีตช่วยเสริมสร้างโครงสร้างคอนกรีตให้หนาแน่นขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นระหว่าง Fly Ash กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากการไฮเดรชันของซีเมนต์ ซึ่งทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำและสารเคมีได้ดีขึ้น [6] นอกจากนี้ Fly Ash ยังช่วยให้ความเหนียวและความต้านทานแรงดึงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยการใช้ Steel Fiber ในสัดส่วนที่สูงขึ้นจะช่วยลดการแตกร้าวและเพิ่มความสามารถในการทนต่อแรงกระแทก

อีกทั้งการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำและการใช้ Silica Fume ในส่วนผสม จะช่วยลดความต้องการน้ำในการผสมคอนกรีต ทำให้สามารถควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ได้ดี ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต นอกจากนี้ Fly Ash ที่มีอนุภาคทรงกลมยังช่วยให้ส่วนผสมคอนกรีตมีความสามารถในการไหลและการเทได้ดีขึ้น ซึ่งทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรที่มีสัดส่วนซีเมนต์สูงกว่า

อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม Fly Ash และลดซีเมนต์อาจทำให้การพัฒนา กำลังอัดในช่วงต้นช้าลงเล็กน้อย แต่จะช่วยให้คอนกรีตมีความทนทานที่สูงขึ้นในระยะยาว นอกจากนี้ สารลดน้ำยังคงมีบทบาทสำคัญในการ

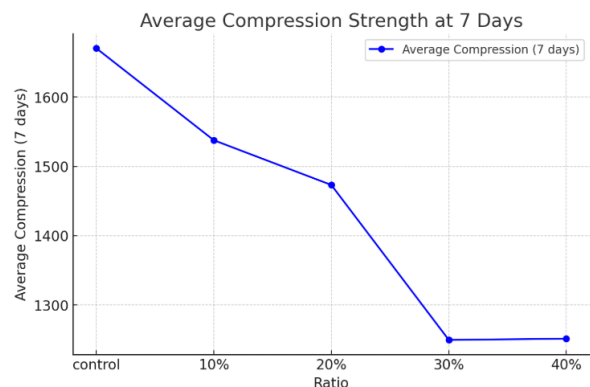
ปรับปรุงความสามารถในการทำงานของคอนกรีต โดยช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ และทำให้คอนกรีตสามารถพัฒนาได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

3.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างทั้ง 5 ส่วนผสม

ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน พบว่าคอนกรีต CT ซึ่งไม่มีการใช้ Fly Ash มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 1,670.46 กก./ตร.ซม. เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย Fly Ash ในอัตราส่วน 10%, 20%, 30% และ 40% พบว่าค่ากำลังอัดลดลงตามลำดับ สำหรับคอนกรีตที่ใช้ Fly Ash 10% และ 20% พบว่าค่ากำลังอัดอยู่ที่ 1,537.72 กก./ตร.ซม. และ 1,473.17 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากคอนกรีตควบคุม แต่ยังคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ Fly Ash 30% และ 40% มีค่ากำลังอัดลดลงอย่างชัดเจน โดยอยู่ที่ 1,249.47 กก./ตร.ซม. และ 1,251.30 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

3.3 การวิเคราะห์ผล

การลดลงของค่ากำลังอัด อาจเกิดจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ Fly Ash ที่ช้ากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้คอนกรีตที่มีปริมาณ Fly Ash สูงมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตาม ในระยะยาว Fly Ash สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) กับไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์ ทำให้โครงสร้างคอนกรีตแข็งแรงและหนาแน่นมากขึ้น เขียนเป็นกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 3 กราฟผลการทดสอบกำลังอัดอายุ 7 วัน

สรุปผลการทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต (ที่ 28 วัน) ตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย Fly Ash

ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ 28 วัน ภายใต้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย Fly Ash ตั้งแต่ 10% - 40% เทียบกับคอนกรีต CT ซึ่งไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์

3.3 การวิเคราะห์ผล

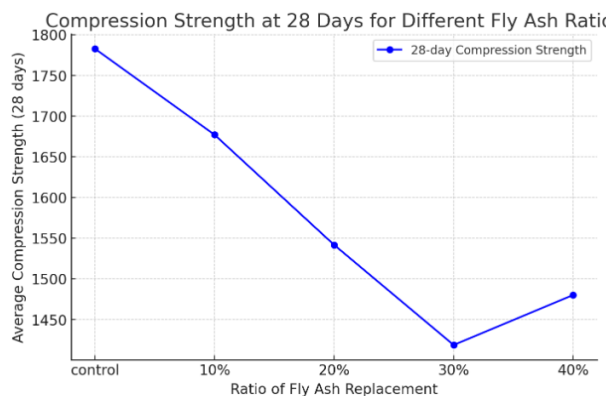
การลดลงของกำลังอัดคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ในช่วง 10% ถึง 30% เป็นผลโดยตรงจากการลดปริมาณซีเมนต์ ซึ่งเป็นตัวประสานหลักในช่วงต้นของการบ่มตัว แม้ว่าวัสดุทดแทน เช่น Fly Ash จะมีศักยภาพในการเสริมสร้างกำลังอัดในระยะยาว แต่ในช่วงแรกของการพัฒนากำลังอัด วัสดุเหล่านี้ยังออกฤทธิ์ไม่เต็มที่ นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อรักษาความสามารถในการทำงาน และการเปลี่ยนแปลงในการกระจายตัวของอนุภาคในส่วนผสม ก็เป็นปัจจัยเสริมที่ทำให้กำลังอัดลดลง การลดลงของกำลังอัดในช่วงดังกล่าวจึงเป็นผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับหลักการพื้นฐานของการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต [7]

การเพิ่ม Fly Ash จาก 30% เป็น 40% ในการผลิต UHPC อาจทำให้กำลังอัดลดลงในระยะแรก แต่ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม อาจช่วยเพิ่มกำลังอัดในระยะยาว ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดในระยะยาว คือ ปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่เกิดระหว่าง Fly Ash และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในซีเมนต์ ซึ่งช่วยสร้างสารประกอบที่เพิ่มกำลังอัดเมื่อเวลาผ่านไป

โครงสร้างจุลภาค ของคอนกรีตก็ได้รับการปรับปรุง เนื่องจากอนุภาคของ Fly Ash เติมช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและแข็งแรงขึ้น การเพิ่ม Fly Ash ยังช่วยลดความต้องการน้ำในการผสม ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง ซึ่งส่งผลดีต่อกำลังอัดของคอนกรีต

คุณสมบัติของ Fly Ash ที่ใช้มีผลต่อประสิทธิภาพการเพิ่มกำลังอัด การเลือกใช้ Fly Ash ที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มกำลังอัดในระยะยาว โดยการเพิ่ม Fly Ash ในสัดส่วนที่ 40% อาจช่วยเสริมประสิทธิภาพของคอนกรีตในระยะยาวโดยไม่กระทบต่อคุณสมบัติที่สำคัญ

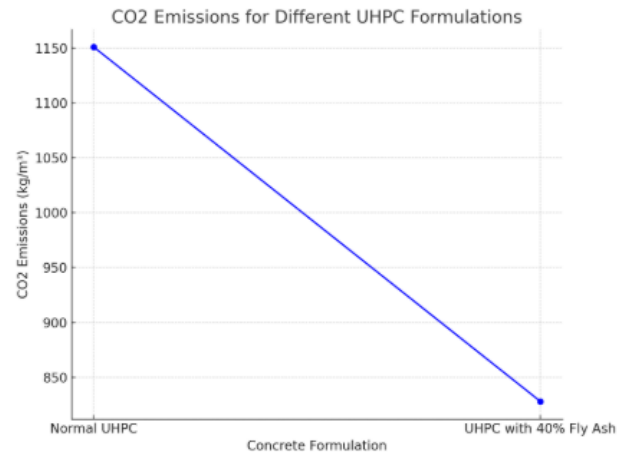
การเพิ่ม Fly Ash ในสัดส่วนที่สูงขึ้นต้องมีการทดลองและการพิจารณาอย่างรอบคอบ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดจากการใช้วัสดุนี้ใน UHPC



รูปที่ 4 กราฟผลการทดสอบกำลังอัดอายุ 28 วัน

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณ CO₂

ในกระบวนการผลิต UHPC การใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซ CO₂ ในระดับสูง โดยจากการคำนวณพบว่า UHPC สูตรปกติ มีการปล่อย CO₂ ประมาณ 1,150.9 กิโลกรัมต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร (1 คิว) ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เมื่อมีการปรับสูตรโดยการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง 40% และแทนที่ด้วย Fly Ash ซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้ที่มีการปล่อย CO₂ ต่ำกว่าอย่างมาก ปริมาณการปล่อย CO₂ ลดลงเหลือเพียง 828.1 กิโลกรัมต่อคิว สามารถลดการปล่อย CO₂ ได้ถึง 322.8 กิโลกรัมต่อคิว หรือคิดเป็นการลดลงประมาณ 28% เมื่อเทียบกับสูตรปกติ นอกจากการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแล้ว การใช้ Fly Ash ยังช่วยเพิ่มความทนทานของคอนกรีต เช่น ความต้านทานต่อการซึมของน้ำและการกัดกร่อนจากสารเคมี รวมถึงช่วยลดต้นทุนการผลิต อย่างไรก็ตาม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย Fly Ash อาจส่งผลให้กำลังอัดช่วงต้นลดลง จึงจำเป็นต้องควบคุมการบ่มอย่างเหมาะสมในช่วงระยะเวลาแรกหลังการเทคอนกรีต โดยสรุป การใช้ Fly Ash แทนปูนซีเมนต์ในอัตรา 40% ถือเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และการเพิ่มคุณภาพของคอนกรีตในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาการก่อสร้างอย่างยั่งยืนในปัจจุบัน [8]



รูปที่ 5 กราฟผลการเปรียบเทียบปริมาณ CO₂

3.4 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

ในยุคที่อุตสาหกรรมก่อสร้างมุ่งเน้นประสิทธิภาพ ต้นทุน และความยั่งยืน การใช้ Fly Ash แทนปูนซีเมนต์ใน UHPC จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ โดย Fly Ash เป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีราคาต่ำกว่าปูนซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ และช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การใช้ Fly Ash แทนที่ปูนซีเมนต์ในสัดส่วน 40% ช่วยลดต้นทุนวัสดุประมาณจาก 2,422.8 บาทต่อลูกบาศก์เมตร เหลือ 1,993.68 บาท หรือคิดเป็นการประหยัดประมาณ 17.7% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ การลดต้นทุนนี้ยังเสริมด้วยการลดต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งหากนำมาพิจารณาจะทำให้ความคุ้มค่าเพิ่มขึ้นอีก

ในด้านการใช้งานจริง UHPC ที่มี Fly Ash ยังมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ลดความถี่และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ส่งผลให้ต้นทุนตลอดวงจรชีวิต (Life Cycle Cost) ของโครงการลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในโครงการโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ เช่น สะพาน ถนน และอาคารสูง [10]

อย่างไรก็ตาม การใช้ Fly Ash ต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างเคร่งครัด เพื่อรักษาสมบัติเชิงกลของ UHPC เช่น กำลังอัด ความไหลตัว และความทนทานในระยะยาว พร้อมทั้งต้องประเมินความพร้อมของแหล่งวัตถุดิบอย่างต่อเนื่อง

3.5 การวิเคราะห์ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เป็นกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน เช่น Fly Ash แฉาเกลือ หรือดินภูเขาไฟ ละเียด ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง ปฏิกิริยานี้จะสร้างสารประกอบซิลิเกตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงและทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำ

วัสดุปอซโซลานโดยตัวมันเองไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะช่วยลดปริมาณสารที่อาจทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพในระยะยาว ทั้งยังช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานก่อสร้าง ซึ่งเป็นการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมซีเมนต์ เป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนแนวทางการก่อสร้างอย่างยั่งยืน

นอกจากนี้ คอนกรีตที่มีปฏิกิริยาปอซโซลานิกยังมีคุณสมบัติที่ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป เช่น มีความทนทานต่อสารเคมี ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริม และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ดังนั้น

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจึงมีบทบาทสำคัญในเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างยุคใหม่ ที่มุ่งเน้นทั้งความแข็งแรง ความทน และการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมไปพร้อมกัน [10]

4. สรุปผลการศึกษา

จากการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุทดแทน Fly Ash พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนวัสดุทดแทน ค่ากำลังอัดจะลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตที่ใช้วัสดุทดแทนในสัดส่วน 30% มีค่ากำลังอัดลดลงจากคอนกรีตที่ไม่ใช้วัสดุทดแทน (CT) ที่ 1670.459 ksc (7 วัน) และ 1782.698 ksc (28 วัน) มาเป็น 1249.468 ksc (7 วัน) และ 1418.812 ksc (28 วัน) แต่เมื่อใช้วัสดุทดแทน 40% ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การใช้วัสดุทดแทนช่วยลดการปล่อย CO₂ เนื่องจาก Fly Ash มีคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ การลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง 30% ช่วยลดการปล่อย CO₂ ได้ถึง 20-25% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ทั้งหมด จากมุมมองด้านเศรษฐศาสตร์ ต้นทุนของปูนซีเมนต์ที่ใช้ใน UHPC เมื่อแทนที่ บางส่วนด้วย Fly Ash 40% จะอยู่ที่ 1453.68 บาทต่อคิว (คำนวณจาก 540 กิโลกรัม × 2.692 บาท/กิโลกรัม) ขณะที่ต้นทุนของ Fly Ash อยู่ที่ 540 บาทต่อคิว (จาก 360 กิโลกรัม × 1.5 บาท/กิโลกรัม) ส่งผลให้ต้นทุน รวมของวัสดุประสานใน UHPC เท่ากับ 1993.68 บาทต่อคิว หากเปรียบเทียบกับ UHPC ที่ใช้ปูนซีเมนต์ทั้งหมด ซึ่งต้องใช้ 900 กิโลกรัม/คิว คิดเป็นต้นทุน 2422.8 บาทต่อคิว (900 × 3.5 บาท/กิโลกรัม) จะพบว่าการใช้ Fly Ash 40% สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 429.12 บาทต่อคิว หรือคิดเป็น 17.7% (บัญชีราคาวัสดุก่อสร้าง และค่าแรงงาน , 2567)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้การสนับสนุนการทดสอบงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

[2] Thomas, M. (2007). *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*. Portland Cement Association (PCA).

[3] Schneider, M. (2019). The cement industry is on the way to a low-carbon future. *Cement and Concrete Research*, 124, 105792. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>.

[4] Wille, K., & Naaman, A. E. (2012). Ultra-High-Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way. *ACI Materials Journal*, 109(4), 1–9.

[5] Naik, T. R., & Moriconi, G. (2005). Environmental-friendly durable concrete is made with recycled materials for sustainable concrete construction. *International Symposium on Sustainable Development of Cement, Concrete and Concrete Structures*, 3–14.

[6] Dheeresh Kumar Nayak, P.P. Abhilash, Rahul Singh, Rajesh kumar, Veerendraa Kumar (2022). Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies, *Cleaner Materials*, Volume 6, 100143.

[7] Hussein M. Hamada, Farid Abed, Herda Yati Binti Katman, Ali M. Humada, Mohammed S.Al Jawahery, Ali Majdi, Salim T. Yousif, Blessen Skariah Thomas (2023). Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, 8887-8908.

[8] Fadi Althoey, Wajahat Sammer Ansari, Muhammad Suifian, Ahmed Farouk Deifalla (2023). Advancements in low-carbon concrete as a construction material for the sustainable built environment, *Developments in the Built Environment*, Volume 16 , 100284.

[9] Yang, S., et al. (2020). Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis of UHPC Bridges. *Sustainability*, 12(12), 4965. <https://doi.org/10.3390/su12124965>.

[10] ASTM C618-19. (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International.