ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะ

Chloride Resistance of Concrete with Bottom Ash from MSW Power Plant

เจนณรงค์ จันทร์ยัง[1] ชลธิชา จันทร์เต็ม[1] พีระ ปานเขียว[1] ธนิยา เกาศล[1] และวิชัยรัตน์ แก้วเจือ[1,*]

1

Corresponding author; E mail address kwichairat@eng.psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเถ้าหนักที่เหลือใช้จากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมาใช้ในพัฒนาคุณภาพของคอนกรีต โดยจะศึกษาคุณสมบัติการแทรกซึมของคลอไรด์ เถ้าหนักจากการเผาขยะมาแทนที่มวลรวมละเอียดที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก กำหนดให้ค่ากำลังอัดออกแบบของคอนกรีตในการขึ้นรูปทรงลูกบาศก์มีค่าเท่ากับ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยปริมาณเถ้าหนักที่เพิ่มมากขึ้นในคอนกรีต ส่งผลทำให้ค่ากำลังอัดและค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมีค่าลดลง มีค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตใช้วิธีการวัดการผ่านของกระแสไฟฟ้าตามมาตฐาน ASTM C1202 อยู่ในระดับสูงสำหรับทุกส่วนผสมการแทนที่ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังนั้นสรุปได้ว่า เถ้าหนักจากการเผาขยะสามารถนำมาแทนที่เถ้าหนักในการผสมคอนกรีตได้ คอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติการต้านการแทรกซึมของคลอไรด์ได้น้อย สามารถนำคอนกรีตไปใช้งานได้ในบริเวณที่มีปริมาณคลอไรด์น้อย ๆ เช่น บริเวณที่ห่างจากทะเล

คำสำคัญ: เถ้าหนักจากการเผาขยะ, การแทรกซึมผ่านคลอไรด์, โรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะ, วัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรม

Abstract

The objective of research is to use the bottom ash from municipal solid waste (MSW) power plant to improve concrete properties. The chloride resistance of concrete is studied in this research. The bottom ash ratios to fine aggregate replacement are 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% by weight. Cube compressive strength is designed 240 ksc at 28 days of curing. The results are shown that the compressive strength and the density of concrete reduce with increasing the bottom ash in mixed concrete. On the contrary, the results of water absorption of concrete trends to increase with increasing the replacement ratio. The chloride penetration is evaluated by using measurement of the total charge passed in accordance with ASTM C1202. The ability of chloride ions to penetrate the concrete is high level for all replacement ratios at 28 days of curing. Therefore, this research indicates that the MSW bottom ash can be replaced fine aggregate in concrete mixes. The concrete containing MSW bottom ash provides the low chloride resistance. The concrete can be used in the area with low chloride content, such as in areas far from the sea.

Keywords: MSW bottom ash, chloride penetration, MSW power plant, industrial waste

1. ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเนื่องจากมีการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจำนวนมากโดยเชื้อเพลิงหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทย ได้แก่ น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล ถ่านหินลิกไนต์ และก๊าซธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เป็นพลังงานทางเลือก คือ ขยะซึ่งเป็นสิ่งของหรือเศษวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นทุกวัน ถึงแม้ว่าจะเป็นเรื่องที่ดีในการนำเอาขยะมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามผลจากการเผาขยะนั้นทำให้เกิดกากของเสียจำนวนมากเป็นเงาตามตัวด้วยเช่นกัน และหากพิจารณาประโยชน์จากการนำเอากากของเสียที่ได้จากการเผาขยะมาใช้ประโยชน์ในการแทนที่บางส่วนในมวลรวมละเอียด ซึ่งมวลรวมละเอียดส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานคอนกรีตจะเป็นทรายแม่น้ำหรือทรายบก ถือเป็นทรัพยากรที่มีอยู่น้อยลงและหายากขึ้นทุกวัน รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาในการกำจัดกากของเสียซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเอาขยะมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือใช้

โรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะ ซึ่งนำเอาขยะมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดกากของเสียจากการเผาขยะจำนวนมากที่ต้องกำจัดทิ้ง ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการกำจัดที่เพิ่มขึ้นและมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนใกล้เคียง หนึ่งในนั้นคือเถ้าซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาขยะมีสภาพเป็นเถ้าลอยและเถ้าหนัก ซึ่งอาจจะเป็นวัสดุปอซโซลานลาน (Pozzolanic Material) เป็นวัสดุที่มีสารจำพวกซิลิกา (Silica) และอลูมินา (Alumina) ปนอยู่ กล่าวคือสารเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เกิดเป็นปฏิกิริยาปอซโซลาน ผลที่ได้ทำให้ความแข็งแรงของ

คอนกรีตเพิ่มขึ้น การนำปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุปอซโซลานในสัดส่วนเหมาะสม จะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว [1] นอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตแล้วสิ่งหนึ่งที่น่าสนใจ คือ ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่มีความสำคัญในการนำไปใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลและพื้นที่ใกล้เคียง โดยคลอไรด์จากน้ำทะเลจะแทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมภายในจนเกิดสนิมส่งผลทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

ในอดีตได้มีนักวิจัยนำเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่แมะเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีต [2] โดยทำการพัฒนาคุณภาพเถ้าก้นเตาด้วยการบดให้มีขนาดเล็กลง จนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในอัตราร้อยละ 30-35, 15-20 และน้อยกว่าร้อยละ 5 ตามลำดับ จากนั้นใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วันเท่ากับ 200, 300 และ 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ได้ผลการทดสอบสรุปได้ว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตได้เป็นอย่างดี ต่อมา ไกรวุฒิ ตันติสุขารมย์ และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดในคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 700 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40 และ 60 โดยน้ำหนัก ผลที่ได้สรุปว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถนำมาใช้ในคอนกรีตสมรรถนะสูงเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ และความต้านทานของคอนกรีตต่อคลอไรด์และซัลเฟตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียด

ชาญชัย เงาะปก และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตพรุน โดยทำการใช้มวลรวมหยาบจากเถ้าก้นเตาขนาด 4.75-9 mm แทนที่มวลรวมหยาบจากหินปูนย่อยในปริมาณร้อยละ 40, 60 และ 100 โดยปริมาตร กำหนดให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับร้อยละ 20 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท F ในทุกส่วนผสม และทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตพรุน ได้แก่ กำลังอัด ความหนาแน่น การนำความร้อน และความสามารถในการดูดซับเสียง ที่อายุ 7 และ 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากเถ้าก้นเตาในทุกส่วนผสมจะมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมหยาบจากหินปูนล้วน การใช้มวลรวมหยาบชนิดเถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงแทนที่หินปูนในปริมาณที่มากขึ้น นอกจากจะทำให้ความหนาแน่นและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตพรุนมีค่าลดลงแล้วยังส่งผลให้การดูดซับเสียงของคอนกรีตพรุนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

อรรคเคช อับดุลมาติน และคณะ [5] ได้ทำการศึกษากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตาบดละเอียด 2 ชนิด ได้แก่ เถ้าก้นเตาจากถ่านหินลิกไนต์ (GLBA) และเถ้าก้นเตาจากถ่านหินบิทูมินัส (GBBA) เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าในช่วงอายุปลายของมอร์ตาร์ การใช้เถ้าก้นเตา GLBA และ GBBA ที่มีปริมาณอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3.70 และ 3.05 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์สูงที่สุด กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ควบคุม) ของมอร์ตาร์ GLBA ที่มีอัตราการแทนที่ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9-11 ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 13-17 ที่อายุ 90 วัน ขณะที่มอร์ต้าร์ GBBA มีกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานอยู่ระหว่างร้อยละ 15-25 และร้อยละ 17-38 ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าเตา GLBA มีค่าน้อยกว่าเถ้าก้นเตา GBBA ที่อัตราการแทนที่เท่ากัน แต่เถ้าก้นเตา GLBA ยังคงสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึง ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยมีค่ากำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 80 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วันขึ้นไป

ณปภัช คงฤทธิ์ และคณะ [6] ได้ทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมี ค่ากำลังอัด ค่าความหนาแน่น และระยะเวลาการบ่มของมอร์ตาร์ ที่ผสมเถ้าหนักยางพาราและเถ้าหนักปาล์ม โดยทำการใช้ปูนซีเมนต์แทนที่เถ้าหนักในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งควบคุมให้เถ้าหนักมีการกระจายตัวของอนุภาคผ่านตะแกรงเบอร์ 30 โดยบ่ม 0, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเถ้าหนักยางพารามีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ในการนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ดีกว่าเถ้าหนักปาล์ม มอร์ตาร์ที่ผสมปูนซีเมนต์แทนที่เถ้าหนักยางพาราร้อยละ 15 โดยน้ำหนักและระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน มีค่ากำลังอัดที่มากกว่าเถ้าปาล์มเท่ากับ 2.29 MPa และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 6,369 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งระยะเวลาการบ่มน้ำมีผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุถมกลับทางปิโตรเลียม โดยเถ้าหนักทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบของซิลิคอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อยู่ ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหลังจากทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เป็นวัสดุปอซโซลานที่เหมาะกับงานคอนกรีต

ดังนั้นโครงงานนี้จะทำการศึกษาการนำเถ้าหนักที่เกิดจากเผาขยะซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้หรือผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะ ที่มีคุณสมบัติที่อาจจะเป็นวัสดุปอซโซลานและมีขนาดใกล้เคียงเพียงพอที่จะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุแทนที่บางส่วนในมวลรวมละเอียด ทำให้เกิดประโยชน์ต่องานคอนกรีตและเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการใช้งานที่เหมาะสมต่อไปในอนาคต รวมไปถึงสามารถลดมลพิษที่เกิดจากการการกำจัดของเสีย และลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะได้อีกทาง

2. วัสดุประสานและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

2.1

คอนกรีต คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ใช้ในการก่อสร้าง อาคาร และสาธารณูปโภค ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพราะเป็น

วัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคา และคุณสมบัติต่าง ๆ คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม

2.1.1

ซีเมนต์เพสต์ทำหน้าที่เป็นตัวยึดวัสดุมวลรวมเข้าด้วยกัน กำลังของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio) ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มาก (น้ำมาก ปูนน้อย) กำลังของซีเมนต์เพสต์ก็จะน้อยในทางกลับกัน ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อย (น้ำน้อย ปูนมาก) กำลังของซีเมนต์เพสต์จะมากตาม ฉะนั้นการควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต จึงเป็นเรื่องสำคัญ การเพิ่มน้ำเพื่อให้คอนกรีตเหลวขึ้นทำงานได้ง่ายขึ้นโดยไม่เพิ่มปูนซีเมนต์ด้วยจะทำให้คอนกรีตที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าที่ต้องการ

2.1.2

วัสดุมวลรวมละเอียด (Fine aggregate) หมายถึงวัสดุมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือเป็นเม็ดที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ทั้งนี้จะต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร วัสดุมวลรวมที่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร เรียกว่า ฝุ่น (Silt หรือ Clay) วัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้กันทั่วไป คือ ทรายหยาบ

วัสดุมวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตร ขึ้นไป หรือที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ซึ่งได้แก่ หินย่อยกรวด การเลือกใช้วัสดุมวลรวมหยาบอาจกำหนดขนาด เพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างนั้น ๆ เช่น ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบอาจเป็น 1 ใน 5 ของความหนาของคาน หรือ 1 ใน 3 ของความหนาของพื้น ปฏิกิริยาระหว่างน้ำ และปูนซีเมนต์ เมื่อนำน้ำมาผสมกับปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งทำให้ปูนซีเมนต์แปรสภาพจากเม็ดเล็กละเอียด เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายเจลาติน ซึ่งจะค่อย ๆ แข็งตัวขึ้นตามลำดับ ตราบเท่าที่ยังมีน้ำเข้าทำปฏิกิริยาอยู่

2.1.3

คุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือการรับแรงอัดสูง ในขณะที่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ (ประมาณ 10% ของแรงอัด) โดยเมื่อต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึง จะมีการเสริมวัสดุอื่นเพิ่มเข้าไปในคอนกรีตโดยจะเรียกว่า คอนกรีตเสริมแรง หรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่เรียกกัน (โดยเสริมแรงด้วยเหล็ก) วัสดุเหล่านี้จะช่วยรับแรงดึงภายในคอนกรีต ซึ่งงานโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่นิยมใช้คอนกรีตเสริมแรงแทนที่คอนกรีตเปลือย การทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีต ที่ใช้กันแพร่หลาย คือ การทดสอบหาค่ายุบตัว (Slump Test) ตัวอย่างค่ายุบตัวที่เหมาะสมกับงานก่อสร้างทั่ว ๆ ไปในประเทศไทยมีแสดงไว้ในตารางที่ 1

2.2

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ตามคำจำกัดความของ ASTM C 618 หมายถึง วัสดุที่ ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Silica) และอลูมินา (Alumina) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH_2)$] ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

ตารางที่ 1 ค่าการยุบตัวที่เหมาะสมกับงานประเภทต่าง ๆ [6]

งานก่อสร้าง	ค่ายุบตัว)cm)
โครงสร้างทั่วไป	7.5 ± 2.5
เสาหรือผนังบาง	10.0 ± 2.5
งานที่เทด้วยคอนกรีตปั๊ม	10.0 ± 2.5
เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่	มากกว่า 15.0
โครงสร้างที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น	มากกว่า 15.0

2.2.1

ปฏิกิริยาปอซโซลานเมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จาก ปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO\text{-}2SiO_2\ 3H_2O$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}6H_2O$ หรือ C-A-H)

$$2(3CaO{\cdot}SiO_2) + 6H2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (1)$$

$$2(2CaO{\cdot}SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2)$$

$$3CaO{\cdot}Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}Al2O_3{\cdot}6H_2O \quad (3)$$

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการ ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] ที่เกิดจากสมการที่ (1) และ (2) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานคือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H)

$$Ca(OH)2 + SiO2 + H2O \longrightarrow xCaO{\cdot}ySiO_2{\cdot}zH2O \quad (4)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow xCaO{\cdot}yAl_2O_3{\cdot}zH_2O \quad (5)$$

ค่า x, y และ z ในสมการที่ 4 และ 5 เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนั้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

2.3

เถ้าหนัก (Bottom Ash) เกิดจากการรวมตัวของเถ้าถ่านหินที่ถูกหลอมเหลว และมีขนาด ค่อนข้างใหญ่และพรุน ปัจจุบันมีเถ้าถ่านหินกองทิ้งประมาณ 50 ล้านตัน และมีเถ้าหนักเกิดขึ้นประมาณ 0.8 ล้านตันต่อปี ในรูปที่ 1 เป็นการวิเคราะห์เถ้าหนักบดด้วย XRD พบว่ามีส่วนที่เป็น SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก และในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเถ้าหนักมาบดละเอียดให้ค่ากำลังที่สูงตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 1 XRD ของเถ้าหนักบด 45 ไมครอน [1]

รูปที่ 2 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าหนักบดละเอียด [1]

รูปที่ 3 แสดงขนาดการกระจายตัวของอนุภาคมาปรับปรุงและเปรียบเทียบกับทรายในงานคอนกรีตทั่วไป พบว่า กำลังมีค่าสูงขึ้นตามอายุการทดสอบ อย่างไรก็ตามกำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มการแทนที่ด้วยเถ้าหนักเป็นมวลรวมละเอียด ดังในรูปที่ 4 เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าหนักส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบลดปริมาณความต้องการน้ำ

รูปที่ 3 ขนาดการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าหนักและทราย [1]

รูปที่ 4 กำลังอัดของการแทนที่เถ้าหนักเป็นมวลรวมละเอียด [1]

เถ้าหนักถูกนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์วัสดุเหล่านี้เรียกว่า วัสดุปอซโซลาน การใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตคือการพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลัก จากมาตรฐาน ASTM C618 ได้แบ่งประเภทของเถ้าหนักออกตามองค์ประกอบทางเคมีเป็น 2 ชนิด ได้แก่ Class F และ Class C โดยที่ Class F จะประกอบด้วย SiO_2, Al_2O_3 และ FeO_3 รวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ของน้ำหนัก ส่วน Class C ประกอบด้วย SiO_2, Al_2O_3 และ FeO_3 รวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนัก แต่ไม่เกินร้อยละ 70 ของน้ำหนัก นอกจากนี้ข้อกำหนดอื่น ๆ ที่เหมือนกันทั้ง Class F และ Class C คือ ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ 5 ของน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 ของน้ำหนักค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก การเผา (Loss on ignition, LOI) ไม่เกินร้อยละ 6 ของน้ำหนัก แต่หากเป็น Class F อนุโลมให้มีค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผาไม่เกินร้อยละ 12 ของน้ำหนัก

2.4

2.4.1

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง หรือเจือปนในวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต อย่างเช่น หิน ทราย หรือ น้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่ กระทบต่อความทนทานของคอนกรีต ส่วนมากจะมาจากสภาพแวดล้อมภายนอกของคอนกรีต คลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตโดยวิธีดังต่อไปนี้

2.4.2 Chloride diffusion)

เป็นการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์จากภายนอก เข้าไปยังโพรงโดยคลอไรด์ โดยใช้ความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ กล่าวคือ คลอไรด์จะแพร่จากความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้จาก กฎการแพร่ ข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเกลือคลอไรด์ที่แพร่เข้าภายในของคอนกรีตเทียบกับระยะเวลา ดังสมการที่ (6)

$$\frac{\partial C_t(x,t)}{\partial t} = -Da\frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial^2 x} \qquad (6)$$

โดยที่

$C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา x

$C_f(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอก ที่ระยะเวลา x

Da คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต

x คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต

t คือ ระยะวลาที่เผชิญคลอไรด์

2.4.3

2.4.4 Ion adsorption)

เนื่องจากผนังของโพรงช่องว่างมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกจะดึงดูดคลอไรด์อิออนที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเข้าไปภายในคอนกรีตได้ประจุลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้า มาในคอนกรีตและสะสมอยู่บริเวณนั้นสูงขึ้น

2.4.5 Permeability)

เข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ มักเกิดจากโครงสร้างคอนกรีตที่มีแรงดันน้ำมากระทำ โดยใช้ความแตกต่างของ Hydraulic head กล่าวคือ คลอไรด์จะแพร่จาก Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่ Hydraulic head ที่ต่ำกว่า

ปัญหาคลอไรด์ที่กระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้นส่วนใหญ่มักจะมาจากสภาวะแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน คลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตทั้งหมดถูกเรียกว่าเกลือคลอไรด์ทั้งหมด ซึ่งเป็นผลรวมของเกลือคลอไรด์ 2 ประเภท คือ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และคลอไรด์อิสระ

3. วัสดุและวิธีการทดสอบ

3.1

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ เถ้าหนักจากการเผาขยะ จากการเผาขยะชุมชนของโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะ ซึ่งเป็นธุรกิจพลังงานและสาธารณูปโภค ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และน้ำ

3.2

3.2.1

สมบัติทางกายภาพของเถ้าหนักจากการเผาขยะที่ทดสอบได้แก่ ทดสอบศึกษาลักษณะสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของเถ้าหนัก ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) หาขนาดคละ ASTM C136 [7] ความถ่วงจำเพาะ ASTM C188 [8] และการดูดซึมน้ำ ASTM C128 [9] และสมบัติทางเคมีของเถ้าหนักจากการเผาขยะทดสอบด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

3.2.2

สมบัติทางกายภาพของเถ้าหนักจากการเผาขยะที่ทดสอบได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ASTM C188 [8]

3.2.3

สมบัติทางกายภาพของมวลรวมที่ทดสอบได้แก่ หาขนาดคละ ASTM C136 [7] การดูดซึมน้ำ ASTM C127 [10] และ ASTM C128 [9] และค่าช่องว่างระหว่างมวลรวม ASTM C29 [11]

3.2.4

สมบัติทางกายภาพของคอนกรีตสดที่ทดสอบได้แก่ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด โดยวิธี Slump Test ASTM C143 [12] และสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตขึ้นรูปทรงลูกบาศก์ ทรงกระบอก และแบบคานที่ทดสอบได้แก่ ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีต ASTM C642 [13] ค่ากำลังอัดของคอนกรีต ASTM C403 [14] ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ASTM C1202 [15] และค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต ASTM C596 [16]

4. ผลการทดสอบ

4.1

4.1.1

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าหนักจากการเผาขยะของโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมวลรวมละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2 ที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งพบว่า เถ้าหนักมีค่าความถ่วงจำเพาะ ต่ำกว่ามวลรวมละเอียด ทำให้เมื่อนำเถ้าหนักมาแทนที่มวลรวมละเอียดตามอัตราส่วนต่าง ๆ จะทำให้คอนกรีตมีแนวโน้มน้ำหนักลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักที่เพิ่มขึ้น

โมดูลัสความละเอียดพบว่า ค่าโมดูลัสความละเอียดของเถ้าหนักมีค่า 3.46 มากกว่ามวลรวมละเอียดที่มีค่า 3.20 แสดงให้เห็นว่าเถ้าหนักมีความหยาบมากกว่ามวลรวมละเอียด ซึ่งมวลรวมละเอียดที่นำมาใช้ทำโครงงานนี้มีค่าโมดูลัสที่เหมาะสม ส่วนเถ้าหนักจากการเผาขยะมีค่าโมดูลัสความละเอียดมากกว่าเกณฑ์ อาจจะส่งให้ผลจำเป็นต้องใช้น้ำมากขึ้นเพื่อให้มีความสามารถในการเทได้เท่า ๆ กันกับคอนกรีตทั่วไป

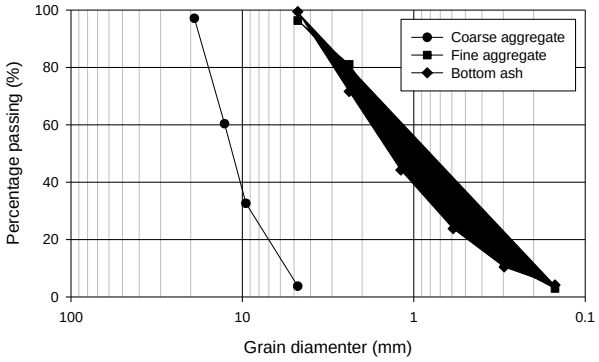
ความหนาแน่นอัดแน่นหรือหน่วยน้ำหนักพบว่า ค่าความหนาแน่นอัดแน่นของมวลรวมละเอียดมีค่า 1,730 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มากกว่าเถ้าหนักที่มีค่า 1,453 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะเห็นได้ว่ามวลรวมละเอียดที่นำมาใช้มีค่าที่สูงกว่าค่าที่ใช้ทั่วไป

4.1.2

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบหาขนาดคละของเถ้าหนักและมวลรวมละเอียด ดังรูปที่ 5 พบว่าเถ้าหนักจากการเผาขยะมีขนาดคละที่ใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด เป็นขนาดที่เหมาะสม เนื่องจากเส้นกราฟที่เขียนได้เป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอ ส่งผลทำให้สามารถนำเถ้าหนักมาแทนที่มวลรวมละเอียดในงานคอนกรีตได้

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมในคอนกรีต

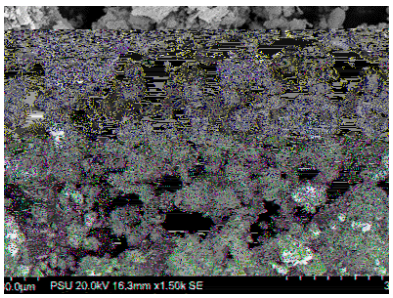
คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด	เถ้าหนัก
ความถ่วงจำเพาะ	3.05	2.78	2.58	2.27
โมดูลัสความละเอียด	-	6.66	3.20	3.46
ความหนาแน่นอัดแน่น (กก./ลบ.ม.)	-	1,605	1,730	1,453



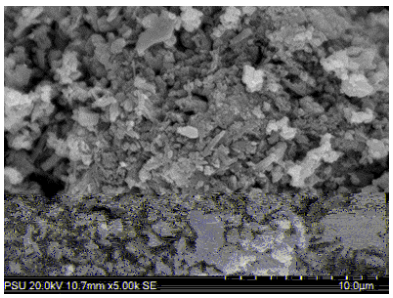
รูปที่ 5 ขนาดคละของมวลรวมและเถ้าหนัก

4.1.3

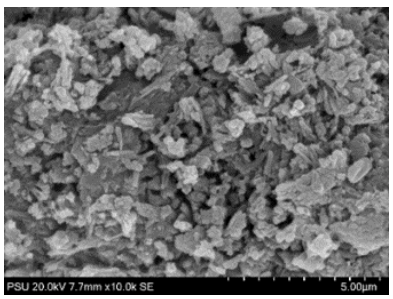
การนำเถ้าหนักไปทดสอบศึกษาลักษณะสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของเถ้าหนัก โดยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า 5,000 เท่า และ 10,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 6, 7 และ 8 ตามลำดับ พบว่าลักษณะพื้นผิวที่สังเกตโดยทั่วไปมีลักษณะเฉพาะที่ไม่แน่นอนอาจจะเป็นผลมาจากการเผาขยะที่มาจากครัวเรือนและชุมชนที่มีวัสดุที่มาจากหลายประเภท



รูปที่ 6 ภาพขยายของเถ้าหนักที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 7 ภาพขยายของเถ้าหนักที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 8 ภาพขยายของเถ้าหนักที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

4.1.4

เมื่อพิจารณาชั้นคุณภาพของวัสดุปอซโซลานตาม ASTM C618 จำแนกวัสดุปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่ ชั้นคุณภาพ N, F และ C โดยที่เถ้าจากการเผาขยะที่ใช้ไม่ผ่านชั้นคุณภาพตามเกณฑ์คุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานกำหนด

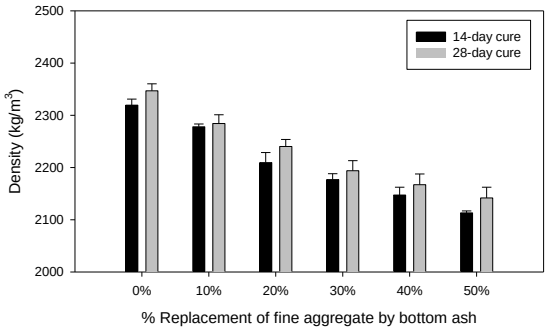
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีทั้งหมดของเถ้าหนักจากการเผาขยะโดยวิธีทดสอบ XRF

สารประกอบ	ความเข้มข้น (%)	สารประกอบ	ความเข้มข้น (%)
Na_2O	1.682	Fe_2O_3	6.788
MgO	1.428	NiO	0.018
Al_2O_3	6.456	CuO	0.156
SiO_2	35.918	ZnO	0.642
P_2O_5	3.295	Br	0.003
SO_3	2.146	Rb_2O	0.010
Cl	1.720	SrO	0.070
K_2O	1.950	ZrO_2	0.040
CaO	30.168	SnO_2	0.019
TiO_2	1.009	BaO	0.085
Cr_2O_3	0.071	PbO	0.191
MnO	0.164		

4.2

4.2.1

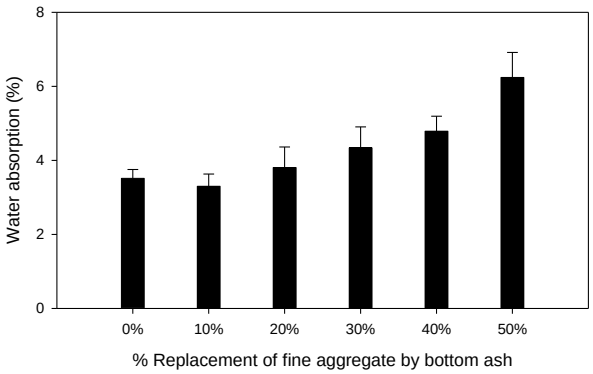
จากการทดสอบหาค่าความหนาแน่น กำหนดค่ากำลังอัดออกแบบที่ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ทำการบ่มที่ระยะเวลา 14 วัน และ 28 วัน โดยผลจากการทดสอบหาค่าความหนาแน่นมีค่าดังรูปที่ 9 พบว่ามีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2,110–2,350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีแนวโน้มความหนาแน่นลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักมากขึ้น และความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นเล็กอย่างไม่มีนัยยะสำคัญเมื่อระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักที่ระยะเวลาบ่มที่ 14 วัน และ 28 วัน

4.2.

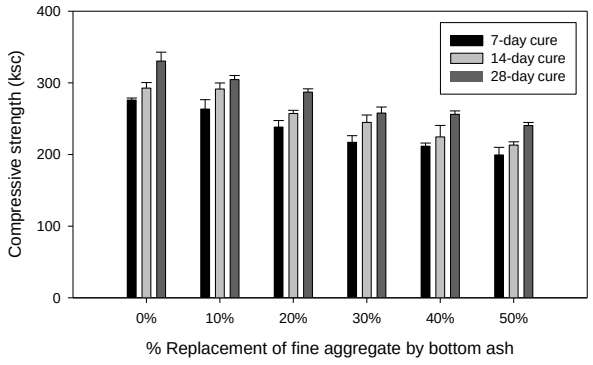
ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ทำการบ่มที่ระยะเวลา 28 วัน แสดงในรูปที่ 10 พบว่าค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 3.30-6.27 และค่าการดูซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าหนักเนื่องจากเถ้าหนักมีความพรุนและขนาดละเอียดกว่ามวลรวมละเอียด ซึ่งสอดคล้องการงานวิจัยในอดีตการใช้ประโยชน์ของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในคอนกรีตสมรรถนะสูง [3]



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของค่าการดูดซึมน้ำและร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน

4.2.3

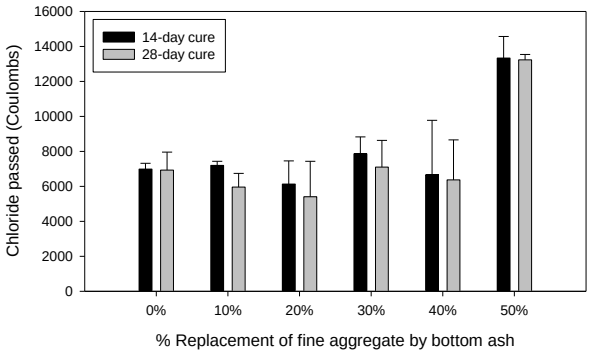
จากการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าหนัก โดยกำหนดค่ากำลังอัดออกแบบที่ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ทำการบ่มที่ระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน พบว่าค่ากำลังมีแนวโน้มเพิ่มสูงตามอายุการบ่ม และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าหนัก เนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุเถ้าหนักมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นของมวลละเอียด เมื่อมีการแทนที่ในคอนกรีตในปริมาณที่มากขึ้นทำกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าลดลง



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักที่

4.2.1

จากการทดสอบความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต กำหนดค่ากำลังอัดออกแบบที่ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ทำการบ่มที่ระยะเวลา 14 และ 28 วัน ดังรูปที่ 12 โดยพบว่ามีค่าประจุไฟฟ้าไหลผ่านเกิน 4,000 คูลอมบ์ ทุกสูตร ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C1202 [14] นั้น เป็นคอนกรีตที่ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ในระดับสูง หรือต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้น้อย เพราะขนาดคละของเถ้าหนักมีค่าใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด ซึ่งไม่เล็กมากพอที่จะอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตที่สามารถต้านการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ คำแนะนำอาจจะต้องใช้วัสดุผสมอย่างอื่นเพิ่ม เช่น ซิลิการฟูล เถ้าลอยจากการเผาถ่านหิน เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้ากับร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนัก

5. บทสรุป

จากผลการศึกษาเกี่ยวกับอัตราส่วนปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักที่ได้จากการเผาขยะของโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะที่เหมาะสมที่สุด ในการผสมของคอนกรีตให้ได้กำลังอัดที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้าง เพื่อต้านทานการแทรกซึมผ่านของคลอไรด์ และเป็นการใช้เถ้าหนักซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมาใช้ในการปรับปรุงและพัฒนางานคอนกรีตให้เกิดประโยชน์สูงสุด ผลการทดสอบ SEM จะเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวที่สังเกตโดยทั่วไปมีลักษณะเฉพาะที่ไม่แน่นอน และเถ้าหนักมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมละเอียด ทำให้คอนกรีตมีแนวโน้มความหนาแน่นลดลง เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบหาขนาดคละ ตามมาตรฐาน ASTM C 136 พบว่าเถ้าหนักจากการเผาขยะมีขนาดคละดีถึงแม้จะไม่ผ่านเกณฑ์ของ ASTM และมีขนาดคละที่ใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด

การทดสอบ XRF ของเถ้าหนัก พบว่าเถ้าหนักจากการเผาขยะนั้นไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานตามเกณฑ์ ASTM C618 กำหนด และจากการทดสอบหาค่าความหนาแน่นระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่า

แนวโน้มความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักมากขึ้น อีกทั้งการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน พบว่ายิ่งมีการแทนที่ปริมาณมวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักมากขึ้นทำให้คอนกรีตมีแนวโน้มการดูดซึมน้ำที่มากขึ้น

นอกจากนี้จากการทดสอบหาค่ากำลังอัดพบว่าค่ากำลังมีแนวโน้มเพิ่มสูงตามเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักที่เพิ่มขึ้น และจากการทดสอบความสามารถด้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ เมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตราฐานตาม ASTM C 1202 พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างทดสอบมีประมาณมาก ซึ่งหมายความว่าไม่สามารถด้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้น้อยมาก

เอกสารอ้างอิง

[1] สำเริง รักช้อน, วัลลภ ภูผา, นิโรจน์ เงินพรหม และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2555). . มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครกรุงเทพมหานคร.

[2] เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2546). การใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต. , ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, หน้า 1-8.

[3] ไกรวุฒิ ตันติสุขารมย์, ธรวัฒน์ โชคสว่างเนตร, ปิยะพล สีหาบุตร และเรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์. (2555). การใช้ประโยชน์ของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในคอนกรีตสมรรถนะสูง. , ปีที่ 23, ฉบับที่ 1, หน้า 40-47.

[4] ชาญชัย เงาะปก, วันชัย สะตะ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2559). การใช้เถ้าก้นเตาเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตพรุน. . โรงแรมสีมาธานี จังหวัดนครราชสีมา.

[5] อรรคเดช อับดุลมาติน, ปกป้อง รัตนชู, เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2563). การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตาที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และถ่านหินบิทูมินัส. , ปีที่ 43, ฉบับที่ 1, หน้า 49-65.

[6] ณปภัช คงฤทธิ์, จักรพงษ์ จิตต์จำนงค์ และณัฐวุฒิ สุภารัตน์. (2563). การเปรียบเทียบวัสดุถมกลับจากเถ้ายางพาราและเถ้าปาล์มสำหรับใช้ในงานปิโตรเลียม. , ครั้งที่ 10, 21 กุมภาพันธ์ 2563. วิทยาลัยเทคโนโลยีภาคใต้.

[7] ASTM C136-06 (2006). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. (p. 24). ASTM International, West Conshohocken, PA.

[8] ASTM C188 (2017). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[9] ASTM C127-15 (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken.

[10] ASTM C128-15 (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken.

[11] ASTM C29 / C29M-17a (2017). Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. ASTM International, West Conshohocken.

[12] ASTM C143/C143M-12 (2015). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[13] ASTM C642-06 (2006). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[14] ASTM C403/C403M-08 (2017). Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. ASTM International, West Conshohocken,

[15] ASTM C1202-12 (2012). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[16] ASTM C596-01 (2001). Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement. ASTM International, West Conshohocken, PA.