

อิทธิพลความละเอียดของกากตะกอนเตาหลอมเหล็กหล่อที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์

Influence of Fineness of Cast Iron Furnace Slag on Mechanical Properties of Mortar

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ ปริญญ์ จิตรดา

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) อ.คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12121

โทร. 0-2564-3001-9 ต่อ 3105 โทรสาร 0-2564-3010

E-Mail: cburacha@engr.tu.ac.th, prinya@mut.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เพื่อเพิ่มศักยภาพของกากตะกอนเตาหลอมเหล็กหล่อ ที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมหล่อขึ้นส่วนเครื่องยนต์ ในการนำมาใช้เป็นวัสดุผสมทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต โดยการบดกากตะกอนให้มีความละเอียดต่างๆ คือ 2,000, 3,000, 4,000 และ 5,000 ซม.²/กรัม เพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในก้อนตัวอย่างทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5 ซม. ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.60, 0.65 และ 0.75 ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90 และ 120 วัน จากผลการทดสอบพบว่า กากตะกอนเหล็กหล่อที่ใช้ไม่จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานประเภทกากตะกอนตามมาตรฐาน ASTM C989 เนื่องจากมีค่าดัชนีกากตะกอน (SAI) ที่ต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดในทุกความละเอียด แต่สามารถใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มจำพวกสารปอซโซลานได้ในทุกความละเอียด จากค่าดัชนีกำลัง (SI) ที่มีค่าถึงร้อยละ 79 – 96 ของมอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งมากกว่าที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618 คือ ร้อยละ 75 โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากตะกอน จะแปรผันตามความละเอียดของกากตะกอนที่ใช้ ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนที่ความละเอียดสูง เช่น 4,000 และ 5,000 ซม.²/กรัม มีการพัฒนากำลังอัดที่ดีทั้งที่อายุ 7 และ 120 วัน ซึ่งเป็นผลของการอัดตัวของอนุภาค (Packing Effect) และจากปฏิกิริยาปอซโซลานของกากตะกอน แต่กำลังอัดที่มีค่าต่ำลงตามร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่เพิ่มขึ้น

ABSTRACT

The main objective of this research is to enhance the effective of iron cast furnace slag, a waste product from automobile industry, as a cement replacement in concrete. The slag was ground to different finenesses at 2000, 3000, 4000 and 5000 cm²/g in order to replace ordinary Portland cement between 0% and 50% by weights, with the water to binder ratios (w/b) of 0.60, 0.65 and 0.75. The mortar specimens were cast in standard 5-cm. cubes, and tested at the ages of 3, 7, 14, 28, 60, 90 and 120 days. The results revealed that the slag did not satisfy ASTM C989 standard due to the lower Slag Activity Indices

(SAI) at all finenesses. However, the slag represents effectively as pozzolan admixture (ASTM C618) since the Strength Indices (SI) of 79%-96% are above the required value of 75%. It was found that the strength of this slag-cement mortar varied with the slag fineness, clearly observed by the high fineness of 4000 and 5000 cm²/g, for strength development at the ages between 7 and 120 days. The strength was affected by packing effect of particles and slag pozzolanic reaction; nevertheless, the strength tended to be reduced with the increase of slag replacement and water to binder ratio (w/b).

1. บทนำ

จากการฟื้นตัวของเศรษฐกิจในประเทศในช่วงปี พ.ศ. 2543-2546 ส่งผลให้อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์มีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 200 [1] ของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์จึงมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย ดังเช่น กากตะกอนเตาหลอมเหล็กหล่อ (Cast Iron Furnace Slag) ที่เป็นของเสียจากกระบวนการหลอมเหล็กเพื่อหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) ที่ใช้วัตถุดิบในการหลอม อันประกอบด้วย เศษเหล็กเก่า (Scrap) เศษเหล็กกลิ้ง (Crank) และสารปรุงแต่งจำพวก ผงคาร์บอน เพอโรซิลิคอน และซิลิโคแมงกานีส หลอมรวมกันที่อุณหภูมิประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส โดยกากตะกอนเตาหลอมคือ ส่วนที่เป็นมลทิน (Impurities) ในกระบวนการหลอมซึ่งลอยตัวขึ้นสู่ผิวบนของน้ำเหล็ก จากนั้นถูกคัดออกแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง จากข้อมูลของบริษัทที่ให้ความอนุเคราะห์กากตะกอนในงานวิจัย [2] พบว่า กากตะกอนเตาหลอมมีปริมาณร้อยละ 5-7 ของน้ำเหล็กที่ผลิตได้หรือมีปริมาณถึง 290 ตัน/ปี โดยจะต้องนำไปกำจัดอย่างถูกวิธีตามระเบียบของกระทรวงอุตสาหกรรม [3] ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายประมาณ 1,100 บาท/ตัน ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น

จากปัญหาดังกล่าว จึงได้มีความพยายามที่จะศึกษาถึงการนำกากตะกอนเตาหลอมเหล็กหล่อกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เช่นเดียวกับกากตะกอนเตาถลุง (Blast Furnace Slag) และกากตะกอนเตาหลอมเหล็ก (Steel Furnace Slag) ที่เป็นของเสียจากกระบวนการหลอมเพื่อผลิตเหล็กในขั้นต้นและขั้นกลาง ด้วยการนำมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต [4, 5] ทั้งนี้เนื่องจากกากตะกอนเตาหลอมมี

องค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ (ดังแสดงในตารางที่ 1) ดังเช่นในงานวิจัยของ นูรฉัตร ฉัตรวีระ [6] ที่นำกากตะกอนเตาหลอม เหล็กหล่อดังกล่าว มาบดที่ความละเอียดค่าเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ใน ตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์ พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากตะกอน เหล็กหล่อที่ได้มีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมกากตะกอนมาก รวมถึงค่า คีชีนิกากตะกอน (Slag Activity Index) ที่ต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดตาม มาตรฐาน ASTM C989

จากข้อมูลดังกล่าว จึงมีความพยายามหาวิธีการปรับปรุงหรือ เพิ่มศักยภาพของกากตะกอน เพื่อให้สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธีเช่น การบดที่ อุณหภูมิสูง การใช้สารเคมีเร่งปฏิกิริยา [7] หรือการบดกากตะกอนให้มี ความละเอียดสูงขึ้น [8] โดยงานวิจัยนี้เลือกที่จะศึกษาถึงการบดกาก ตะกอนให้มีความละเอียดสูงขึ้น เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่าย ในทางปฏิบัติ และมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก โดยจะทำการบดกากตะกอน ให้มีความละเอียดต่างๆ คือ 2,000, 3,000, 4,000 และ 5,000 ซม.²/กรัม เพื่อศึกษาถึงผลของความละเอียดของกากตะกอนที่มีต่อกำลังและการ พัฒนากำลังของมอร์ตาร์ รวมทั้งศึกษาถึงศักยภาพในการเป็นวัสดุเชื่อม ประสานและวัสดุผสมเพิ่มจำพวกสารประกอบโซลาน จากค่าคีชีนิกาก ตะกอน (Slag Activity Index, SAI) และค่าคีชีนิกำลังอัด (Strength Index, SI) ของกากตะกอนที่ใช้ในแต่ละความละเอียด

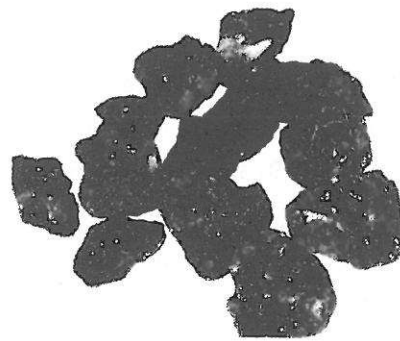
2. การทดสอบ

2.1 การเตรียมวัสดุและวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของกาก ตะกอนเหล็กหล่อ

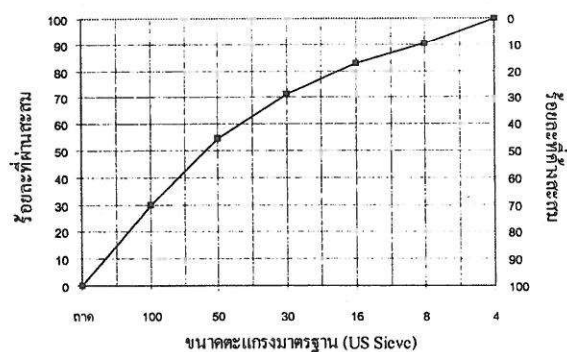
กากตะกอนเหล็กหล่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นกากตะกอนเตา หลอมเหล็กจากโรงงานหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ที่ปล่อยให้เย็นตัวใน อากาศ กากตะกอนที่ได้จึงมีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่คล้ายหิน สีเทาดำ และมีรูพรุนที่ผิว (รูปที่ 1) โดยนำมาบดย่อยให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่อง ย่อยหิน จนมีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ประมาณ 4.28 หรือมีการ กระจ่ายตัวเมื่อร่อนผ่านตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM C136 ดังแสดงใน รูปที่ 2 จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่อง Los Angeles ครึ่งละ 10 กิโลกรัม โดยใช้ลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว จำนวน 10 ลูก (น้ำหนัก 440 กรัม/ลูก) เพื่อให้ได้ความละเอียดในรูปพื้นที่ผิว จำเพาะด้วยวิธี Air Permeability แบบ Blaine ตามมาตรฐาน ASTM C204 คือ 2,000, 3,000, 4,000 และ 5,000 ซม.²/กรัม (ความคลาดเคลื่อน ± 50 ซม.²/กรัม) ดังแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการบดกับ ความละเอียดของกากตะกอนที่ได้ ในรูปที่ 3

สำหรับปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ส่วนทรายเป็นทรายแม่น้ำที่ล้างจนสะอาด มี ขนาดอยู่ในช่วงตะแกรงเบอร์ 16 ถึงตะแกรงเบอร์ 100 โดยมีค่าโมดูลัส ความละเอียดและค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.85 และ 2.51 ตามลำดับ

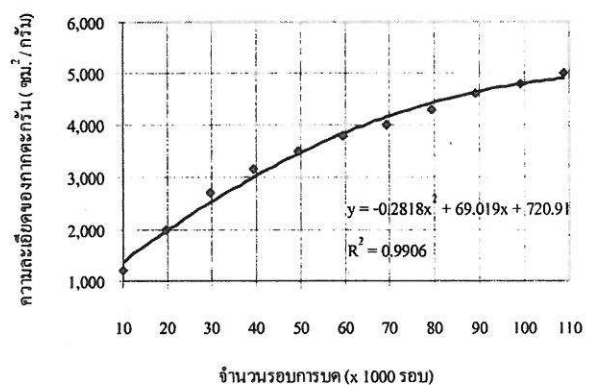
การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนเหล็กหล่อ และปูนซีเมนต์ได้แก่ ภาพขยายอนุภาคกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) การหาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุผงด้วยวิธี Air Permeability แบบ Blaine ตามมาตรฐาน ASTM C204 ร้อยละที่ผ่าน ตะแกรงเบอร์ 325 (45 μ m) ตามมาตรฐาน ASTM C430 ขนาดและการ กระจ่ายตัวของอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer S และค่าความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐาน ASTM C188 ส่วนองค์ประกอบทางเคมีและการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ของกากตะกอนเหล็กหล่อและ ปูนซีเมนต์ อ้างอิงจากงานวิจัยของนูรฉัตร [6] เนื่องจากเป็นกากตะกอน ที่มาจากแหล่งเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 กากตะกอนเตาหลอมเหล็กหล่อ



รูปที่ 2 ขนาดคละของกากตะกอนที่ร่อนผ่านตะแกรงหลังจากบดย่อย ด้วยเครื่องย่อยหิน



รูปที่ 3 จำนวนรอบการบดกากตะกอนด้วยเครื่อง Los Angeles กับความละเอียดที่ได้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเหล็กหล่อ กากตะกอนหลอมเหล็กชั้นกลาง และปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก		
	กากตะกอนเหล็กหล่อ [6]	กากตะกอนหลอมเหล็กชั้นกลาง [5]	ปูนซีเมนต์ [6]
CaO	1.87	28.70	66.28
SiO ₂	57.20	15.00	20.84
Al ₂ O ₃	12.79	7.90	5.22
Fe ₂ O ₃	16.64	26.70	3.20
MgO	0.30	5.40	1.24
K ₂ O	0.48	0.03	0.22
Na ₂ O	-	1.20	0.10
SO ₃	-	0.30	2.41
อื่น ๆ	10.72	14.77	0.49

หมายเหตุ: 'กากตะกอนหลอมเหล็กชั้นกลางคือ กากตะกอนเตาหลอมจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้าที่ใช้เหล็กดิบ เศษเหล็ก หินปูน และโคโลไมท์ เป็นวัตถุดิบในการผลิต

2.2 การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

2.2.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมกากตะกอน ตามมาตรฐาน ASTM C191 โดยใช้กากตะกอนที่ความละเอียดต่างๆ ตามที่กำหนด แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ทำให้เกิดความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency)

2.2.2 คำนวณค่าดัชนีกากตะกอน และดัชนีกำลังอัด

การหาค่าดัชนีกากตะกอน (Slag Activity Index, SAI) และดัชนีกำลังอัด (Strength Index, SI) ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C989 และ ASTM C618 ตามลำดับ โดยใช้กากตะกอนความละเอียดต่างๆ ตามที่กำหนด แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 20 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75:1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ทำให้ค่าร้อยละการไหลแผ่เท่ากับ 110±5 ตามมาตรฐาน ASTM C109 สำหรับหล่อก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ดขนาด 5×5×5 ซม. โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C311

2.2.3 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ด

การทดสอบกำลังอัด โดยการเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบที่ใช้กากตะกอนความละเอียดต่างๆ ตามที่กำหนดเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนน้ำ

ต่อวัสดุประสาน (w/b) คือ 0.60, 0.65 และ 0.70 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75:1 โดยน้ำหนัก ในก้อนตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์ดขนาด 5×5×5 ซม. โดยจะทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C311

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอน

จากองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอน ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่ากากตะกอนเตาหลอมเหล็กหล่อมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 57.20, 12.79 และ 16.64 ตามลำดับ หรือมีปริมาณรวมของ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ ถึงร้อยละ 86.39 ซึ่งมากกว่าวัสดุปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C618 ที่กำหนดไว้อย่างน้อยร้อยละ 75 แต่มีปริมาณของ CaO ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญต่อการพัฒนากำลังของวัสดุเชื่อมประสานเพียงร้อยละ 1.87 ซึ่งต่ำกว่าที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์และกากตะกอนเตาหลอมเหล็กชั้นกลาง (Steel Furnace Slag) ทั่วไปมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากในกระบวนการผลิตเหล็กหล่อนี้มิได้ใช้หินปูนหรือโคโลไมท์ (วัตถุดิบที่ให้ CaO กับกากตะกอน) เป็นวัสดุช่วยหลอม (Flux) ต่างจากกระบวนการถลุงแร่เหล็กและการหลอมเพื่อผลิตเหล็กในชั้นกลาง ที่กากตะกอนจะมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 25-55 [4,9] ดังนั้นกากตะกอนเตาหลอมเหล็กหล่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงจัดเป็นกากตะกอนประเภทแคลเซียมต่ำ (Low Lime Slag)

3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอน

3.2.1 การบดกากตะกอนกับความละเอียดที่ได้

ตารางที่ 2 แสดงถึงจำนวนรอบในการบดกับความละเอียดของกากตะกอนที่ได้ จะเห็นได้ว่าการบดกากตะกอนเหล็กหล่อให้ได้ความละเอียดตามที่ต้องการ คือ 2,000, 3,000, 4,000 และ 5,000 ซม.²/กรัม ต้องใช้จำนวนรอบในการบดที่สูงถึง 20×10³, 40 ×10³, 60×10³ และ 108×10³ รอบ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากากตะกอนเหล็กหล่อมีความแข็งและยากต่อการบด ทั้งนี้เป็นผลมาจากกระบวนการหล่อเย็นกากตะกอนที่ใช้วิธีปล่อยให้เย็นตัวในอากาศอย่างช้าๆ จึงส่งผลให้โครงสร้างของกากตะกอนอยู่ในรูปของผลึกที่แข็งแรง [10] และจับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ (Lump Slag) ประกอบกับขนาดของกากตะกอนที่ผ่านการบดย่อยด้วยเครื่องย่อยหินค่อนข้างมีขนาดใหญ่ (F.M. เท่ากับ 4.28) จึงทำให้ต้องใช้พลังงานหรือรอบในการบดที่สูง โดยเฉพาะกับความละเอียดที่มากกว่า 4,000 ซม.²/กรัม จำนวนรอบในการบดจะเริ่มมีความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรงกับความละเอียดที่ได้ ดังเช่นที่ ความละเอียด 5,000 ซม.²/กรัม ต้องใช้จำนวนรอบในการบดสูงเกือบสองเท่าของความละเอียดที่ 4,000 ซม.²/กรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบดกากตะกอนด้วยวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ไม่เหมาะสมกับความละเอียดที่เกินกว่า 4,000 ซม.²/กรัม

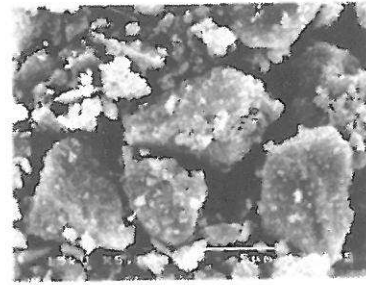
ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนและปูนซีเมนต์

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์	กากตะกอนเตาหลอมเหล็กหล่อ				
		2,000	3,000	4,000	5,000	
1. ความละเอียด จากพื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยวิธีเบตน (ชม. ² /กรัม)	3,200	2,000	3,000	4,000	5,000	
2. จำนวนรอบในการบด (รอบ)	-	20x10 ³	40x10 ³	60x10 ³	108x10 ³	
3. ร้อยละที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325	5	67	55	43	32	
4. ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	32	115	71	43	35	
5. การกระจายตัวของอนุภาค						
- ร้อยละ 10 มีขนาดเล็กกว่า (μm)	0.3	2.0	1.0	0.5	0.3	
- ร้อยละ 90 มีขนาดเล็กกว่า (μm)	41	300	190	103	76	
6. ความถ่วงจำเพาะ	3.05	2.89	2.92	3.09	3.22	

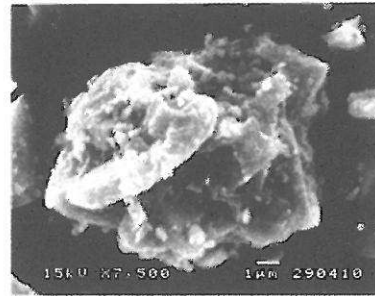
3.2.2 ลักษณะรูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของกากตะกอน

จากภาพถ่ายอนุภาคกำลังสูง (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4 เห็นได้ว่ากากตะกอนมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และมีอนุภาคขนาดเล็กเกาะติดที่ผิว โดยความเป็นเหลี่ยมมุมจะลดลงเมื่อบดกากตะกอนให้มีความละเอียดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลต่อค่าความละเอียดแบบเบตน อย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (Mean Particle Size) และร้อยละที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ระหว่างกากตะกอนกับปูนซีเมนต์ที่ค่าความละเอียดประมาณ 3,000-3,200 ชม.²/กรัม ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่ากากตะกอนมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์มาก ณ ที่ความละเอียดใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากลักษณะรูปร่างของกากตะกอนที่เป็นเหลี่ยมมุมและมีอนุภาคขนาดเล็กเกาะติดที่ผิว จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก ค่าความละเอียดที่ทดสอบจากวิธีเบตนจึงมีค่าสูง

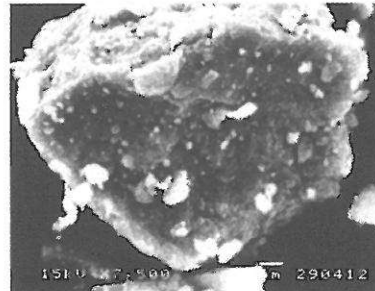
สำหรับการกระจายตัวของอนุภาคกากตะกอนและปูนซีเมนต์แสดงในรูปที่ 5 พบว่ากากตะกอนมีการกระจายตัวในช่วงที่กว้าง กล่าวคือที่ความละเอียด 2,000, 3,000, 4,000 และ 5,000 ชม.²/กรัม มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 2-300, 1-190, 0.5-103 และ 0.3-76 ไมโครเมตร ตามลำดับ หรือมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 115, 71, 43 และ 35 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งต่างจากปูนซีเมนต์ที่มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงแคบคือ 0.3-41 ไมโครเมตร หรือมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 32 ไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของกากตะกอนที่ผ่านการบดย่อยมีขนาดค่อนข้างใหญ่ (F.M เท่ากับ 4.28) และมีการกระจายตัวอยู่ในช่วงที่กว้าง ดังแสดงในรูปที่ 2 ประกอบกับในขั้นตอนการบดละเอียดกากตะกอนมิได้ทำการบดคัดแยกขนาดเพื่อค้ำ จึงส่งผลให้กากตะกอนมีการกระจายตัวดังที่ปรากฏ แต่อย่างไรก็ตามการบดกากตะกอนที่ความละเอียดสูงขึ้นก็ส่งผลให้อนุภาคมีขนาดเฉลี่ยลดลงและมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5



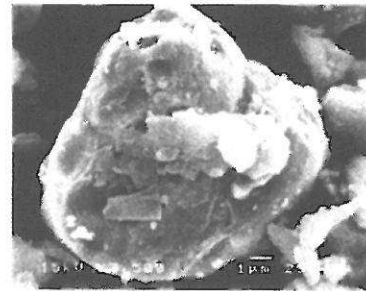
(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (กำลังขยาย 5,000 เท่า)



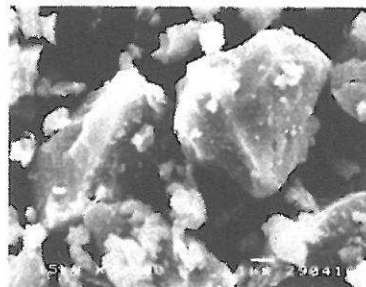
(ข) กากตะกอนความละเอียด 2,000 ชม.²/กรัม (กำลังขยาย 7,500 เท่า)



(ค) กากตะกอนความละเอียด 3,000 ชม.²/กรัม (กำลังขยาย 7,500 เท่า)



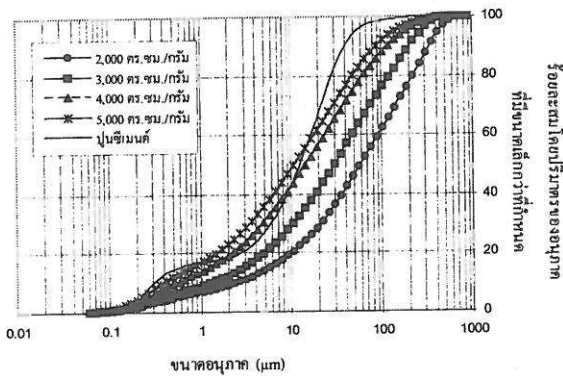
(ง) กากตะกอนความละเอียด 4,000 ชม.²/กรัม (กำลังขยาย 7,500 เท่า)



(จ) กากตะกอนความละเอียด 5,000 ชม.²/กรัม (กำลังขยาย 7,500 เท่า)

รูปที่ 4 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM ของปูนซีเมนต์และกากตะกอนเหล็กหล่อที่ความละเอียดต่างๆ

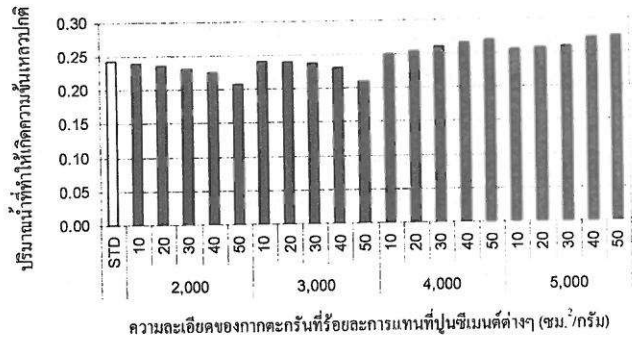
สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะของกากตะกอน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์คือ มีค่าอยู่ในช่วง 2.89-3.22 ดังนั้นการนำกากตะกอนนี้ไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมากนัก



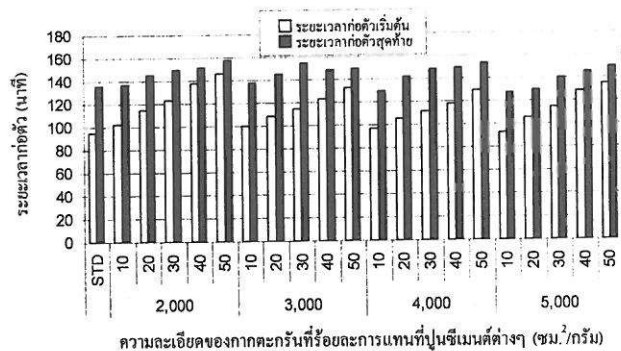
รูปที่ 5 การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และกากตะกอนเหลือที่ความละเอียดต่างๆ

3.3 ระยะเวลาการก่อตัว

รูปที่ 6 แสดงปริมาณความต้องการน้ำที่ทำให้เกิดความชื้นเหลวปกติของเพสต์ พบว่าการใช้กากตะกอนที่มีความละเอียด 2,000 และ 3,000 ซม./กรัม แทนที่ปูนซีเมนต์จะมีความต้องการน้ำที่น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมกากตะกอน (ซีเมนต์เพสต์ควบคุม: STD) และมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อร้อยละการที่แทนปูนซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น แต่ในกรณีของกากตะกอนความละเอียด 4,000 และ 5,000 ซม./กรัม ความต้องการน้ำกลับมีค่าสูงกว่า STD และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์และความละเอียดของกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า การใช้กากตะกอนที่มีความละเอียด 2,000 และ 3,000 ซม./กรัม ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ (ดังแสดงในตารางที่ 2) กากตะกอนจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำที่ต่ำ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า เป็นผลให้ความต้องการน้ำของเพสต์ผสมกากตะกอนในช่วงความละเอียดดังกล่าวมีค่าต่ำกว่า STD และลดต่ำลงตามร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันกับการใช้กากตะกอนความละเอียด 4,000 และ 5,000 ซม./กรัม ซึ่งมีขนาดของอนุภาคที่เล็ก (43 และ 35 ไมโครเมตร ตามลำดับ) หรือมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มาก จึงทำให้มีความต้องการน้ำสูง ประกอบกับในช่วงความละเอียดดังกล่าวนี้ กากตะกอนมีอนุภาคขนาดเล็กๆ เกาะติดที่ผิวจำนวนมาก (ดังแสดงในรูปที่ 4) จึงส่งผลให้ความต้องการน้ำที่ทำให้เกิดความชื้นเหลวปกติมีค่าสูงกว่า STD และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความละเอียด และร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ความชื้นเหลวปกติของเพสต์



รูปที่ 7 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของเพสต์

สำหรับระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมกากตะกอน ที่แสดงในรูปที่ 7 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของเพสต์ผสมกากตะกอน มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มลดต่ำลงเล็กน้อยตามความละเอียดของกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น โดยสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการก่อตัว (เริ่มต้นและสุดท้าย) ตามปริมาณการใช้กากตะกอน เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งก่อให้เกิดการแข็งตัวของเพสต์มีปริมาณลดลง ตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ของกากตะกอน สำหรับแนวโน้มการลดลงของระยะเวลาการก่อตัวตามความละเอียดของกากตะกอนที่เพิ่มขึ้นนั้น เป็นผลมาจากขนาดของอนุภาคกากตะกอนที่เล็กลง และมีการกระจายตัวที่ดี จึงส่งผลให้เพสต์มีเนื้อแน่นและแข็งแรงเพิ่มขึ้น [11, 12]

3.4 ดัชนีกากตะกอน (Slag Activity Index, SAI) และดัชนีกำลัง (Strength Index, SI)

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ทำให้เกิดร้อยละการไหลแผ่ 110 ± 5 สำหรับตัวอย่างทดสอบค่าดัชนีกากตะกอน (SAI) และดัชนีกำลัง (SI) ที่ความละเอียดของกากตะกอนต่างๆ พบว่าค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของชุดตัวอย่างทดสอบ SAI และ SI มีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานควบคุม (STD) แสดงให้เห็นว่ากากตะกอนเหลือเหลือมีการไหลหรือการเคลื่อนตัวที่ดี โดยค่าอัตราส่วน w/b ลดลง

เล็กน้อยเมื่อใช้กากตะกอนที่มีความละเอียดมากขึ้น จากผลของอนุภาคที่มีขนาดเล็กและความเป็นเหลี่ยมมุมที่ลดลง

ตารางที่ 3 ร้อยละการไหลผ่านและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สำหรับการทดสอบดัชนีกากตะกอน (SAI) และดัชนีกำลัง (SI)

ดัชนีทดสอบ	ความละเอียดของปูนซีเมนต์และกากตะกอน (ชม./กรัม)	ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์	ร้อยละการไหลผ่าน	w/b
STD	3,200	0	108.8	0.60
SAI	2,000	50	112.5	0.59
	3,000	50	105.5	0.59
	4,000	50	112.0	0.58
	5,000	50	115.0	0.57
SI	2,000	20	113.7	0.59
	3,000	20	110.5	0.59
	4,000	20	113.0	0.58
	5,000	20	114.5	0.58

สำหรับค่าดัชนีกากตะกอน (SAI) ที่ความละเอียดต่างๆ แสดงในตารางที่ 4 พบว่าค่าดัชนีกากตะกอนในทุกค่าความละเอียดที่ใช้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C989 ทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน แสดงให้เห็นว่ากากตะกอนเหลือห่อมีคุณสมบัติการเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious Material) ที่ต่ำซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนที่มีปริมาณออกไซด์ของแคลเซียมต่ำ (Low Lime Slag) ดังที่กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามค่าดัชนีกากตะกอนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความละเอียดของกากตะกอนและอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น

ส่วนค่าดัชนีกำลัง (SI) ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าค่าดัชนีกำลังที่ได้ในทุกความละเอียดมีค่ามากกว่าที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618 ทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน แสดงให้เห็นว่ากากตะกอนเหลือห่อมีศักยภาพในการเป็นวัสดุผสมเพิ่มจำพวกสารปอซโซลานได้ โดยที่อายุ 7 วัน ค่าดัชนีกำลังที่ได้มีค่ามากกว่าร้อยละ 90 ในทุกความละเอียด และเพิ่มสูงขึ้นตามความละเอียดของกากตะกอนที่ใช้ แต่ค่าดัชนีกำลังที่อายุ 28 วัน มีค่าน้อยกว่าที่อายุ 7 วัน

การเพิ่มขึ้นของดัชนีกากตะกอนและดัชนีกำลัง (SAI และ SI) ตามความละเอียดของกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากขนาดอนุภาคที่เล็กลงทำให้กากตะกอนมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานหรือไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์มากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ประกอบกับที่ความละเอียดเพิ่มขึ้น กากตะกอนจะมีขนาดอนุภาคเล็กและมีการกระจายตัวที่ดี (ดังแสดงในรูปที่ 5) มอร์ตาร์จึงมีการอัดตัวที่ดี [11, 12] จึงเป็นผลให้ค่าดัชนีทั้งสองเพิ่มสูงขึ้นตามความละเอียดของกากตะกอนที่ใช้

ตารางที่ 4 ดัชนีกากตะกอน (SAI)

มอร์ตาร์	กำลังอัด (กก./ชม.)		SAI (ร้อยละ)	
	7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน
STD	238	281	100	100
SAI-2000	83	124	35	44
SAI-3000	100	152	42	54
SAI-4000	105	169	44	60
SAI-5000	112	186	47	66
เกณฑ์กำหนด ASTM C989 :		Grade 80	-	75
		Grade 100	75	95
		Grade 120	95	115

SAI-X000 คือ ค่าดัชนีกากตะกอนที่ความละเอียดต่างๆ

ตารางที่ 5 ดัชนีกำลัง (SI)

มอร์ตาร์	กำลังอัด (กก./ชม.)		SI (ร้อยละ)	
	7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน
STD	238	281	100	100
SI2000	214	223	90	79
SI3000	221	237	93	84
SI4000	224	242	94	86
SI5000	228	264	96	94
เกณฑ์กำหนด ASTM C618:			75	75

SI-X000 คือ ค่าดัชนีกำลังที่ความละเอียดต่างๆ

ค่าดัชนีกำลัง (SI) ที่อายุ 7 วัน ที่มีค่าสูงกว่าที่อายุ 28 วัน แสดงถึงอัตราการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุ 7 วัน มีค่าสูงกว่าที่อายุ 28 วัน เมื่อเทียบกับกำลังอัดของ STD ซึ่งต่างจากพฤติกรรมของกากตะกอนและวัสดุปอซโซลานทั่วไป ที่อัตราการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นจะต่ำกว่าช่วงอายุปลาย [9, 12] ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาของกากตะกอนหรือสารปอซโซลานนั้นเป็นปฏิกิริยาขั้นที่สอง ซึ่งต้องรอผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์ (Ca(OH)_2) และสภาพความเป็นด่างที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา [5, 9, 10] ดังนั้นการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นที่เกิดขึ้น อันเป็นผลให้ค่าดัชนีกำลัง (SI) ที่อายุ 7 วัน มีค่าสูงถึงร้อยละ 90 และมากกว่าที่อายุ 28 วัน น่าจะมีผลมาจากการอัดตัวของอนุภาค (Packing Effect) [11, 12] และความแข็งแรงของกากตะกอนเป็นหลัก มากกว่าจะเกิดจากผลของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของกากตะกอน ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากตะกอนในหัวข้อที่ 3.5 ที่สังเกตถึงการพัฒนากำลังอัด อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของกากตะกอนได้อย่างชัดเจนที่อายุบ่มมากกว่า 28 วันขึ้นไป

3.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากตะก้น

จากผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้กากตะก้นแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ที่ความละเอียด 2,000, 3,000, 4,000 และ 5,000 ซม.³/กรัม ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่างๆ คือ 0.60, 0.65 และ 0.70 พบว่าร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์และความละเอียดของกากตะก้นมีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ในทิศทางเดียวกัน ในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ใช้ ดังผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากตะก้นที่ร้อยละการแทนที่และความละเอียดต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่า 0.65 ในรูปที่ 8 (ก) ถึง (ง) ที่พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากตะก้นมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (0%) ในทุกความละเอียดของกากตะก้นที่ใช้ ตลอดช่วงอายุการบ่มที่พิจารณา และมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราส่วนการแทนที่มากกว่าร้อยละ 20 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากตะก้นลดลงมากกว่าร้อยละ 30 ของมอร์ตาร์ควบคุม ทั้งนี้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious Material) ของกากตะก้นที่ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีกากตะก้น (SAI) ดังที่กล่าวมาในข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้กากตะก้นในอัตราส่วนการแทนที่ที่ไม่สูงมากนัก เช่นที่ร้อยละ 10 และ 20 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมคือ อยู่ในช่วงร้อยละ 73-92 ของมอร์ตาร์ควบคุม

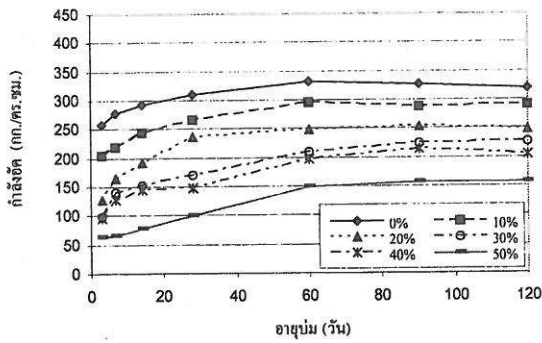
โดยจะสังเกตถึงการพัฒนากำลังอัดอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของกากตะก้นได้ ดังในตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์ที่ใช้กากตะก้นความละเอียด 2,000 และ 3,000 ซม.³/กรัม (รูปที่ 8 (ก) และ (ข)) ที่มีการพัฒนา กำลังอัดในช่วงอายุปลายที่ดี (ตั้งแต่อายุ 60 วัน) และสูงกว่าในช่วงอายุต้น (3-28 วัน) อย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของกากตะก้นที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ และให้กำลังอัดในช่วงอายุปลาย

สำหรับอิทธิพลความละเอียดของกากตะก้น ก็มีแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดในทิศทางเดียวกับค่าดัชนีกากตะก้น (SAI) และดัชนีกำลัง (SI) คือมีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นตามความละเอียดของกากตะก้นที่เพิ่มขึ้น ในทุกอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ ทั้งในช่วงอายุต้น และอายุปลาย ดังเช่น รูปที่ 8 (ง) ที่ใช้กากตะก้นความละเอียด 5,000 ซม.³/กรัม ที่พบว่ามีการพัฒนา กำลังอัดในช่วงอายุต้น (3-7 วัน) ที่สูงและใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะไม่พบในกากตะก้น ที่ความละเอียดต่ำ (2,000 และ 3,000 ซม.³/กรัม) ทั้งนี้จะเป็นผลของการอัดตัวของอนุภาคกากตะก้นที่มีขนาดเล็กและการกระจายตัวที่ดี (Packing Effect) [11,12] ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ตั้งแต่ช่วงอายุต้น ในส่วนอิทธิพลความละเอียดของกากตะก้นต่อการพัฒนา กำลังอัดในช่วงอายุปลาย สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 9 (ก-ค) ที่แสดงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้กากตะก้นแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่างๆ พบว่า

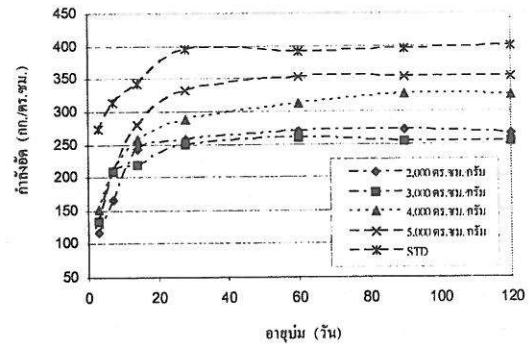
การใช้กากตะก้นที่มีความละเอียดสูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดในช่วงอายุปลายเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากผลของขนาดอนุภาคที่เล็กลงและการมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้น กากตะก้นจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ดี ประกอบกับผลของการอัดแน่นของอนุภาค จึงส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ในช่วงอายุปลายมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามความละเอียดของกากตะก้นที่เพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบกำลังอัดที่ได้ สามารถแบ่งช่วงความละเอียดของกากตะก้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้เป็นสองกลุ่มคือ 1. กากตะก้นความละเอียดต่ำ คือที่ความละเอียด 2,000 และ 3,000 ซม.³/กรัม ซึ่งกากตะก้นมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังอัดของกากตะก้นมีค่าต่ำ โดยมีค่ากำลังอัดประมาณร้อยละ 60 - 68 ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุ 120 วัน สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 2. กากตะก้นความละเอียดสูง คือที่ความละเอียด 4,000 และ 5,000 ซม.³/กรัม ซึ่งกากตะก้นมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์และมีการพัฒนากำลังอัดที่ดี โดยมีค่ากำลังอัดประมาณร้อยละ 83 - 93 ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุ 120 วัน สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20

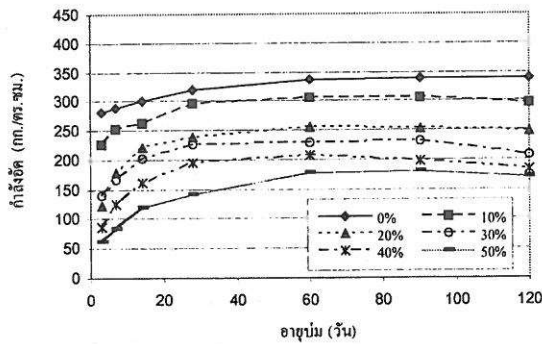
สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากตะก้นมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 10 ทั้งนี้เป็นที่ทราบว่า การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เพสต์หรือมอร์ตาร์มีความพรุนมากขึ้น



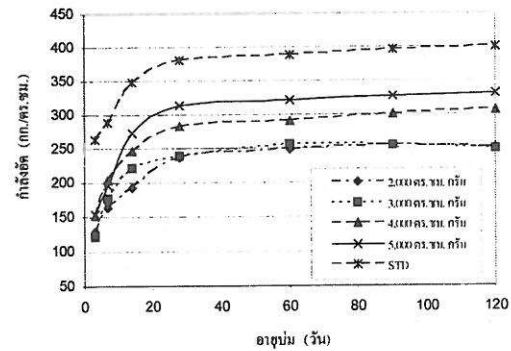
(ก) ความละเอียดของกากตะกอนเท่ากับ 2,000 ชม.³/กรัม



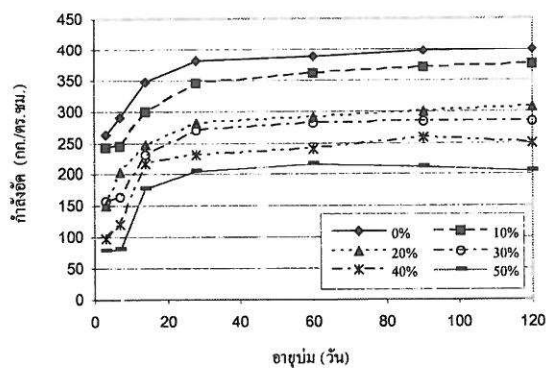
(ก) มอร์ตาร์ที่อัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.60



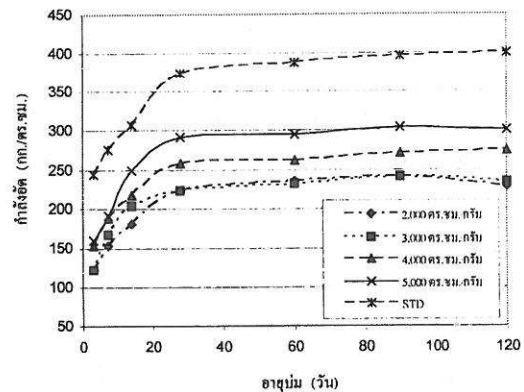
(ข) ความละเอียดของกากตะกอนเท่ากับ 3,000 ชม.³/กรัม



(ข) มอร์ตาร์ที่อัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.65

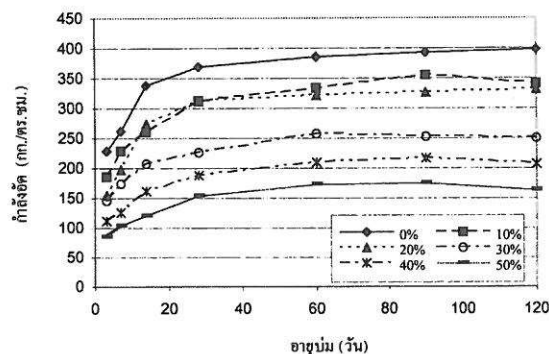


(ค) ความละเอียดของกากตะกอนเท่ากับ 4,000 ชม.³/กรัม

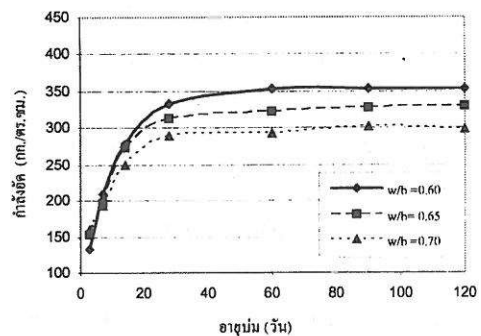


(ค) มอร์ตาร์อัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.70

รูปที่ 9 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากตะกอนที่ใช้กากตะกอนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ที่ความละเอียดและอัตราส่วน w/b ต่างๆ



(ง) ความละเอียดของกากตะกอนเท่ากับ 5,000 ชม.³/กรัม



รูปที่ 8 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.65 ในร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์และความละเอียดของกากตะกอนต่างๆ

รูปที่ 10 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้กากตะกอนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ที่ความละเอียด 5,000 ชม.³/กรัม ในอัตราส่วน w/b ต่างๆ

4. สรุปผลการวิจัย

กากตะกอนเหล็กหล่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ไม่จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานประเภทกากตะกอน (Slag) ตามมาตรฐาน ASTM C989 แต่สามารถใช้หรือจัดเป็นวัสดุผสมเพิ่มจำพวกสารปอซโซลานได้ เนื่องจากมีค่าดัชนีกำลัง (SI) ที่สูงถึงร้อยละ 79 – 96 ซึ่งมากกว่าที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618

กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากตะกอนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของกากตะกอนที่ใช้ โดยจะมีประสิทธิภาพในการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ดีเมื่อใช้กากตะกอนที่มีความละเอียดสูงคือ ที่ความละเอียด 4,000 และ 5,000 ซม.²/กรัม ซึ่งนอกจากมีการพัฒนากำลังอัดที่ดีในช่วงอายุปลายจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของกากตะกอนแล้ว กำลังอัดในช่วงต้นก็ยังมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลของอนุภาคกากตะกอนที่มีขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวที่ดี อย่างไรก็ตามกำลังของมอร์ตาร์ผสมกากตะกอนก็มีค่าลดต่ำลงตามสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น

สรุปได้ว่า กากตะกอนเตาหลอมเหล็กหล่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีศักยภาพเป็นวัสดุเพิ่มทดแทนปูนซีเมนต์จำพวกสารปอซโซลานได้ และการบดกากตะกอนให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกากตะกอนในการแทนที่ปูนซีเมนต์ให้สูงขึ้น โดยที่ความละเอียดของกากตะกอนประมาณ 4,000 ซม.²/กรัม และร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ในช่วงร้อยละ 10 – 20 โดยน้ำหนัก เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม และใช้พลังงานในการบดไม่สูงมากนัก อีกทั้งมีระยะเวลาการก่อตัวและความต้องการน้ำที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท สยามโद्यดอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กากตะกอนและข้อมูลเพื่อใช้ในการวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชีรวัธ ตันนุกิจ "การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอุตสาหกรรมเหล็กหลังวิกฤต" รายงานวิชาการสำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน ฉบับที่ สอพ. 7/2547 พ.ศ. 2547.
- [2] บัญชี จันทวิชกุล บริษัท สยามโद्यดอุตสาหกรรม จำกัด สอบถามข้อมูลเป็นการส่วนตัว พ.ศ. 2547.
- [3] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง "การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว" ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 114 ตอนพิเศษ 106ง 13 พฤศจิกายน พ.ศ. 2540.
- [4] G. Menendez, V. Bonavetti and E.F. Irassar, "Strength Development of Ternary Blended Cement with Limestone Filler and Blast-Furnace Slag", Cement and Concrete Research, Vol. 25, 2003, pp. 61-343.
- [5] S. Caijun, "Characteristics and Cementitious Properties of Ladle Slag Fines from Steel Productions", Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp. 459-462.
- [6] นรฉัตร ฉัตรวีระ และณรงค์ศักดิ์ มากุล "คุณสมบัติทางกลและความทนทานของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมกากตะกอนเตาหลอมโลหะที่ผ่านการบดด้วยเครื่องลอสแอลเจลลิส" วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 27 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2547 หน้า 157-174.
- [7] S. Caijun and Q. Jueshi, "High Performance Cementing Materials from Industrial Slag-a Review", Resources Conservation & Recycling, Vol. 29, 2000, pp.195-207.
- [8] M. Oner, K. Erdogan and A. Gunlu, "Effect of Components Fineness on Strength of Blast Furnace Slag Cement", Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2004, pp. 463-469.
- [9] M. Tufekci, A. Demirbas and H. Genc, "Evaluation of Steel Furnace Slag as Cement Additive", Cement and Concrete Research, Vol. 27, 1997, pp. 1713-1717.
- [10] S. Caijun, "Steel Slag-its Production, Processing, Characteristics and Cementitious Properties", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, 2004, pp. 230-236.
- [11] สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และเมธี เวชารัตนา "แบบจำลองทำนายกำลังอัดของเถ้าถ่านหินมอร์ตาร์จากความละเอียดของเถ้าถ่านหิน" การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ.2544 หน้า MAT-31-MAT-36.
- [12] C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, V. Sata and T. Leekeeratikul, "Use of Ground Coarse Fly Ash as a Replacement of Condensed Silica Fume in Producing High-strength Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 549-555.