

คุณสมบัติทางกลและความคงทนของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสม ตะกรันเตาหลอมโลหะที่ผ่านการบดด้วยเครื่องลอสแอลเจลลิส

บุรฉัตร ฉัตรวีระ¹ และ ณรงค์ศักดิ์ มากกุล²

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12121

รับเมื่อ 28 เมษายน 2546 ตอบรับเมื่อ 23 มกราคม 2547

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกลและความคงทนของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะจากโรงงานหล่อเครื่องยนต์ คุณสมบัติที่ทำการศึกษาประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของตะกรันเตาหลอมโลหะ ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ดัชนีกำลังของตะกรันและความสามารถในการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ คุณสมบัติทางกลได้แก่ กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ และคุณสมบัติทางด้านความทนทานได้แก่ การหดตัวแบบแห้งของเพสต์ ความทนทานต่อกรดไฮโดรคลอริกและปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ โดยกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และทำการควบคุมอัตราส่วนการแทนที่ของตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) ที่ 0.3, 0.4 และ 0.5 และอัตราส่วนวัสดุผงต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบ พบว่าตะกรันเตาหลอมโลหะซึ่งผ่านการบดด้วยเครื่องลอสแอลเจลลิสเป็นจำนวน 1,000 รอบไม่สามารถจัดอยู่ในประเภทของตะกรันเตาถลุงสำหรับใช้ในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 989 สำหรับความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ และค่าการไหลแผ่ในรูปของความต้องการน้ำของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ของตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลง นอกจากนี้การหดตัวแบบแห้งของเพสต์ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกและความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ของตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

² ผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

Mechanical Properties and Durability of Portland Cement Containing Ground Slag by Los Angeles Machine

Burachat Chatveera¹ and Narongsak Makul²

Thammasat University (Rangsit Campus), Pathumthani 12121

Received 28 April 2003 ; accepted 23 January 2004

Abstract

This research presented mechanical properties and durability of Portland cement containing slag from car engine foundry. The investigation included chemical composition and physical properties of slag, normal consistency and setting time of paste, slag activity index and flowability of mortar. A mechanical property such as compressive strength of mortar was also investigated. Durability properties tested were drying shrinkage of paste, hydrochloric acid attacks and carbonation reaction of mortar. Hydrochloric acid was used at a concentration of 5% by weight. Mortars with the percentage replacements of slag in Portland cement type I by weight were 0, 10, 20, 30, 40 and 50% and water to binder materials ratio (W/B) of 0.3, 0.4, and 0.5 were used. The binder materials to sand ratio was 1:2.75 by weight. The test results showed that slag which was ground by Los Angeles machine (1000 revolutions) could not be used as slag for using in concrete as specified by ASTM C 989 standards. Normal consistency and setting time of paste and flowability in term of water requirement of mortar were increased when the percentage replacements of slag in Portland cement were increased whereas compressive strength of mortar was decreased. Furthermore, drying shrinkage of paste, the weight loss due to hydrochloric acid of mortar, and the depth of carbonation reaction of mortar were increased when the percentage replacements of slag in Portland cement were increased.

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering.

² Research Assistant, Department of Civil Engineering.

1. บทนำ

คอนกรีตนับเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีของเสียที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นในปริมาณมาก ยกตัวอย่างเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น ประกอบกับสภาพเศรษฐกิจในปัจจุบันทำให้แนวคิดเรื่องของการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ มีมากขึ้น โดยยึดหลักการที่ว่า เมื่อนำวัสดุดังกล่าวกลับมาใช้งานใหม่ต้องทำให้คุณภาพของคอนกรีตคงเดิมหรือดีขึ้น

ในประเทศไทยมีโรงงานหลอมโลหะอยู่เป็นจำนวนมาก โดยจากข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรมในช่วงปี พ.ศ. 2538 - 2539 มีจำนวน 336 แห่ง [1] ซึ่งในกระบวนการผลิตจะมีวัสดุเหลือทิ้งเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตหลายชนิด อาทิเช่น ตะกรันเตาหลอมโลหะ พงเหล็ก พงฝุ่นทราย เป็นต้น การนำตะกรันเตาหลอมโลหะกลับมาใช้งานโดยการนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้ทำคอนกรีตจึงเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่ง เพราะนอกจากจะเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าแล้วยังสามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงเกิดแนวคิดในการศึกษาเพื่อพิจารณาและประเมินศักยภาพของตะกรันเตาหลอมโลหะจากโรงงานหลอมโลหะที่เกิดขึ้นในประเทศไทยสำหรับใช้ในงานคอนกรีต โดยในเบื้องต้นนี้จะศึกษาจากโรงงานหล่อเครื่องยนต์ซึ่งมีกระบวนการหลอมโลหะและหล่อชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ซึ่งมีตะกรันเตาหลอมโลหะเกิดขึ้น

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของเพสต์และมอร์ตาร์ โดยการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะจากโรงหล่อเครื่องยนต์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3. วิธีการศึกษา

3.1 ขอบเขตของการศึกษา

3.1.1 ตัวแปรที่ใช้ คือ ปริมาณการแทนที่ของตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ตามลำดับ และอัตราส่วนวัสดุผงต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนัก การผสมรวมของวัสดุผงใช้วิธีการคลุกเคล้า (blending)

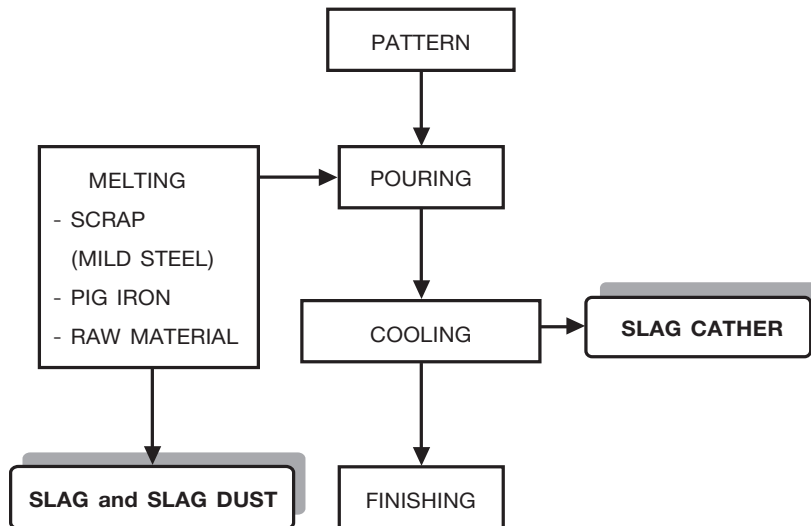
3.1.2 คุณสมบัติที่ทำการศึกษาจากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ได้แก่ การหดรัดตัวแบบแห้ง

3.1.3 คุณสมบัติที่ทำการศึกษาจากตัวอย่างมอร์ตาร์ได้แก่ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ความทนทานต่อสารละลายเป็นกรดไฮโดรลิก (HCl) ที่เข้มข้นร้อยละ 5 มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 1.0 และปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นที่อายุ 90 และ 180 วัน ตามลำดับ

3.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.2.2 ตะกรันเตาหลอมโลหะ (Slag) จากจังหวัดชลบุรี โดยตะกรันเตาหลอมโลหะจะนำมาบดด้วยเครื่องลอสแอลเจลลิส (Los Angeles) ซึ่งหมุนด้วยความเร็ว 33 รอบต่อนาที เป็นจำนวน 1,000 รอบ โดยมีรายละเอียดของกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเริ่มต้นจากเมื่อเตรียมแบบหล่อเครื่องยนต์ (pattern) ซึ่งขึ้นรูปจากทรายเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนของการหลอมน้ำเหล็กด้วยไฟฟ้า (electric furnace) โดยนำ SCRAP ซึ่งเป็นเหล็กกล้าละมุน (mild steel) แร่เหล็ก (pig iron) และวัตถุดิบอื่นๆ ที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำเหล็กมาทำการหลอมจนกระทั่งมีอุณหภูมิประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส ซึ่งในกระบวนการหลอมส่วนผสมนี้จะมีกากของเสียเป็นตะกรันเตาหลอมโลหะ และฝุ่นจากเตาหลอม (slag dust) เกิดขึ้น โดยตะกรันจะลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าของน้ำเหล็กภายในเตาหลอมซึ่งจะใช้อุปกรณ์กำจัดลงถังเก็บและเพื่อความสะอาดต่อการกำจัดออกจากเตาหลอมจึงมีการเติมวัสดุเข้าไปในขณะหลอมเหล็กเพื่อให้ตะกรันเหล็กจับตัวกัน เมื่อตะกรันเย็นตัวลงจะเป็นตะกรันเตาหลอมโลหะที่มีก้อนขนาดใหญ่ซึ่งมีทั้งแบบที่แตกเปราะง่ายและเป็นเม็ดแข็ง ในขณะที่ฝุ่นจากเตาหลอมจะถูกดูดออกโดยใช้เครื่อง Dust Collector จากนั้นจึงเทส่วนผสมของน้ำเหล็กจากเตาหลอม (pouring) หลังจากการเทส่วนผสมเรียบร้อยแล้วจะมาถึงกระบวนการลดอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่อยู่ในแบบหล่อ (cooling) โดยในขั้นตอนนี้มีตะกรันเศษเหลือที่ติดกับแบบและหลุดร่อนออกในขณะที่มีการลดอุณหภูมิ (slag cather) จากนั้นจึงถอดแบบและตกแต่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย (finishing) ตะกรันเตาหลอมโลหะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการมีปริมาณโดยเฉลี่ยปีละประมาณ 290 ตัน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคะกรันเตาหลอมโลหะในส่วนที่ได้จากเตาหลอมในขณะหลอมน้ำเหล็ก



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตของการหล่อเครื่องยนต์

3.2.3 มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 [2] และมีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.58

3.3 รายละเอียดวิธีการทดสอบ

3.3.1 วิธีการทดสอบคุณสมบัติของเพสต์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะ

1. การทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ ตามมาตรฐาน ASTM C 187 [3]
2. การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 191 [4]
3. การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 490 [5] และ ASTM C 596 [6] โดยใช้ตัวอย่างขนาด 25 x 25 x 285 มม. ทำการถอดแบบหล่อที่เวลา $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง วัดความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่าง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปทำการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ระหว่างนั้นให้วัดค่าการยืดหดตัวของตัวอย่างด้วยเครื่อง Digital Length Comparator อย่างสม่ำเสมอ เมื่อครบกำหนด 28 วัน จึงนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เปลี่ยนมาเป็นการบ่มในตู้ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60 ± 5 ทำการเก็บวัดข้อมูลเป็นประจำจนกระทั่งค่าการหดตัวมีแนวโน้มคงที่และคำนวณหน่วยการยืดหดตัวจากความยาวที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับความยาวเริ่มต้น ของแท่งตัวอย่าง

3.3.2 วิธีการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะ

1. การทดสอบร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยใช้แนวทางจากมาตรฐาน ASTM C 109 [7] มาทำการดัดแปลงใช้กับมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะซึ่งควบคุมอัตราส่วนการแทนที่ของตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ปริมาณวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาหลอมโลหะ) ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และใช้ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 แล้วจึงทำการบ่มในน้ำและทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ
2. การทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1437 [8]
3. การทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 100 มม. การทดสอบกำลังรับแรงอัดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 39 [9] ทำการทดสอบที่อายุ 1, 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ
4. การทดสอบความทนทานต่อสารละลายที่เป็นกรด โดยหล่อมอร์ตาร์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. หลังถอดแบบจึงนำมาทำการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงบ่มในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 1.0 ทำการทดสอบหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่เวลา 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ
5. การทดสอบความทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. บ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงนำไปไว้บริเวณที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในที่นี้จะนำไปไว้ในห้องเรียนที่มีการใช้งานอย่างต่อเนื่องซึ่งมีเครื่องปรับอากาศตั้งอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60 ± 5 เมื่อครบกำหนดจึงนำมาทำการผ่าซีก จากนั้นทำการฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1

โดยน้ำหนักในเอทานอลที่บริเวณหน้าตัดภายใน สังเกตสีที่เปลี่ยนไปของหน้าตัดดังกล่าว บริเวณใดที่มีการทำปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นจะทำให้สีของพินอล์ฟทาลีนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนบริเวณที่ไม่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพู จากนั้นทำการวัดระยะจากผิวนอกของแท่งตัวอย่างจนถึงบริเวณที่เป็นสีม่วงอมชมพู และกำหนดเป็นค่าความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น

3.4 สัดส่วนที่ใช้ในการผสมเพสต์และมอร์ตาร์

สัดส่วนผสมของเพสต์และมอร์ตาร์แสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของเพสต์

อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุผง	ร้อยละการแทนที่ โดยน้ำหนัก	ปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	ตะกรันเตาหลอมโลหะ (กก./ม. ³)	น้ำ (กก./ม. ³)
0.30	0	1617	0	485
0.30	10	1455	162	485
0.30	20	1293	324	485
0.30	30	1131	486	485
0.30	40	969	648	485
0.30	50	807	810	485
0.40	0	1392	0	556
0.40	10	1253	139	556
0.40	20	1114	278	556
0.40	30	975	417	556
0.40	40	836	556	556
0.40	50	697	695	556
0.50	0	1222	0	611
0.50	10	1100	122	611
0.50	20	978	244	611
0.50	30	856	366	611
0.50	40	734	488	611
0.50	50	612	610	611

ตารางที่ 2 ลัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์

อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุผง	ร้อยละการแทนที่ โดยน้ำหนัก	ปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	ตะกรันเตาหลอมโลหะ (กก./ม. ³)	น้ำ (กก./ม. ³)	ทราย (กก./ม. ³)
0.30	0	604	0	181	1661
0.30	10	544	60	181	1661
0.30	20	483	121	181	1661
0.30	30	423	181	181	1661
0.30	40	362	242	181	1661
0.30	50	302	302	181	1661
0.40	0	569	0	228	1565
0.40	10	512	57	228	1565
0.40	20	455	114	228	1565
0.40	30	398	171	228	1565
0.40	40	341	228	228	1565
0.40	50	285	285	228	1565
0.50	0	539	0	270	1482
0.50	10	485	54	270	1482
0.50	20	431	108	270	1482
0.50	30	377	162	270	1482
0.50	40	323	216	270	1482
0.50	50	270	270	270	1482

4. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

4.1 คุณสมบัติของตะกรันเตาหลอมโลหะ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาหลอมโลหะที่ผ่านการบดด้วยเครื่องลอสแอลเจลลิสจำนวน 1000 รอบ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงได้ในตารางที่ 3 พบว่าตะกรันเตาหลอมโลหะมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) มากกว่าที่มีในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในขณะที่ปริมาณแคลเซียมออกไซด์มีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของตะกรันเตาหลอมโลหะได้แก่ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้มีค่าร้อยละ 0.92 ซึ่งน่าจะมาจากวัสดุที่ใส่เข้าไปในขณะหลอมเหล็กเพื่อให้ตะกรันเหล็กจับตัวกันสะดวกต่อการกำจัดออกจากเตาหลอม และเมื่อนำตะกรันเตาหลอมโลหะมาทำการจัดประเภทของตะกรันตามมาตรฐาน ASTM C 989 ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าไม่สามารถจัดประเภทของตะกรันเตาหลอมโลหะได้ เนื่องจากดัชนีกำลังของตะกรันที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่าต่ำกว่าทุกประเภทในมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้

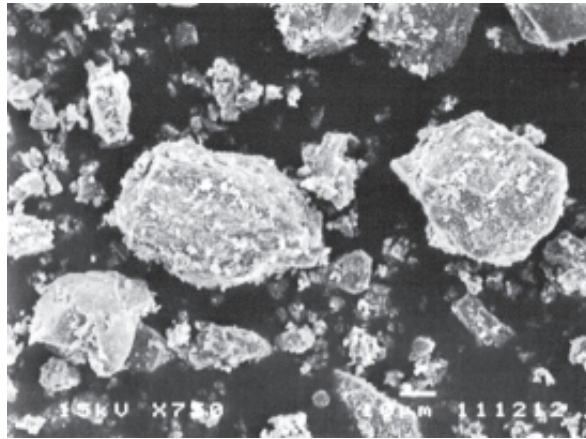
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกรันเตาหลอมโลหะเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบเคมี (ร้อยละ)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	20.84	5.22	3.20	66.28	1.24	0.22	0.10	2.41	0.96
ตะกรันเตาหลอมโลหะ	57.20	12.79	16.64	1.87	0.30	0.48	0.00	0.00	0.92
คุณสมบัติทางกายภาพ			ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1			ตะกรันเตาหลอมโลหะที่ผ่านการบด			
1. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)			0.19			0.04			
2. พื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีเบลน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)			3248			720			
3. ความถ่วงจำเพาะ			3.14			5.63			
4. ความละเอียด (ร้อยละผ่าน)									
- ≥ 75 ไมโครเมตร			0.5			59.1			
- 75 ไมโครเมตร			5.3			13.8			
- 45 ไมโครเมตร			3.6			4.3			
- ≤ 36 ไมโครเมตร			90.6			22.8			
5. ดัชนีกำลังของตะกรัน (ร้อยละ)									
7 วัน			100			58			
28 วัน			100			68			
6. ปริมาณน้ำที่ต้องการ (ร้อยละ)			100			101			

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของตะกรันเตาหลอมโลหะเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 989 [10]

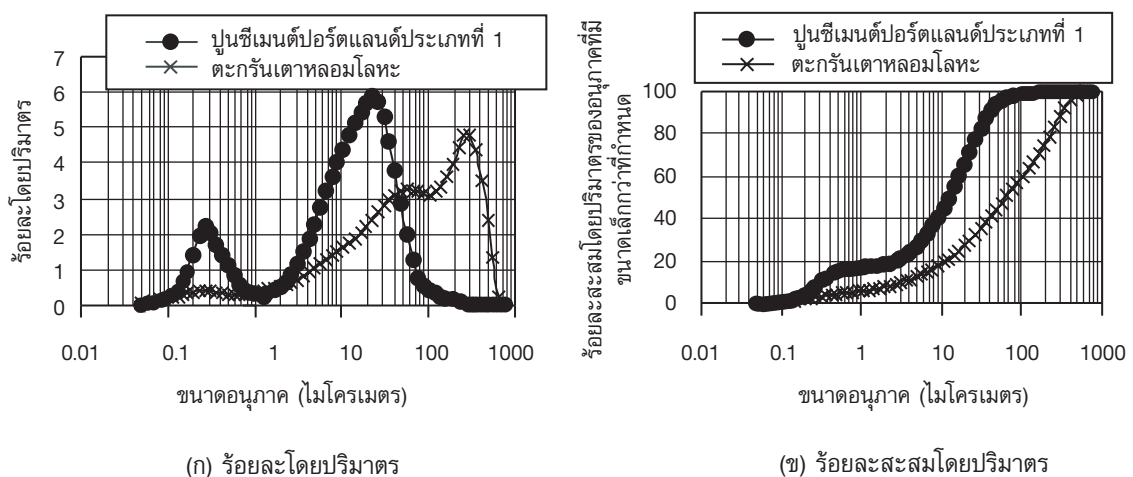
องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณสูงสุด (ไม่เกิน)			ตะกรันเตาหลอมโลหะ
Sulfur Trioxide (SO ₃), max., %	4.00			0.0
Alkalis as Na ₂ O, Na ₂ O (%) + 0.658 K ₂ O (%), max., %	0.60			0.2
คุณสมบัติทางกายภาพ	ระดับของตะกรันเตาหลอมโลหะ			ตะกรันเตาหลอมโลหะ
	80	100	120	
ดัชนีกำลังของตะกรัน				
7 วัน, min.,%	-	70	90	58
28 วัน, min.,%	70	90	110	68

เมื่อพิจารณาลักษณะอนุภาคของตะกรันเตาหลอมโลหะที่ผ่านการบดด้วยเครื่องลอสแอลเจลลิสจำนวน 1000 รอบ (ความเร็ว 33 รอบต่อนาที) ที่กำลังขยาย 750 เท่า พบว่าตะกรันเตาหลอมโลหะมีลักษณะเป็นก้อนเป็นเหลี่ยมมุมและมีอนุภาคขนาดเล็กเกาะที่ผิวของอนุภาคที่ใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 อนุภาคของตะกรันเตาหลอมโลหะที่ผ่านการบด (กำลังขยาย 750 เท่า)

สำหรับการกระจายขนาดของอนุภาคตะกรันเตาหลอมโลหะแสดงในรูปที่ 3 พบว่าตะกรันเตาหลอมโลหะที่ผ่านการบดด้วยเครื่องลอสแอลเจลลิส จำนวน 1000 รอบ มีอนุภาคกระจายขนาดคละอยู่ในช่วงขนาด 0.05 ถึง 700 ไมโครเมตร โดยที่ตะกรันเตาหลอมโลหะมีอนุภาคในช่วงขนาด 0.05 ถึง 42 ไมโครเมตร น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในขณะที่ขนาดอนุภาคในช่วง 42 ถึง 700 ไมโครเมตร ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีปริมาณน้อยกว่าตะกรันเตาหลอมโลหะ

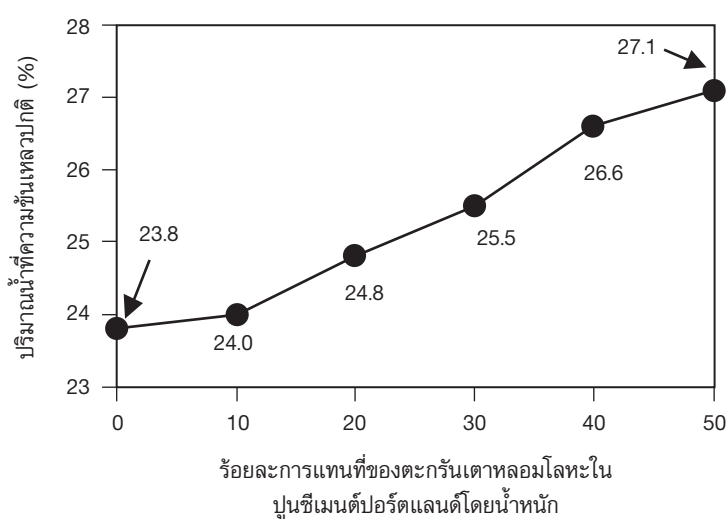


รูปที่ 3 การกระจายขนาดคละของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาหลอมโลหะ

4.2 คุณสมบัติของเพสต์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะ

4.2.1 ความชื้นเหลวปกติ

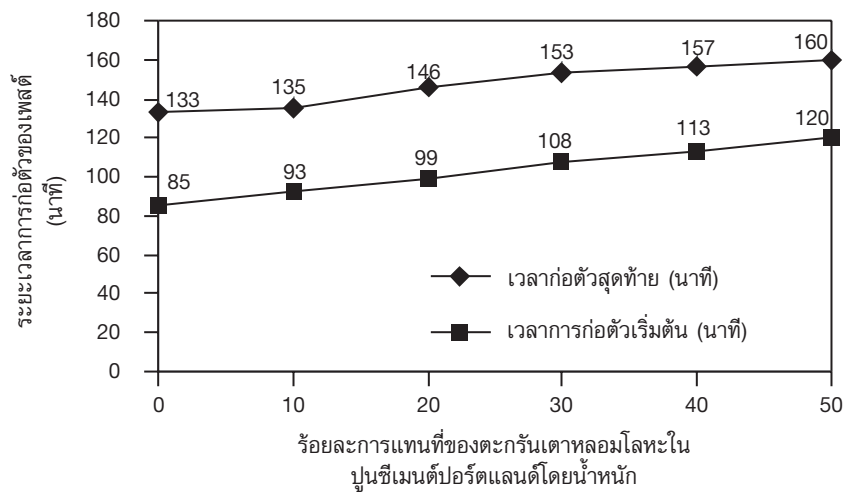
ผลจากการทดสอบค่าปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเพสต์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะมีค่าความชื้นเหลวปกติมากกว่าซีเมนต์เพสต์ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของตะกรันเตาหลอมโลหะที่เพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะมาจากการที่ตะกรันเตาหลอมโลหะมีอนุภาคขนาดเล็กเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคที่ใหญ่มากดังแสดงในรูปที่ 2 ทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ของตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ของตะกรันเตาหลอมโลหะกับปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ

4.2.2 ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวเป็นการอธิบายถึงการแข็งตัวของเพสต์จากสภาพที่ไหลได้เป็นสภาพที่แข็งตัวโดยจากผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์แสดงในรูปที่ 5 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายของตะกรันเตาหลอมโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้นประกอบกับความเฉื่อยของตะกรันเตาหลอมโลหะซึ่งพิจารณาจากดัชนีการพัฒนากำลัง ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาโดยรวมของเพสต์ยิ่งช้าลงจึงทำให้สภาพการแข็งตัวของเพสต์ต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น

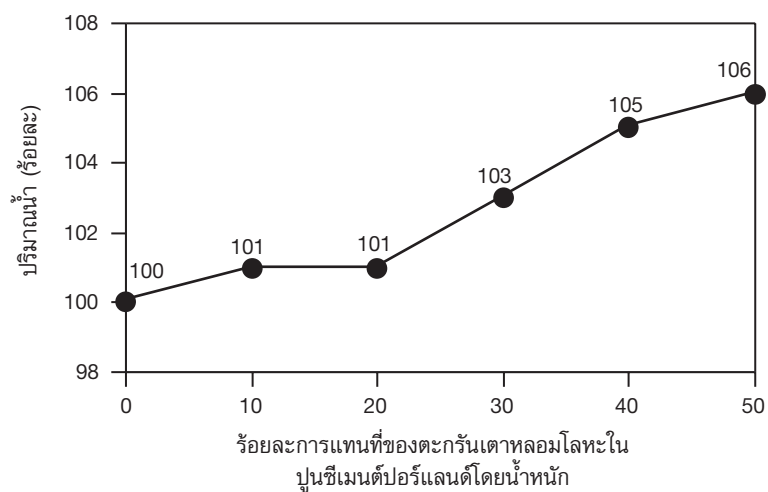


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ของตะกรันเตาหลอมโลหะ กับระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

4.3 คุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะ

4.3.1 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

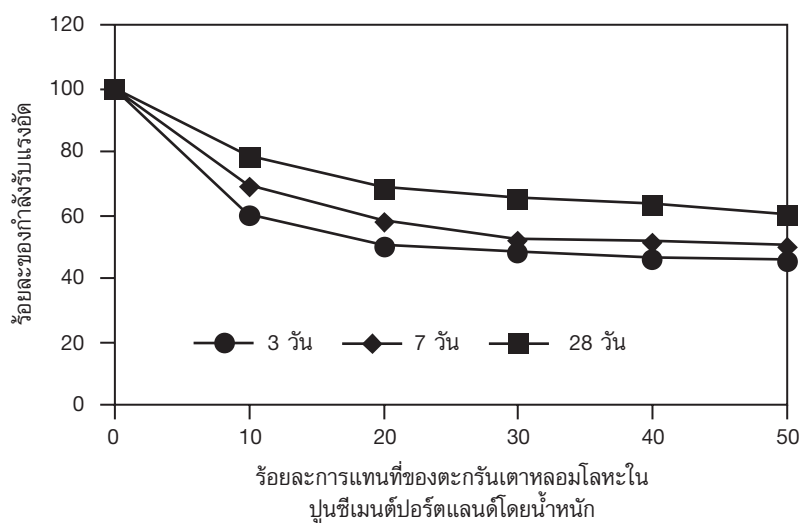
จากผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ในรูปของความต่อน้ำที่ทำให้มอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อทำการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นทำให้เพิ่มปริมาณน้ำที่ได้ค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน (ร้อยละ 110 ± 5) ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความชื้นเหลวปกติ ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันคือมาจากการที่ตะกรันเตาหลอมโลหะมีอนุภาคขนาดเล็กเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคที่ใหญ่ทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ได้ค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ค่าการไหลแผ่ในรูปของค่าความต่อน้ำ

4.3.2 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

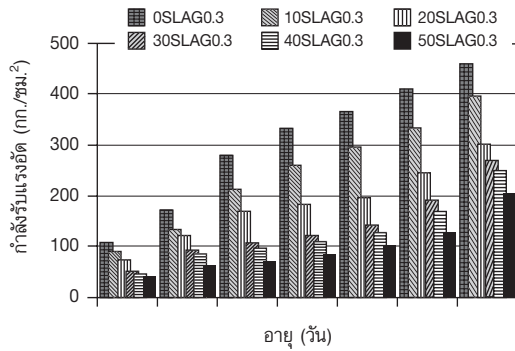
จากรูปที่ 7 พบว่าร้อยละการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะเทียบกับมอร์ตาร์ปกติ (ร้อยละการแทนที่เท่ากับ 0) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีสาเหตุมาจากความเฉื่อยของตะกรันเตาหลอมโลหะทำให้การพัฒนากำลังรับแรงลดลง ประกอบกับผลของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงจึงทำให้กำลังรับแรงจึงมีค่าลดลงตามลำดับ และสังเกตว่าค่ากำลังรับแรงของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าต่ำที่สุด



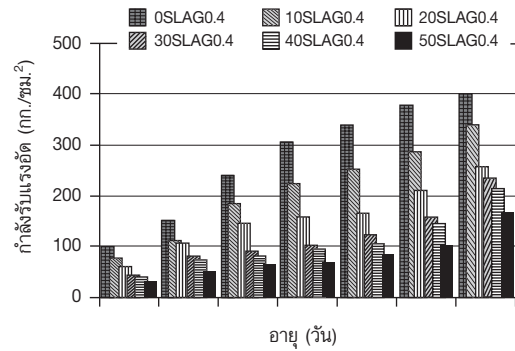
รูปที่ 7 ดัชนีกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันเตาหลอมโลหะ

4.3.3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะ

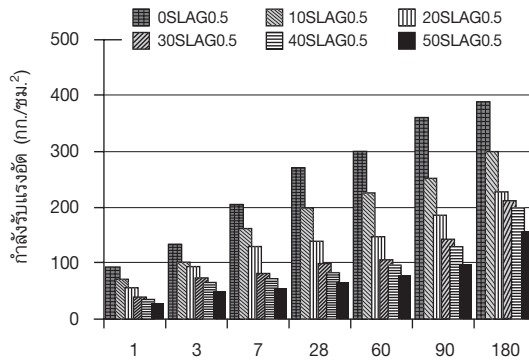
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าตะกรันเตาหลอมโลหะ) เท่ากับ 0.3 ค่าของกำลังรับแรงอัดที่ได้มีค่าลดลงทุกอายุของการบ่มในน้ำ เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั้งนี้เพราะการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะเพิ่มขึ้น หมายถึงการที่ปูนซีเมนต์มีปริมาณลดลงตามไปด้วยทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงเพราะความสามารถในการทำปฏิกิริยาของตะกรันเตาหลอมโลหะมีค่าต่ำมาก โดยพิจารณาจากค่าดัชนีการพัฒนากำลังที่มีค่าร้อยละ 58 และ 68 ของปูนซีเมนต์ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ประกอบกับลักษณะของอนุภาคที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ทำให้มีพื้นที่ผิวน้อยการทำปฏิกิริยาจึงยิ่งลดลงค่าของกำลังรับแรงอัดจึงลดลงและเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงจะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงอีก เนื่องจากความพรุนของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้น



(ก) W/B เท่ากับ 0.3



(ข) W/B เท่ากับ 0.4



(ค) W/B เท่ากับ 0.5

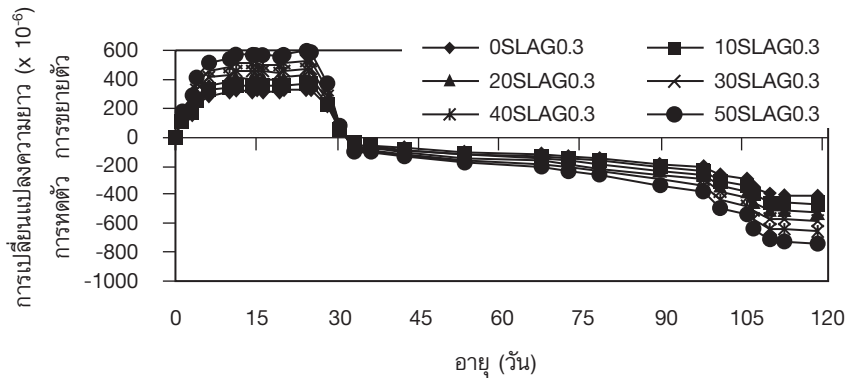
หมายเหตุ XSLAG_Y คือ มอร์ตาร์ซึ่งทำการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ X โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ Y

รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

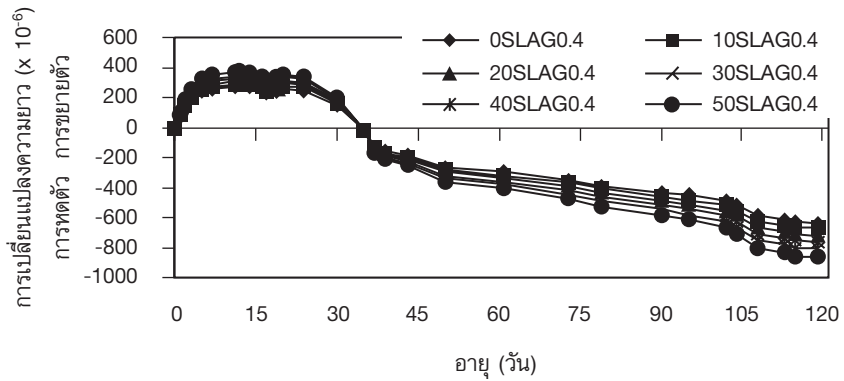
4.4 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของเพสต์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะ

4.4.1 การหดตัวแบบแห้ง

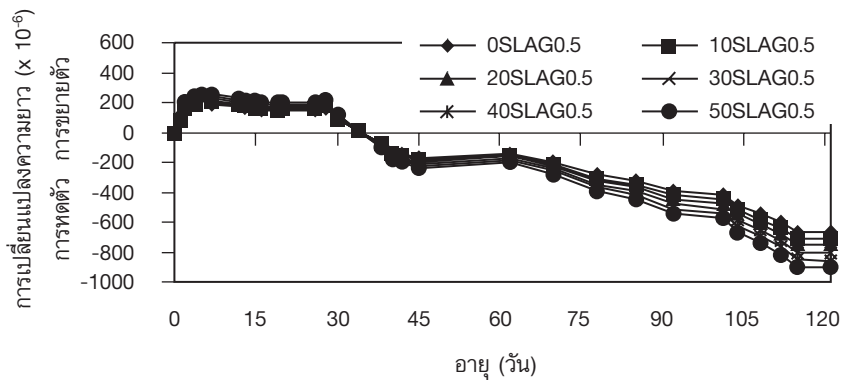
จากผลการทดสอบหาค่าการหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าเมื่อทำการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการหดตัวแบบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลไกการหดตัวแบบแห้งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ ปริมาณโพรงที่มีอยู่ภายในและความชื้นของสภาวะแวดล้อม [11] โดยเห็นว่าการเพิ่มปริมาณตะกรันเตาหลอมโลหะมีแนวโน้มที่จะทำให้โครงสร้างมีความพรุนเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความเฉื่อยของตะกรันเตาหลอมโลหะซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่และเป็นเหลี่ยมมุมสูง ทำให้โพรงดังกล่าวน่าที่จะมีขนาดใหญ่ทำให้น้ำออกสู่ภายนอกได้มาก และเมื่อเพิ่มปริมาณตะกรันเตาหลอมโลหะเข้าไปในส่วนผสมจะทำให้โครงสร้างยังมีความพรุนมากขึ้นตามลำดับ ค่าการหดตัวแบบแห้งจึงเพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวแบบแห้งที่ค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะปริมาณน้ำที่มีมากขึ้นในซีเมนต์เพสต์ทำให้ปริมาณโพรงคาпилลารีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อันส่งผลให้ความชื้นในเพสต์สูญเสียให้กับสภาวะแวดล้อมได้มากขึ้น การหดตัวแบบแห้งจึงสูงขึ้น



(ก) W/B เท่ากับ 0.3



(ข) W/B เท่ากับ 0.4



(ค) W/B เท่ากับ 0.5

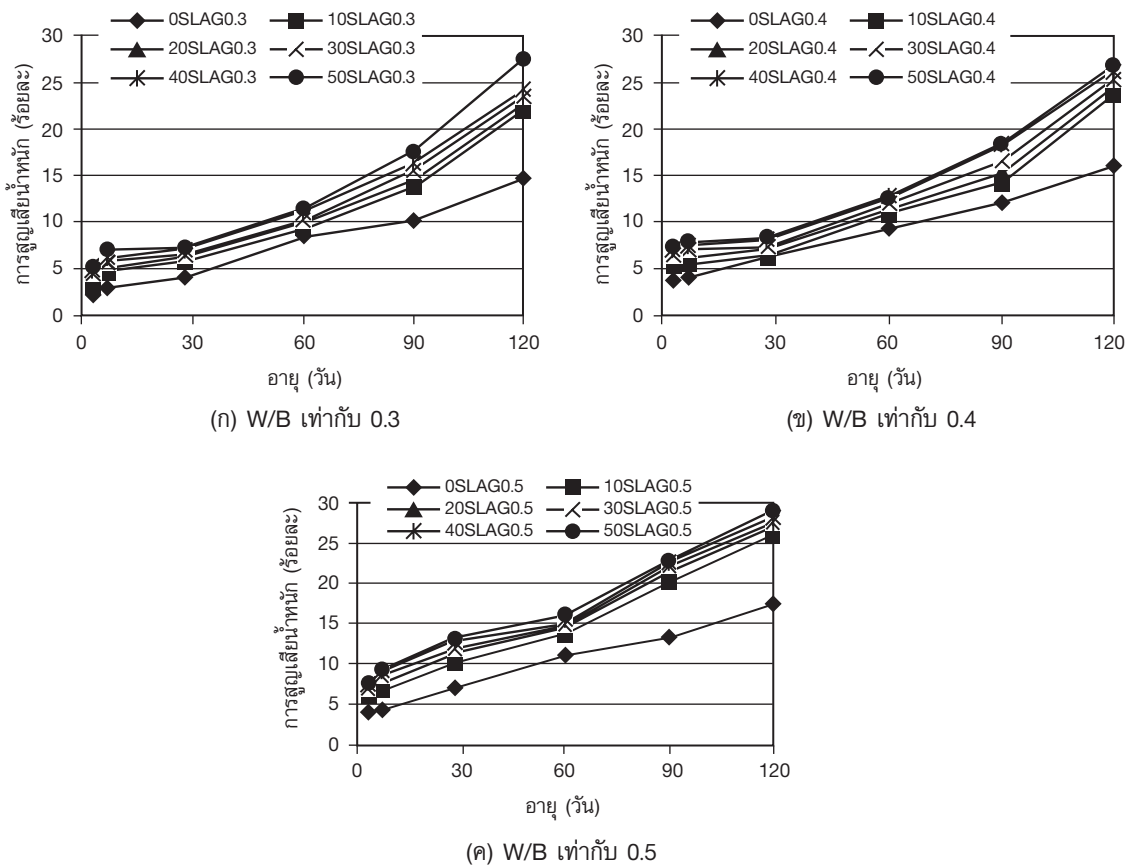
หมายเหตุ **X**SLAG**Y** คือ มอร์ตาร์ซึ่งทำการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ **X** โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ **Y**

รูปที่ 9 การหดตัวแบบแห้งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 596

4.5 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะ

4.5.1 ความทนทานต่อกรดไฮโดรคลอริกของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะ

จากผลการทดสอบความทนทานต่อสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในรูปของร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของตะกรันเตาหลอมโลหะที่ผ่านการบดด้วยเครื่องลอสแอลเจลิสดังแสดงในรูปที่ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 พบว่าเมื่อทำการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากตะกรันเตาหลอมโลหะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่ำกว่าปูนซีเมนต์ทำให้โครงสร้างของมอร์ตาร์มีความพรุนเพิ่มขึ้น เปรียบเสมือนมีการเติมมวลรวมหยาบเพิ่มเข้าไป [12] ซึ่งผลกระทบจะมีมากขึ้น ประกอบกับความสามารถในการดูดซับน้ำที่มีมากในตัวัสดุ แต่ในที่นี้คือสารละลายกรดที่ตะกรันเตาหลอมโลหะดูดซับเข้าไปจึงทำให้กรดสามารถเข้าไปทำลายโครงสร้างของมอร์ตาร์ได้เพิ่มขึ้น ยิ่งถ้าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงสูงขึ้นก็จะทำให้ความพรุนภายในโครงสร้างมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งส่งผลทำให้กรดสามารถแทรกเข้าไปทำลายเนื้อมอร์ตาร์ผ่านโพรงที่เปิดสัมผัสกับกรด เช่น โพรงคาปิลลารี นอกเหนือจากการทำลายของกรดที่ผิวของมอร์ตาร์

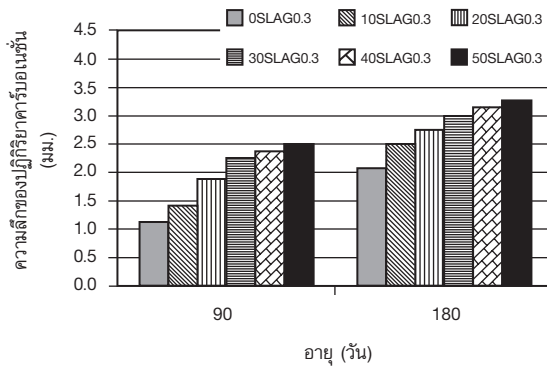


หมายเหตุ X SLAG Y คือ มอร์ตาร์ซึ่งทำการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะ (SLAG) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ X โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ Y

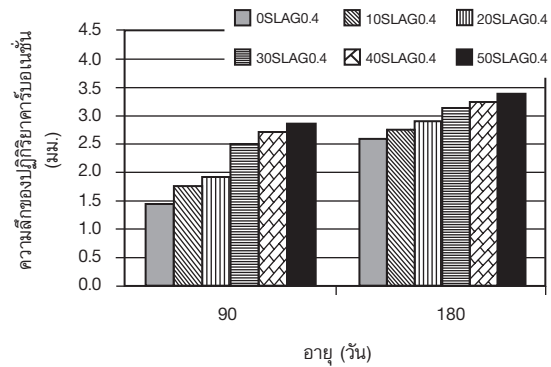
รูปที่ 10 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริก

4.5.2 ปฏิริยาคาร์บอนเนชั่น

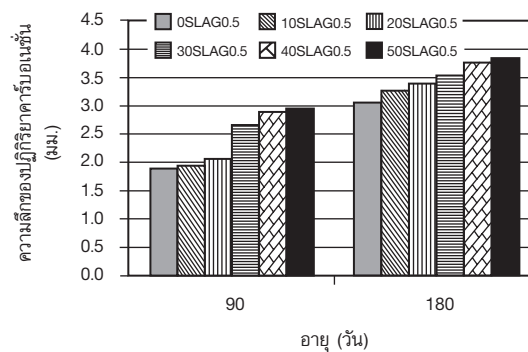
ผลการทดสอบความลึกของปฏิริยาคาร์บอนเนชั่นโดยเฉลี่ยของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะที่อายุ 90 และ 180 วัน ของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 11 ตามลำดับ พบว่ามอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาหลอมโลหะมีความลึกของปฏิริยาคาร์บอนเนชั่นเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อมีการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะที่ร้อยละ 50 ในขณะที่มอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์มีค่าต่ำสุด โดยปกติปฏิริยาคาร์บอนเนชั่นเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แทรกซึมผ่านทางโพรงของเพสต์และทำปฏิริยากับสารประกอบแคลเซียมในมอร์ตาร์เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้น [13] แต่เมื่อทำการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จากปฏิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ลดลง จึงเป็นสาเหตุให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่ผ่านเข้าภายในเนื้อมอร์ตาร์ได้ง่ายขึ้น ประกอบกับที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความลึกของปฏิริยาคาร์บอนเนชั่นเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความพรุนและปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น



(ก) W/B เท่ากับ 0.3



(ข) W/B เท่ากับ 0.4



(ค) W/B เท่ากับ 0.5

หมายเหตุ X SLAG Y คือ มอร์ตาร์ซึ่งทำการแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะ (SLAG) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ X โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ Y

รูปที่ 11 ความลึกเนื่องจากปฏิริยาคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ที่อยู่ในห้องเรียน (อุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60 ± 5)

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 ตะกรันเตาหลอมโลหะที่ผ่านการบดด้วยเครื่องลอสแอลเจลลิสเป็นจำนวน 1000 รอบ ภายใน 30 นาที ไม่สามารถจัดประเภทของตะกรันเตาหลอมโลหะตามมาตรฐาน ASTM C 989 [9] เนื่องจากค่าดัชนีดัชนีกำลังของตะกรันมีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้

5.2 ความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้าย และค่าการไหลแฟ้มมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อแทนที่ตะกรันเตาหลอมโลหะบดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนเพิ่มขึ้น

5.3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของตะกรันเตาหลอมโลหะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น

5.4 คุณสมบัติทางด้านความทนทานได้แก่ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริก การหดตัวแบบแห้ง และความลึกจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันเตาหลอมโลหะในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2545 นอกจากนี้ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตะกรันเตาหลอมโลหะและบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

1. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2537, บัญชีเลขที่ 59 และ 60 รายชื่อโรงงานอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะที่เป็นเหล็กกล้าและที่ไม่ใช่เหล็กกล้า, 80 หน้า.

2. American Society for Testing and Material, ASTM C 33, 1994, "Standard Specification for Concrete Aggregates", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02*, Philadelphia, PA, USA.

3. American Society for Testing and Material, ASTM C 187, 1994, "Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01*, Philadelphia, PA, USA.

4. American Society for Testing and Material, ASTM C 191, 1994, "Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01*, Philadelphia, PA, USA.

5. American Society for Testing and Material, ASTM C 490, 1994, "Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01*, Philadelphia, PA, USA.

6. American Society for Testing and Material, ASTM C 596, 1994, "Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01*, Philadelphia, PA, USA.

7. American Society for Testing and Material, ASTM C 109, 1994, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (Using 2-in., or 50 mm) Cube Specimens", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02*, Philadelphia, PA, USA.

8. American Society for Testing and Material, ASTM C 1437, 1994, "Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01*, Philadelphia, PA, USA.

9. American Society for Testing and Material, ASTM C 39, 1994, "Standard Test Method for Compressive Strength Cylindrical Concrete Specimens", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02*, Philadelphia, PA, USA.

10. American Society for Testing and Material, ASTM C 989, 1994, "Standard Specification for Ground Granulated Blast - Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars", *Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01*, Philadelphia, PA, USA.

11. Neville A.M., 1995, *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Pitman Books Limited, London, England.

12. Bentz, D., Garboczi, E., Haecker, C., and Jensen, O., 1999, "Effect of Particle Size Distribution on Performance Properties of Portland Cement-Based Materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 7, pp. 1663-1671.

13. Robu I., 1996 "A Study of Carbonation in Binding System with Cement and Hydraulic Admixtures", *Appropriate Concrete Technology*.