การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

A Study of Properties of Concrete with Ground Granulated Blast-Furnace Slag

เจต นาจารย์[1] และ ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2]

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดโดยแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผลการศึกษาพบว่าความต้องการน้ำของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีแนวโน้มให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน นอกจากนี้พบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และสุดท้ายพบว่าคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

คำสำคัญ : ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผงหินปูน กำลังอัดประลัย การหดตัวแบบแห้ง การแทรกซึมของคลอไรด์

Abstract

This paper presents the study of properties of concrete with ground granulated blast-furnace slag (GGBF slag). The Portland cement type 1 replaced partially with the GGBF slag and limestone powder was considered.

The results showed that the normal consistency of paste made with Portland cement type 1 replaced partially with the GGBF slag and limestone powder was smaller than that of Portland cement type 1 paste. A paste made from Portland cement type 1 replaced partially with the GGBF slag and limestone powder had delay of setting time when compared with Portland cement type 1 paste. In addition, the GGBF slag and limestone powder concrete had smaller slump when compared with Portland cement type 1 concrete specimens. While the compressive strength of concrete made from GGBF slag and limestone powder was slightly to be less than that of Portland cement type 1 concrete. It was also found that the drying shrinkage of concrete with GGBF slag and limestone powder was less than that of Portland cement type 1 concrete specimens. Finally, it was found that concrete specimens made from Portland cement type 1 partially replaced with GGBF slag and limestone powder had superior resistance chloride penetration when compared with Portland cement type 1 concrete specimens.

[1]นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[2]อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Keywords: ground granulated blast-furnace slag, limestone powder, compressive strength, drying shrinkage, chloride penetration

1. คำนำ

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากถึง 0.5 ตัน ในทุกๆ 1 ตันของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้น [1] หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์พลังงานที่ใช้ลำเลียงผลพลอยได้ไปทิ้งในบ่อกลบฝัง พลังงานที่ใช้ในการระเบิดภูเขาหินปูน และพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืดระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

ในปัจจุบันการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ground granulated blast-furnace slag, GGBF slag) นอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสาน (cementitious material) ในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีตมีเหตุผล 2 ประการ คือ 1) สามารถบด GGBF slag ได้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และ 2) สามารถปรับส่วนผสมคอนกรีตที่มี GGBF slag ให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้ง่าย [2] สำหรับในประเทศไทยยังมีข้อมูลการศึกษาวิจัยการนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตนั้นนับว่าน้อยมาก หรืออาจกล่าวว่าแทบไม่มีก็ว่าได้ ส่วนผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย เมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะต้นและความคงทนบางชนิดให้แก่คอนกรีตได้ [3-7] จากข้อดีของผงหินปูนดังกล่าวทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้เป็นนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดใช้เป็นวัสดุประสานและเป็นวัสดุประสานร่วมกับผงหินปูนแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของส่วนผสมในคอนกรีตซึ่งเป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์ร่วมกัน โดยได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตดังกล่าว

2. ระเบียบวิธีศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15

2. ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 14 ไมโครเมตร

3. ผงหินปูนใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิตมีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 8 ไมโครเมตร

4. ทราย ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนออกจนสะอาดนำไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์4และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (saturated-surface dry, SSD)

5. หินเบอร์ 2 นำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและ

สิ่งเจือปนต่างๆออกจนสะอาด นำไปอบ และปรับหินให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

6. น้ำใช้น้ำประปามีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในช่วง 7 ถึง 8

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กในครั้งนี้ ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติพื้นฐาน (ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี) และคุณสมบัติด้านซีเมนต์ (ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต) ของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน) นอกจากนี้ได้ศึกษาการหดตัวแบบแห้งและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนที่ศึกษาประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188-95 ความละเอียดโดยวิธีเบลนโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C204-00 และภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค ใช้วิธี scanning electronic microscope (SEM) ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานนั้นใช้วิธีวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

2.2.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน ซึ่ง ได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C187-98 และ ASTM C191-99 ตามลำดับ และค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยกำลังอัดประลัยของคอนกรีตใช้แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 10 ซ.ม. × 10 ซ.ม. ×10 ซ.ม. โดยหล่อ 3 ชิ้นตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 3, 14, 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัดประลัยประยุกต์ใช้มาตรฐานอังกฤษBS 1881-116

2.2.3 การทดสอบการหดหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) ของคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C157 ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบการหดตัวแบบไม่ยึดรั้งใช้แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 75 ม.ม. ×75 ม.ม. × 285 ม.ม. โดยหล่อ 3 ชิ้นตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลาอีก 7 วัน แล้วจึงนำชิ้นตัวอย่างขึ้นจากน้ำเช็ดให้แห้งแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศอีก 1 ชั่วโมง จึงชั่งน้ำหนักและวัดค่าความยาวด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator) และทำการวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงที่อายุ 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 42 และ 56 วัน โดยวางแท่งตัวอย่างให้มีระยะห่างไม่น้อยกว่า 1 นิ้วในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิคงที่ 21±2°C ตลอดการทดสอบ

2.2.4 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ใช้ชิ้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หนา 50 มิลลิเมตร โดยหลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำจนถึงอายุที่จะทำการทดสอบ ซึ่งทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน โดยทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (rapid chloride penetrability test, RCPT) ซึ่งใช้ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่าง เพื่อนำไปประเมินความสามารถแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตตามมาตรฐานASTM C1202 โดยตารางที่ 1 แสดงความสามารถแทรกซึมคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ ตามมาตรฐานของ ASTM C 1202

ตารางที่ 1 ความสามารถแทรกซึมคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ (ASTM C 1202)

จำนวนประจุที่เคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์)	ระดับการซึมผ่านได้
มากกว่า 4,000	สูง
2,000 ถึง 4,000	ปานกลาง
1,000 ถึง 2,000	ต่ำ
100 ถึง 1,000	ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ไม่มีผล

2.3 สัดส่วนผสมของเพสต์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สัดส่วนผสมของเพสต์และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน แสดงดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ที่ใช้ในการหาค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ผงหินปูน	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
C1[*]	100	-	-
C1-5LP[**]	95	5	-
C1-10LP	90	10	-
C1-30SL[***]	70	-	30
C1-50SL	50	-	50
C1-70SL	30	-	70
C1-5LP-25SL[****]	70	5	25
C1-5LP-45SL	50	5	45
C1-5LP-65SL	30	5	65
C1-10LP-20SL	70	10	20
C1-10LP-40SL	50	10	40
C1-10LP-60SL	30	10	60

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม) ที่ใช้ในการหาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบแห้งและความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ผงหินปูน	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ทราย	หิน	น้ำ
C1[*]	332	0	0	790	1080	215.8
C1-5LP[**]	316	16	0	790	1080	215.8
C1-10LP	299	33	0	790	1080	215.8
C1-30SL[***]	233	0	99	790	1080	215.8
C1-50SL	166	0	166	790	1080	215.8
C1-70SL	100	0	232	790	1080	215.8
C1-5LP-25SL[****]	233	16	83	790	1080	215.8
C1-5LP-45SL	167	16	149	790	1080	215.8
C1-5LP-65SL	100	16	216	790	1080	215.8

ตารางที่ 3 (ต่อ) สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม) ที่ใช้ในการหาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบแห้ง และความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ผงหินปูน	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ทราย	หิน	น้ำ
C1-10LP-20SL	233	33	66	790	1080	215.8
C1-10LP-40SL	167	33	132	790	1080	215.8
C1-10LP-60SL	180	33	119	790	1080	215.8

หมายเหตุ

[*]C1 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

[**]C1-xLP หมายถึง วัสดุประสานที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก

[***]C1-xSL หมายถึง วัสดุประสานที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก

[****]C1-xLP-ySL หมายถึง วัสดุประสานที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก และมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ y โดยน้ำหนัก

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

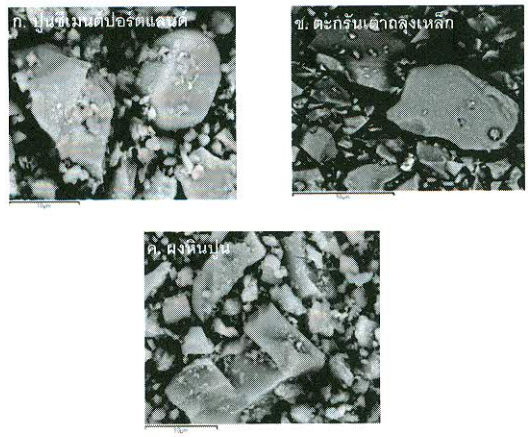
3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน

ตารางที่ 4 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน พบว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.12 ส่วนของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่าเท่ากับ 2.96 และ 2.69 ตามลำดับ สำหรับความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับ 3,250 4,600 และ 5,210 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ผงหินปูน
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.96	2.69
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ ก.)	3,250	4,600	5,210
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	16	14	8

ส่วนรูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน (ที่ใช้ในการศึกษา) โดยวิธี scanning electronic microscope (SEM) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของวัสดุประสานทั้งสามชนิดนั้นมีลักษณะรูปร่างของอนุภาคที่ใกล้เคียงกันกล่าวคือมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว



รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน

องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน (ตารางที่ 5) พบว่าซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าค่อนข้างสูงคือเท่ากับร้อยละ 34.06 เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 19.50 ในขณะที่ผงหินปูนมี SiO_2 น้อยมาก คือร้อยละ 0.45 ส่วนอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าเท่ากับร้อยละ 16.27ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนเท่ากับร้อยละ 4.97 และ 0.05 ตามลำดับ และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) นั้นพบว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าเท่ากับร้อยละ 36.05 ซึ่งน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน ซึ่งเท่ากับร้อยละ 65.38 และ 55.20 ตามลำดับ และพบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition, LOI) ของตะกันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ร้อยละ 1.44) มีค่าไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 2.27) ในขณะที่ของผงหินปูนมีค่าค่อนข้างสูงคือร้อยละ 43.12

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

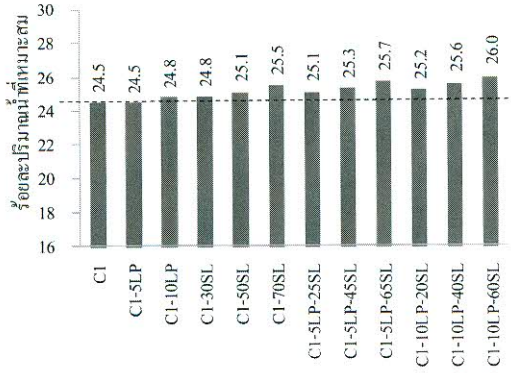
ออกไซด์ (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ผงหินปูน
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	19.50	34.06	0.45
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	4.97	16.27	0.05
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.78	1.70	0.03
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.38	36.05	55.20
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.08	7.38	0.34
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.16	2.16	< 0.01
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	< 0.01	0.21	< 0.01
โปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.47	1.09	0.01
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	2.27	1.44	43.12
แคลเซียมออกไซด์อิสระ(fCaO)	1.00	-	-
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง	0.28	-	-

3.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์

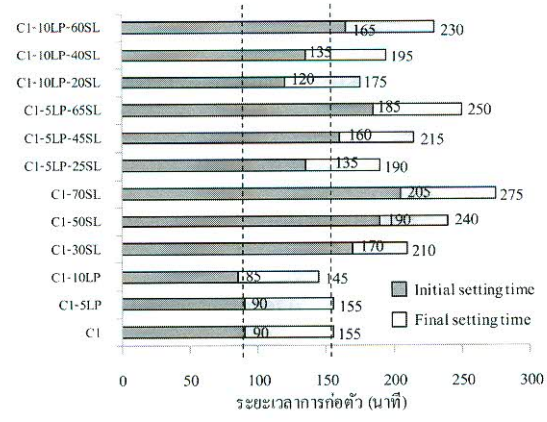
3.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

ผลการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์(normal consistency) แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีแนวโน้มสูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนทั้งนี้เป็นเพราะความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มากกว่า มีพื้นที่ผิวที่มากกว่า ส่งผลให้มีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้น (โดยเฉพาะเมื่อแทนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้น) ซึ่ง เช่นเดียวกับความต้องการน้ำของเพสต์แทนที่ด้วยผงหินปูนมีแนวโน้มให้ค่าที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยที่ละเอียดกว่า ส่วนเมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กร่วมกับผงหินปูน ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกันคือ หากปริมาณการแทนที่มากขึ้นปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ก็สูงขึ้น

รูปที่ 3 แสดงระยะเวลาการก่อตัว พบว่าระยะเวลาการก่อตัวระยะต้น (initial setting time) และระยะเวลาการก่อตัวระยะปลาย (final setting time) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าไม่แตกต่าง ในขณะที่เพสต์แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีแนวโน้มเร็วกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งที่เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งมีผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูน (8 ไมโครเมตร) ซึ่งมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (16 ไมโครเมตร) สามารถไปแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์เป็นผลให้พื้นที่ผิวของอนุภาคของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำมากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้มากขึ้น การก่อตัวจึงมีแนวโน้มเร็วขึ้นส่วนระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นการไปลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง รวมทั้งตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่า โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวก็ช้ามากขึ้น และเมื่อมีการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1พบว่าระยะเวลาการก่อตัวมีค่าช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1ล้วนซึ่งเป็นไปตามการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่มากขึ้น



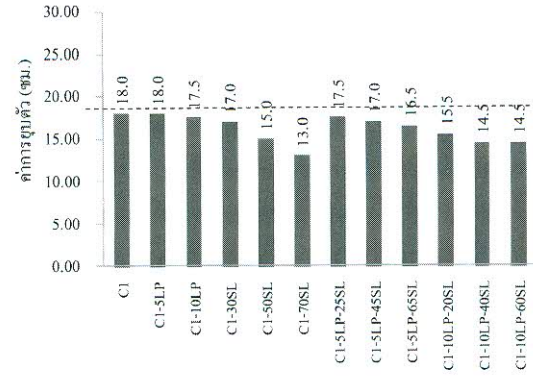
รูปที่ 2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน



รูปที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูน

3.2.2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงค่าการยุบตัว (slump) ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนซึ่งก็จะมีค่าแปรผกผันตามปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์กล่าวคือถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากจะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อย

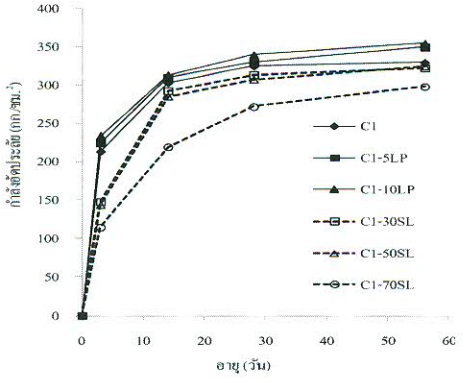


รูปที่ 4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

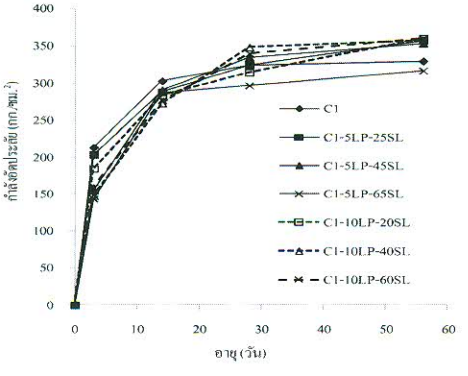
3.2.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

รูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้ พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (การแทนที่ร้อยละ 10 มีแนวโน้มมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 5) ทั้งนี้อาจเพราะผงหินปูนมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยที่ค่อนข้างละเอียดสามารถเข้าไปเติมเต็ม (Filler) ช่องว่างของเพสต์ (การแทนที่ในปริมาณร้อยละ 10 ซึ่งน่าเป็นปริมาณที่เหมาะสมกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 5) เป็นการลดปริมาณช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นคอนกรีตจึงมีกำลังอัดประลัยสูงขึ้นส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดนั้นกลับให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นให้ค่ากำลังอัดประลัยต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดประลัยลดลง โดยเฉพาะในช่วงอายุต้น อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยา

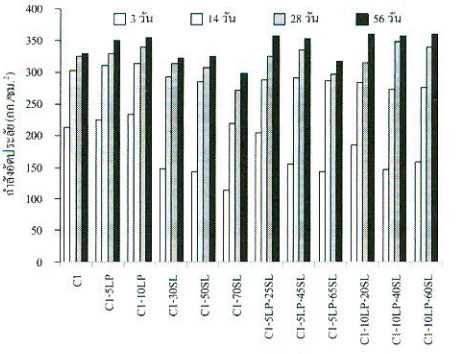
ปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีอัตราการพัฒนาเพิ่มที่สูงขึ้น (รูปที่ 5 และรูปที่ 7) ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 6 และรูปที่ 7) พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตดังกล่าวมีแนวโน้มเหมือนกับการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและการแทนที่ด้วยผงหินปูนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน



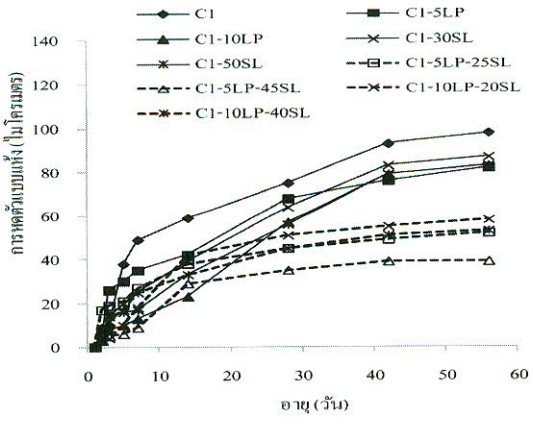
รูปที่ 7 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 3, 14, 28 และ 56 วัน

3.3 การหดตัวแบบแห้ง

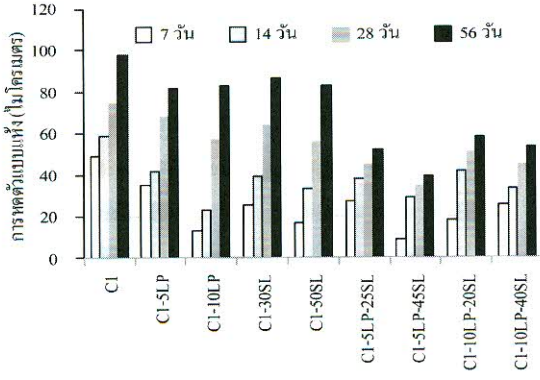
รูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงค่าการหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1ล้วนคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

ผลการศึกษาพบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงสามารถดูดซับน้ำไว้ที่ผิวของอนุภาคได้มาก ทำให้เหลือน้ำอิสระน้อยลง คอนกรีตจึงมีช่องว่างลดลง ส่งผลให้การสูญเสียความชื้นยากขึ้น และพบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยผงหินปูน(โดยการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 มีแนวโน้มน้อยกว่าเมื่อแทนที่ด้วยร้อยละ 30) ซึ่งเหตุผลเพราะตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความ

ละเอียดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนในกรณีคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ก็ให้ผลการหดตัวแบบแห้งในทิศทางเดียวกับคอนกรีตที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และที่แทนที่ด้วยผงหินปูน กล่าวคือมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



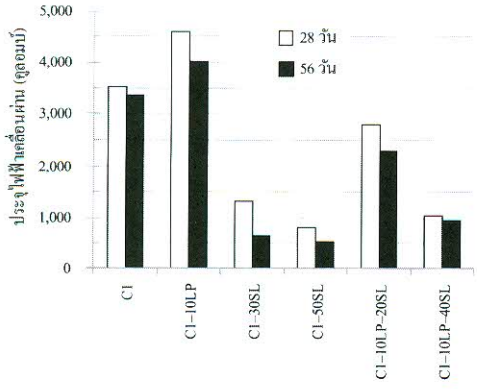
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน



รูปที่ 9 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน

3.4 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

ผลการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (rapid chloride penetration test, RCPT) ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนที่อายุ 28 และ 56 วัน (รูปที่ 10) พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (โดยเฉพาะเมื่ออายุ 28 วัน มีค่าของประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านมากกว่า 4,000 คูลอมป์) บ่งชี้ถึงการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ในระดับที่สูง (ตารางที่ 1) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคอนกรีตผสมผงหินปูนขาดคุณสมบัติในการยึดประสาน (แม้ว่าผงหินปูนเป็นวัสดุอุดโพรงช่องว่าง (Filler) ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นก็ตาม) จึงทำให้คลอไรด์สามารถแทรกผ่านเนื้อคอนกรีตได้ง่าย ส่วนปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนโดยเฉพาะเมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 50) คือมีปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตน้อยกว่า 1,000 คูลอมป์ บ่งชี้ถึงการแทรกซึมคลอไรด์ได้ในระดับที่ต่ำมาก (ตารางที่ 1) ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น สำหรับในกรณีของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนนั้นพบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อการแทนที่ด้วยปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่ายิ่งต่ำลง ทั้งนี้ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 10 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ความต้องการน้ำของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1ล้วนส่วนระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือแนวโน้มเร็วกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่เพสต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และเพสต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2. ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าแปรผกผันตามปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากจะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อย

3. กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1ล้วนในขณะที่คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ให้ค่ากำลังอัดประลัยน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนนั้น พบว่าที่อายุต้นๆ ให้ค่ากำลังอัดประลัยที่น้อยกว่า แต่เมื่ออายุมากขึ้นค่ากำลังอัดประลัยมีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1ล้วน

4. การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5. ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1แทนที่ด้วยผงหินปูนให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1ล้วนในขณะที่คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน กลับให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อการแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Pitisan Krammart, **"Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with mu nicipal solid waste ash and calcium carbide waste, and sulfate resistance of fly ashconcrete,"** Ph.D. Thesis, Civil Engineering and Technology, Sirind horn International Institute of Technology Thammasat University, 2005.

[2] ชัยจาตุรพิทักษ์กุล,"ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด," วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ฉบับที่ 12 , เมษายน 2554.

[3] ปิติศานต์ กร้ำมาตรและสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, **"การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน,"** การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี, ครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, 2550.

[4] N. Voglisa, G. Kakalia, E. Chaniotakisb, S. Tsivilisa, **"Portland-limestonecement. Theirproperties and hydration compared to those of other composite cements,"** Cement & Concrete Composites, Vol. 27, pp. 191-196, 2005.

[5] จตุพร ชูตาภา และ วรพจน์ แสงราม, **"แคลเซี่ยมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate: CaCO3),"** วิหารแดง,ปีที่ 1, ฉบับที่ 6 มิถุนายน, 2552.

[6] Neville, A.M., Properties of Concrete. Pittmen Book Limited, London, 1981.

[7] D. P. Bentz, Taijiro Sato, Igor de la Varga, W. Jason Weiss, "Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures," Cement & Concrete Composites, Vol. 34, pp.11-17, 2012.