

ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

Effect of Bottom Ash on Corrosion of Steel in Concrete

อธิพงษ์ อารยวงศ์วาท (Athipong Arayawongwan) * วีระ หอสกุลไท (Veera Horsakulthai) **

บทคัดย่อ

นำเสนอกำลังรับแรงอัดและการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าก้นเตาในอัตราร้อยละ 0, 10, 20, และ 40 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ที่ใช้เท่ากับ 0.61 ขึ้นตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ฝังด้วยเหล็กกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 200 มม. ไม้ที่ตรงกลางหน้าตัดตัวอย่างทดสอบ จำนวน 1 เส้น โดยแช่ตัวอย่างทดสอบให้บางส่วนจมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3% และต่อศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ เข้ากับตัวอย่างทดสอบให้ขั้วบวกต่อกับเหล็กที่เสียบในตัวอย่างทดสอบและขั้วลบต่อกับแผ่นเหล็กโรสนิมที่แช่ในสารละลายเดียวกัน การทดสอบกระทำในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$ การประเมินค่าการกัดกร่อนของเหล็กเสริมโดยการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวอย่างทดสอบวันละครั้ง ขั้นตอนและการทดสอบทำตามมาตรฐาน NT BUILD 356 จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10, 20 และ 40 คิดเป็นร้อยละ 95, 80 และ 59 ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ และคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 สามารถต้านทานการแตกร้าวจากการเกิดกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 20 และ 40 จะด้อยกว่าคอนกรีตควบคุม

ABSTRACT

This paper presents compressive strength and corrosion of steel in concrete containing bottom ash with Portland cement replacement dosage of 0%, 10%, 20%, and 40% by weight of binder. The water to binder ratio of 0.61 was used. Specimen size of 100 mm diameter and 200 mm height with a round bar of 12 mm diameter and 200 mm long at center of cross section is used. The specimen is partially immersed in 3% sodium chloride solution. A constant direct current potential 5 volts is applied across the specimen, the steel rod being positive electrode and a stainless sheet being negative electrode. The test is acted in control room at temperature $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ and relative humidity $50 \pm 5\%$. The corrosion of steel is predicted by measurement current passed the specimen once a day according to NT BUILD 356. From the test, it was found that the compressive strength of concrete with 10%, 20% and 40% bottom ash were

* นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** รองศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

95%, 80% and 59% of compressive strength of control concrete, and the concrete with 10% bottom ash can resistance to crack from steel corrosion better than the control concrete, but the concrete with 20% and 40% bottom ash were inferior than the control concrete.

คำสำคัญ : การกัดกร่อน เหล็กกล้า กระแสไหลผ่าน คลอไรด์ ความต้านทาน

Key Words : Corrosion, Bottom ash, Current passed, Chloride, Resistance

บทนำ

ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดฟิล์มบางๆ ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบเหล็กเสริมซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก แต่อย่างไรก็ตามอ็อกไซด์ของคลอไรด์สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้เมื่อฟิล์มถูกทำลายเหล็กเสริมบริเวณนี้จะสูญเสียอิเล็กตรอนและมีประจุไฟฟ้าเป็น Fe^{++} ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกจึงเป็นขั้วบวก (anode) ส่วนอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็กเสริมสู่บริเวณที่ฟิล์มยังไม่ถูกทำลายจึงทำให้มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบจึงเป็นขั้วลบ (cathode) เมื่ออิเล็กตรอนทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิด OH^- และวิ่งผ่านโครงของซีเมนต์เพสต์ที่ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ไปรวมกับ Fe^{++} ทำให้เกิด $\text{Fe}(\text{OH})_2$ เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำทำให้เกิดสนิม (Neville, 2003) สนิมจะกัดกร่อนเหล็กเสริมส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง เหล็กเสริมบริเวณที่เกิดสนิมจะขยายตัวทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น ซึ่งจะดันคอนกรีตทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดร่อน (Bentur et al., 1997)

ถ้าก้อนเตาเป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน โดยนำถ่านหินลิกไนท์เป็นเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยทั่วไปมีขนาดความละเอียดค่าแรงเบอร์ 325 มากกว่าร้อยละ 90 เมื่อนำไปบดให้ละเอียด สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ Jaturapitakkul and Cheerarat , 2003)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำถ่านหินบด นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, และ 40 ผสม

ในคอนกรีตเพื่อศึกษาผลกระทบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ทดสอบโดยใช้วิธีแบบเร่งด้วยไฟฟ้า ตามมาตรฐาน NT Build 356 [4]

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15-2547

2. ถ่านหินเตา (Bottom ash)

ถ่านหินเตา จากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนท์ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง นำมาบดให้ได้สัดส่วนความละเอียดค่าแรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32.6

3. มวลรวม

หินปูนย่อยขนาดโตสุด 20 มม. ความถ่วงจำเพาะ 2.69 หน่วยน้ำหนักกระตุงแน่น 1575 กก/ม³ เป็นมวลรวมหยาบ และทรายแม่น้ำธรรมชาติจากอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ค่าโมดูลัสความละเอียด 2.75 ความถ่วงจำเพาะ 2.60 เป็นมวลรวมละเอียด

4. น้ำ

น้ำที่ใช้สำหรับผสมและบ่มคอนกรีต เป็นน้ำประปาผลิตโดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

5. สารผสมเพิ่ม

สารลดน้ำพิเศษประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C 494

6. สารละลายโซเดียมคลอไรด์

เกล็ดเกลือโซเดียมคลอไรด์ นำมาละลายในน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 3 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตา

องค์ประกอบ	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (%)	เถ้าก้นเตา (%)
SiO ₂	21.52	37.07
Al ₂ O ₃	4.54	18.86
Fe ₂ O ₃	3.05	13.77
CaO	62.74	16.59
MgO	1.09	2.26
Na ₂ O	1.47	1.29
K ₂ O	0.74	2.43
SO ₃	3.47	1.82
LOI	1.20	5.28
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.67

วิธีการศึกษา

1. ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ ใช้คอนกรีตกำลังออกแบบ 25 MPa มี อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.61 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตได้ออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1 เป็นคอนกรีตควบคุม จากนั้นคอนกรีตแต่ละกลุ่มได้แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาในอัตราร้อยละ 10, 20, และ 40 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต

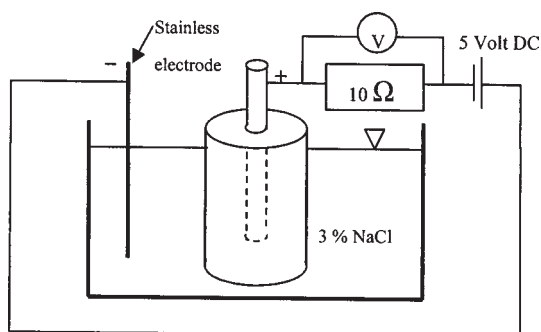
Mix	Slump (mm)	w/b	Composition (kg/m ³)				
			PC	BA	C. Agg.	Sand	Water
OPC	150	0.61	312	-	984	845	190
BA10	182	0.61	281	31	984	837	190
BA20	175	0.61	250	62	984	832	190
BA40	193	0.61	197	125	984	816	190

2. การทดสอบกำลังรับแรงอัด

หล่อคอนกรีตในแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 100 x 100 x 100 มม. จำนวน 12 ชิ้น ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม หลังการหล่อคลุมตัวอย่างด้วยพลาสติกทิ้งไว้ 24 ± 0.5 ชั่วโมง แล้วจึงทำการถอดแบบ นำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มโดยแช่ในน้ำที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ 23 ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5 % เมื่ออายุคอนกรีตครบ 7, 28, 90 และ 180 วัน จึงนำออกจากน้ำ เช็ดผิวให้แห้ง ชั่งน้ำหนักวัดขนาด แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด จำนวน 3 ชิ้นตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม

3. การทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ทำการหล่อคอนกรีตในแบบมาตรฐานทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เสียบเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 200 มม. ลึก 150 มม. ที่ศูนย์กลางหน้าตัด ดังแสดงในภาพที่ 1 เมื่อคอนกรีตอายุครบ 24 ± 0.5 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำ ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ 23 ± 2 °C จนอายุ 14 วัน จากนั้นนำมาบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิ 23 ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5 % อีก 14 วัน จึงนำไปทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเพื่อวัดการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3 % ให้ระดับของสารละลายอยู่ต่ำกว่าผิวบนแห่งตัวอย่างทดสอบ 30 มม. จากนั้นต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์ 5 โวลต์ เข้ากับชิ้นตัวอย่างทดสอบโดยขั้วบวกต่อตัวต้านทาน 10 โอห์ม แล้วเชื่อมเข้ากับเหล็ก ขั้วลบต่อเข้ากับแผ่นสแตนเลสซึ่งเป็นอิเล็กโทรด จากนั้นวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านวงจร โดยวัดความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน 10 โอห์ม วันละ 1 ครั้ง จนกว่าคอนกรีตแตกร้าว วงจรไฟฟ้าเคมีแสดงไว้ในภาพที่ 1 การทดสอบทำตามมาตรฐาน NT Build 356 [4]



ภาพที่ 1 การติดตั้งชุดทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ผลการทดสอบและอภิปราย

1. การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและค่ายุบตัวของคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 2, 3 และ 4 ค่ายุบตัวของคอนกรีตอยู่ในช่วง 150 - 193 มม. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม (OPC) มีค่า 32.0, 42.6, 49.7 และ 51.3 MPa ที่อายุ 7, 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตามีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตควบคุมทุกอัตราส่วนผสม โดยที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตา BA10, BA20 และ BA40 มีค่าคิดเป็นร้อยละ 95, 80 และ 59 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน และเมื่ออายุคอนกรีต 180 วัน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตา BA10, BA20 และ BA40 มีค่าคิดเป็นร้อยละ 100, 91 และ 72 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

Mix	Compressive strength (MPa) - Normalized (%)			
	7 days	28 days	90 days	180 days
OPC	32.0 (100)	42.6 (100)	49.7 (100)	51.3 (100)
BA10	30.6 (96)	40.3 (95)	47.8 (96)	51.1 (100)
BA20	24.1 (75)	34.1 (80)	40.3 (81)	46.6 (91)
BA40	17.0 (53)	25.0 (59)	32.4 (65)	36.9 (72)

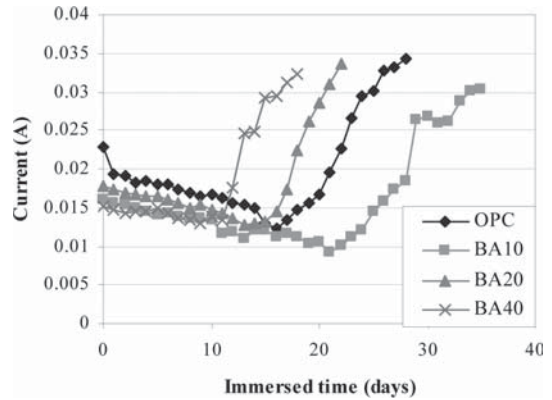
การพัฒนากำลังรับแรงอัด ที่อายุ 7 วัน ซึ่งกำลังส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ดังนั้นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาร้อยละ 40 จึงมีกำลังรับแรงอัดน้อยสุด เนื่องจากมีปูนซีเมนต์ในส่วนผสมน้อยสุด เมื่อเทียบกับคอนกรีตในกลุ่มเดียวกัน และจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากั้นเตาลดลง การพัฒนากำลังรับแรงอัด จากอายุ 7 วัน เป็น 28 วัน จากตารางที่ 4 พบว่า คอนกรีต OPC, BA10, BA20 และ BA40 มีอัตราการเพิ่มของกำลังรับแรงอัดร้อยละ 33.1, 31.3, 41.5 และ 47.1 ตามลำดับ จะเห็นว่าคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาร้อยละ 40 มีอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปูนซีเมนต์กับน้ำควบคู่กับปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากกว่าของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาร้อยละ 20 และ 10 ตามลำดับ ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดน้อยลง เมื่อผสมเถ้ากั้นเตาน้อยลง การพัฒนากำลังรับแรงอัดจากอายุ 28 วัน เป็น 90 วัน คอนกรีต OPC, BA10, BA20 และ BA40 มีอัตราการเพิ่มของกำลังรับแรงอัดร้อยละ 16.7, 18.6, 18.2 และ 29.6 ตามลำดับ ช่วงนี้เป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาปูนซีเมนต์กับน้ำลดลงเมื่อเทียบกับช่วง 7 ถึง 28 วัน จากอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดข้างต้นของ OPC ดังนั้นอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตา น่าจะเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่า แต่ยังมีปฏิกิริยาปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นด้วย ซึ่งคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาร้อยละ 40 จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากที่สุด และคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาร้อยละ 10 และ 20 เกิดใกล้เคียงกัน การพัฒนากำลังรับแรงอัดจากอายุ 90 วัน เป็น 180 วัน คอนกรีต OPC, BA10, BA20 และ BA40 มีอัตราการเพิ่มของกำลังรับแรงอัดร้อยละ 3.2, 6.9, 6.3 และ 13.9 ตามลำดับ จากการสังเกตในช่วงนี้การปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตายังเห็นชัดเจนอยู่ จากอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดที่มากกว่าคอนกรีตควบคุม

ตารางที่ 4 อัตราการเพิ่มของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

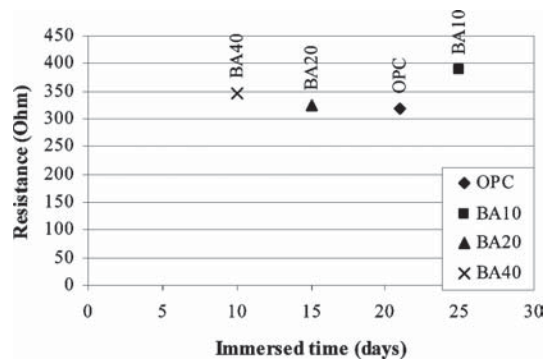
Mix	Compressive activity increased rate (%)		
	7 to 28 days	28 to 90 days	90 to 180 days
OPC	33.1	16.7	3.2
BA10	31.7	18.6	6.9
BA20	41.5	18.2	6.3
BA40	47.1	29.6	13.9

2. การกักร้อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

การวัดการกักร้อนของเหล็กเสริม เป็นวิธีการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อีกวิธีการหนึ่ง โดยดูค่ากระแสที่ไหลผ่านและระยะเวลาการแตกร้าวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3 พบว่ากระแสไหลผ่านคอนกรีตเริ่มต้นเรียงจากมากไปหาน้อยคือ OPC, BA20, BA10 และ BA40 ซึ่งค่ากระแสเริ่มต้นของคอนกรีต BA10, BA20 และ BA40 มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการซึมผ่านของคลอไรด์เริ่มต้นใกล้เคียงกัน และซึมผ่านน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม OPC จากการสังเกตภาพที่ 2 จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าค่อนข้างคงที่ก่อนคอนกรีตแตกร้าว ทั้งนี้เนื่องจากอาจเกิดการพัฒนาโครงสร้างโพรงจากการบ่มที่มีอายุมากขึ้นทำให้ขนาดเฉลี่ยของโพรงเล็กลง การซึมผ่านของคลอไรด์จึงซึมผ่านยากขึ้นกระแสไฟฟ้าจึงลดลง เมื่อคอนกรีตแตกร้าวกระแสไหลผ่านเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในภาพที่ 2 จากภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านเฉลี่ยของคอนกรีตกับระยะเวลาการแตกร้าว ความต้านเฉลี่ยของคอนกรีต OPC, BA10, BA20 และ BA40 มีค่าเท่ากับ 318, 390, 325 และ 346 ตามลำดับ และระยะเวลาการแตกร้าวของคอนกรีตเป็น 21, 25, 15 และ 10 วัน ตามลำดับ



ภาพที่ 2 กระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีต



ภาพที่ 3 ความต้านทานและระยะเวลาวิบัติของคอนกรีต

สรุป

เถ้ากันเตา จากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนท์แม่เมาะ เมื่อนำมาบดได้ความละเอียดขนาดค้ำตระแกรงเบอร์ 325 (45 μm) ร้อยละ 30 - 35 และนำมาผสมในคอนกรีตมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดและการกักร้อนต่อเหล็กเสริม ดังนี้

1. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้ากันเตามีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมทุกส่วนผสมที่อายุ 28 วัน เมื่อผสมในอัตราเพิ่มขึ้นกำลังจะลดลง และเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้นกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยที่อายุ 180 วัน คอนกรีตผสมเถ้ากันเตาร้อยละ 10, 20 และ 40 คิดเป็นร้อยละ 100, 91 และ 72 ตามลำดับ

2. คอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาร้อยละ 10 ด้านทานการแตกร้าวจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาร้อยละ 20 และ 40 จะด้อยกว่าคอนกรีตควบคุม

เอกสารอ้างอิง

ACI Committee 211, 2005. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI 211.1-91, ACI manual of concrete practice part 1, Miami: American Concrete Institute.

Bentur, A., Diamond, S., and Berke, NS., 1997. Steel Corrosion in Concrete. London: Chapman and Hall.

Jaturapitakkul, C., Cheerarot, R. 2003. Development of bottom ash as pozzolanic material. J. Mat. in Civ. Engrg, 15: 48-53.

Neville, AM., 2003. Properties of concretes. 4th and final edition. Harlow, London: John Winley and Sons.

Nordtest method, 1989. Embedded steel method, chloride permeability. NT BUILD 356 Espoo, Finland: Nordtest.