

การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม

สุภิชาติ เจนจิระปัญญา^{1*} และ ปิติสานต์ กร้ามาตร²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์วัสดุกากอุตสาหกรรมเป็นสารปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 ของปริมาณปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก โดยวัสดุกากอุตสาหกรรมที่ศึกษาคือ ถ่านลอม และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตเบื้องต้น และคุณสมบัติทางความทนทานของคอนกรีต เพื่อสามารถนำวัสดุกากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดปัญหาในการกำจัดทิ้ง ผลการทดลองพบว่า วัสดุกากอุตสาหกรรมคือถ่านลอม และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีศักยภาพในการแทนที่ปูนซีเมนต์คุณสมบัติด้านกำลังยังมีย่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนในช่วงอายุต้น แต่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น เนื่องจากการเกิดของปฏิกิริยาปอชโซลาน ส่วนการเกิดคาร์บอนั้นจะเกิดอย่างรวดเร็วเมื่อผสมวัสดุกากอุตสาหกรรมในส่วนผสม มีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าก่อนตัวอย่างที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ล้วน และมีการขยายตัวที่ต่ำในสารละลายซัลเฟต เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลงและผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลาน

คำสำคัญ : วัสดุกากอุตสาหกรรม, สารปอชโซลาน, การแทนที่ปูนซีเมนต์, ถ่านลอม, ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม, กรุงเทพมหานคร

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: supichart.j@gmail.com รับเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2558 ตอบรับเมื่อ 11 กรกฎาคม 2559

A Study on Properties of Cementitious Material Using Industrial Waste

Supichart Jenjirapanya^{1*} and Pitisan Krammart²

Abstract

This research studied on the utilization of industrial wastes as pozzolanic material to replace Portland cement type I at replacement rates of 40 and 50 % by weight of binder. Industrial wastes were including fly ash and ground granulated blast furnace slag. Concretes were produced and tested for mechanical and durability properties. Objective was to utilize the industrial wastes and reduce the waste disposal. Results showed that industrial wastes including fly ash and ground granulated blast furnace slag had the potential to replace the cement. However, the strength property of pozzolan concretes were lower than Portland cement concrete at early age, However the strength tended to be increased at later age due to pozzolanic reaction. Carbonation of pozzolan concrete was rapidly penetration. Moreover, pozzolan concrete was resistant to chloride penetration better than Portland cement concrete. In addition, it had low expansion in sulfate solution because of low cement content and pozzolanic reaction in pozzolan concrete made from fly ash and granulated blast furnace slag.

Keywords : Industrial wastes, Pozzolanic material, Cement replacement, Fly ash, Ground granulated blast furnace slag

¹ Civil Technology, Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University, Bangkok.

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani.

* Corresponding author, E-mail: supichart.j@gmail.com Received 6 November 2015, Accepted 11 July 2016

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาที่ประเทศต่างๆ ทั่วโลกกำลังเผชิญอยู่ เกี่ยวกับการแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ อยู่ในภาวะวิกฤตอย่างรุนแรงที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่น ประเทศไทยก็มีแนวโน้มปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นมากตามทิศทางการพัฒนาประเทศที่มุ่งเน้นการเติบโตทางภาคเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ทั่วโลกเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ โดยเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดทั่วโลกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ [1] ดังนั้นหากมีการผลิตปูนซีเมนต์ลดลงก็จะเป็นวิธีหนึ่งลดก๊าซเรือนกระจกลงได้ ที่ผ่านมานักวิจัยทั่วโลกต่างหาวิธีการลดการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายได้แก่ การนำวัสดุจากอุตสาหกรรม (Industrial wastes) มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์หรือแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน [2-4] การใช้วัสดุจากอุตสาหกรรมที่สามารถใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต นอกจากจะช่วยพัฒนาคุณสมบัติในทางที่ดีให้กับคอนกรีตแล้ว ยังเป็นการลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลงได้ [2] รวมทั้งการนำของเหลือทิ้งดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ จะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่จะตามมาอีกทางหนึ่งด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีต โดยมุ่งเน้นไปที่ส่วนผสมที่ใช้วัสดุจากอุตสาหกรรม ซึ่งในที่นี้ได้แก่เถ้าลอย เป็นเถ้าที่เกิดจากการนำถ่านหินมาเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้า และตะกรันเตาถลุงเหล็ก ที่เป็นวัสดุที่

เหลือจากกระบวนการผลิตเหล็กที่ใช้เตาหลอมในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก มาแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 ของปริมาณปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตเบื้องต้น และคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต เพื่อสามารถนำวัสดุจากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดปัญหาในการกำจัดทิ้งและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้ง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากการผลิตปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลดลง

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีทดลอง

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยจากการเผาถ่านหินแบบใช้ถ่านหินบด (PCC) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ตะกรันเตาถลุงเหล็กที่บดละเอียด หินเบอร์ 2 และทรายร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยงานวิจัยนี้ใช้น้ำประปาในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

2.2 วิธีทดลอง

2.2.1 คุณสมบัติของวัสดุจากอุตสาหกรรม

ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุจากอุตสาหกรรมที่ใช้วัสดุ ประสานประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence analysis ความละเอียดของวัสดุโดยใช้วิธีของเบลน (ตามมาตรฐาน ASTM C204) ค่าความถ่วงจำเพาะ (ตามมาตรฐาน ASTM C188) และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุประสาน ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

จากองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าวัสดุประสานทั้ง 2 ชนิด คือ เถ้าลอย และ ตะกรันเตาถลุง เหล็กบด มีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 ก่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับปูนซีเมนต์ได้ [5] นอกจากนี้ เถ้าลอยมีปริมาณ Fe_2O_3 และ CaO สูง เนื่องจากเป็นเถ้าลอยจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำ ปริมาณเหล็กที่สูงทำให้เถ้าลอยมีสีเข้ม

ตารางที่ 1 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุจากอุตสาหกรรม

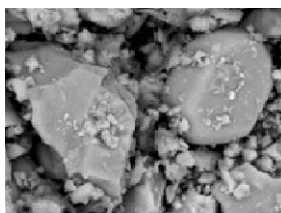
องค์ประกอบ	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด
SiO_2	19.5	40.9	34.0
Al_2O_3	4.9	22.4	16.2
Fe_2O_3	3.7	13.7	1.7
CaO	64.3	13.5	36.0
MgO	1.0	2.9	7.3
Na_2O	< 0.01	0.8	0.2
K_2O	0.4	2.3	1.0
SO_3	2.1	1.9	2.1
Free Lime	1.0	0.2	-
Others	0.9	1.0	0.1
LOI	2.2	0.4	1.4

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุจากอุตสาหกรรม

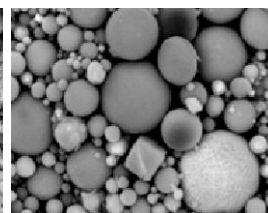
คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.46	2.96
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ชม. ² /ก.)	3,250	3,550	4,600
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	17	17	14

จากตารางที่ 2 พบว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กมีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ ส่วนเถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าวัสดุทั้งสอง มีค่าเท่ากับ 2.46 ส่วนความละเอียดพบว่า ตะกรันเตาถลุงมีความละเอียดสูงสุด เนื่องจากมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยน้อยที่สุด

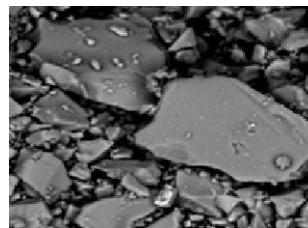
ภาพขยายของอนุภาควัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ด้วยเครื่อง Scanning Electronic Microscope: SEM แสดงในรูปที่ 1 พบว่ารูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์คล้ายกับของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด เนื่องจากผ่านการบดมาแล้ว ส่วนอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะกลมผิวเรียบมีขนาดต่างๆ กันกระจายอยู่เห็นได้ชัดเจน [6] เนื่องจากผ่านกระบวนการหลอมที่อุณหภูมิสูง



(ก) ปูนซีเมนต์



(ข) เถ้าลอย



(ค) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคของวัสดุประสาน

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตผสมวัสดุกากอุตสาหกรรมที่ใช้ในการศึกษาการเกิดคาร์บอนชั้น และการซึมผ่านคลอไรด์

คย.	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมคอนกรีต ต่อ 1 ลบ.ม. โดยน้ำหนัก (กก.) w/b = 0.55						ค่าการยุบตัว (ซม.)
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด	ทราย	หิน	น้ำ	
1	CC1	332	-	-	970	1080	182.6	17.5
2	CC1 FA40	199	133	-	970	1080	182.6	19.5
3	CC1 SL50	166	-	166	970	1080	182.6	15.0

หมายเหตุ:

CC1 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แลนคี่ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ส่วน

CC1 FA40 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์แลนคี่ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40 ของปริมาณวัสดุประสานโดยน้ำหนัก

CC1 SL50 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่ปูนซีเมนต์แลนคี่ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 50 ของปริมาณวัสดุประสานโดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4 สัดส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมวัสดุกากอุตสาหกรรมที่ใช้ในการศึกษาการการต้านทานซัลเฟต

คย.	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมมอร์ตาร์ (กรัม)				
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด	ทราย	น้ำ
1	MC1	1.00	-	-	2.75	0.55
2	MC1 FA40	0.60	0.40	-	2.75	0.55
3	MC1 SL50	0.50	-	0.50	2.75	0.55

หมายเหตุ:

MC1 หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์แลนคี่ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ส่วน

MC1 FA40 หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์แลนคี่ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40 ของปริมาณวัสดุประสานโดยน้ำหนัก

MC1 SL50 หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดแทนที่ปูนซีเมนต์แลนคี่ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 50 ของปริมาณวัสดุประสานโดยน้ำหนัก

2.2.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต มอร์ตาร์ และการทดสอบ

สำหรับสัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือใช้ปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ในปริมาณร้อยละ 40 และ 50 ของปริมาณปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 โดยแยกตามคุณสมบัติด้าน

ต่างๆ ซึ่งได้แก่การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตขนาด 10x10x10 ซม. (ตามมาตรฐาน ASTM C 109) ทดสอบที่อายุ 3, 14, 28, 56 และ 91 วัน การทดสอบการเกิดคาร์บอนชั้นในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10x10x10 ซม. โดยบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (saturated lime water) เป็นเวลา 28 วัน แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปอบในตู้อบคาร์บอนชั้นอุณหภูมิภายใน

ดูดซับ $30 \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกปล่อยออกมาในปริมาณ 40,000 ppm และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50-55 จนถึงอายุที่ต้องการทดสอบ คือที่อายุ 28 วัน และ 56 วัน จึงนำไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น (carbonation depth) แบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็น 2 ซีก จากนั้นฉีกระเบิดละลายฟีนอล์ฟทาไลน์ที่ก้อนตัวอย่าง ซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอนเนชั่น ส่วนที่เกิดคาร์บอนเนชั่นตัวอย่างก่อนคอนกรีตจะไม่มีสี ใช้เวอร์เนียร์วัดค่าความลึกคาร์บอนเนชั่น บริเวณที่ไม่เกิดสีม่วงหรือบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่น ทั้งหมด 16 จุดต่อคอนกรีตแต่ละซีก (ด้านละ 4 จุด) แล้วนำมาเฉลี่ยความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่น (ตามมาตรฐาน ASTM C 856) การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 20 ซม. โดยหลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน นำตัวอย่างไปป้อนในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวจนถึงอายุที่จะทำการทดสอบ ซึ่งจะใช้ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่าง เพื่อนำไปประเมินระดับการซึมผ่านได้ของคอนกรีต (ตามมาตรฐาน ASTM C 1202) ซึ่งจะทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน และการทดสอบการต้านทานซัลเฟต โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด $25 \times 25 \times 285$ มม. ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 5 การวัดการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ตามมาตรฐาน ASTM C 1012) โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างมอร์ตาร์ด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator) (ตามมาตรฐาน ASTM C 490) จากนั้นนำตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แล้วทำการวัดความยาวของตัวอย่างที่อายุ 14, 21, 28,

56, 91, 112, 175, 231 และ 287 วัน ของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ คำนวณจากสมการที่ (1)

$$\text{การขยายตัว (ร้อยละ)} = [(L_t - L_g)/L_g] \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน L_g คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของชิ้นตัวอย่าง ณ เวลาที่ต้องการวัดการขยายตัวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตแล้ว และ L_g คือ ค่าความยาวของ gauge length หรือเท่ากับ 285 มม.

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหลือกบด

ตารางที่ 5 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหลือกบด จากการศึกษาพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่ามากกว่ากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหลือกบดตลอดช่วงอายุทดสอบ เนื่องจากการใช้เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหลือกบดแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ ทำให้ส่วนผสมมีปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้สารประกอบทางเคมีที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีตลดน้อยลง โดยเฉพาะในช่วงอายุนั้นๆ แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหลือกบดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีอัตราการพัฒนาเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะพัฒนามากขึ้นเมื่ออายุของตัวอย่างมากขึ้น [5]

ตารางที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

คย.	สัญลักษณ์	กำลังอัด (กก./ตร.ซม)				
		3 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
1	CC1	213	303	325	330	335
2	CC1 FA40	123	206	223	227	230
3	CC1 SL50	143	285	308	315	321

3.2 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ทำการวิเคราะห์ที่อายุ 28 วันและ 56 วัน ดังแสดงผลในตารางที่ 6 และรูปที่ 2 พบว่าการเกิดคาร์บอนเนชั่นทั้งของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย และคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดนั้น มีค่าค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากการแทนที่ (ทั้งกรณีของเถ้าลอย และกรณีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด) เป็นการไปลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ซึ่งทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าลอย และ/หรือของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด จึงส่งผลให้เป็นการเร่งการเกิดคาร์บอนเนชั่นเร็วขึ้น และส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงตามไปด้วย [7]

ตารางที่ 6 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

คย.	สัญลักษณ์	การเกิดคาร์บอนเนชั่น (มม.)	
		28 วัน	56 วัน
1	CC1	8	12
2	CC1 FA40	15	17
3	CC1 SL50	13	15



รูปที่ 2 ตัวอย่างผลของก๊อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่าซีกหลังจากแช่ในดูลบแล้วทำการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น บริเวณเนื้อคอนกรีตที่ไม่เป็นสีม่วงเป็นบริเวณเกิดคาร์บอนเนชั่น

3.3 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

การศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ครั้งนี้เป็นการประเมินความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid Chloride Penetration Test, RCPT) โดยวัดปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของคลอไรด์และปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 ซึ่งกำหนดระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ตามจำนวนประจุที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ ASTM C 1202

จำนวนประจุที่เคลื่อนที่ผ่าน (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

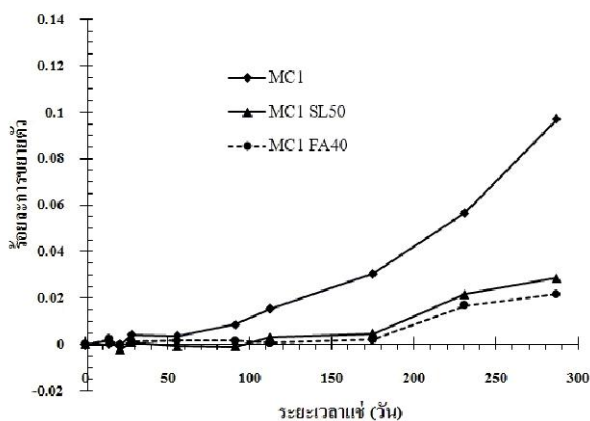
ตารางที่ 8 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

ตย.	สัญลักษณ์	ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่าน	
		ตัวอย่างคอนกรีต (ลูมบ์)	
		อายุบ่ม 28 วัน	อายุบ่ม 56 วัน
1	CC1	3,531	3,366
2	CC1 FA40	694	455
3	CC1 SL50	801	523

ผลการทดสอบปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตในการศึกษาครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 8 พบว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ที่ใช้แทนที่ด้วยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 40 และ 50 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างน้อยกว่า 1,000 คูลอมป์ ซึ่งบ่งชี้ถึงการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ในระดับที่ต่ำมาก [8] และเมื่ออายุ 56 วัน ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างมีแนวโน้มต่ำลง เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น คลอไรด์จึงสามารถแทรกผ่านเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดในปริมาณดังกล่าว ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างมีแนวโน้มต่ำลง อีกทั้งเมื่ออายุมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ยังมีผลทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างมีแนวโน้มต่ำลงเช่นกัน [9]

3.4 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยที่แทนที่ร้อยละ 40 และมอร์ตาร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดที่แทนที่ร้อยละ 50 มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งผลของการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่น้อยกว่า แสดงว่ามีความทนทานต่อการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มากกว่าด้วย [10] ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดจะเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ และเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่สามารถช่วยลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงทำให้มี C_3A และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ลดลงตามไปด้วย [4]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ความเข้มข้นร้อยละ 5)

4. สรุปผล

วัสดุกากอุตสาหกรรมคือเถ้าลอย และตะกรันเตา-ถลุงเหล็กบดมีศักยภาพในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 ของปริมาณปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก คุณสมบัติทางด้านกำลังอัดยังมีค่าไม่น้อยกว่าคอนกรีตที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ล้วนในช่วงอายุต้น แต่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น เนื่องจากการเกิดของปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชั่นจะเกิดอย่างรวดเร็วเมื่อผสมเถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดลงในส่วนผสม มีความต้านทานการแทรกของคลอไรด์ได้ดีกว่าของตัวอย่างที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ล้วน และมีการขยายตัวที่ต่ำในสารละลายซัลเฟต เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดจะลดปริมาณปูนซีเมนต์ และเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่สามารถช่วยลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดิน ปี 2557 มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] V.M. Malhotra, "Introduction: sustainable development and concrete technology", ACI concrete International 24, 2002, pp. 22
- [2] O.S.B. Al-Amoudi, "Mechanisms of sulfate in plain and blended cement: a review", Proceedings of the International Seminar, 1999, University of Dundee, Scotland. UK.
- [3] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul and T. Leelawat, "A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete", Construction and Building Materials 20, 2006, pp. 744-753.
- [4] P. Krammart and S. Tangtermsirikul, "Expansion, strength reduction and weight loss of fly ash concrete in sulfate solution", ASEAN Journal on Science & Technology for Development 21, 2004, pp. 373-390.
- [5] S. Mindess, J.F. Young and D. Darwin, "Concrete" 2nd edition, Prentice Hall, 2002.
- [6] N. Raksapol, S. Sukyeam, J. Tangpagasit and P. Krammart, "Chloride Penetration Resistance of Concrete Using Fly Ash, Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Silica Fume and Limestone Powder" The 20th National Convention on Civil Engineering 8-10 July 2015, Chonburi, Thailand, 2015, pp. 1-6. (in Thai)
- [7] K. Jin-Keun, K. Chin-Yong, Y. Seong-Tae and L. Yun, "Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete", Cement & Concrete Composites 31(2), 2009, pp. 139-144.
- [8] G.J. Osborne, "Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete", Cement and Concrete Composites 21, 1999, pp. 11-21.

- [9] W. Chalee, M. Teekavanit, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn and C. Jaturapitakkul, "Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment" *Construction and Building Materials* 21, 2007, pp. 965-971.
- [10] P.S. Mangat and J.M. Khatib, "Influence of fly-ash, silica fume, and slag on sulfate resistance of concrete", *ACI materials journal* 92(5), pp. 542-552.