



คุณลักษณะของเถ้าขยะเทศบาลที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผ่านการแช่ในโซเดียมซัลเฟต
CHARACTERISTICS OF MUNICIPAL WASTE ASH AFFECTING MECHANICAL PROPERTIES
AND EXPANSION OF MORTAR IMMERSSED IN SODIUM SULFATE SOLUTION

กมลชนก วังบุญคง^{1*}, นันทชัย ชุศลปี่² และ จุฑามาศ ลักษณะกิจ²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

*Corresponding author, E-mail: Kamonchanok_see@rmutsvmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะของเถ้าขยะเทศบาลที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผ่านการแช่ในโซเดียมซัลเฟต โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) ด้วยเถ้าขยะเทศบาล (MWA) บางส่วน ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 20 25 และ 30 โดยมวลของวัสดุประสาน พบว่า กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ของมอร์ตาร์ GU ผสมเถ้าขยะเทศบาล มีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ PC ผสมเถ้าขยะเทศบาลทุกอัตราส่วน ยกเว้น GU-15MWA และมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อร้อยละการแทนที่เท่ากับ 5 และ 10 จากนั้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราส่วน GU-10MWA มีกำลังรับแรงอัดได้สูงสุด 37.2 เมกะปาสกาล เนื่องจากอิทธิพลของการอัดตัวของอนุภาค (Packing effect) ในซีเมนต์เพสต์ ขณะที่กำลังรับแรงคดของมอร์ตาร์ GU มีค่าไม่แตกต่างกับมอร์ตาร์ PC และลดลงเมื่อร้อยละการแทนที่ของเถ้าขยะเทศบาลเพิ่มขึ้น การขยายตัวของมอร์ตาร์ GU และมอร์ตาร์ PC มีค่าเพิ่มขึ้นตามร้อยละการแทนที่เถ้าขยะเทศบาลที่เพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์ GU มีค่าการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ตาร์ PC

คำสำคัญ: มอร์ตาร์; เถ้าขยะเทศบาล; สมบัติเชิงกล; การขยายตัว; การต้านทานซัลเฟต; เถ้าลอย

ABSTRACT

This research the examined characteristics of municipal waste ash that affect the mechanical properties and the expansion of mortar immerssed in sodium sulfate solution. Hydraulic cement for general utility (GU) and Portland cement type I (PC) were partially replaced by municipal waste ash (MWA) with 5%, 10%, 15%, 20% and 30% by mass of binder materials. It was found that compressive strengths at curing age of 28 days of all mixtures of GU mortar mixed with MWA were higher than those of PC mortar, except the mixture GU-15MWA. The compressive strengths of mixtures of GU mortar were also found to increase when MWA replacement increased by 5 and 10 percent and then continuously decreased in the mixtures with higher than 15 percent of MWA replacement. The mixture GU-10MWA presented the highest compressive strength with 37.2 MPa. Because of the influence to packing effect in cement paste. Furthermore, bending strength of GU mortar was roughly the same as that of PC mortar and

decreased when the MWA replacement increased. The expansion of GU mortar and PC mortar increased in every increasing ratio of MWA, with a smaller value of GU mortar than that of PC mortar.

KEYWORDS: Mortar; Municipal Waste Ash; Mechanical; Expansion; Sulfate Resistant; Fly ash

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในงานวิศวกรรมโยธาจำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะด้านความคงทนซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบ เนื่องจากคอนกรีตอาจจะต้องเผชิญอยู่กับสภาพแวดล้อมที่มีผลกระทบของการกัดกร่อนเนื่องจากการโจมตีของซัลเฟต (SO_4^{2-}) จะเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบซีเมนต์สัมผัสกับ SO_4^{2-} จากแหล่งภายใน (มีอยู่ในปูนซีเมนต์หรือสารผสมเพิ่ม) [1] หรือแหล่งภายนอก มักพบได้ตามธรรมชาติ ได้แก่ น้ำทะเล น้ำใต้ดิน ในดินบริเวณริมทะเลหรือดินทั่วไป น้ำกร่อย น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โรงงานผลิตสารเคมีบางประเภท บ่อน้ำบาดล ท่อน้ำทิ้ง โรงงานทำปุ๋ย รวมถึงน้ำเสียจากบ้านเรือน เป็นต้น ซัลเฟตที่พบมากที่สุดจะเป็นโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โดยมีความสามารถทำลายคอนกรีตจากการแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เฟสของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ได้ ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของยิปซัม (Gypsum) และ เอททริงไทต์ (Ettringite) [2, 3] และนำไปสู่การขยายตัว การผุกร่อน การแตกร้าว รวมถึงสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตในท้ายที่สุด

ในปัจจุบันมีวัสดุปอซโซลานมากมาย ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย เถ้าขยะ เถ้าอุตสาหกรรม การใช้เถ้าลอย (Fly Ash) ที่มีสมบัติปอซโซลานมาแทนซีเมนต์ในบางส่วน จะทำให้ปอซโซลานเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, $Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และเกิดการยึดประสานคล้ายปูนซีเมนต์โดยเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งจะช่วยเพิ่มความคงทนของคอนกรีตได้มากขึ้นเนื่องจากมีความทึบน้ำสูงขึ้น [4] จากรายงานวิจัย [5, 6] พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (Fly Ash) ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น ในขณะที่เทศบาลนครหาดใหญ่มีปัญหาที่เกิดจากของเหลือทิ้งหรือขยะมูลฝอย มีการจัดการปัญหาขยะมูลฝอยโดยนำไปเผา ณ สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยของเทศบาลนครหาดใหญ่ ส่งผลให้เกิดเถ้าลอยที่ได้จากการเผาขยะเทศบาลประมาณร้อยละ 10 จากปริมาณขยะทั้งหมด [7] การจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลนครหาดใหญ่จะใช้ระบบเผาไหม้แบบแก๊สซิฟิเคชัน (Ash Melting Gasification) เพื่อแปรรูปความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า ขยะมูลฝอยจะถูกนำไปจัดการเบื้องต้น โดยการคัดแยกโลหะและ PVC ออกไป จากนั้นจะถูกส่งไปยังเครื่องรีดน้ำเพื่อลดความชื้น จากนั้นสับให้มีขนาดไม่เกิน 100 x 100 มิลลิเมตร และอบด้วยความร้อนเพื่อลดความชื้น และถูกส่งเข้าเตาเผาแบบระบบเผาไหม้แบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่มีอุณหภูมิ 1200 – 1400 องศาเซลเซียส ขยะมูลฝอยชุมชนส่วนใหญ่เป็นเศษอาหาร รองลงมาคือพลาสติก แก้ว กระจกาศ โลหะ และอื่น ๆ ร้อยละ 48.15 14.64 8.21 6.09 0.96 และ 21.95 ตามลำดับ [8] จากรายงานวิจัย [9] กล่าวว่า เถ้าขยะเทศบาลมีแคลไซต์ (Calcite, $CaCO_3$) ที่ช่วยให้เกิดการยึดเกาะ (Bonding Effect) กันระหว่างเม็ดดิน

การทำวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะของเถ้าขยะเทศบาลที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการขยายตัวของมอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขยะเทศบาล (Municipal Waste Ash, MWA) จากโรงงานกำจัดขยะมูลฝอยชุมชนของเทศบาลนครหาดใหญ่บางส่วน แบ่งกลุ่มศึกษาเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ แทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (Hydraulic cement, GU) ด้วยเถ้าขยะเทศบาล และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I, PC) ด้วยเถ้าขยะเทศบาล เพื่อเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณของเสียที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษที่ส่งผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของคนในชุมชน ทั้งยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเถ้าขยะเทศบาล โดยศึกษาสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ ได้แก่ การรับแรงอัด แรงดัด และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์โดยวิธีวัดการขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (แทนด้วย ปูนซีเมนต์ GU) ตามมาตรฐาน มอก.2594-2556 [10] ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (แทนด้วย ปูนซีเมนต์ PC) ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2547 [11] และ เถ้าขี้เถ้าเทศบาล (แทนด้วย เถ้าขี้เถ้าเทศบาล MWA) จากโรงงานผลิตไฟฟ้าบริษัทจีเคค จำกัด อำเภอลาดใหญ่ จังหวัดสงขลา พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 3.11 3.12 และ 2.29 ตามลำดับ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) เท่ากับ 14.10 13.54 และ 22.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ พื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 3,139 3,681 และ 4,297 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และเถ้าขี้เถ้าเทศบาลมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 16.78 ดังตารางที่ 1 มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำขนาดที่อยู่ในสภาพ อิ่มตัวผิวแห้งตามมาตรฐาน ASTM C778 โดยร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และล้างบนตะแกรงเบอร์ 30 โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.58 และค่าการดูดซึมน้ำ เท่ากับร้อยละ 1.03 และใช้น้ำประปาที่มีค่าความเป็นด่าง (pH) เท่ากับ 7.0

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) และสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

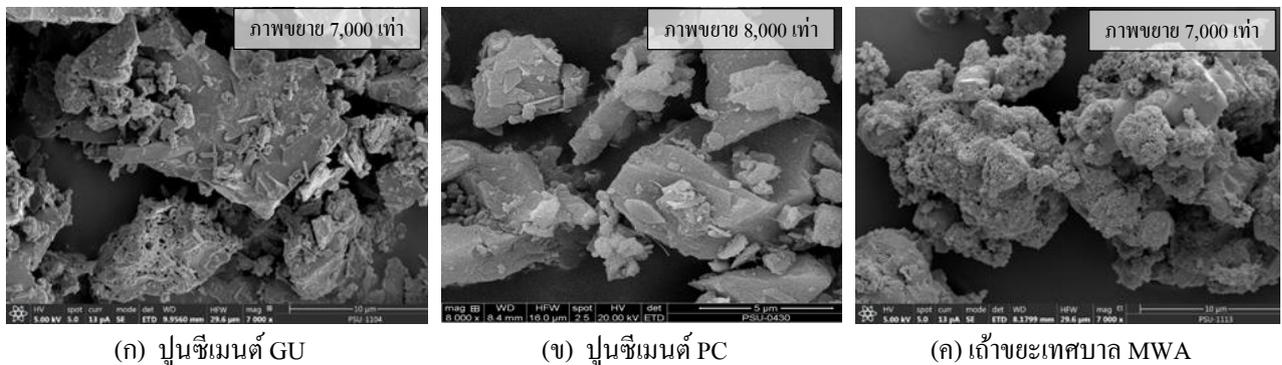
	วัสดุประสาน			มาตรฐาน ASTM C 618 Class C
	ปูนซีเมนต์ GU	ปูนซีเมนต์ PC	เถ้าขี้เถ้าเทศบาล MWA	
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	18.55	20.95	5.15	-
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	5.07	4.24	1.30	-
ไอออนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	4.09	2.92	1.04	-
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	62.05	62.39	15.15	-
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.89	2.24	0.83	-
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.11	-	-	-
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	1.09	0.86	-	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	3.42	4.43	6.39	< 5.00
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C ₃ S)	67.44	54.80	-	-
ไดแคลเซียมซิลิเกต (C ₂ S)	2.32	18.73	-	-
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C ₃ A)	6.52	6.30	-	-
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C ₄ AF)	12.45	8.89	-	-
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	-	-	16.78	-
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	27.72	28.11	7.49	> 50.00
ความถ่วงจำเพาะ	3.11	3.12	2.29	-
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	3,139	3,681	4,297	-
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	14.10	13.54	22.50	-

ปูนซีเมนต์ GU เป็นผงมีสีเทา ลักษณะจากภาพถ่ายกำลังสูงมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอนแตกต่างกัน มีรูพรุน และขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ ปูนซีเมนต์ PC เป็นผงสีเทาเข้ม ลักษณะจากภาพถ่ายกำลังสูงมีลักษณะผิวขรุขระ เป็นเหลี่ยมมุม ส่วนเถ้าขี้เถ้าเทศบาล MWA เป็นผงมีสีดำ ลักษณะจากภาพถ่ายกำลังสูงเป็นมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมนน้อยกว่าปูนซีเมนต์ ผิวเรียบ และมีขนาดอนุภาคค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 1 และ 2 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน พบว่า ปูนซีเมนต์ GU

ปูนซีเมนต์ PC และเถ้าขยะเทศบาล MWA มีองค์ประกอบหลักได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 62.05 62.39 และ 15.15 โดยมวลของวัสดุ และได้คำนวณปริมาณสารประกอบ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF ของปูนซีเมนต์ GU และปูนซีเมนต์ PC โดยวิธีของ R.H. Bogue ตามมาตรฐาน ASTM C150 ดังตารางที่ 1 การทดสอบการหักเหของรังสีเอกซ์เรย์ด้วยวิธี XRD พบว่า จุด Peak Intensity ของปูนซีเมนต์ GU และ PC เป็นแร่ Hatrurite (Ca_3SiO_4O) ที่มุม 2-Theta เท่ากับ 32 มีค่า Counts สูงสุดเท่ากับ 12,000 และ 1,100 ตามลำดับ โดยมีส่วนเสริมให้ตัวอย่างมีความแข็งแรง [12] รูปที่ 3 (ก) และ (ข) ส่วนเถ้าขยะเทศบาลมีจุด Peak Intensity ที่มุม 2-Theta เท่ากับ 28 มีค่า Counts สูงสุดเท่ากับ 28,000 ซึ่งเป็นแร่ Sylvite (KCl) โดยที่ไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์ [13] ดังรูปที่ 3 (ค)



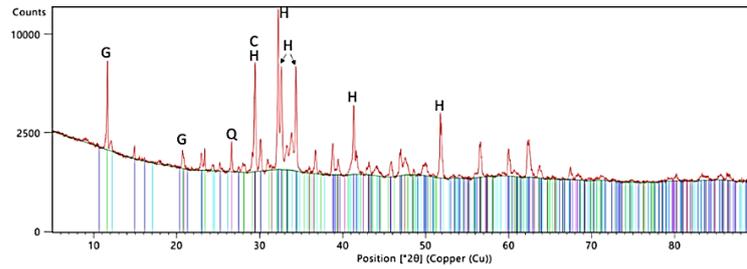
รูปที่ 1 วัสดุประสาน



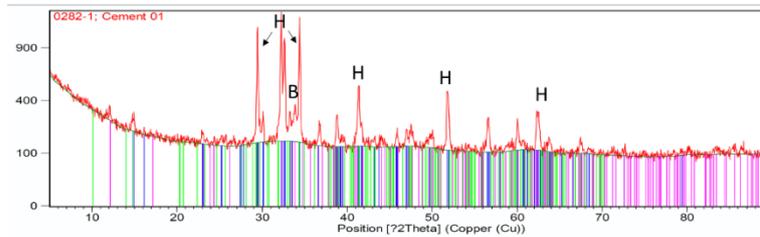
รูปที่ 2 ภาพถ่ายกำลังสูงของวัสดุประสาน

2.2 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์

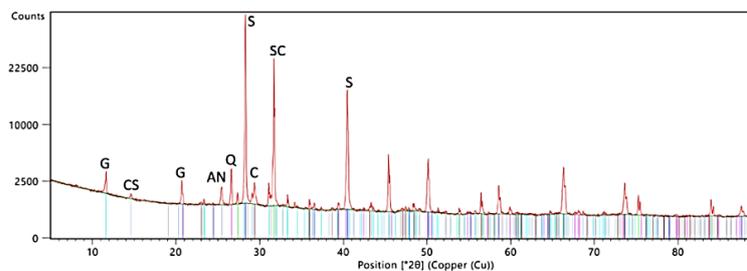
อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมเท่ากับ 1 : 2.75 แบ่งเป็น 2 กลุ่ม โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ GU และปูนซีเมนต์ PC บางส่วน ด้วยเถ้าขยะเทศบาล MWA แทนด้วยสัญลักษณ์ GU-xxMWA และ PC-xxMWA ตามลำดับ ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 15 20 25 และ 30 โดยมวลวัสดุประสาน ดังตารางที่ 2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ให้ค่าจากการทดสอบการไหลแผ่ (Flow Table) ตามมาตรฐาน ASTM C230 เท่ากับร้อยละ 110 ± 5



(ก) ปูนซีเมนต์ GU



(ข) ปูนซีเมนต์ PC



(ค) เถ้าขยะเทศบาล (MWA)

เมื่อ H : Hatrurite G : Gypsum Q : Quartz C : Calcite B : Brownmillerite S : Sylvite SC : Halite
An : Anhydrite CS : Calcium Sulfate

รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซเรย์ของวัสดุประสาน

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ใช้ตัวอย่างขนาด 50 มม. × 50 มม. × 50 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C109 หลังจากหล่อมอร์ต้าร์ครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วนำตัวอย่างบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน และนำตัวอย่างไปทดสอบโดยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ดังรูปที่ 4 (ก)

2.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ใช้ตัวอย่างคานขนาด 40 มม. × 40 มม. × 160 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C348 หลังจากหล่อมอร์ต้าร์ครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วนำตัวอย่างบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน และนำตัวอย่างไปทดสอบโดยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ดังรูปที่ 4 (ข)

2.3.3 การทดสอบความต้านทานซัลเฟต ด้วยวิธีการขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยวัดการขยายตัว (Expansion) ของตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C1012 ขนาด 25 มม. × 25 มม. × 285 มม. ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต หลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำแท่งตัวอย่างไปแช่ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดความยาว (Length comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C490 หลังจากนั้นนำแท่งตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

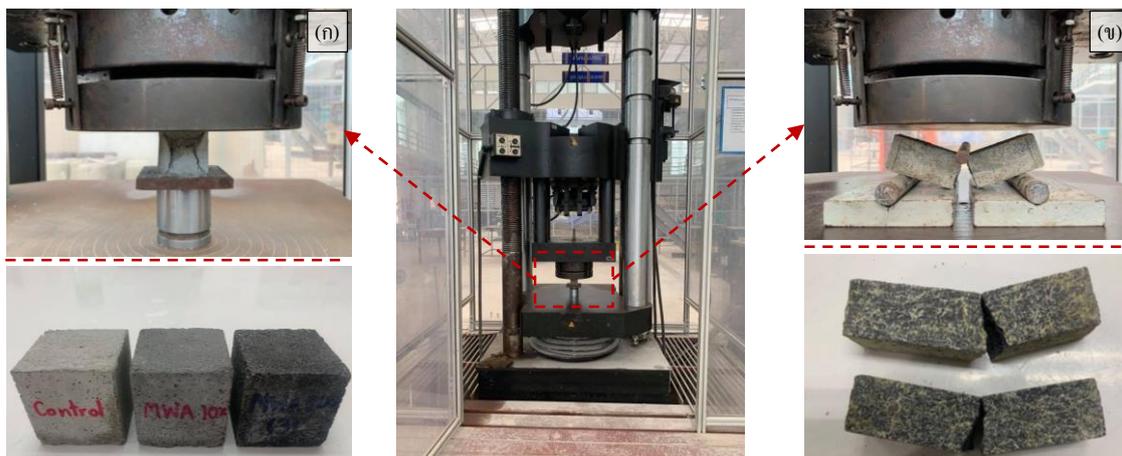
ซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล โดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร ซึ่งมีปริมาณ SO_4^{2-} เท่ากับ 33,800 ppm อัตราส่วนปริมาตรสารละลายต่อปริมาตรแท่งตัวอย่างที่แช่ประมาณ 4 ต่อ 1 แล้วทำการวัดความยาวของแท่งตัวอย่างหลังแช่สารละลายที่อายุ 28 วัน 60 วัน 90 วัน 120 วัน 150 วัน และ 180 วัน ดังรูปที่ 5 โดยสารละลายที่ใช้แช่แท่งตัวอย่างจะเปลี่ยนทุก ๆ อายุ 2 เดือน ซึ่งการขยายตัวของแท่งตัวอย่างเป็นการเฉลี่ยการขยายตัว 3 แท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยค่าการขยายตัวของแท่งตัวอย่างคำนวณดังสมการที่ 1

$$\text{การขยายตัว (ร้อยละ)} = [(L_t - L_0) / L_g] \times 100 \quad (1)$$

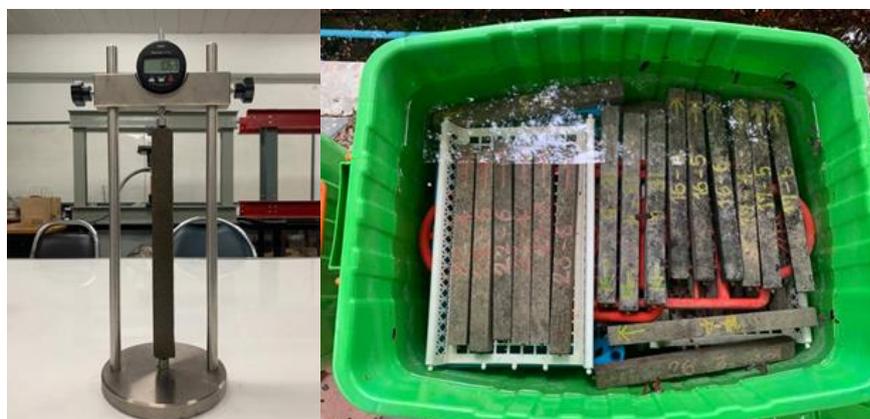
โดยที่ L_t คือ ค่าความยาวเฉลี่ยของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (มิลลิเมตร)

L_0 คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่างหลังจากแช่น้ำปูนขาวอมตัว 28 วัน (มิลลิเมตร)

L_g คือ ความยาวมาตรฐานของตัวอย่างคอนกรีต เท่ากับ 285 มิลลิเมตร



รูปที่ 4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงคดของมอร์ตาร์ (ก) การทดสอบกำลังรับแรงอัด และ (ข) การทดสอบกำลังรับแรงคด



รูปที่ 5 การทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ควบคุมและมอร์ตาร์ผสมเถ้าขยะเทศบาล

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมมอร์ตาร์โดยมวล (กรัม)					การไหล (ร้อยละ)
		ปูนซีเมนต์ GU	ปูนซีเมนต์ PC	เถ้าขยะเทศบาล MWA	ทราย	W/B	
1	GU	1.00	-	-	2.75	0.495	113
2	GU-5MWA	0.95	-	0.05	2.75	0.495	111
3	GU-10MWA	0.90	-	0.10	2.75	0.490	112
4	GU-15MWA	0.85	-	0.15	2.75	0.485	112
5	GU-20MWA	0.80	-	0.20	2.75	0.475	111
6	GU-25MWA	0.75	-	0.25	2.75	0.470	112
7	GU-30MWA	0.70	-	0.30	2.75	0.465	111
8	PC	-	1.00	-	2.75	0.550	110
9	PC-5MWA	-	0.95	0.05	2.75	0.540	109
10	PC-10MWA	-	0.90	0.10	2.75	0.530	110
11	PC-15MWA	-	0.85	0.15	2.75	0.520	108
12	PC-20MWA	-	0.80	0.20	2.75	0.515	109
13	PC-25MWA	-	0.75	0.25	2.75	0.510	109
14	PC-30MWA	-	0.70	0.30	2.75	0.505	110

หมายเหตุ : GU หมายถึง อัตราส่วนควบคุมของปูนซีเมนต์ GU และ PC หมายถึง อัตราส่วนควบคุมปูนซีเมนต์ PC
xx หน้า MWA หมายถึง อัตราร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขยะเทศบาล

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 คุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์

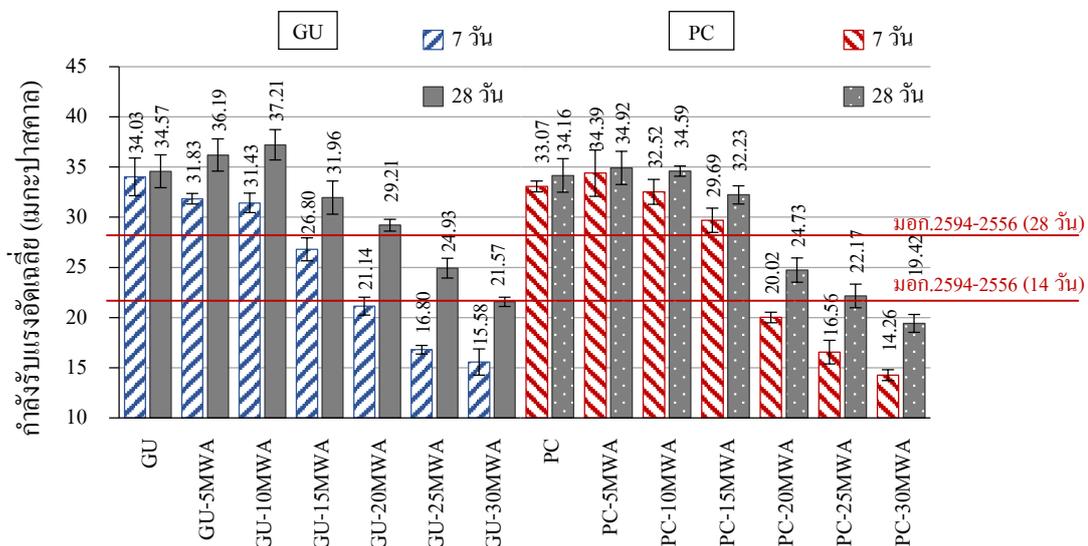
3.1.1 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

รูปที่ 6 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ GU และมอร์ตาร์ PC ผสมเถ้าขยะเทศบาล MWA ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 20 25 และ 30 โดยมวลของวัสดุประสาน ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ GU มีค่าเท่ากับ 34.03 และ 34.57 เมกะปาสคาล สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้มากกว่าอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ PC ร้อยละ 2.82 และ 1.19 ตามลำดับ เนื่องจากปูนซีเมนต์ GU มีวัสดุทดแทนอย่างปอชโซลานเป็นส่วนประกอบ [10, 14] อย่างไรก็ตามการพัฒนา กำลังของ GU มีการพัฒนาการรับกำลังอัดได้อย่างต่อเนื่อง [15-20] โดยอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ PC มีค่าเท่ากับ 33.07 และ 34.16 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยของ [21, 22]

ที่อายุการบ่ม 7 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ GU ด้วยเถ้าขยะเทศบาล MWA ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดลดลงในทุกอัตราส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ GU อย่างไรก็ตามเมื่ออายุการบ่มเพิ่มเป็น 28 วัน กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ GU ที่แทนที่ด้วยเถ้าขยะเทศบาล MWA ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 (GU-5MWA และ GU-10MWA) มีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ GU ร้อยละ 4.69 และ 7.64 ตามลำดับ ในขณะที่อัตราส่วนอื่นมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ GU และอัตราส่วนที่รับกำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ GU-10MWA ในขณะที่มอร์ตาร์ PC แทนที่ด้วยเถ้าขยะเทศบาล MWA ที่อายุการบ่ม 7 วัน อัตราส่วนผสม PC-5MWA มีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดสูงกว่าอัตราส่วน

ควบคุมมอร์ตาร์ PC อาจเนื่องมาจากที่อายุการบ่ม 7 วัน มีการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์จึงทำให้เกิดความแปรปรวน และอัตราส่วนอื่น มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ PC เมื่ออายุการบ่มเพิ่มเป็น 28 วัน กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ PC ที่แทนที่ด้วยเถ้าขี้เถ้า MWA ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 (PC-5MWA และ PC-10MWA) มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงกว่าอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ PC ร้อยละ 2.22 และ 1.26 และเมื่อถูกแทนที่ด้วยเถ้าขี้เถ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีกำลังอัดที่ลดลงในทุกอัตราส่วน เนื่องจากองค์ประกอบสำหรับสร้างกำลังรับแรงอัดให้กับมอร์ตาร์ GU และมอร์ตาร์ PC ผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นผลิตภัณฑ์คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานมีปริมาณลดลง ส่งผลให้มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ GU และ PC ผสมเถ้าขี้เถ้าลดลงไปด้วย [23]

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ GU และมอร์ตาร์ PC ผสมเถ้าขี้เถ้า MWA ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 20 25 และ 30 โดยมวลของวัสดุประสาน ที่อายุการบ่ม 28 วัน จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ GU ผสมเถ้าขี้เถ้า MWA มีค่าการรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ PC ผสมเถ้าขี้เถ้า MWA ยกเว้น GU-15MWA มีค่าต่ำกว่า PC-15MWA เพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากเถ้าขี้เถ้า MWA มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 22.50 ไมโครเมตร และมี Calcite (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบหลักจึงจัดเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปอซโซลาน ดังนั้นกำลังอัดที่สูงขึ้นจึงเป็นผลจากอิทธิพลของการอัดตัวของอนุภาค (Packing effect) ตามที่ [24] กล่าวไว้ว่า มอร์ตาร์ผสมวัสดุเฉลี่ยที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยไม่เกิน 30 ไมโครเมตร ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 กำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์จะมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับ [25] ที่สรุปว่า การแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุมวลละเอียดร้อยละ 0 – 10 ทำให้กำลังของมอร์ตาร์สูงขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการอัดตัวของอนุภาค และ [26] การแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุผสมที่มีขนาดเล็กหรือขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคเฉลี่ยของซีเมนต์ช่วยสอดแทรกการกระจายตัวได้ดีในเฟสดี จึงทำให้ความสามารถในการรับกำลังดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่และหยาบกว่า

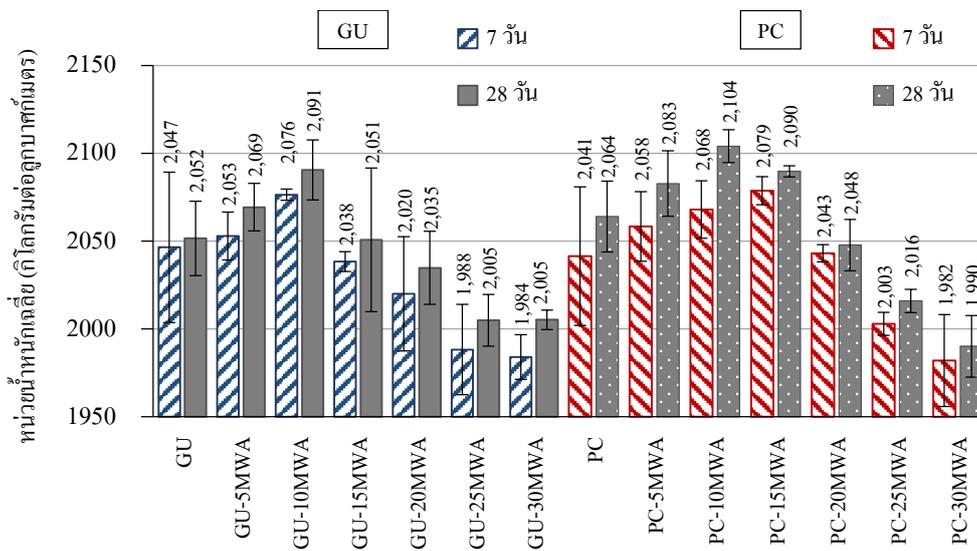


รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ GU และมอร์ตาร์ PC ผสมเถ้าขี้เถ้า MWA ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน

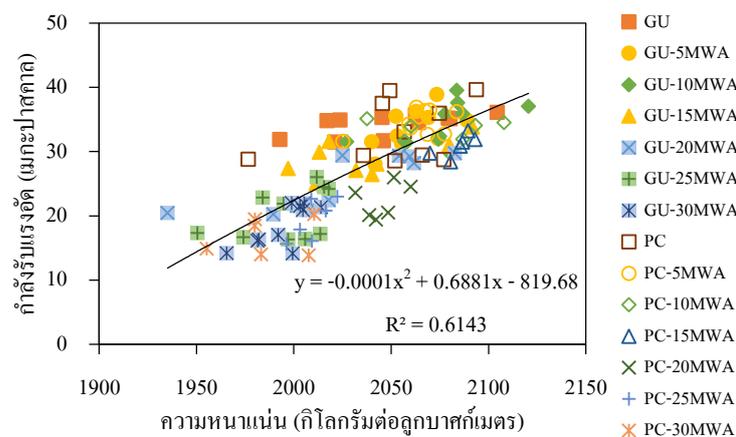
เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ GU และ PC ด้วยเถ้าขี้เถ้า MWA ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 พบว่ามอร์ตาร์ GU-5MWA GU-10MWA PC-5MWA และ PC-10MWA มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามลำดับและมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ GU และ

มอร์ตาร์ PC แต่เมื่อการแทนที่ของเถ้าขยะเทศบาล MWA สูงกว่าร้อยละ 10 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 7 เนื่องจากเถ้าขยะเทศบาลมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยไม่แตกต่างจากขนาดอนุภาคของซีเมนต์ GU และ PC จึงอัดตัวและแทรกอุดช่องว่างได้ดีขึ้น และร้อยละของการแทนที่น้อยกว่า 10 เป็นสัดส่วนที่ทำให้การอัดตัวหรือการแทรกอุดช่องว่างมีผลในทางบวก

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ GU และมอร์ตาร์ PC จะเห็นได้ว่าโดยภาพรวมกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น ทั้งนี้มอร์ตาร์ GU-5MWA GU-10MWA GU-15MWA GU-20MWA PC-5MWA PC-10MWA และ PC-15MWA มีค่าการรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ผ่านเกณฑ์ มอก.2594-2556 ซึ่งกำหนดไว้ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 20 และ 28 เมกะปาสคาล ตามลำดับ



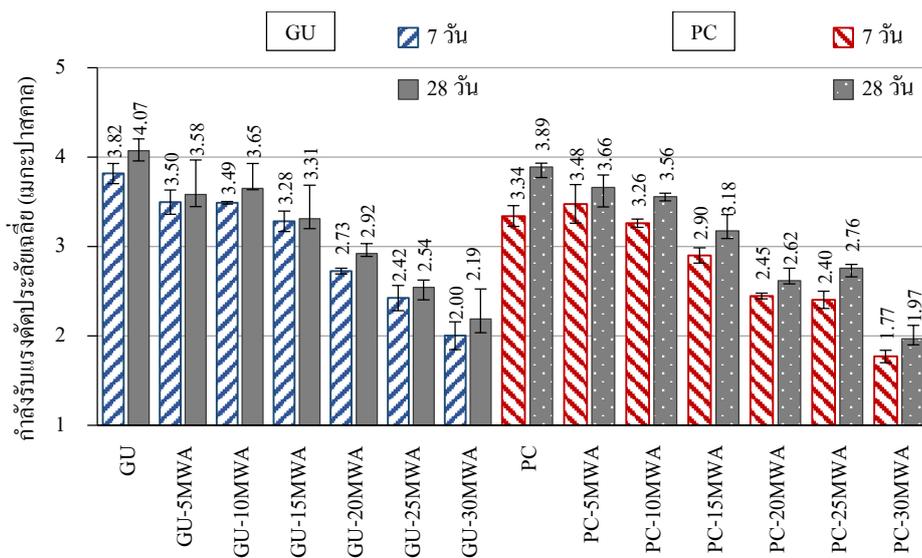
รูปที่ 7 หนาแน่นน้ำหนักเฉลี่ยของมอร์ตาร์ GU และมอร์ตาร์ PC ผสมเถ้าขยะเทศบาล WMA ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน



รูปที่ 8 กำลังรับอัดและความหนาแน่นที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน

3.1.2 กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ต้าร์ GU และมอร์ต้าร์ PC ผสมเถ้าขยะเทศบาล WMA พบว่า กำลังรับแรงดัดระหว่างอัตราส่วนควบคุมมอร์ต้าร์ GU และมอร์ต้าร์ PC ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน อัตราส่วนควบคุมมอร์ต้าร์ GU มีค่ากำลังรับแรงดัด เท่ากับ 3.82 และ 4.07 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ซึ่งสามารถรับแรงดัดได้มากกว่าอัตราส่วนควบคุมมอร์ต้าร์ PC ที่มีค่าเท่ากับ 3.34 และ 3.87 เมกะปาสกาล ตามลำดับ เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ของมอร์ต้าร์ GU และ PC ด้วยเถ้าขยะเทศบาล MWA ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 20 25 และ 30 โดยมวลของวัสดุประสาน ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน มีกำลังรับแรงดัดลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของเถ้าขยะเทศบาลในทุกอัตราส่วน โดยมอร์ต้าร์ GU มีกำลังรับแรงดัดสูงกว่ามอร์ต้าร์ PC เช่นเดียวกับอัตราส่วนควบคุม ยกเว้น มอร์ต้าร์ GU-5MWA และ GU-25MWA ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีกำลังรับแรงดัดต่ำกว่า มอร์ต้าร์ PC-5MWA และ PC-25MWA เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและรากที่สองของกำลังรับแรงอัด ($\sqrt{f_c}$) ของมอร์ต้าร์ GU และมอร์ต้าร์ PC ผสมเถ้าขยะเทศบาล WMA ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ดังรูปที่ 10 พบว่า กำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มการพัฒนากำลังไปในทิศทางเดียวกับกำลังรับแรงอัด เมื่อกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงดัดก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดสามารถใช้คาดการณ์กำลังรับแรงดัดได้ [27]

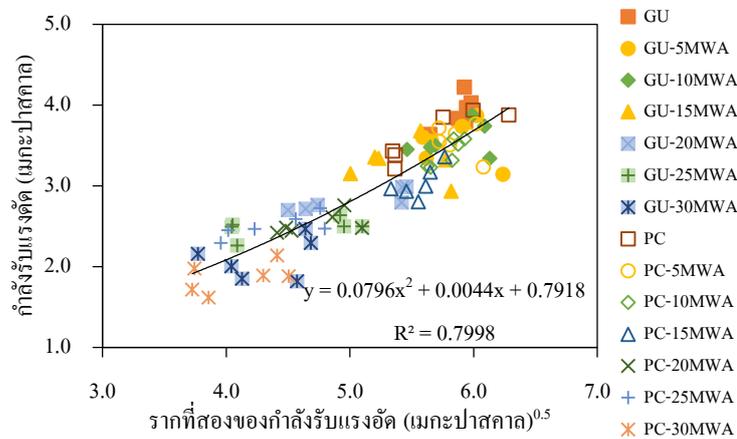


รูปที่ 9 กำลังรับแรงดัดของมอร์ต้าร์ GU และ PC ผสมเถ้าขยะเทศบาลที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน

3.2 การขยายตัวของมอร์ต้าร์

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 28 วัน 60 วัน 90 วัน 120 วัน 150 วัน และ 180 วัน ของมอร์ต้าร์ GU และมอร์ต้าร์ PC ผสมเถ้าขยะเทศบาล WMA ตามมาตรฐาน ASTM C1012 ระบุให้ มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าร้อยละ 0.10 หลังแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตครบ 180 วัน สำหรับสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟตปานกลาง พบว่า มอร์ต้าร์ GU และมอร์ต้าร์ PC ทุกอัตราส่วนมีค่าการขยายตัวเพิ่มขึ้นหลังจากสัมผัสสารละลายโซเดียมซัลเฟต เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของอัตราส่วนควบคุมมอร์ต้าร์ GU และมอร์ต้าร์ PC มีอัตราการขยายตัวใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 11 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ของปูนซีเมนต์ GU และ

ปูนซีเมนต์ PC ที่มีปริมาณใกล้เคียงกัน เท่ากับร้อยละ 6.52 และ 6.30 ตามลำดับ ผลการศึกษาของ [2, 3, 28, 29] กล่าวว่าไว้ว่าปริมาณ C_3A มีผลต่ออัตราการขยายตัวของมอร์ตาร์ เนื่องจาก C_3A จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมจึงเกิดก่อตัวของเอทริงไคต์ [3]



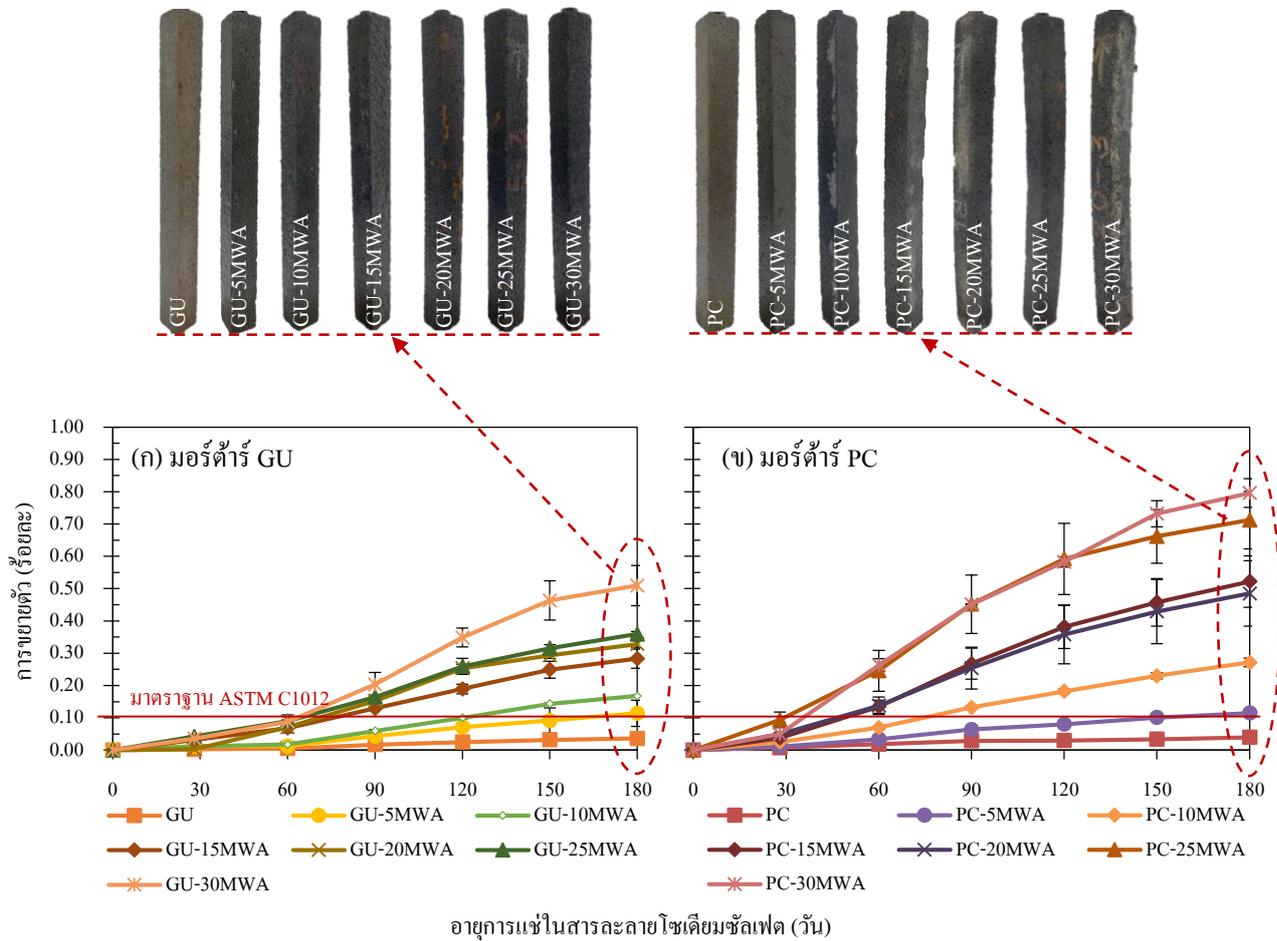
รูปที่ 10 กำลังรับแรงอัดและรากที่สองของกำลังรับแรงอัด ($\sqrt{f_c}$) ของมอร์ตาร์

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ GU ด้วยเถ้าขยะเทศบาล MWA ดังรูปที่ 11 (ก) จะเห็นว่าที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 180 วัน มอร์ตาร์ GU GU-5MWA GU-10MWA GU-15MWA GU-20MWA GU-25MWA และ GU-30MWA มีค่าการขยายตัว เท่ากับร้อยละ 0.036 0.114 0.168 0.283 0.328 0.359 และ 0.509 ตามลำดับ รูปที่ 11 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ PC ด้วยเถ้าขยะเทศบาล MWA จะเห็นได้ว่าการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออายุการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น ซึ่งมอร์ตาร์ PC PC-5MWA PC-10MWA PC-15MWA PC-20MWA PC-25MWA และ PC-30MWA ที่อายุการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต 180 วัน มีการขยายตัว เท่ากับร้อยละ 0.040 0.115 0.272 0.522 0.485 0.712 และ 0.796 ตามลำดับ และการขยายตัวที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขยะเทศบาลมีค่ามากกว่าอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ GU และ PC ในทุกอัตราส่วน โดยมีค่าการขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขยะเทศบาลในปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบการโก่งตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ GU และมอร์ตาร์ PC เมื่อผสมเถ้าขยะเทศบาล WMA ในช่วงอัตราส่วนร้อยละ 15 ถึง 30 อย่างเห็นได้ชัด และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D.) ก่อนข้างผันผวนในช่วงอายุการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตมากกว่า 90 วัน

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ GU และมอร์ตาร์ PC ผสมเถ้าขยะเทศบาล MWA ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 20 25 และ 30 โดยมวลของวัสดุประสาน พบว่า การขยายตัวที่อายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตในช่วง 90 ถึง 180 วัน ของมอร์ตาร์ PC ผสมเถ้าขยะเทศบาลมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ GU ผสมเถ้าขยะเทศบาล ในทุกอัตราส่วน อาจเนื่องมาจากปูนซีเมนต์ GU ปูนซีเมนต์ PC และเถ้าขยะเทศบาล MWA มีปริมาณ SO_3 เท่ากับร้อยละ 3.42 4.43 และ 6.39 ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 ซึ่งปริมาณ SO_3 อาจทำให้มอร์ตาร์มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากการก่อตัวของเอทริงไคต์ ซึ่งการก่อตัวของเอทริงไคต์ ทำให้เกิดผลึกที่ดันออกไป จึงส่งผลให้เกิดรอยร้าวภายในแท่งตัวอย่าง [15, 30]

สรุปได้ว่า มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขยะเทศบาลในอัตราส่วนร้อยละ 15 - 30 มีความสามารถในการต้านทานซัลเฟตไม่ดีพอ ไม่เหมาะสำหรับใช้ในงานที่สัมผัสซัลเฟตปานกลางถึงรุนแรงได้ และมอร์ตาร์ PC ผสมเถ้าขยะเทศบาลมีปริมาณ SO_3 มากกว่ามอร์ต

ด้าย GU ผสมเส้นใยเทศบาลจึงเป็นเหตุผลให้เกิดการขยายตัวมากกว่า และผลการทดสอบการต้านทานซัลเฟตสอดคล้องกับการทดสอบเชิงกลคือความแข็งแรงน้อยส่งผลให้มีค่าการขยายตัวสูงขึ้น [15]



รูปที่ 11 การขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ดีนต์ GU และ PC

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ของมอร์ดีนต์ GU ผสมเส้นใยเทศบาล มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ดีนต์ PC ที่ผสมเส้นใยเทศบาล MWA ในทุกอัตราส่วน ยกเว้น GU-15MWA ซึ่งมีค่าต่ำกว่า PC-15MWA เพียงเล็กน้อย และมอร์ดีนต์ GU เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเส้นใยเทศบาลในอัตราส่วนร้อยละ 10 (GU-10MWA) ที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้ดีที่สุด

4.2 กำลังรับแรงคดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ของมอร์ดีนต์ GU และมอร์ดีนต์ PC ผสมเส้นใยเทศบาล MWA มีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงคดของอัตราส่วนควบคุมมอร์ดีนต์ GU และ PC ในทุกอัตราส่วน โดยมีกำลังรับแรงคดลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยเทศบาล ยกเว้น GU-10MWA ซึ่งมีค่าสูงกว่า PC-5MWA เพียงเล็กน้อย

4.3 การขยายตัวที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขะเทศบาลมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขะเทศบาลที่เพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์ GU ที่ผสมเถ้าขะเทศบาล MWA มีค่าการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ตาร์ PC ที่ผสมเถ้าขะเทศบาล MWA ทุกอัตราส่วน และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขะเทศบาลในทุกอัตราส่วนมีค่าการขยายตัวมากกว่าร้อยละ 0.10 หลังแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตครบ 180 วัน จึงไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C1012

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานกำจัดขยะมูลฝอยชุมชน โดยแปลงขยะเป็นพลังงานไฟฟ้าเทศบาลนครหาดใหญ่ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา ที่ได้สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Neusa, Ap. et.al. Alkali activated cement made from blast furnace slag generated by charcoal: Resistance to attack by sodium and magnesium sulfates. *Construction and Building Materials*, 2020, 238, pp. 1-8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117710.
- [2] Barbosa Costa, L.C. Sodium sulfate attack on portland cement structures: experimental and analytical approach. *REM - International Engineering Journal*, 2018, 71 (4), pp. 531-542. DOI: 10.1590/0370-44672018710009.
- [3] Gopalakrishnan, R. and Jeyalakshmi, R. The effects on durability and mechanical properties of multiple nano and micro additive OPC mortar exposed to combined chloride and sulfate attack. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, 106, pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.mssp.2019.104772.
- [4] Chindaprasit, P. and Jaturapitakkul, C. *Cement Pozzolan and Concrete*, 7th ed. Bangkok: Thailand Concrete Association, 2012.
- [5] Vattanakul, Y. et.al. Cementitious properties and expansion in sodium sulfate solution of concrete with fly ash and limestone powder. *Journal of Engineering, RMUTT*, 2012, pp. 51-59.
- [6] Kaolim, N. *Durability of concrete made with industrial wastes*. Master's Thesis, Nakhon Nayok: Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2017.
- [7] Regional Environmental Office 16 (Songkhla). *Report on the results of monitoring and evaluation of the wastewater collection and treatment system and the community solid waste disposal system*. Regional Environmental Office 16, 2560.
- [8] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. *Knowledge enhancement in waste to energy management*. Ministry of Energy, 2559.
- [9] Sanewu, I.F. et.al. Pozzolanic characteristics of municipal solid waste ash. *Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology*, 2013, 15 (1), pp.70-80.
- [10] Thai Industrial Standard. *TIS 2594-2556: Hydraulic cement*. Bangkok, 2556.
- [11] Thai Industrial Standard. *TIS 15 1-2555 Portland Cement Part 1 Specification*. Bangkok, 2547.
- [12] Chantaramanee, S. et.al. Properties of cement composite fabricated from white rice husk ash incorporated with short single-walled carbon nanotubes. *Engineer Journal Chiang Mai University*, 2018, 25 (3), pp.113-121.

- [13] Nagrockiene, D. et.al. The effect of waste from Mineral wool manufacturing on The properties of Concrete. *Ceramics-Silikáty*, 2021, 65 (2), pp.141-147. DOI: 10.13168/cs.2021.0013.
- [14] Thai Cement Manufacturers Association. *Hydraulic Cement*. Thai Cement Manufacturers Association. Bangkok, 2563.
- [15] Nguyen, T.B.T. et.al. Influences of different types of fly ash and confinement on performances of expansive mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 2019, 209, pp. 176-186. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.032.
- [16] Yang, J. et.al. Improving durability of heat-cured high volume fly ash cement mortar by wet-grinding activation. *Construction and Building Materials*, 2021, 289, pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123157.
- [17] Fanghui, H. et.al. The differences among the roles of ground fly ash in the paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 2015, 93, pp. 172-179. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.117.
- [18] Chindaprasirt, P. et.al. *Utilization of fly ash and waste material from industrial factory as a material in concrete*, 2th ed. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2553, pp.15-33.
- [19] Wang, C. et.al. Effect of binary admixture of sepiolite and fly ash on carbonation and chloride resistance of modified cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2021, 279, pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122509.
- [20] Lima, C.P.F. et.al. Evaluation of corn straw ash as supplementary cementitious material: Effect of acid leaching on its pozzolanic activity. *Cement*, 2021, 4, pp. 1-12. DOI: 10.1016/j.cement.2021.100007.
- [21] Ngarmkham, S. *Effects of municipal waste ash on the durability and mechanical properties of concrete*. Master's Thesis, Songkhla: Rajamangala University of Technology Srivijaya, 2016.
- [22] Sangrayab, A. *Effect of fly ash type on properties of paste, mortar and concrete*. Master's Thesis, Nakhon Nayok: Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2017.
- [23] Chunran, W. et.al. Effects of high-calcium sepiolite on the rheological behaviour and Effects of high-calcium sepiolite on the rheological behaviour and. *Construction and Building Materials*, 2019, 196, pp. 105-114. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.130.
- [24] Jatuphon, T. et al. Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35, pp. 1145-1151. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.09.030.
- [25] Khan, M.N.N. et al. Filler effect of pozzolanic materials on the strength and microstructure development of mortar. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21 (1), pp. 274-284. DOI: 10.1007/s12205-016-0737-5.
- [26] Chatveera, B. and Srinoum, P. A study of properties of mortar portland cement type V mixed with ground rice husk ash and limestone powder. *KMUTT Research and Development Journal*, 2012, 35 (2), pp.201-218.
- [27] Teixeira, E.R. et al. Quality and durability properties and life-cycle assessment of high volume biomass fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, 2019, 197, pp. 195-207. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.173.
- [28] Hodhod, O.A. and Salama, G. Simulation of expansion in cement based materials subjected to external sulfate attack. *Ain Shams Engineering Journal*, 2014, 5, pp. 7-15. DOI: 10.1016/j.asej.2013.05.002.
- [29] Chusilp, N. et al. Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construction and Building Materials*, 2009, 23, pp.3523-3531. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.046.
- [30] Zahedi, M. et al. Properties and durability of concrete containing fluidized bed combustion (FBC) fly ash. *Construction and Building Materials*, 2020, 258, pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119663.