สมบัติของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง ผสมร่วมทรายพ่นเหลือทิ้งและผงแคลเซียมคาร์บอเนต

Properties of Self-Compacting Mortar Mixed with Sandblasting Waste and Calcium Carbonate Powder

กัญวรรธน์ โสขุมา[1] บุรฉัตร ฉัตรวีระ[2,*] และกฤษดา เสือเอี่ยม[3]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี
[3] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: cburacha@engr.tu.ac.th*

บทคัดย่อ

การพ่นทรายเป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อทำความสะอาดสิ่งสกปรก การกัดกร่อนสีหรือวัสดุเคลือบต่าง ๆ บนพื้นผิววัตถุ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการต่อเรือและบำรุงรักษา การบำรุงรักษาสะพานหรือการปฏิบัติการทางทหาร เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและประหยัดแต่ในขณะเดียวกันก็สร้างของเหลือทิ้งจำนวนมากเช่นเดียวกัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองผสมร่วมทรายพ่นเหลือทิ้งจากกระบวนการพ่นทรายในโรงงานอุตสาหกรรม โดยการนำทรายพ่นเหลือทิ้งมาแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ผสมร่วมผงแคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยกำหนดค่าการไหลแผ่ของทุกส่วนผสมอยู่ในช่วง 25±5 เซนติเมตร ทำการทดสอบความสามารถในการไหลและสมบัติของมอร์ตาร์แข็งตัวซึ่งประกอบไปด้วยกำลังอัด และกำลังดัดที่อายุบ่มสูงสุด 90 วัน ผลการทดสอบพบว่าอายุบ่ม 90 วัน มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองผสมร่วมทรายพ่นเหลือทิ้งร้อยละ 60 และผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดเท่ากับ 673.60 และ 82.43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมถึงร้อยละ 8 และ 25 ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการดูดกลืนน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ด้วยทรายพ่นเหลือทิ้งเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ: มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง, ทรายพ่นเหลือทิ้ง, ผงแคลเซียมคาร์บอเนต, สมบัติทางกล

Abstract

Sandblasting is a process to free an object's surface of dirt, corrosion, paint, or coatings. It is used extensively in the shipbuilding and maintenance industries, bridge maintenance, and military operations. This efficient, economical method creates considerable waste. This research studied the properties of self-compacting mortar mixed with sand waste from the sandblasting process by replacing fine aggregate with sandblasting waste at ratios of 0, 20, 40, 60, 80, and 100 percent by weight, respectively, and mixed with calcium carbonate powder at a cement replacement ratio of 10 percent by weight. All mixes had a controlled slump diameter in the range of 25±5 cm. Tested the slump flow and hardened mortar properties, including compressive and flexural strengths, at a maximum curing time of 90 days. Results showed that the compressive strength of mortar made with 60% sandblasting waste replacement mixed with 10% calcium carbonate powder replacement had a maximum compressive strength and a flexural strength value of 673.60 and 82.43 ksc at 90 days of curing, higher than the controlled mortars 8% and 25%, respectively. While the water absorption tends to decrease when the sandblasting waste replacement increases.

Keywords: self-compacting mortar, sandblasting waste, calcium carbonate powder, mechanical properties

1. บทนำ

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมจัดว่าเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดของเสียจากกระบวนการทำงานอยู่ในลำดับต้นๆ โดยของเสียเหล่านั้นสามารถจำแนกตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม [1] ได้เป็น 2 ประเภท คือ ของเสียที่ไม่เป็นอันตรายและสามารถทำลายหรือจัดการให้หมดไปโดยง่าย เช่น เศษอาหารอาจถูกนำไปใช้ทำปุ๋ย เศษกระดาษนำไปใช้ทำกระดาษห่อของ หรือเศษโลหะสามารถนำมาหลอมใหม่ได้ อีกประเภทได้แก่ของเสียอันตราย เช่น สารเคมีที่มีพิษหรือสารปนเปื้อนเชื้อโรค ซึ่งหากนำไปทิ้งหรือทำลายโดยไม่ถูกวิธีก็อาจก่อให้เกิดมลพิษแพร่กระจาย ส่งผลให้ผู้คนเจ็บป่วยหรือร้ายแรงถึงขั้นเสียชีวิตได้

สำหรับอุตสาหกรรมการพ่นทราย นิยมใช้ทรายเป็นตัวกลางในกระบวนการทำความสะอาดขัดพื้นผิวชิ้นงานด้วยเครื่องพ่นชนิดแรงดันสูง โดยใช้แรงดันจากปั๊มลมเป็นแรงขับเคลื่อนทรายให้ไปกระทบผิวของชิ้นงานเพื่อให้ขัดผิวได้อย่างรวดเร็ว เข้าถึงทุกซอกทุกมุม ผลพลอยได้จากกระบวนการพ่นทรายนั้นก่อให้เกิดทรายพ่นเหลือทิ้งจากกระบวนการจำนวนมาก โดยทรายพ่นเหลือทิ้งนั้นจะมีลักษณะละเอียด ขนาดอนุภาคส่วนใหญ่เล็กกว่า 10 ไมครอน อีกทั้งยังมีสนิมเหล็กหรือเศษโลหะปะปนอยู่ด้วย ทั้งนี้หากเกิดการฟุ้งกระจายทั้งภายในโรงงานและออกสู่ภายนอกจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานและผลให้เกิดมลภาวะต่อผู้อยู่อาศัยบริเวณใกล้เคียงได้ ซึ่งเป็นสาเหตุและปัจจัยทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับปอดและระบบทางเดินหายใจ เช่น ภาวะปอดอักเสบ มะเร็งปอด หรือโรคภัยไข้เจ็บอื่นๆ เป็นต้น โดยปกติทรายพ่นเหลือทิ้งนี้จะถูกนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบตามหลักสุขาภิบาลซึ่งต้องใช้พื้นที่ในการฝังกลบมาก อีกทั้งยังก่อให้เกิดมลพิษ ปริมาณขยะและปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย [2] ได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณของเสีย เมื่อปี พ.ศ. 2554 พบว่ามีปริมาณของเสียจากวัสดุพ่นขัดผิวที่มีสารอันตรายมากถึง 22,645.80 ตันต่อปี ถูกจัดเป็นลำดับที่ 69 ของปริมาณของเสียอุตสาหกรรม จากปริมาณของเสียจากวัสดุพ่นขัดผิวที่มีอยู่สูงนั้นเป็นเหตุให้มีนักวิจัยทั้งในและต่างประเทศหลายท่านพยายามศึกษาเพื่อหาแนวทางในการนำของเสียเหล่านั้นไปใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการศึกษาของ Abdul Shukor Lim et al. [3] และ Qomariah et al. [4] พบว่าการผสมร่วมทรายเหลือทิ้งจากกระบวนการพ่นทรายส่งผลต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของมอร์ต้าร โดยทรายเหลือทิ้งจากกระบวนการพ่นทรายสามารถนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนผสมของมอร์ตาร์ได้สูงสุดถึงร้อยละ 50 โดยที่มีกำลังอัดสูงว่ามอร์ตาร์ควบคุมถึงร้อยละ 16 [3] ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณามอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองนั้นโดยปกตินิยมนำวัสดุปอซโซลานหรือวัสดุที่มีความละเอียดมาผสมร่วมเพื่อปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ หนึ่งในนั้นคือผงแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งจัดเป็นวัสดุเฉื่อยและมีความละเอียดสูงมาก [5-7] ทั้งนี้หากนำผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดและปริมาณที่เหมาะสมมาทำการผสมร่วม จะช่วยทำหน้าที่เติมแทรกในส่วนผสมมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ส่งผลให้โครงสร้างมีโพรงที่ลดลง ความหนาแน่น กำลังอัดและความทนทานเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความละเอียดมากจะส่งผลต่อปริมาณน้ำในส่วนผสมดังนั้นเพื่อให้มอร์ตาร์หรือคอนกรีตมีความสามารถในการไหลที่ดีนั้นจึงมีความจำเป็นต้องนำสารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษเข้ามาใช้งานร่วมในส่วนผสมด้วย

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงนำทรายพ่นเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อนำมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียด และนำเอาผงแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เพื่อศึกษาสมบัติทางด้านวิศวกรรมและความเป็นไปได้เพื่อหาอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในงานมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง เพื่อเป็นแนวทางที่เป็นประโยชน์ในการนำของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาเป็นวัสดุทดแทนในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตได้ต่อไปในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง ทั้งในสภาวะเหลว ได้แก่ ความสามารถในการไหลและระยะเวลาก่อตัว และในสภาวะแข็งตัว ได้แก่ กำลังอัด กำลังดัดและการดูดซึมน้ำ สำหรับส่วนผสมที่แตกต่างกันตามที่ได้ออกแบบไว้ และเป็นการหาแนวทางอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการนำขยะเหลือทิ้งจากกระบวนการพ่นทรายมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 วัสดุผสมหลักมอร์ตาร์

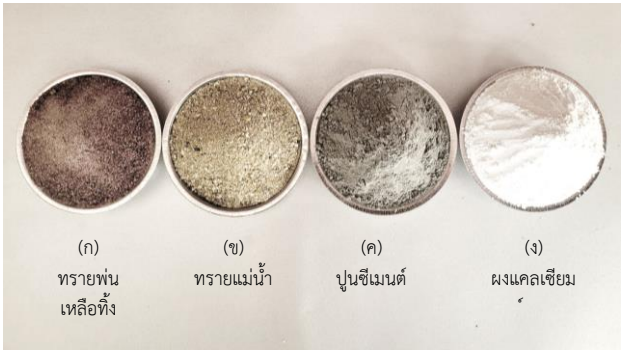
วัสดุสำหรับส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement Type 1) ตราทีพีไอ ผลิตตามตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2555 [8] ดังรูปที่ 1 (ค) มวลรวมละเอียดหรือทรายที่ผ่านการทำความสะอาดและมีการกระจายตัวขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33-18 [9] ดังรูปที่ 1 (ข) และน้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ระหว่าง 6-7

3.1.2 วัสดุทดแทน

วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้แก่ ผงแคลเซียมคาร์บอเนต มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 9.5 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 1 (ง) และวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายพ่นเหลือทิ้งที่จากกระบวนการพ่นทรายเพื่อขัดและทำความสะอาดผิววัสดุในโรงงานอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 1 (ก)

3.1.3 สารเคมีผสมเพิ่ม

สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำปริมาณมากหรือซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ ตามมาตรฐาน ASTM C494-05 [10] เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการไหลของมอร์ตาร์และลดอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ลง ส่งผลให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดในช่วงต้นสูงขึ้น



รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษามอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตนเอง

3.2 อัตราส่วนผสม

แนวคิดในการกำหนดอัตราส่วนผสม คือการนำทรายพ่นเหลือทิ้งมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียด อัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ผสมร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มปรับเพื่อคงสภาวะของการไหลของมอร์ตาร์ตามที่กำหนดในทุกส่วนผสม (25±5 เซนติเมตร) สรุปอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตนเอง

Mix No.	ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์		ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียด	
	ปูนซีเมนต์	ผงแคลเซียมคาร์บอเนต	มวลรวมละเอียด	ทรายพ่นเหลือทิ้ง
Mix. 1	100	-	100	-
Mix. 2	90	10	100	-
Mix. 3	90	10	80	20
Mix. 4	90	10	60	40
Mix. 5	90	10	40	60
Mix. 6	90	10	20	80
Mix. 7	90	10	-	100

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การวิเคราะห์หาขนาดคละของทรายแม่น้ำและทรายพ่นเหลือทิ้ง

นำทรายแม่น้ำและทรายพ่นเหลือทิ้งที่ผ่านการสุ่มด้วยวิธีการแบ่งสี่ (Quartering) ไปอบที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส เพื่อให้มีมวลคงที่ จากนั้นนำไปทำการร่อนบนตะแกรงขนาดมาตรฐาน (เบอร์ 4, 8, 16, 30, 50, 100) บันทึกค่าน้ำหนักทรายที่ค้างบนตะแกรงในแต่ละเบอร์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ขนาดคละของทรายทั้งสองคำนวณค่าโมดูลัสความละเอียด

3.3.2 การวิเคราะห์หาขนาดคละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงแคลเซียมคาร์บอเนต

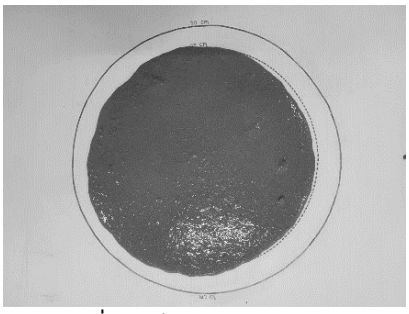
สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำการวิเคราะห์หาขนาดคละด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบเปียก (Laser Diffraction Technique) ผ่านตัวกลางเอทานอลด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 ในขณะที่ผงแคลเซียมคาร์บอเนตทำการวิเคราะห์หาขนาดคละโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง

3.3.3 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของทรายพ่นเหลือทิ้ง

การศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (Bulk Specific Gravity) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity) และการดูดซึม (Absorption) ของทรายพ่นเหลือทิ้ง โดยใช้ทรายพ่นเหลือทิ้งที่ผ่านการแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แล้วนำไดร์มาเป่าเพื่อให้ลมร้อนพัดผ่าน ก่อนนำไปกวนให้ทั่วจนกระทั่งทรายพ่นเหลือทิ้งอยู่ในสภาวะร่วนซุย หลังจากนั้นจึงใส่ทรายพ่นเหลือทิ้งลงในแบบกรวย ทำการกระทุ้งจำนวน 25 ครั้ง เพื่อให้ทรายแน่น แล้วจึงยกกรวยออกในแนวดิ่ง หากทรายยังอยู่ในสภาพคงรูป ให้นำทรายออกมากวนพร้อมกับเป่าลมร้อนด้วยไดร์อีกครั้ง แล้วทดสอบด้วยวิธียกกรวยออกเป็นระยะๆ จนกว่าทรายพ่นเหลือทิ้งจะล้มทันทีเมื่อดึงกรวยออกในแนวดิ่ง หรือจนกว่าทรายจะอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface - Dry Condition) ตามมาตรฐาน ASTM C128-15 [11]

3.3.4 การทดสอบระยะการไหลแผ่

ทดสอบความสามารถในการไหลแผ่โดยใช้กรวยตัดขนาดตามมาตรฐาน วางแผ่นทดสอบผิวเรียบ ทำการบรรจุมอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จใหม่ๆ ลงในกรวยจนเต็ม จากนั้นทำการยกกรวยตัดขึ้นโดยปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลอย่างอิสระ ดังรูปที่ 2 ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่แผ่ออกตามมาตรฐาน ASTM C1437-07 [12]



รูปที่ 2 การไหลแผ่ (Mortar Flow)

3.3.5 การทดสอบการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี (V-funnel test)

การประเมินค่าความหนืดของมอร์ตาร์จากการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวีตามมาตรฐาน EFNARC [13] โดยทำการเติมมอร์ตาร์ลงในกล่องแบนรูปทรงวีจนเต็มจากนั้นมอร์ตาร์จึงถูกปล่อยผ่านจุดปล่อยด้านล่าง ทำการจับเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มปล่อยมอร์ตาร์จนกระทั่งไหลออกจนหมด ระยะเวลาที่ได้จากการทดสอบมีนัยยะว่าหากใช้เวลาที่ใช้ในการไหลน้อยแสดงว่ามอร์ตาร์มีลักษณะคอนข้างเหลว ในทางกลับกันหากใช้เวลาในการไหลมากแสดงว่ามอร์ตาร์มีความหนืด

3.3.6 การทดสอบการก่อตัว (Test of Setting time)

ทดสอบหาระยะเวลาของการก่อตัวของมอร์ตาร์โดยใช้เข็มไวแคตขนาด 1±0.05 มม. ทำการวัดระยะจมทุกช่วงเวลา โดยระยะก่อตัวขั้นต้น (Initial setting time) หมายถึงระยะจมของเข็มไวแคตมีค่าเท่ากับ 10 มม. ในขณะที่ระยะก่อตัวขั้นสุดท้าย (final setting time) หมายถึงไม่มีระยะการจมของเข็มไวแคต เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C807-21 [14]

3.3.7 การทดสอบการดูดกลืนน้ำ (Water Absorption test)

การทดสอบปริมาณร้อยละการดูดกลืนน้ำของมอร์ตาร์ที่มีอายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน มอก.243-2520 [15] โดยการนำมอร์ตาร์ไปอบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียสเพื่อให้น้ำหนักคงที่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นให้ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บันทึกค่าน้ำหนักแห้งของมอร์ตาร์ แล้วนำไปแช่น้ำอีก 24 ชั่วโมง นำขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้ง นำไปชั่งน้ำหนักเพื่อจดบันทึกค่าน้ำหนักเปียกของมอร์ตาร์ ร้อยละการดูดกลืนน้ำคำนวณจากสมการที่ (1)

$$Absorption\ (\%) = (W_{sat} - W_{dry})*100/W_{sat} \quad (1)$$

เมื่อ W_{sat} คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังการแช่ในน้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (กรัม)
W_{dry} คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบที่อุณหภูมิ100±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (กรัม)

3.3.8 การทดสอบกำลังอัด (Test of compressive strength)

ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์จากตัวอย่างขนาด 5x5x5 เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อนจากเพื่อหาค่าเฉลี่ยกำลังอัด ตามอายุการทดสอบที่กำหนด ได้แก่ 7, 28 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-20 [16] ดังรูปที่ 3



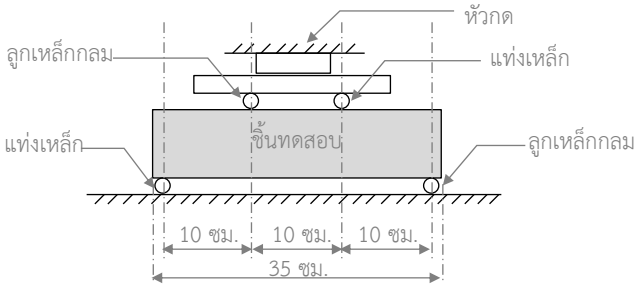
รูปที่ 3 การทดสอบกำลังอัด (Test of compressive strength)

3.3.9 การทดสอบกำลังดัด (Test of flexural strength)

ทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์จากตัวอย่างขนาด 10x10x35 เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อนจากเพื่อหาค่าเฉลี่ยกำลังดัด ตามอายุการทดสอบที่กำหนด ได้แก่ 7, 28 และ 90 วัน โดยวางตัวอย่างทดสอบลงบนฐานรองรับและตำแหน่งของหัวกดในรูปแบบแรงกดคานสองจุด (Third point loading) ดังรูปที่ 4 ตามมาตรฐาน ASTM C78-02 [17] ทำการคำนวณค่ากำลังดัดตามสมการที่ (2)

$$R = PL/bd^2 \quad (2)$$

เมื่อ R คือ กำลังดัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
P คือ แรงที่จุดวิบัติของคาน (กิโลกรัม)
L คือ ช่วงคาน (เซนติเมตร)
b คือ ความกว้างหน้าตัดบริเวณรอยแตก (เซนติเมตร)
d คือ ความลึกหน้าตัดบริเวณรอยแตก (เซนติเมตร)

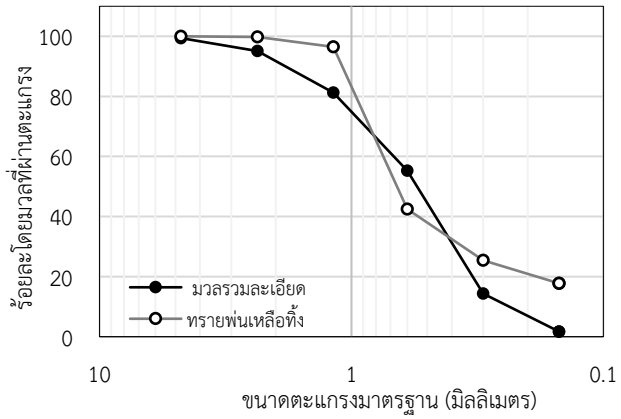


รูปที่ 4 ตำแหน่งเครื่องมือสำหรับทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดโดยวิธีใช้แรงกดคานสองจุด (Third point loading)

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดและทรายพ่นเหลือทิ้ง

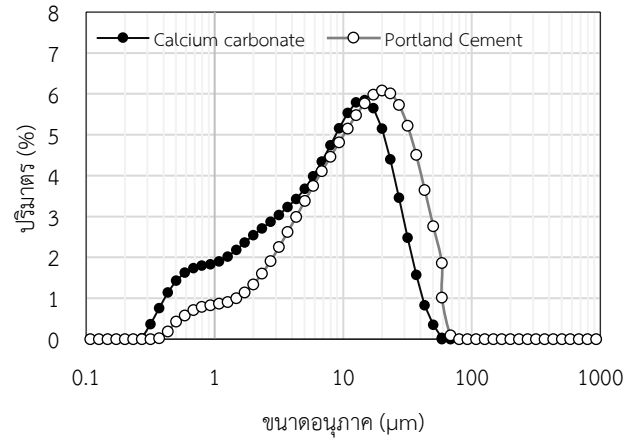
เมื่อนำมวลรวมละเอียดและทรายพ่นเหลือทิ้งมาทำการวิเคราะห์หาขนาดคละพบว่า โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดและทรายพ่นเหลือทิ้งมีค่า 2.53 และ 2.18 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าโมดูลัสความละเอียดยังอยู่ในช่วงระหว่าง 2.20 -3.20 ตามมาตรฐาน ASTM C33-18 [9] และขนาดคละของทรายพ่นเหลือทิ้งกับมวลรวมละเอียดมีขนาดคละใกล้เคียงกันดังแสดงในกราฟวิเคราะห์ขนาดคละ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 วิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมละเอียดและทรายพ่นเหลือทิ้ง

4.2 ขนาดคละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงแคลเซียมคาร์บอเนต

ผลการวิเคราะห์หาขนาดคละและการกระจายตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D[4,3]) เท่ากับ 16.12 ไมครอน ในขณะที่ผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D[4,3]) เท่ากับ 13.06 ไมครอน



รูปที่ 6 การกระจายขนาดอนุภาคของผงแคลเซียมคาร์บอเนต และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

4.3 ความถ่วงจำเพาะของทรายพ่นเหลือทิ้งจากกระบวนการพ่นทราย

จากการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C 128-15 [11] พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะในสภาวะอิ่มตัวและผิวแห้งของทรายพ่นเหลือทิ้งเท่ากับ 4.06 เมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33-18 [9] ที่มีค่าระหว่าง 2.40 - 2.90 แล้วน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้มวลรวมของทรายพ่นเหลือทิ้งมีค่ามากกว่าถึงร้อยละ 30-40

4.4 ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มและระยะการไหลแผ่

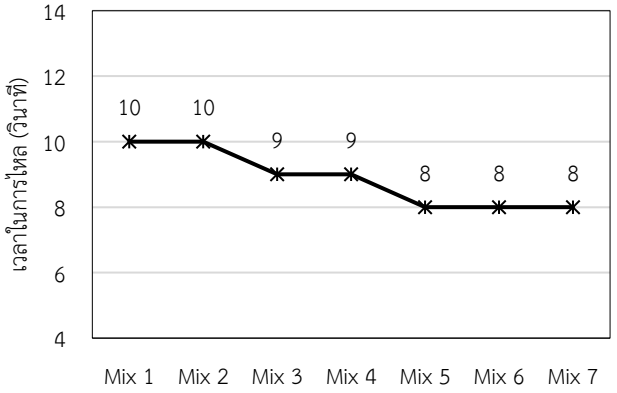
จากระยะการไหลแผ่ที่กำหนดสำหรับทุกส่วนผสมในช่วง 25±5 เซนติเมตร จากการปรับปริมาณสารเคมีผสมเพิ่ม พบว่า ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มอยู่ในช่วงร้อยละ 0.40-0.52 ทั้งนี้เมื่ออัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยทรายพ่นเหลือทิ้งในปริมาณที่สูงขึ้น ความต้องการปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มในส่วนผสมมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มต่อระยะไหลแผ่

Mix No.	ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์	ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียด	ร้อยละปริมาณสารเคมีผสมเพิ่ม	ระยะไหลแผ่ (ซม.)
Mix. 1	0	0	0.50	25
Mix. 2	10	0	0.52	24
Mix. 3	10	20	0.50	24
Mix. 4	10	40	0.48	25
Mix. 5	10	60	0.45	25
Mix. 6	10	80	0.42	26
Mix. 7	10	100	0.40	26

4.5 การไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี (V-funnel)

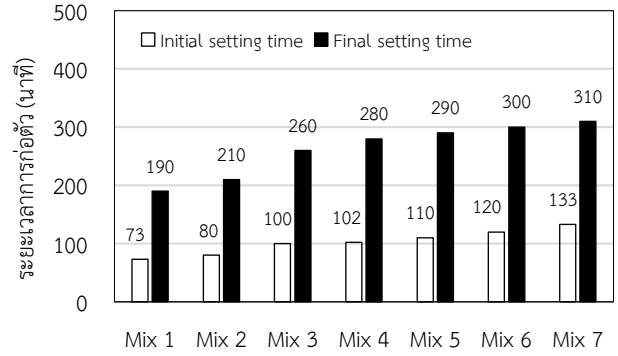
จากผลการทดสอบการไหลของมอร์ตาร์ผ่านกล่องแบนรูปทรงวีตามมาตรฐาน EFNARC [13] พบว่ามอร์ตาร์มีระยะเวลาในการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวีอยู่ในช่วง 8-10 วินาที ทั้งนี้เมื่ออัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยทรายพ่นเหลือทิ้งในปริมาณที่สูงขึ้น ระยะเวลาในการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวีมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 7 นั่นหมายถึงมอร์ต้าร์มีแนวโน้มเหลวเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าการดูดซึมน้ำของทรายพ่นทิ้งน้อยกว่าของทรายแม่น้ำ



รูปที่ 7 เวลาในการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี

4.6 ระยะการก่อตัว

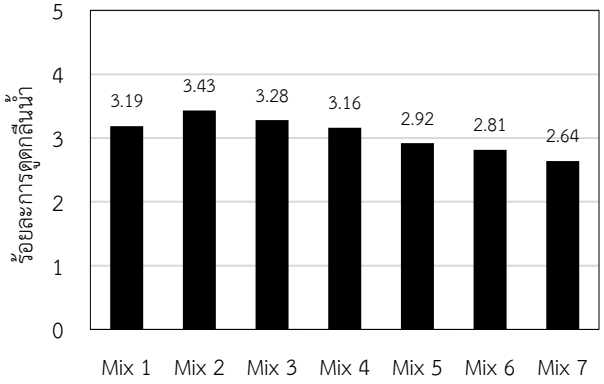
ผลการทดสอบระยะการก่อตัวตามมาตรฐาน ASTM C807-21 [14] ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าการก่อตัวระยะต้นอยู่ในช่วง 70-133 นาที และการก่อตัวระยะสุดท้ายอยู่ในช่วง 190-310 นาที ทั้งนี้เมื่ออัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยทรายพ่นเหลือทิ้งในปริมาณที่สูงขึ้น ระยะการก่อตัวของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

4.7 การดูดกลืนน้ำ

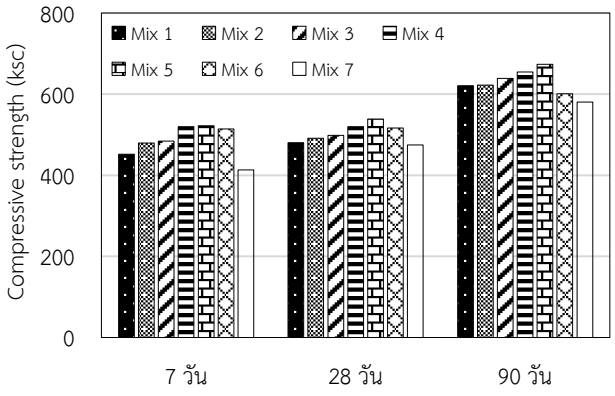
ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน มอก.243-2520 [15] ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าการผสมร่วมผงแคลเซียมคาร์บอเนตส่งให้อัตราการดูดกลืนน้ำของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่ออัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยทรายพ่นเหลือทิ้งในปริมาณที่สูงขึ้น ร้อยละการดูดกลืนน้ำของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง และทุกส่วนผสมมีร้อยละการดูดกลืนน้ำของมอร์ตาร์ต่ำกว่ามอร์ต้ารควบคุม (Mix 1) ยกเว้นส่วนผสมอัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 20 (Mix 3)



รูปที่ 9 ร้อยละการดูดกลืนน้ำของมอร์ต้าร์

4.8 กำลังอัด

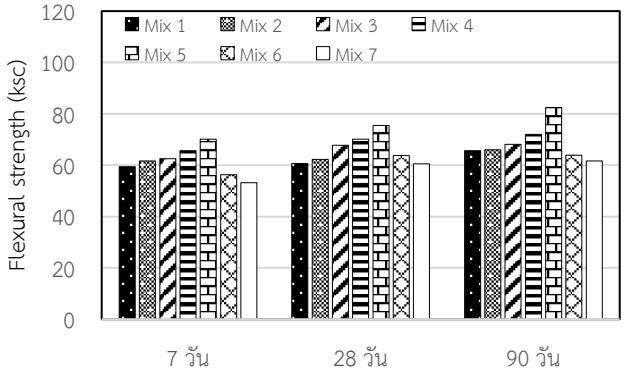
ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-20 [16] ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยทรายพ่นเหลือทิ้งในปริมาณที่สูงขึ้นไม่เกินร้อยละ 60 โดยที่อายุ 7 วันมอร์ตาร์มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 414-522 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วันมอร์ตาร์มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 475-538 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อายุ 90 วันมอร์ตาร์มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 580-674 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมอร์ตาร์ผสมร่วมทรายพ่นเหลือทิ้งร้อยละ 60 และผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 522, 538 และ 674 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในช่วงร้อยละ 7-12 และมีกำลังอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณทรายพ่นเหลือทิ้งมากกว่าร้อยละ 60



รูปที่ 10 กำลังอัดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

4.9 กำลังดัด

ผลทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองตามมาตรฐาน ASTM C78-02 [17] ดังแสดงในรูปที่ 11 ผลการทดสอบกำลังดัดมีแนวโน้มเป็นไปในแนวทางเดียวกับผลการทดสอบกำลังอัด และพบว่ากำลังดัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยทรายพ่นเหลือทิ้งในปริมาณที่สูงขึ้นไม่เกินร้อยละ 60 โดยที่อายุ 7 วันมอร์ตาร์มีกำลังดัดอยู่ในช่วง 53-71 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วันมอร์ตาร์มีกำลังดัดอยู่ในช่วง 60-76 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อายุ 90 วันมอร์ตาร์มีกำลังดัดอยู่ในช่วง 61-83 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมอร์ตาร์ผสมร่วมทรายพ่นเหลือทิ้งร้อยละ 60 และผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10 เป็นสัดส่วนคละที่ให้ค่ากำลังดัดสูงสุด เท่ากับ 70, 75 และ 82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในช่วงร้อยละ 18-25 และมีกำลังดัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณทรายพ่นเหลือทิ้งมากกว่าร้อยละ 60



รูปที่ 11 กำลังดัดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

5. บทสรุป

ผลการศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองผสมร่วมทรายพ่นเหลือทิ้งที่นำมาทำการแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ผสมร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนตนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทุกส่วนผสมกำหนดค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 25±5 เซนติเมตร มีดังนี้

5.1 สมบัติของมอร์ตาร์สด

เพื่อให้เป็นไปตามการกำหนดค่าการไหลแผ่ทุกอัตราส่วนผสมให้อยู่ในช่วง 25±5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C1437-07 [12] อัตราส่วน

การแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อผงแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ให้ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วย แม้ว่าอนุภาคของผงแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ถึงร้อยละ 19 แต่ไม่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความเป็นเหลี่ยมมากกว่าปูนซีเมนต์ได้ แต่ในทางตรงกันข้ามอัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยทรายพ่นทิ้งเพิ่มสูงขึ้นกลับส่งผลให้ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากพื้นผิวของทรายพ่นเหลือทิ้งมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ผิวเรียบ ซึ่งต่างจากมวลรวมละเอียดที่มีลักษณะผิวขรุขระเล็กน้อย รวมถึงค่าการดูดซึมน้ำของทรายพ่นทิ้งน้อยกว่าของทรายแม่น้ำ โดยสอดคล้องกับระยะเวลาในการการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี (V-funnel) ที่ลดลง ด้านระยะการก่อตัว (Setting time) ผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีส่วนช่วยเร่งการก่อตัวได้เป็นอย่างดี แต่การเพิ่มปริมาณการแทนที่ทรายพ่นเหลือทิ้ง ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุกอัตราส่วน แต่ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C807-21 [14]

5.2 สมบัติของมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว

อิทธิพลของการผสมร่วมผงแคลเซียมคาร์บอเนต ทรายพ่นเหลือทิ้ง และอายุในการบ่มส่งผลต่อคุณสมบัติทางด้านกำลังของมอร์ต้าร์ ทั้งในส่วนของกำลังอัดและกำลังดัดอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10 ช่วยพัฒนากำลังอัดและกำลังดัดเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการแทนที่ทรายด้วยทรายพ่นเหลือทิ้งจะมีส่วนช่วยพัฒนากำลังอัดและกำลังดัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการไม่เกินร้อยละ 60 โดยส่วนผสมที่มีกำลังอัดและกำลังดัดสูงสุด ได้แก่มอร์ตาร์ผสมร่วมผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10 และทรายพ่นเหลือทิ้งร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 522, 538 และ 674 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน และมีแนวโน้มกำลังอัดและกำลังดัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณทรายพ่นเหลือทิ้งมากกว่าร้อยละ 60

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท เทสโก เอ็นจิเนีย จำกัด สาขาลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร ที่ได้ให้การสนับสนุนอนุเคราะห์ทรายพ่นเหลือทิ้งจากกระบวนการพ่นทราย และบริษัท สุรินทร์ ออมย่า เคมิคอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนอนุเคราะห์ผงแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่เอื้ออำนวยอุปกรณ์และสถานที่ตลอดระยะเวลาในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง การกำหนดชนิดและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วและวิธีการกำจัด สำหรับการขออนุญาตและการอนุญาตให้นำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงาน แบบอัตโนมัติผ่านระบบอิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ. 2561. (2561, 23 เมษายน). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 135 ตอนพิเศษ 95 ง. หน้า 8-48.

[2] ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตรายจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555). ปริมาณของเสียอุตสาหกรรม จำนวน 100 ชนิด. โครงการจัดทำบัญชีของเสียที่เป็นแหล่งทรัพยากรทดแทนกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, หน้า 14-19.

[3] Nor Hasanah Abdul Shukor Lim, Noor Fazura Najihah Alladin, Hossein Mohammadhosseini, Nur Farhayu Ariffin and Ain Naadia Mazlan. (2020) . Properties of Mortar Incorporating Spent Garnet as Fine Aggregates Replacement. International Journal of Integrated Engineering, 12-9, pp. 96-102.

[4] Qomariah, Q. Sugiharti, S. and Riyanto, S. (2020). The utilization of sandblasting sand waste for mortar and normal concrete. *The 1st Annual Technology, Applied Science and Engineering*, Indonesia, 29-30 August 2019.

[5] บุรฉัตร ฉัตรวีระและ ณัฏฐ์ มากุล (2555). ผลกระทบของขนาดผงหินปูนต่อสมบัติของมอร์ต้าร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมและเถ้าแกลบ. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 23, ฉบับที่ 1, หน้า 10-17.

[6] ธีรภพ ศรีบุญเรือง, *ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าแกลบ*. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2558), หน้า 45-80

[7] กฤติยา แก้วมณี, สมนึก ตั้งเติมสิริกุล และ คมสันต์ มีธนาถาวร (2558). คุณสมบัติพื้นฐานและความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ปีที่ 3, ฉบับที่ 2, หน้า 8-16.

[8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2548). ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ มอก.15 เล่ม 1-2555.

[9] American Society for Testing and Materials. ASTM C33/C33M, 2018, *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Annual Book of ASTM Standard.

[10] American Society for Testing and Materials. ASTM C494/C494M, 2005 *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. Annual Book of ASTM Standard.

[11] American Society for Testing and Materials. ASTM C128, 2015, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. Annual Book of ASTM Standard.

[12] American Society for Testing and Materials. ASTM C1437, 2007, *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. Annual Book of ASTM Standard.

[13] EFNARC. Specification and guidelines for self-compacting concrete, Surrey, UK., February, 2002

[14] American Society for Testing and Materials. ASTM C807, 2021, *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle*. Annual Book of ASTM Standard.

[15] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2520). วิธีชักตัวอย่างและทดสอบอิฐและอิฐกลวง มอก.243 -2520.

[16] American Society for Testing and Materials. ASTM C109/C109M, 2020, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. Annual Book of ASTM Standard.

[17] American Society for Testing and Materials. ASTM C78, 2002, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). Annual Book of ASTM Standard.