การพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสำหรับโครงสร้างแข็งเกร็งพิเศษ

Development of high modulus concrete for special rigid structures

ณรงค์ชัย ปักษา[1,*] ทศพล ปิ่นแก้ว[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

**Corresponding author; E-mail address: pohnnarongchai@gmail.com[1] , tospol.p@chula.ac.th[2]*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคุณสมบัติโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ของคอนกรีตให้มีค่ามากกว่าคอนกรีตกำลังสูงทั่วไป เพื่อประยุกต์ใช้ในส่วนโครงสร้างที่ต้องการความแข็งเกร็ง (Rigidity) เป็นพิเศษ เช่น เสาตอม่อโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูง หรือผนังรับแรงเฉือนในอาคารสูงชะลูด เพื่อลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ แม้การใช้คอนกรีตกำลังสูงจะสามารถให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มากขึ้น แต่เนื่องจากมีราคาแพงจึงไม่มีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้จะอาศัยการปรับเปลี่ยนวัสดุมวลรวมหยาบเป็นหินบะซอลต์ขนาดระหว่าง 9.5-25 มม. และตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF slag) ขนาดระหว่าง 9.5-19 มม. ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลดีกว่าหินปูน การศึกษาพิจารณาแหล่งหินบะซอลต์จากโรงโม่หินในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 2 แหล่ง และแหล่งตะกรันจากโรงหลอมเหล็กในเขตภาคตะวันออกอีก 1 แหล่ง โดยทำการออกแบบส่วนผสมที่เหมาะสม แล้วหล่อตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 14 และ 28 วัน จากนั้นจึงเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้วัสดุมวลรวมเป็นหินปูน จากผลการทดสอบพบว่าการใช้ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าสามารถเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้มาก ทั้งประหยัดกว่าการใช้คอนกรีตกำลังสูงอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง, โครงสร้างแข็งเกร็ง, หินบะซอลต์, ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า

Abstract

This research objective is to develop high elastic modulus concrete over existing high strength concrete in order to apply to the structures those required special high rigidity or stiffness such as pier columns of high-speed rail projects and slender tall buildings to reduce the displacements under loadings. To increase the elastic modulus, high strength concrete can be adopted, however it is found to be ineffectiveness due to its high cost. In this research, the coarse aggregates using basalt rocks having size between 9.5 - 25 mm and EAF slag having size between 9.5 - 19 mm are used instead of conventional limestone aggregates. Both basalt aggregate and EAF slag exhibit better mechanical properties than limestone aggregate. The study considers two sources of basalt rock produced from different crushing plant in Northeastern of Thailand and EAF slag produced from steel manufactures in Eastern of Thailand. Based on appropriate mix design, the compressive strength as well as elastic modulus of the developed concrete specimen are tested at 14 and 28 days. The obtained results are compared with normal concrete specimen using limestone as coarse aggregate. It is found that the proposed concrete using EAF slag can significantly enhanced the elastic modulus with more cost effective than conventional high strength concrete.

Keywords: High Elastic Modulus Concrete, Rigid Structure, Basalt Aggregate, EAF slag

1. บทนำ

คอนกรีตเทคโนโลยีมีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาอย่างรวดเร็ว นับตั้งแต่การค้นพบและเป็นวัสดุที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างกว้างขวาง เนื่องจากคอนกรีตมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น ความสามารถในการหล่อ ความประหยัด ความทนทาน และความสามารถต้านการเคลื่อนตัวของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ ซึ่งมีความเหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโครงสร้างแข็งเกร็งพิเศษ เช่น เสาตอม่อของโครงการรถไฟความเร็วสูงที่ต้องออกแบบให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ต่ำมากภายใต้แรงเบรคและเร่งเครื่องของขบวนรถ หรือผนังรับแรงเฉือนในอาคารสูงชะลูดที่ต้องออกแบบให้มีการเคลื่อนตัวภายใต้แรงลมที่ต่ำกว่าเกณฑ์การใช้งานตามมาตรฐาน เป็นต้น ซึ่งในกรณีดังกล่าวค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) มีความสำคัญมากกว่ากำลังของคอนกรีต การพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง จึงจำเป็นเมื่อต้องออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่การเคลื่อนตัวเป็นข้อจำกัดหลักในการออกแบบ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา การพัฒนาด้านเทคโนโลยีคอนกรีต มีมาอย่างต่อเนื่องและกว้างขวาง แต่มีแค่ส่วนน้อยที่จะสนใจเรื่องการพัฒนาโมดูลัสยืดหยุ่น แต่ในทางกลับกัน โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากในโครงสร้างคอนกรีต โดยเฉพาะโครงสร้างแข็งเกร็งพิเศษ จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง

คอนกรีตเป็นวัสดุผสมประกอบด้วย มวลรวมซึ่งจะถูกเติมด้วย ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ในช่องว่างระหว่างมวลรวมเพื่อยึดติดมวลรวมเข้าด้วยกัน มีเนื้อไม่สม่ำเสมอ เปราะ และพฤติกรรมจะแปรผันตามแรงที่มากระทำ ตัวแปรที่ส่งผลสำคัญต่อโมดูลัสยืดหยุ่นคือ เนื้อซีเมนต์ รอยต่อระหว่างซีเมนต์กับมวลรวม และมวลรวม โดยประมาณ 75% ของปริมาตรคอนกรีตเป็นปริมาตรของมวลรวม คุณสมบัติของมวลรวมจึงมีผลกระทบอย่างมากต่อสมรรถนะของคอนกรีต ดังนั้นการพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจึงมักมุ่งเน้นการปรับปรุงสัดส่วนผสม ขนาดและคุณสมบัติของมวลรวมในคอนกรีต

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 มวลรวมและขนาดคละ

โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุที่ทำมาจากซีเมนต์นั้นมีความซับซ้อนเนื่องจากโครงสร้างในวัสดุไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อที่จะคาดการณ์พฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำนั้น จะต้องใช้ความเข้าใจผลกระทบจากประเภทมวลรวม ขนาดของมวลรวม และ ปริมาตรของมวลรวม [1] ซึ่งโมดูลัสยืดหยุ่นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงของความแข็งเกร็งของแต่ละองค์ประกอบในคอนกรีตและรอยต่อ [2] จากการศึกษา [3] ได้พบว่าคุณสมบัติของหินนั้นจะขึ้นอยู่กับแหล่งหิน แม้กำลังของหินอาจไม่สามารถคาดการณ์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้หินนั้นเป็นมวลรวมหยาบได้ แต่คุณสมบัติของหินก็มีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้ และ [4-5] พบว่าประเภทของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดส่งผลอย่างมากต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อเทียบกับกำลังของคอนกรีตซึ่งเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ถึงแม้จะใช้มวลรวมหยาบที่มีกำลังสูงแต่การวิบัติจะเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ตาร์ (Mortar) และมวลรวมที่มีความพรุนมากจะส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลง [6] การศึกษาของ [7] พบว่าการเพิ่มยึดเกาะของมวลรวมในเนื้อซีเมนต์และการลดการแตกร้าวที่รอยต่อทำได้โดยการลดอัตราน้ำต่อซีเมนต์ ทั้งยังลดความพรุนของที่รอยต่ออีกด้วย อิทธิพลของความแข็งของมวลรวมจะพัฒนาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัดในคอนกรีตอายุไม่เกิน 14 วันเท่านั้น [8]

ส่วนใหญ่โมดูลัสยืดหยุ่นแบบสถิต (Static elasticity modulus) จากการกดอัดตามแนวแกนปกติ จะกดถึงที่ระดับความเค้นประมาณ 40-50% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่านั้น ซึ่งเป็นระดับที่ความเค้นที่ยังไม่เกิดรอยร้าวขนาดเล็กที่รอยต่อระหว่างเนื้อซีเมนต์และมวลรวม [9] จากการวิจัยของ [10] พบว่าวิธีการอัดแน่นเพื่อพัฒนาสัดส่วนของส่วนผสม เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพอย่างมากในการลดปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม การผลิตซีเมนต์นั้นส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งการปรับปรุงการอัดแน่นของมวลรวมจะสามารถลดปริมาณซีเมนต์และช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอีกด้วย โดยช่วยพัฒนากำลังจากการปรับปรุงกระบวนการไฮเดรชั่น (Hydration process) ในคอนกรีต [11] และกำลังของคอนกรีตได้รับอิทธิพลเป็นอย่างมากจากการกระจายขนาดของมวลรวม ซึ่งปัจจัยสำคัญของการอัดแน่นมวลรวมนั้นคือการให้มวลรวมขนาดเล็กเติมเต็มในช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมขนาดใหญ่ โดยการใช้ขนาดคละและสัดส่วนที่เหมาะสม [12]

2.2 หินบะซอลต์

หินบะซอลต์เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของลาวา (Lava) พบได้ในหลายประเทศทั่วโลก ส่วนใหญ่มีสีดำ ถูกนำมาใช้เป็นมวลรวมในการผลิตคอนกรีต เนื่องจากหินบะซอลต์นั้นมีเนื้อแน่น ทนทานและการดูดซึมน้ำน้อยกว่าหินปูน การใช้หินบะซอลต์ยังช่วยลดความพรุนและการนำความร้อนของคอนกรีตได้ ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัดและค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture) เพิ่มขึ้นเมื่อใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมแทนหินปูน ดังนั้นการใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมแทนหินปูนสามารถเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตได้ [1] เนื่องจากหินบะซอลต์ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้ โดยคอนกรีตยังคงมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ [13] และ [14] ได้ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมในโครงสร้างเสาคอนกรีต พบว่ากำลังรับแรงอัดของเสาเพิ่มมากขึ้นและการโก่งของเสาลดลงตามสัดส่วนของหินบะซอลต์ที่ใช้แทนหินปูน

2.3 ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า

การใช้วัสดุรีไซเคิลในอุตสาหกรรมการก่อสร้างถือว่าเป็นทางเลือกใหม่และเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการลดปัญหาการกำจัดขยะซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [15] งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้มวลรวมรีไซเคิลจากอุตสาหกรรมโลหะในการผลิตคอนกรีต [16] ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า คือผลพลอยได้จากการผลิตเหล็กมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 1 ปัจจุบันมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากตามการพัฒนาเศรษฐกิจ โดยปกติผู้ผลิตเหล็กต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด ดังนั้นหากสามารถนำตะกรันเหล็กซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ มาพัฒนาใช้เป็นวัสดุมวลรวมในการผลิตคอนกรีตได้ก็จะเป็นประโยชน์อย่างมาก [17]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า [17]

Principal constituents (% by weight)		Element traces (mg/kg)	
CaO	25 - 30	As	< 15
CaO_{free}	0 - 4	Cd	< 30
SiO_2	8 - 18	Cr_{total}	5000 - 20000
Al_2O_3	3 - 10	Cu	< 300
MgO	2 - 9	Hg	< 0.5
Fe_{total}	20 - 30	Ni	< 70
Mn_{total}	2 - 8	Pb	< 90
CaO/SiO_2	1.7 - 4.0	Zn	< 900

ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีคุณสมบัติทางกายภาพ แร่และทางเคมีที่ดี เหมาะสำหรับใช้ในงานวิศวกรรมโยธา คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กจะมีน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากมีความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะที่มากและมีความพรุนน้อย เนื่องจากตะกรันเหล็กมีคุณสมบัติทางกลที่ดี ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นมวลรวมหยาบจึงสามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้ [18] และเมื่อทดสอบที่สภาวะเปียกสลับแห้งพบว่า กำลังลดลงมากกว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนเพียงเล็กน้อย แต่อนุภาคเหล็กที่สึกกร่อนของตะกรันเหล็กจะเคลื่อนย้ายมาอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างคอนกรีต ทำให้มีจุดคราบหลายจุด ซึ่งไม่เหมาะกับโครงสร้างที่ต้องการความสวยงามโดยจะขึ้นอยู่กับความแปรปรวนของความชื้น และจากการประเมินเสถียรภาพภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปิดโล่งพบว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเกิดการขยายตัวมากกว่าคอนกรีตทั่วไปเพียงเล็กน้อย จากการทดสอบความทนทานต่ออุณหภูมิสูงต่ำสลับกันพบว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กได้ผลเหมือนกับคอนกรีตทั่วไปและไม่มีสัญญาณการเกิดรอยแตกร้าว [19] และสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำภายใต้แรงดันได้ดีมากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ [20] การศึกษาของ [21] ได้ประเมินการกัดกร่อนของเหล็กเส้นเมื่อฝังอยู่ในคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้าและให้อยู่ในสิ่งแวดล้อมใกล้ทะเลเป็นเวลา 1 ปี พบว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีพฤติกรรมเหมือนกับคอนกรีตที่ใช้หินปูน และมีค่าการบดแตก (Aggregate crushing value) ที่ต่ำ [22] แต่ [23] พบว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กจะหดตัวมากกว่าคอนกรีตทั่วไป

การขยายตัวของตะกรันเหล็กนั้นขัดขวางการใช้ตะกรันเหล็กในงานวิศวกรรมโยธา อีกทั้งลดคุณภาพของตะกรัน มีหลายปัจจัยที่ทำให้เกิดอนุภาคอิสระของปูนขาวและแมกนีเซียมโดยเฉพาะกระบวนการการผลิตเหล็กและการเย็นตัวของตะกรันที่อุณหภูมิในเตาหลอม อนุภาคแคลเซียมอิสระและแมกนีเซียมออกไซด์จะส่งผลสำคัญกับความชื้นและการขยายตัวของตะกรันเมื่อได้สัมผัสกับน้ำ แคลเซียมออกไซด์จะขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่แมกนีเซียมออกไซด์จะต้องมีความชื้นที่ยาวนานมากขึ้นจึงจะเกิดการขยายตัวที่กว้างขึ้นและใช้เวลานาน ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาคทั้งสองซึ่งทำให้ประสิทธิภาพและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นวัสดุมวลรวมนั้นลดลง ดังนั้นการดูแลอย่างเช่นการควบคุมสภาพแวดล้อมและฉีดน้ำอย่างน้อย 3 เดือน จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของปริมาตรและจำกัดการขยายตัวของตะกรันได้ โดยทั่วไปหลังจากการ ปรับสภาพนั้นพบว่าอนุภาคปูนขาวอิสระลดลงจนเหลือสัดส่วนน้อยมาก ทำให้สามารถใช้ตะกรันเหล็กได้อย่างปลอดภัยในการผลิตคอนกรีต การทดสอบแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ในตะกรันเหล็ก ไม่ได้จำกัดความสามารถด้านความทนทานของคอนกรีตเนื่องจากมีเสถียรภาพในโครงผลึก คอนกรีตตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าจึงสามารถใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างปลอดภัย [24-25]

3. วัสดุและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสัดส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย

การวิจัยจะศึกษาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จากการใช้หินบะซอลต์ และตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า เป็นวัสดุมวลรวมหยาบเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้หินปูน ตารางที่ 2 แสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบที่จะใช้ในการทดสอบ ทั้งคุณลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ จะเห็นว่าหินปูนและหินบะซอลต์มีค่าความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน โดยหินบะซอลต์จะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย แตกต่างจากตะกรันเหล็กที่มีค่าสูงกว่ามาก เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็ก รูปที่ 1 แสดงวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการวิจัย ตะกรันเหล็กมีรูปทรงอนุภาคไม่คงที่และผิวค่อนข้างขรุขระแตกต่างจากหินบะซอลต์และหินปูนที่ส่วนใหญ่รูปทรงมีเหลี่ยมมุมและผิวเรียบ ค่าการดูดซึมน้ำของตะกรันเหล็กมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งส่งผลดีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยในการศึกษาครั้งนี้พบว่าหินบะซอลต์มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมวลรวมหยาบ

Physical properties	EAF Slag	Basalt YL	Basalt SR	Limestone	River sand
Size (mm)	9.5 - 19	9.5 - 25	9.5 - 25	6.3 - 19	< 4.75
Specific gravity	3.43	2.78	2.62	2.7	2.51
Density (kg/m^3)	2101.18	1657.26	1625.49	1621	1664
Water Absorption (%)	0.39	1.33	1.58	0.6	0.72
Shape	Irregular	Angular	Angular	Angular	Roundish

รูปที่ 1 วัสดุมวลรวมที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมหยาบแต่ละประเภท โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.34 และ 0.38 เพื่อเปรียบเทียบกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อปรับเปลี่ยน

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีต

Composition	Limestone concretes (LS)	Basalt concretes-YL (BS1)	Basalt concretes-SR (BS2)	EAF concrete (EAF)
Water (L)	181.6	202.9	181.6	181.6
Cement (kg)	534	534	534	534
River sand (kg)	528	538.1	538.1	504.8
Limestone (kg)	1197.5	-	-	-
Basalt YL (kg)	-	1224.3	-	-
Basalt SR (kg)	-	-	1224.3	-
EAF slag (kg)	-	-	-	1552.2
Superplasticizer (%)	0.5	0.5	0.5	0.5
w/c	0.34	0.38	0.34	0.34
Slump (cm)	4.5	16	3.5	6

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.38 จะมี 1 ส่วนผสม และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.34 จะมี 3 ส่วนผสม ซึ่งจะใช้หินบะซอลต์จากโรงโม่หินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 2 แหล่ง ขนาดอนุภาคระหว่าง 9.5 - 25 มม. และใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าซึ่งได้จากโรงหลอมเหล็กจากภาคตะวันออก ขนาดอนุภาคระหว่าง 9.5 - 19 มม. เป็นวัสดุมวลรวมหยาบหลักเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้หินปูน ซึ่งมีขนาดอนุภาคระหว่าง 6.3 - 19 มม. ซึ่งเป็นวัสดุมวลรวมหยาบที่ใช้อยู่ในงานก่อสร้างทั่วไป ส่วนมวลรวมละเอียดจะใช้เป็นทรายแม่น้ำ โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเติมสารลดน้ำพิเศษจากโพลีคาร์บอกซิเลท (Polycarboxylate) ปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ เพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต ทั้ง 4 ส่วนผสมจะถูกผสมตามมาตรฐาน ASTM C192 และก่อนจะทำการผสม มวลรวมทั้งหมดจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตสดจะถูกทดสอบหาค่าการยุบตัวตามมาตรฐาน ASTM C143 ก่อนจะนำไปเข้าแบบหล่อ หลังจากนั้น 24 ชม. ตัวอย่างจะถูกถอดแบบและนำไปบ่ม ที่ห้องบ่มซึ่งควบคุมระดับความชื้นที่ 100% จนถึงเวลาที่จะทำการทดสอบ

3.2 การทดสอบขนาดคละที่เหมาะสมของมวลรวมหยาบ

เนื่องจากมวลรวมที่ใช้มีขนาดคละที่ต่างกันดังในตารางที่ 2 การหาขนาดคละที่เหมาะสมนั้นจึงมีความจำเป็น โดยการลดช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบโดยการให้อนุภาคขนาดเล็กเติมในช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ เพื่อลดการใช้ซีเมนต์และปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งนำไปสู่การลดต้นทุนของการก่อสร้าง การทดลองจึงถูกออกแบบโดยการใช้ถังเหล็กขนาดความจุ 7 ลิตร นำมาใส่มวลรวมหยาบแล้วอัดแน่นโดยการกระทุ้งด้วยแท่งเหล็ก ก่อนจะนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อทดลองหาน้ำหนักมากที่สุดที่มวลรวมหยาบสามารถอัดเข้าไปได้ โดยจะทำการทดลองโดยใช้มวลรวมหยาบ 3 ขนาด คือ ขนาด 9.5 มม. 19 มม. และ 25 มม. โดยจะปรับเปลี่ยนปริมาตรของแต่ละขนาด คละกันโดยเพิ่มลดทีละ 20% ของปริมาตรมวลรวมหยาบ ซึ่งแบบทดลองการคละทั้งหมด 21 แบบ จะถูกทดลอง และแต่ละแบบจะทดลอง 3 ครั้ง

3.3 การทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

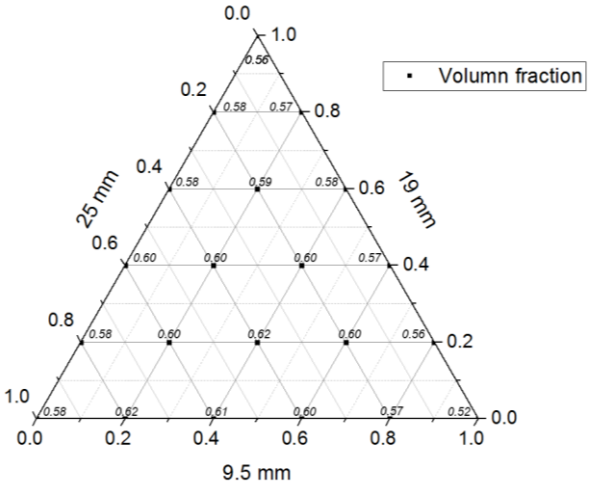
เพื่อที่จะประเมินกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. จะถูกหล่อโดยใช้ขนาดคละที่อัดแน่นที่สุดที่ได้จากการทดลอง โดยจะหล่อส่วนผสมละ 3 ตัวอย่าง กำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกจะหาตามมาตรฐาน ASTM C39 และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จะหาตามมาตรฐาน ASTM C469 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน

4. ผลการทดสอบ

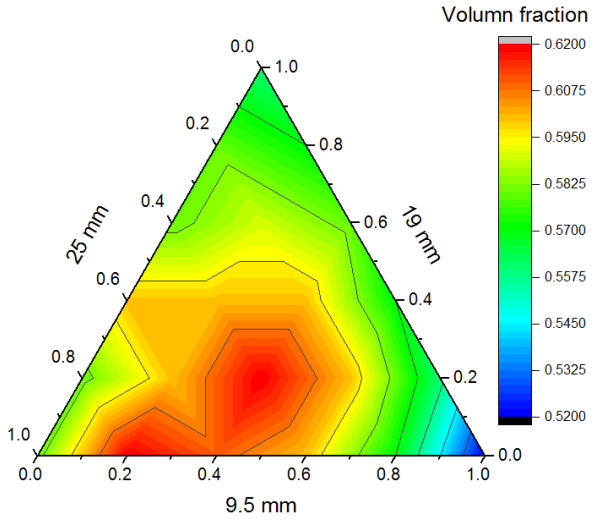
4.1 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ

จากการทดลองเพื่อหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุดของมวลรวมหยาบได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2 โดยแสดงเป็นสัดส่วนของมวลรวมหยาบต่อปริมาตรทั้งหมด จากการใช้มวลรวมหยาบขนาด 9.5 มม. 19 มม. และ 25 มม. และในรูปที่ 3 คือเส้นแสดงรูปร่างสัดส่วนของมวลรวมหยาบต่อปริมาตรทั้งหมด จะสังเกตเห็นได้ว่าปริมาตรมากที่สุดและน้อยที่สุดของมวลรวมหยาบที่อัดแน่นได้คือ 62% และ 52% ตามลำดับ และเห็นว่าการใช้ขนาดของมวลรวมหยาบเพียงขนาดเดียวไม่ว่าจะเป็นขนาดเล็กหรือใหญ่ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคขึ้นมากกว่าการคละขนาด เนื่องจากขาดอนุภาคที่เล็กกว่าไปเติมในช่องว่างระหว่างมวลรวม และผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการคละขนาดของมวลรวมหยาบมีอิทธิผลต่อการอัดแน่นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากรูปทรงของอนุภาคมีเหลี่ยมมุมซึ่งสามารถอัดแน่นได้ดีมากกว่าอนุภาคทรงกลมอยู่แล้ว การคละขนาดจึงเห็นผลต่างน้อย

กว่าการใช้อนุภาคทรงกลม และขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการวิจัยนั้น มีขนาดใกล้เคียงกันทำให้ไม่มีอนุภาคขนาดเล็กที่จะไปเติมในช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมขนาดใหญ่ได้ จากผลการทดลอง การวิจัยนี้จึงจะใช้หินบะซอลต์ขนาด 25 มม. สัดส่วน 60% ขนาด 19 มม. สัดส่วน 10% และขนาด 9.5 มม. สัดส่วน 30% ของปริมาตรมวลรวมหยาบทั้งหมด และใช้ตะกรันเหล็กขนาด 19 มม. สัดส่วน 60% และ 9.5 มม. สัดส่วน 40% ของปริมาตรมวลรวมหยาบทั้งหมด ซึ่งขนาดคละข้างต้นจะให้ค่าการอัดแน่นที่สุดจากการทดลอง

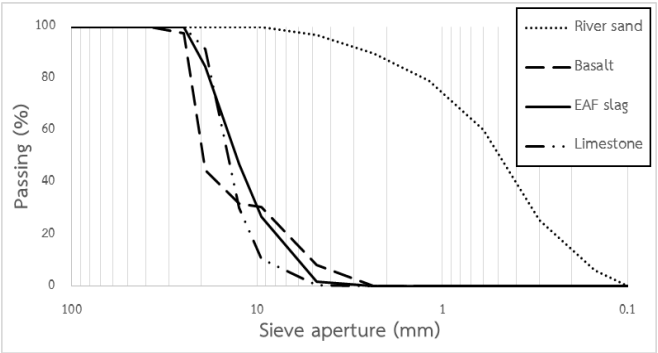


รูปที่ 2 กราฟขนาดคละของปริมาตรวัสดุมวลรวมหยาบ



รูปที่ 3 รูปร่างขนาดคละของปริมาตรวัสดุมวลรวมหยาบ

หลังจากนั้นจึงทำการตรวจสอบขนาดคละของมวลรวมที่ได้ตามมาตรฐาน ASTM C136 ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งขนาดคละของทั้งหินบะซอลต์และตะกรันเหล็กจะถูกปรับปรุงจากการทดลองอีกเล็กน้อย เพื่อลดปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการใช้ในส่วนผสมให้ดียิ่งขึ้น



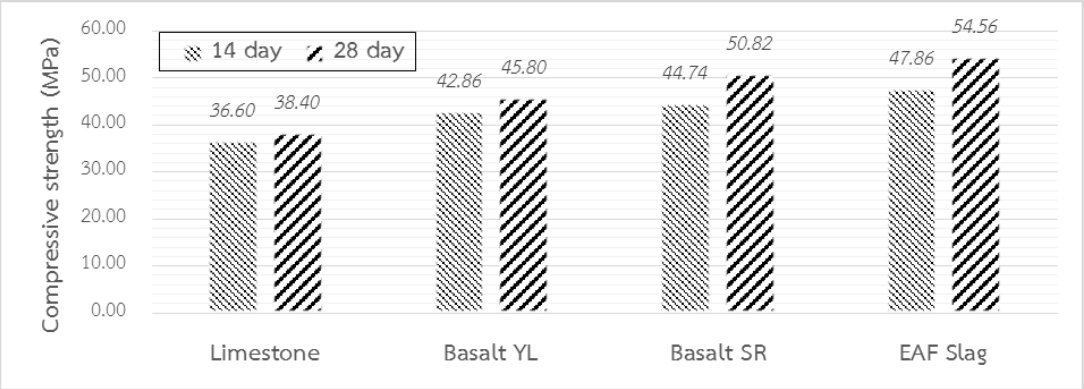
รูปที่ 4 ขนาดคละของมวลรวม

4.2 กำลังอัดของคอนกรีต

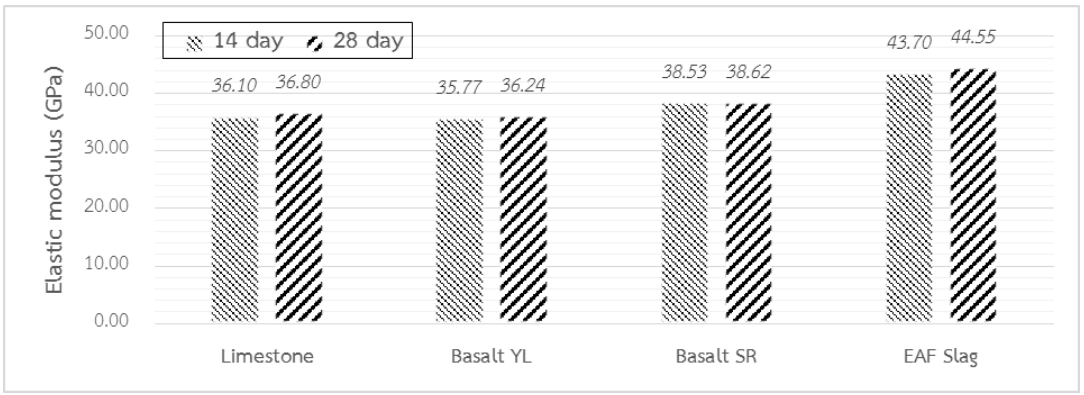
ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในการใช้มวลรวมหยาบแต่ละประเภทแสดงในรูปที่ 5 พบว่าประเภทของมวลรวมหยาบมีอิทธิผลต่อทั้งกำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 และ 28 วัน อย่างมีนัยสำคัญ จะสังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์และตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนอย่างเห็นได้ชัด โดยมีส่วนผสมของมอร์ตาร์เหมือนกัน เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของหินบะซอลต์และตะกรันเหล็กมีความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นที่ดีกว่าหินปูน โดยเฉพาะตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงถึง 3.43 และมีหน่วยน้ำหนักอัดแน่นถึง 2,101 kg/m^3 ซึ่งสูงกว่าวัสดุมวลรวมจากธรรมชาติอย่างชัดเจน จึงส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบมีค่ากำลังอัดสูงที่สุด ถึง 54.6 MPa ที่อายุคอนกรีต 28 วัน แต่จะส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กมีหน่วยน้ำหนักมากขึ้นเป็น 2,855 kg/m^3 รองลงมาคือหินบะซอลต์ซึ่งจะมีกำลังอัดสูงสุดประมาณ 50.8 MPa และน้อยที่สุดคือคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ ซึ่งได้กำลังอัดของคอนกรีตเพียง 38.4 MPa เท่านั้น

4.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตดังรูปที่ 6 บ่งชี้ว่าการเปลี่ยนประเภทของมวลรวมส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตด้วยเช่นกัน โดยค่าโมดูลัสจากคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบให้ค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบประเภทอื่น ซึ่งใช้ส่วนผสมของมอร์ตาร์เดียวกัน โดยมีค่าโมดูลัสสูงถึง 44.6 GPa และพบว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่น้อยที่สุดเท่ากับ 36.8 GPa เนื่องจากตะกรันเหล็กมีค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักที่สูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติมาก และผิวของตะกรันเหล็กมีความหยาบและขรุขระจึงช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะที่รอยต่อระหว่างมวลรวมหยาบและเนื้อซีเมนต์ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการเพิ่มโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์ พบว่ามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 38.6 GPa ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตจากหินปูนเพียงเล็กน้อย และยังพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 14 วันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในทุกประเภทของมวลรวม



รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมหยาบประเภท หินปูน หินบะซอลต์ และตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า ตามลำดับ



รูปที่ 6 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมหยาบประเภท หินปูน หินบะซอลต์ และตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า ตามลำดับ

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองบ่งชี้ว่าการคละขนาดของมวลรวมสามารถช่วยเพิ่มการอัดแน่นของมวลรวมได้ แต่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อขนาดของมวลรวมใกล้เคียงกัน และอิทธิพลของประเภทมวลรวมส่งผลทั้งกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ทั้งคอนกรีตอายุ 14 วัน และ 28 วัน โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุดถึง 54.6 MPa เนื่องจากมีหน่วยน้ำหนักและคุณสมบัติของมวลรวมที่ดีกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ส่วนคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นวัสดุมวลรวมหยาบให้กำลังคอนกรีตที่สูงรองลงมาประมาณ 50.8 MPa และคอนกรีตทั่วไปที่ใช้หินปูนมีกำลังที่น้อยที่สุดเพียง 38.40 MPa เท่านั้น คิดเป็นการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมชนิดหินปูนด้วยหินบะซอลต์และตะกรันเหล็กเท่ากับ 32.34% และ 42.1% ตามลำดับ ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงที่สุดถึง 44.6 GPa เนื่องจากผิวของตะกรันที่ขรุขระช่วยปรับปรุงกำลังระหว่างรอยต่อของมวลรวมและเนื้อซีเมนต์ให้ดีขึ้น ซึ่งมากกว่าคอนกรีตทั่วไปที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพียง 36.8 GPa ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นประมาณ 20% ส่วนคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นวัสดุมวลรวมหยาบมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 38.62 GPa ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปที่ใช้หินปูนเพียงเล็กน้อย และเมื่อนำผลกำลังของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ มาหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากสมการที่นำเสนอโดยมาตรฐานของ American Concrete Institute (ACI) และเปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบ จึงพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการทดสอบมากกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากสมการของ ACI ประมาณ 13.34% และ 10.17% ที่คอนกรีตอายุ 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

จากผลการศึกษาข้างต้น แสดงให้ว่ามีความเป็นไปได้อย่างยิ่งที่จะพัฒนาคอนกรีตให้มีคุณสมบัติโมดูลัสยืดหยุ่นที่ดีขึ้น โดยการเลือกใช้ประเภทของมวลรวมหยาบที่เหมาะสม และออกแบบให้มีขนาดคละที่เหลือช่องว่างน้อย คอนกรีตที่ได้อาจมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าปกติมากกว่าร้อยละ 20 โดยมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย (ประหยัดกว่าการใช้คอนกรีตที่กำลังสูงขึ้น) อันเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้กับงานโครงสร้างแข็งเกร็งพิเศษได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Al-Baijat, H. M. (2008). The use of basalt aggregates in concrete mixes in Jordan. *Jordan Journal of Civil Engineering*, *2*(1), 63-70.

[2] Alexander MG, Mindess S. (2005). Aggregates in concrete. Abingdon: Taylor & Frances, Oxon

[3] Piasta, W., Góra, J., & Budzyński, W. (2017). Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes. *Construction and Building Materials*, *153*, 728-739.

[4] Fan, T. (2017). *Development of high modulus concrete for tall buildings* (Doctoral dissertation).

[5] Beshr, H., Almusallam, A. A., & Maslehuddin, M. (2003). Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and* Building Materials, 17(2), 97-103.

[6] Zhou, F. P., Lydon, F. D., & Barr, B. I. G. (1995). Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement and concrete research*, *25*(1), 177-186.

[7] Fic, S., & Szelą g, M. (2015). Analysis of the development of cluster cracks caused by elevated temperatures in cement paste. *Construction and Building Materials*, *83*, 223-229.

[8] Beushausen, H., & Dittmer, T. (2015). The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, *74*, 132-139.

[9] ASTM, A. (2010). C469/C469M-10 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.

[10] de Grazia, M. T., Sanchez, L. F., Romano, R. C., & Pileggi, R. G. (2019). Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems. *Construction and Building Materials*, *195*, 524-536.

[11] Klein, N. S., Lenz, L. A., & Mazer, W. (2020). Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes. *Construction and Building Materials*, *242*, 118086.

[12] Haque, M. B., Tuhin, I. A., & MSS, F. (2012). Effect of aggregate size distribution on concrete compressive strength. *SUST journal of science and technology*, *19*(5), 35-39.

[13] Kishore, I. S., Mounika, L., Prasad, C. M., & Krishna, B. H. (2015). Experimental study on the use of basalt aggregate in concrete mixes. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, *2*(4), 37-40.

[14] Al-Baijat, H., & Benedetti, A. (2013). Comparison between Composite Column Using Limestone and Basalt Concrete.

[15] Oikonomou, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and concrete composites*, *27*(2), 315-318.

[16] Pellegrino, C., Cavagnis, P., Faleschini, F., & Brunelli, K. (2013). Properties of concretes with black/oxidizing electric arc furnace slag aggregate. *Cement and Concrete Composites*, *37*, 232-240.

[17] Hekal, E. E., Abo-El-Enein, S. A., El-Korashy, S. A., Megahed, G. M., & El-Sayed, T. M. (2013). Hydration characteristics of Portland cement–Electric arc furnace slag blends. *HBRC Journal*, *9*(2), 118-124.

[18] Faleschini, F., Brunelli, K., Zanini, M. A., Dabala, M., & Pellegrino, C. (2016). Electric arc furnace slag as coarse recycled aggregate for concrete production. *Journal of Sustainable Metallurgy*, *2*(1), 44-50.

[19] González-Ortega, M. A., Cavalaro, S. H. P., de Sensale, G. R., & Aguado, A. (2019). Durability of concrete with electric arc furnace slag aggregate. *Construction and Building Materials*, *217*, 543-556.

[20] Santamaría, A., Orbe, A., San José, J. T., & González, J. J. (2018). A study on the durability of structural concrete incorporating electric steelmaking slags. *Construction and Building Materials*, *161*, 94-111.

[21] Sezer, G. İ., & Gülderen, M. (2015). Usage of steel slag in concrete as fine and/or coarse aggregate.

[22] BSI, B. (1990). 812-110 Testing aggregates-Methods for determination of aggregate crushing value (ACV).

[23] Coppola, L., Buoso, A., Coffetti, D., Kara, P., & Lorenzi, S. (2016). Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, *123*, 115-119.

[24] Pellegrino, C., & Gaddo, V. (2009). Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, *31*(9), 663-671.

[25] Pellegrino, C., Cavagnis, P., Faleschini, F., & Brunelli, K. (2013). Properties of concretes with black/oxidizing electric arc furnace slag aggregate. *Cement and Concrete Composites*, *37*, 232-240.