

การใช้ดินลูกรังเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตเพื่อทำเป็นชั้นหินอุ้มน้ำประดิษฐ์

Utilization of Lateritic Soil as Coarse Aggregate in Concrete for Artificial Aquifer

دننพล ตันนโยภาส^{1*}, ณัฐวัตร จันท์มาตร์² และนันทนัช เจริญสุข¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

²สำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ เขต 2 อุตรธานี

399 หมู่ 11 ถนนมิตรภาพ ตำบลโนนสูง อำเภอเมือง จังหวัดอุตรธานี 41330

Danupon Tonnyopas^{1*}, Nattawat Janmart² and Nanthanat Charoensuk¹

¹Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

Kho Hong, Hat-Yai, Songkhla, Thailand, 90110

²Office of Primary Resources and Mines, Region 2 Udonthani

399 Moo 11, Mittraphap Road, Tamboon Non Sung, Amphoe Mueang Udon Thani 41330

¹Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

Kho Hong, Hat-Yai, Songkhla, Thailand, 90110

*ผู้รับผิดชอบบทความ: danupon.t@psu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 07-4287-0656 ต่อ 7318

Received: 8 July 2020, Revised: 26 August 2020, October: 13 November 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการถึงความเหมาะสมที่ใช้ดินลูกรังเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่ทำเป็นชั้นหินอุ้มน้ำ มวลรวมหยาบนำมาใช้หล่อตัวอย่างคอนกรีตเป็นลูกรังสองขนาดคือ 9.5-25.0 และ 25.0-37.5 มิลลิเมตร พบอยู่ในพื้นที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ออกแบบส่วนผสมสำหรับคอนกรีตควบคุม มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อลูกรังต่อทรายเท่ากับ 1:2:1.25 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 15 เตรียมตัวอย่างทั้งหมดหล่อในแบบหล่อขนาด 100×100×100 มิลลิเมตร ทดสอบความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ อัตราการซึมผ่าน ความแข็งแบบชอร์ และกำลังอัด ภายหลังจากบ่มด้วยการแช่น้ำเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน วิเคราะห์ห้วงภาคแร่และโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบลูกรังขนาด 25.0-37.5 มิลลิเมตร บ่ม 28 วัน มีกำลังอัด 18 เมกะพาสคัล การดูดซึมน้ำร้อยละ 30.57 อัตราการซึมผ่าน 0.15-0.37 ลูกบาศก์เมตรต่อพื้นที่ต่อตารางเมตร รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างระบุวิภาคแร่ เอ็ดทรินไกต์และแคลไซต์ ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงบริเวณส่งผ่านรอยต่อ คอนกรีตมวลรวมลูกรังสามารถทำเป็นชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดันประดิษฐ์ระดับต้นได้

คำสำคัญ การดูดซึมน้ำ ชั้นหินอุ้มน้ำประดิษฐ์ มวลรวมหยาบลูกรัง เถ้าแกลบ อัตราการซึมผ่าน

Abstract

This paper presents a laboratory study on the suitability of using lateritic soil as coarse aggregate in pervious concretes as artificial aquifer. Two sizes of laterite available in Prince of Songkla University Hat Yai campus, 9.5-25.0 mm and 25.0-37.5 mm in size, were used as the coarse aggregates. The mixture contained ordinary Portland cement Type 1 (OPC), lateritic aggregate, and sand in proportion of 1:2:1.25 by weight and the OPC was partially replaced with ground rice husk ash in proportion of 15wt.%. All of the samples were casted in size of 100×100×100 mm and the bulk density, water absorption, infiltration rate, Shore hardness and compressive strength after curing for 1, 7 and 28 days were determined. The mineral phases and microstructure were analyzed via X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) techniques, respectively. Experimental results showed that the laterite coarse aggregate of size 25.0-9.5 mm and concrete

cured for 28 days provided compressive strength of 18 MPa, water absorption of 30.57% and infiltration rate of 0.15-0.37 m³/min/m². The XRD pattern revealed mineral phases abundant of ettringite and calcite. SEM displays interfacial transition zone. The lateritic aggregate concrete was found to be a satisfactorily shallow artificial unconfined aquifer.

Keywords: Artificial Aquifer, Lateritic Soil as Coarse Aggregate, Rice Husk Ash, Water Absorption, Infiltration Rate

1. บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาประเทศไทยได้ประสบปัญหาภัยแล้งอยู่ตลอดเวลาและทวีความรุนแรงขึ้น จากรายงานสถานการณ์ภัยแล้งในปี 2563 ของกรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย พบว่ามีพื้นที่ประสบภัยแล้ง จำนวน 23 จังหวัด 135 อำเภอ [1] โดยสาเหตุหลักมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม การที่ฝนตกทิ้งช่วง ทำให้แหล่งน้ำทั้งธรรมชาติและที่สร้างกักเก็บไว้ใช้ฤดูแล้งมีปริมาณน้ำลดลง ประกอบกับประชากรเพิ่มมากขึ้น และสภาพแวดล้อมป่าต้นน้ำลำธารเสื่อมลง ทำให้พื้นที่ชุ่มน้ำลดน้อย ปริมาณน้ำฝนซึมลงสู่ใต้ผิวดินได้น้อยตามไปด้วย อากาศที่ร้อนจัดทำให้การสูญเสียน้ำจากการระเหยมีมาก ทำให้ผิวดินแห้งแล้ง วิธีกักเก็บน้ำไว้ใต้ดินเสมือนมีชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifers) ก็คือมีวัสดุยอมให้น้ำซึมผ่านและกักไว้ เช่นน้ำใต้ดิน ดังนั้นหากสร้างคอนกรีตพรุน (Porous Concretes) ให้เปรียบเสมือนชั้นหินอุ้มน้ำไว้ ก็สามารถแก้สถานการณ์นี้ได้ระดับหนึ่ง ซึ่งดินลูกรัง (Lateritic Soils) จัดว่าเป็นวัสดุที่มีความพรุนมาก พบได้ทั่วไปในภูมิภาคเขตร้อนชื้น เช่น ไทย ลาว กัมพูชา มาเลเซีย ไนจีเรีย มีการนำไปใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งเป็น ติลาแลงมวลรวมละเอียดและหยาบในคอนกรีต (Lateritic Aggregate Concrete) [2-6] อิฐบล็อก [7,8] พบว่ามีการดูดซึมน้ำมากขึ้น การผสมด้วยของเสียจากอุตสาหกรรม เช่น ผงปูนเม็ด [9] หรือเถ้าแกลบทำให้เนื้อดินจับตัวแข็งแน่นขึ้น [10] เศษเซรามิกทำให้คอนกรีตลูกรังมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ [11] เถ้าลอยทำให้คอนกรีตลูกรังทนต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (สูงขึ้น) และอัดแข็งตัวเองได้ [12] เนื่องจากแหล่งดินลูกรังพบมากที่สุดในภาคอีสานประเทศไทย ในภาคใต้พบมากที่จังหวัดสงขลา [13] จึงมีความคิดทำชั้นหินอุ้มน้ำประดิษฐ์จากคอนกรีตมวลรวมลูกรังที่ดูดซึมน้ำและซึมผ่านน้ำได้มาก เพื่อเพิ่มความชุ่มชื้นและปรับสภาพให้พื้นดินมีความสมบูรณ์มากขึ้น

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

ดินลูกรังล้างคัดเอาก้อนเป็นหินทรายและหินดินดานสีเหลืองปนแดง ขนาด 9.5-25.0 รูปที่ 1 (ก) และ 25.0-37.5 มิลลิเมตร รูปที่ 1 (ข) ดูดซึมน้ำง่าย ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ความหนาแน่นจริง (True Density) 3,034.24 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (s) รูปที่ 1 (ค) และเถ้าแกลบบดละเอียด (Rice Husk Ash, RHA) ขนาดเล็กกว่า 45

ไมครอน มีความหนาแน่นจริง 2,391.14 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังในรูปที่ 1 (ง)



รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ (ก) ลูกรังขนาด 9.5-25.0 มิลลิเมตร (ข) ลูกรังขนาด 25.0-37.5 มิลลิเมตร (ค) ทรายหยาบ (ง) เถ้าแกลบ

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

มวลรวมหยาบลูกรัง Laterite (L) ล้างสะอาด สองช่วงขนาดคือ 9.5-25.0 มิลลิเมตร (Small Laterite, SL) และ 25.0-37.5 (Large Laterite, LL) โดยออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อลูกรังต่อทรายต่อน้ำ 2:4:2.5:1 ได้ปรับอยู่ในกรอบ ACI 522.1-13 [14] และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบพันธุ์ข้าวสังข์หยดบดละเอียด ในปริมาณร้อยละ 15 ที่เหมาะสมในการยึดประสานเนื้อคอนกรีต [15] ก็ได้ตัวอย่างคอนกรีตเพิ่มขึ้นอีก 2 ชนิด (LLRHA, SLRHA) ดังมีรายละเอียดส่วนผสมในตารางที่ 1 หล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 100×100×100 มิลลิเมตร ป่มแบบขึ้นในอุณหภูมิห้อง 28-30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-83 เป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

รหัสชุดตัวอย่าง	ขนาดลูกรัง (มิลลิเมตร)	ปริมาณ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)				
		OPC	L	s	น้ำ	RHA
LL	25.0-37.5	450	1000	625	225	-
SL	9.50-25.0	450	1000	625	225	-
LLRHA	25.0-37.5	382	1000	625	225	68
SLRHA	9.50-25.0	382	1000	625	225	68

2.2 วิธีการทดสอบ

ตรวจสอบสมบัติมวลรวม ได้แก่ ขนาดคละ [16] ลักษณะรูปทรงดัชนีความยาว (Elongation Index) [17] และดัชนีความแบน (Flakiness Index) [18] การดูดซึมน้ำ และความถ่วงจำเพาะ ตามวิธี ASTM C29/C29M [19] ความหนาแน่นแบบหลวมและแบบแน่น (Loose and Compacted Bulk

Density) [20] ภาวะคงทนกลั้ว (Slake Durability) [21] ค่ากระแทก (Impact Value) ตามวิธี BS EN 1097-2:2010 [22] ทดสอบคอนกรีตตามอายุบ่ม ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ [23] การขยายตัวแบบเปียกเทียบปริมาตรก่อนกับหลังบ่มน้ำ อัตราการซึมผ่านตามวิธี ASTM C1781/C1781M [24] ความแข็งแบบชอร์ (Shore Hardness) อันเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง [25] และกำลังอัดตามวิธี ASTM C109/C109M [26] วิเคราะห์แร่ประกอบและโครงสร้างจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) และภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมลูกรัง

มวลรวมลูกรังที่ใช้มีรูปร่างเรียวยาวแบน ยกเว้นที่ขดมีขอบรอยแตกคม มีค่ากระแทกร้อยละ 29 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์งานผิวถนนตามการจำแนกของ IS [27] ดัชนีภาวะคงทนกลั้วช่วงร้อยละ 85.22-96.78 (91.58 ± 3.43) จัดอยู่ในภาวะคงทนกลั้วสูง [28] อนึ่งมวลรวมลูกรังในมาเลเซียมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.0-2.32 [29] น้อยกว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนลูกรัง 3 ชุด ที่ทดลองครั้งนั้นมาก (ตารางที่ 2)

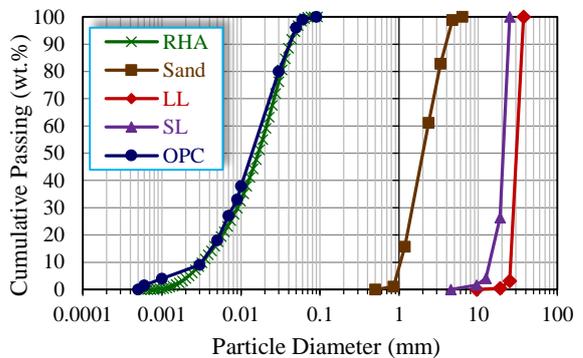
ตารางที่ 2 สมบัติมวลรวมของดินลูกรังที่ใช้

สมบัติ	ขนาดมวลรวม	ค่าทดสอบที่ได้
ค่าการดูดซึมน้ำ, %	25.0 มม.	2.60
(Water Absorption, %)	12.5 มม.	11.54
ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ	25.0 มม.	2.52
(Apparent Specific Gravity)	12.5 มม.	1.88
ดัชนีความแบน, %	25.0 มม.	44.57
(Flakiness Index, %)	12.5 มม.	92.70
ดัชนีความยาว, %	25.0 มม.	41.36
(Elongation Index, %)	12.5 มม.	97.13
ความหนาแน่นหลวม, กก./ม ³	25.0 มม.	3,689.65
(Loose Bulk Density, kg/m ³)	12.5 มม.	3,884.90
ความหนาแน่นแน่น, กก./ม ³	25.0 มม.	3,864.87
(Dense Density, kg/m ³)	12.5 มม.	3,957.49

3.2 การกระจายขนาดของมวลรวม

ผลการวิเคราะห์ขนาดของเถ้าแกลบสังขยัด ด้วยแสงด้วยเลเซอร์พบกระจายตัวในช่วง 0.545-92.02 ไมโครเมตร ส่วนทรายกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.8-7 มิลลิเมตร และลูกรังมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 10-40 มิลลิเมตร (รูปที่ 2) เส้นโค้งของเถ้าแกลบได้ส่วนขนาดละเอียด (Well Graded) เส้นโค้งของทรายลูกรังขนาดใหญ่และขนาดเล็ก มีการกระจายขนาดเดียวถึงค่อนข้างเป็นขนาดเดียว (Uniform Graded) พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์

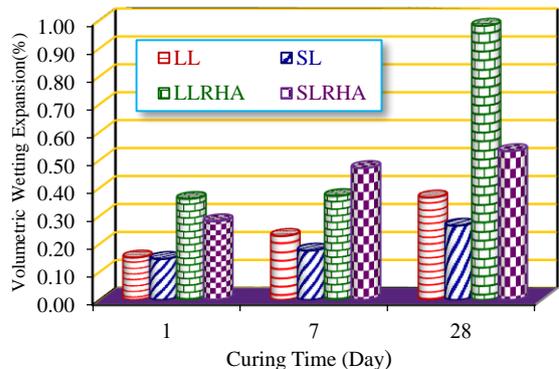
ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity, C_u) ของเถ้าแกลบ ทราย ลูกรังขนาดเล็ก และลูกรังขนาดใหญ่ คือ 6.12 2.30 1.56 และ 1.24 ตามลำดับ ในเถ้าแกลบมีการกระจายขนาดที่ดี ส่วนทรายและลูกรังมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก ค่าสัมประสิทธิ์ความคล้ะกัน (Coefficient of Curvature, C_c) ของเถ้าแกลบ ทราย ลูกรังขนาดเล็ก และลูกรังขนาดใหญ่ คือ 1.22 1.07 0.97 และ 0.94 ตามลำดับ และค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M) ของทรายคือ 2.44 อยู่ในช่วง 1.18-2.36 มิลลิเมตร ของลูกรังขนาดเล็กและลูกรังขนาดใหญ่ร้อยละ 1.70 และ 35.12 จากขนาดช่วง 9.51-12.5 และ 19-25 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 2 การกระจายขนาดของวัสดุใช้ในการศึกษาครั้งนี้

3.3 การขยายตัวแบบเปียก

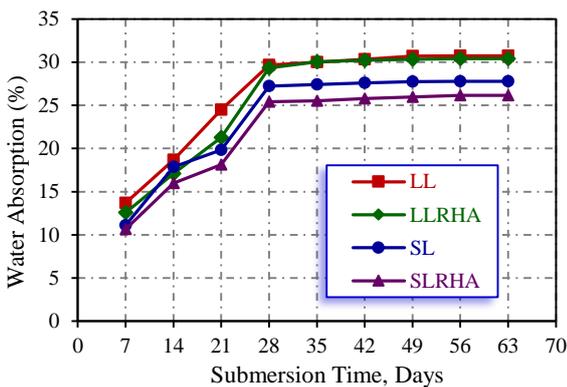
คอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าแกลบได้ขยายตัวแบบเปียกเชิงปริมาตรสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งสอง (รูปที่ 3) ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเกิดช่องว่างในเนื้อประสานคอนกรีตขึ้น พบว่าคอนกรีตมวลรวมขนาดใหญ่ขยายตัวมากกว่าคอนกรีตมวลรวมขนาดเล็ก ขนาดคอนกรีตทุกสูตรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุบ่ม โดยเฉพาะคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่บ่ม 28 วัน



รูปที่ 3 การขยายตัวแบบเปียกเชิงปริมาตรของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ

3.4 การดูดซึมน้ำ

ตัวอย่างคอนกรีตแต่ละชนิดไม่ผ่านการบ่มได้แช่น้ำ 56 วัน พบค่าการดูดซึมน้ำเริ่มแรกที่ คอนกรีตควบคุมที่ใส่ลูกรังขนาดใหญ่ มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 30.74 มากกว่าที่ใส่ลูกรังขนาดเล็กที่ได้ร้อยละ 27.79 เมื่อคอนกรีตลูกรังทั้งสองขนาดผสมเข้า แกลบ ค่าได้ลดเหลือร้อยละ 30.40 และ 26.14 ตามลำดับ (รูปที่ 4) ค่าการดูดซึมน้ำลดลงประมาณร้อยละ 1.09 และ 5.92 ตามลำดับ ซึ่งผลจากการเติมเข้าแกลบได้ทำให้การขยายตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3) โดยเฉพาะบริเวณส่งผ่านรอยต่อ (Interfacial Transition Zone, ITZ) ระหว่างเนื้อประสานกับมวลรวมลูกรังได้เอื้อให้ค่าการดูดซึมน้ำมากขึ้นอีก นอกเหนือจากซึมผ่านในตัวมวลรวมลูกรังแล้ว (ตารางที่ 2) ซึ่งคอนกรีตมวลรวมขนาดใหญ่ผสมเข้าแกลบมีค่าการดูดซึมน้ำลดลงเข้าใกล้ค่าของคอนกรีตมวลรวมขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามคอนกรีตทดลองครั้งนี้มีการดูดซึมน้ำหรือปริมาณโพรง (Void Content) อยู่ในเกณฑ์คอนกรีตพูน ซึ่งกำหนดไว้อยู่ในช่วงร้อยละ 15-35 [14]

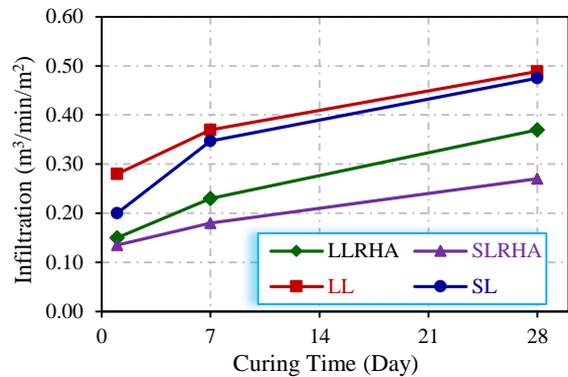


รูปที่ 4 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเข้าแกลบ

3.5 อัตราการซึมผ่าน

พบว่าคอนกรีตมวลรวมลูกรังทั้งสองขนาดมีค่าอัตราการซึมผ่านช่วง 0.20-0.49 ลูกบาศก์เมตรต่อพื้นที่ต่อตารางเมตรตั้งรูปที่ 5 เป็นผลจากช่องว่างระหว่างมวลรวมขนาดใหญ่ (LL) มากกว่าทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปตามซอกระหว่างช่องได้มากกว่า คอนกรีตมวลรวมขนาดใหญ่ที่ผสมเข้าแกลบ มีค่าอัตราการซึมผ่าน 0.15-0.37 ลูกบาศก์เมตรต่อพื้นที่ต่อตารางเมตร มากกว่า คอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดเล็กผสมเข้าแกลบ 0.14-0.27 ลูกบาศก์เมตรต่อพื้นที่ต่อตารางเมตร ปริมาณเข้าแกลบที่เติมเข้าไปทำให้น้ำคอนกรีตมีช่องว่างลดลงและค่อนข้างสอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำที่ลดลงเช่นกันหลังแช่ 28 วัน (รูปที่ 4) คอนกรีตพูนทั่วไปได้กำหนดค่าอัตราการซึมผ่านอยู่ในช่วง 0.08-0.72 ลูกบาศก์เมตรต่อพื้นที่ต่อตารางเมตร [14] ซึ่งผลทดลองได้ค่าอัตราการซึมผ่านอยู่ในช่วงปานกลาง ก็ถือว่าเป็นผลในแง่บวก เพราะช่วยให้การกักเก็บน้ำไว้ในตัวคอนกรีตอยู่ได้นาน ไม่ระบายน้ำไหลออกไปอย่างรวดเร็วหรือรั่วไหล อันจะเป็นชิ้น

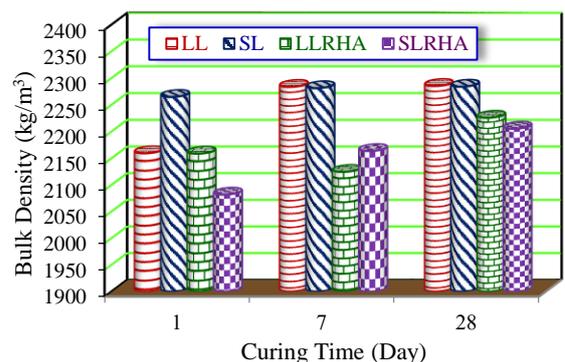
หินอุ้มน้ำ (Aquifer) หรืออ่างเก็บน้ำใต้ดิน (Underground Reservoir) ที่ดีให้ความชุ่มชื้นพื้นดิน และอาจพัฒนานำน้ำขึ้นมาใช้ภายหลัง



รูปที่ 5 อัตราการซึมผ่านของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเข้าแกลบ

3.6 ความหนาแน่นรวม

คอนกรีตควบคุมที่ใส่มวลรวมลูกรังสองชุด มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง 2,159-2,285 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อคอนกรีตผสมเข้าแกลบ ความหนาแน่นรวมมีค่าลดลงอยู่ที่ 2,082-2,226 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 6) สาเหตุมาจากเข้าแกลบมีความหนาแน่นจริงที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลให้คอนกรีตผสมมีความหนาแน่นรวมลดลง นอกจากนี้การดูดซึมน้ำและอัตราการซึมผ่านมาก เปรียบได้ว่าคอนกรีตมีช่องว่างมาก ทำให้น้ำหนักแห้งลดลงและขนาดตัวอย่างที่ขยายขึ้น ก็รวมเป็นอีกปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมลดลงได้เช่นกัน



รูปที่ 6 ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเข้าแกลบ

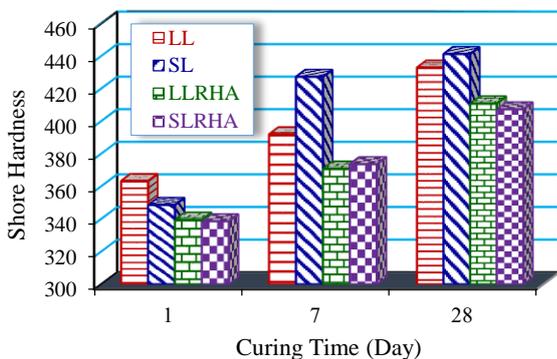
3.7 ความแข็งแรงแบบชอร์

ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงแบบชอร์ของคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดเล็กและใหญ่ที่ผสมเข้าแกลบ บ่ม 28 วัน ได้ 407 (SLRHA) และ 411 (LLRHA) ตามลำดับ พบว่าน้อยกว่าคอนกรีตมวลรวมลูกรังทั้งสองขนาดที่เฉลี่ยสูงสุดได้ 441 (SL) และ 433 (LL)

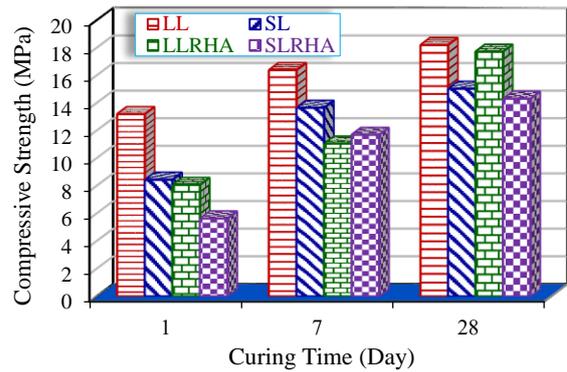
ตามลำดับ ค่าทั้งหมดนั้นได้เพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม (รูปที่ 7) สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวมหลังบ่ม 7 วัน ขึ้นไป (รูปที่ 6) ซึ่งน่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อค่าทดสอบชนิดนี้

3.8 กำลังอัด

คอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่ (25-37.5 มิลลิเมตร) ทุกอายุบ่มมีค่ากำลังอัด (13.20-18.62 เมกะพาสคัล) มากกว่าคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดเล็ก (8.44 - 15.03 เมกะพาสคัล) ตามลำดับ สอดคล้องกับผลวิจัยของ Ogundipe et al. [30] ที่กำลังอัดมากขึ้นตามมวลรวมที่ขนาดใหญ่ขึ้น และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบก็เช่นกัน มีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมที่ผสมลูกรังขนาดเดียวกัน (รูปที่ 8) อย่างไรก็ตามพบว่าคอนกรีตที่ทดสอบทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม [29] และค่าเข้าใกล้กันที่อายุบ่ม 28 วัน สอดคล้องกับผลศึกษาของ Olugbenga [31] ที่พบว่าอายุบ่มและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ส่งผลต่อกำลังอัดเมื่อคำนึงถึงรูปทรงของลูกรัง ซึ่งค่อนข้างรูปไข่มนถึงรีแบนมน ทำให้การขัดประสานระหว่างอนุภาคลูกรังน้อย ส่งผลค่ากำลังอัดลดลงได้ [2] และผลจากการผสมเถ้าแกลบ อายุบ่มช่วงต้น (1-7 วัน) ค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่ออายุบ่ม 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลรวมทั้งสองขนาดผสมเถ้าแกลบได้พัฒนา กำลังอัดที่ขยับเข้าใกล้ค่าคอนกรีตควบคุม (รูปที่ 8) สันนิษฐานเป็นผลจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างสารละลาย $Ca(OH)_2$ กับซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ที่อยู่ในเถ้าแกลบ [10] ได้ส่งผลให้เนื้อประสานกันแน่น [32] แต่ต้องใช้เวลา [15] นอกจากนี้พบว่าแนวโน้มทำนองเดียวกับค่าความแข็งแบบชอร์ (รูปที่ 7) อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดที่ได้ผ่านเกณฑ์ ACI 522.1-13 ซึ่งได้กำหนดค่าไว้อยู่ในช่วง 2.8-28 เมกะพาสคัล [14]



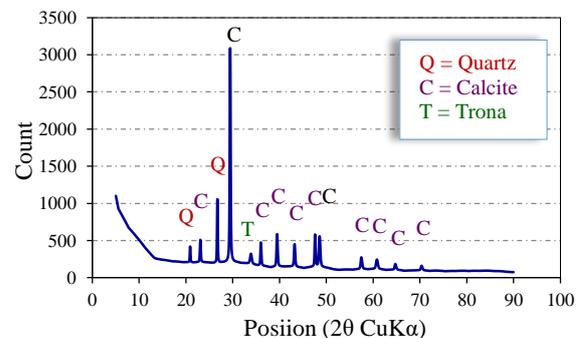
รูปที่ 7 ความแข็งแบบชอร์ของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 8 กำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ

3.9 องค์ประกอบแร่ของคอนกรีต

วิเคราะห์องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่ที่ผสมเถ้าแกลบมีค่ากำลังอัดสูงสุด นำไปวิเคราะห์แร่ประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ดังในรูปที่ 9 ปริมาณวัฏภาคแร่ที่มีการตกผลึก (Precipitation) โดดเด่นมากที่สุดคือ แร่แคลไซต์ (Calcite, $CaCO_3$) และรองลงมาเป็นควอตซ์ (Quartz) และโทรนา (Trona, $Na_3H(CO_3)_2 \cdot 2H_2O$) การที่เนื้อคอนกรีตมีสภาพแอลคาไลสูงและอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ CO_2 สามารถจับกับสารละลายไฮดรอกไซด์ และมีการตกผลึกวัฏภาคแร่โทรนาขึ้นมา

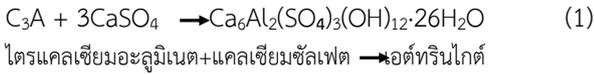


รูปที่ 9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเนื้อคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ

4.0 โครงสร้างจุลภาค

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่ากำลังอัดสูงสุดในการทดลองนี้ เน้นวิเคราะห์บริเวณเนื้อประสานกัน พบว่าเนื้อมวลรวมลูกรัง (L) ยึดติดกับเนื้อประสานกันอย่างหลวมในบริเวณส่งผ่านรอยต่อ (ITZ) ดังในรูปที่ 10 (ก) พบแร่ควอตซ์ฝังเนื้อผิวโค้งมนติดกัน ขณะที่ในซอกร่องโพรงเกิดวัฏภาคเอตทรินไกต์

(Ettringite Phase, $(\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{CaSO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) มีลักษณะเป็นรูปทรงแท่งเข็มเกิดขึ้นมาก (รูปที่ 10 ข) เช่นเดียวกับงานคอนกรีตมวลรวมกรวดทะเลสาบสงขลาผสมเถ้าแกลบ [15] จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานมีน้ำมากเกินไป [33] และค่าอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมซัลเฟตต่อไตรแคลเซียมอะลูมิเนตสูงทำให้เกิดได้ง่าย [34] ดังแสดงสมการทางเคมี (1)

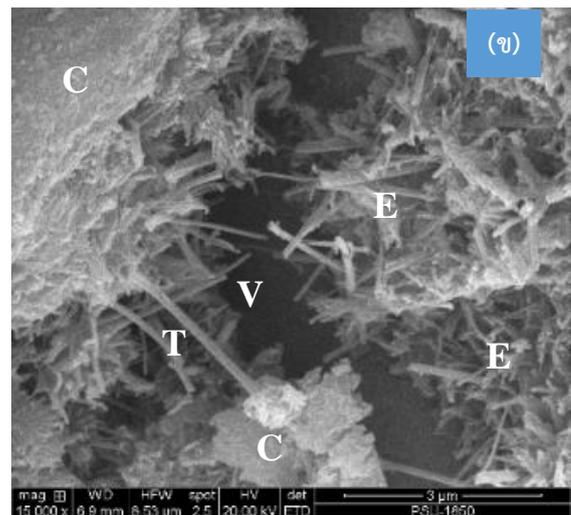
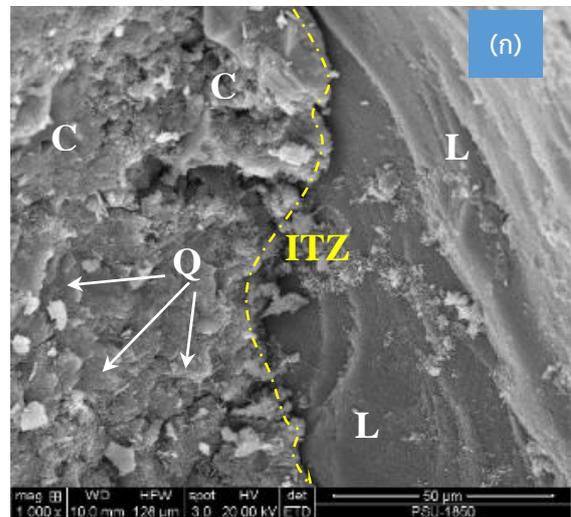


การเกิดเอตทริไนท์ในโพรงทำให้ขยายตัวมาก [33] เช่น ผลทดลองครั้งนี้ (รูปที่ 10 ข) อันส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานไม่เต็มที่ (รูปที่ 8) แต่กลับเป็นผลให้คอนกรีตขยายตัว (รูปที่ 3) ดูดซึมน้ำ (รูปที่ 4) และอัตราการซึมผ่าน (รูปที่ 5) สูงขึ้น นอกจากนี้ยังตรวจพบแคลไซต์ (Calcite, C) มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกันจับกันเป็นกลุ่ม และวิทรานา (Trona, T) มีลักษณะรูปแท่งแขนงกลมยาวสม่ำเสมอ แต่มีปริมาณน้อย ดังในรูปที่ 10 (ข) อันเนื่องจากในช่วงสภานั้นเนื้อคอนกรีตบริเวณดังกล่าวมีสภาพแอลคาไล (Alkalinity) เข้มข้นกว่าบริเวณอื่น จึงตกผลึกให้วิทรานาเกิดขึ้นมา

4. บทสรุป

จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมลูกรังพบว่ามีการดูดซึมน้ำมาก โดยเฉพาะคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่ (25.0 - 37.5 มิลลิเมตร) มีค่าการดูดซึมน้ำที่มากกว่าคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดเล็ก (9.5 - 25.0 มิลลิเมตร) เมื่อผสมเถ้าแกลบ คอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่และขนาดเล็ก มีค่าการดูดซึมน้ำลดลงเล็กน้อย เฉลี่ยร้อยละ 1.09 และ 5.92 ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีตทดลองทั้งหมดมีค่าการดูดซึมน้ำและอัตราการซึมผ่านที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม อยู่ในเกณฑ์คอนกรีตพูน [14] ส่วนความหนาแน่นรวมของคอนกรีตควบคุมทั้งมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่และเล็ก มีค่าใกล้เคียงกัน แต่คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบมีค่าความหนาแน่นรวมลดลงจากการที่มีการขยายตัวเชิงปริมาตร (รูปที่ 3) และความพูน (รูปที่ 4) เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงแบบชอร์ (รูปที่ 7) กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมเถ้าแกลบมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่ม ค่ากำลังอัดสูงสุดที่บ่ม 28 วัน ประมาณ 18 เมกะพาสคัล และคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่มีกำลังอัดสูงกว่าที่ใส่มวลรวมขนาดเล็ก คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 23.39 ซึ่งค่ากำลังอัดที่ทดสอบทั้งหมดผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานคอนกรีตพูน ACI 522.1-13 ผลการศึกษาครั้งนี้บ่งชี้ว่าดินลูกรังที่พบได้ในหลายพื้นที่ในประเทศไทยนำมาผสมกับเถ้าแกลบนั้น เพื่อจะทำเป็นคอนกรีตชนิดน้ำซึมน้ำนั้น ควรต้องมีการศึกษาสมบัติและทดสอบถึงความเหมาะสมก่อน ว่าตัวอย่างคอนกรีตที่หล่อจะมีกำลังอัดพอรับน้ำหนักดินบรรจุทุกข้างบนและอัตราการซึมผ่าน

น้ำจัดทำเป็นชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นได้ดี ซึ่งงานวิจัยนี้ไม่เพียงลดวัสดุของเสียทางเกษตรกลับมาใช้ใหม่ (Recycled) ให้ได้คุณประโยชน์สูงสุด แต่ยังช่วยลดการนำพื้นที่ทำเป็นบ่อฝังกลบขยะอีกด้วย นอกจากนี้เถ้าแกลบแล้ว ในประเทศไทยก็พบว่าเถ้าชนิดอื่นที่มีศักยภาพมาศึกษาทดลองพัฒนางานวิจัยนี้ได้อีก เช่น เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้ามันสำปะหลัง เถ้ากะลามะพร้าว เถ้าซังข้าวโพด คอนกรีตพูนสามารถใช้ทำเป็นพื้นที่ชุ่มน้ำ (Wet Land) หรือแหล่งน้ำใต้ดินในบริเวณที่ตัดแหล่งน้ำผิวดิน หรือพัฒนาแหล่งกักเก็บน้ำในรูปแบบแก้มลิงได้ดิน อันจะช่วยชะลอน้ำป้องกันน้ำท่าไหลท่วมบ่า และเป็นมาตรการหนึ่งช่วยแก้ไขความกันดารขาดแคลนน้ำในยามต้องการ



รูปที่ 10 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ ก) รอยต่อระหว่างลูกรังกับเนื้อประสาน (LTZ) มีควอตซ์ (Q) แคลไซต์ (C) ติดกับมวลรวมลูกรัง (L) และ ข) รูปทรงสัณฐานผลึกแคลไซต์ เอตทริไนท์ (E) และวิทรานา (T) ที่เกิดขึ้นในซอกโพรง (V)

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย ประเภทโครงการนักศึกษา ตามสัญญาเลขที่ ENG-58-2-7-08-0218-S ประจำปี 2559 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Drought of Thailand in 2020. Available from <http://portal.disaster.go.th/portal/ext/nirapai/> [Accessed 21th June 2020].
- [2] Ryduchowska DT. The effect of aggregate variation on the compressive strength of laterite concrete. *Cem. Concr. Res.* 1986; 16(2):135-142.
- [3] Falade FA. Comparative study of normal concrete with concretes containing granite and laterite fine aggregates. *SEMC.* 2001;2:1407-1413.
- [4] Udeoyo FF, Iron UH, Odim OO. Strength performance of laterized concrete. *Constr Build Mater.* 2006;20(10):1057-1062.
- [5] Ettu LO, Ibearugbulem OM, Ezech JC, Anya UC. The suitability of using laterite as soil fine aggregate in structural concrete. *IJSER.* 2013;4(5):502-507.
- [6] Muthusamy K, Kamaruzaman NW, Ahmad SW, Yahaya FM. Study on durability performance of concrete containing laterite aggregates. *Concr Res Lett.* 2015;6(2):60-68.
- [7] Raheem AA, Bello OA, Makinde OA. A comparative study of cement and lime stabilized lateritic interlocking blocks. *PJST.* 2010;11(2):27-34.
- [8] Otoko GR, Isoleim F-M, Oyebode OJ. The suitability of lateritic soils for block making. *IJMER.* 2016;6(9):12-16.
- [9] Tonnyopas D, Hnumuang K and Nounpradit T. Effect of cement clinker dust on stabilized lateritic soil. *Proceedings of the 9th Mining, Metallurgical and Petroleum Conference (REUSE II), 2011 Jan 13-14; Montien Riverside Hotel, Bangkok: 2011. p. 183-190.Thai.*
- [10] Tonnyopas D, Thinpakpanang T. Improvement of clay soil with industrial wastes. *Engng.J.CMU.* 2015;22(1):1-8.Thai.
- [11] Awoyera PO, Dawson AR, Thom NH, Akinmusuru JO. Suitability of mortars produced using Laterite and ceramic wastes: Mechanical and microscale analysis. *Constr Build Mater.* 2017;148:195-203.
- [12] Mathew G, Paul MM. Mix design methodology for laterized self-compacting concrete and its behavior at elevated temperature. *Constr Build Mater.* 2012;36:104-109.
- [13] Ministry of Natural Resources and Environment. Environmental management from the use of lateritic soil and soft rock (South Region). The Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, Thailand. Final Report: 2014.Thai.
- [14] American Concrete Institute. ACI 522.1-13. Specification For pervious concrete pavement. USA; ACI Committee; 2013.
- [15] Tonnyopas D, Jitnukoon K. Effect of Sang Yod rice husk ash on Songkhla Lake gravel gap-graded aggregate concrete. *SWU Eng. J.* 2013; 8(2):62-69. Thai.
- [16] American Society for Testing and Materials. ASTM C136/C136M-14. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. PA: ASTM International; 2014.
- [17] British Standards Institution. BS 812-105.2:1990. Testing aggregates. Methods for determination of particle shape. –Section elongation index of coarse aggregate. London: BSI; 1990.
- [18] British Standards Institution. BS EN 933-3:2012. Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle shape. Flakiness index. London: BSI; 2012.
- [19] American Society for Testing and Materials. ASTM C29/C29M-17a. Standard test method for bulk density (“Unit Weight”) and voids in aggregate. PA: ASTM International; 2017.
- [20] British Standards Institution. BS EN 1097-3:1998. Tests for mechanical and physical properties of aggregates –Part 3: Determination of loose bulk density and voids. London: BSI; 1998.



- [21] American Society for Testing and Materials. ASTM D4644-16. Standard test method for slake durability of shales and other similar weak rocks. PA: ASTM International; 2016.
- [22] American Society for Testing and Materials. ASTM C131/C131M-20. Standard test methods for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. PA: ASTM International; 2020.
- [23] American Society for Testing and Materials. ASTM C1754/C1754M-12. Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete, PA: ASTM International; 2012.
- [24] American Society for Testing and Materials. ASTM C1781/C1781M-18e1. Standard test method for surface infiltration rate of permeable unit pavement systems. PA: ASTM International; 2018.
- [25] American Society for Testing and Materials. ASTM F1957-99(2017), Standard Test Method for composite foam hardness-durometer hardness. PA: ASTM International; 2017.
- [26] American Society for Testing and Materials. ASTM C109/C109M-16a. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens). PA: ASTM International; 2016.
- [27] Indian Standard (IS), Indian Road Congress (IRC), BIS and Ministry of Road Transport and Highway (MORTH).
- [28] Franklin JA, Chandra R. The slake-durability test. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr. 1972; 9(3):325-328.
- [29] Muthusamy K, Kamaruzaman NW. Assessment of Malaysian laterite aggregate in concretes. IJCEE. 2012;12(4):83-86.
- [30] Ogundipe OM, Olanike AO, Nnochiri ES, Ale PO. Effects of coarse aggregate size on the compressive strength of concrete. C.E.J. 2018;4(4):836-842.
- [31] Olugbenga A. Effects of varying curing age and water/cement ratio on the elastic properties of laterized concrete. Civ. Eng. Dimens. 2007;9(2):85-89.
- [32] Yu Q, Sawayama K, Sugita S, Shoya M, Isojima Y. The reaction between rice husk ash and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution and the nature of its product. Cem. Concr. Res. 1999;29(1):37-43.
- [33] Min D, Tang M. Formation and expansion of ettringite crystals. Cem. Concr. Res. 1994;24(1):119-126.
- [34] Bizzozero J, Gosselin C, Scrivener KL. Expansion mechanisms in calcium aluminate and sulfoaluminate systems with calcium sulfate. Cem. Concr. Res. 2014;56:190-202.