ผลกระทบของผงแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมรรถนะการไหลและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลรวมเบาที่อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

Effect of Calcium Carbonate Powder on Flowing Performances and Compressive Strength of Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete (LWASCC)

บุญญานัน เพ็ญสุวรรณ[1], นฤมล พลายทอง[2], คงกฤช สมฤดี[3] และ มงคล นามลักษณ์[4*]

Bunyanun Pensuwan[1] Narumon Plaithong[2], Kongkrit Somrudee[3] and Mongkhon Narmluk[4*]

[1234]ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[1234] Department of Civil Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

Received : 2021-07-27 Revised : 2021-08-12 Accepted : 2021-08-16

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ที่มีต่อสมรรถนะการไหลและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อัดแน่นได้ด้วยตัวเองที่ใช้เม็ดดินเหนียวขยายตัวเบาเป็นมวลรวมหยาบ ในการทดลองได้นำผงแคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 20, 35 และ 50 ของปริมาตรวัสดุประสานรวม การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตประกอบด้วย ค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาไหลแผ่ถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มม. (T_{500}) ระยะเวลาไหลผ่านกล่องแบนรูปตัววี ดัชนีการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง H_2/H_1 จากการทดสอบ L-box และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ผลการวิจัยพบว่าการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ลดความสามารถในการไหลของคอนกรีต LWASCC ค่าการไหลแผ่และดัชนีการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง H_2/H_1 ลง ขณะที่ระยะเวลา T_{500} และเวลาในการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวีเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่ส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน สูงกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 13.3-33.2 และการเลือกใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20 ได้รับกำลังรับแรงอัดสูงสุด

คำสำคัญ : คอนกรีตที่อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง, ผงแคลเซียมคาร์บอเนต, สมรรถนะการไหล, เม็ดดินเหนียวขยายตัวเบา

Abstract

This research presents the effect of the use of calcium carbonate powder, as a cement replacement material, on flowing performances and compressive strength of self-compacting concrete incorporating lightweight expanded clay aggregate (LECA) as coarse aggregate. In the experiment, calcium carbonate powder was used to replace Portland cement by 20, 35 and 50 % of total binder volume. The investigated concrete properties included slump flow, flow time to reach a diameter of 500 mm (T_{500}), V-funnel flow time, L-box H_2/H_1 passing index, and compressive strength of the concrete. The results revealed that the replacement of calcium carbonate powder in Portland cement decreased flowing of LWASCC. The slump flow diameter and H_2/H_1

*มงคล นามลักษณ์

E-mail : *mongkhon.nar@kmutt.ac.th.*

passing index were decreased, while T_{500} and V-funnel flow time were increased by of the volume of calcium carbonate replacement. In addition, the concrete containing calcium carbonate powder had the compressive strength higher than the control at 7 days, and the use of cement replacement with calcium carbonate powder of 20% obtained the highest compressive strength.

Keywords : Self-compacting concrete, Calcium carbonate powder, Flowing performances, Lightweight expanded clay aggregate.

1. บทนำ

คอนกรีตมวลรวมเบาที่อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete, LWASCC) คือ คอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการไหลเข้าแบบหล่อได้ดีและมีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป ทำให้ง่ายต่อการเทและทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปในปัจจุบัน คุณลักษณะพื้นฐานคอนกรีต LWASCC คือ ต้องมีสมรรถนะการไหลเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตที่อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) [1] กล่าวคือ 1) สามารถแทรกตัวและอัดแน่นในแบบหล่อ (Filling ability) ได้ด้วยน้ำหนักตัวเองโดยไม่ต้องใช้แรงกระทำจากภายนอก 2) สามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้โดยไม่ติดขัด (Passing ability) และ 3) สามารถต้านทานต่อการแยกตัว (Segregation resistance) คือ มีเนื้อคอนกรีตที่สม่ำเสมอ ไม่เกิดการแยกตัวของน้ำปูนหรือเกิดการตกตะกอนของมวลรวม [2] แต่คุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญของ LWASCC ซึ่งแตกต่างจาก SCC ทั่วไป คือ มีน้ำหนักเบา (ความหนาแน่นต่ำกว่า 2,000 กก./ม.^{3} [3] ซึ่งทำได้โดยการใช้มวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate) เป็นมวลรวมหยาบ และมวลรวมน้ำหนักเบาที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการผลิต LWASCC ในปัจจุบัน คือ เม็ดดินเหนียวขยายตัวเบา (Lightweight Expanded Clay Aggregate, LECA) เนื่องจากสามารถผลิตขึ้นได้เองในปริมาณที่ต้องการ

จากการศึกษาพบว่ามีงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ ที่ศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของคอนกรีต LWASCC ที่ใช้ LECA เป็นมวลรวมหยาบ อาทิ Maghsoudi และคณะ [4] รายงานว่าคอนกรีตซึ่งใช้ LECA ขนาด 4.75-9.5 มม. เป็นมวลรวมหยาบในปริมาณ 175 กก./ม.^{3} มีค่าความหนาแน่นที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 1,890-1,870 กก./ม.^{3} ปานปรียา ขาวเถิน และคณะ [5] รายงานว่าการแทนที่หินปูนบดย่อยด้วย LECA ร้อยละ 16-47 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าการไหลแผ่สูงขึ้น ค่าความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งขัดแย้งกับ Alexandre Bogas และคณะ [6] ที่รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาตร LECA ในส่วนผสม ทำให้คอนกรีตมีค่าการไหลแผ่ (Slump flow) ลดลงเล็กน้อย ขณะที่ระยะเวลาการไหลแผ่ถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มม. (T_{500}) มีค่าเพิ่มขึ้น และดัชนีการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง H_2/H_1 จากการทดสอบ L-box มีค่าลดลง

นอกจากนี้ยังพบว่า ส่วนผสมของคอนกรีต LWASCC ในงานวิจัยส่วนใหญ่ ยังใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก เพื่อเพิ่มเนื้อซีเมนต์เพสต์ซึ่งเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการไหล ซึ่งทำให้คอนกรีต SCC มีราคาสูงและเกิดความร้อนสูง [2] ดังนั้นทิศทางการพัฒนาส่วนผสมของคอนกรีต LWASCC ที่น่าสนใจ คือ การลดปริมาณปูนซีเมนต์โดยใช้วัสดุเติมแทรก (Filler) ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน

ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate powder, CC) คือ วัสดุเติมแทรก (Filler) ในงานคอนกรีตที่ได้จากการบดหินปูนจนได้ผงสีขาวที่มีความละเอียดสูง โดยทั่วไปผงแคลเซียมคาร์บอเนตไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน แต่สามารถแทรกตัวระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ทำให้โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์มีความพรุนต่ำลง งานวิจัยในอดีตได้

รายงานอิทธิพลของผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต SCC อาทิ Sue-iam และ Makul [7] พบว่าการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากกระบวนการบดหินปูน เป็นวัสดุปรับแต่งส่วนผสมคอนกรีต SCC ที่ใช้เถ้าแกลบไม่บดแทนที่ทรายบางส่วน ทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดและความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางดีขึ้น John และคณะ [8] รายงานว่าการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 2.5-5.0 แทนที่ปูนซีเมนต์ สามารถปรับปรุงกำลังและความหนาแน่นของคอนกรีต SCC แต่ทำให้ความสามารถทำงานได้ต่ำลง พงศกร พรมสวัสดิ์ และคณะ [9] รายงานว่าในคอนกรีต SCC ที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่ปูนซีเมนต์ ทำให้ค่าการไหลแผ่ลดลง เนื่องจากคอนกรีตมีความหนืดมากขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 5 ทำให้คอนกรีตที่ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม (ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน) เล็กน้อย แต่เมื่อปริมาณผงแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น เป็นร้อยละ 10 และ 20 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มต่ำลง

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า การรายงานผลกระทบของผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อสมรรถนะการไหลของคอนกรีต SCC ยังมีน้อยและขัดแย้งกัน และยังไม่พบการศึกษาผลกระทบของผงแคลเซียมคาร์บอเนตต่อคุณสมบัติของคอนกรีต LWASCC โดยตรง นอกจากนี้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตยังใช้ค่อนข้างต่ำ

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อสมรรถนะการไหลของคอนกรีต LWASCC ที่ใช้ LECA เป็นมวลรวมหยาบ ได้แก่ ค่าการไหลแผ่ (Slump flow) ระยะเวลาไหลแผ่ถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มม. (T_{500}) ระยะเวลาไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี (V-funnel flow time) และค่าดัชนีการไหลผ่านสิ่งกีดขวางด้วยวิธี L-box โดยมุ่งศึกษาการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณในระดับสูงกว่างานวิจัยในอดีต คือ ร้อยละ 20 35 และ 50 โดยปริมาตร ซึ่งผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปในปัจจุบัน

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1–2555 [10] เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความละเอียดสูง รุ่น CALCRETE F3 จากบริษัทสุรินทร์ออมย่า เคมิคอล (ประเทศไทย) จำกัด เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมี คือ $CaCO_3$ มากกว่าร้อยละ 98.5 $MgCO_3$ ไม่เกินร้อยละ 0.8 FeO_3 ไม่เกินร้อยละ 0.02 และ HCl ที่ไม่ละลายน้ำ ไม่เกินร้อยละ 1 และมีค่า pH 8-10 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงในตารางที่ 1 สำหรับมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำสะอาด มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ค่าการดูดซึมน้ำในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งร้อยละ 1.10 และมีค่าดัชนีความละเอียดเท่ากับ 2.21 สำหรับมวลรวมหยาบใช้เม็ดดินเหนียวขยายตัวเบา (LECA) จากบริษัทไซมีส อีโคไลท์ จำกัด จังหวัดราชบุรี ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีขนาดเม็ดโตสุดเท่ากับ 8 มม. มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.16 และมีค่าการดูดซึมน้ำในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับร้อยละ 14.09 ส่วนสารลดน้ำใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ประเภทโพลีคาร์บ็อกซีเลต ADVA® 208 จากบริษัท จีซีพี แอพพลาย เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด มีความหนาแน่น 1.10 กรัม/ซม.^{3} และน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตใช้น้ำประปาสะอาด

2.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย

คอนกรีต SCC ควบคุม (Controlled concrete) ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จำนวน 585 กก./ม.^{3} อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.6 ของน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนคอนกรีต SCC กลุ่มทดลองในงานวิจัยนี้ แสดงในตารางที่ 2 มีรายละเอียดของส่วนผสมดังนี้ ส่วนผสม CC20, CC35,

และ CC50 ใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยปริมาตรของวัสดุประสานรวม (ปูนซีเมนต์+ผงแคลเซียมคาร์บอเนต) ตามลำดับ โดยควบคุมค่า w/b ให้คงที่เท่ากับ 0.35 (โดยน้ำหนัก)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

ตัวอย่างวัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	พื้นที่ผิว (ซม.^{2}/กรัม)	น้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)
Cement	3.13	3,470	-
CC	2.70	6,000	1.50

หมายเหตุ : CC คือ ผงแคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดดินเหนียวขยายตัวเบา (LECA)

2.3 การผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีตในงานวิจัยนี้ มีขั้นตอนดังนี้ 1) ผสมสารลดน้ำพิเศษกับน้ำที่ต้องในการผสมทั้งหมดและแบ่งเป็น 5 ส่วน 2) เติมมวลรวมหยาบ (LECA) ที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ลงในเครื่องผสมคอนกรีตพร้อมเติมน้ำ 1 ส่วน แล้วเดินเครื่องผสม 1 นาที 3) เติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พร้อมน้ำ 2 ส่วน แล้วเดินเครื่องผสม 5 นาที 4) เติมมวลรวมละเอียด(ทราย) พร้อมน้ำ 1 ส่วน แล้วเดินเครื่องผสม 5 นาที และ 5) ใส่ผงแคลเซียมคาร์บอเนต พร้อมน้ำ 1 ส่วน แล้วเดินเครื่องผสม 3 นาที เมื่อผสมคอนกรีตจนเข้ากันดีแล้ว นำคอนกรีตที่ได้ไปทดสอบสมรรถนะการไหลและนำคอนกรีตอีกส่วนหนึ่งเทลงในแบบหล่อสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยไม่ทำการจี้เขย่าหรือกระทุ้ง

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

กลุ่มตัวอย่าง	อัตราส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม.^{3})					
	Cement	Calcium Carbonate	LECA	Sand	Water	Superplasticizer (%)
Control	585	-	491	678	201	0.60
CC20	466	101	491	678	199	0.65
CC35	383	179	491	678	197	0.68
CC50	298	258	491	678	194	0.70

หมายเหตุ : CC35 หมายถึง ใช้ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 65 และ ผงแคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 35 และปริมาณสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักวัสดุผง

2.4 วิธีการทดสอบ

การประเมินสมรรถนะการไหลของคอนกรีต LWASCC ในงานวิจัยนี้ ได้ทำตามแนวทางการทดสอบของ EFNARC 2005 [1] ซึ่งประกอบด้วย คือ 1)ความสามารถในการไหล (Flow ability) พิจารณาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของการไหลแผ่ (Slump flow) 2) ความสามารถในการเติมแทรกแบบหล่อ (Filling ability) เป็นการประเมินจากความหนืด (Viscosity) ของคอนกรีตสด โดยการทดสอบระยะเวลาที่ใช้ในการไหลแผ่ถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มม. (T_{500}) และระยะเวลาไหลผ่านกล่องแบนรูปตัววี และ 3) ความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (Passing ability) พิจารณาจากดัชนี H_2/H_1 ที่ได้จากการทดสอบ L-box โดยมีเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้และการแบ่งชั้นคุณภาพของคุณสมบัติข้างต้น ดังแสดงในตารางที่ 3

2.4.1 วิธีการทดสอบค่าการไหลแผ่และระยะเวลาการไหล T_{500}

วางแผ่นเหล็กบนพื้นที่ได้ระดับและใช้กรวยสำหรับการทดสอบค่ายุบตัว วางหงายให้ปลายกรวยด้านแคบสัมผัสกับแผ่นเหล็ก จากนั้นเทคอนกรีตจนเต็มโดยไม่ต้องกระทุ้งให้แน่น แล้วยกกรวยทดสอบขึ้นในแนวดิ่ง ปล่อยให้คอนกรีตไหลแผ่อิสระด้วยน้ำหนักตนเอง เริ่มจับเวลาที่คอนกรีตไหลแผ่จนถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มม. จึงหยุดเวลาและบันทึกเป็นค่าเวลาการไหล T_{500} จากนั้นปล่อยให้คอนกรีตไหลแผ่จนหยุดนิ่งดังรูปที่ 2 จึงวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตที่แผ่ออกใน 2 แนวที่ตั้งฉากกัน เพื่อหาค่าการไหลแผ่เฉลี่ย งานวิจัยนี้รายงานค่าเฉลี่ยของค่าการไหลแผ่และระยะเวลาการไหล T_{500} จากการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง



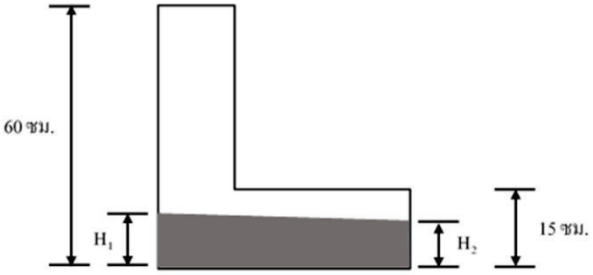
รูปที่ 2 การทดสอบค่าการไหลแผ่และระยะเวลาการไหล T_{500}



รูปที่ 3 การทดสอบระยะเวลาไหลผ่าน V-funnel



รูปที่ 4 การทดสอบ L-box



รูปที่ 5 การวัดค่าผลการทดสอบ L-box

ตารางที่ 3 เกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ของผลการทดสอบสมรรถนะการไหล EFNARC 2005 [1]

สมรรถนะ	การทดสอบ	เกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับ	
		ชั้นคุณภาพ	ค่าที่ยอมรับ
ความสามารถในการไหล (Flow ability)	Slump flow test	*Slump class*	*Slump flow (mm)*
		SF1	550-650
		SF2	660-750
		SF3	760-850
ความสามารถในการไหล (Flow ability)	Slump flow test	*Slump class*	*Slump flow(mm)*
		SF1	550-650
		SF2	660-750
		SF3	760-850

ตารางที่ 3 (ต่อ) เกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ของผลการทดสอบสมรรถนะการไหล EFNARC 2005 [1]

สมรรถนะ	การทดสอบ	เกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับ	
		ชั้นคุณภาพ	ค่าที่ยอมรับ
ความสามารถในการเติมแทรก (Filling ability)	T_{500}	*Viscosity class*	*T_{500} time (sec)*
		VS1/VF1	≤2
		VS2/VF2	>2
	V-funnel test	*Viscosity class*	*V-funnel time (sec)*
		VS1/VF1	≤8
		VS2/VF2	9-25
ความสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (Passing ability)	L-box test	*Passing class*	*H_2/H_1 index*
		PA1	≥0.8 with 2 bars
		PA2	≥0.8 with 3 bars

2.4.2 วิธีการทดสอบ V-funnel

ตั้งกล่องแบนรูปทรงวี (V-funnel) บนพื้นให้ได้ระดับ และปิดฝาช่องเปิดด้านล่างให้สนิท จากนั้นนำคอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วลงใน V-funnel จนเต็ม พร้อมกับเปิดฝาช่องเปิดด้านล่าง เพื่อปล่อยให้คอนกรีตไหลผ่านอย่างอิสระ ลงในภาชนะรองรับดังรูปที่ 3 พร้อมจับเวลาตั้งแต่เริ่มปล่อยคอนกรีตจนกระทั่งคอนกรีตไหลผ่านจนหมดและมองเห็นแสงลอดผ่านด้านล่าง ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง และคำนวณหาระยะเวลา V-funnel flow time เฉลี่ยที่วัดได้จากการทดสอบ 3 ครั้ง

2.4.3 วิธีการทดสอบ L-box

วางกล่องทดสอบรูปทรงแอล (L-box) ชนิดที่มีเหล็กกีดขวาง 3 เส้น บนพื้นที่ได้ระดับ พร้อมปิดแผ่นปิดกั้นการไหลให้สนิท และเทคอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วลงในกล่อง L- Box ในแนวตั้งจนเต็มโดยไม่ต้องทำให้แน่นจากแรงภายนอก จากนั้นเปิดแผ่นปิดกั้นเพื่อให้คอนกรีตไหลผ่านเหล็กกีดขวางทั้ง 3 เส้นอย่างอิสระจนหยุดไหลด้วยตัวเองดังรูปที่ 4 จากนั้นจึงวัดความสูงของระดับผิวหน้าคอนกรีตที่ต้นรางและที่ปลายราง เพื่อนำไปคำนวณหาค่า H_1 และ H_2 ดังรูปที่ 5 งานวิจัยนี้รายงานค่าเฉลี่ยของดัชนี H_2/H_1 ที่ได้จากการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง

2.4.4 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด ได้ทำตามมาตรฐาน ASTM C39 [11] โดยใช้ตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ซึ่งถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วบ่มในน้ำ และนำตัวอย่างทดสอบขึ้นจากน้ำและปล่อยให้แห้งในอากาศ 24 ชั่วโมงก่อนทดสอบที่อายุ 7 วัน และ 80 วัน นอกจากนี้ได้ชั่งน้ำหนักและวัดปริมาตรจริงของตัวอย่างทดสอบเพื่อหาค่าความหนาแน่นก่อนทดสอบกำลังรับแรงอัด งานวิจัยนี้รายงานค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบซ้ำ 3 ตัวอย่าง

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ความสามารถในการไหล (Flow ability)

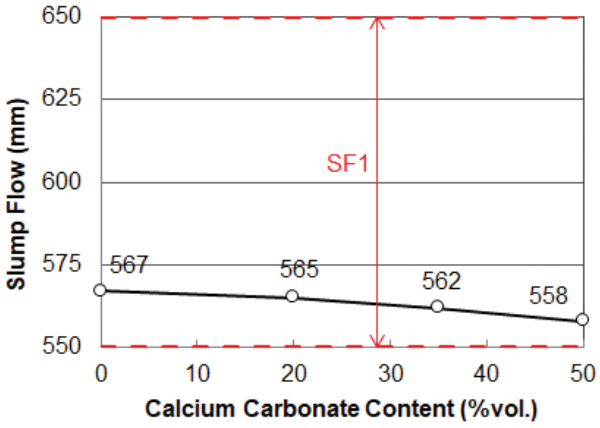
จากรูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของคอนกรีต LWASCC ที่ใช้เม็ดดินเหนียวขยายตัวเบาเป็นมวลรวมหยาบ จากรูปจะเห็นว่าโดยภาพรวมคอนกรีต LWASCC ที่ผลิตขึ้น มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 558-567 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 3 พบว่าผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ SF1 ซึ่งเป็นชั้นคุณภาพที่มีความสามารถในการไหลแผ่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ เหมาะแก่การใช้เทในงานโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมน้อย หรือชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวดิ่ง เช่น เสาและผนัง [12] เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการแทนที่ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีค่าการไหลแผ่ต่ำลง โดยคอนกรีต CC50 มีค่าการไหลแผ่ต่ำสุด เท่ากับ 558 มม. ขณะที่คอนกรีต Control ที่มีค่าการไหลแผ่สูงสุด เท่ากับ 567 มม. ซึ่งมีสาเหตุมากจากผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความละเอียดสูงมาก สามารถผ่าน

ตะแกรงเบอร์ 325 ได้มากกว่าร้อยละ 98.5 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะถึง 6,000 ซม.^{2}/กรัม ซึ่งสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 1.73 เท่า (3,470 ซม.^{2}/กรัม) จึงสามารถดูดซับน้ำไว้บนผิวอนุภาคได้มาก คอนกรีตจึงมีความหนืดเพิ่มขึ้นและไหลแผ่ได้น้อยลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ พงศกร พรมสวัสดิ์ และคณะ [9] ที่อธิบายว่าผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีลักษณะอนุภาครูปทรงเหลี่ยมมุม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ที่สูง ทำให้เกิดการดูดกลืนน้ำมาก ส่งผลให้ความสามารถในการไหลของคอนกรีต SCC ต่ำลง

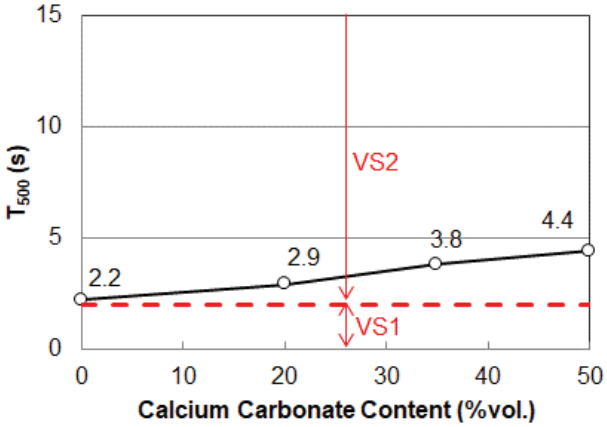
3.2 ความสามารถในการเติมแทรกแบบหล่อ (Filling ability)

ความสามารถในการเติมแทรกแบบหล่อ ในงานวิจัยนี้พิจารณาจากระยะเวลาไหลแผ่ถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มม. หรือ T_{500} และระยะเวลาไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวีในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ซึ่งแสดงถึงอัตราเร็วในการไหล (Flow rate) ของคอนกรีต กล่าวคือ คอนกรีตที่มีความหนืดมาก จะใช้เวลาในการไหลยาวนานมากขึ้น

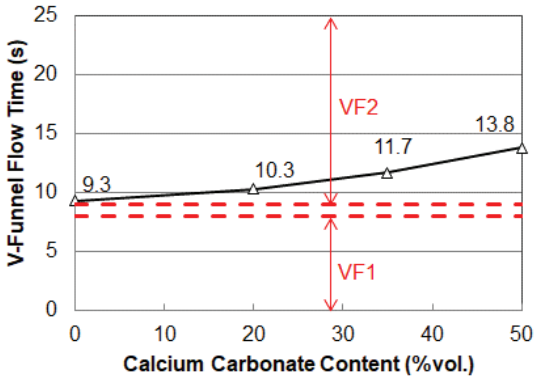
จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีระยะเวลา T_{500} มากกว่า 2 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในตารางที่ 3 จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ VS2 โดยคอนกรีต Control มีค่า T_{500} ต่ำที่สุด คือ 2.2 วินาที เมื่ออัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น จะทำให้ระยะเวลา T_{500} สูงขึ้นตามลำดับ และคอนกรีต CC50 มีค่า T_{500} สูงสุด คือ 4.4 วินาที จากรูปที่ 8 จะเห็นว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีระยะเวลา V-funnel flow time อยู่ในช่วง 9-25 วินาที ซึ่งจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ VF2 โดยคอนกรีต Control มีระยะเวลาไหลผ่าน V-funnel ต่ำที่สุด คือ 9.3 วินาที เมื่ออัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น จะทำให้ระยะเวลาไหลผ่าน V-funnel สูงขึ้นตามลำดับ และคอนกรีต CC50 มีระยะเวลาไหลผ่าน V-funnel สูงสุด คือ 13.8 วินาที ผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีอิทธิพลทำให้คอนกรีตมีความหนืดมากขึ้น จึงทำให้คอนกรีตต้องใช้เวลาในการไหลแผ่ถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มม. และระยะเวลาในการไหลผ่าน V-funnel ยาวนานมากขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน EFNARC 2005 ในตารางที่ 3 พบว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ VS2/VF2 ซึ่งจัดเป็นคอนกรีต LWASCC ที่ไหลไม่เร็ว แต่มีข้อดี คือ ช่วยลดแรงดันของคอนกรีตที่กระทำต่อแบบหล่อ และมีความต้านทานต่อการแยกตัวได้ดีขึ้น เหมาะสำหรับการใช้หล่อชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวดิ่ง [12]



รูปที่ 6 ผลการทดสอบการไหลแผ่ (Slump flow test)



รูปที่ 7 ผลการทดสอบระยะเวลา T_{500}



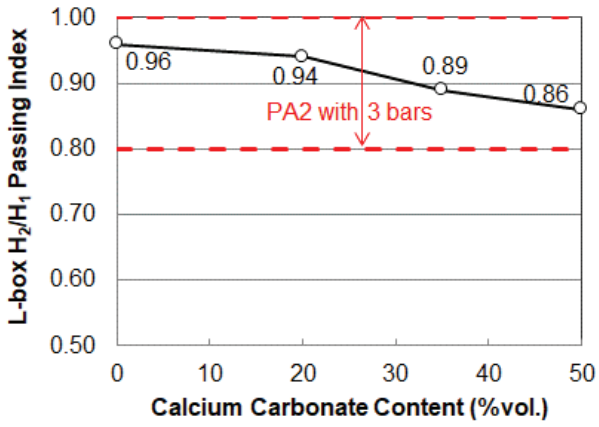
รูปที่ 8 ผลการทดสอบระยะเวลาไหลผ่าน V-funnel

3.3 ความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (Passing ability)

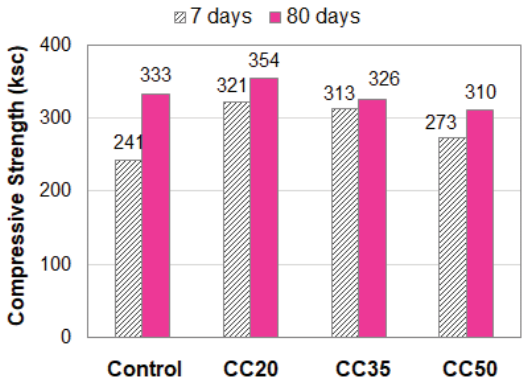
จากรูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบดัชนีการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง H_2/H_1 ที่ได้จากการทดสอบ L-box ของคอนกรีต LWASCC ที่ใช้เม็ดดินเหนียวขยายตัวเบาเป็นมวลรวมหยาบ จากรูปจะเห็นว่าคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมมีค่าดัชนี H_2/H_1 อยู่ในช่วง 0.86-0.96 แสดงให้เห็นว่าเป็นคอนกรีต LWASCC ที่มีความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ดี ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ในตารางที่ 3 จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ PA2 เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีค่าดัชนีการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง H_2/H_1 ต่ำลง ตามลำดับ โดยคอนกรีต CC50 มีค่า H_2/H_1 ต่ำสุด คือ 0.86 ขณะที่คอนกรีต Control มีค่า H_2/H_1 สูงสุด คือ 0.96 แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 50 ทำให้คอนกรีตเกิดการสูญเสียความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง ร้อยละ 10.4 ซึ่งเป็นผลมาจากผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้คอนกรีตมีความหนืดมากขึ้น จึงสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางต่ำลง [7]

3.4 กำลังรับแรงอัด

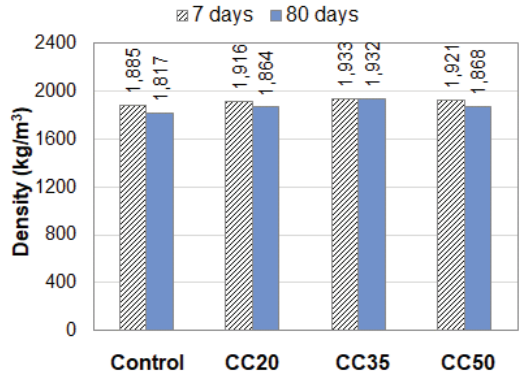
จากรูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบกำลังรับอัดของคอนกรีต LWASCC ที่อายุ 7 วัน และ 80 วัน จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้นตามอายุทดสอบ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20, 35 และ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 241, 321, 313 และ 273 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของผงแคลเซียมคาร์บอเนตทุกอัตราส่วน มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน สูงกว่าคอนกรีตควบคุม ในช่วงร้อยละ 13.3-33.2 ซึ่งเป็นผลจากการเติมแทรกของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ (Filler effect) จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ในช่วงอายุต้นมีความอัดแน่นสูงกว่าคอนกรีตควบคุม โดยคอนกรีต CC20 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันสูงที่สุด เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดในระยะยาวพบว่าคอนกรีต Control, CC20, CC35 และ CC50 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 80 วัน เท่ากับ 333, 354, 326 และ 310 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ จะเห็นว่าคอนกรีต CC20 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 6.3 ขณะที่คอนกรีต CC35 และ CC50 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยลงเล็กน้อย ร้อยละ 2.1 และ 6.9 ตามลำดับ เนื่องจากคอนกรีต CC35 และ CC50 มีอัตราการแทนที่ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่สูง ทำให้เหลือปริมาณปูนซีเมนต์ในระบบค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตน้อย จึงทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำลง



รูปที่ 9 ผลการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางด้วยวิธี L-box



รูปที่ 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 11 ความหนาแน่นของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

3.5 ค่าความหนาแน่น

รูปที่ 11 แสดงค่าความหนาแน่นของคอนกรีต LWASCC ที่ใช้ LECA เป็นมวลรวมหยาบ จากรูปจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นแปรผันอยู่ในช่วง 1,817-1,933 กก./ม.^{3} ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิจัยของ Maghsoudi และคณะ [4] ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นที่อยู่ในชั้นคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (Structural lightweight concrete) [3] นอกจากนี้พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่ทำให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตแตกต่างจากตัวอย่างควบคุมอย่างชัดเจน ในขณะที่ค่าความหนาแน่นที่อายุ 80 วัน มีค่าต่ำกว่าอายุ 7 วัน เล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความชื้นภายในก้อนตัวอย่างทดสอบที่แตกต่างกัน

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลอง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

4.1 คอนกรีต LWASCC ที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 558-567 มม. จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ SF1 มีระยะเวลา T_{500} มากกว่า 2 วินาที และมีระยะเวลาไหลผ่าน V-funnel อยู่ในช่วง 9-25 วินาที จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ VS2/VF2 ซึ่งเป็นคอนกรีต SCC ที่มีความสามารถในการไหลต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ และมีความสามารถเติมแทรกในแบบหล่อไม่สูงนัก เหมาะแก่การใช้เทในงานโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมน้อย หรือชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวดิ่ง และมีข้อดี คือ ช่วยลดแรงดันของคอนกรีตที่กระทำต่อแบบหล่อ และมีความต้านทานต่อการแยกตัวได้ดีขึ้น

4.2 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้คอนกรีต LWASCC มีสมรรถนะในการไหลโดยรวมต่ำลง โดยค่าการไหลแผ่และดัชนีการไหลผ่าน L-box ต่ำลง ในขณะที่ใช้เวลาในการไหลแผ่ถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มม. (T_{500}) และเวลาในการไหลผ่าน V-funnel เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงถึงคอนกรีตมีความหนืดมากขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนต

4.3 คอนกรีต LWASCC ที่มีส่วนผสมของผงแคลเซียมคาร์บอเนตทุกอัตราส่วน มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน สูงกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ทั้งที่อายุ 7 วัน และ 80 วัน และเมื่อใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนที่มากขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มต่ำลง ดังนั้นอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอร์เนตไม่ควรเกินร้อยละ 20

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทสุรินทร์ ออมย่า เคมิคอล (ประเทศไทย) จำกัด บริษัทไซมีส อีโคไลท์ จำกัด และบริษัท จีซีพี แอพพลาย เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] EFNARC 2005. “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Free pdf copy downloadable from <http://www.efnarc.org>.

[2] ธนธรณ์ คัมภีร์ยิ่งเจริญ และ มงคล นามลักษณ์, “อิทธิพลของเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าต่อการเกิดความร้อนและการหดตัวของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง”, วารสารวิจัยและนวัตกรรมการอาชีวศึกษา, ปีที่ 4, พ.ศ.2564, หน้า 159-167.

[3] K.H. Yang, G.H. Kim, and Y.H. Choi. "An initial trial mixture proportioning procedure for structural lightweight aggregate concrete". *Construction and* Building Materials, 55, pp. 431-439, 2014.

[4] A.A. Maghsoudi, Sh. Mohamadpour, and M. Maghsoudi. “Mix design and mechanical properties of self-compacting light weight concrete”. *Int. J. Civ. Eng*. 9(3), pp.230–236, 2011.

[5] ปานปรียา ขาวเถิน, นิบัสซัม เดะแอ และ มงคล นามลักษณ์, “อิทธิพลของเม็ดดินเหนียวขยายตัวเบาต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีความสามารถเทได้สูง”, *วารสารวิจัยและนวัตกรรมการอาชีวศึกษา*, ปีที่ 5, พ.ศ.2564, หน้า 159-167.

[6] J. Alexandre Bogas, Augusto Gomes, and M.F.C. Pereira, “Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate”. Construction and Building Materials, 35, pp.1013–1022, 2012.

[7] G. Sua-iam and N. Makul. “Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate”. Construction and Building *Materials*, 38, pp.455-464, 2013.

[8] W. John, A.O. Oghenekume, T.L. Zahemen, “Effect of calcium carbonate filler on self-compacting concrete using different aggregate sizes”. European Journal of Engineering Research and Science, 4, pp.9-16, 2019.

[9] พงศกร พรมสวัสดิ์, บุรฉัตร ฉัตรวีระ, และ กฤษดา เสือเอี่ยม, “สมบัติของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองผสมร่วมผงแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอย”, *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 31, พ.ศ. 2563, หน้า 11-22.

[10] Thai Industrial Standard Institute. "TIS 15: 2555 Thai standard for Portland cement: Part I specification". *TISI*, 2012.

[11] ASTM C39 / C39M-21, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org

[12] G. De Schutter, P. Bartos, P. Domone, J. Gibbs. *Self-compacting concrete*. Whittles Publishing, Caithness, 2008.