วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.
UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

ผลของชนิดของสารสร้างฟองโฟมที่มีต่อขนาดฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

Effects of foaming agent types on air void size of cellular lightweight concrete

แก้วตา ดียิ่งศิริกุล เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Kaewta Deeyingsirikul Griengsak Kaewkulchai*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University Ubon Ratchathani 34190

* Corresponding author.

E-mail: griengsak@gmail.com; Telephone: 0 4535 3345

วันที่รับบทความ 11 สิงหาคม 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 14 กันยายน 2563; วันที่ตอบรับบทความ 30 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมของฟองอากาศ ซึ่งเกิดจากการเติมโฟมเหลวที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตแทนการใช้หินหรือมวลรวมหยาบ โดยคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความหนาแน่นหรือปริมาณฟองอากาศที่เติมเข้าไป เมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะเกิดรูพรุนมีลักษณะเป็นโพรงอากาศในเนื้อคอนกรีต ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกำลัง ความทนทาน และค่าการนำความร้อน งานวิจัยนี้นำเสนอผลของชนิดสารสร้างฟองโฟมที่มีต่อขนาดฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 โดยใช้สารสร้างฟองโฟม 3 ชนิด อัตราส่วนสารสร้างฟอง โฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:20, 1:30 และ 1:40 และแรงดันขณะที่ฉีดฟองโฟมเท่ากับ 5.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรบ่มตัวอย่างในอากาศ 28 วัน พบว่าขนาดฟองอากาศเฉลี่ยอยู่ในช่วง 50-450 ไมโครเมตร โดยสาร A จะพบขนาดฟองอากาศระหว่าง 50 – 250 ไมโครเมตร สาร B ขนาดฟองอากาศอยู่ระหว่าง 50 – 450 ไมโครเมตร และสาร C ขนาดฟองอากาศระหว่าง 100 – 450 ไมโครเมตร ถึงแม้ว่าสารแต่ละชนิดจะมีกระบวนการผลิตที่เหมือนกันแต่จะให้ขนาดฟองอากาศที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของสารสร้างฟองชนิดนั้นๆ อีกทั้งการใช้อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมที่ต่างกันมีผลต่อขนาดฟองอากาศเฉลี่ยและการกระจายขนาดของฟองอากาศ ซึ่งมีผลต่อกำลังรับแรงอัดในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ จึงควรมีการทดสอบหาสัดส่วนผสมก่อนที่นำไปใช้งานจริง

คำสำคัญ

ฟองอากาศ โพรงอากาศ สารสร้างฟองโฟม คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โฟมคอนกรีต

Abstract

Cellular lightweight concrete is produced by uniform distribution of air bubbles made from preformed foam throughout the mass of concrete in substitution of coarse aggregates. The properties of cellular lightweight concrete are depended on density or foam volume, when the concrete hardens was to become pore system inside. That, it is a very significant characteristic affects to strength, durability and thermal conductivity. This paper presents the effect of foaming agent types to air void size of cellular lightweight concrete with a wet density of 1,800 kg/m^3 using sand to cement ratios of 2:1 and water to cement ratios of 0.45. At this density, the concrete specimens were used three types of foaming agent and used three different foaming agents to water ratios of 1:20, 1:30 and 1:40. To producing preformed

foam by foam generator used pressure at 5.50 kg/cm^2 and the concrete specimens were used air dry curing method for 28 days. It was found that median air void sizes are mainly in the range of 50-450 microns. Foaming agent A was found median air void sizes between 50-250 microns, foaming agent B was median air void sizes between 50-450 microns and foaming agent C was median air void sizes between 100-450 microns. Although, foaming agents used the same process to produce preformed foam but it's caused to make a difference on air void sizes. That's depend on performance of foaming agents, in addition the different foaming agents to water ratios has impacted on air void sizes and air void size distributions that effects on compressive strength of cellular lightweight concrete. Thus, before using foaming agents to produce should be test for finding proportion foaming agents.

Keywords

air-void; air-void diameter; foaming agent; cellular lightweight concrete; foam concrete

1. คำนำ

คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete) คือคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักในช่วง 300-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [1] ซึ่งปัจจุบันเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมสำหรับงานก่อสร้างผนังอาคารเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานในอาคาร เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี และช่วยลดน้ำหนักบรรทุกโครงสร้างทำให้สามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างได้จำนวนหนึ่ง [2-3] การผลิตคอนกรีตมวลเบาทำได้ 3 วิธีคือ 1) การทำให้เกิดฟองอากาศในคอนกรีตโดยการผสมฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อคอนกรีตจึงเรียกว่าคอนกรีตเติมอากาศ (Aerated Concrete) 2) การทำให้เกิดช่องว่างโดยไม่ใช้มวลรวมละเอียด (No-Fines Aggregate) คือ มีแต่มวลรวมหยาบและซีเมนต์เพสท์เคลือบมวลรวมหยาบหนาไม่เกิน 1- 3 มิลลิเมตร 3) การใช้มวลรวมหยาบที่มีน้ำหนักเบา (Light Weight Aggregate Concrete) โดยใช้มวลรวมหยาบที่มีน้ำหนักเบา 100 - 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มาผสมกับคอนกรีต [4] คอนกรีตเติมอากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามกรรมวิธีการผลิต กล่าวคือ ประเภทแรกจะใช้การผสมของปูนซีเมนต์ ทราย ปูนขาว น้ำ และสารกระจายฟองอากาศ แล้วผ่านการอบไอน้ำภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงด้วยเครื่องจักรที่มีมาตรฐาน โดยคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้เรียกว่า Autoclaved Aerated Concrete หรือ AAC ซึ่งมีค่าการลงทุนที่สูงมาก ส่วนประเภทที่สองนั้นเป็นคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (Cellular Lightweight Concrete หรือ CLC) คอนกรีตชนิดนี้บางครั้งเรียกว่าโฟมคอนกรีต (Foamed Concrete) คอนกรีตที่มีส่วนผสมของมอร์ต้ากับโฟมเหลว ซึ่งโฟมเหลวผลิตจากการผสมน้ำยาสร้างฟองโฟม (Foaming Agent) กับน้ำ ในเครื่องผลิตฟองโฟมซึ่งจะได้โฟมเหลว (Pre-foamed Foam) เมื่อฉีดโฟมเหลวเข้าไปผสมกับมอร์ต้า เมื่อคอนกรีตแข็งตัวเนื้อคอนกรีตที่ได้จะมีรูพรุนและมีน้ำหนักเบา [4-7] ซึ่งคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC มีข้อได้เปรียบกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบ AAC ในแง่ที่ไม่ต้องผ่านการอบไอน้ำภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ทำให้การลงทุนค่อนข้างต่ำอีกทั้งยังสามารถพัฒนากรรมวิธีการผลิตได้เองโดยไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีการผลิตจากต่างประเทศ

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าหน่วยน้ำหนักของโฟมคอนกรีต มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรของฟองโฟมที่เติมลงไป โดยขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตอยู่ระหว่าง 200-400 ไมโครเมตร ซึ่งการเพิ่มปริมาตรฟองโฟมมีผลทำให้ขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง [8,11] รูปร่างลักษณะของโพรงและการกระจายขนาดของโพรง มีความสำคัญต่อคุณสมบัติด้านกำลัง ความทนทาน และค่าการนำความร้อน [9] ขนาดโพรงอากาศจะส่งผลต่อกำลังอัดและคุณสมบัติต่างๆ ตามข้อกำหนด ACI532.3R-93 แนะนำให้ขนาดโพรงอากาศมีค่าอยู่ในช่วง 200 ไมโครเมตร [10] และฟองอากาศที่ขนาดใหญ่ขึ้นการกระจายขนาดของฟองอากาศที่กว้างมีผลให้ค่าการนำความร้อนลดลง [12] อีกทั้งคุณภาพของน้ำยาผลิตฟองโฟม (Foaming Agent) ก็มีส่วนสำคัญมากในการทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ [13] และชนิดของน้ำยาผลิตฟองโฟมมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดโดยชนิดที่ผลิตจากโปรตีนธรรมชาติ (Protein Based) จะให้ฟองโฟมที่มีความเสถียรกว่าชนิดสังเคราะห์ (Synthetic) [14] งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลของชนิดสารสร้างฟองโฟมที่มี

ต่อขนาดฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ (S:C) 2:1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) 0.45 อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำ (F:W) 1:20, 1:30 และ 1:40 โดยใช้แรงดันขณะฉีดฟองโฟมที่ 5.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการประเมินขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น เพื่อช่วยในการพัฒนากระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศให้มีคุณสมบัติตามการนำไปใช้งานได้

2. วิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบมีดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่ใช้สำหรับงานโครงสร้าง ค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15

2) ทรายสะอาดแม่น้ำมูลในจังหวัดอุบลราชธานี ค่าโมดูลัสความละเอียดประมาณ 2.10

3) น้ำสะอาดใช้น้ำประปาในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

4) สารสร้างฟองโฟม (Foaming Agent) โดยใช้ผลิตภัณฑ์ต่างยี่ห้อ 3 ชนิดที่จำหน่ายในท้องตลาด ได้แก่ สารสร้างฟองโฟม A ซึ่งเป็นสารกักกระจายฟองอากาศซึ่งดัดแปลงจากสารลดแรงตึงผิวจากธรรมชาติและสารสังเคราะห์ (Surfactant blend) สารสร้างฟองโฟม B และ C เป็นสารสร้างฟองโฟมสังเคราะห์ (Chemical Base) ซึ่งสารแต่ละตัวไม่ได้กำหนดสัดส่วนผสมที่ชัดเจนในการผลิตคอนกรีตเพื่อให้ได้คุณสมบัติตรงตามการนำไปใช้งาน โดยสาร A อัตราส่วนที่แนะนำอยู่ในช่วง 1:30-1:40 สาร B อัตราส่วนแนะนำที่ 1:40 สาร C อัตราส่วนที่แนะนำอยู่ที่ 1:30-1:40 งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดอัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมที่ไม่เท่ากันเพื่อดูแนวโน้มของขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำ 1:20 1:30 และ 1:40 ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติสารสร้างฟองเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 1

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

1) อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย โม่ผสมคอนกรีต เครื่องผลิตโฟมเหลว (Foam Generator) แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร

2) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด รุ่น MD-500MT

3) เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ขนาดของฟองอากาศจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชั่น (FESEM) รุ่น JEOL JSM-7610FPlus ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ภาพ (Image Analysis)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติสารสร้างฟองโฟม

สารสร้างฟอง	แรงดันที่ใช้ฉีดฟองโฟม (kg/cm^2)	อัตราส่วนสารสร้างฟองต่อน้ำ (F:W)	อัตราการขยายตัวของฟองโฟม	อัตราการไหลของโฟม (litre/sec.)
A	5.5	1:20	46	1.70
		1:30	48	1.75
		1:40	43	1.70
B	5.5	1:20	41	1.75
		1:30	44	1.61
		1:40	40	1.60
C	5.5	1:20	28	1.50
		1:30	28	1.45
		1:40	24	1.50

ตารางที่ 2 สูตรผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

ชนิดสารสร้างฟอง	แรงดันที่ใช้ฉีดฟองโฟม (kg/cm^2)	อัตราส่วนสารสร้างฟองต่อน้ำ (F:W)	Density 1,800 kg/m^3 S:C =2:1 ,W/C= 0.45
			จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)
A	5.5	1:20	3
		1:30	3
		1:40	3
B	5.5	1:20	3
		1:30	3
		1:40	3
C	5.5	1:20	3
		1:30	3
		1:40	3
รวม			27

2.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมีดังนี้

1) เตรียมเครื่องมือสำหรับผสมคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยเครื่องผสมคอนกรีต ปั๊มลมและถังแรงดันผสมสารสร้างฟองโดยผสมสารสร้างฟองกับน้ำ (F:W) ในอัตราส่วนที่ต้องการดังตารางที่ 2 ใส่ลงในถังของเครื่องผลิตโฟมเหลว ในปริมาณที่ต้องการใช้ในการผสมแต่ละครั้ง และปรับแรงดันของถังให้ได้ตามที่กำหนด

2) ใส่ทรายและซีเมนต์ลงในโม่ผสมคอนกรีตแล้วเปิดเครื่องผสมให้ทรายและซีเมนต์คลุกเคล้ากัน

3) เมื่อทรายและซีเมนต์ คลุกเคล้ากันดีแล้ว ใส่น้ำลงไปในโม่ผสมคอนกรีต โดยระหว่างเติมน้ำให้เปิดเครื่องผสมคอนกรีตเพื่อให้น้ำที่เติมลงไปเข้ากันได้ดีกับทรายและซีเมนต์

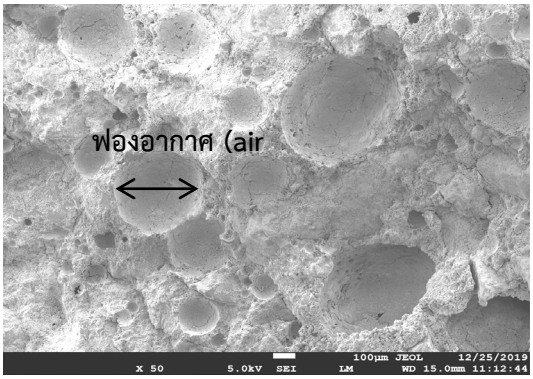
4) เมื่อน้ำผสมกับทรายและซีเมนต์จนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วทำการฉีดโฟมเหลวลงไป โดยระหว่างการฉีดโฟมเหลวต้องเปิดเครื่องผสมคอนกรีตดังรูปที่ 1

5) เมื่อซีเมนต์มอร์ต้ากับโฟมเหลวคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จึงหยุดเครื่องผสม ในการผสมในแต่ละครั้งไม่ควรใช้เวลาเกิน 5 นาที ทำการตรวจสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตแล้วจึงนำคอนกรีตที่ได้ไปเทลงแบบหล่อ

รูปที่ 1 การฉีดโฟมเหลวลงในซีเมนต์มอร์ต้า

2.4 การทดสอบวิเคราะห์ตัวอย่าง

การทดสอบวิเคราะห์ขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยใช้ภาพถ่ายที่ได้จากการส่องชิ้นตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เตรียมชิ้นตัวอย่างจากก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน นำก้อนตัวอย่างมาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง ตามมาตรฐาน ASTM C457 จากนั้นในแต่ละส่วนทำการตัดโดยไม่ให้ผิวของโพรงเสียหาย ให้ขนาดของชิ้นตัวอย่างมีขนาดประมาณ 1x1x2 เซนติเมตร เพื่อให้มีขนาดเท่าฐานวาง (Stub) ก่อนนำชิ้นตัวอย่างเข้าสู่เครื่อง ต้องทำการฉาบผิวชิ้นตัวอย่างด้วยเครื่องฉาบผิวที่เรียกว่า Sputter Coater ในการถ่ายภาพ SEM สามารถเลือกกำลังขยายตามความต้องการที่จะใช้การศึกษาดังรูปที่ 2 นำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ หาเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศในแต่ละสูตร นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดฟองอากาศ ที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

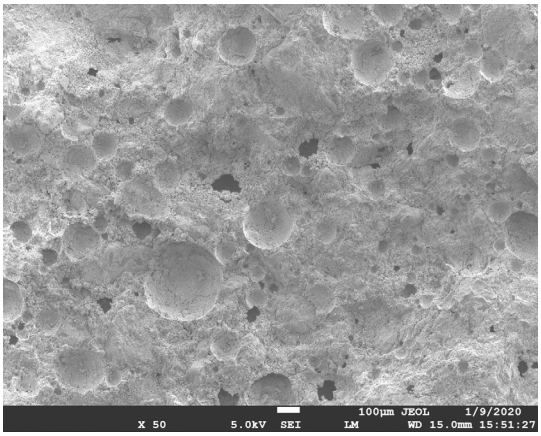


รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

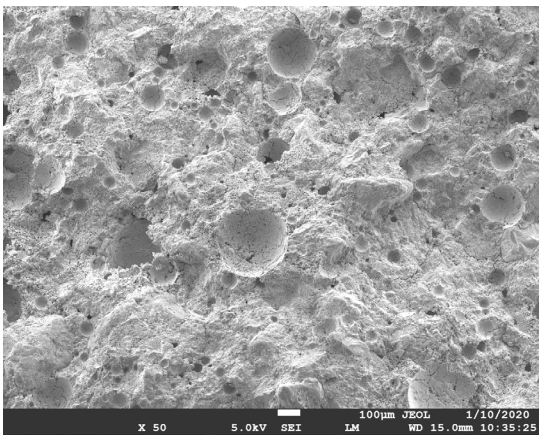
3. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและผลวิเคราะห์การกระจายขนาดฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ 28 วัน

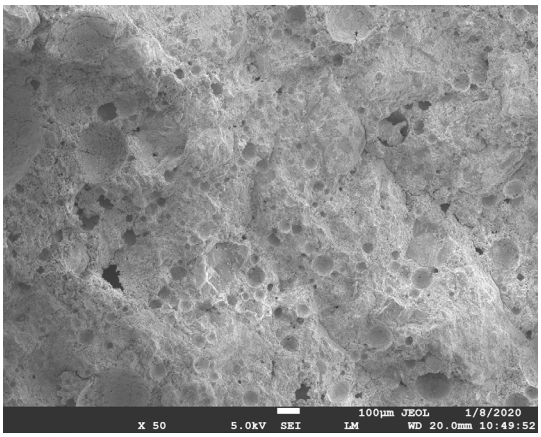
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ 2:1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำ 1:20, 1:30 และ 1:40 ใช้แรงดันขณะฉีดฟองโฟมที่ 5.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แสดงดังตารางที่ 3 และจากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นลักษณะของฟองอากาศที่มีรูปร่างทรงกลมกระจายตัวในเนื้อคอนกรีตเมื่อใช้สาร A สาร B และสาร C ที่อัตราส่วนสารสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำ 1:20, 1:30 และ 1:40 แสดงดังรูปที่ 3, 4 และ 5



(ก) สาร A ที่อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟม 1:20

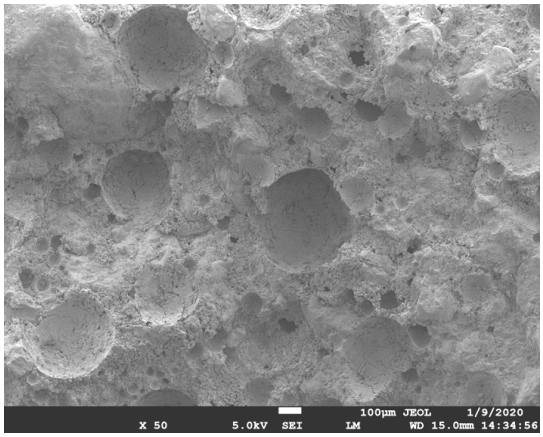


(ข) สาร A ที่อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟม 1:30

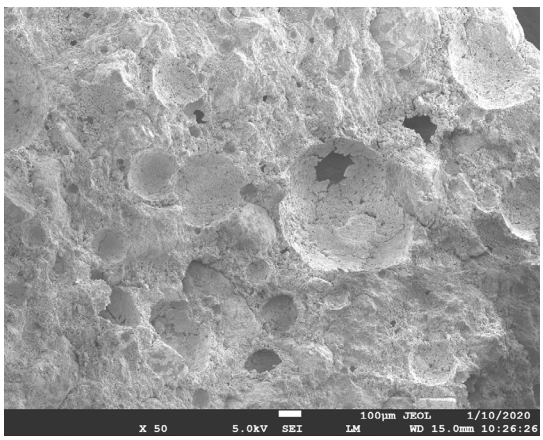


(ค) สาร A ที่อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟม 1:40

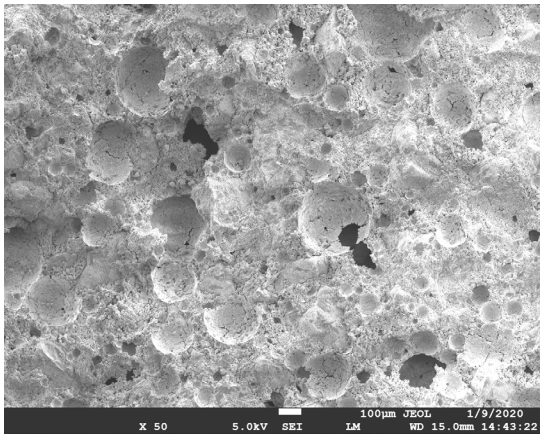
รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ใช้สาร A



(ก) สาร B ที่อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟม 1:20

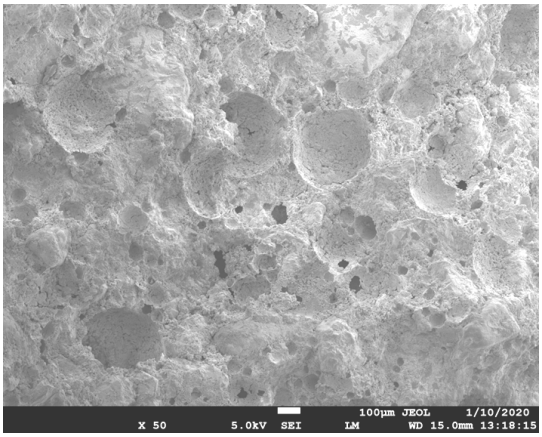


(ข) สาร B ที่อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟม 1:30

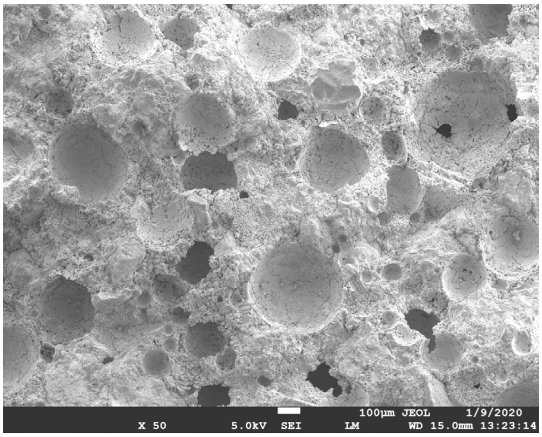


(ค) สาร B ที่อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟม 1:40

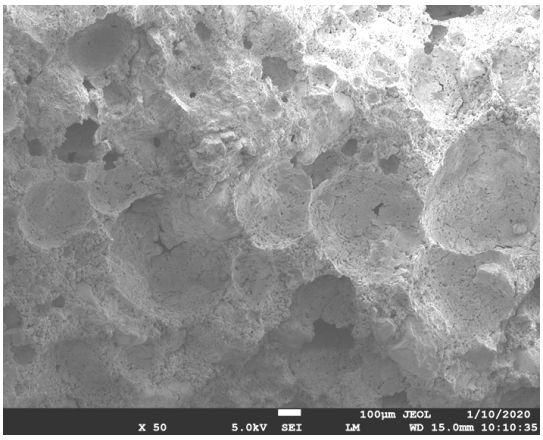
รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM ของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ใช้สาร B



(ก) สาร C ที่อัตราส่วนสารสร้างฟอง 1:20



(ข) สาร C ที่อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟม 1:30



(ค) สาร C ที่อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟม 1:40

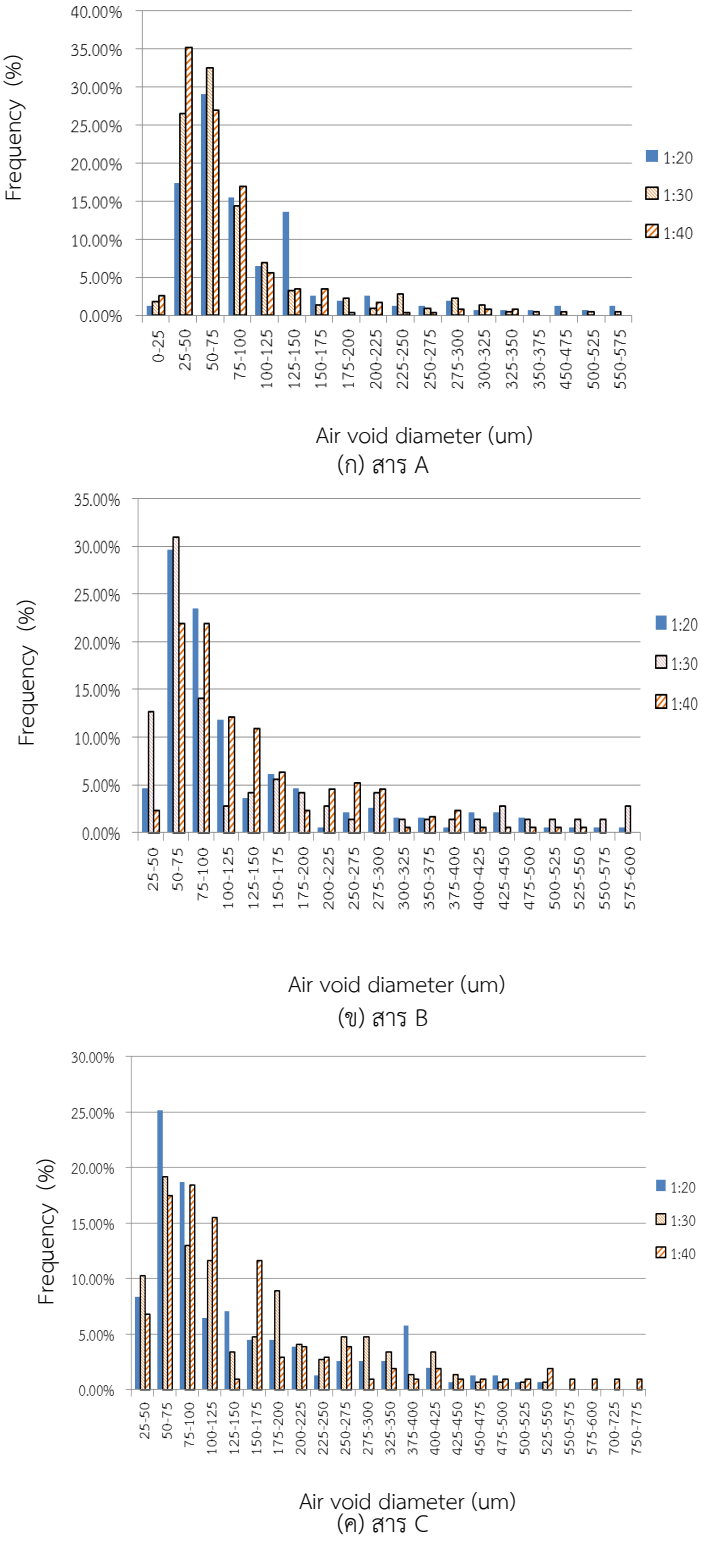
รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ใช้สาร C

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ 28 วัน

ชนิดสารสร้างฟอง	แรงดันที่ใช้ฉีดฟองโฟม (kg/cm^2)	อัตราส่วนสารสร้างฟองต่อน้ำ (F:W)	Density 1,800 kg/m^3 S:C =2:1 ,W/C= 0.45
			กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (MPa)
A	5.5	1:20	23.51
		1:30	19.36
		1:40	23.65
B	5.5	1:20	21.52
		1:30	18.56
		1:40	22.53
C	5.5	1:20	18.68
		1:30	17.56
		1:40	16.17

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

สารสร้างฟอง	อัตราส่วนสารสร้างฟองต่อน้ำ (F:W)	จำนวนฟองอากาศ	ขนาดฟองอากาศใหญ่สุด (um)	ขนาดฟองอากาศเล็กสุด (um)
A	1:20	156	792	16
	1:30	215	570	21
	1:40	231	885	17
B	1:20	197	878	20
	1:30	171	600	26
	1:40	173	589	18
C	1:20	155	543	30
	1:30	146	596	31
	1:40	103	763	31

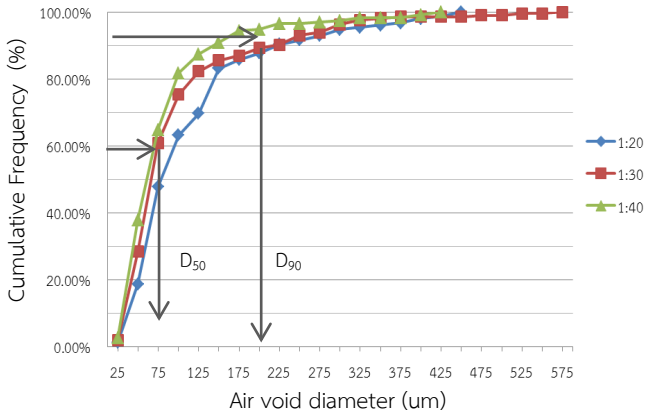


รูปที่ 6 การกระจายขนาดของฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเมื่อใช้อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟม 1:20 1:30 และ 1:40 (ก) สาร A (ข) สาร B (ค) สาร C

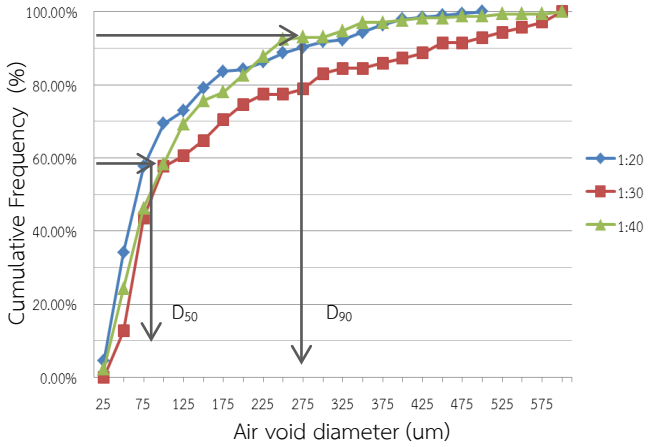
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฟองอากาศจากภาพถ่าย SEM ด้วยโปรแกรม ImageJ แสดงดังตารางที่ 4 นำมาแสดงผลการกระจายขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเมื่อใช้สารสร้างฟองโฟม A, B และ C ที่อัตราส่วนสารสร้างฟองต่อน้ำ 1:20 1:30 และ 1:40 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความถี่ของขนาดฟองอากาศกับขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต โดยแบ่งช่วงความถี่ของขนาดฟองอากาศเท่ากับ 25 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศจะใช้วิธีสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สะสมกับขนาดฟองอากาศ หาค่าพารามิเตอร์ขนาดฟองอากาศที่เปอร์เซนต์ไทล์ที่ 50 (D_{50}) และขนาดฟองอากาศที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 90 (D_{90}) [8][11-13] ดังแสดงในรูปที่ 7 สรุปผลการวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศที่ D_{50} และ D_{90} ได้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศที่ D_{50} และ D_{90} ของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

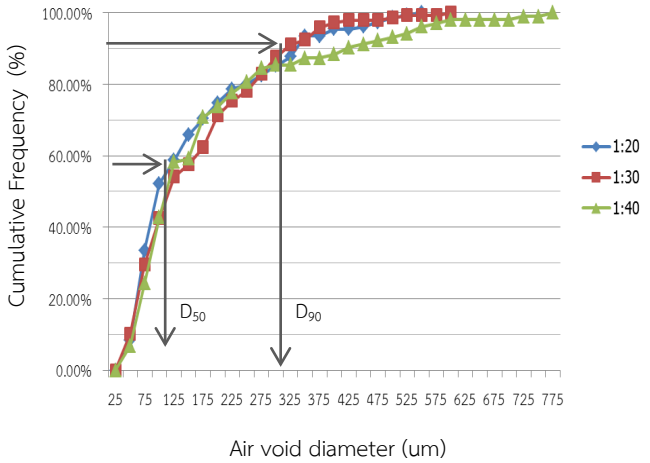
สารสร้างฟอง	อัตราส่วนสารสร้างฟองต่อน้ำ (F:W)	ขนาดฟองอากาศ (D_{50}) (um)	ขนาดฟองอากาศ (D_{90}) (um)
A	1:20	76	209
	1:30	65	219
	1:40	57	148
B	1:20	67	271
	1:30	82	427
	1:40	81	235
C	1:20	93	335
	1:30	113	307
	1:40	111	421



(ก) สาร A



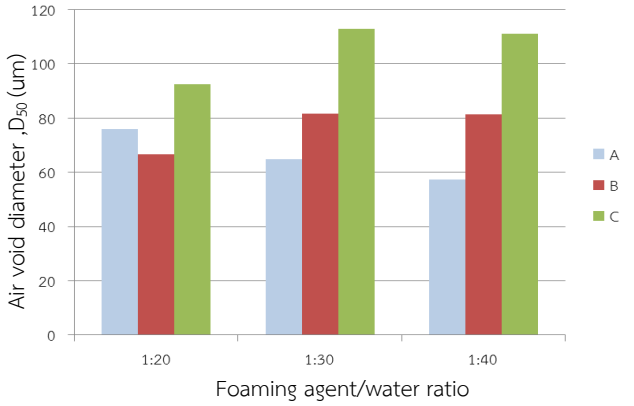
(ข) สาร B



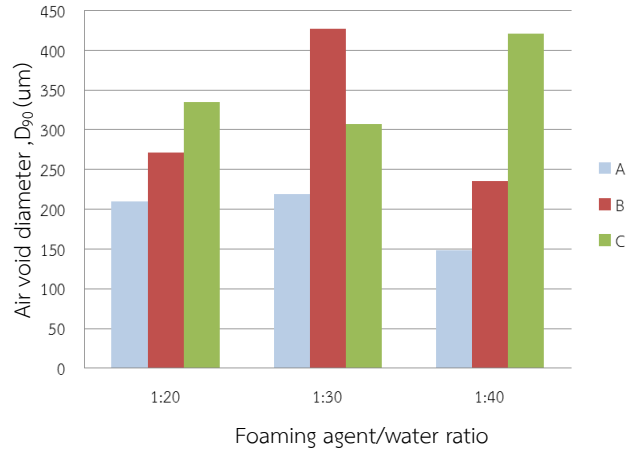
(ค) สาร C

รูปที่ 7 เปอร์เซ็นต์สะสมการกระจายขนาดฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเมื่อใช้อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟม 1:20 1:30 และ 1:40 (ก) สาร A (ข) สาร B (ค) สาร C

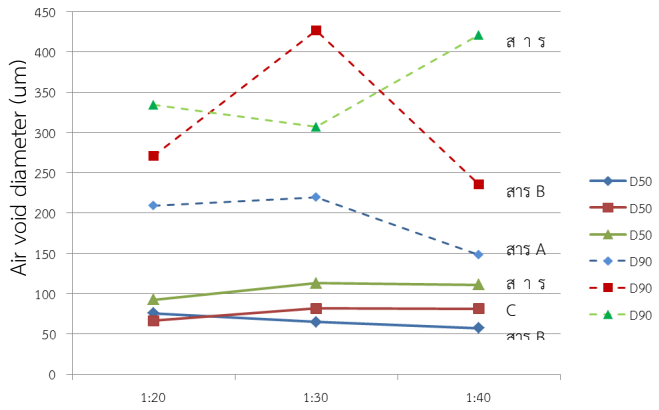
จากตารางที่ 5 นำมาแสดงผลของอัตราส่วนสารสร้างฟองต่อน้ำในส่วนผสมคอนกรีตต่อขนาดฟองอากาศเฉลี่ย (D_{50}) เมื่อใช้สาร A สาร B และสาร C ดังรูปที่ 8 พบว่าขนาดฟองอากาศที่ D_{50} อยู่ในช่วง 50-120 ไมโครเมตร โดยสาร A ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย (D_{50}) มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออัตราส่วนน้ำเพิ่มขึ้น แต่สาร B และสาร C เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำจาก 1:20 เป็น 1:30 มีผลทำให้ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย (D_{50}) เพิ่มขึ้นแต่กลับมีผลน้อยมากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 1:40 อาจกล่าวได้ว่าหากใช้สาร B และสาร C การเพิ่มอัตราส่วนน้ำมากกว่า 1:30 ไม่มีผลต่อขนาดฟองอากาศที่ D_{50}



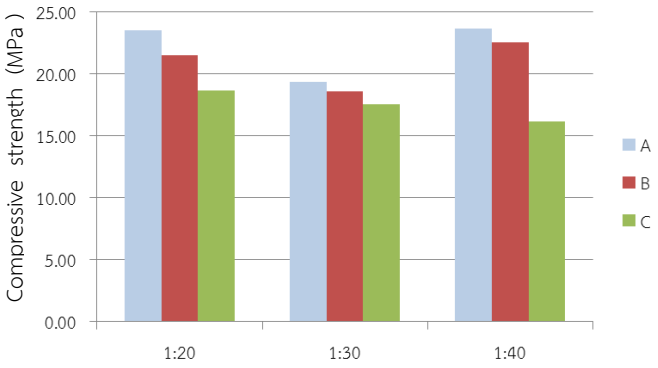
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ (D_{50}) กับอัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำ 1:20 1:30 และ 1:40 ของสาร A สาร B และสาร C



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ (D_{90}) กับอัตราส่วนสารสร้างฟองต่อน้ำ 1:20 1:30 และ 1:40 ของสาร A สาร B และสาร C



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ (D_{50},D_{90}) กับอัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำ 1:20 1:30 และ 1:40 ของสาร A สาร B และสาร C



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำ 1:20 1:30 และ 1:40 ของสาร A สาร B และสาร C

จากรูปที่ 9 พบว่าขนาดฟองอากาศ D_{90} อยู่ในช่วง 150-450 ไมโครเมตร โดยสาร A ขนาดฟองอากาศที่ D_{90} มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำ ในขณะที่สาร B ขนาดฟองอากาศที่ D_{90} ใหญ่ขึ้นถึง 427 ไมโครเมตรที่อัตราส่วน 1:30 แต่มีขนาดลดลงที่อัตราส่วน 1:40 ส่วนสาร C การเพิ่มอัตราส่วนน้ำมีผลให้ขนาดฟองอากาศที่ D_{90} ใหญ่ขึ้น ขนาดฟองอากาศที่ D_{90} เป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าที่ D_{50} โดยการเพิ่มขึ้นของขนาดฟองอากาศที่ D_{90} ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง [8][11] จากรูปที่ 10 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของขนาดฟองอากาศที่ D_{50} และ D_{90} กับอัตราส่วนสารสร้างฟองพบว่า สาร A และสาร B การเพิ่มอัตราส่วนน้ำที่ 1:40 มีผลให้การกระจายขนาดฟองอากาศมีช่วงแคบลง การกระจายขนาดของฟองอากาศที่แคบลงมีผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้น [8] ในขณะที่สาร C การเพิ่มปริมาณน้ำมีผลให้การกระจายขนาดของฟองอากาศกว้างขึ้นมีเปอร์เซนต์ฟองขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ซึ่งขนาดฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นและการกระจายขนาดฟองอากาศที่กว้างมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงดังแสดงในรูปที่ 11

4. สรุป

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมที่มีต่อขนาดฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 โดยใช้สารสร้างฟองโฟม 3 ชนิด อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:20, 1:30 และ 1:40 และแรงดันขณะที่ฉีดฟองโฟมเท่ากับ 5.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร บ่มตัวอย่างในอากาศ 28 วัน พบว่า

1) สาร A มีขนาดฟองอากาศเฉลี่ยเล็กกว่า สาร B และสาร C ตามลำดับ และการกระจายขนาดของฟองอากาศของสาร A น้อยกว่าสาร B และสาร C ซึ่งสาร A เป็นสารกักกระจายฟองอากาศดัดแปลงจากสารลดแรงตึงผิวจากธรรมชาติและสารสังเคราะห์ (Surfactant blend) ส่วนสารสร้างฟองโฟม B และ C เป็นสารสร้างฟองโฟมสังเคราะห์ (Chemical Base) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าชนิดของสารสร้างฟองโฟมมีผลต่อขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพความแข็งแรงของฟองอากาศที่ได้จากสารต่างชนิดกัน

2) สาร A ขนาดฟองอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 50 – 250 ไมโครเมตร โดยขนาดฟองอากาศที่ D_{50} มีค่าระหว่าง 50-100 ไมโครเมตร และค่าฟองอากาศที่ D_{90} มีขนาด 150-200 ไมโครเมตร ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำในอัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำมีผลให้ขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตมีขนาดเล็กลง

3) สาร B ขนาดฟองอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 50 – 450 ไมโครเมตร ขนาดฟองอากาศที่ D_{50} มีค่าระหว่าง 50-100 ไมโครเมตร และค่าฟองอากาศที่ D_{90} มีขนาดระหว่าง 200-450 ไมโครเมตร ที่อัตราส่วนสารสร้างฟองต่อน้ำ 1:30 มีผลต่อขนาดฟองอากาศที่ D_{90} กล่าวคือมีฟองอากาศขนาดใหญ่เพิ่มจำนวนมากขึ้น และมีค่าลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำเป็น 1:40

4) สาร C ขนาดฟองอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 100 – 450 ไมโครเมตร ขนาดฟองอากาศที่ D_{50} มีค่าระหว่าง 100-150 ไมโครเมตร และค่าฟองอากาศที่ D_{90} มีขนาดระหว่าง 300-450 ไมโครเมตรแนวโน้มของขนาดฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อสัดส่วนปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น

ดังนั้นลักษณะฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีรูปร่างทรงกลมกระจายในเนื้อคอนกรีต โดยมีขนาดฟองอากาศอยู่ในช่วง 50 - 450 โครเมตร ซึ่งขนาดของฟองอากาศและการกระจายขนาดของฟองอากาศที่เกิดจากสารสร้างฟองโฟมแต่ละชนิดจะมีลักษณะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของสารสร้างฟองโฟมชนิดนั้นๆ ดังนั้นจึงควรมีการทดสอบหาสัดส่วนผสมก่อนที่นำไปใช้งานจริงเนื่องจากมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด บริษัท ซากุระโตไก จำกัด และ บริษัทอินฟินนิตี้คอนกรีคเทคโนโลยี จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์สารสร้างฟองสำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีสำหรับการใช้อุปกรณ์และสถานที่

เอกสารอ้างอิง

[1] Narayanan N, Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*. 2000;22: 321-329.

[2] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. *คอนกรีตเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 8.กรุงเทพฯ : คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, 2543.

[3] Kumar NV, Arunkumar C, Senthil SS. Experimental study on mechanical and thermal behavior of foamed concrete. *Materials Today*: Proceeding. 2018;5: 8753-8760.

[4] Neville AM. *Properties of Concrete*. 5th ed. London: Pearson Education; 2011.

[5] Just A, Middendorf B. Microstructure of high-strength foam concrete. *Materials Characterization*. 2009;60(7): 741-748.

[6] Hilal AA. *Properties and Microstructure of Pre-formed Foamed Concrete*. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, University of Nottingham; 2015.

[7] ธนภร ทวีวุฒิ, นท แสงเทียน, วิวัฒน์ พัวทัศนานนท์, สถาพร โภคา. ผลของความหนาแน่น และอัตราส่วนที่มีต่อปริมาณช่องว่างอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 2561;11(2): 1-11.

[8] Nambiar EKK, Ramamurthy K. Air-void characterization of foam concrete. *Cement and Concrete Research*. 2007;37(2): 221-230.

[9] Abiev RS, Kozlov VV. Investigation of foam concrete properties, produced by means of vortex jet apparatus. *New Materials, Compounds and Applications*. 2018;2(1): 71-80.

[10] อภัย ชาภิรมย์. *การพัฒนากำลังคอนกรีตเซลลูล่าด้วยเถ้าถ่านหินและเส้นใยสังเคราะห์.* วิทยานิพนธ์; มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุร นารี; 2561.

[11] Kearsley EP, Visagie M. Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters. *Concrete Beton*. 2002;101: 9-13.

[12] Batool F, Bindiganavile V. Air-void size distribution of cement based foam and its effect on thermal conductivity. *Construction and Building Materials*. 2017;(149): 17-28.

[13] Visagie, M. *The effect of microstructure on the properties of foamed concrete*. Dissertation for Master of Engineering. University of Pretoria, 2000.

14] Mugahed Amran YH, Farzadnia N, Abang Ali AA. Properties and applications of foam concrete; a review. *Construction and Building Material*. 2015;(101): 990-1005.