



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

ผลของลักษณะฟองอากาศต่อการรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

Effects of air void characteristics on compressive strength of cellular lightweight concrete

แก้วตา ดียิ่งศิริกุล¹ เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย^{2*}

¹ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ 32000

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Kaewta Deeyingsirikul¹ Griengsak Kaewkulchai^{2*}

¹ Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University Surin 32000

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University Ubon Ratchathani 34190

* Corresponding author.

E-mail: griengsak@gmail.com; Telephone: 0837296636

วันที่รับบทความ 3 กรกฎาคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 16 สิงหาคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 1 พฤศจิกายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 10 กุมภาพันธ์ 2568

บทคัดย่อ

คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมของฟองอากาศ ซึ่งเกิดจากการเติมโฟมเหลวที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตแทนการใช้หินหรือมวลรวมหยาบ โดยคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความหนาแน่นหรือปริมาณฟองอากาศที่เติมเข้าไป เมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะเกิดรูพรุนมีลักษณะเป็นโพรงอากาศในเนื้อคอนกรีต ซึ่งส่งผลต่อสมบัติด้านกำลัง ความทนทาน และ ค่าการนำความร้อน งานวิจัยนี้นำเสนอผลของชนิดสารสร้างฟองโฟมที่มีต่อขนาดฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่มีความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.65 โดยใช้สารสร้างฟองโฟม 2 ชนิด อัตราส่วนสารสร้างฟอง โฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:20, 1:30 และ 1:40 และแรงดันขณะที่ฉีดฟองโฟมอยู่ที่ 4.5, 5.0 และ 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร บ่มตัวอย่างในอากาศ 28 วัน พบว่าเมื่อความพรุนเพิ่มขึ้น ขนาดฟองอากาศที่ D_{90} และความกว้างของการกระจายขนาดฟองอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง ค่า SPAN (Sp) ใช้เป็นตัวบ่งชี้ความแตกต่างของการ กระจายขนาดของฟองอากาศ ซึ่งค่า Sp ที่สูงขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศลดลง

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 $1,800 \text{ kg/m}^3$ using sand to cement ratios of 2:1 and water to cement ratios of 0.65. 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 4.5, 5.0, and 5.5 kg/cm^2 and the concrete specimens were used air dry curing method for 28

days. It was found that when porosity was increased, the air void size at D_{90} and air void size distribution ranges were increased resulting in a decrease of compressive strength. SPAN (Sp) was used to identify the difference in air void.

Keywords

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

1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete) คือคอนกรีตที่มีความหนาแน่นในช่วง 300-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [1] ซึ่งนิยมใช้ในงานก่อสร้างผนังอาคารเนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปทำให้ช่วยลดน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างและมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี [2,3] กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยการทำให้เกิดฟองอากาศในคอนกรีตซึ่งการผสมฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อคอนกรีตจึงเรียกว่าคอนกรีตเติมอากาศ (Aerated Concrete) โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามกรรมวิธีการผลิตกล่าวคือ ประเภทแรกจะใช้การผสมของปูนซีเมนต์ หิน ปูนขาว น้ำ และสารกระจายฟองอากาศ แล้วผ่านการอบไอน้ำภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงด้วยเครื่องจักรที่มีมาตรฐาน โดยคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้เรียกว่า Autoclaved Aerated Concrete หรือ AAC ซึ่งมีค่าการลงทุนที่สูงมาก ส่วนประเภทที่สองนั้นเป็นคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (Cellular Lightweight Concrete หรือ CLC) คอนกรีตชนิดนี้บางครั้งเรียกว่าโฟมคอนกรีต (Foamed Concrete) คอนกรีตที่มีส่วนผสมของมอร์ต้ากับโฟมเหลว ซึ่งโฟมเหลวผลิตจากการผสมน้ำยาสร้างฟองโฟม (Foaming Agent) กับน้ำในเครื่องผลิตฟองโฟมซึ่งจะได้โฟมเหลว (Pre-foamed Foam) แล้วทำการฉีดโฟมเหลวเข้าไปผสมกับมอร์ต้าเมื่อคอนกรีตแข็งตัวเนื้อคอนกรีตที่ได้จะมีรูพรุนและมีน้ำหนักเบา [4-7] ซึ่งคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC มีข้อได้เปรียบกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบ AAC ในแง่ที่ไม่ต้องผ่านการอบไอน้ำภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ทำให้การลงทุนค่อนข้างต่ำ อีกทั้งยังสามารถพัฒนากรรมวิธีการผลิตได้เองโดยไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีการผลิตจากต่างประเทศ

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความหนาแน่นของโฟมคอนกรีตมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรของฟองโฟมที่เติมลงไป โดยขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตอยู่ระหว่าง 200-400 ไมโครเมตร ซึ่งการเพิ่มปริมาตรฟองโฟมมีผลทำให้

ขนาดโพรงอากาศใหญ่ขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง [8,14] รูปร่างลักษณะของโพรงและการกระจายขนาดของโพรงมีความสำคัญต่อสมบัติด้านกำลัง ความทนทาน และค่าการนำความร้อน [9] ขนาดโพรงอากาศจะส่งผลต่อกำลังอัดและสมบัติต่าง ๆ ตามข้อกำหนด ACI532.3R-93 แนะนำให้ขนาดโพรงอากาศมีค่าอยู่ในช่วง 200 ไมโครเมตร [10] อีกทั้งคุณภาพของน้ำยาผลิตฟองโฟม (Foaming Agent) ก็มีส่วนสำคัญมากในการทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ [11] และพบว่าค่าความพรุนเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง [11,12,13] การกระจายขนาดของโพรงอากาศมีอิทธิพลต่อกำลังของโฟมคอนกรีต [14] ค่า SPAN ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคประเภทผง (Powders) รูพรุน (Pores) ละอองของเหลว (Droplets) ฟองอากาศ (Bubbles) [15]

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าขนาดของโพรงอากาศและการกระจายขนาดของโพรงอากาศ มีผลต่อกำลังรับแรงอัด ดังนั้นหากสามารถประเมินความแตกต่างของค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศภายใต้รูปแบบฟองอากาศที่แตกต่างกัน ที่เกิดจากการใช้น้ำยาผลิตฟองโฟมและเครื่องฉีดฟองโฟมที่ต่างชนิดกัน ก็จะมีประโยชน์อย่างยิ่งในผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเพื่อให้มีสมบัติด้านกำลังตามที่ต้องการนำไปใช้งาน งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาผลของลักษณะฟองอากาศต่อกำลังรับแรงอัดโดยการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการประเมินค่ากำลังของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

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 2 ชนิดที่จำหน่ายในท้องตลาด ได้แก่ สารสร้างฟองโฟม A ซึ่งเป็นสารกักกระจายฟองอากาศซึ่งดัดแปลงจากสารลดแรงตึงผิวจากธรรมชาติและสารสังเคราะห์ (Surfactant Blend) สารสร้างฟองโฟม B เป็นสารสร้างฟองโฟมสังเคราะห์ (Chemical Base) งานวิจัยนี้ได้กำหนดอัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมและความดันที่ใช้ฉีดฟองโฟมที่ไม่เท่ากันเพื่อให้ขนาดฟองอากาศและการกระจายขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตมีความหลากหลาย ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบสมบัติสารสร้างฟองเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบสมบัติสารสร้างฟองโฟม

สารสร้างฟอง	ความดันที่ใช้ฉีดฟองโฟม (kg/cm ²)	อัตราส่วนสารสร้างฟองต่อน้ำ (F:W)	อัตราการขยายตัวของฟองโฟม	อัตราการไหลของโฟม (litre/sec.)
A	4.5	1:20	41	1.44
		1:30	44	1.41
		1:40	39	1.41
	5.0	1:20	39	1.60
		1:30	46	1.54
		1:40	39	1.60
	5.5	1:20	46	1.70
		1:30	48	1.75
		1:40	42	1.70
B	4.5	1:20	36	1.25
		1:30	42	1.28
		1:40	36	1.27
	5.0	1:20	39	1.45
		1:30	44	1.46
		1:40	39	1.44
	5.5	1:20	41	1.75
		1:30	44	1.61
		1:40	39	1.70

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

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

2) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด รุ่น MD-500MT

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

ตารางที่ 2 สูตรผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศและจำนวนตัวอย่าง

ความดันที่ฉีดฟองโฟม (kg/cm ²)	Density 1,800 kg/m ³ S:C =2:1 ,W/C= 0.65					
	สาร A			สาร B		
	F:W			F:W		
	1:20	1:30	1:40	1:20	1:30	1:40
4.5	9	9	9	9	9	9
5.0	9	9	9	9	9	9
5.5	9	9	9	9	9	9
รวม	27	27	27	27	27	27
รวมจำนวนก้อนตัวอย่าง 162 ก้อน						

2.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมีดังนี้

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

2) ใส่ทรายและซีเมนต์ลงในโม่ผสมคอนกรีตแล้วเปิดเครื่องผสมให้ทรายและซีเมนต์คลุกเคล้ากัน

3) เมื่อทรายและซีเมนต์ คลุกเคล้ากันดีแล้ว ใส่น้ำลงไปโม่ผสมคอนกรีต โดยระหว่างเติมน้ำให้เปิดเครื่องผสมคอนกรีตเพื่อให้หน้าที่เติมน้ำไปเข้ากันได้กับทรายและซีเมนต์

4) เมื่อน้ำผสมกับทรายและซีเมนต์จนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ทำการฉีดโฟมเหลวลงไป โดยระหว่างการฉีดโฟมเหลวต้องเปิดเครื่องผสมคอนกรีตดังรูปที่ 1

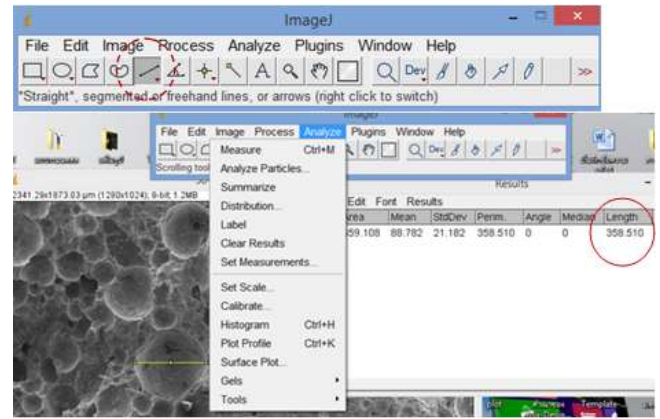
5) เมื่อซีเมนต์มอร์ต้ากับโฟมเหลวคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จึงหยุดเครื่องผสม ในการผสมในแต่ละครั้งไม่ควรใช้เวลาเกิน 5 นาที ทำการตรวจสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตแล้วจึงนำคอนกรีตที่ได้ไปเทลงแบบหล่อ



รูปที่ 1 การฉีดโฟมเหลวลงในซีเมนต์มอร์ต้า

2.4 การทดสอบวิเคราะห์ตัวอย่าง

การทดสอบวิเคราะห์ขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยใช้ภาพถ่ายที่ได้จากการส่องขึ้นตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) เตรียมขึ้นตัวอย่างจากก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน นำก้อนตัวอย่างมาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง ตามมาตรฐาน ASTM C457 จากนั้นในแต่ละส่วนทำการตัดโดยไม่ให้ผิวของโพรงเสียหาย ให้ขนาดของขึ้นตัวอย่างมีขนาดประมาณ 1x1x2 เซนติเมตร เพื่อให้มีขนาดเท่าฐานวาง (Stub) ก่อนนำขึ้นตัวอย่างเข้าสู่เครื่อง ต้องทำการฉาบผิวขึ้นตัวอย่างด้วยเครื่องฉาบผิวที่เรียกว่า Sputter Coater ในการถ่ายภาพ SEM สามารถเลือกกำลังขยายตามความต้องการที่จะใช้ในการศึกษาแล้วนำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศในแต่ละสูตรดังรูปที่ 2 นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดฟองอากาศ ที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

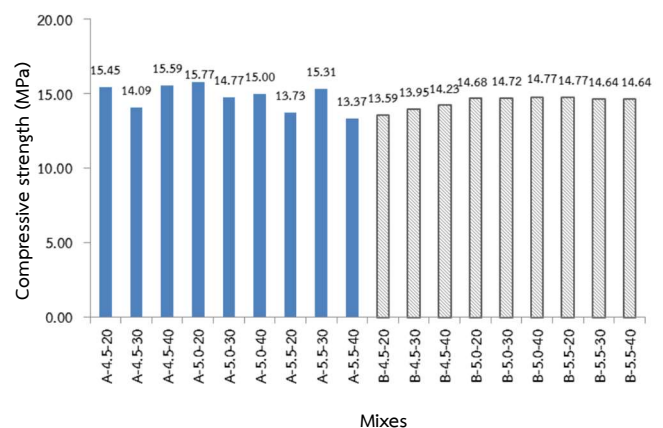


รูปที่ 2 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศโดยโปรแกรม ImageJ

3. ผลการทดสอบ

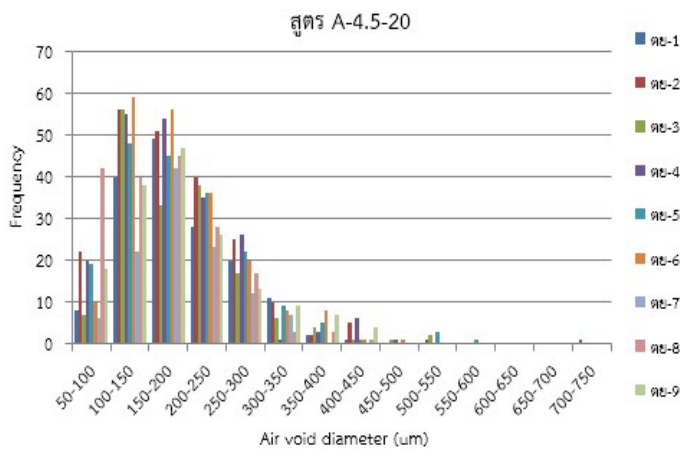
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและผลวิเคราะห์การกระจายขนาดฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ 28 วัน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศนำค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดในแต่ละสูตรมาแสดงดังรูปที่ 3 พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้สารสร้างฟองโฟม A จำนวน 9 สูตร มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยระหว่าง 13.37-15.77 เมกะปาสคาล และกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเมื่อใช้สารสร้างฟองโฟม B ทั้งหมด 9 สูตร อยู่ระหว่าง 13.59-14.77 เมกะปาสคาล

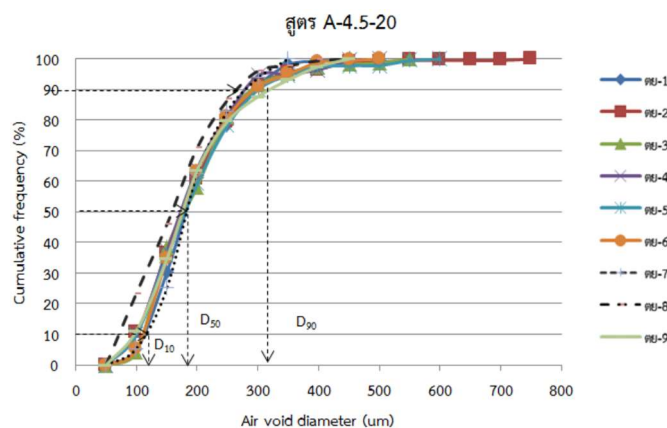


รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศจำนวน 18 สูตร

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ฟองอากาศจากภาพถ่าย SEM ด้วยโปรแกรม ImageJ นำมา แสดงผลการกระจายขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในคอนกรีต มวลเบาแบบเติมฟองอากาศดังตัวอย่างในรูปที่ 4 โดยแบ่ง ช่วงความถี่ของขนาดฟองอากาศเท่ากับ 50 ไมโครเมตรและ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความถี่สะสมของ ขนาดฟองอากาศกับขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต โดย D_{10} หมายถึง ค่าเปอร์เซ็นต์ความถี่สะสมของขนาด ฟองอากาศที่ 10 เปอร์เซ็นต์ D_{50} หมายถึง ค่าเปอร์เซ็นต์ ความถี่สะสมของขนาดฟองอากาศที่ 50 เปอร์เซ็นต์ และ D_{90} หมายถึง ค่าเปอร์เซ็นต์ความถี่สะสมของขนาดฟองอากาศที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 5

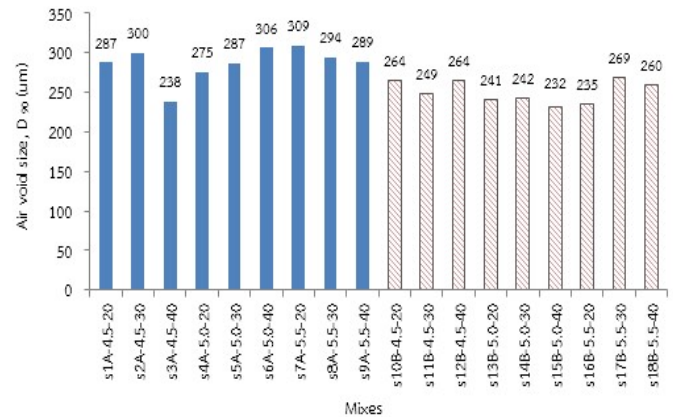


รูปที่ 4 การกระจายขนาดของฟองอากาศในสูตร A-4.5-20



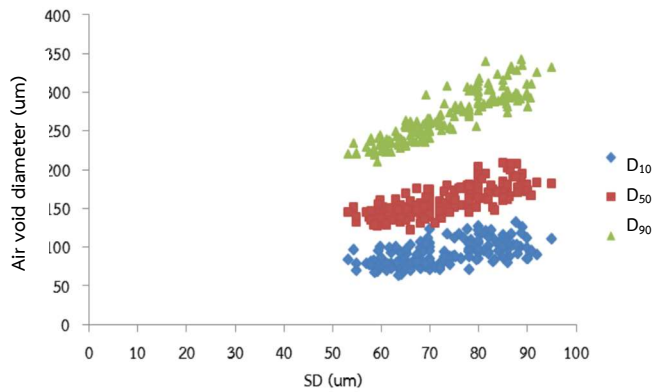
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความถี่สะสมกับช่วงขนาด ฟองอากาศสูตร A-4.5-20

จากผลการวิเคราะห์เมื่อพิจารณาขนาดฟองอากาศที่ D_{90} พบว่ามีค่าระหว่าง 200-350 ไมโครเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของ ขนาดฟองอากาศที่ D_{90} แสดงดังในรูปที่ 6 ขนาดฟองอากาศที่ ได้จากการใช้สารสร้างฟองโฟม A มีค่าเฉลี่ยในช่วง 238-309 ไมโครเมตร ส่วนขนาดฟองอากาศที่ได้จากการใช้สารสร้างฟอง โฟม B มีค่าเฉลี่ยขนาดฟองอากาศที่ D_{90} ในช่วง 232-269 ไมโครเมตร

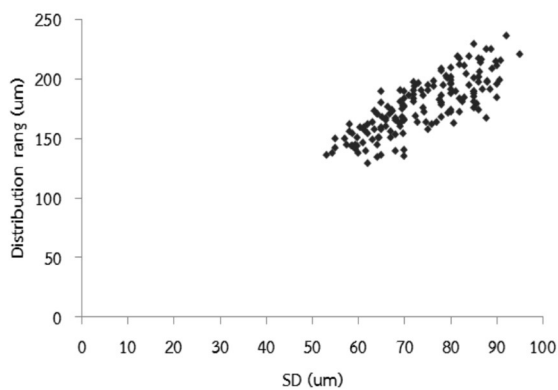


รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยขนาดฟองอากาศที่ D_{90} จำนวน 18 สูตร

เมื่อนำค่าขนาดฟองอากาศที่ D_{10} , D_{50} และ D_{90} มาสร้าง ความสัมพันธ์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟองอากาศ แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งพบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาด ฟองอากาศอยู่ในช่วง 50-100 ไมโครเมตร ขนาดฟองอากาศที่ D_{10} , D_{50} และ D_{90} มีค่าระหว่าง 50-150 ไมโครเมตร 100-200 ไมโครเมตร และ 200-350 ไมโครเมตรตามลำดับ โดยพบว่า เมื่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพิ่มขึ้นมีผลให้ขนาดฟองอากาศที่ D_{10} , D_{50} และ D_{90} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อใช้ ความกว้างของการกระจายขนาดฟองอากาศ (Distribution Rang) มาสร้างความสัมพันธ์กับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าเมื่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพิ่มขึ้น ความกว้างของ การกระจายจะมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 8

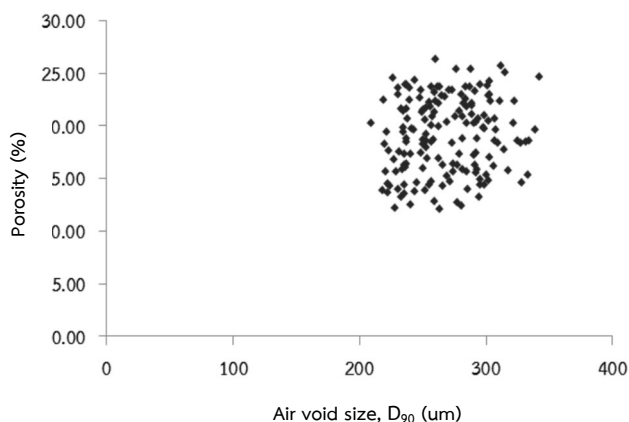


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่า D_{10} , D_{50} และ D_{90}



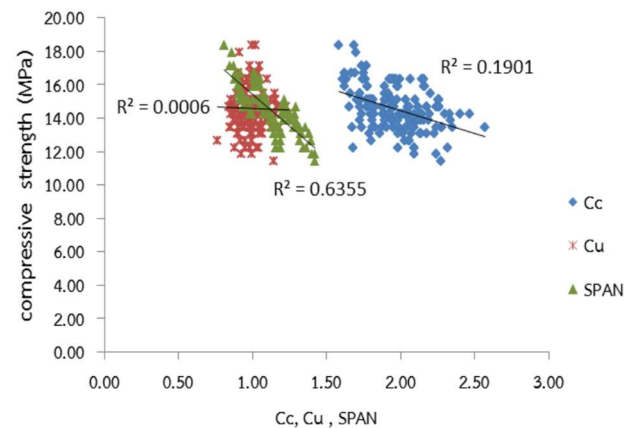
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับความกว้างของการกระจายขนาด

เมื่อพิจารณาค่าความพรุนพบว่ามีค่าระหว่าง 12-26 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับขนาดฟองอากาศที่ D_{90} พบว่าเมื่อขนาดฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นความพรุนของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับขนาดฟองอากาศที่ D_{90}

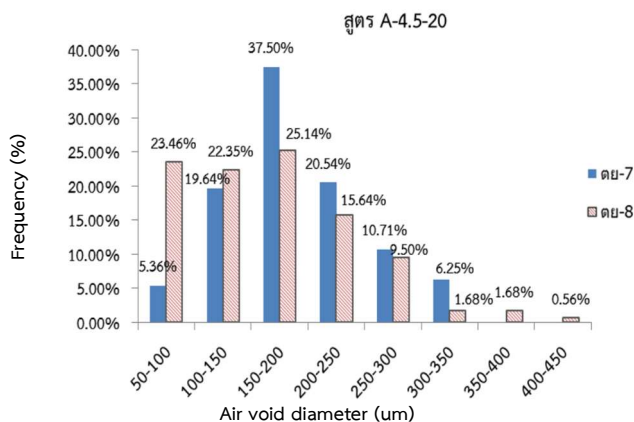
ในงานวิจัยได้นำค่า SPAN มาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศและประยุกต์ใช้การกระจายขนาดของเม็ดดินค่า $C_u = D_{60}/D_{10}$ และค่า $C_c = (D_{30})^2/(D_{10} \cdot D_{60})$ เพื่อใช้เป็นค่าที่บ่งชี้ความแตกต่างของขนาดและการกระจายขนาดฟองอากาศที่จะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ พบว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสร้างกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่า C_c , C_u และ SPAN ดังรูปที่ 10 พบว่าค่า R square ของ SPAN มีค่ามากกว่าค่า R square ของ C_c และ C_u ในงานวิจัยนี้จึงตัดสินใจใช้ค่า SPAN เป็นค่าที่บ่งชี้ความแตกต่างของการกระจายขนาดฟองอากาศที่จะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่า C_c , C_u และ SPAN

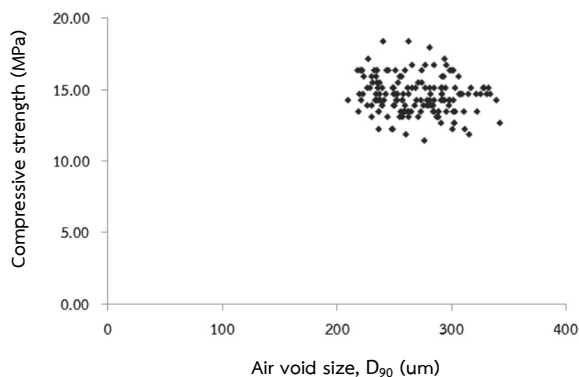
ค่า SPAN มีค่าระหว่าง 0.81 -1.42 ซึ่งความแตกต่างของค่า SPAN จะใช้เป็นตัวชี้วัดปริมาณฟองอากาศที่พบในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศในแต่ละก้อนตัวอย่างใน แต่ละสูตร โดยอธิบายได้จากรูปที่ 5 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความถี่สะสมกับช่วงขนาดฟองอากาศในสูตร A-4.5-20 จะเห็นว่าลักษณะกราฟของก้อนตัวอย่างที่ 8 (ตย-8) จะมีความแตกต่างจากเส้นกราฟของก้อนตัวอย่างอื่น ๆ โดยเส้นกราฟในก้อนตัวอย่างที่ 8 จะเยื้องไปทางซ้าย และพบว่าค่า SPAN ของก้อนตัวอย่างที่ 8 มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1.24 และก้อนตัวอย่างที่ 7 (ตย-7) มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.81 และจากรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาปริมาณฟองอากาศจะพบว่าก้อนตัวอย่างที่ 8 มีขนาดฟองอากาศในช่วง 50-100 ไมโครเมตร

23.46 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ก้อนตัวอย่างที่ 7 มีขนาดฟองอากาศในช่วง 50-100 ไมโครเมตรเพียง 5.36 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และขนาดฟองอากาศในช่วง 100-150 ไมโครเมตร ก้อนตัวอย่างที่ 8 มี 22.35 เปอร์เซ็นต์ ก้อนตัวอย่างที่ 7 มี 19.64 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าก้อนตัวอย่างที่ 8 มีขนาดฟองอากาศในช่วง 50-150 ไมโครเมตรมากกว่าก้อน ตัวอย่างที่ 7 แต่จะลดน้อยลงและน้อยกว่าก้อนตัวอย่างที่ 7 ในช่วง 150-350 ไมโครเมตร ซึ่งในช่วงขนาดฟองอากาศ 150-200 ไมโครเมตร ก้อนตัวอย่างที่ 7 จะพบ 37.50 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 11

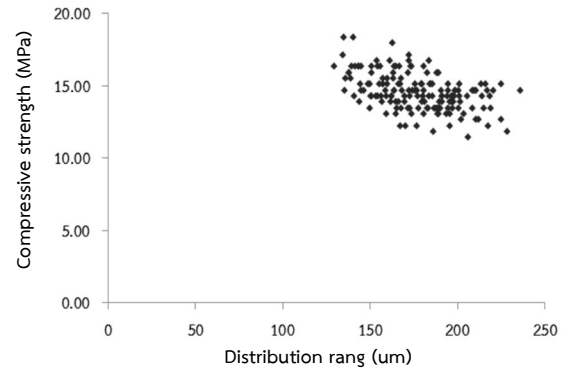


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ฟองอากาศกับช่วงของขนาดฟองอากาศของสูตร A-4.5-20

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของฟองอากาศนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับขนาดฟองอากาศที่ D_{90} และความกว้างของกระจายขนาดฟองอากาศ แสดงดังรูปที่ 12 และ 13

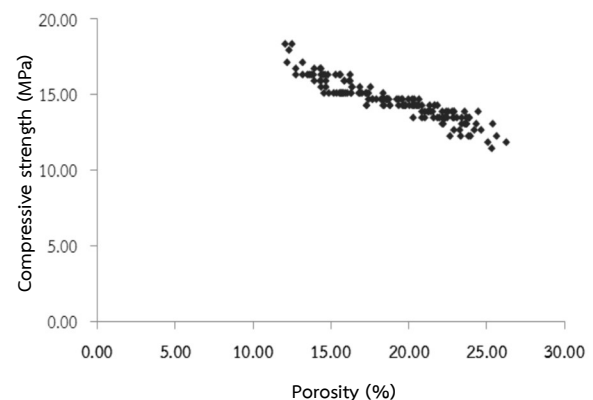


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับขนาดฟองอากาศที่ D_{90}



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับความกว้างของกระจายขนาดฟองอากาศ

จากรูปที่ 12 และ 13 พบว่าเมื่อขนาดฟองอากาศที่ D_{90} และความกว้างของการกระจายขนาดฟองอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นมีผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า SPAN หรือใช้ตัวย่อว่า Sp สร้างกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 14 พบว่าเมื่อค่า Sp มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งค่า Sp ที่มีค่าสูงขึ้นเป็นผลจากการที่มีขนาดฟองอากาศในช่วง 50-150 ไมโครเมตรเพิ่มขึ้น แต่ขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตมีขนาดฟองอากาศที่ใกล้เคียงกัน ความคละกันของขนาดฟองอากาศน้อยลง จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดในคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศลดลง



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่าความพรุน

จากรูปที่ 15 เมื่อนำค่าความพรุนมาสร้างความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดพบว่าความพรุนเพิ่มขึ้นมีผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยหลายท่าน [11,12,13]

4 สรุป

จากการศึกษาผลของลักษณะฟองอากาศต่อกำลังรับแรงอัดคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.65 โดยใช้สารสร้างฟองโฟม 2 ชนิด อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:20, 1:30 และ 1:40 และแรงดันขณะฉีดฟองโฟมเท่ากับ 5.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรบ่มตัวอย่างในอากาศ 28 วัน พบว่า

1) พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้สารสร้างฟองโฟม A มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยระหว่าง 13.37-15.77 เมกะปาสคาล และกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเมื่อใช้สารสร้างฟองโฟม B อยู่ระหว่าง 13.59-14.77 เมกะปาสคาล

2) ขนาดฟองอากาศที่ D_{90} ที่ได้จากการใช้สารสร้างฟองโฟม A มีค่าเฉลี่ยในช่วง 238-309 ไมโครเมตร ส่วนขนาดฟองอากาศที่ได้จากการใช้สารสร้างฟองโฟม B มีค่าเฉลี่ยขนาดฟองอากาศที่ D_{90} ในช่วง 232-269 ไมโครเมตร ซึ่งพบว่าชนิดของสารสร้างฟองโฟมที่ต่างกัน การเพิ่มปริมาณน้ำในอัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำและความดันที่ใช้ฉีดฟองโฟมที่ต่างกัน เป็นปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะฟองอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของสารสร้างฟองชนิดนั้น ๆ

3) ค่า SPAN (Sp) มีค่าระหว่าง 0.81 -1.42 ใช้เป็นตัวชี้วัดปริมาณฟองอากาศที่พบในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศในแต่ละก้อนตัวอย่างในแต่ละสูตร และเป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ความแตกต่างของการกระจายขนาดฟองอากาศที่จะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศได้

(4) เมื่อความพรุนเพิ่มขึ้น ขนาดฟองอากาศที่ D_{90} และความกว้างของการกระจายขนาดฟองอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง ค่า Sp ใช้เป็นตัวบ่งชี้ความแตกต่างของการกระจายขนาดของฟองอากาศ ซึ่งค่า Sp ที่สูงขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ชีก้า (ประเทศไทย) จำกัด บริษัท ซากูระโตโก จำกัด และ บริษัทอินฟินิตี้คอนกรีตเทคโนโลยี

จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์สารสร้างฟองสำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีสำหรับการใช้อุปกรณ์และสถานที่

เอกสารอ้างอิง

- [1] Narayanan N, Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. 2000;22(5):321-329.
- [2] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตตร. *คอนกรีตเทคโนโลยี*. กรุงเทพมหานคร: คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค; 2543.
- [3] Kumar NV, Arunkumar C, Srinivasa SS. Experimental study on mechanical and thermal behavior of foamed concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(9):8753-8760.
- [4] Neville AM. *Properties of Concrete*. Harlow (England): Longman; 1995.
- [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]. Nottingham (UK): University of Nottingham, Department of Civil Engineering; 2015.
- [7] ธนกร ทวีวุฒิ, นท แสงเทียน, วิวัฒน์ พัวทัศนานนท์, สถาพร โภคา. ผลของความหนาแน่นและอัตราส่วนที่มีต่อปริมาณช่องว่างอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ใส่สารลดน้ำปริมาณมาก. *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 ขาภิรมย์. *การพัฒนากำลังคอนกรีตเซลลูโลสด้วยแก้ว ถ่านหินและเส้นใยสังเคราะห์* [วิทยานิพนธ์]

วิศวกรรมศาสตร์ดุสิตบัณฑิต]. นครราชสีมา:
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2561.

- [11] Visagie M. *The effect of microstructure on the properties of foamed concrete* [dissertation]. Pretoria (South Africa): University of Pretoria; 2000.
- [12] Lian C, Zhuge Y, Beecham S. The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*. 2011;25(11):4294-4298.
- [13] Ryshkevitch E. Compression strength of porous sintered alumina and zirconia. *Journal of the American Ceramic Society*. 1953;36(2):65-68.
- [14] Kearsley EP, Visagie M. Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters. *Concrete Beton*. 2002;101:9-13.
- [15] Moghadam H, Zaker M, Samimi A. Mono-Size Distribution Index (MSDI): A new criterion for the quantitative description of size distribution. *Journal of Particle Science and Technology*. 2019;5(2):71-76.