

ผลกระทบของปริมาณทรายและน้ำต่อความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส

Effects of Sand and Water Quantity to Stress-Strain of Cellular Lightweight Concrete

จารุพันธ์ ไพพูพลิมพ์* เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Jaruphan Phaiphulphim* Griengsak Kaewkulchai

Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warinchamrap, Ubonratchathani 34190

Tel: 08-7870-4841 E-mail: performance.p@hotmail.com

บทคัดย่อ

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมของฟองอากาศ ซึ่งเกิดจากการเติมโฟมเหลวลงรูปที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตแทนการใช้หินหรือมวลรวมหยาบ ปริมาณฟองอากาศที่เติมเข้าไปมีผลต่อความหนาแน่นและคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของปริมาณทรายและน้ำต่อความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 และ 0.65 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 ทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน การศึกษาพบว่าความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและจุดวิบัติมีค่าประมาณ 0.0027-0.0035 และ 0.0036-0.0044 ตามลำดับ และพบว่าอัตราส่วนผสมของทรายต่อซีเมนต์และอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อค่าความเค้นและความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส โดยปริมาณน้ำที่มากขึ้นและปริมาณทรายที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความเค้นและความเครียดมีค่าลดลง

คำหลัก ความเค้น-ความเครียด คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส 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 air bubbles affect the density and the properties of cellular lightweight concrete. This paper presents a study of sand and water quantity to the stress-strain of cellular lightweight concrete having wet density of 1,800 kg/m³ using water to cement ratios of 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 and 0.65 and sand to cement ratios of 1:1, 2:1 and 3:1. Samples were tested at 28 and 56 days. It was found that the strains of cellular lightweight concrete at the maximum strength and the failure strength are about 0.0027-0.0035 and 0.0036-0.0044 respectively. The results have shown that a mixture of sand to cement and water to cement ratio affects the stress and strain of cellular lightweight concrete. The higher amount of water results in lower stress and strain.

Keywords: stress-strain, cellular lightweight concrete, foam concrete

1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างผนังอาคารและอิฐบล็อกปูพื้น เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีจึงสามารถช่วยลดการใช้พลังงานลงได้ คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส (Cellular

Lightweight Concrete; CLC) เป็นคอนกรีตที่ผลิตโดยวิธี Pre-formed foam คือการสร้างฟองโฟมหรือฟองอากาศปริมาณสูงขึ้นมา ก่อน จากนั้นค่อยฉีดโฟมเหลวเข้าไปผสมกับมอร์ตาร์ ซึ่งเป็นกระบวนการเติมฟองอากาศเข้าสู่เนื้อคอนกรีตเพื่อให้ฟองอากาศเข้าไปแทรกตัวตามเนื้อคอนกรีตแทนการใช้มวลรวมหยาบปกติ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวเนื้อคอนกรีตที่ได้จะมีรูพรุนมากและมีน้ำหนักเบา การผลิตคอนกรีตโดยวิธีนี้สามารถควบคุมกระบวนการเกิดโพรงอากาศภายในคอนกรีตได้ดีและใช้กันอย่างแพร่หลาย [1] คุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ [2-4] ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ใช้งานอยู่ระหว่าง 300-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [5] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ถึง 230 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าความหนาแน่นเพียงเท่ากับ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [6] และผลการศึกษาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าแตกต่างกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน ACI สูงสุดเท่ากับ 29 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าต่ำกว่าเสมอ [7] นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่นๆ ด้านกำลังที่ได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยมาแล้ว เช่น กำลังรับแรงดึง กำลังรับโมเมนต์ดัดและกำลังรับแรงเฉือน เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะเป็นฐานข้อมูลที่สามารถนำไปพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเพื่อใช้ในงานโครงสร้างได้

การนำคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสไปใช้ในงานก่อสร้างที่เป็นส่วนของงานโครงสร้าง จำเป็นที่จะต้องทราบคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งนั่นคือความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อประกอบการพิจารณาออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้านโครงสร้าง งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของปริมาณทรายและน้ำต่อความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ที่ค่าความหนาแน่นเพียงเท่ากับ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเพื่อใช้ในงานก่อสร้างในส่วนที่เป็นงานโครงสร้างต่อไป

2. วิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบมีดังนี้

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้สำหรับงานโครงสร้าง
- 2) น้ำสะอาด
- 3) ทรายตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายแม่น้ำมูลในจังหวัดอุบลราชธานี เป็นทรายที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และไม่เปียกชื้น เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติของทรายพบว่ามีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.64 ค่าโมดูลัสความละเอียด (fineness modulus) อยู่ที่ประมาณ 2.28
- 4) น้ำยาผลิตฟองโฟม (foaming agent) ดัดแปลงมาจากสารลดแรงตึงผิวจากธรรมชาติและสารสังเคราะห์ ซึ่งผลการทดสอบคุณสมบัติในการใช้งานของน้ำยาผลิตฟองโฟมแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำยาผลิตฟองโฟม

คุณสมบัติ	ปริมาณ/หน่วย
ความถ่วงจำเพาะ	1.05
อัตราส่วนน้ำยาโฟมต่อน้ำ	1:50 เท่า
อัตราการขยายตัวของโฟม	40 เท่า
อัตราการไหลของโฟม	1.09 ลิตรต่อวินาที
แรงดันอากาศที่ใช้	4.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ความคงรูปของฟองโฟม	15 นาที

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

- 1) อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย โม่ผสมคอนกรีต แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอก (cylinder) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร และเครื่องผลิตโฟมเหลว (foam generator)
- 2) เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตในงานวิจัยนี้มีชื่อว่า ESH Testing Limited ดังรูปที่ 1 เป็นเครื่องทดสอบการกดแบบแรงกระทำต่อเนื่อง (quasi static) พร้อมอุปกรณ์วิเคราะห์ผล มีความสามารถทำงานได้ถึง 2,000 กิโลนิวตัน และมีระยะกดมากที่สุด 200 มิลลิเมตร โดยมีระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมผสมกับระบบไฮดรอลิก (hydraulic) สามารถบันทึกผลการทดสอบเป็นแรงกด (load) และระยะกด (displacement) ได้อย่างละเอียดทุกๆ ระยะการกด 0.04 มิลลิเมตร โดยการทดสอบจะแสดงผลเป็นตัวเลขและเขียนเป็นกราฟได้ทันทีผ่านระบบคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบแบบ Quasi static Compressive

2.3 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างทดสอบผลิตโดยเตรียมเครื่องผลิตโฟมเหลวประกอบด้วย บั้มลม และถังแรงดันผลิตโฟมเหลว โดยผสมน้ำยาเพิ่มฟองโฟมเหลวกับน้ำในอัตราส่วน 1: 50 ใส่ลงในถังผลิตโฟมเหลว ต่อมั้มลมเข้ากับเครื่องผลิตโฟมเหลวแล้วปรับค่าแรงดันของถังให้เหมาะสมที่ประมาณ 5.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.49 เมกะปาสกาล) จากนั้นใส่ทรายและซีเมนต์ลงในโม่ผสมคอนกรีตแล้วเปิดเครื่องผสมให้ทรายและซีเมนต์คลุกเคล้ากันได้ดีสม่ำเสมอ เมื่อทรายและซีเมนต์คลุกเคล้ากันดีแล้วค่อยๆ เติมน้ำลงไปโม่ผสมคอนกรีต โดยระหว่างเติมน้ำให้เปิดเครื่องผสมคอนกรีตเพื่อให้ น้ำที่เติมลงไปผสมเข้ากันได้ดีกับทรายและซีเมนต์เมื่อน้ำผสมกับทรายและซีเมนต์จนเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอแล้ว (ซีเมนต์มอร์ตาร์) ทำการฉีดโฟมเหลวลงไปผสมให้ได้หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยจับเวลาเทียบกับอัตราการฉีดโฟม ในระหว่างการฉีดโฟมเหลวเครื่องผสมคอนกรีตต้องทำงานตลอดเวลา หลังจากซีเมนต์มอร์ตาร์กับโฟมเหลวผสมเข้ากันได้ดีแล้วจึงหยุดเครื่องผสม ในการผสมในแต่ละครั้งไม่ควรใช้เวลาเกิน 5 นาที ทำการตรวจสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตแล้วนำคอนกรีตที่ได้ไปเทลงแบบหล่อ

2.4 การทดสอบตัวอย่าง

การทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสจะใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 39 การทดสอบในงานวิจัยนี้จะการทดสอบตัวอย่างโดยการให้แรงกดจนกว่าตัวอย่างจะเกิดการวิบัติ การทำงานของเครื่องทดสอบจะใช้ระบบคอมพิวเตอร์เป็นตัวสั่งการให้เครื่องทดสอบไฮดรอลิกทำงานโดยใช้แรงกดกดตัวอย่างจนวิบัติ ซึ่งเครื่องทดสอบจะรายงานผลของค่าแรงกดที่ค่าระยะการกดที่ตำแหน่งต่างๆ ผ่านตัวเซ็นเซอร์ที่ติดไว้บนหัวกดสำหรับการวัดระยะการหดตัวของตัวอย่าง ซึ่งสามารถวัดค่าที่มีความละเอียดสูงส่งต่อไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องคอมพิวเตอร์จะบันทึกผลเป็นตัวเลขที่ได้แสดงค่าของแรงกดและระยะการกดที่ตำแหน่งต่างๆ พร้อมทั้งแสดงกราฟเส้นความสัมพันธ์ของแรงกดและระยะการกด ซึ่งจะต้องนำไปแปลงเป็นกราฟเส้นความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดต่อไป ซึ่งรายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส

Density (kg/m ³)	Ratio		Number of samples	
	S:C	W/C	The 28-day test.	The 56-day test.
1,800	1:1	0.40	24	24
		0.45	24	24
		0.50	24	24
	2:1	0.45	24	24
		0.50	24	24
		0.55	24	24
	3:1	0.55	24	24
		0.60	24	24
		0.65	24	24
			Total = 432	

หมายเหตุ S:C คืออัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์, W/C คืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

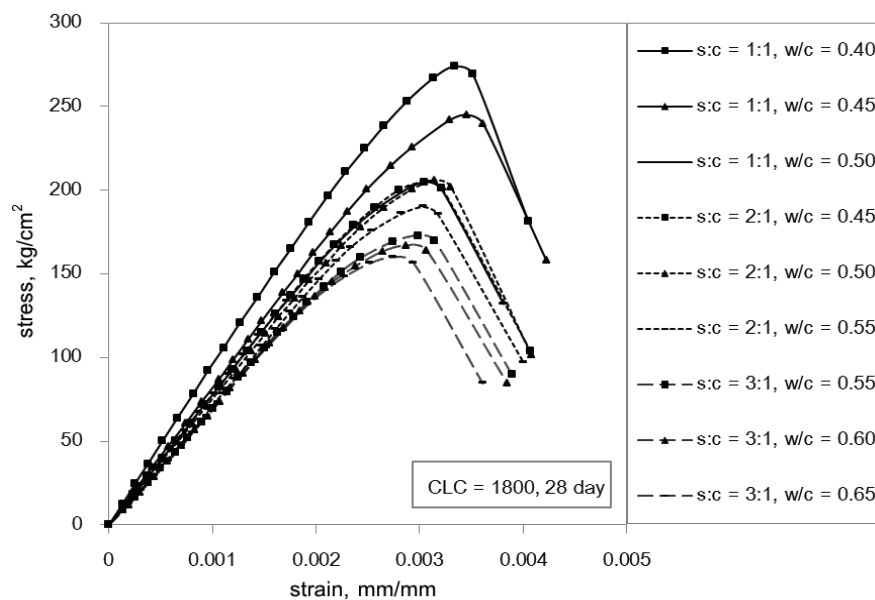
3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่อายุ 28 วัน

ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ที่ความหนาแน่น 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน

Density (kg/m ³)	S:C	W/C	f _c (kg/cm ²)		Strain(mm/mm)	
			Maximum strength	Failure strength	At f _c maximum strength	At f _c failure strength
1,800	1:1	0.40	274	181	0.0033	0.0040
		0.45	245	158	0.0034	0.0042
		0.50	205	132	0.0031	0.0038
	2:1	0.45	205	104	0.0030	0.0041
		0.50	206	102	0.0031	0.0041
		0.55	190	97	0.0030	0.0040
	3:1	0.55	173	90	0.0030	0.0039
		0.60	167	84	0.0029	0.0038
		0.65	160	84	0.0027	0.0036



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน

จากตารางที่ 3 พบว่าตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 160-274 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดระหว่าง 0.0027-0.0034 และที่จุดวิบัติระหว่าง 0.0036-0.0042 ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 มีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 มีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3:1 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะตัวอย่างที่มี

อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่ต่ำจะมีปริมาณโพมและน้ำที่ใช้ผสมน้อยผลิตโพมน้อยกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่สูง ทำให้หากรวมปริมาณน้ำผสมมอร์ตาร์และน้ำผสมน้ำยาโพมด้วยกัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่สูงจะมีปริมาณโพมมากกว่าและอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงกว่าทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่า [8] ในกรณีที่ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 แต่ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำเท่ากับ 0.50 กลับมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ซึ่งมีความขัดแย้งกับผลการทดสอบอื่น อาจเป็นเพราะการเกิดฟองโพมในกระบวนการผสมคอนกรีตซึ่งอาจเกิดจากใช้ปริมาณน้ำน้อยเกินไป

ทำให้โฟมเหลวและมอร์ตาร์ผสมกันได้ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดจุดบกพร่องในเนื้อคอนกรีตซึ่งจุดบกพร่องเป็นปัจจัยที่ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง [4, 9] ทำให้แนวโน้มไม่เป็นไปตามผลทดสอบอื่น

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่ทดสอบที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2 จะสังเกตเห็นว่าตัวอย่างที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สูงจะให้ค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัด (ความเค้น) สูงสุดสูงตามไปด้วย นั่นคือความเครียดจะแปรผันตรงกับความเค้น และพบว่าอัตราส่วนผสมของทรายและน้ำต่อซีเมนต์จะมีผลต่อความเค้นและความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าด้วย ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของทรายเท่ากับ 1:1 มีอัตราส่วนผสมของน้ำเท่ากับ 0.40 ทำให้ได้ค่าความเค้นและความเครียดที่สูงที่สุด ส่วนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของทรายเท่ากับ 3:1 มีอัตราส่วนผสมของน้ำเท่ากับ 0.65 ทำให้ได้ค่าความเค้นและความเครียดต่ำที่สุด

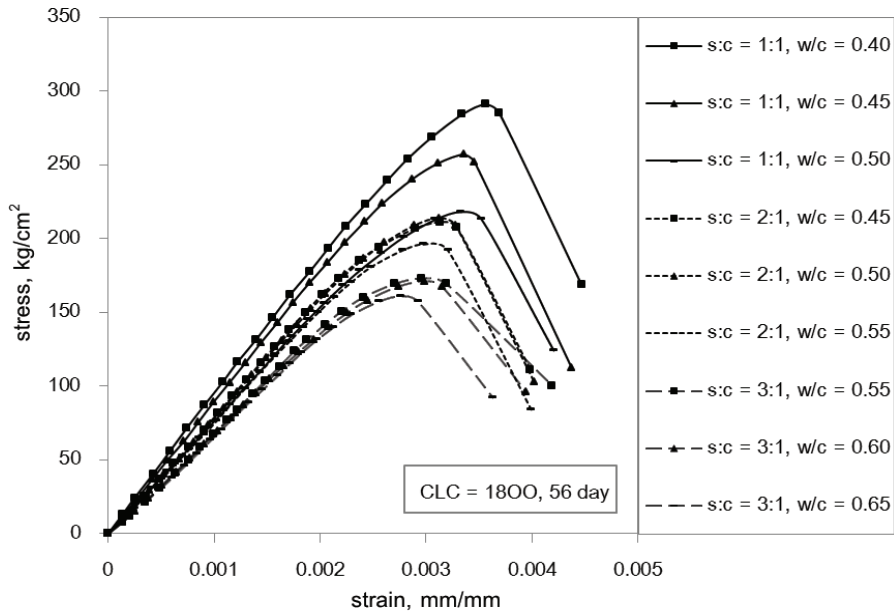
3.2 ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 56 วัน

ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่ความหนาแน่น 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 56 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 161-291 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความเครียดที่จุดกำลังรับ

แรงอัดสูงสุดระหว่าง 0.0028-0.0035 และที่จุดวิบัติระหว่าง 0.0036-0.0044 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีอายุ 56 วัน สามารถพัฒนากำลังได้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีอายุ 28 วัน ซึ่งจากผลของการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางที่สอดคล้องกันกับผลการทดสอบของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน คือตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 มีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 มีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3:1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่ทดสอบที่อายุ 56 วัน สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3 จะสังเกตเห็นว่าตัวอย่างที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สูงจะให้ค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงตามไปด้วย ซึ่งพฤติกรรมการรับกำลังของคอนกรีตทั้งที่อายุ 28 และ 56 วัน มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและจะเห็นว่าหลังจากคอนกรีตมีอายุได้ 28 วัน ก็ยังสามารถพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นได้อีกแต่ก็เพิ่มขึ้นไม่มาก ซึ่งกำลังของคอนกรีตก็จะเริ่มคงที่รวมทั้งค่าความเครียดของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 56 วัน มีความแตกต่างกันไม่มาก

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่าความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 56 วัน

Density (kg/m ³)	S:C	W/C	f _c (kg/cm ²)		Strain(mm/mm)	
			Maximum strength	Failure strength	At f _c maximum strength	At f _c failure strength
1,800	1:1	0.40	291	169	0.0035	0.0044
		0.45	257	113	0.0034	0.0043
		0.50	218	124	0.0033	0.0042
	2:1	0.45	211	111	0.0031	0.0040
		0.50	214	103	0.0031	0.0040
		0.55	196	84	0.0030	0.0040
	3:1	0.55	173	100	0.0030	0.0042
		0.60	171	96	0.0030	0.0039
		0.65	161	92	0.0028	0.0036



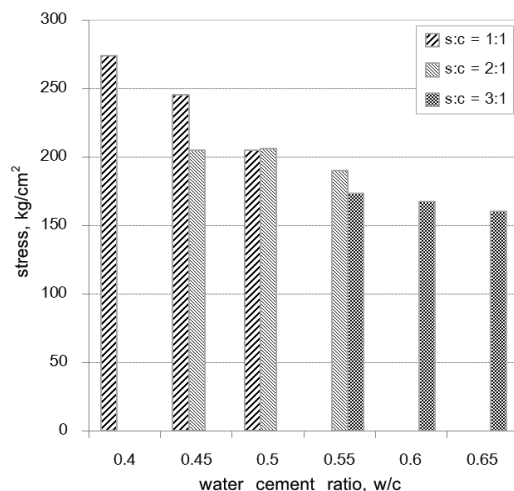
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่อายุ 56 วัน

สรุปได้ว่า คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสมีค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและจุดวิบัติประมาณ 0.0027-0.0035 และ 0.0036-0.0044 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3-4 ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของทรายเท่ากับ 1:1 มีอัตราส่วนผสมของน้ำเท่ากับ 0.40 ทำให้ได้ค่าความเค้นและความเครียดสูงสุด ส่วนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของทรายเท่ากับ 3:1 มีอัตราส่วนผสมของน้ำเท่ากับ 0.65 ทำให้ได้ค่าความเค้นและความเครียดต่ำที่สุด

3.3 ผลของอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์

3.3.1 ผลของอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด
เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผลิตโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากันแต่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกันดังแสดงตามรูปที่ 4-5 ซึ่งเป็นผลการทดสอบที่ 28 และ 56 วัน พบว่าผลของอัตราส่วนทรายต่อกำลังรับแรงอัดจะมีความชัดเจนที่สุดในกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 1:1 และ 2:1 ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 มีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่า ส่วนกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 1:1 และ 2:1 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมาก ส่วนกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.55 มีอัตราส่วนทรายต่อ

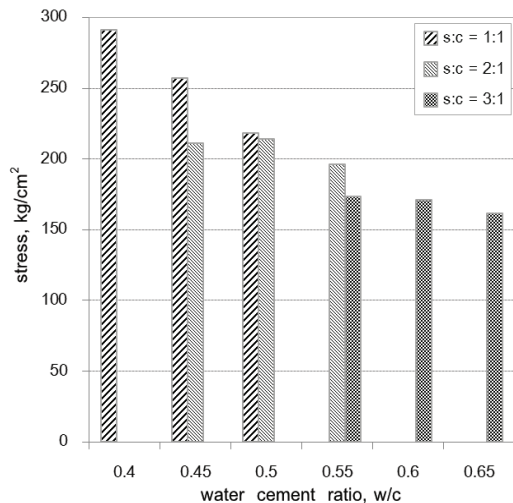
ซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 2:1 และ 3:1 พบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มีแนวโน้มที่สูงกว่าแต่แตกต่างกันน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45



รูปที่ 4 ผลของอัตราส่วน S:C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ทั้งนี้อาจเป็นเพราะตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่าจะมีปริมาณโฟมและน้ำที่ใช้ผสมน้อยกว่าผลิตโฟมน้อยกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่สูง ทำให้หากรวมปริมาณน้ำผสมมอร์ตาร์และน้ำผสม

น้ำยาโฟมด้วยกัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่สูงจะมีปริมาณโฟมมากกว่าและอัตราส่วนของน้ำตอปูนซีเมนต์สูงกว่าทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่า



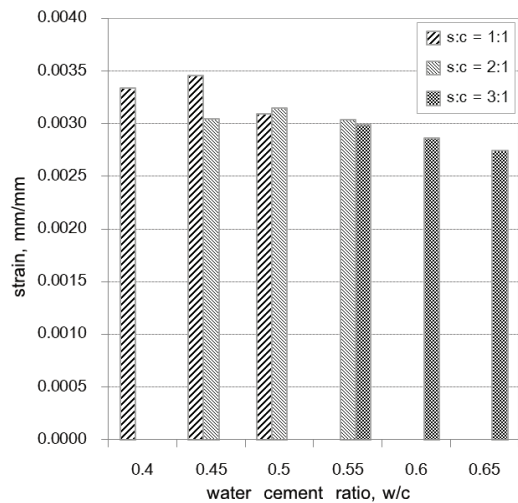
รูปที่ 5 ผลของอัตราส่วน S:C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 56 วัน

จากรูปที่ 4-5 สรุปได้ว่าอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลา กรณีอัตราส่วนผสมของน้ำที่เท่ากัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของทรายที่สูงกว่าจะมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่า นั่นคือปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง [10] นอกจากนี้ขนาดช่องหรือความละเอียดของทรายที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น [11]

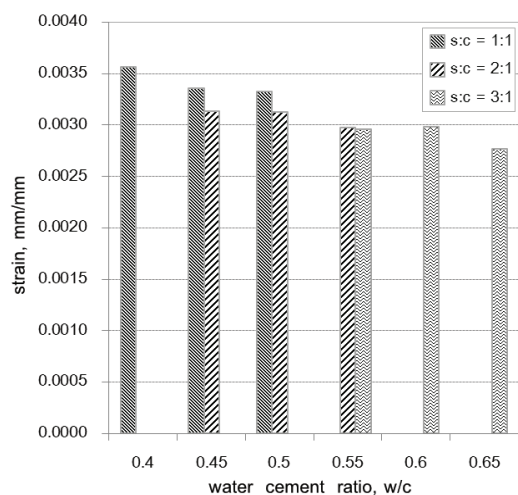
3.3.2 ผลของอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่อความเครียด

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผลิตโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากันแต่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 เป็นผลการทดสอบที่ 28 วัน พบว่าผลของอัตราส่วนทรายต่อความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดจะมีความชัดเจนที่สุดในกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 1:1 และ 2:1 ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 มีแนวโน้มของค่าความเครียดที่สูงกว่า กรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 1:1 และ 2:1 พบว่าค่าความเครียดมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมาก ส่วนกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.55 มีอัตราส่วนทรายต่อ

ซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 2:1 และ 3:1 พบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 ให้ค่าความเครียดที่มีแนวโน้มที่สูงกว่าแต่แตกต่างกันน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ซึ่งความเครียดจะมีความสอดคล้องกับความเค้น นั่นคือค่าความเค้นสูงจะทำให้ค่าความเครียดสูงตามไปด้วย หรืออีกนัยหนึ่งคือความเครียดจะแปรผันตรงกับความเค้น ซึ่งผลการทดสอบที่อายุ 56 วัน มีแนวโน้มส่วนมากที่มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ผลของอัตราส่วน S:C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 7 ผลของอัตราส่วน S:C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 56 วัน

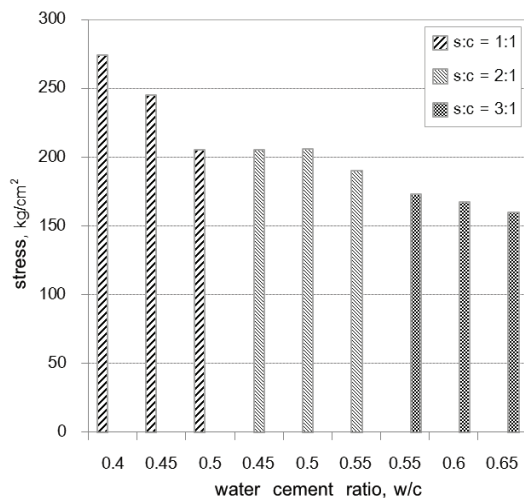
จากรูปที่ 6-7 สรุปได้ว่าอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์มี

ผลต่อความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส กรณีสัดส่วนผสมของน้ำที่เท่ากัน ตัวอย่างที่มีอัตรา ส่วนผสมของทรายที่สูงกว่าจะมีความเครียดที่ต่ำกว่า นั่น คือปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเครียดลดลง

3.4 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

3.4.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด

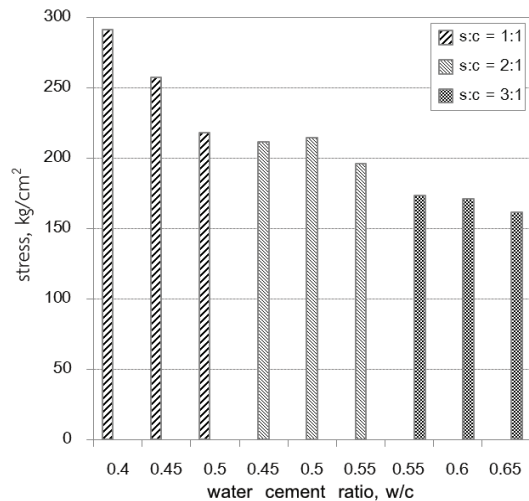
เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผลิตโดยใช้อัตราส่วนทราย ต่อซีเมนต์เท่ากันแต่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกัน พบว่า ผลของอัตราส่วนน้ำต่อกำลังรับแรงอัดที่จุดกำลังรับ แรงอัดสูงสุดจะมีความชัดเจนที่สุดในกรณีของตัวอย่างที่มี อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 มีอัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ซึ่งพบว่า ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 มี แนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าตัวอย่างที่มี อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ ส่วนกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ เท่ากับ 2:1 และ 3:1 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มีแนวโน้ม เช่นเดียวกันแต่จะแตกต่างกันไม่มากนัก ดังแสดงในรูปที่ 8-9 ซึ่งเป็นผลการทดสอบของตัวอย่างที่อายุ 28 และ 56 วัน



รูปที่ 8 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ อายุ 28 วัน

ในกรณีที่ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ เท่ากับ 2:1 แต่ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำเท่ากับ 0.50 มี กำลังรับแรงอัดที่มากกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์เท่ากับ 0.45 อาจเกิดจากใช้ปริมาณน้ำน้อยเกินไป

ทำให้โฟมเหลวและมอร์ตาร์ผสมกันได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่ง การผสมคอนกรีตที่ค่อนข้างข้นอาจทำให้ฟองอากาศ สลายตัวหรือแตกตัวไปหรือมอร์ตาร์ไม่สามารถยึดเกาะ กับฟองอากาศ [3] ทำให้เกิดจุดบกพร่องในเนื้อคอนกรีต ซึ่งจุดบกพร่องเป็นปัจจัยที่ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

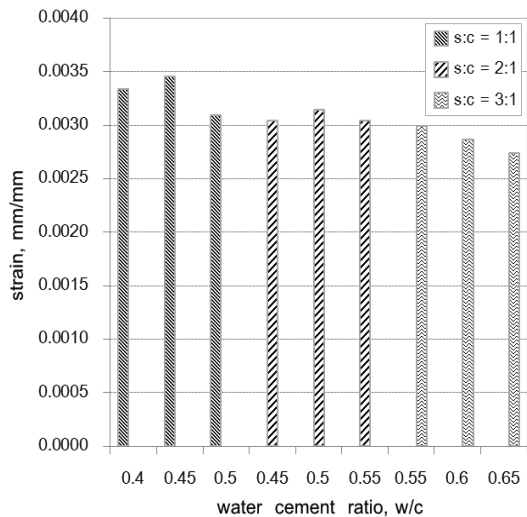


รูปที่ 9 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ อายุ 56 วัน

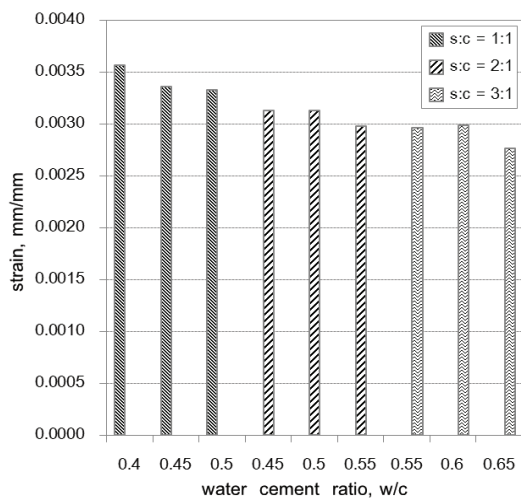
จากรูปที่ 8-9 สรุปได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผล ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส กรณีสัดส่วนผสมของทรายที่เท่ากัน ตัวอย่างที่มีอัตรา ส่วนผสมของน้ำที่สูงกว่าจะมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่า ซึ่งผลการ ทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งกรณีทดสอบที่ อายุ 28 และ 56 วัน นั่นคือปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้ กำลังรับแรงอัดลดลง [10] นอกจากนี้ Kearsley และ Mostert [12] ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำส่งผลต่อ ความแข็งแรงของคอนกรีตชนิดนี้ค่อนข้างมีนัยสำคัญ

3.4.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อความเครียด

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผลิตโดยใช้อัตราส่วนทราย ต่อซีเมนต์เท่ากันแต่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกัน พบว่า ผลของอัตราส่วนน้ำต่อความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัด สูงสุดจะมีความชัดเจนที่สุดในกรณีของตัวอย่างที่มี อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 3:1 เมื่อ พิจารณาที่ตัวอย่างที่ใช้ปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดกับปริมาณ น้ำที่มากที่สุด ส่วนกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทราย ต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 ให้ค่าความเครียดที่จุดกำลังรับ แรงอัดสูงสุดแตกต่างกันไม่มาก ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 11 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 56 วัน

จากรูปที่ 10 กรณีที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 กับกรณีที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 มีความเครียดที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้ปริมาณน้ำที่มากกว่าและปริมาณน้ำที่น้อยกว่า อาจเป็นเพราะการใช้ค่าเฉลี่ยซึ่งแต่ละสูตรทดสอบจะเฉลี่ยผลทดสอบทั้ง 24 ตัวอย่าง เพื่อให้ได้ตัวแทนของค่าเฉลี่ยมาหนึ่งค่า ซึ่งบางตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนน้ำที่สูงกว่ามีความเครียดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนน้ำที่ต่ำกว่า ซึ่งจะต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมในส่วนของการทดสอบความเครียด แต่เมื่อพิจารณาถึง

แนวโน้มโดยรวมโดยพิจารณาที่ใช้ปริมาณน้ำที่มากที่สุดกับปริมาณน้ำที่น้อยสุดที่อัตราส่วนทรายที่เท่ากัน ดังรูปที่ 10-11 สรุปได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส กรณีที่อัตราส่วนผสมของทรายที่เท่ากัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำที่สูงกว่าจะมีความเครียดที่มีแนวโน้มโดยรวมที่ต่ำกว่า ดังนั้นปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเครียดลดลง

4. สรุป

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ที่ทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสมีกำลังรับแรงอัดระหว่าง 160–291 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและจุดวิบัติประมาณ 0.0027-0.0035 และ 0.0036-0.0044 ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่มีอายุ 56 วัน สามารถพัฒนากำลังได้สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่มีอายุ 28 วัน แต่ไม่มาก อัตราส่วนของทรายต่อซีเมนต์และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อความเค้นและความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส โดยที่ปริมาณน้ำที่มากขึ้นและปริมาณทรายที่มากขึ้นส่งผลให้ความเค้นและความเครียดมีค่าลดลง ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของทรายเท่ากับ 1:1 มีอัตราส่วนผสมของน้ำเท่ากับ 0.40 ทำให้ได้ค่าความเค้นและความเครียดสูงที่สุด ส่วนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของทรายเท่ากับ 3:1 มีอัตราส่วนผสมของน้ำเท่ากับ 0.65 ทำให้ได้ค่าความเค้นและความเครียดต่ำที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท แอลซีเอ็ม (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และ บริษัท ชิก้า ประเทศไทย จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์น้ำยาผลิตฟองโฟมสำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบา สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติสำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยประจำปีการศึกษา 2556 และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีสำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Panesar, D.K. 2013. Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction and Building Materials*, 44: 575-584.
- [2] Narayanan, N. and Ramamurthy, K. 2000. Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*, 22: 321-329.
- [3] Ramamurthy, K., Kunhanandan Nambiar, E.K. and Indu Siva Ranjani, G. 2009. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement & Concrete Composites*, 31: 388-396.
- [4] ชัยนัตต์ เอี่ยมเชย และ สุขะฐฐ์ เอี่ยมเชย. 2542. การศึกษาคุณสมบัติของ Cellular Concrete เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลเบา. รายงานฉบับที่ วพ.172 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.
- [5] แก้วตา ตี๋ยัง, นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา และ เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย. 2551. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, โรงแรมสุโขทัยแกรนด์แอนด์คอนเวนชั่นเซ็นเตอร์, อุบลราชธานี, 12-14 พฤษภาคม 2553.
- [6] นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา และ อิทธิพงศ์ พันธุ์นิกุล. 2551. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4, โรงแรมลายทอง, อุบลราชธานี, 20-22 ตุลาคม 2551.
- [7] นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, อิทธิพล รัตนมงคลทิพย์ และ เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย. 2553. การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, โรงแรมแกรนด์แปซิฟิกฮอเทลเฟอรินีสอร์ทแอนด์สปา, เพชรบุรี, 20-22 ตุลาคม 2553.
- [8] อิทธิเชษฐ อุตะธีรวิชัย. 2555. กำลังรับแรงอัดและคุณสมบัติสำหรับใช้งานของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์ ปรญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [9] อิทธิพล รัตนมงคลทิพย์. 2553. โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์ ปรญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [10] Hamidah, M.S., Azmi, I., Ruslan, M.R.A., Kartini, K. and Fadhil, N.M. 2005. Optimisation of foamed concrete mix of different sand-cement ratio and curing conditions + Proceedings. "Use of Foamed Concrete in Construction", University of Dundee, Scotland, UK, July 5, 2005.
- [11] Kunhanandan Nambiar, E.K. and Ramamurthy, K. 2006. Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement & Concrete Composites*, 28: 475-480.
- [12] Kearsley, E.P. and Mostert, H.F. Designing mix composition of foamed concrete with high fly ash contents + Proceedings. Use of Foamed Concrete in Construction. University of Dundee, Scotland, UK, July 5, 2005.