

การศึกษาปริมาณหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนที่เหมาะสม สำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน EN 197-1

อดิศักดิ์ ยิ้มวัน¹ และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ^{2*}

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันสำหรับงานคอนกรีตต่างๆ ไปที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูงนัก เช่น งานคอนกรีตสำหรับโครงสร้างทั่วไป งานหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปขนาดเล็ก เช่น แผ่นพื้น เสาเข็ม ท่อ เสา คอนกรีตบล็อก หรืองานคอนกรีตผสมเอง ที่หน้างาน มีการใช้ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และการใช้ปูนซีเมนต์ผสมบ้างในบางพื้นที่ ปัญหาที่เกิดขึ้นกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ กำลังอัดที่สูงเกินจำเป็น ในขณะที่เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ผสมมักจะทำให้เกิดความแข็งแรงของคอนกรีตที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ หลักของการใช้งานคอนกรีตกลุ่มนี้คือ ปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพพอสมควรกับงาน ถอดแบบได้เร็วเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ความแข็งแรงที่มากกว่าปูนซีเมนต์ผสม และราคาเหมาะสม ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน (Portland Limestone Cement, PLC) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถสนองต่อความต้องการดังกล่าวได้

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาถึงปริมาณหินปูนที่ใส่เพิ่มในสัดส่วนต่างๆ และการบดปูนให้ได้ความละเอียดต่างๆ เพื่อหาจุดเหมาะสมที่สามารถนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนมาใช้งานจริงได้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์รวมทั้งงานคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าสัดส่วนผสมที่สามารถนำมาใช้งานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ ปริมาณของหินปูนร้อยละ 15-20 ที่ความละเอียด 4,500-5,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จทั้งที่ใส่น้ำยาและไม่ใส่น้ำยา แต่หากเมื่อผสมแล้วลอยลงไปในส่วนผสม กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้มีค่าไม่สูงตามที่ออกแบบ ส่วนกรณีของการนำไปผลิตเป็นคอนกรีตหล่อสำเร็จสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี และจากการทดสอบความคงทนในแง่ของการต้านทานการซึมผ่านของซัลเฟตและคลอไรด์พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนมีความสามารถในการต้านทานซัลเฟตดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่มีความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ด้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

คำสำคัญ : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน / พงหินปูน / ค่าความละเอียด

* Corresponding author: E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th

¹ นักศึกษาระดับมหาบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

The Study of Suitable Limestone Content in Portland Limestone Cement for Using in Reinforced Concrete Work Comply with EN 197-1

Adisak Yimwan ¹ and Burachat Chatveera ^{2*}

Thammasat University, Rangsit Campus, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Abstract

In sector that concrete was not required high performance such as conventional concrete, small to medium pre-cast elements, currently Ordinary Portland Cement (OPC) has familiarly been used and sometimes Mixed Cement was selected in some locations. Main problems the users faced is strength of concrete using OPC is too high, in the other hand; performance of concrete is not suitable enough when using Mixed Cement. Anyhow, primary needs which users concerned are the cement with suitable performance, fast setting as an OPC and also affordable cost. Therefore, Portland Limestone Cement (PLC) is one of the options that possibly meet those requirements.

The objective of this research is to study a suitable proportion of raw materials of Portland Limestone Cement by adjusting quantity of limestone and Blaine fineness in OPC and as well as maintain standard quality of EN 197-1. The study found that the adequate proportion of PLC can be used effectively compared with OPC is 15-20% of limestone content with 4,500-5,000 cm²/g of Blaine fineness range. These proportions are suitable for ready mixed concrete mixing with and without admixture. However, performance of concrete is not satisfied if fly ash was added in. In case that the PLC was applied in pre-cast concrete, it can meet the performance both strength and setting time as designed. But its workability is lower than OPC a little bit. In term of durability concern regarding resistance to penetration of sulfate, PLC showed more performance than OPC does. However, for chloride resistance, PLC showed lower performance than OPC.

Keywords : Portland Limestone Cement / Limestone Powder / Blaine Fineness

* Corresponding author: E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th

¹ Graduate Student, Department of Civil Engineering.

² Associate Professor, Department of Civil Engineering.

1. บทนำ

สำหรับงานคอนกรีตต่างๆ ไปที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูงนัก เช่น งานคอนกรีตสำหรับเทโครงสร้างขนาดเล็ก งานหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปขนาดเล็ก เช่น ท่อ เสา บล็อกทางเท้า ในปัจจุบันมีการใช้ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ผสม ซึ่งพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ กำลังอัดที่สูงเกินจำเป็น ในขณะที่เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ผสมมักจะเกิดปัญหาความแข็งแรงของคอนกรีตที่ไม่เพียงพอ

จากผลสำรวจตลาดของผู้ใช้ปูนซีเมนต์ในประเทศไทย ปี 2551 นั้น พบว่าในงานคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์

ชนิดสูงนั้นมีความต้องการค่อนข้างสูง ความต้องการหลักของผู้ใช้กลุ่มนี้คือต้องการปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพพอสสมตรงกับงาน ถอดแบบได้เร็วเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความแข็งแรงที่มากกว่าปูนซีเมนต์ผสม ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลม์สโตน (Portland Limestone Cement, PLC) (คุณสมบัติตามตารางที่ 1 และ 2) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สนองตอบความต้องการดังกล่าวได้ [1] อีกทั้งการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลม์สโตนยังสามารถลดปริมาณก๊าซ CO₂ ระหว่างกระบวนการผลิตลงได้ เพราะใช้ปริมาณปูนเม็ดน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 1 มาตรฐาน BS EN 197-1 [2] ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลม์สโตน

Cement	BS EN 197-1 Cement Notation	Clinker Content	Additive (%)	Additive Type
Portland Cement	CEM I	95 - 100	-	-
Portland Limestone Cement	CEM II/A-L CEM II/B-L	80 - 94 65 - 79	6 - 20 21 - 35	Limestone Limestone

ตารางที่ 2 Strength Class สำหรับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน BS EN 197-1 [2]

Class	Compressive Strength (N/mm ²)			
	Early Strength		Standard Strength 28 days	
	2 days	7 days		
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 R	≥ 10.0	-		
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5 R	≥ 20.0			
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-
52.5 R	≥ 30.0			

2. วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลม์สโตน โดยการปรับปริมาณผงหินปูนและค่าความละเอียด (Blaine fineness) ให้ได้คุณภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลม์สโตนอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงมาตรฐาน EN 197-1

2) เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์โลม์สโตนไปใช้ในงานคอนกรีต เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3. ขอบเขตการศึกษาและกระบวนการวิจัย

3.1 ขอบเขตการศึกษา

1) ทดลองปรับปริมาณของผงหินปูน (Additive limestone, ADL) และปรับค่าความละเอียด ที่เหมาะสม

ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลมส์โตน โดยการปรับสัดส่วนของผงหินปูน (ADL) ในช่วงร้อยละ 15-25 และค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ในช่วง 4,000-5,000 ตร.ซม./ก. จากนั้นทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ รวมไปถึงความสามารถในการต้านทานสารประกอบซัลเฟตและคลอไรด์

2) ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลมส์โตนที่สัดส่วนปริมาณวัตถุดิบต่างๆ และนำไปผสมเป็นคอนกรีตโดยใช้สัดส่วนผสมตามลักษณะการใช้งานจริงที่หน้างาน เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้การนำไปใช้งานคอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.2 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบไปด้วย

- 1) ปูนเม็ด (Clinker)
- 2) ยิบซั่ม (Gypsum)

- 3) หินปูน (ADL)
- 4) ทรายหายาบ ค่า F.M. 2.8-3.0 และมีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33 [3]
- 5) หิน 3/4 นิ้ว ค่า F.M. 6.0-7.0 และมีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33 [3]
- 6) ภาชนะจากแม่เมาะ
- 7) น้ำยาผสมคอนกรีต ประเภท D&G จาก WR Grace

3.3 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบ

ในการบดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลมส์โตนจะใช้ยิบซั่มร้อยละ 4 และแปรผันปริมาณหินปูนที่ร้อยละ 0, 15, 20 และ 25 ส่วนที่เหลือจะเป็นปริมาณปูนเม็ด ตัวอย่างที่ผสมกันจะถูกบดใน Lab Ball Mill เพื่อให้มีค่าความละเอียด $4,000 \pm 150$, $4,500 \pm 150$ และ $5,000 \pm 150$ ตร.ซม./ก. ซึ่งจะได้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลมส์โตนจำนวน 12 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ชื่อตัวอย่างและสัดส่วนผสมของปูนเม็ด ผงหินปูน และยิบซั่ม ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลมส์โตน

No	Sample Code	Proportion (%)			Targeted Blaine Fineness (cm ² /g)
		Clinker	Limestone	Gypsum	
1	C96D00B4000	96	0	4	4,000
2	C81D15B4000	81	15	4	4,000
3	C76D20B4000	76	20	4	4,000
4	C71D25B4000	71	25	4	4,000
5	C96D00B4500	96	0	4	4,500
6	C81D15B4500	81	15	4	4,500
7	C76D20B4500	76	20	4	4,500
8	C71D25B4500	71	25	4	4,500
9	C96D00B5000	96	0	4	5,000
10	C81D15B5000	81	15	4	5,000
11	C76D20B5000	76	20	4	5,000
12	C71D25B5000	71	25	4	5,000

ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ และจะถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 15-2547 [4] ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

4. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

4.1 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน

องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่มีระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดผ่านตามมาตรฐาน มอก. 15-2547 [4] มีดังนี้

1. C81L15B4000 มีหินปูนร้อยละ 15 และ ค่าความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก.
2. C81L15B4500 มีหินปูนร้อยละ 15 และ ค่าความละเอียด 4,500 ตร.ซม./ก.

3. C76L20B4500 มีหินปูนร้อยละ 20 และ ค่าความละเอียด 4,500 ตร.ซม./ก.

4. C81L15B5000 มีหินปูนร้อยละ 15 และ ค่าความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก.

5. C76L20B5000 มีหินปูนร้อยละ 20 และ ค่าความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก.

ตัวอย่าง C76L20B4000, C71L25B5000 จะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากมีค่ากำลังอัดที่ 28 วัน (278.4 และ 288.4 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ) ใกล้เคียงมาตรฐาน มอก. (อย่างน้อย 280 กก./ตร.ซม.) จนเกินไป ซึ่งอาจทำให้ไม่มีส่วนเพื่อด้านกำลังอัดเมื่อนำไปใช้งานจริง

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางกายภาพของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทั้ง 12 ตัวอย่าง

Sample Code	Blaine Fineness (cm ² /g)	LOI (%)	Setting Time (min)		False Set (%)	Air Content (%)	Compressive Strength (ksc)			
			Initial	Final			1 day	3 days	7 days	28 days
OPC	3550	1.15	109	205	85	8.4	145.0	263.2	326.1	427.9
C96L00B4000	4013	1.29	86	170	33	9.0	155.5	280.9	327.5	427.0
C81L15B4000	3961	7.29	105	192	36	7.2	93.5	213.5	269.9	351.8
C76L20B4000	3901	9.63	108	200	42	7.4	74.2	172.3	206.9	287.4
C71L25B4000	3988	11.99	109	202	55	5.4	54.5	129.7	199.4	253.2
C96L00B4500	4547	1.27	69	156	29	9.7	156.9	306.0	374.3	448.9
C81L15B4500	4145	6.66	92	185	28	7.2	119.7	249.3	288.6	369.5
C76L20B4500	4340	9.38	96	202	29	5.4	87.3	190.3	219.9	304.5
C71L25B4500	4488	11.44	88	200	53	5.1	75.8	144.2	218.7	274.1
C96L00B5000	4908	1.08	54	152	30	8.4	197.2	302.6	388.4	429.9
C81L15B5000	4885	7.23	97	181	17	6.8	122.5	254.8	271.2	380.1
C76L20B5000	4922	9.73	97	198	24	5.6	90.6	198.5	237.1	317.7
C71L25B5000	4827	11.49	95	205	22	4.3	68.7	159.2	201.4	288.4

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่นำมาใช้ในการทดสอบมีคุณภาพทางเคมีและกายภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2547 [4] และ ASTM C 150 [7] โดยมีค่าองค์ประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณ MgO ร้อยละ 1.74, SO₃ ร้อยละ 2.54, LOI 1.29 C₃S ร้อยละ 58.70, C₂S ร้อยละ 15.96, C₃A ร้อยละ 7.20, C₄AF ร้อยละ 9.97 และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ค่าความละเอียด

3,550 ตร.ซม./ก. ระยะเวลาก่อตัวช่วงต้น 109 นาที ระยะเวลาก่อตัวช่วงปลาย 205 นาที ส่วนค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน อยู่ที่ 263, 326 และ 427 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนแต่ละสัดส่วนผสมที่บดได้มีค่าคุณสมบัติทางเคมีที่ใกล้เคียงกันเนื่องการใช้ปูนเม็ด หินปูน และยิปซั่มชนิดเดียวกันเป็นส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน

ปริมาณหินปูน (%)	องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน (%)									
	MgO	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
15	1.74	2.54	21.01	4.81	3.28	64.51	60.70	14.96	7.20	9.97
20	1.76	2.53	20.81	4.76	3.27	64.71	61.41	13.34	7.08	9.94
25	1.76	2.52	20.76	4.84	3.29	64.60	60.80	13.65	7.26	10.00

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนกับข้อกำหนดของ มอก.15 เล่ม 1-2547 พบว่ามีคุณสมบัติเกือบทั้งหมดผ่านเกณฑ์ ยกเว้นค่าน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา จึงมีแนวโน้มว่าสามารถนำไป

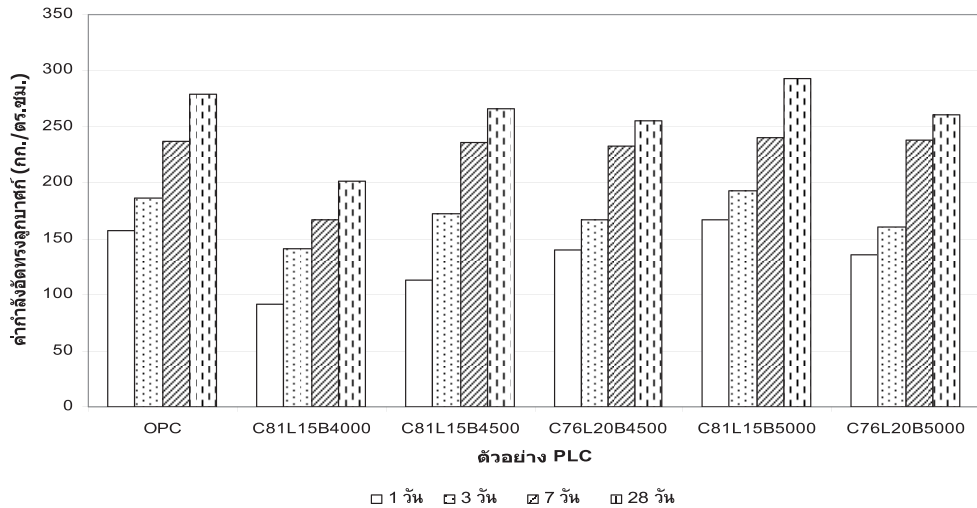
ใช้งานได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากนั้นนำตัวอย่างทั้ง 5 ไปทดลองผสมเป็นคอนกรีตในสัดส่วนผสมตามตารางที่ 6 และนำไปทดสอบความคงทนในแง่การต้านทานต่อซัลเฟตและคลอไรด์

ตารางที่ 6 สัดส่วนผสมที่ใช้ผลิตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ

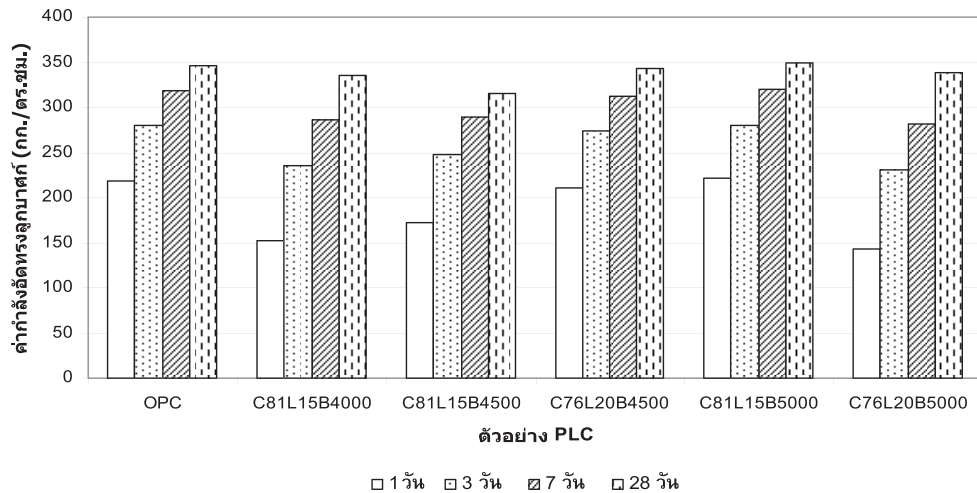
ส่วนผสมที่	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)		ค่ายุบตัว (ซม.)	ส่วนผสมใน 1 ลบ.ม. (กก.)					น้ำยาผสมคอนกรีต (cc)	W/C	S/A	หมายเหตุ
	ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		PLC	เถ้าลอย	ทราย	หิน ¾"	น้ำ				
1	180	210	7.5 +/-2.5	275	-	845	1125	190	-	0.69	0.43	ไม่ผสมน้ำยาและเถ้าลอย
2	210	240	7.5 +/-2.5	300	-	840	1110	190	-	0.63	0.43	
3	240	280	7.5 +/-2.5	325	-	830	1095	190	-	0.58	0.43	
4	255	300	7.5 +/-2.5	340	-	820	1090	190	-	0.56	0.43	
5	180	210	7.5 +/-2.5	275	-	845	1125	175	1375	0.64	0.43	ไม่ผสมเถ้าลอย
6	210	240	7.5 +/-2.5	300	-	840	1110	175	1500	0.58	0.43	
7	240	280	7.5 +/-2.5	325	-	830	1095	175	1625	0.54	0.43	
8	255	300	7.5 +/-2.5	340	-	820	1090	175	1700	0.51	0.43	
9	180	210	7.5 +/-2.5	220	55	885	1045	165	1100	0.60	0.46	ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20
10	210	240	7.5 +/-2.5	240	60	865	1045	165	1200	0.55	0.45	
11	240	280	7.5 +/-2.5	260	65	830	1055	165	1300	0.51	0.44	
12	255	300	7.5 +/-2.5	270	70	825	1050	165	1350	0.49	0.44	
13	180	210	7.5 +/-2.5	200	70	905	1070	163	1000	0.60	0.46	ผสมเถ้าลอยร้อยละ 25
14	210	240	7.5 +/-2.5	210	75	895	1070	163	1050	0.57	0.46	
15	240	280	7.5 +/-2.5	225	75	865	1085	163	1125	0.54	0.44	
16	255	300	7.5 +/-2.5	235	75	850	1085	163	1175	0.53	0.44	

4.2 ผลการทดสอบเมื่อนำไปผลิตเป็นคอนกรีตที่สัดส่วนผสมต่างๆ

คอนกรีตผสมเสร็จ (แสดงเฉพาะสัดส่วนผสมที่กำลังอัดทรงลูกบาศก์ 210 และ 300 กก./ตร.ซม.)



รูปที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลมส์โตน



รูปที่ 2 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ ของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสมที่ 4

จากผลการทดสอบการนำไปผสมเป็นคอนกรีตที่ไม่ใส่น้ำยาและเถ้าลอย (รูปที่ 1 และ 2) พบว่า ตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลมส์โตนทุกตัวอย่างมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ยกเว้นตัวอย่าง C81L15B4000 สำหรับสัดส่วนผสมที่ 1 (210 กก./ตร.ซม.) เนื่องจากมีค่าความละเอียดที่ต่ำที่สุด (4,000 ตร.ซม./ก.)

ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมโดยตัวอย่าง C81L15B5000 มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกส่วนผสม เนื่องจากตัวอย่างดังกล่าวมีปริมาณหินปูนไม่สูงมากนัก (ร้อยละ 15) แต่มีความละเอียดค่อนข้างสูง (5,000 ตร.ซม./ก.) จึงมีแนวโน้มที่จะ

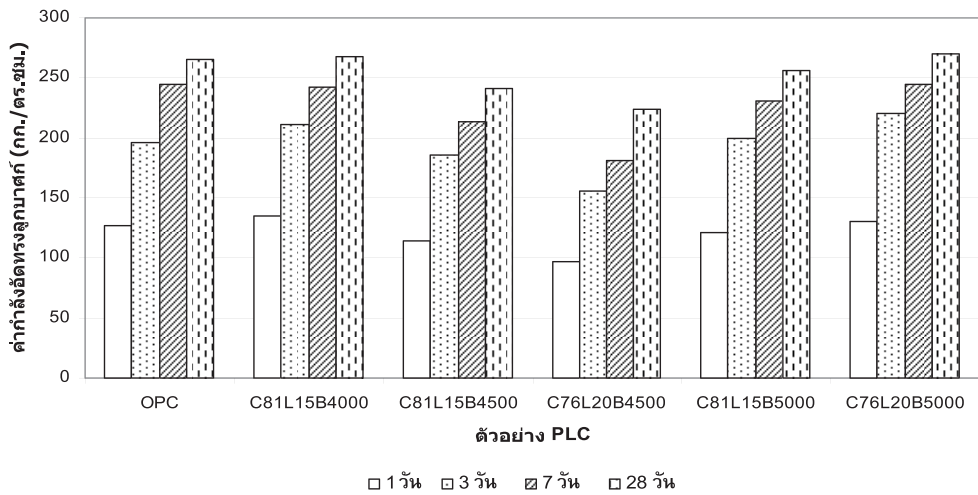
ทำให้กำลังอัดมีค่าสูง

ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลมส์โตน C81L15B4500 และ C76L20B4500 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกสัดส่วนผสม แต่มีค่ากำลังอัดช่วงต้นน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณปูนเม็ดลดลงและความละเอียดระดับนี้ยังไม่สามารถส่งผลถึงการพัฒนากำลังอัดช่วงต้นได้ดีเท่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

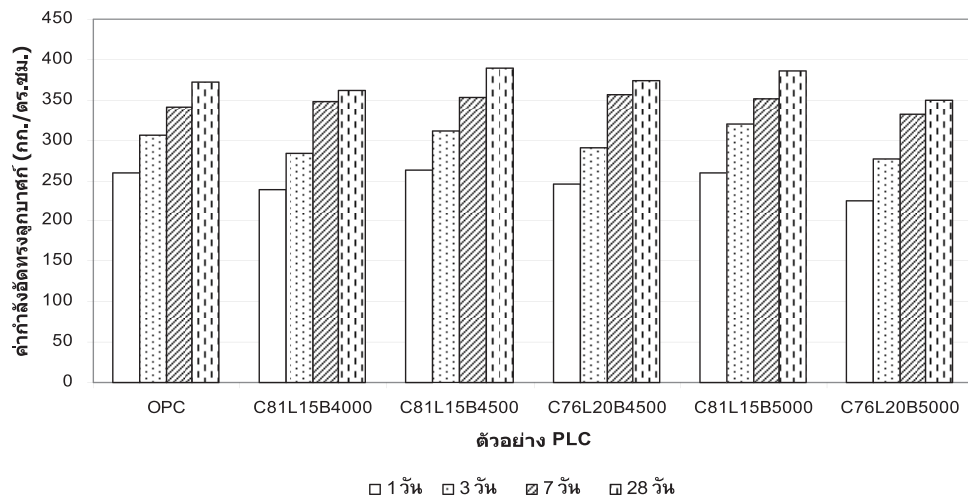
ระยะเวลาก่อตัวระยะต้นและปลายของคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลมส์โตน มีแนวโน้มสั้นกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

เล็กน้อย เนื่องจากคุณสมบัติการอัดตัวกันที่แน่นของอนุภาคหินปูนและการที่ผงหินปูนทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดสารประกอบที่ชื่อว่าแคลเซียมคาร์โบอะลูมิเนต (Calcium Carboaluminate) และโมนอคาร์บอนอะลูมิเนต (Monocarboaluminate) ซึ่งให้ความแข็งแรงคล้ายคลึงกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate) [9] [10]

คอนกรีตที่ผสมโดยใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงมีแนวโน้มของความต้องการน้ำสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดต่ำ [11] และยังพบว่าที่ค่ายุบตัวใกล้เคียงกัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลมส์โตนเป็นส่วนผสมมีลักษณะของเนื้อคอนกรีตที่ค่อนข้างนุ่ม ผสมและเทเข้าแบบได้ง่าย และมีสีขาวกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม [8]



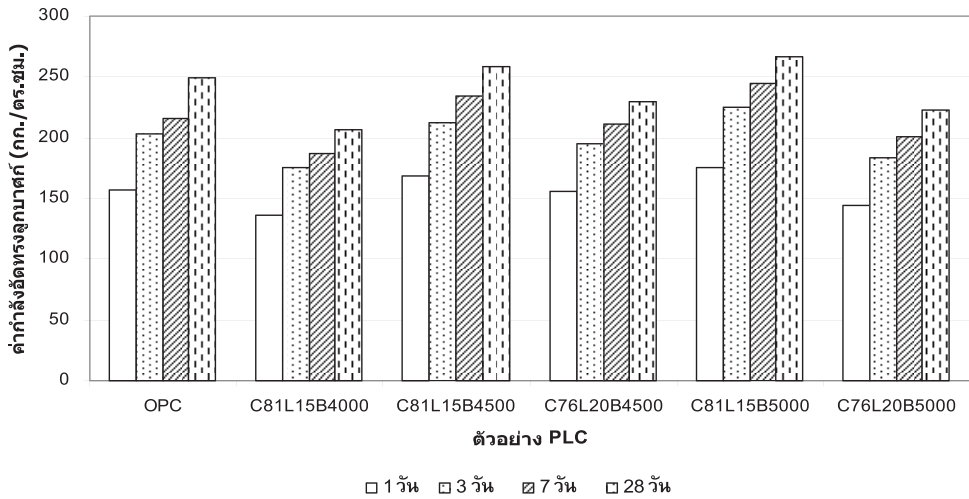
รูปที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ ของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสมที่ 5



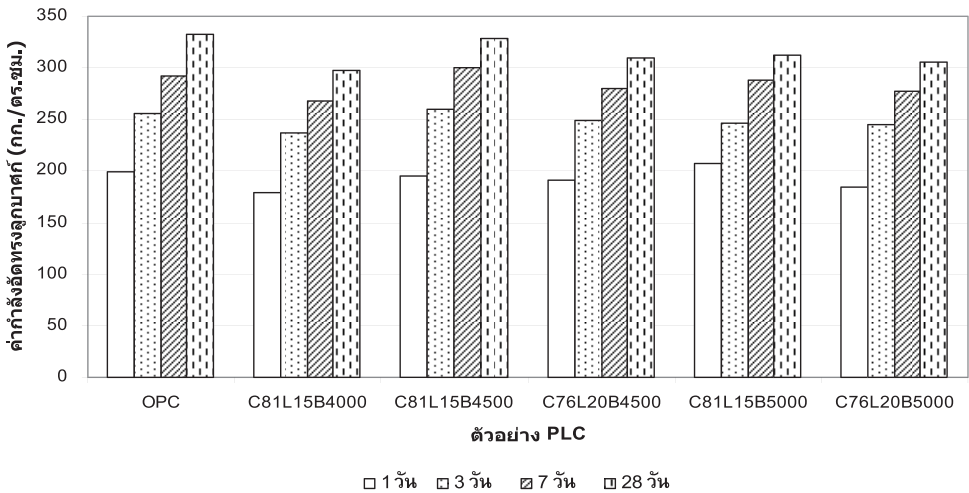
รูปที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ ของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสมที่ 8

ในการทดสอบคอนกรีตที่ใส่น้ำยาลดน้ำและหน่วงการก่อตัว พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทุกตัวอย่างมีกำลังอัดผ่านตามเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ (รูปที่ 3 และ 4) และมีแนวโน้มของกำลังอัดที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ

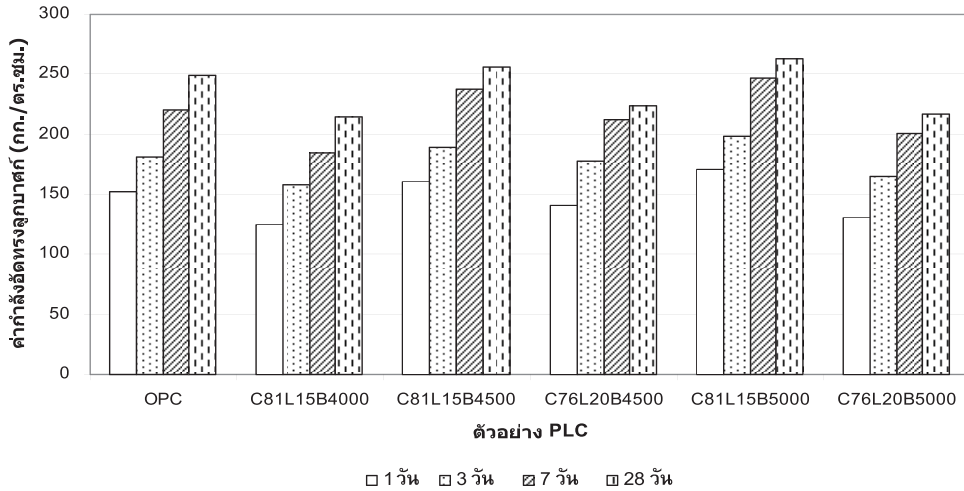
กับคอนกรีตที่ไม่ใส่น้ำยา (รูปที่ 1 และ 2) แสดงว่าน้ำยาผสมคอนกรีตส่งผลต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



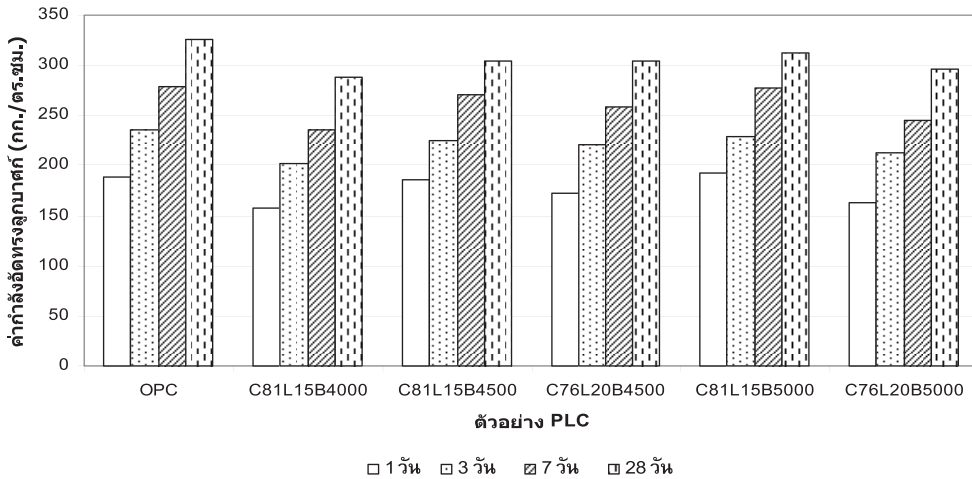
รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ ของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสมที่ 9



รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ ของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสมที่ 12



รูปที่ 7 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ ของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสมที่ 13



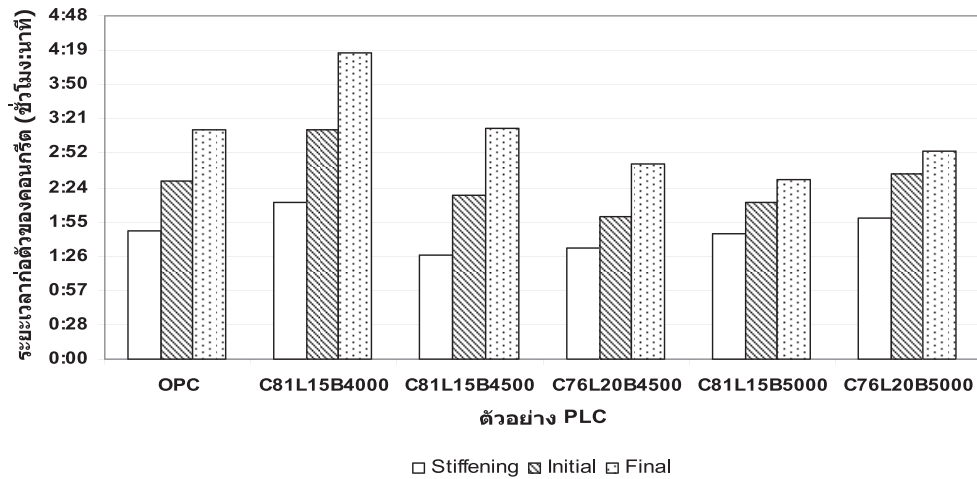
รูปที่ 8 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ ของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสมที่ 16

จากผลการทดสอบตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการนำไปผสมเป็นคอนกรีตที่ใส่น้ำยาและผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 25 (รูปที่ 5-8) พบว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทุกตัวอย่างมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม

เหตุผลที่กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ คาดว่าจะเกิดจากปริมาณปูนเม็ด (Clinker) ในส่วนผสมที่น้อยเกินไป [11]

4.3 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวและการยุบตัวของคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ C81L15B4500, C76L20B4500, C81L15B5000 และ C76L20B5000 เป็นส่วนผสม มีระยะเวลาก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายที่ค่อนข้างสั้นกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม เนื่องจากคุณสมบัติของการอัดตัวกันที่แน่นของอนุภาคไลม์สโตน (Particle packing) และการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันบางส่วนของผงหินปูน แต่บางสัดส่วนคอนกรีตที่ผสมโดย C81L15B4000 มีระยะเวลาก่อตัวที่ยาวกว่าคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 9 ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้ตัวอย่าง PLC และ OPC

ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนส่วนใหญ่มีค่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากนัก แต่เนื้อ

คอนกรีตค่อนข้างนุ่ม เทเข้าแบบได้ง่ายและมีสีขาวกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม ดังรูปที่ 10



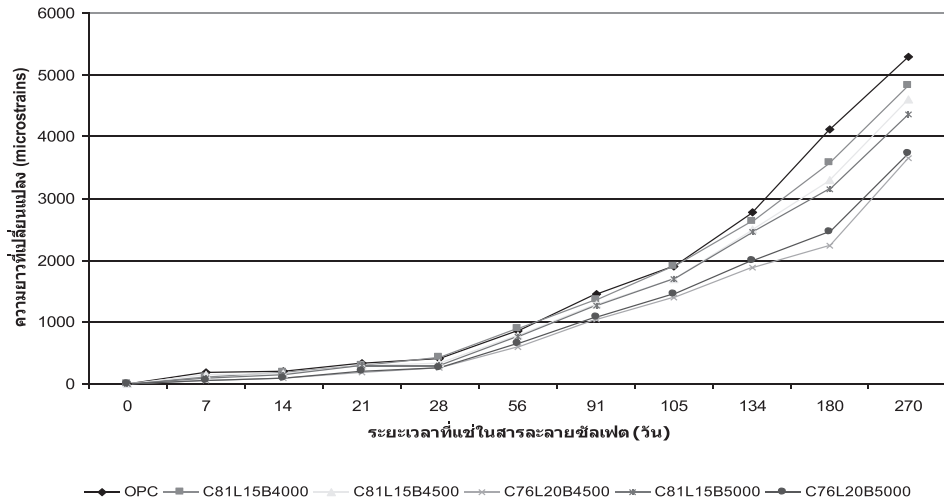
รูปที่ 10 การยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนในส่วนผสม

4.4 ผลการทดสอบด้านความคงทน

4.4.1 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อซัลเฟต

ผลการทดสอบความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของ

แท่งมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 [5] ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนแต่ละตัวอย่างเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 แสดงในรูปที่ 11



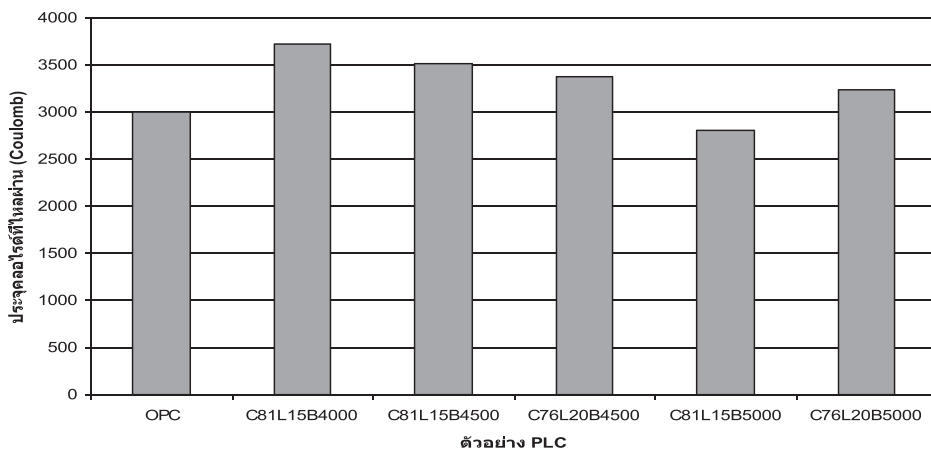
รูปที่ 11 ผลการทดสอบความยาวที่เปลี่ยนแปลงของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5

จากผลการทดสอบ พบว่าตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าการขยายตัวน้อยกว่าแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจะเริ่มเห็นความแตกต่างชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 2 เดือน แนวโน้มการขยายตัวจะลดลงเมื่อมีปริมาณหินปูนในส่วนผสมเพิ่มขึ้นและมีความละเอียดเพิ่มขึ้น สาเหตุหลักคาดว่ามาจากเมื่อทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ด้วย

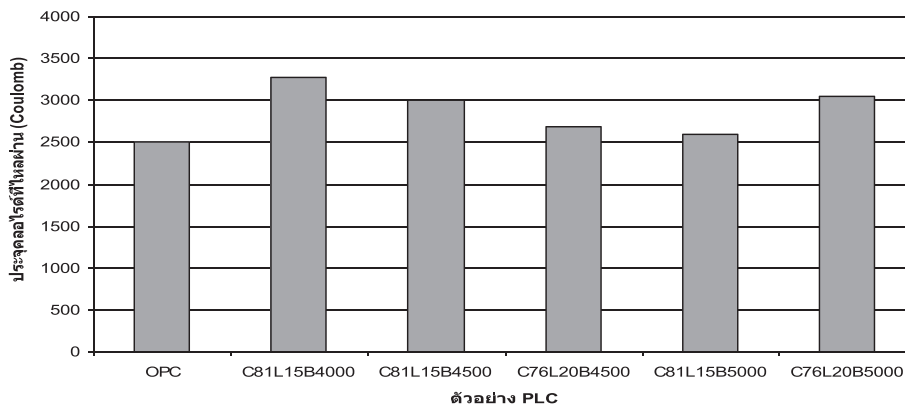
ผงหินปูน หมายถึงปริมาณ C_3A ในปูนเม็ดที่ลดลง ส่งผลให้การทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซัลเฟตลดลง [12]

4.4.2 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อคลอไรด์

สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการต้านทานต่อคลอไรด์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 [6] เลือกจากสัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 1 และ 4 เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 12 ปริมาณการซึมผ่านของประจุคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 1



รูปที่ 13 ปริมาณการซึมผ่านของประจุคลอรีนในตัวอย่างคอนกรีตสี่ส่วนผสมที่ 4

ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอรีนได้แสดงไว้ในรูปที่ 13 และ 14 ซึ่งพบว่าประจุของคลอรีนที่ไหลผ่านเข้าไปในคอนกรีตมีค่าประมาณ 2,500-3,700 คูลอมป์ ทั้งนี้ประจุของคลอรีนที่ไหลผ่านมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณน้ำในส่วนผสมลดลง กล่าวคือเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดสูงเนื่องจากค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงและต้านทานการซึมผ่านของคลอรีนได้ดี

หากพิจารณาผลของการต้านทานคลอรีนของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนที่ปริมาณหินปูนที่เท่ากันแต่ความละเอียดต่างกัน พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนที่มีความละเอียดสูงกว่าจะสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอรีนได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนที่มีความละเอียดต่ำกว่า ส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนที่มีความละเอียดเท่ากันแต่มีปริมาณหินปูนต่างกันนั้น แสดงผลของความต้านทานคลอรีนได้ไม่ชัดเจนนัก [12]

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดสอบสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

1) การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

คุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทุกตัวอย่างและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากใช้ปูนเม็ด หินปูน และยิปซัมชนิดเดียวกัน

ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพ ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทั้งหมดมีระยะเวลาการก่อตัวสั้นกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีแนวโน้มที่สั้นลงเมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น กำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เล็กน้อยและมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนหินปูนมากขึ้น และความละเอียดที่สูงขึ้นจะทำให้แนวโน้มของกำลังอัดเพิ่มขึ้น

2) คุณสมบัติเมื่อนำไปผลิตเป็นคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน 5 ตัวอย่าง

ที่สี่ส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใส่น้ำยา ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเกือบทุกตัวอย่างมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ผ่านตามที่ออกแบบไว้ ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมน้ำยาที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทุกตัวอย่างมีค่ากำลังอัดผ่านตามที่ออกแบบไว้ที่ 28 วัน และมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผลิตโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากอิทธิพลของน้ำยา

ที่สี่ส่วนผสมคอนกรีตที่ใส่น้ำยาและผสมเถ้าลอย

คอนกรีตที่ใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนร่วมกับเถ้าลอยเกือบทั้งหมดมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมและไม่ผ่านตามเกณฑ์กำลังอัดที่กำหนดไว้ เนื่องจากการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยทำให้ในส่วนผสมคอนกรีตมีปูนซีเมนต์ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้กำลังอัดที่ต้องการ

3) การทดสอบในแง่ความคงทน

การทดสอบความสามารถในการต้านทานซัลเฟต

ตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮดรอสโตนที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีการขยายตัวน้อยกว่าแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีแนวโน้มการขยายตัวลดลงเมื่อมีปริมาณหินปูนเพิ่มขึ้นและความละเอียดเพิ่มขึ้น

การทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์

ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮดรอสโตนทุกตัวอย่างจะน้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม ส่วนผลกระทบต่อความต้านทานคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮดรอสโตนในปริมาณหินปูนที่แตกต่างกันนั้นไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนนัก

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ในการสนับสนุนทุนวิจัย ภายใต้โครงการทุนวิจัยสาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2551 เลขที่ทุน RDG 5250005

ขอขอบพระคุณบริษัท เอสเออาร์คอนกรีต จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบและสถานที่ในการทดสอบคอนกรีต

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบที่ใช้ในการทดสอบและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทางเคมีและฟิสิกส์ในการทดสอบตัวอย่าง และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมทั้งการอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

1. ฝ่ายบริการเทคนิคลูกค้า บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน), 2551, *คู่มืออินทรีคอนกรีต*, กรกฎาคม หน้า 8-45.

2. BS EN 197-1, 1987, *Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements Part 4*, pp.

3. Annual Book of ASTM Standards, 2002, *C 33-97 Standard Specification for Concrete Aggregate*.

4. สำนักงานผลิตภัณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม, *มอก.15 เล่ม 1-2547 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1*.

5. Annual Book of ASTM Standards, 2002, *C 1012 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*.

6. Annual Book of ASTM Standards, 2002, *C 1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*.

7. Annual Book of ASTM Standards, 2002, *C 150 Standard Specification for Portland Cement*.

8. Barker, A.P. and Copy, H.P., 1991, *The Early Hydration of Limestone-Filled Cements*, Elsevier, pp. 1-31.

9. Baron, J. and Douvre, C., 1987, "Technical and Economical Aspects of the Use of Limestone Filler Additions in Cement", *World Cement*, pp.109-128.

10. Detwiler, R.J., 1996, "Properties of Concretes Made with Fly Ash and Cements Containing Limestone", *PCA R&D*, Serial No. 2082, Illinois, pp. 120-148.

11. Kantro, D.L., 1978, "Calcium Carbonate Additions", *Paper Presented at the Portland Cement Association Cement Chemists Seminar*, Vol. 1, pp. 100-104.

12. Siebel, E. and Sprung, S., 1991, *Influence of Limestone in Portland Limestone Cement on the Durability of Concrete*, Beton, pp. 113-117.