



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

“การศึกษาปริมาณหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนที่เหมาะสมสำหรับงาน
โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน EN 197-1”

THE STUDY OF SUITABLE LIMESTONE CONTENT IN PORTLAND LIMESTONE
CEMENT FOR USING IN REINFORCED CONCRETE WORK COMPLY WITH EN 197-1

อดิศักดิ์ ยิ้มวัน

Adisak Yimwan

ตุลาคม พ.ศ. 2552

สัญญาเลขที่ RDG5250005

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

“การศึกษาปริมาณหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนที่เหมาะสมสำหรับงาน
โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน EN 197-1”

“THE STUDY OF SUITABLE LIMESTONE CONTENT IN PORTLAND LIMESTONE CEMENT FOR
USING IN REINFORCED CONCRETE WORK COMPLY WITH EN 197-1”

คณะผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.บุรณัฏฐ์ นัทรวิระ

นายอดิศักดิ์ ยิ้มวัน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ชุดโครงการ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

และบริษัทปูนซีเมนต์ นครหลวง จำกัด (มหาชน)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปริมาณหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนที่เหมาะสม สำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน EN 197-1
นักศึกษา	นายอดิศักดิ์ ยิ้มวัน
รหัสนักศึกษา	4810036097
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2552
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ

บทคัดย่อ

สำหรับงานคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูงนัก เช่น งานคอนกรีตสำหรับโครงสร้างทั่วไป งานหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปขนาดเล็กถึงขนาดกลาง เช่น แผ่นพื้น เสาเข็ม ท่อ เสา คอนกรีตบล็อก หรืองานคอนกรีตที่ผสมเองที่หน้างาน ในปัจจุบันมีการใช้ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และพบการใช้ปูนซีเมนต์ผสมบ้างในบางพื้นที่ ปัญหาที่เกิดขึ้นกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ กำลังอัดที่สูงเกินไป ในขณะที่เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ผสมมักจะเกิดปัญหาความแข็งแรงของคอนกรีตที่ไม่เพียงพอ ความต้องการหลักของผู้บริโภคกลุ่มนี้คือปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพพอสมควรกับงาน ถอดแบบได้เร็ว เช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ความแข็งแรงที่มากกว่าปูนซีเมนต์ผสม และราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน (Portland Limestone Cement, PLC) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถสนองตอบความต้องการดังกล่าวได้

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาถึงการปริมาณหินปูนที่ใส่เพิ่มในสัดส่วนต่างๆ และการบดปูนให้ได้ความละเอียดต่างๆ เพื่อหาจุดเหมาะสมที่จะสามารถนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนมาใช้งานจริงได้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์รวมทั้งงานคอนกรีต จากการศึกษา พบว่าสัดส่วนผสมที่สามารถนำมาใช้งานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ ปริมาณของหินปูน 15-20 % ที่ความละเอียด 4,500-5,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จทั้งที่ใส่น้ำยาและไม่ใส่น้ำยา แต่หากเมื่อผสมแล้วลอยลงไปในส่วนผสม กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้มีค่าไม่สูงตามที่ออกแบบ ส่วนกรณีของการนำไปผลิตเป็นคอนกรีตหล่อสำเร็จสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี และจากการทดสอบความคงทนในแง่ของการต้านทานการซึมผ่านของซัลเฟตและคลอไรด์พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนนั้นมีความสามารถในการต้านทานทั้งซัลเฟตและคลอไรด์ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งนี้ หากคำนวณในเชิงต้นทุนประกอบกันแล้วปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนที่มีปริมาณหินปูน 20 % ความละเอียด 4,500 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม จะมีประสิทธิภาพดีที่สุด

Thesis Title	THE STUDY OF SUITABLE LIMESTONE CONTENT IN PORTLAND LIMESTONE CEMENT FOR USING IN REINFORCED CONCRETE WORK COMPLY WITH EN 197-1
Student	Mr. Adisak Yimwan
Student ID.	4810036097
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Burachat Chatveera

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 cm^2/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.

In addition, PLC with 20% of limestone content and around 4,500 cm^2/g of Blaine fineness is the best one in term of both performance and cost.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ภายใต้โครงการทุนวิจัยสาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อมประจำปี ในการสนับสนุนทุนวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทางศูนย์เครื่องมือวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณบริษัท เอสเออาร์คอนกรีต จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ วัตถุดิบ และสถานที่ในการทดสอบคอนกรีต

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทางเคมีและฟิสิกส์ในการทดสอบตัวอย่าง และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมทั้งการอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคลากรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้เอื้อนามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนทำให้งานวิจัยนี้สามารถทำได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้ สามารถนำมาใช้ประยุกต์และ/หรือเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ต่อไป

นายอดิศักดิ์ ยิ้มวัน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ระเบียบวิธีวิจัยโดยย่อ.....	4
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา.....	5
1.5 ขอบเขตการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 หลักการและทฤษฎี.....	7
2.1.1 ปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ (Clinker and Cement)	7
2.1.2 การบดปูนซีเมนต์ (Cement Grinding).....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 วิธีการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	19
3.1 วิธีการจัดเก็บรวบรวมข้อมูล.....	19
3.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้.....	20
3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการบด.....	22
3.2.3 การทดสอบหาลงค์ประกอบทางเคมี.....	23
3.2.4 การทดสอบทางกายภาพ.....	25
3.2.5 การทดสอบหาค่าความคงทน (Durability)	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	28
4.1 ศึกษาข้อมูลองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1.....	29
4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน.....	30
4.2.1 คุณคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน.....	31
4.2.2 การทดสอบนำไปผลิตเป็นคอนกรีตที่ส่วนผสมต่างๆ.....	35
4.3 การทดสอบด้านความคงทน.....	58
4.3.1 การทดสอบความสามารถในการต้านทานซัลเฟต.....	58
4.3.2 การทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	65
5.1 ศึกษาข้อมูลองค์ประกอบทางเคมี และทางกายภาพของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1.....	65
5.2 คุณสมบัติเมื่อนำไปผลิตเป็นคอนกรีต.....	65
5.3 การทดสอบด้านความคงทน.....	67
บรรณานุกรม.....	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 มาตรฐาน BS EN 197-1 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ Portland Limestone Cement.....	3
1.2 Strength Class สำหรับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน BS EN 197-1.....	3
2.1 ผลทดสอบกำลังอัดของปูนซีเมนต์ที่มีและไม่มีส่วนผสมของผงหินปูน.....	10
2.2 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่มีสัดส่วนผงหินปูน 20 % เปรียบเทียบกับที่ไม่มีปริมาณผงหินปูน.....	14
3.1 การทดสอบตัวอย่างคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุวิจัย.....	19
3.2 สัดส่วนวัตถุดิบที่ใช้เป็น Portland Limestone Cement.....	22
3.3 สัดส่วนผสมที่ใช้ผลิตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ.....	26
3.4 สัดส่วนผสมที่ใช้ผลิตเป็นคอนกรีตหล่อสำเร็จ.....	27
4.1 ข้อกำหนดองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2547.....	28
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่นำมาใช้ในการทดสอบ.....	29
4.3 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่นำมาใช้ในการทดสอบ.....	30
4.4 ชื่อตัวอย่างทดสอบและสัดส่วนผสมของปูนเม็ด หินปูน และยิปซัม ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน.....	30
4.5 ผลทดสอบทางเคมีและกายภาพของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน ที่บดได้.....	31
4.6-4.37 สัดส่วนผสมคอนกรีตและผลการทดสอบสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จ (RMX01-RMX16).....	34-51
4.38-4.47 สัดส่วนผสมคอนกรีตและผลการทดสอบสำหรับคอนกรีตหล่อสำเร็จ..... (CPM01-CPM05)	53-58
4.48 ผลการทดสอบค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตเข้มข้น 5 %.....	59

4.49	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้สำหรับทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์.....	61
4.50	ผลทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สัดส่วนผสม RMX01.....	63
4.51	ผลทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สัดส่วนผสม RMX04.....	63

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สัดส่วนความต้องการในการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆในประเทศไทย พ.ศ. 2551.....	2
2.1 ปูนเม็ด (Clinker).....	8
2.2 ยิปซัม (Gypsum).....	8
2.3 หินปูน (Limestone)	8
2.4 หม้ออบปูนซีเมนต์	10
2.5 หม้ออบปูนซีเมนต์ในห้องทดสอบ.....	11
2.6 ความลึกของคาร์บอนชั้นในตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสกับสภาวะอุณหภูมิ 20 oC และความชื้น 65% ที่อายุ 3 ปี ผสมด้วยปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ.....	16
3.1 ปูนเม็ด (Clinker).....	20
3.2 ยิปซัม (Gypsum).....	20
3.3 หินปูน (Limestone)	20
3.4 เครื่องย่อยวัตถุดิบแบบหยาบ.....	21
3.5 เครื่องผสม.....	21
3.6 หม้ออบปูนซีเมนต์จำลอง.....	21
3.7 เครื่องทดสอบ Air Permeability สำหรับทดสอบหาค่าความละเอียด.....	21
3.8 X-ray Fluorescence.....	23
3.9 X-ray Diffractogram.....	24
3.10 การยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่น ไปกระทบชิ้นงาน และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสี ที่มุมต่างๆกัน.....	24
3.11 Rapid Chloride Permeability Apparatus.....	25
3.12 การติดตั้งเครื่องมือวัดการซึมผ่านของประจุคลอไรด์.....	26
4.1 ค่ากำลังอัดของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน.....	32
4.2 ระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน.....	33

4.3-4.18	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX01-RMX16.....	35-52
4.19-4.23	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX01-RMX16.....	53-58
4.24	ผลการทดสอบค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตเข้มข้น 5 %.....	60
4.25	การติดตั้งเครื่องมือวัดการซึมผ่านของประจุคลอไรด์.....	61
4.26	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX01.....	62
4.27	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX04.....	62
4.28	ปริมาณการซึมผ่านของประจุคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สัดส่วนผสม RMX01.....	63
4.29	ปริมาณการซึมผ่านของประจุคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สัดส่วนผสม RMX04.....	64

บทที่ 1

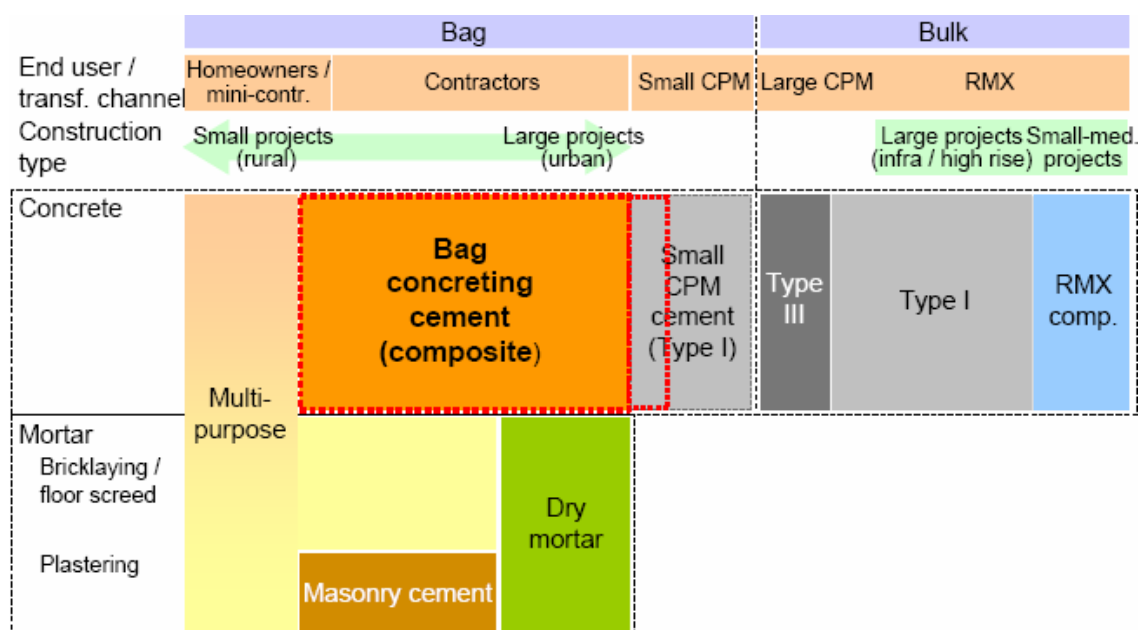
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในประเทศไทยนั้นปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งพบได้ทั่วไปในลักษณะบรรจุในถังไซโลและบรรจุลงขายปลีกตามร้านวัสดุก่อสร้าง ในธุรกิจคอนกรีตผสมเสร็จเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 รวมไปถึงงานหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปในโรงงานทั้งที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กหรือคอนกรีตอัดแรงก็นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไปใช้เป็นส่วนผสม แต่ก็มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 กันอย่างแพร่หลายเช่นเดียวกันในงานหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงโดยเฉพาะชิ้นส่วนขนาดใหญ่

สำหรับงานคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูงนัก เช่น งานคอนกรีตสำหรับเทโครงสร้างขนาดเล็ก งานหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปขนาดเล็ก เช่น ท่อ เสา บล็อกทางเท้า โดยเฉพาะงานคอนกรีตที่ผสมเองที่หน้างาน(ผสมด้วยมือหรือโม้ขนาดเล็ก) ในปัจจุบันมีการใช้ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ผสม ซึ่งพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ กำลังอัดที่สูงเกินจำเป็น ในขณะที่เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ผสมมักจะเกิดปัญหาความแข็งแรงของคอนกรีตที่ไม่เพียงพอ

จากการสำรวจในตลาดของผู้บริโภคปูนซีเมนต์ในประเทศไทยปี 2551 ดังแสดงในรูปที่ 1 นั้น พบว่าในส่วนงานคอนกรีต(ที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูงนัก)ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ชนิดสูงนั้นมีความต้องการค่อนข้างสูง โดยเฉพาะพื้นที่ในต่างจังหวัด ซึ่งความต้องการหลักของผู้บริโภคกลุ่มนี้ที่รับเหมาและช่างปูนเป็นส่วนใหญ่ และมีบางส่วนที่เป็นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป ซึ่งต้องการปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพพอสมควรกับงานถอดแบบได้เร็วเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ความแข็งแรงที่มากกว่าปูนซีเมนต์ผสม และราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลมส์โตน (Portland Limestone Cement, PLC) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สนองตอบความต้องการดังกล่าวได้



รูปที่ 1.1 แสดงสัดส่วนความต้องการในการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆในประเทศไทย พ.ศ. 2551 (ข้อมูลจากฝ่ายวิจัยการตลาดบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน))

ตามมาตรฐาน BS EN 197-1 นั้นระบุประเภทของ Cement เป็น 5 ประเภท ดังนี้

- CEM I Portland Cement
- CEM II Portland-composite Cement
- CEM III Blast Furnace Cement
- CEM IV Pozzolanic Cement
- CEM V Composite Cement

ซึ่ง Portland Limestone Cement (PLC) จัดอยู่ในประเภท CEM II Portland Composite Cement และ EN 197-1 ยังได้แบ่งย่อย CEM II ออกเป็น 2 ชนิด คือ CEM II/A-L มีปริมาณปูนเม็ด 80-94 % มีปริมาณผงหินปูน (Additive Limestone) 6-20 % และ CEM II/B-L ซึ่งมีปริมาณปูนเม็ด 65-79 % มีปริมาณผงหินปูน 21-35 % ดังแสดงในตารางที่ 1 (เปรียบเทียบกับ CEM I Portland Cement)

กำลังอัดที่ต่ำที่สุดของ Portland Limestone Cement ตามมาตรฐาน EN 197-1 นั้นระบุอยู่ใน Class 32.5 N กล่าวคือต้องมากกว่า 16 และ 32.5 MPa ที่อายุ 7 และ 28 วันตามลำดับ ในขณะที่ตามมาตรฐาน มอก.นั้นระบุกำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไว้ที่ 19 และ 28 MPa ที่อายุ 7 และ 28 วันตามลำดับ และกำลังอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อายุ 7 วันเพียง 11.5 MPa

ตารางที่ 1.1 แสดงมาตรฐาน BS EN 197-1 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ Portland Limestone Cement

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

ตารางที่ 1.2 Strength Class สำหรับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน BS EN 197-1

Compressive Strength (N/mm ²)				
Class	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			

ที่มา BS EN 197-1 Standard

แสดงให้เห็นว่าในเบื้องต้น Portland Limestone Cement ที่มีคุณสมบัติด้านกำลังอัดอยู่ระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ผสม ซึ่งน่าจะเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ผลิตคอนกรีตดังกล่าวมาข้างต้น อีกทั้งการผลิต Portland Limestone Cement ยังสามารถลดปริมาณก๊าซ CO₂ จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ให้น้อยลงได้เพราะมีการใช้ปริมาณปูนเม็ดน้อยลง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบในการผลิต Portland Limestone Cement โดยการปรับปริมาณ ผงหินปูนหรือหินปูนบด (ADL) และค่าความละเอียด (Blaine Fineness) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และได้คุณภาพของ Portland Limestone Cement อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงมาตรฐาน EN 197-1

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำ Portland Limestone Cement ไปใช้งานคอนกรีตเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย (โดยย่อ)

เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนผสมและคุณภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ Portland Limestone Cement แล้วพบว่าความแตกต่างกันที่ค่า Compressive Strength และช่วงของค่า Blaine เป็นจุดแรกที่น่าสนใจให้เป็นเป้าหมายแรกในการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งเป้าหมายของงานวิจัยชิ้นนี้ต้องการหาสัดส่วนปริมาณผงหินปูนและค่าความละเอียดที่เหมาะสม ให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

ในขั้นตอนแรกจะทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและอัตราส่วนผสม (Material Proportion) ของปูนซีเมนต์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 รวมทั้งพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีต เช่น ปริมาณผงหินปูน ความละเอียดของผงซีเมนต์และการกระจายของขนาดอนุภาค รอบที่ใช้ในการบด ขนาดและปริมาณลูกเหล็กที่ใช้ เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการศึกษาถึงการปริมาณหินปูนที่ใส่เพิ่มในสัดส่วนต่างๆ และการบดปูนให้ได้ความละเอียดต่างๆ เพื่อหาจุดเหมาะสมที่จะสามารถนำ Portland Limestone Cement มาใช้งานจริงได้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และรวมทั้งงานคอนกรีต เพื่อเป็นการพัฒนาที่ยั่งยืนร่วมกันระหว่างสังคมสิ่งแวดล้อม ภาครัฐและภาคอุตสาหกรรมต่อไป

งานวิจัยนี้ได้แบ่งขอบเขตของการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1.3.1 การทดลองปรับปริมาณของหินปูนบด (additive Limestone) และปรับค่าความละเอียด (Blaine Fineness) ที่เหมาะสมในการผลิต Portland Limestone Cement

- * ปูนเม็ด (Clinker) เป็นปูนเม็ดที่ได้จากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) อ. แก่งคอย จ.สระบุรี
- * ทดลองปรับสัดส่วนของหินปูน (ADL) ในช่วง 15-25 % ควบคู่ไปกับค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ (Blaine Fineness) ในช่วง 4,000-5,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม
- * ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ รวมไปถึงความสามารถในการต้านทานสารประกอบซัลเฟตและคลอไรด์ ของ Portland Limestone Cement ที่สัดส่วนปริมาณวัตถุดิบต่างๆเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอยู่ในท้องตลาด

1.3.2 การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของ Portland Limestone Cement ที่สัดส่วนปริมาณวัตถุดิบต่างๆ เพื่อหาความเป็นไปได้การนำไปใช้งานคอนกรีต

- * ทดสอบคุณสมบัติของ Portland Limestone Cement ที่ได้ตามมาตรฐาน BS EN 197-1
- * ทดลองนำ Portland Limestone Cement ไปใช้งานจริงในสนามทั้งการผลิตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ และงานหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป โดยใช้สัดส่วนผสมคอนกรีตตามลักษณะที่ใช้จริงที่หน้างาน และทดสอบคุณสมบัติเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอยู่ในท้องตลาด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในเชิงความรู้พื้นฐานและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ

1.4.1 ความรู้เชิงพื้นฐาน

ทราบถึงอัตราส่วนของวัตถุดิบและค่าความละเอียดที่เหมาะสมในการผลิต Portland Limestone Cement และคุณสมบัติเมื่อนำไปผสมเป็นคอนกรีตทั้งที่เป็นงานคอนกรีตผสมเสร็จและงานหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.4.2 เชิงพาณิชย์

สามารถนำไปเป็นแนวทางในการผลิต Portland Limestone Cement เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภคในการนำไปใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับงานคอนกรีตทั่วไป และยังเป็นการส่งเสริมให้ผู้บริโภคใช้ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับประเภทของงานและในต้นทุนที่เหมาะสมยิ่งขึ้น

1.4.3 เชิงสาธารณะ

เป็นการส่งเสริมและสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ที่มีคุณภาพ และมีความสามารถทำงานวิจัยในเชิงความรู้ อีกทั้งยังสามารถสร้างโจทย์งานวิจัยเพื่อพัฒนาและแก้ไขปัญหาของสังคมหรือปัญหาของภาคอุตสาหกรรมอันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศโดยรวม

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1.5.1 การทดลองปรับปริมาณของผงหินปูน (Additive Limestone) และปรับค่าความละเอียด (Blaine Finenes) ที่เหมาะสมในการผลิต Portland Limestone Cement

- * ปูนเม็ด (Clinker) เป็นปูนเม็ดที่ได้จากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) อ. แก่งคอย จ.สระบุรี
- * ทดลองปรับสัดส่วนของผงหินปูน (ADL) ในช่วง 15-25 % ควบคู่ไปกับค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ (Blaine Fineness) ในช่วง 4,000-5,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

- * ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ รวมไปถึงความสามารถในการต้านทานสารประกอบซัลเฟต และคลอไรด์ ของ Portland Limestone Cement ที่สัดส่วนปริมาณวัตถุดิบต่างๆเปรียบเทียบกับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอยู่ในท้องตลาด

1.4.4 การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของ Portland Limestone Cement ที่สัดส่วน ปริมาณวัตถุดิบต่างๆ เพื่อหาความเป็นไปได้การนำไปใช้งานคอนกรีต

- * ทดสอบคุณสมบัติของ Portland Limestone Cement ที่ได้ตามมาตรฐาน BS EN 197-1
- * ทดลองนำ Portland Limestone Cement ไปใช้งานจริงในสนามทั้งการผลิตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ และงานหล่อขึ้นรูปชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป โดยใช้สัดส่วนผสมคอนกรีตตามลักษณะที่ใช้งานที่ หน้างาน และทดสอบคุณสมบัติเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอยู่ในท้องตลาด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและทฤษฎี

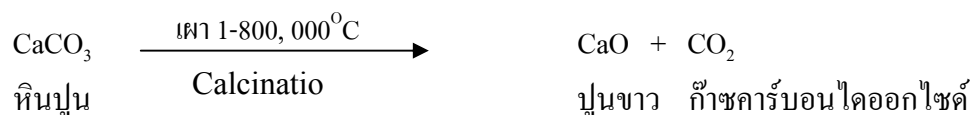
2.1.1 ปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ (Clinker and Cement)

ปูนเม็ด (Clinker) เป็นก้อนวัตถุหลอมที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆจนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนผสมทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ส่วนปูนซีเมนต์ (Cement) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดร่วมกับยิปซัม และหินปูน ซึ่งหากเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปริมาณหินปูนจะใช้น้อยมาก ในขณะที่อาจใช้หินปูนถึง 40 % ในการผลิตปูนซีเมนต์ผสม

ปูนเม็ดเป็นวัตถุดิบที่สำคัญที่สุดในการบดปูนซีเมนต์เพราะคุณภาพของปูนเม็ดจะมีผลต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์โดยตรง ขั้นตอนการผลิตปูนเม็ดเป็นขั้นตอนของการนำวัตถุดิบ ได้แก่ หินปูน (Limestone) หินเชล (Shale) แร่เหล็ก เป็นต้น มาเผาภายใต้อุณหภูมิประมาณ 800-1500 °C โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

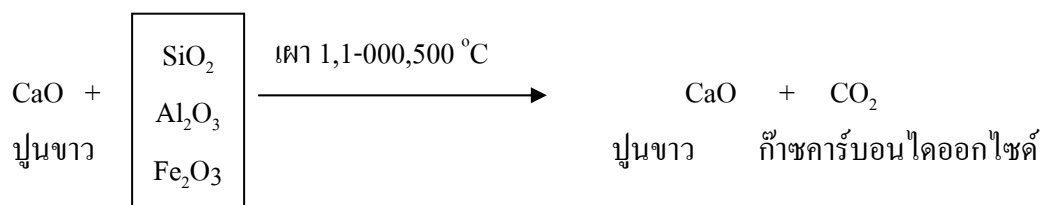
1) ปฏิกิริยา Calcination

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 800-1,000 °C โดยมีหินปูน (Limestone) หรือ CaCO_3 (Calcium Carbonate) เป็นสารตั้งต้นซึ่งจะถูกให้ความร้อนแล้วเปลี่ยนเป็น ปูนขาว (Lime) หรือ CaO (Calcium Oxide) และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการนี้ด้วย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้



2) ปฏิกิริยา Sintering

เป็นปฏิกิริยาที่นำปูนขาว (CaO) จากปฏิกิริยา Calcination มาทำปฏิกิริยากับหินเชลและแร่ต่างๆ (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) ภายในช่วงอุณหภูมิ 800-1,500 °C แล้วทำให้เกิดเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ C_3S (Tricalcium Silicate), C_2S (Dicalcium Silicate), C_3A (Tricalcium Aluminate) และ C_4AF (Tetracalcium Alumino-ferite) ซึ่งทั้งหมดจะมีลักษณะเป็นผลึกอยู่ในปูนเม็ด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้



ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือ Portland Cement คือผงปูนซีเมนต์ที่ได้จากการผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน ระหว่างหินปูน (Calcareous) ที่มีออกไซด์ของแคลเซียมเป็นองค์ประกอบกับดินดานบดละเอียด (Argillaceous) ที่มีออกไซด์ของซิลิกา (Silica Oxide) อลูมินา (Alumina) และเหล็ก (Iron) โดยผ่านขบวนการเผา และทำการบดให้ละเอียด ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะมีสีเทา

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ (Manufacture of Portland Cement) จากนิยามข้างต้นจะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของวัตถุดิบได้แก่

1. หินปูน (Limestone) หรือดินสอพอง (Chalk) ให้สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม
2. ซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) Argillaceous Materials ที่ได้จากดินเหนียวหรือดินดาน (Shale)
3. Iron Oxide Materials ซึ่งได้จากแร่เหล็ก (iron ore) หรือสีลาแลง (Laterite)

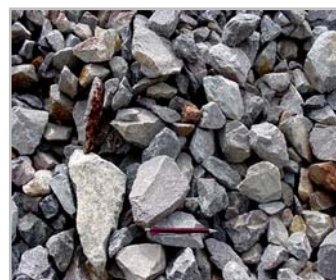
วัตถุดิบที่ใช้นี้อาจแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียม ได้แก่ หินปูน (Limestone) หรือดินสอพอง (Chalk) ดินปูนขาว (Marl) และประเภทที่ให้ธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียม ได้แก่ หินเชล (Shale) หรือดินเหนียว (Clay) นอกจากนี้ยังมีวัตถุดิบอย่างอื่น เช่น แร่เหล็ก และยิปซัม เป็นต้น โดยกระบวนการผลิตเริ่มจากการนำส่วนผสมมาบดให้เป็นผงละเอียด แล้วนำมาผสมรวมกันตามสัดส่วน จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดมาเผารวมกันในเตาเผาแบบหมุนที่เรียกว่า Rotary Kiln ที่อุณหภูมิประมาณ $1,450\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเมื่อทำให้เย็นตัวลง วัตถุดิบจะหลอมรวมตัวกันเป็นก้อนที่เรียกว่า Clinker (ดังรูปที่ 1) แล้วจึงถูกบดให้ละเอียดอีกครั้งเพื่อเป็นปูนซีเมนต์ผง โดยขั้นตอนนี้จะมีการผสมยิปซัม (Gypsum) ดังรูปที่ 2 เข้าไปด้วย เพื่อช่วยในการหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ หรืออาจผสมหินปูน (ADL) ลงไปด้วยในระหว่างขั้นตอนนี้



รูปที่ 2.1 แสดงภาพ Clinker



รูปที่ 2.2 แสดงภาพ Gypsum



รูปที่ 2.3 แสดงภาพ ADL

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ตามปริมาณของสารประกอบ และวัตถุประสงค์ในการใช้งาน โดยมาตรฐานของสมาคมทดสอบอเมริกัน (American Society for Testing and Materials, ASTM) และสำนักงานผลิตภัณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) ของประเทศไทย ได้แบ่งประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไว้ 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 (Type I) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement; OPC) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีการผลิตและใช้งานกันมากที่สุด เหมาะสำหรับงานผลิตคอนกรีตหรือโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ตัวอย่างปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในประเทศไทย เช่น ตราอินทรีเพชรตราช้าง ตราทีพีไอแดง ตราพญานาคเขียว เป็นต้น

ประเภทที่ 2 (Type II) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้รับการปรับปรุงจากปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพื่อให้มีความสามารถในการต้านทานซัลเฟต (Sulfate attack) และลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ประเภทที่ 3 (Type III) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ให้อำนาจเร็ว (High-Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้คล้ายกับปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่จะมีการพัฒนาให้อำนาจอย่างรวดเร็วในระยะแรก เนื่องจากมีค่า C_3S และค่าความละเอียดที่สูงกว่าปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตัวอย่างที่มีขายในประเทศไทย เช่น ตราอินทรีดำ ตราช้างเอราวัณ ตราพญานาคแดง เป็นต้น

ประเภทที่ 4 (Type IV) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีความร้อนจากปฏิกิริยา Hydration ต่ำ มีประสิทธิภาพสูงกว่าปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 2 เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete) หรืองานคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น สร้างเขื่อน ฐานรากขนาดใหญ่ เป็นต้น เนื่องจากมีค่า C_3S และ C_3A ที่ต่ำ ทำให้มีการคายความร้อนน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่น

ประเภทที่ 5 (Type V) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้จะมีปริมาณ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ต่ำเพื่อลดโอกาสการทำลายเนื้อคอนกรีตจากซัลเฟตภายนอก ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะให้กำลังอัดช้า และมีการคายความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ผสม

นอกจากนี้ปูนซีเมนต์อีกชนิดที่นิยมใช้ในประเทศไทยกันอย่างแพร่หลาย คือ ปูนซีเมนต์ผสม ที่มีมาตรฐาน มอก. 15-2547 รองรับซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดขึ้นโดยสำนักงานผลิตภัณฑ์มาตรฐาน

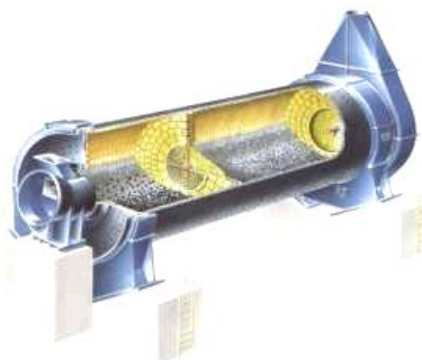
อุตสาหกรรม (มอก.) โดยเฉพาะ ปูนซีเมนต์ผสมจะใช้ปูนเม็ดชนิดเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 แต่มีการเติมผงหินปูนลงในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ลงไปประมาณ 35-40 %

โดยทั่วไปปูนซีเมนต์ผสมถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับงานคอนกรีตขนาดเล็กที่ไม่ต้องการกำลังอัดมากนัก รวมไปถึงงานก่ออิฐฉาบปูน กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเป็นส่วนประกอบมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมในสัดส่วนเดียวกัน

2.1.2 การบดปูนซีเมนต์ (Cement Grinding)

ลักษณะของหม้อบดและการบดปูนซีเมนต์เป็นดังนี้

หม้อบดปูนซีเมนต์จะถูกติดตั้งอยู่ในก้านจับ (Cradle) ซึ่งจะมีการหมุนรอบ ๆ อยู่ในโครง โดยการหมุนรอบก้านจับและหม้อบดจะทำให้ลูกเหล็กภายในเกิดการหมุนตาม และจะมีตัวจับยึดด้านข้าง (Quick-Release) สปริงยึด (Spring – loaded) เป็นตัวจับยึด ซึ่งจะจับก้านยึดและโครงอื่นๆให้อยู่ในแนวนอน จากนั้นจึงทำการหมุนหม้อบด เมื่อตัวจับยึดถูกคลายออก ก้านจับและหม้อบดสามารถถูกจับเอียง เพื่อเทสารตัวอย่างที่บดเสร็จแล้วออกจากหม้อบด ซึ่งหม้อบดที่ทำการเท สามารถจับหมุนกลับ 180° ได้เพื่อให้ตัวอย่างออกได้หมด



รูปที่ 2.4 หม้อบดปูนซีเมนต์ (Cement Mill)



รูปที่ 2.5 หม้อบดปูนซีเมนต์ในห้องทดสอบ (Lab Mill)

ส่วนหม้อบดที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นแบบ Pascal Ball Mill Pot โดยหม้อบดและก้านจับถูกโครงนอกปิดอย่างมิดชิดระหว่างการดำเนินการขั้นตอนการบด โดยเลื่อนโครงนอกปิด และยึดด้วยหัวยึด (Incorporates) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปิดโครงนอกระหว่างขั้นตอนการบด หม้อบดนี้จะถูกขับเคลื่อนด้วยเกียร์มอเตอร์ (Gear Motor) ½ HP โดยมีการใช้ไฟฟ้าขนาด $3 \times 380 \text{ Volt}/50 \text{ Hz}$ และมีขนาดต่าง ๆ ของหม้อบดดังนี้

- ขนาดปริมาณบรรจุ : 35 ลิตร
- เส้นผ่านศูนย์กลาง : 356 มม.
- ความสูงของหม้อบด : 495 มม.
- น้ำหนัก (ไม่รวมตัวอย่างและลูกเหล็ก) ประมาณ 27 กิโลกรัม
- ลูกเหล็กที่ใช้เป็นชนิด Hard Carbon Steel โดยในขั้นตอนการบดจะมีการใส่ลูกเหล็กขนาด ต่าง ๆ เป็นน้ำหนัก ดังนี้
 - ลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มม. ใส่เป็นน้ำหนัก 21 กิโลกรัม (ประมาณ 119 ลูก/กก.)
 - ลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มม. ใส่เป็นน้ำหนัก 21 กิโลกรัม (ประมาณ 35 ลูก/กก.)
 - ลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มม. ใส่เป็นน้ำหนัก 28 กิโลกรัม (ประมาณ 15 ลูก/กก.)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มาตรฐานสากลสำหรับการเติมผงหินปูนในปูนซีเมนต์สามารถกล่าวได้โดยสรุปดังนี้

การใช้ผงหินปูนเพื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐานของแคนาดา (Canadian Cement Standard) อนุญาตให้ใส่ได้ถึง 5% ตั้งแต่ต้นค.ศ.1980 มาตรฐาน CSA (CSA 1998) สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ CAN/CSA-A5 ได้นิยามปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ว่า “เป็นผลผลิตที่ได้จากการบดเม็ดปูนซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งส่วนผสมของแคลเซียมซิลิเกต หินปูน น้ำ และ ส่วนผสมเพิ่มเติมอื่นๆอาจถูกเติมได้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต”

สำหรับมาตรฐานยุโรป EN 197-1 (CEN 2000) ระบุว่า สามารถเติมผงหินปูนในปูนซีเมนต์ได้ 3 ระดับ คือ CEM I : Portland Cement สามารถมีส่วนประกอบย่อยชนิดอื่น ซึ่งอาจเป็นหินปูนได้ไม่เกิน 5% CEM II/A-L และ CEM IIB-L : Portland Limestone Cement มีส่วนผสมของหินปูนบดได้ 6% ถึง 20% และ 21% ถึง 35% ตามลำดับ ซึ่งในยุโรป 19% ของซีเมนต์ทั้งหมดเป็น PLC ที่มีส่วนผสมของผงหินปูนตั้งแต่ 6% ถึง 35%

มาตรฐานปูนซีเมนต์โลกได้ระบุว่า มากกว่า 25 ประเทศอนุญาตให้มีอัตราส่วนผสมของหินปูนตั้งแต่ 1 ถึง 5% ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และหลายประเทศอนุญาตให้ใช้อัตราส่วนผสมของผงหินปูนมากถึง 35% ใน Blended Cementตั้งแต่ปี ค.ศ. 1991 หลายประเทศ เช่น Australia, Italy, New Zealand และอังกฤษได้ปรับมาตรฐานเกี่ยวกับการอนุญาตให้ใช้อัตราส่วนผสมของผงหินปูนในมาตรฐานปูนซีเมนต์โลกฉบับล่าสุด นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาปูนซีเมนต์ผสมสารลดน้ำอย่างจำนวนมากที่ความละเอียดมากกว่า $5,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ โดยทดสอบเกี่ยวกับการสูญเสียค่าความยุบตัว ปริมาณอากาศ การเยิ้ม เวลาในการก่อตัว และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมสารลดน้ำอย่างแรงในขั้นตอนการบดปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ทำจากปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาที่เติมสารลดน้ำอย่างแรงเข้าไปตอนผสมคอนกรีต พบว่าผลที่ได้แตกต่างกันไม่ชัดเจนนัก

กำลังและการพัฒนากำลัง

Hooton (1990) ได้ทดสอบตัวอย่างปูนซีเมนต์ 3 ชุด ซึ่งแต่ละชุดได้มาจากเม็ดปูนชนิดเดียวกัน ทั้งที่มีและไม่มีส่วนผสมของผงหินปูน ผลกำลังอัดของตัวอย่างทดสอบถูกแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลทดสอบกำลังอัดของปูนซีเมนต์ที่มีและไม่มีส่วนผสมของผงหินปูน (Additive Limestone) (Hooton (1990))

Cement	1	1c	2	2c	3	3c
% C ₃ A	10.4	10.0	9.1	9.8	8.3	7.3
% CaCO ₃ (by TGA)	0.3	4.1	0.8	4.7	0.3	2.6
Age						
2 days	27.0	21.4	22.7	21.2	18.5	21.0
3 days	29.3	24.1	26.4	24.2	22.4	24.7
7 days	33.4	28.7	31.5	29.3	27.8	29.0
28 days	40.8	36.4	41.3	36.4	35.0	35.3
16 months	51.1	49.6	45.6	42.1	43.6	45.4

Albeck และ Sutej (1991) พบว่าการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ Portland Limestone Cement ซึ่งได้มาจากเม็ดปูนประเภทเดียวกัน (ค่า Blaine Fineness ประมาณ 4,000 ตร.ซม/ก.) ตั้งแต่ช่วงเดือนมกราคม 1989 ถึง พฤษภาคม 1990 ค่อนข้างใกล้เคียงกัน การพัฒนากำลังอัดของ PLC อาจมีระดับต่ำกว่าเล็กน้อยในบางตัวอย่าง

Hawkins (1986) ได้ทำการทดสอบ 2 การทดสอบ โดยการทดสอบแรกทำการปูนเม็ดและยิปซัมในห้องทดสอบซึ่งมีส่วนผสมของผงหินปูน 0, 3, 5.5 และ 8% ที่มีค่า Blaine Fineness ที่คงที่ ในการทดสอบที่สอง การทดสอบได้ถูกทำซ้ำโดยมีส่วนผสมของหินปูน 0, 2, 5 และ 8% โดยค่าที่ต่ำกว่าตะแกรงเบอร์ 325 ได้ถูกกำหนดไว้ให้คงที่ โดยการทดสอบทั้งหมดได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 โดยมีส่วนผสมของ C₃A เท่ากับ 5.1% และ หินปูนที่มี CaCO₃ เท่ากับ 85% ซึ่งปริมาณของ SO₃ ได้ถูกคงระดับที่ 2.5% ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น PLC จะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Bedard และ Bergeron (1990) ได้ศึกษาผลกระทบของคาร์บอนต่อนกริตที่บ่มด้วยความร้อน ตัวอย่างใช้ปูนซีเมนต์ CSA Type 30 และปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนจาก 2 แหล่ง ได้ถูกนำมาผสมคอนกรีต ปริมาณของผงหินปูนได้ถูกเลือกเพื่อให้เหมาะสมต่อคุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ชนิดแรกมีส่วนผสมของ C₃A เท่ากับ 10.4% และถูกทดสอบในกรณีที่มีและไม่เติมผงหินปูนชนิด A ปริมาณ 4.1% ปูนซีเมนต์ชนิดที่สองมีส่วนผสมของ C₃A เท่ากับ 11.6% และถูกทดสอบในกรณีที่มีและไม่เติมผงหินปูนชนิด B ปริมาณ 2.3% การกระจายตัวของขนาดปูนซีเมนต์ในแต่ละกรณีใกล้เคียงกัน โดยผลกำลังของคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆกรณี ผลกำลังอัดที่อายุ 1 วัน ทั้งที่มีและไม่เติมผงหินปูนแทบจะไม่มี ความแตกต่างกัน

Sprung และ Siebel (1991) พบว่าการใช้วัสดุเนื้อหยาบเพื่ออุดช่องว่างขนาดเล็กสามารถเพิ่มกำลังอัดโดยการปรับปรุงการอัดตัวของส่วนผสมขนาดเล็ก ผลเหล่านี้ได้ถูกศึกษามาเป็นเวลานานแล้ว แต่การใช้ผงหินปูนแตกต่างจากกรณีที่ใช้เถ้าลอยหรือวัสดุปอซโซลาน การใช้ผงหินปูนไม่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นเมื่อมีการบ่มที่นานขึ้น เมื่อผงหินปูนถูกเติมในปริมาณมาก (15-25%) กำลังอัดจะต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Livesey (1991) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับคอนกรีตที่มีความสามารถในการเทได้เท่ากันและมีปริมาณหินปูนถึง 25% จากการวิจัยพบว่าการใช้ผงหินปูนปริมาณ 5% ส่งผลกระทบน้อยมากต่อคอนกรีต แต่คุณสมบัติของผง

หินปูนอาจเป็นปัจจัยหลักได้ ผลของการใช้ผงหินปูนปริมาณ 5% ได้แสดงว่า มีการเร่งกำลังอัดในช่วงต้น โดยเฉพาะถ้าปูนซีเมนต์มีความละเอียดมากขึ้น

Schmidt (1992) พบว่ากำลังของปูนซีเมนต์และคอนกรีตจะไม่ลดหากมีการเติมผงหินปูนเพียง 5-10% ผลกระทบจากการเจือจางจะพบได้ชัดเมื่อปูนซีเมนต์ถูกบดละเอียดมากขึ้น การลดอัตราส่วน w/c อาจถูกใช้เพื่อทดแทนผลกระทบจากการเจือจาง

Vuk et al. (2001) ได้ทำการทดลองด้านสถิติเพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้ผงหินปูนปริมาณ 5% ความละเอียดของปูนซีเมนต์ คุณสมบัติด้านเคมีของเม็ดปูนต่อกำลังอัด พบว่ากำลังอัดช่วงต้นของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของผงหินปูน อย่างไรก็ตามกำลังอัดช่วงปลายจะคงที่หรือลดลงขึ้นอยู่กับความละเอียดและคุณสมบัติด้านเคมีของเม็ดปูน โดยเม็ดปูนที่ใช้มีปริมาณ C_3A ต่ำ (1.3 % หรือ 1.4%) และปริมาณ C_3S เพียง (35 % หรือ 46%)

ความคงตัวของปริมาตร

Adams และ Race (1990) ศึกษาผลกระทบต่อการหดตัวแบบแห้ง ของการผสมผงหินปูนลงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 2 โดยใช้มาตรฐาน ASTM C 596 ผลแสดงให้เห็นถึงอัตราการหดตัวที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการเติมส่วนผสมของซัลเฟต และ/หรือ การใช้สารผสมเพิ่มสามารถเพิ่มอัตราการหดตัวได้

Hooton (1990) เปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบการใช้ปูนซีเมนต์จากเม็ดปูนชนิดเดียวกันที่ผสมและไม่ผสมผงหินปูนซึ่งพบว่าการใช้คาร์บอนเอนท์ไม่ส่งผลมากนักต่ออัตราการขยายตัว

Alunno-Rossetti และ Curcio (1997) กล่าวว่า การหดตัวของตัวอย่างคอนกรีตสามารถวัดได้จากการใช้ปูนซีเมนต์ที่ผสมและไม่ผสมผงหินปูนปริมาณ 20% ผลข้อมูลได้ถูกแสดงในตารางที่ 4 ตามที่คาดการไว้ การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ทำให้เกิดการเพิ่มในอัตราการการหดตัว

ตารางที่ 2.2 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่มีสัดส่วนผงหินปูน 20 % เปรียบเทียบกับที่ไม่มีปริมาณหินปูน (Alunno-Rossetti และ Curcio (1997))

	Plant B				Plant G			
Cement content, kg/m ³	270		330		270		330	
Limestone content of cement, % by mass	0	20	0	20	0	20	0	20
Shrinkage, $\mu\text{m/m}$	635	640	680	690	540	560	615	595

การซึมผ่านของน้ำ

การซึมผ่านของน้ำเป็นปัจจัยหลักต่อความทนทานของวัสดุที่มีรูพรุน ถ้าไม่รวมการกัดเซาะ กลไกการพังทลายจะเกิดขึ้นจากการซึมผ่านของน้ำ และวัสดุประเภทอื่นเช่น Oxygen, Carbon dioxide, Chlorine ions,

Sulfate ion, กรด และอื่นๆ การพังทลายจากการแข็งตัวของน้ำจะไม่เกิดขึ้นหากคอนกรีตไม่อยู่ในสภาวะอิ่มตัว การเกิดสนิมจะต้องมีน้ำและ Oxygen และปฏิกิริยาจะเกิดเร็วขึ้นหากมีคลอไรด์ไอออน ปฏิกิริยา Alkali-silica จำเป็นต้องมีน้ำ ในบางกรณีน้ำที่เป็นส่วนผสมของคอนกรีตอาจมีในปริมาณที่มากเกินไปและทำให้เกิดการพังทลาย แต่โดยทั่วไปแล้วน้ำจากสิ่งแวดล้อมภายนอกจะเป็นตัวทำให้เกิดความเสียหายกับคอนกรีต ทั้งนี้ ในสภาพแวดล้อมปกติอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ต่ำกว่าทำให้คอนกรีตมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีวิธีที่สะดวกและเป็นที่ยอมรับได้ในการวัดอัตราการซึมได้ของน้ำ

การซึมผ่านของน้ำสัมพันธ์กับโครงสร้างของรูพรุนโดยตรง ขนาดของรูพรุนมีความสำคัญน้อยกว่า ลักษณะการเชื่อมต่อของรูพรุน Sellevold et al. (1982) ได้กล่าวว่าการเติม CaCO_3 เพื่อปรับปรุงโครงสร้างของรูพรุนไม่ได้ทำให้ปริมาตรของรูพรุนน้อยลงแต่ทำให้ลดขนาดของรูพรุนซึ่งทำให้ลดความเป็นไปได้ที่จะมีการเชื่อมต่อกัน

Moir และ Kelham (1993) ศึกษาการซึมผ่านของ Oxygen ในตัวอย่างคอนกรีตที่มีและไม่มีส่วนผสมของผงหินปูนปริมาณ 5% และ 25% พบว่าผงหินปูนทำให้อัตราการซึมผ่านของ Oxygen น้อยลง การบ่มที่นานขึ้นทำให้อัตราการซึมผ่านลดลงเช่นเดียวกัน ผลกระทบต่อปริมาตรของรูพรุนจะน้อยลงเมื่อเติมผงหินปูนในปริมาณ 5% และผลกระทบต่อการดูดซึมของน้ำก็ลดลงในลักษณะเดียวกันเมื่อเติมหินปูนปริมาณ 5%

Schmidt (1992) ทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตกระจายกักฟองอากาศผสมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ PLC ตาม DIN 1048 ผลการทดสอบค่อนข้างใกล้เคียงกันสำหรับปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ประเภท Schmidt ได้หาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจากซีเมนต์ทั้งสองประเภทอีกด้วย ในทุกกรณีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสำหรับ Portland Limestone Cement มีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเนื่องจากจำนวนตัวอย่างการทดสอบมีไม่มากพอ Schmidt จึงไม่มั่นใจว่าข้อมูลสามารถสรุปแนวโน้มของสมรรถนะต่อขนาดและการอัดตัวของปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามผลแสดงแน่ชัดว่าการใช้ Portland Limestone Cement มีผลกระทบคล้ายกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมคอนกรีตในปริมาณและระยะเวลาการบ่มที่เท่ากัน โดยไม่คำนึงถึงความต้องการน้ำที่น้อยลงซึ่งสามารถลดอัตราส่วน W/C ได้

คาร์บอนเนชั่น

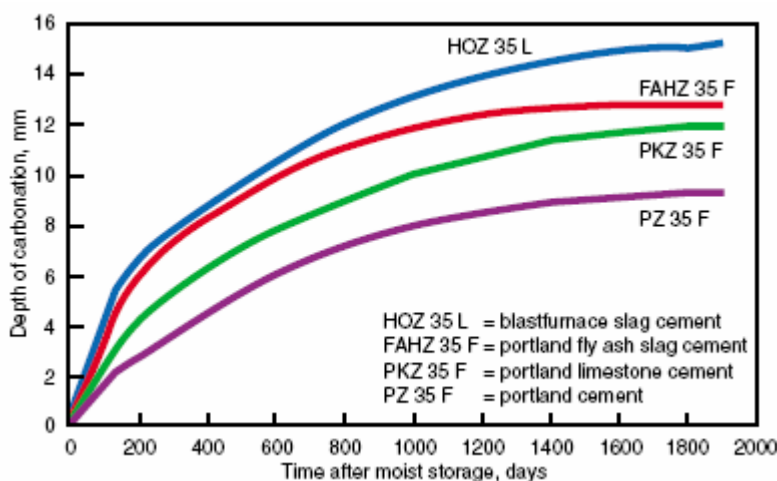
Sprung และ Siebel (1991) พบว่า โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่ใช้ Portland Limestone Cement (ที่มีปริมาณผงหินปูน 6-20%) ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียว ถึงแม้ว่าค่ากำลังอัดจะเท่ากันก็ตาม

Tezuka et al. (1992) ศึกษาความลึกของคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของผงหินปูนที่ต่างกัน เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Baron (1988) พบว่าความลึกของคาร์บอนเนชั่นที่มีปริมาณผงหินปูนเท่ากับ 15% ผสมอยู่มีค่าเท่ากับตัวอย่างสำหรับควบคุม

Barker และ Matthews (1994) ศึกษาความทนทานของคอนกรีต 2 ชุด : ชุด A ผสมจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์และ w/c ที่เท่ากัน ชุด B ผสมเพื่อให้เกิดค่าความยวบตัวและกำลังอัดที่อายุ 28 วันที่เท่ากัน ข้อมูลความลึกของคาร์บอนเนชั่นสำหรับคอนกรีตที่ผสมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และคอนกรีตที่ใช้ PLC ในปริมาณที่ต่างกัน ตัวอย่างคอนกรีตถูกเก็บไว้ในอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความชื้น 65% ผลการทดลองพบว่าถ้าหากไม่คำนึงถึงส่วนประกอบของซีเมนต์ ความลึกของคาร์บอนเนชั่นจะสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดของคอนกรีต

Schmidt (1992) สังเกตเห็นว่าความลึกของคาร์บอนเนชั่นสำหรับคอนกรีตที่ใช้ Portland Limestone Cement (ปริมาณหินปูน 13 - 17%) จะสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่จะต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ Slag Cement อย่างไรก็ตามเนื่องจากการใช้ Slag ในสภาวะจริงทำให้สมรรถนะของคอนกรีตดีขึ้น ดังนั้นผลการทดลองนี้ไม่สามารถแสดงถึงความทนทานของคอนกรีตได้ ในกรณีใดก็ตามการเพิ่มขึ้นของความลึกของคาร์บอนเนชั่นจะต้องวัดอย่างน้อยหลังจาก 3 ปี ของการสัมผัสกับสภาพแวดล้อม รูปที่ 8 แสดงให้เห็นความลึกของคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ถูกบ่มในน้ำเป็นเวลา 6 วัน และสัมผัสกับสภาพแวดล้อมทั่วไปที่มีความชื้น 65% และที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ปี คอนกรีตเหล่านี้มี w/c ที่คงที่ เพื่อที่จะให้เห็นความแตกต่างของความสามารถในการเทได้



รูปที่ 2.6 ความลึกของคาร์บอนเนชั่นในตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสกับสภาวะอุณหภูมิ 20 °C และความชื้น 65% ที่อายุ 3 ปี ผสมด้วยปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ

Moir และ Kelham (1993) พบว่าความลึกของคาร์บอนเนชั่นมีความสัมพันธ์ในทางกลับกันกับกำลังอัดของคอนกรีต การทดสอบของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของผงหินปูนปริมาณ 5% ถึง 25% ทั้งที่ใส่และไม่ใส่เถ้า

ลอย หรือ slag แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของคาร์บอนชั้นและกำลังอัดของคอนกรีต การเพิ่มระยะเวลาการบ่มตั้งแต่ 1 ถึง 3 วัน ลดความลึกของคาร์บอนชั้นโดยประมาณ 40% สำหรับปูนซีเมนต์ทุกประเภท

Alunno-Rosetti และ Curcio (1997) ทดสอบเกี่ยวกับความลึกของคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ผสมและไม่ผสมผงหินปูนปริมาณ 20% และพบว่าการใช้ผงหินปูนไม่ส่งผลกระทบต่อความลึกของคาร์บอนชั้น ทั้งนี้ จากที่กล่าวมาทั้งสามสามารถสรุปได้พอสังเขป ดังนี้

- เมื่อหินปูนถูกบดละเอียดได้ง่ายกว่าเม็ดปูนเพื่อให้ได้ Blaine Fineness ที่เท่ากัน เม็ดปูนมีความเป็นไปได้อาจมีส่วนหยาบมากกว่าหินปูน ระดับกำลังของซีเมนต์ที่ผสมผงหินปูนสามารถควบคุมได้โดยใช้ความแตกต่างในความสามารถในการถูกบด
- การที่หินปูนถูกบดละเอียดได้ง่ายกว่า ทำให้มีการกระจายของขนาดที่กว้างขึ้น และการคัดขนาดทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีการปรับปรุงในความสามารถในการเทได้และการยึมน้ำน้อยลงสำหรับ Portland Limestone Cement การกระจายของขนาดที่กว้างขึ้นยังช่วยลดความต้องการน้ำที่ลดลง เพิ่มความหนาแน่นและกำลังอีกด้วย
- Heat of hydration จะลดลง (เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม) สำหรับซีเมนต์บางประเภทที่มีส่วนผสมของผงหินปูนและจะเพิ่มขึ้นสำหรับประเภทอื่น เวลาการแห้งตัวก็ผันผวนเช่นกัน การแข็งตัวที่ผิดปกติมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อมีการเติมหินปูนแทนยิปซั่ม
- ข้อมูลโดยสังเขปๆแสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของกำลังของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่มีและไม่มีส่วนผสมของผงหินปูนนั้นเหมือนกัน อย่างไรก็ตามข้อมูลของกำลังสามารถใช้เพื่อหาปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสมของผงหินปูนและเม็ดปูน
- การหดตัวแบบแห้งและความลึกของคาร์บอนชั้นแสดงให้เห็นถึงผลที่ไม่แน่นอน ในบางกรณีมีการหดตัวและคาร์บอนชั้นที่เพิ่มขึ้นและในบางกรณีก็ลดลงเมื่อใช้ Portland Limestone Cement เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- การซึมผ่านของน้ำจะลดลงเมื่อมีการใช้ผงหินปูน อาจเกิดจากการลดลงของการเชื่อมต่อของรูพรุนมากกว่าปริมาตรของรูพรุนที่ลดลง
- ความทนทานต่อการแข็งตัวและละลายของน้ำมีค่าเท่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน ถ้าหากปริมาณการกระจายกักอากาศถูกควบคุมให้คงที่

- การทดสอบบางครั้งแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงของการต้านทานซัลเฟตสำหรับปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน ถ้าหากระยะเวลาการทดสอบนานขึ้น การใช้หินปูนในส่วนผสมของซีเมนต์จะไม่ทำให้เกิดความแตกต่างกับการไม่ใช้ผงหินปูน ความต้านทานซัลเฟตขึ้นอยู่กับปริมาณ C_3A และอัตราส่วน w/c
- คุณสมบัติของแร่ธาตุผสมเพิ่มจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการผสมของผงหินปูน
- คุณภาพของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์จะมีความใกล้เคียงกันหากใช้ปูนซีเมนต์จากเม็ดปูนเดียวกัน ไม่ว่าจะมีส่วนผสมของผงหินปูนบดหรือไม่ก็ตาม

บทที่ 3

วิธีการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

3.1 วิธีการจัดเก็บรวบรวมข้อมูล

ศึกษาและรวบรวมข้อมูลองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1: การทดสอบตัวอย่างคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุวิจัย

วัสดุ	การทดสอบ	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition)	XRF และ XRD
	ขนาดการกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution)	Master Seizer
	ร้อยละปริมาณส่วนตกค้าง ขนาด 36, 45 และ 75 ไมครอนบนตะแกรง	Air Jet Sieve
	ค่าความละเอียด (Blaine Fineness)	Laser Granulom Blaine Apparatus
	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ (%Loss on Ignition)	Furnace
	ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ (Compressive Strength)	Compression Testing Machine

รวมทั้งการทดสอบคุณสมบัติของหินปูน (ADL) และยิปซัม (Gypsum) ที่จะใช้ในการติดตามมาตรฐานดังนี้

- ASTM C 25 Chemical Analysis of Limestone, Quick Lime and Hydrated Lime
- ASTM C 22 Standard Specification of Gypsum

- ASTM C 471 Test Method of Chemical Analysis of Gypsum and Gypsum Products
- ASTM C 472 Test Method of Physical Testing of Gypsum Plasters and Gypsum Concrete

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบในการดำเนินการศึกษาในครั้งนี้ ใช้เครื่องมือทดสอบทางองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ จากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) และคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นหลัก

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบไปด้วย (ได้จากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน))

1. ปูนเม็ด (Clinker)
2. ยิบซั่ม (Gypsum)
3. หินปูน (ADL)



รูปที่ 3.1 แสดงภาพ Clinker



รูปที่ 3.2 แสดงภาพผง Gypsum



รูปที่ 3.3 แสดงภาพ ADL

เครื่องมือใช้ในการวิจัยประกอบไปด้วย

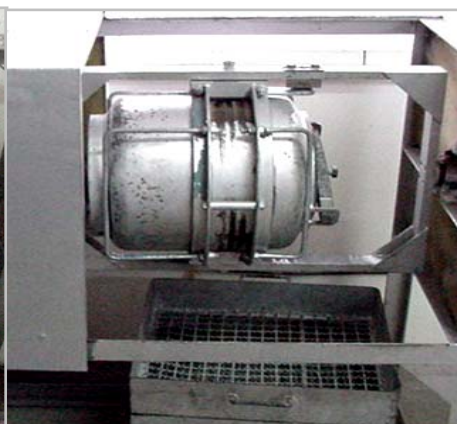
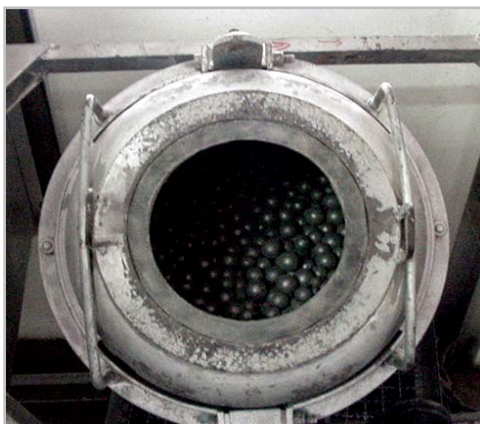
1. เครื่องย่อยวัตถุดิบแบบหยาบ (Jaw Crusher)
2. เครื่องผสม (Dry Mix Blender)
3. หม้อบดปูนซีเมนต์จำลอง (Lab Ball Mill)
4. เครื่องทดสอบหาความละเอียดของผงปูนซีเมนต์ (Air Permeability)



รูปที่ 3.4 เครื่องย่อยวัตถุดิบแบบหยาบ



รูปที่ 3.5 เครื่องผสม



รูปที่ 3.6 หม้อบดปูนซีเมนต์จำลอง



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบ Air Permeability สำหรับทดสอบหาค่าความละเอียด

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการบด Portland Limestone Cement

1. นำตัวอย่าง Clinker, Gypsum และ ADL ที่เก็บมาจากโรงงาน และผ่านการตรวจสอบคุณภาพด้วยเครื่อง X-Ray มาเพื่อทำการเตรียมตัวอย่างสำหรับใช้บด
2. นำ Clinker และ ADL มาทำการย่อยหยาบด้วยเครื่อง Jaw Crusher เพื่อให้มีขนาดเล็กลง และง่ายในขั้นตอนการบดด้วย Ball Mill โดยนำ Clinker และ ADL ที่ผ่านการย่อยหยาบด้วย Jaw Crusher มา ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 (ขนาด 2.36 มม.) แล้วนำส่วนที่ผ่านตะแกรงไปทำการเตรียมตัวอย่างต่อไป
3. นำส่วนที่ผ่านการย่อยหยาบและผ่านตะแกรงเบอร์ 8 มาทำการ Mix ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยเครื่อง Blender แบบ Dry Mixer ก่อนทำการผสมรวมกันทุกวัตถุดิบ
4. นำวัตถุดิบต่าง ๆ คือ Clinker และ ADL ที่ผ่านขั้นตอนการย่อยหยาบแล้วมาผสมกับ Gypsum ในอัตราส่วนต่าง ๆ ของตัวอย่างแต่ละประเภทดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนวัตถุดิบที่ใช้บดเป็น Portland Limestone Cement

ส่วนผสมที่	สัดส่วนผสมวัตถุดิบ (%)		
	Clinker	ADL	Gypsum
1	96	0	4
2	81	15	4
3	76	20	4
4	71	25	4

5. นำตัวอย่างที่ผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ ไปทำการบดใน Lab Ball Mill เพื่อให้มีค่า ความละเอียดที่ประมาณ 4,000, 4,500 และ 5,000 cm^2/g ในระหว่างการบดจะมีการสุ่มตัวอย่างที่บดเพื่อนำมาหาค่า Blaine ว่าอยู่ในช่วงที่ต้องการหรือไม่ โดยนำตัวอย่างมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 75 ขนาด 200 micron แล้วนำไปทดสอบหาค่า Blaine ถ้าค่า Blaine ที่ได้ไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดจะทำการเพิ่มรอบบดและบดต่อไป แต่ถ้าค่า Blaine ที่ทดสอบได้อยู่ในช่วงที่กำหนดจะเทตัวอย่างที่บดออกจากตะแกรง เพื่อแยกเอาลูกเหล็กขนาดต่างๆออก

6. แล้วนำตัวอย่างที่แยกลูกเหล็กออกแล้วมาทำการร่อนด้วยเครื่องร่อนที่มีตะแกรงขนาด 200 micron อยู่ทั้งหมด เพื่อนำตัวอย่างที่ได้ไปทำการทดสอบหาค่า Blaine และนำไปทดสอบคุณภาพทางเคมี และฟิสิกส์ต่อไป

7. จำนวนตัวอย่างที่ได้ทั้งหมด 12 ตัวอย่าง นำไปทดสอบหาคุณสมบัติต่อไป

3.2.3 การทดสอบหาค่าประกอบทางเคมี (Chemical Properties)

ทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่าง Portland Limestone Cement ทั้ง 12 ตัวอย่าง เทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเครื่อง XRF และ XRD

การทดสอบหาค่าประกอบทางเคมีของ โดย XRF

อุปกรณ์ทดสอบ : X-ray Fluorescence แสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 3.8 X-ray Fluorescence

วิธีการทดสอบ : ตามการทดสอบ ด้วยใช้ Calibration Curve จากห้องปฏิบัติการ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) และคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบหาลักษณะประกอบทางเคมีของตัวอย่าง โดย XRD

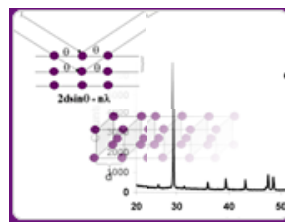
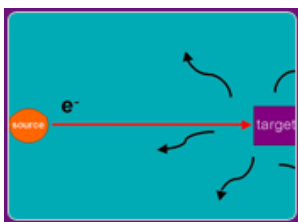


รูปที่ 3.9 X-ray Diffractogram

การทดสอบหาลักษณะประกอบทางเคมีของ โดย XRD

อุปกรณ์ทดสอบ : X-ray Diffractogram แสดงในรูปที่ 3.9

วิธีการทดสอบ : XRD เป็น เทคนิคที่อาศัยหลักการของการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่น ไปกระทบชิ้นงาน และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสี ที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมีตัว Detector เป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากสารประกอบ และธาตุที่มีส่วนผสม หรือโครงสร้างต่างกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมที่มิต้องต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับ จึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับ โครงสร้างของ ผลึก ของสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณคร่าวๆของปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึกและหน่วยแรง ของสารประกอบในสารตัวอย่างได้อีกด้วย



รูปที่ 3.10 การยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่น ไปกระทบชิ้นงาน และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสี ที่มุมต่าง ๆ กัน

3.2.4 การทดสอบทางกายภาพ

ทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างซีเมนต์ที่ได้เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานมอก.15-2547 ดังนี้

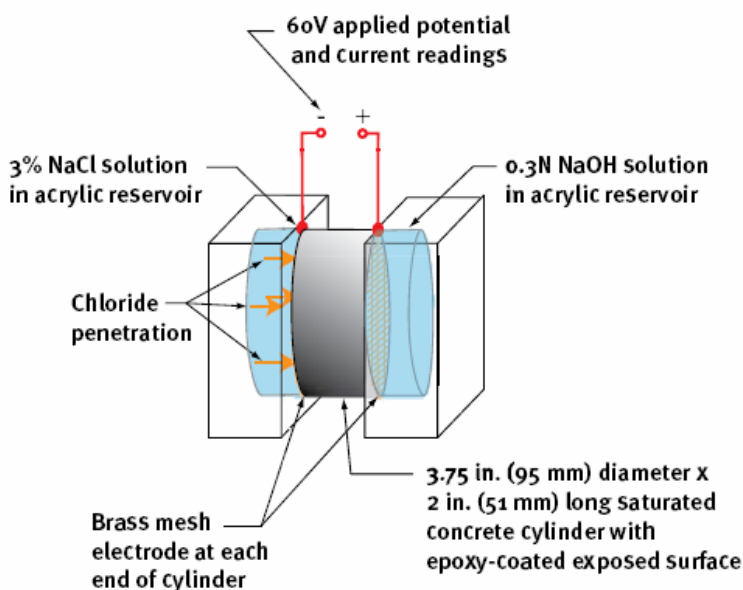
- การกระจายของขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ (Particle Size Distribution)
- ค่าการขยายตัวโดยวิธี Autoclave Expansion
- ค่า Residue บนตะแกรงขนาด 36, 45 และ 90 micron
- ระยะเวลาก่อตัว (Initial and Final Setting Time) ของซีเมนต์เฟส (Vicat Test) และการก่อตัวผิดพลาด (False Set)
- ปริมาณอากาศในมอร์ตาร์
- กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 1 ,3 , 7 และ 28 วัน

3.2.5 การทดสอบหาความคงทน (Durability)

- ความต้านทานต่อซัลเฟต ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution
- ความต้านทานต่อคลอไรด์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration



รูปที่ 3.11 Rapid Chloride Permeability Apparatus



รูปที่ 3.12 การติดตั้งเครื่องมือวัดการซึมผ่านของประจุคลอไรด์

3.2.6 การทดลองนำไปผลิตเป็นคอนกรีต

การผลิตคอนกรีตแบ่งเป็น 2 ส่วนผสม โดยเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม

1. การนำตัวอย่าง Portland Limestone Cement ที่สัดส่วนของผงหินปูนและความละเอียดต่างๆ ไปผลิตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จและคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป โดยจำลองการใช้สัดส่วนผสม (ที่นิยมใช้กันในงานจริง) ดังตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนผสมที่ใช้ผลิตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ

ส่วนผสมที่	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)		ค่ายุบตัว (ซม.)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)					น้ำยาผสมคอนกรีต (cc)	W/C	S/A	หมายเหตุ
	ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	ทราย	หิน 3/8	หิน 3/4	น้ำ				
1	180	210	7.5 +/- 2.5	275	0	845	1125	190	-	0.69	0.43	ไม่ผสมน้ำยาและเกล็ดลอย
2	210	240	7.5 +/- 2.5	300	0	840	1110	190	-	0.63	0.43	
3	240	280	7.5 +/- 2.5	325	0	830	1095	190	-	0.58	0.43	
4	255	300	7.5 +/- 2.5	340	0	820	1090	190	-	0.56	0.43	
5	180	210	7.5 +/- 2.5	275	0	845	1125	175	1375	0.64	0.43	ไม่ผสมเกล็ดลอย
6	210	240	7.5 +/- 2.5	300	0	840	1110	175	1500	0.58	0.43	
7	240	280	7.5 +/- 2.5	325	0	830	1095	175	1625	0.54	0.43	
8	255	300	7.5 +/- 2.5	340	0	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	ผสมเกล็ดลอย 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	ผสมเกล็ดลอย 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	

ตารางที่ 3.4 แสดงสัดส่วนผสมที่ใช้ผลิตเป็นคอนกรีตหล่อสำเร็จ

ส่วนผสมที่	กำลังอัด (กก./ตร.ซม)		ค่ายุบตัว (ซม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)					น้ำยาผสมคอนกรีต (cc)	W/C	S/A	หมายเหตุ
	ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	ทราย	หิน 3/8	หิน 3/4	น้ำ				
แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง												
1	280	320	3.0-7.0	380	820	0	1,135	135	3,800	0.36	0.42	กำลังอัดที่อายุ 24 ชั่วโมง
เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง												
2	280	320	5.0-10.0	400	800	0	1,160	135	4,000	0.34	0.41	กำลังอัดที่อายุ 24 ชั่วโมง
ท่อนคอนกรีตอัดแรง												
3	320	380	0	400	785	375	700	120	-	0.30	0.42	สำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30, 40, 50, 60 ซม.
4	350	400	0	425	775	690	370	130	-	0.31	0.42	สำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80, 100, 120, 150 ซม.
คอนกรีตบดสีก												
5	20 ksc at 3 days		0	50	0	700	0	15	-	0.30	-	ใช้หินฝุ่น

2. ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตตามมาตรฐานมอก. 15-2547 ดังนี้

- ค่าความยุบตัวและค่าการสูญเสียความยุบตัว (Slump และ Slump Loss)
- ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต (Concrete Setting Time)
- กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต (Compressive Strength) ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

4.1 ศึกษาข้อมูลองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

4.1.1 จากการศึกษารายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยเครื่อง XRF และปริมาณองค์ประกอบหลักของซีเมนต์เพสต์ ด้วยเครื่อง XRD พบว่าปริมาณองค์ประกอบทางเคมีหลักที่พบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตารางที่ 4.2) ที่นำมาใช้ในการทดสอบผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด โดยเกณฑ์มาตรฐานที่นำมาใช้วัดผล ได้แก่ มาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2547 ซึ่งมีข้อกำหนดไว้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อกำหนดองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2547

องค์ประกอบทางเคมี	ข้อกำหนด มอก. 15-2547
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) ร้อยละ	ไม่เกิน 6.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfur trioxide, SO ₃) ร้อยละ	
- เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ร้อยละ 8 หรือ น้อยกว่า	ไม่เกิน 3.0
- เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต เกินร้อยละ 8	ไม่เกิน 3.5
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (Loss on ignition) ร้อยละ	ไม่เกิน 3.0
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue) ร้อยละ	ไม่เกิน 0.75
ด่าง (Na ₂ O + 0.658K ₂ O) ร้อยละ	ไม่เกิน 0.6
องค์ประกอบทางกายภาพ	ข้อกำหนด
ความละเอียด, พื้นผิวจำเพาะ(ตารางเมตรต่อกิโลกรัม, m ² /kg)	
- ทดสอบด้วยเบลนแอร์เพอร์มิอะบิลิตี (Blaine air permeability)	อย่างน้อย 280
การขยายตัวโดยวิธีออโตคลีฟ (Autoclave expansion)	ไม่เกิน 0.8
ระยะเวลาก่อตัว : การทดสอบแบบไวแคต (Vicat Test)	
- การก่อตัวระยะต้น: นาที่	อย่างน้อย 45
- การก่อตัวระยะปลาย: นาที่	ไม่เกิน 375
ปริมาณอากาศในมอร์ตาร์ ร้อยละโดยปริมาตร	ไม่เกิน 12

การก่อตัวผิดปกติ (False set)	อย่างน้อย 50
แรงอัด (กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร, kg/cm ²)	
อายุ 3 วัน (3 Days)	อย่างน้อย 120
อายุ 7 วัน (7 Days)	อย่างน้อย 190
อายุ 28 วัน (28 Days)	อย่างน้อย 280

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่นำมาใช้ในการทดสอบ

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
SiO ₂	21.01
Al ₂ O ₃	4.81
Fe ₂ O ₃	3.28
CaO	64.51
MgO	1.74
K ₂ O	0.43
Na ₂ O	0.12
SO ₃	2.54
LOI	1.29
C ₃ S	58.70
C ₂ S	15.96
C ₃ A	7.20
C ₄ AF	9.97

สำหรับผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่นำมาใช้ในการทดสอบผ่านตามมาตรฐานมอก. 15 เล่ม 1-2547 เช่นเดียวกัน โดยผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่นำมาใช้ในการทดสอบ

องค์ประกอบทางกายภาพ	ปริมาณ
ความละเอียด, พื้นผิวจำเพาะ(ตารางเซนติเมตรต่อกรัม, cm ² /g) - ทดสอบด้วยเบลนแอร์เพอร์มีอะบิลิตี (Blaine air permeability)	3550
การขยายตัวโดยวิธีออโตคลีฟ (Autoclave expansion)	-0.012
ระยะเวลาก่อตัว : การทดสอบแบบไวแคต (Vicat Test) - การก่อตัวระยะต้น: นาที - การก่อตัวระยะปลาย: นาที	109 205
ปริมาณอากาศในมอร์ตาร์ ร้อยละโดยปริมาตร	8.4
การก่อตัวผิดพลาด (False set)	85
แรงอัด (กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร, kg/cm ²) อายุ 3 วัน (3 Days) อายุ 7 วัน (7 Days) อายุ 28 วัน (28 Days)	263 326 427

4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลมส์โตน

จำนวนตัวอย่างและรายละเอียดสัดส่วนผสมของปูนเม็ด ผงหินปูน และ ยิปซัม แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงชื่อตัวอย่างและสัดส่วนผสมของปูนเม็ด ผงหินปูน และยิปซัม ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลมส์โตน

No	Sample Code	Proportion (%)			Targeted Blain fineness (cm ² /g)
		Clinker	ADL	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

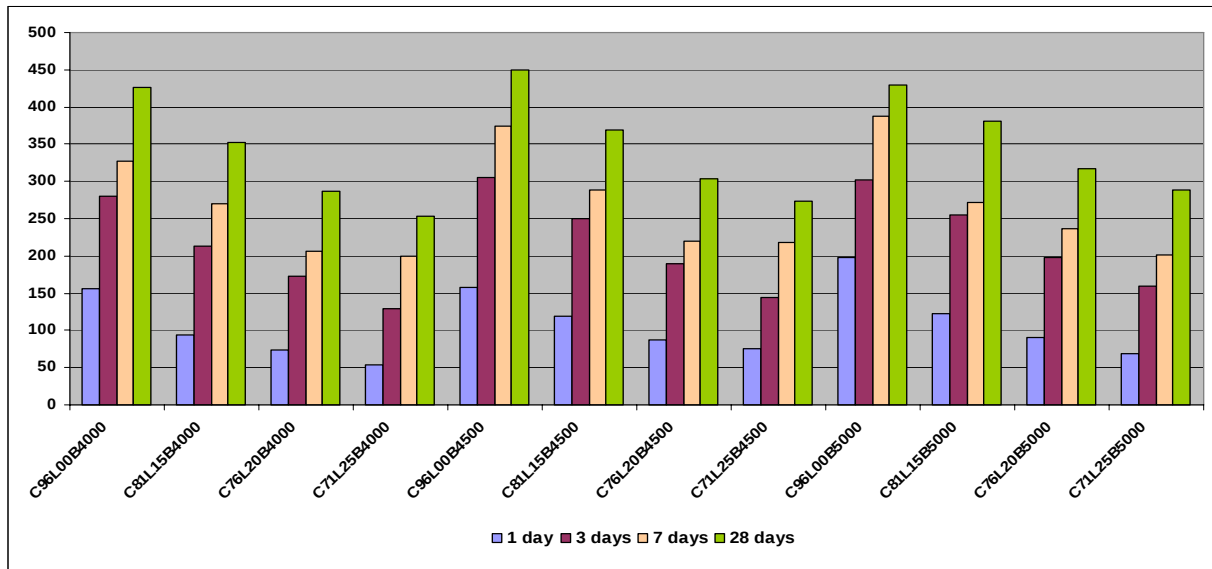
6	C81D15B4500	81	15	4	4,500
7	C76D20B4500	76	20	4	4,500
8	C71D25B4500	71	25	4	4,500
9	C96D00B5000	96	0	4	5,000
10	C81D15B5000	81	15	4	5,000
11	C76D20B5000	76	20	4	5,000
12	C71D25B5000	71	25	4	5,000

4.2.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตน

องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตนแสดงในตารางที่ 4.5

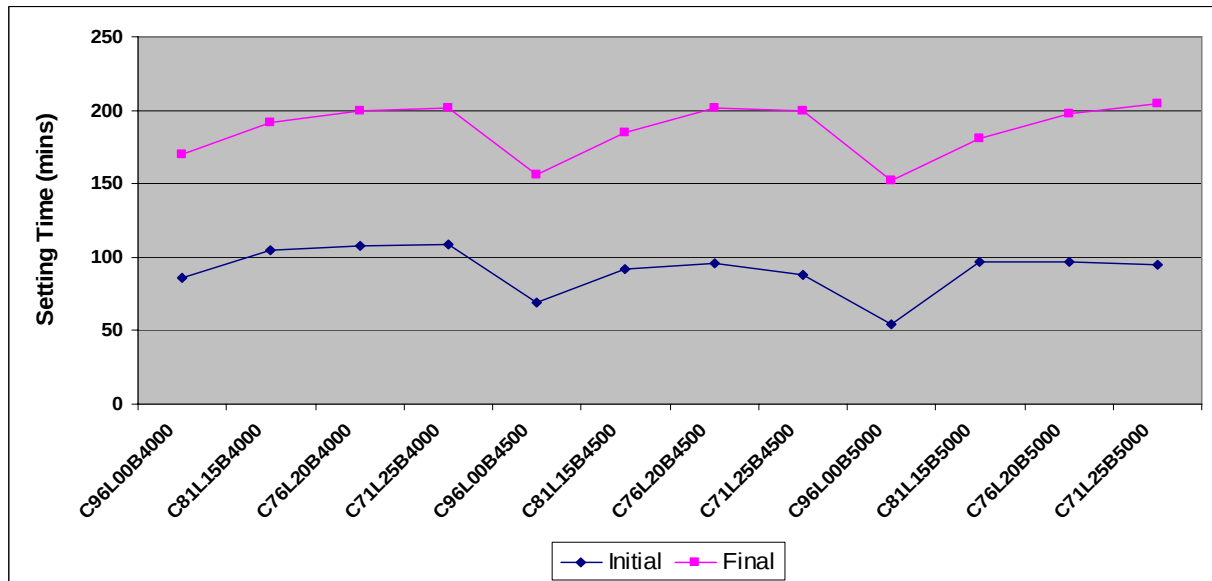
ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบทางเคมีและกายภาพของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตนที่บดได้

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



33

รูปที่ 4.1 ค่ากำลังอัดของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน



รูปที่ 4.2 ระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน

ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่มีคุณสมบัติของระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดผ่านตามมาตรฐาน มอก. 15-2547 มีจำนวน 5 ตัวอย่าง ดังนี้

1. C81L15B4000 มีหินปูน 15 % และ ค่าความละเอียด 4,000 cm^2/g
2. C81L15B4500 มีหินปูน 15 % และ ค่าความละเอียด 4,500 cm^2/g
3. C76L20B4500 มีหินปูน 20 % และ ค่าความละเอียด 4,500 cm^2/g

4. C81L15B5000 มีหินปูน 15 % และ ค่าความละเอียด 5,000 cm²/g

5. C76L20B5000 มีหินปูน 20 % และ ค่าความละเอียด 5,000 cm²/g

จากนั้นนำตัวอย่างทั้ง 5 ไปทดลองผสมเป็นคอนกรีตและทดสอบความคงทนในแง่การต้านทานต่อซัลเฟตและคลอไรด์

4.2.2 การทดสอบเมื่อนำไปผลิตเป็นคอนกรีตที่สัดส่วนผสมต่างๆ

คอนกรีตผสมเสร็จ

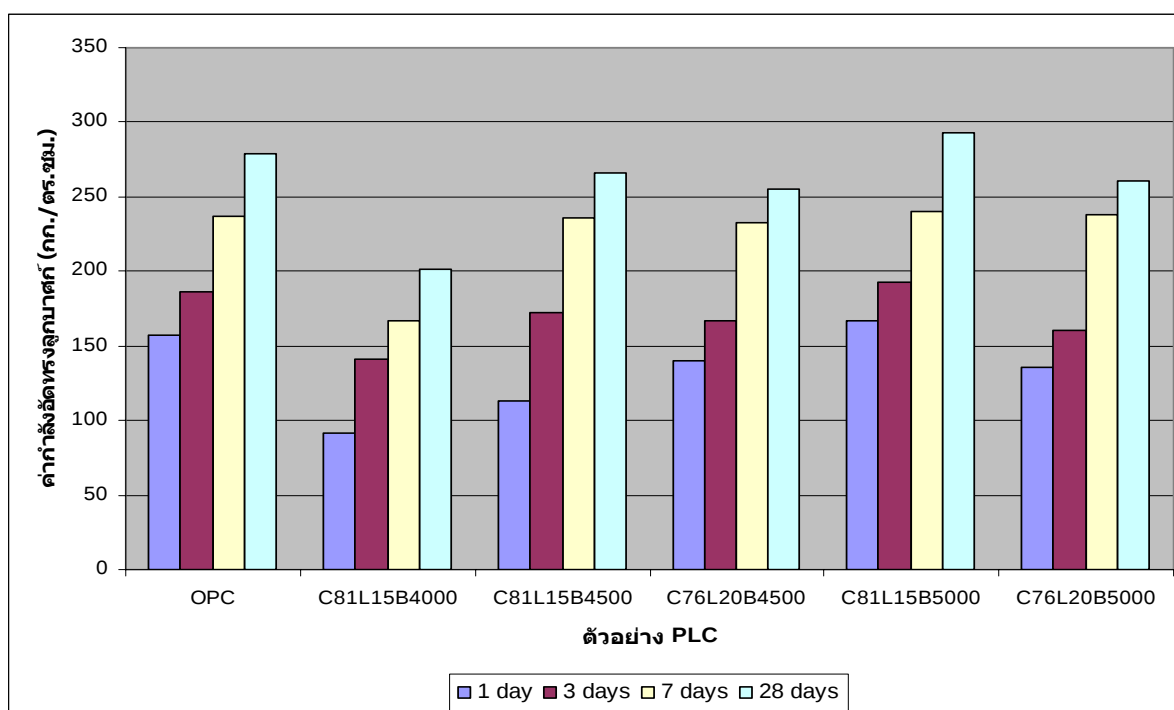
34

ตารางที่ 4.6 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 210 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ไม่ใส่เถ้าลอย และน้ำยา (RMX01)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่าขุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)					หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	ไม่ผสมเถ้า ลอยและ น้ำยา
180	210	7.5 +/- 2.5	275	0	845	1125	190	

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX01

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX01	OPC	6.0	1:26	2:21	3:19	157.2	186.5	237.0	278.9
	C81L15B4000	6.5	2:26	3:42	5:01	91.9	141.2	167.3	201.5
	C81L15B4500	6.0	1:41	2:48	3:58	112.8	172.0	235.4	265.5
	C76L20B4500	6.5	1:45	2:39	3:30	140.4	167.2	233.1	255.0
	C81L15B5000	6.5	1:45	2:12	2:31	166.4	192.3	240.1	292.5
	C76L20B5000	6.0	1:50	2:31	2:40	135.6	160.5	237.6	260.8



รูปที่ 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX01

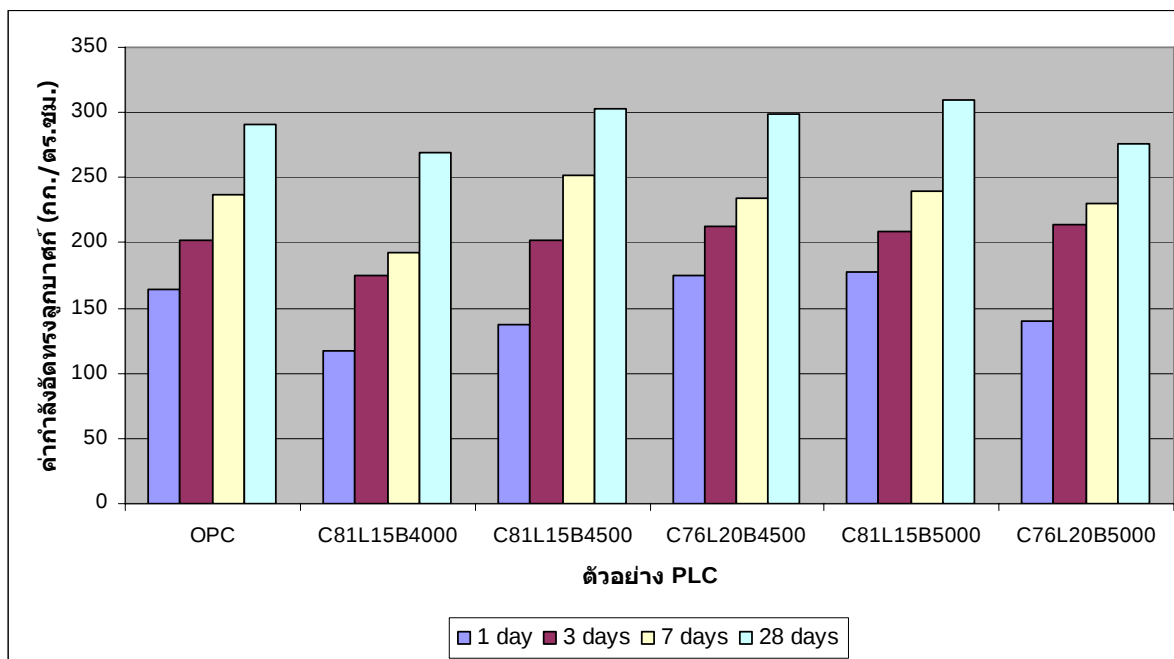
ตารางที่ 4.8 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 240 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ไม่ใส่
เถ้าลอยและน้ำยา (RMX02)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)					หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรง ลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	ไม่ผสม เถ้าลอย และน้ำยา
210	240	7.5 +/- 2.5	300	0	840	1110	190	

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX02

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX02	OPC	7.0	1:16	2:16	3:19	164.2	202.5	236.7	291.4
	C81L15B4000	8.0	2:03	3:16	4:33	117.2	175.3	192.4	268.7
	C81L15B4500	6.0	1:24	2:11	3:01	137.9	202.3	2516	303.2

	C76L20B4500	7.0	1:30	2:19	3:12	175.3	212.1	234.3	299.5
	C81L15B5000	6.5	1:41	2:28	3:30	177.3	208.0	240.1	310.2
	C76L20B5000	6.0	1:45	2:33	3:55	140.6	214.1	230.5	275.4



รูปที่ 4.4 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX02

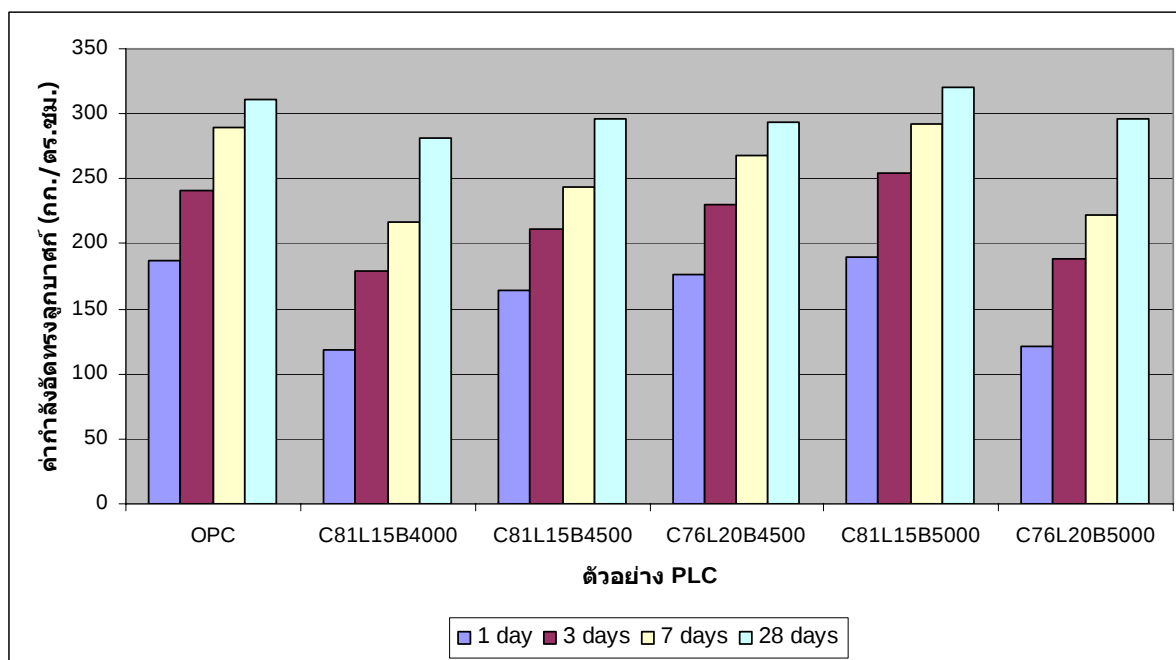
ตารางที่ 4.10 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 280 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ไม่ใช่
เกล็ดลอยและน้ำยา (RMX03)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)					หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เกล็ดลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	ไม่ผสมเกล็ด ลอยและ น้ำยา
240	280	7.5 +/- 2.5	325	0	830	1095	190	

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX03

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX03	OPC	7.0	1:21	2:11	3:03	186.7	240.9	289.0	311.4
	C81L15B4000	9.0	2:21	3:32	4:48	119.0	179.1	217.4	281.3

	C81L15B4500	6.0	1:31	2:22	3:17	164.4	211.3	243.0	295.7
	C76L20B4500	6.5	1:37	2:12	3:20	176.5	230.2	267.8	294.1
	C81L15B5000	7.5	1:48	2:30	3:47	190.2	255.0	292.4	320.5
	C76L20B5000	7.0	1:57	2:41	3:52	120.7	188.1	222.4	296.5



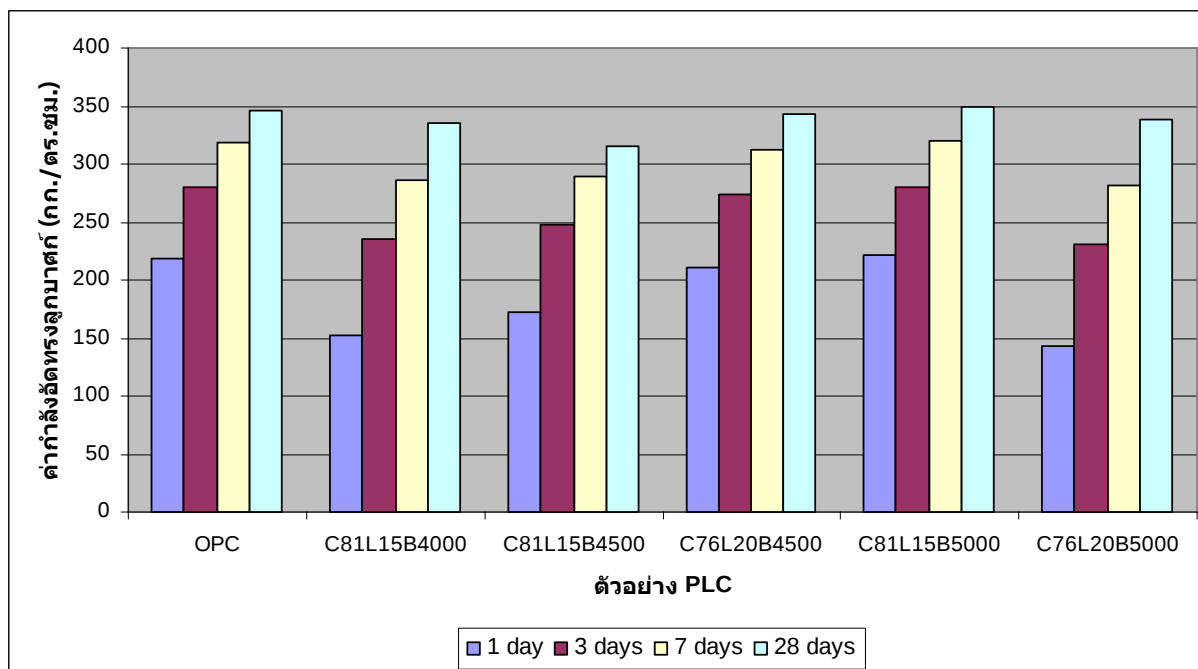
รูปที่ 4.5 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX03

ตารางที่ 4.12 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 300 กก./ตร.ซม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ไม่ใส่เถ้าลอยและน้ำยา (RMX04)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ซม)		ค่ายุบตัว (ซม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)					หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	
255	300	7.5 +/- 2.5	340	0	820	1090	190	ไม่ผสมเถ้า ลอยและ น้ำยา

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX04

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX04	OPC	5.5	1:48	2:29	3:12	217.8	280.3	318.9	345.7
	C81L15B4000	10.0	2:11	3:12	4:17	152.5	235.4	285.6	336.0
	C81L15B4500	6.0	1:27	2:18	3:13	172.7	247.0	288.5	315.2
	C76L20B4500	7.5	1:33	2:00	2:44	210.5	274.6	311.9	342.8
	C81L15B5000	8.0	1:45	2:12	2:31	222.1	279.7	320.5	350.0
	C76L20B5000	8.5	1:58	2:35	2:54	143.2	230.1	281.6	338.5



รูปที่ 4.6 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX04

จากผลการทดสอบตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการนำไปผสมเป็นคอนกรีตที่ไม่ใส่น้ำยาและเถ้าลอย พบว่า

ตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทุกตัวอย่างมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ยกเว้นตัวอย่าง C81L15B4000 ที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันน้อยกว่าค่าที่ออกแบบไว้สำหรับสัดส่วนผสม RMX01 (210 กก./ตร.ซม.) และค่อนข้างน้อยสำหรับสัดส่วนผสม RMX03 (280 กก./ตร.ซม.)

ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตน C81L15B5000 มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เกือบทุกสัดส่วนผสมยกเว้น RMX04 เนื่องจากตัวอย่าง C81L15B5000 มีปริมาณหินปูนไม่สูงมากนัก (15 %) แต่มีความละเอียดค่อนข้างสูง (5,000 ตร.ชม./ก.) จึงมีแนวโน้มที่จะทำให้กำลังอัดมีค่าสูง

ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตน C81L15B4500 และ C76L20B4500 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกสัดส่วนผสม แต่จะมีค่ากำลังอัดช่วงต้นน้อยกว่า

ระยะเวลาก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตน มีแนวโน้มสั้นกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมเล็กน้อย

ในการทดสอบคอนกรีตที่ผสมโดยใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงมีแนวโน้มในการกินน้ำสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมโดยใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดต่ำ จากการทดสอบจะพบว่าถึงแม้คอนกรีตจะมีค่า slump ที่ใกล้เคียงกัน แต่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตนมีลักษณะของเนื้อคอนกรีตที่ค่อนข้างนุ่มผสมและเทเข้าแบบได้ง่าย และมีสีขาวกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม

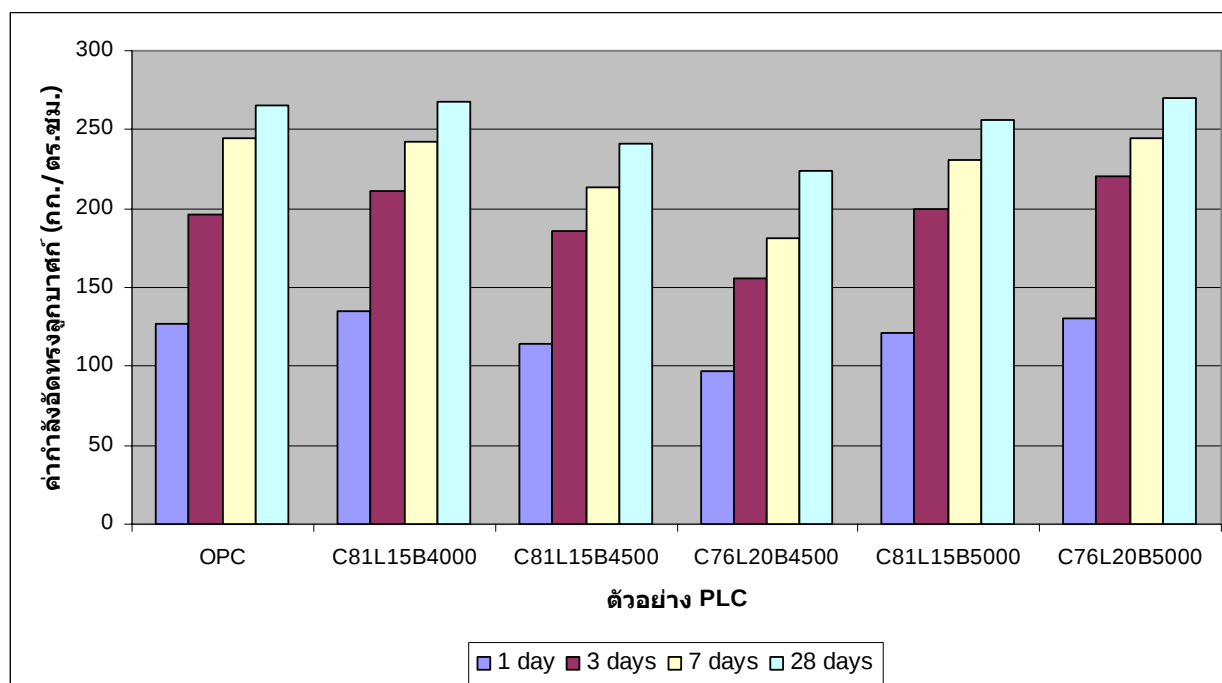
ตารางที่ 4.14 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 210 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใส่ น้ำยาแต่ไม่ผสมเถ้าลอย (RMX05)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	
180	210	7.5 +/- 2.5	275	0	845	1125	175	1375	ไม่ผสม เถ้าลอย

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX05

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX05	OPC	7.5	4:10	5:05	6:20	127.2	196.7	244.3	265.6
	C81L15B4000	6.5	4:09	5:08	6:11	134.7	211.6	242.3	267.4
	C81L15B4500	9.5	3:50	4:35	5:55	114.0	185.7	213.4	240.8
	C76L20B4500	8.5	3:55	4:43	6:02	96.7	156.1	181.5	224.3
	C81L15B5000	7.5	3:53	4:40	5:59	121.4	199.6	230.5	255.9

	C76L20B5000	8.0	3:58	4:45	6:08	130.9	220.1	245.0	269.8
--	-------------	-----	------	------	------	-------	-------	-------	-------



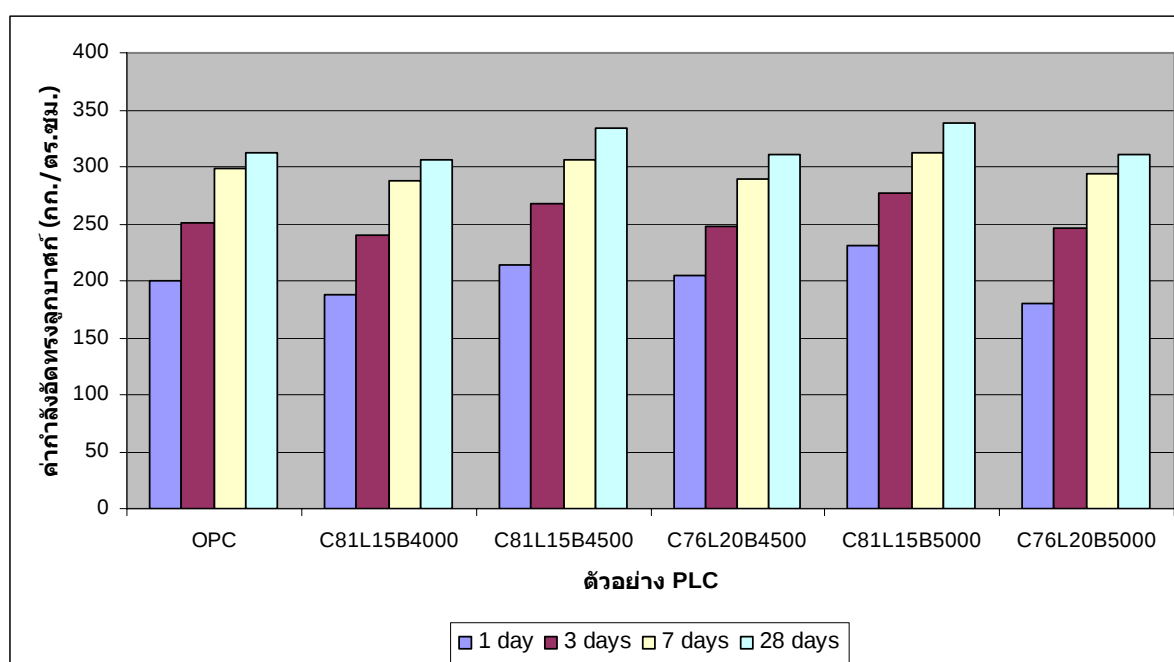
รูปที่ 4.7 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX05

ตารางที่ 4.16 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 240 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใส่น้ำยาแต่ไม่ผสมเถ้าลอย (RMX06)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	
210	240	7.5 +/- 2.5	300	0	840	1110	175	1500	ไม่ผสม เถ้าลอย

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX06

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX06	OPC	7.5	3:24	4:16	5:15	200.5	250.1	298.0	312.4
	C81L15B4000	7.0	3:21	4:13	5:09	188.4	239.5	287.3	305.6
	C81L15B4500	8.0	3:11	3:59	5:02	213.8	268.2	306.7	333.1
	C76L20B4500	7.5	3:15	4:03	5:10	204.6	248.2	289.9	310.6
	C81L15B5000	8.0	3:12	3:55	5:03	230.6	277.4	312.5	338.9
	C76L20B5000	7.5	3:20	4:08	5:12	180.3	245.6	293.5	310.1



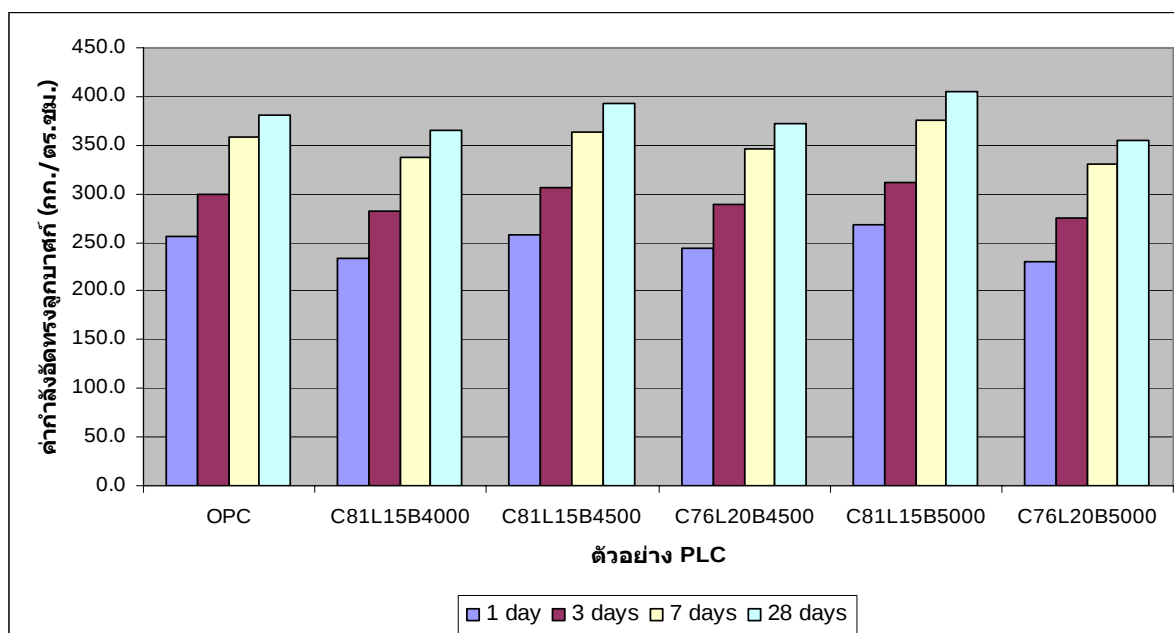
รูปที่ 4.8 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX06

ตารางที่ 4.18 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 280 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใส่น้ำยาแต่ไม่ผสมเถ้าลอย (RMX07)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก./ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	ไม่ผสม เถ้าลอย
240	280	7.5 +/- 2.5	325	0	830	1095	175	1625	

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX07

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX07	OPC	6.0	2:45	3:18	4:00	255.7	299.0	357.6	380.1
	C81L15B4000	5.5	2:55	3:30	4:07	234.1	281.8	338.0	365.5
	C81L15B4500	7.5	2:38	3:05	3:50	257.3	305.9	362.8	393.3
	C76L20B4500	7.0	2:37	3:10	3:52	244.6	288.7	346.3	372.1
	C81L15B5000	7.0	2:50	3:25	4:09	268.9	312.2	375.0	404.3
	C76L20B5000	8.0	2:46	3:20	4:00	230.2	275.5	330.1	354.9



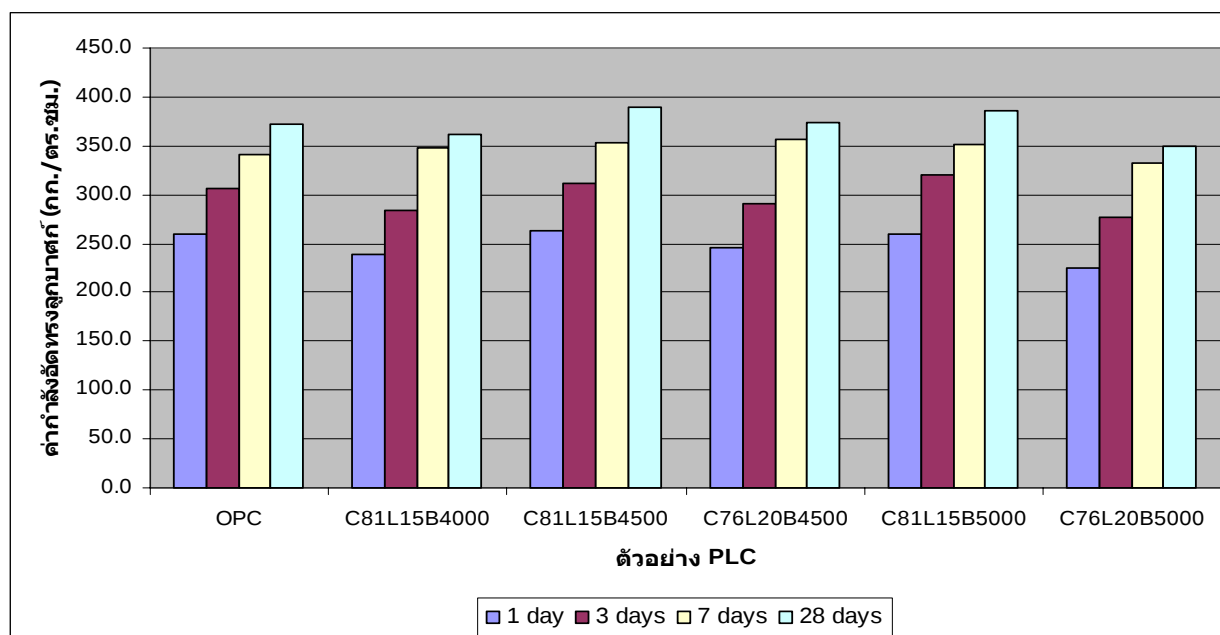
รูปที่ 4.9 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX07

ตารางที่ 4.20 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 300 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใส่น้ำยาแต่ไม่ผสมเถ้าลอย (RMX08)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก./ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ซม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	ไม่ผสมเถ้าลอย
255	300	7.5 +/- 2.5	340	0	820	1090	175	1700	

ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX08

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX08	OPC	7.0	3:10	3:50	4:26	259.9	305.5	341.1	372.8
	C81L15B4000	7.0	3:06	3:41	4:18	238.2	283.5	348.1	362.4
	C81L15B4500	9.0	2:55	3:29	4:10	262.4	311.0	353.8	388.9
	C76L20B4500	7.5	2:58	3:23	4:07	245.4	290.9	355.7	373.2
	C81L15B5000	8.0	2:50	3:27	4:11	260.3	319.4	350.9	385.7
	C76L20B5000	8.0	3:01	3:33	4:17	225.1	276.4	333.0	350.3



รูปที่ 4.10 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX08

จากผลการทดสอบตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการนำไปผสมเป็นคอนกรีตที่ใส่น้ำยาแต่ไม่ผสมเถ้าลอย พบว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทุกตัวอย่างมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เป็นไปตามที่ออกแบบไว้

ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน C81L15B4500 และ C81L15B5000 มีแนวโน้มค่ากำลังอัดช่วงต้นและที่อายุ 28 วันสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ระยะเวลาก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน มีแนวโน้มสั้นกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมเล็กน้อย

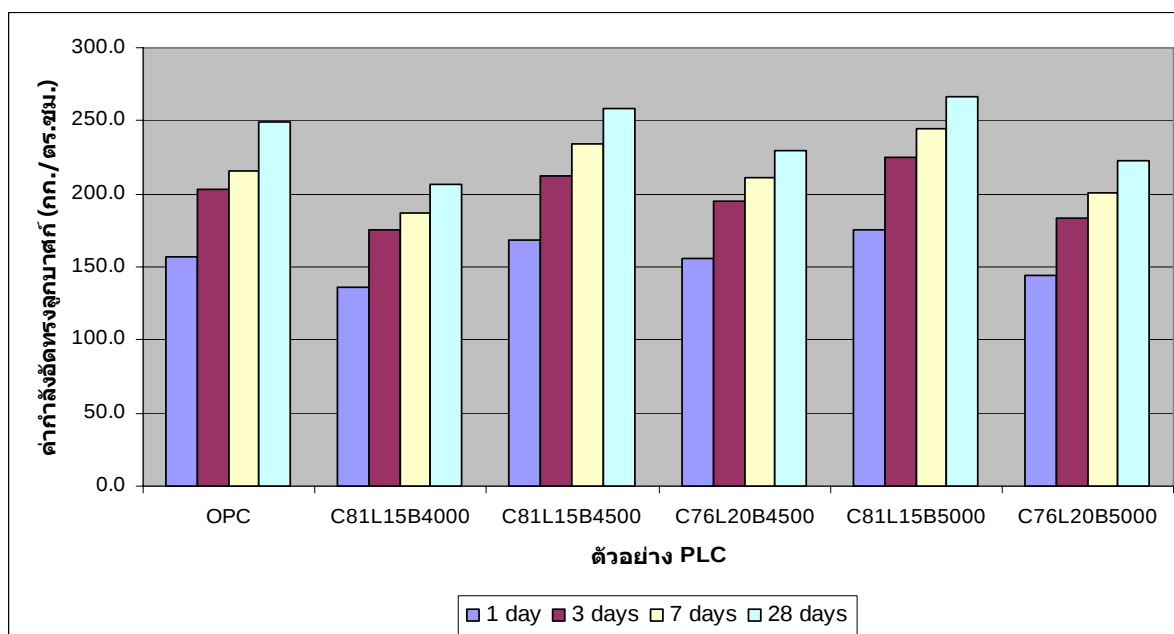
น้ำยาผสมเพิ่มที่ใช้เป็นน้ำยาผสมคอนกรีตประเภท D&G (Water-reducing (mid-range) and retarding)

ตารางที่ 4.22 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 210 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใส่น้ำยาและผสมเถ้าลอย 20 % (RMX09)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	ผสมเถ้าลอย 20%
180	210	7.5 +/- 2.5	220	55	885	1045	165	1100	

ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX09

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX09	OPC	6.0	2:55	3:50	5:02	157.3	202.6	215.8	249.4
	C81L15B4000	6.0	2:46	3:48	4:53	136.6	175.3	187.1	206.4
	C81L15B4500	7.0	2:30	3:33	4:45	169.0	212.8	234.5	258.9
	C76L20B4500	7.5	2:35	3:36	4:44	155.2	194.5	211.2	229.7
	C81L15B5000	8.0	2:22	3:25	4:38	175.7	225.5	244.1	267.0
	C76L20B5000	8.0	2:36	3:29	4:35	144.3	182.9	201.1	222.5

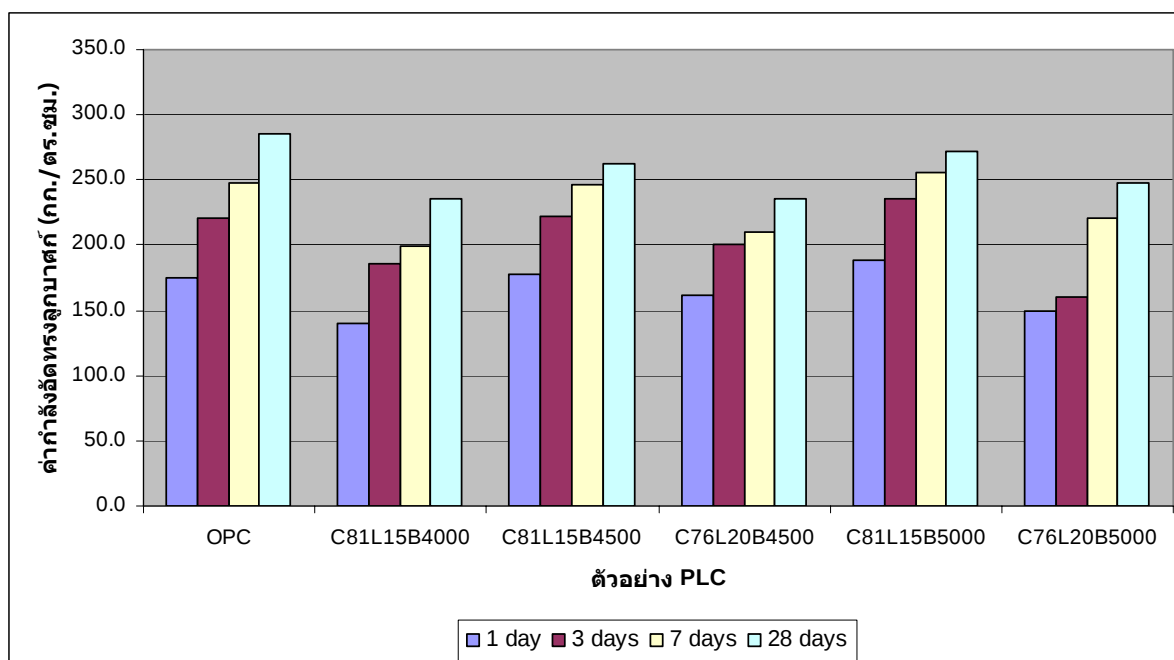


รูปที่ 4.11 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX09
 ตารางที่ 4.24 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 240 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใสน้ำยาและผสมเถ้าลอย 20 % (RMX10)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	
210	240	7.5 +/- 2.5	240	60	865	1045	165	1200	ผสมเถ้า ลอย 20%

ตารางที่ 4.25 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX10

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX10	OPC	7.0	2:43	3:45	4:56	175.4	220.1	247.9	286.0
	C81L15B4000	7.5	2:33	3:32	4:44	140.5	186.4	199.2	235.1
	C81L15B4500	8.0	2:20	3:18	4:28	177.8	222.3	246.2	262.0
	C76L20B4500	9.0	2:21	3:19	4:25	162.1	200.1	209.5	235.4
	C81L15B5000	8.5	2:09	3:11	4:27	188.0	235.2	255.8	271.3
	C76L20B5000	7.0	2:18	3:17	4:23	149.5	160.2	221.3	247.8



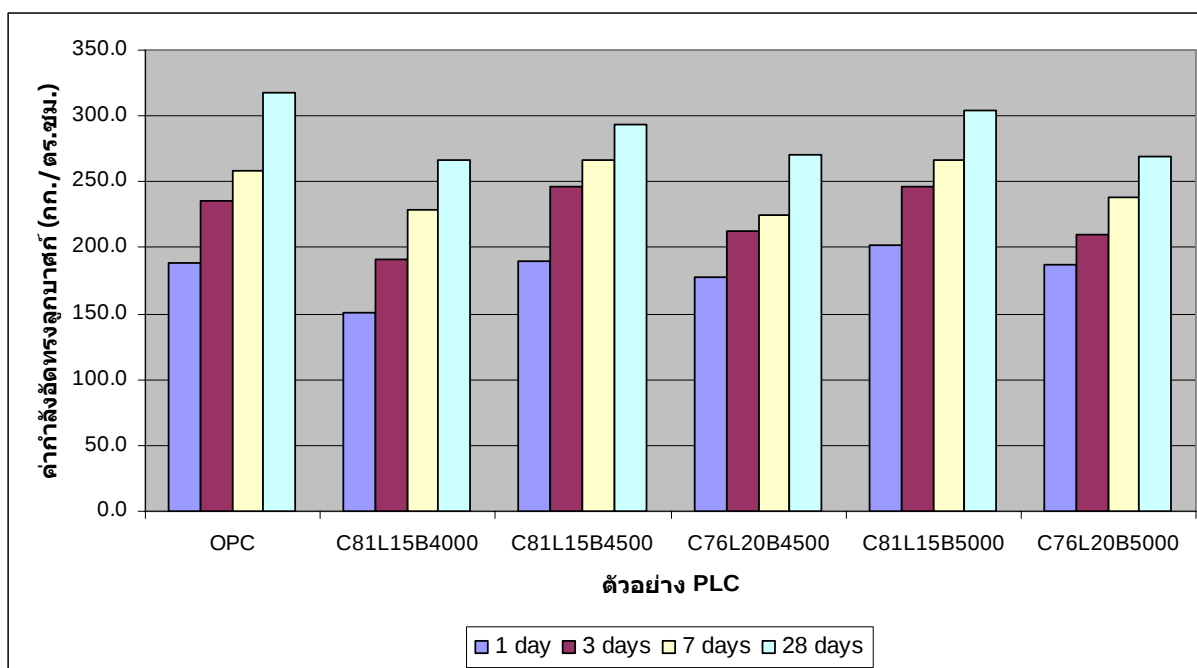
รูปที่ 4.12 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX10

ตารางที่ 4.26 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 280 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใส่น้ำยาและผสมเถ้าลอย 20 % (RMX11)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	
240	280	7.5 +/- 2.5	260	65	830	1055	165	1300	ผสมเถ้า ลอย 20%

ตารางที่ 4.27 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX11

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX11	OPC	7.0	2:32	3:40	4:34	188.2	235.7	258.0	317.4
	C81L15B4000	8.0	2:22	3:21	4:25	151.2	190.5	229.5	266.4
	C81L15B4500	8.5	2:18	3:11	4:20	190.2	245.7	266.1	292.9
	C76L20B4500	7.5	2:09	3:09	4:14	177.3	212.8	225.4	270.3
	C81L15B5000	9.5	1:58	3:00	4:15	201.3	246.8	267.2	304.0
	C76L20B5000	8.5	1:55	3:09	4:12	187.2	209.5	238.9	269.7

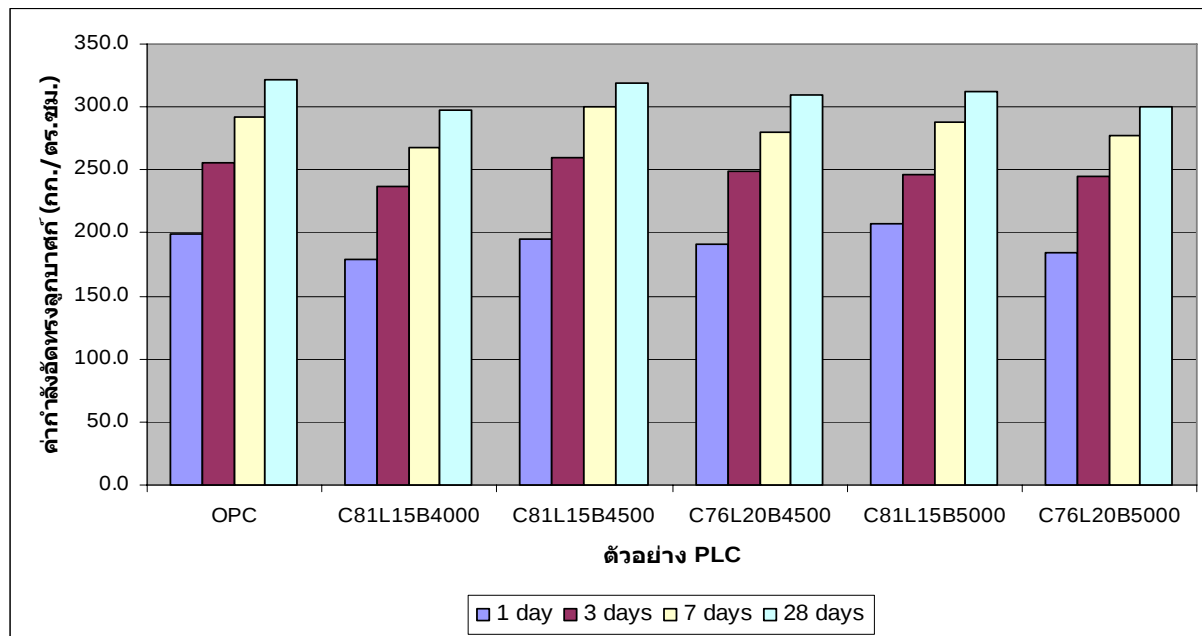


รูปที่ 4.13 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX11
ตารางที่ 4.28 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 300 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใส่น้ำยาและผสมเถ้าลอย 20 % (RMX12)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	ผสมเถ้าลอย 20%
255	300	7.5 +/- 2.5	270	70	825	1050	165	1350	

ตารางที่ 4.29 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX12

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX12	OPC	8.5	2:58	3:49	4:44	199.5	255.3	292.3	332.4
	C81L15B4000	9.5	3:01	3:57	4:56	178.4	237.1	268.5	297.3
	C81L15B4500	9.5	2:50	3:33	4:47	195.1	259.5	300.7	328.5
	C76L20B4500	8.0	2:57	3:40	5:06	190.9	248.6	280.2	309.1
	C81L15B5000	8.5	2:55	3:48	4:49	207.5	246.8	288.1	322.0
	C76L20B5000	9.0	3:04	3:57	5:05	184.2	245.5	277.1	305.5



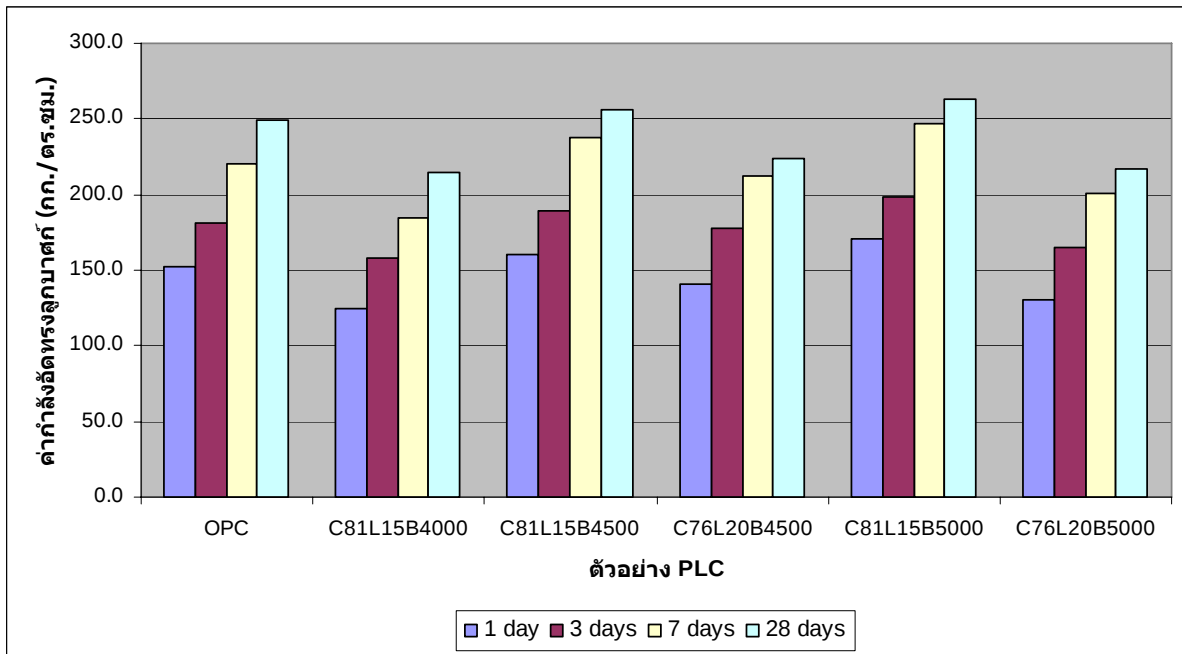
รูปที่ 4.14 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX12

ตารางที่ 4.30 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 210 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใส่น้ำยาและผสมเถ้าลอย 25 % (RMX13)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	ผสมเถ้าลอย 25%
180	210	7.5 +/- 2.5	200	70	905	1070	163	1000	

ตารางที่ 4.31 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX13

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX13	OPC	5.5	2:56	3:35	4:29	152.5	181.1	220.6	249.5
	C81L15B4000	5.5	2:44	3:40	4:39	124.3	158.0	184.5	214.5
	C81L15B4500	6.5	2:39	3:35	4:18	160.0	188.9	237.7	256.3
	C76L20B4500	7.0	2:44	3:40	4:24	140.5	177.3	212.2	224.4
	C81L15B5000	8.5	2:51	3:49	4:55	171.1	199.0	247.5	263.3
	C76L20B5000	8.0	2:44	3:43	4:42	130.2	165.5	200.3	216.8



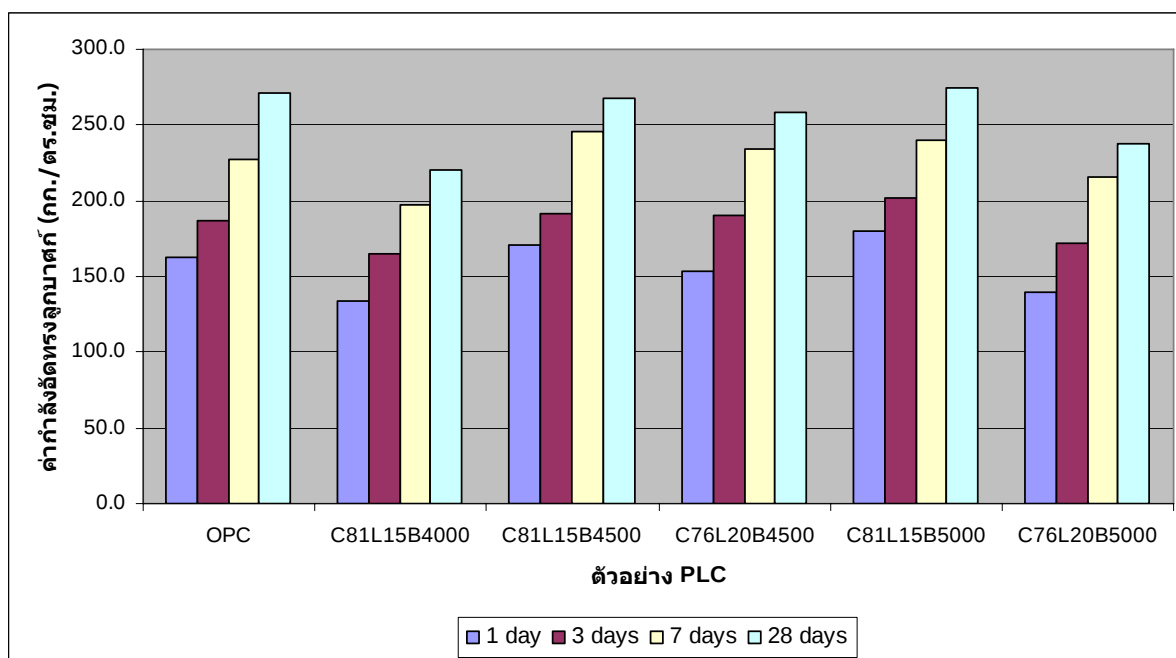
รูปที่ 4.15 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX13

ตารางที่ 4.32 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 240 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใส่น้ำยาและผสมเกล็ดลอย 25 % (RMX14)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เกล็ดลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	ผสมเกล็ดลอย 25%
210	240	7.5 +/- 2.5	210	75	895	1070	163	1050	

ตารางที่ 4.33 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX14

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX14	OPC	7.5	2:44	3:22	4:20	163.1	187.3	226.9	271.7
	C81L15B4000	7.5	2:32	3:31	4:25	133.3	165.2	196.8	220.1
	C81L15B4500	8.0	2:25	3:24	4:09	170.3	192.1	245.5	267.7
	C76L20B4500	9.0	2:31	3:29	4:21	153.3	189.9	234.0	257.9
	C81L15B5000	9.5	2:43	3:43	4:50	180.0	202.5	239.8	275.1
	C76L20B5000	9.0	2:45	3:40	4:38	139.9	172.3	215.6	237.8



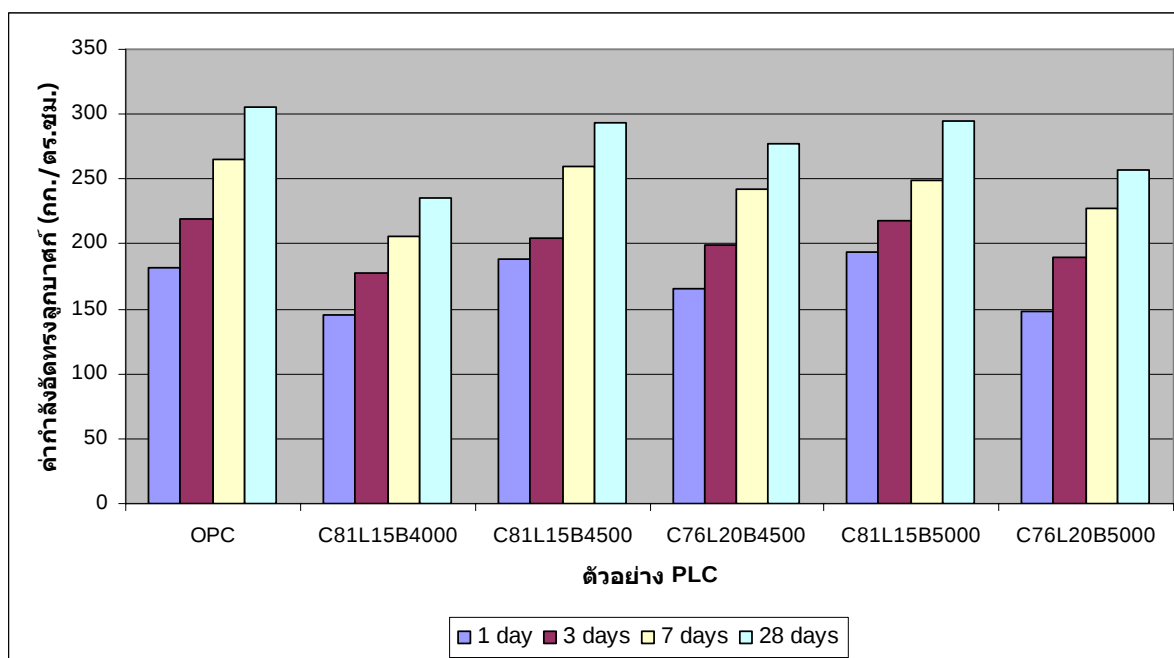
รูปที่ 4.16 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX14

ตารางที่ 4.34 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 280 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใส่น้ำยาและผสมเถ้าลอย 25 % (RMX15)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	
240	280	7.5 +/- 2.5	225	75	865	1085	163	1125	ผสมเถ้า ลอย 25%

ตารางที่ 4.35 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX15

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX15	OPC	8.5	2:30	3:15	4:12	182.2	219.3	265.8	305.5
	C81L15B4000	7.5	2:22	3:25	4:18	145.3	177.8	205.5	235.7
	C81L15B4500	9.0	2:12	3:04	3:52	188.1	204.0	259.9	293.8
	C76L20B4500	8.5	2:21	3:12	4:02	165.1	199.0	242.1	277.1
	C81L15B5000	9.0	2:22	3:28	4:35	193.4	218.3	249.0	295.3
	C76L20B5000	8.5	2:25	3:27	4:31	148.1	190.4	226.9	257.2



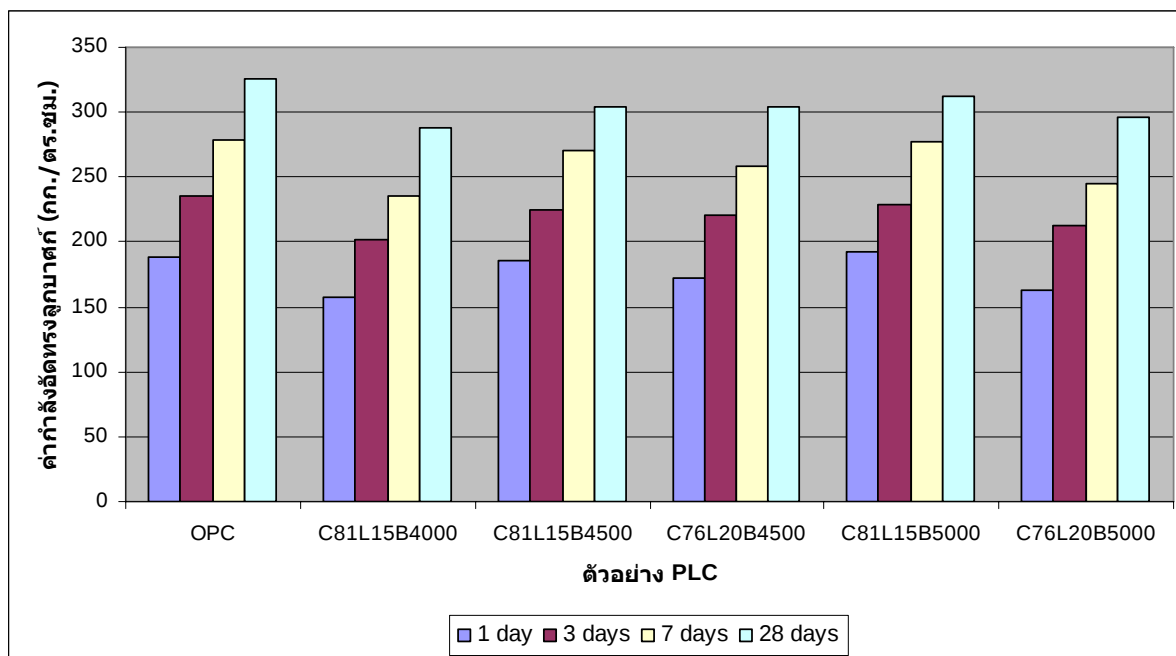
รูปที่ 4.17 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX15

ตารางที่ 4.36 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัด 300 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 28 วัน ที่ใส่น้ำยาและผสมเกล็ดลอย 25 % (RMX16)

กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						หมายเหตุ
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	เกล็ดลอย	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา (ซีซี)	
255	300	7.5 +/- 2.5	235	75	850	1085	163	1175	ผสมเกล็ดลอย 25%

ตารางที่ 4.37 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม RMX16

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
RMX16	OPC	7.5	3:25	4:30	5:31	188.1	235.3	278.0	325.5
	C81L15B4000	8.5	3:23	4:27	5:36	157.6	202.3	235.4	288.4
	C81L15B4500	6.5	3:12	4:10	5:23	185.2	224.8	270.1	304.9
	C76L20B4500	8.5	3:21	4:05	5:28	172.5	220.6	257.9	304.8
	C81L15B5000	8.0	3:15	4:09	5:23	192.2	229.1	277.0	312.6
	C76L20B5000	8.0	3:19	4:17	5:25	163.2	212.4	244.5	296.7



รูปที่ 4.18 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX16

จากผลการทดสอบตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการนำไปผสมเป็นคอนกรีตที่ใส่น้ำยาและผสมเกล็ดลอย 20 และ 25 % พบว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทุกตัวอย่างมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม

ถ้าเปรียบเทียบคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนด้วยกันเอง จะพบว่าตัวอย่าง C81L15B4500 และ C81L15B5000 มีแนวโน้มของกำลังอัดที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีสัดส่วนหินปูนในส่วนผสมที่น้อย (15 %) และค่าความละเอียดที่สูง ($4,500-5,000 \text{ cm}^2/\text{g}$)

เหตุผลที่กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้น่าจะเกิดจากการปริมาณปูนเม็ด (Clinker) ในส่วนผสมที่น้อยเกินไป

หมายเหตุ: น้ำยาใช้ WRDA P59 (type D & G จาก Grace)

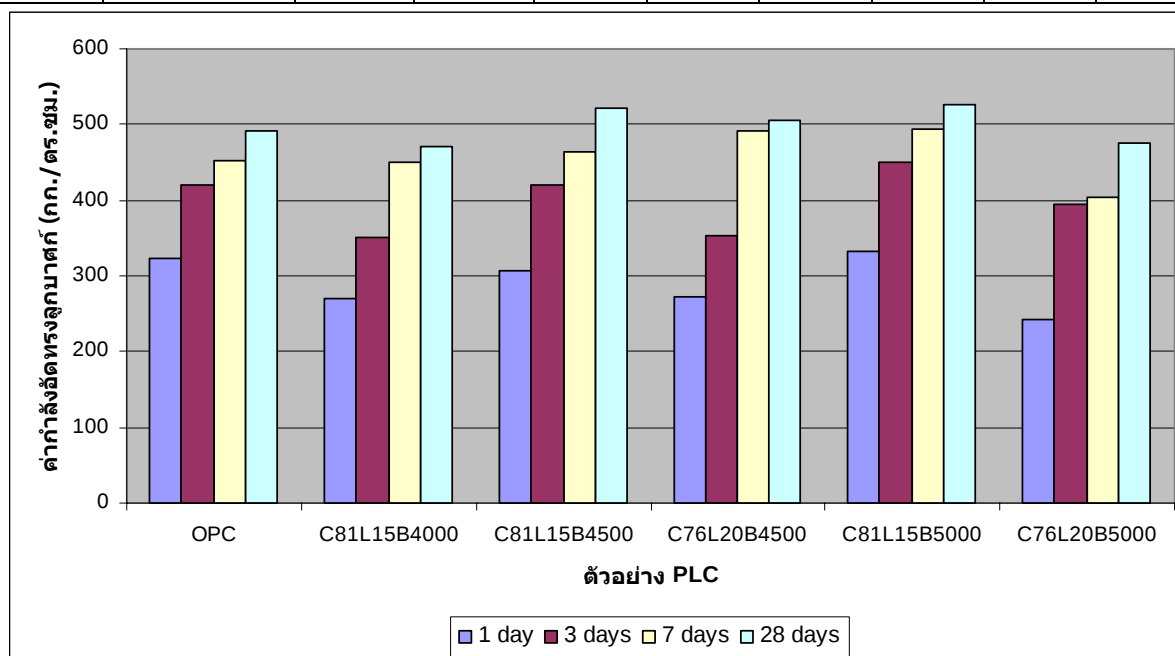
คอนกรีตหล่อสำเร็จ

ตารางที่ 4.38 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงกำลังอัด 320 กก./ตร.ชม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 24 ชั่วโมง (CPM01)

กำลังอัดที่ 24 ชั่วโมง (กก./ตร.ชม)		ค่ายุบตัว (ชม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)				
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา Type F
280	320	3.0-7.0	380	820	1135	135	3.8 (ลิตร)

ตารางที่ 4.39 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม CPM01

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
CPM01	OPC	6.0	1:44	2:45	3:50	322.4	420.2	452.2	490.9
	C81L15B4000	6.5	1:37	2:37	3:40	270.4	351.5	450.3	470.1
	C81L15B4500	6.0	1:21	2:05	2:52	307.5	419.2	464.9	522.3
	C76L20B4500	7.0	1:46	2:32	3:22	272.8	354.1	491.2	505.5
	C81L15B5000	5.0	1:25	2:06	2:49	331.3	449.4	494.6	525.1
	C76L20B5000	5.0	1:12	1:57	2:45	243.3	393.5	404.0	475.2



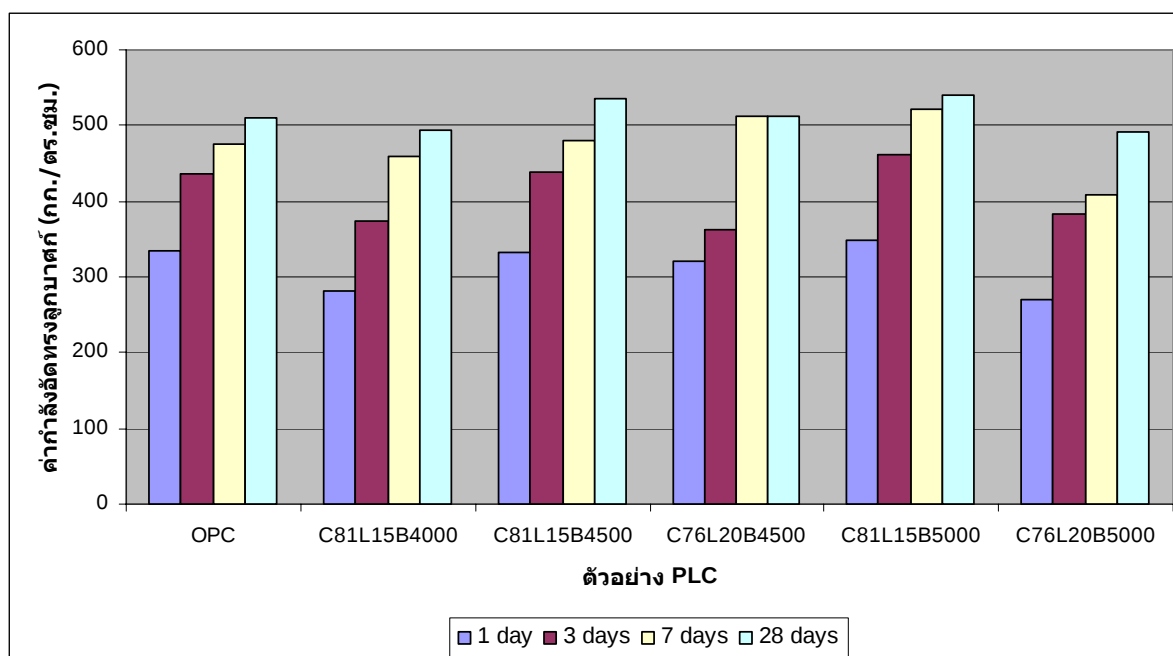
รูปที่ 4.19 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม CPM01

ตารางที่ 4.40 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงกำลังอัด 320 กก./ตร.ซม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 24 ชั่วโมง (CPM02)

กำลังอัดที่ 24 ชั่วโมง (กก/ตร.ซม.)		ค่ายุบตัว (ซม.)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)				
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	ทราย	หิน 3/4	น้ำ	น้ำยา Type F
280	320	5.0-10.0	400	800	1,160	135	4.0 (ลิตร)

ตารางที่ 4.41 ผลการทดสอบค่าความชื้นเหลว ระยะเวลาก่อตัว และกำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม CPM02

Mixed Design	Sample	Slump (cm)	Setting time (min)			Compressive Strength (ksc)			
			Stiffening	Initial	Final	24 hrs	3 days	7 days	28 days
CPM02	OPC	7.0	1:32	2:23	3:41	335.5	437.1	475.1	510.3
	C81L15B4000	6.5	1:22	2:25	3:31	282.6	374.8	460.2	494.5
	C81L15B4500	7.5	1:13	1:95	2:44	332.4	438.5	480.1	535.6
	C76L20B4500	7.0	1:33	2:24	3:09	321.8	363.2	512.6	513.4
	C81L15B5000	6.5	1:11	1:92	2:28	347.5	460.8	521.7	539.3
	C76L20B5000	6.0	1:02	1:44	2:35	270.0	382.2	409.3	490.8



รูปที่ 4.20 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม CPM02

จากผลการทดสอบตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการนำไปผสมเป็นคอนกรีตสำหรับงานคอนกรีตอัดแรง พบว่าตัวอย่าง C81L15B4500 และ C81L15B5000 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 24 ชั่วโมงใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม ส่วนคอนกรีตที่ใช้ตัวอย่างอื่นมีค่ากำลังอัดที่ค่อนข้างต่ำ แต่ถ้าพิจารณาการพัฒนาำลังอัด พบว่าการพัฒนาำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนมีแนวโน้มที่ดี กำลังอัดที่ 28 วันมีค่ามากกว่า 450 กก./ตร.ซม. ซึ่งถือว่าเป็นไปตามที่ออกแบบไว้

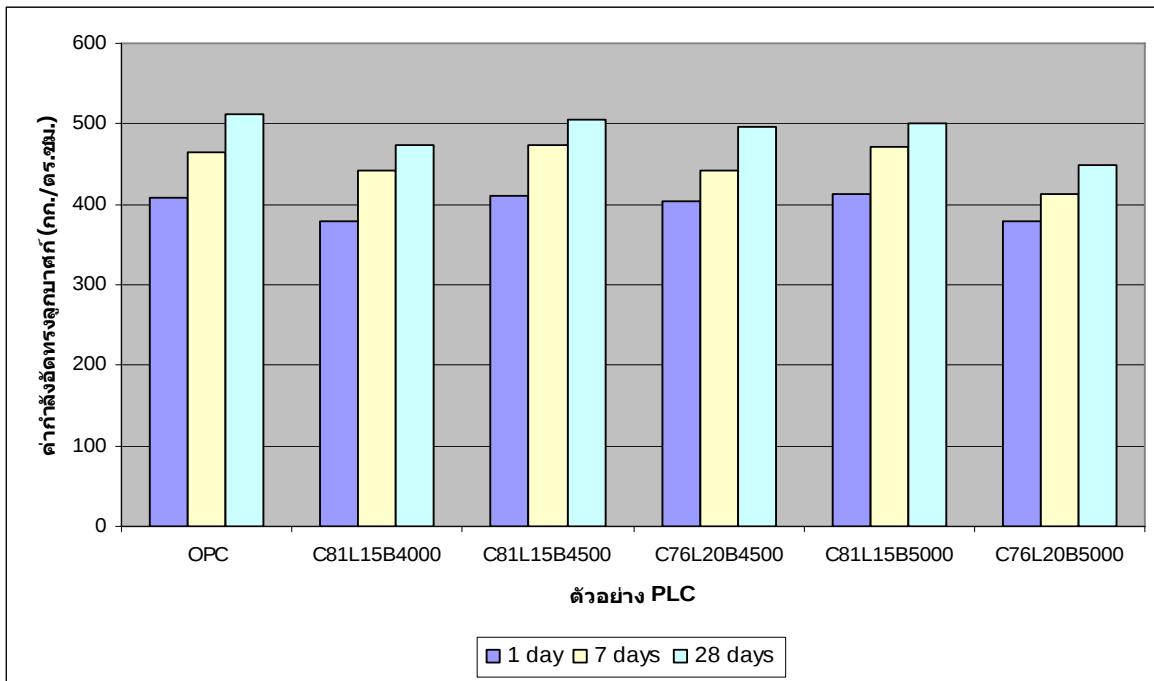
ระยะเวลาก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน มีแนวโน้มสั้นกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมเล็กน้อย

ตารางที่ 4.42 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับท่อคอนกรีตขนาดเล็กกำลังอัด 380 กก./ตร.ซม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 24 ชั่วโมง (CPM03)

กำลังอัดที่ 24 ชั่วโมง (กก/ตร.ซม)		ค่ายุบตัว (ซม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)				
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	ทราย	หิน 3/8	หิน 3/8	น้ำ
320	380	0	400	785	375	700	120

ตารางที่ 4.43 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม CPM03

Mixed Design	Sample	Compressive Strength (ksc)		
		24 hrs	7 days	28 days
CPM03	OPC	409.1	465.2	512.0
	C81L15B4000	377.9	442.1	474.8
	C81L15B4500	410.0	473.3	504.9
	C76L20B4500	404.6	442.1	495.5
	C81L15B5000	412.6	471.7	500.7
	C76L20B5000	378.0	412.2	448.8



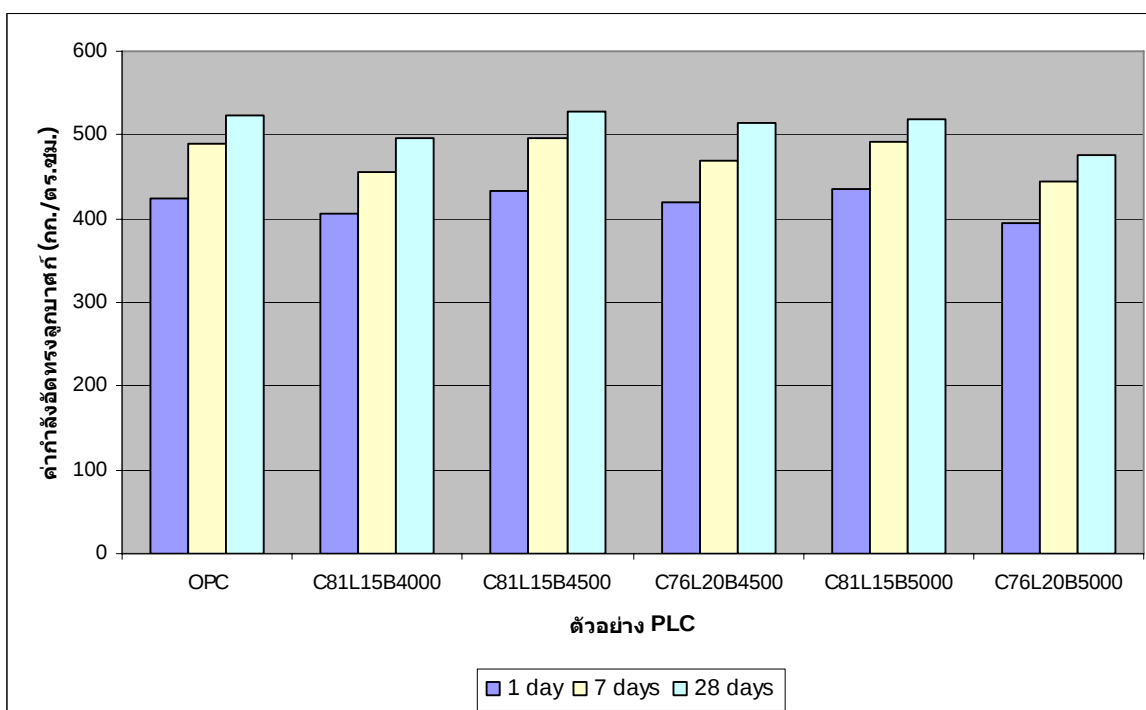
รูปที่ 4.21 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม CPM03

ตารางที่ 4.44 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับท่อคอนกรีตขนาดใหญ่กำลังอัด 400 กก./ตร.ซม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 24 ชั่วโมง (CPM04)

กำลังอัดที่ 24 ชั่วโมง (กก/ตร.ซม)		ค่ายุบตัว (ซม)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)				
ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์		ซีเมนต์	ทราย	หิน 3/8	หิน 3/8	น้ำ
350	400	0	425	775	690	370	130

ตารางที่ 4.45 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม CPM04

Mixed Design	Sample	Compressive Strength (ksc)		
		24 hrs	7 days	28 days
CPM04	OPC	424.3	488.5	524.0
	C81L15B4000	406.5	456.6	497.2
	C81L15B4500	432.0	495.5	526.7
	C76L20B4500	418.7	469.9	513.9
	C81L15B5000	435.5	492.2	518.5
	C76L20B5000	395.2	444.1	475.4



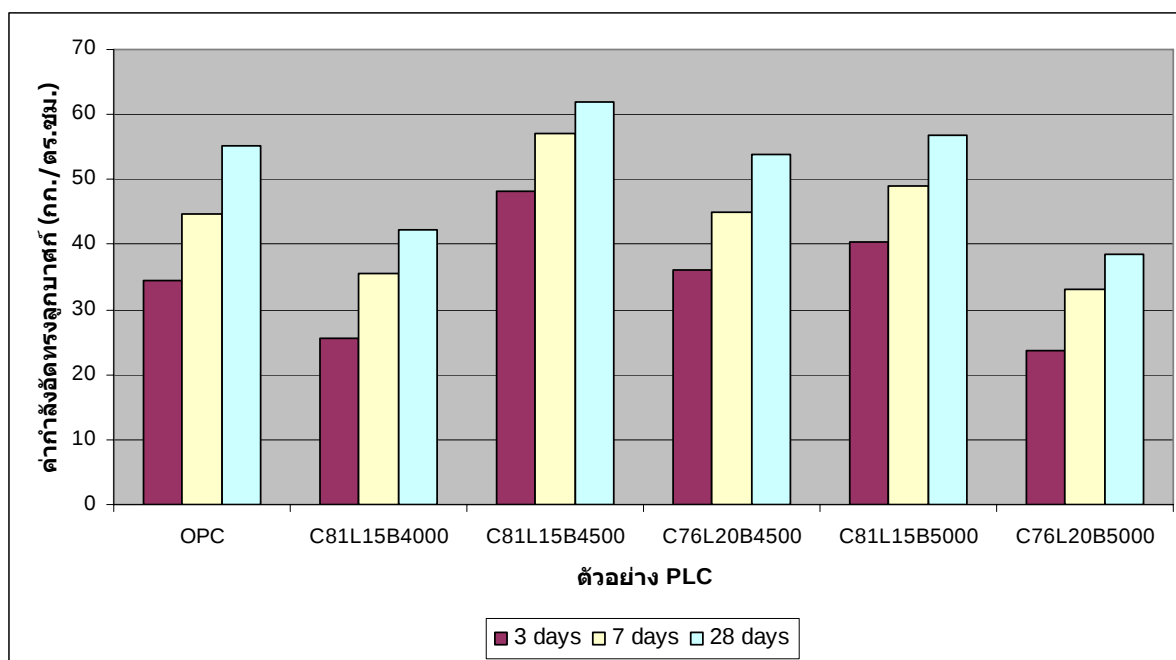
รูปที่ 4.22 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม CPM04

ตารางที่ 4.46 สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตบล็อกกำลังอัด 25 กก./ตร.ซม.(ทรงลูกบาศก์) ที่ 3 วัน (CPM05)

กำลังอัดที่ 3 วัน (กก/ตร.ซม.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)			
		ซีเมนต์	ทราย	หินปูน	น้ำ
25 (ทดสอบโดยกดก้อนบล็อก)	0	50	0	700	15

ตารางที่ 4.47 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตในสัดส่วนผสม CPM05

Mixed Design	Sample	Compressive Strength (ksc)			
		24 hrs	3 days	7 days	28 days
CPM05	OPC	-	34.5	44.8	55.2
	C81L15B4000	-	25.6	35.6	42.3
	C81L15B4500	-	48.2	57.0	62.0
	C76L20B4500	-	36.1	45.0	53.9
	C81L15B5000	-	40.5	49.1	56.8
	C76L20B5000	-	23.7	33.2	38.5



รูปที่ 4.23 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม CPM05

จากผลการทดสอบตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการนำไปผสมเป็นคอนกรีตสำหรับงานคอนกรีตหล่อสำเร็จที่ไม่มีค่ายุบตัว พบว่าตัวอย่าง C81L15B4500 C76L20B4500 มีค่ากำลังอัดทุกช่วงอายุใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม ส่วนตัวอย่างที่ใช้ C81L15B4500 และ C81L15B5000 มีค่ากำลังอัดที่ค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะเมื่อผลิตเป็นคอนกรีตบล็อกที่มีกำลังอัดที่ออกแบบไว้ต่ำมาก

4.2.2 ผลการทดสอบด้านความคงทน

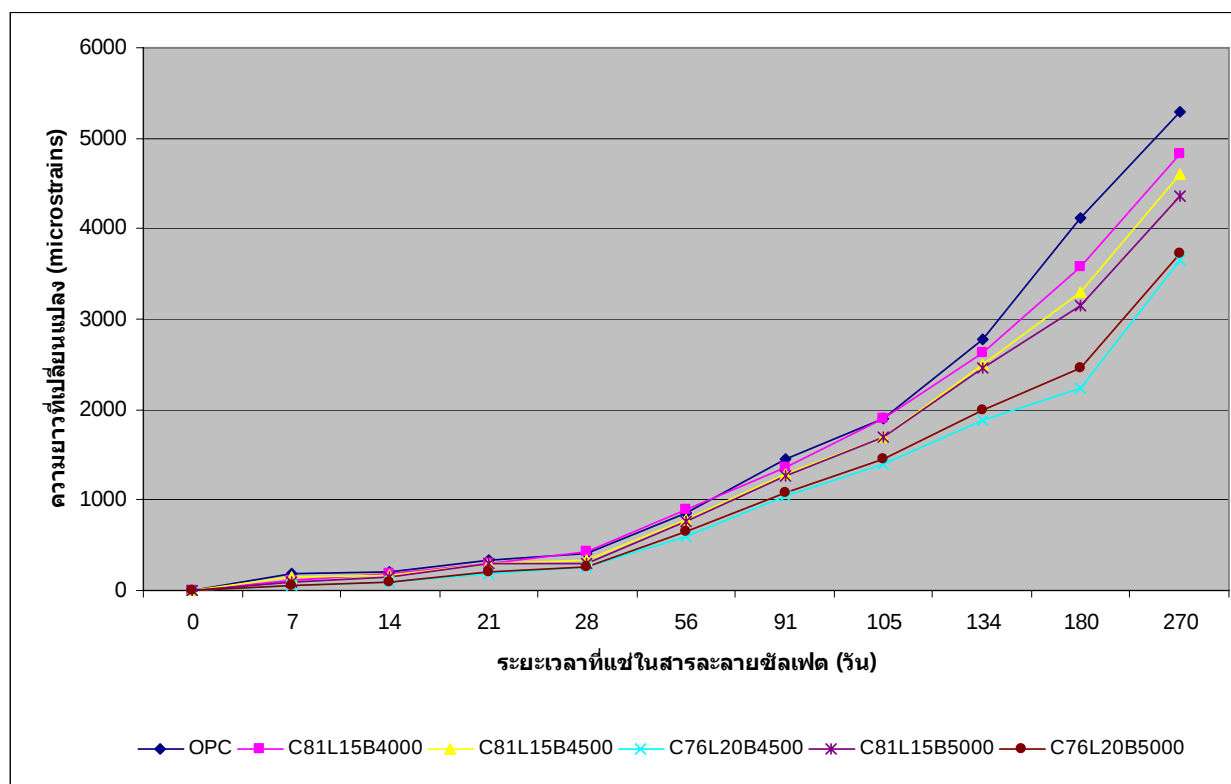
4.2.2.1 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อซัลเฟต

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งมอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตตามมาตรฐาน ASTM C 1012 กำหนดให้ตัวอย่างที่ทดสอบต้องมีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 10 เมกะปาสคาลหรือประมาณ 194 กก./ตร.ชม. ก่อนที่จะนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 ดังนั้น มอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนแต่ละตัวอย่างจะถูกบ่มในน้ำเป็นระยะเวลาที่ต่างกัน

ผลการทดสอบความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของแท่งมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนแต่ละตัวอย่างเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 แสดงในตารางที่ 4.48 และรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.48 ผลการทดสอบค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตเข้มข้น 5 %

	ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ (microstrains)					
	OPC	C81L15B4000	C81L15B4500	C76L20B4500	C81L15B5000	C76L20B5000
w/c	0.55	0.52	0.54	0.52	0.61	0.58
วันที่แช่						
0	0	0	0	0	0	0
7	32	56	53	113	64	144
14	68	88	92	148	107	165
21	124	195	199	289	222	293
28	170	254	267	302	284	328
56	245	598	655	756	659	777
91	502	1045	1085	1260	1105	1289
105	729	1390	1458	1691	1477	1703
134	1080	1877	1990	2462	2003	2488
180	1566	2234	2460	3154	2512	3299
270	1843	3658	3724	4367	3743	4510



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตเข้มข้น 5 %

จากผลการทดสอบ พบว่าตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตนที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าการขยายตัวน้อยกว่าแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจะเริ่มเห็นความแตกต่างชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 2 เดือน ส่วนแนวโน้มการขยายตัวจะลดลงเมื่อมีปริมาณหินปูนในส่วนผสมเพิ่มขึ้นและมีความละเอียดเพิ่มขึ้น

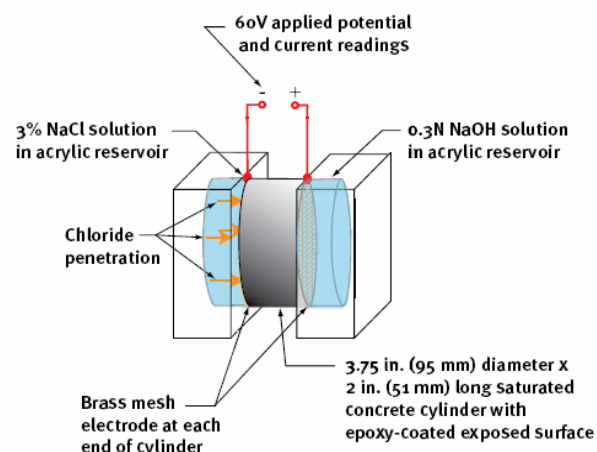
4.2.2.2 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อคลอไรด์

สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการต้านทานต่อคลอไรด์เลือกจากสัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 1 และ 4 เพื่อให้เห็นความแตกต่างชัดเจนในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และค่ากำลังอัด โดยใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตน ที่สัดส่วนของหินปูนและความละเอียดต่างๆที่เลือกเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ได้จากท้องตลาด รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.49

ตารางที่ 4.49 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้สำหรับทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์

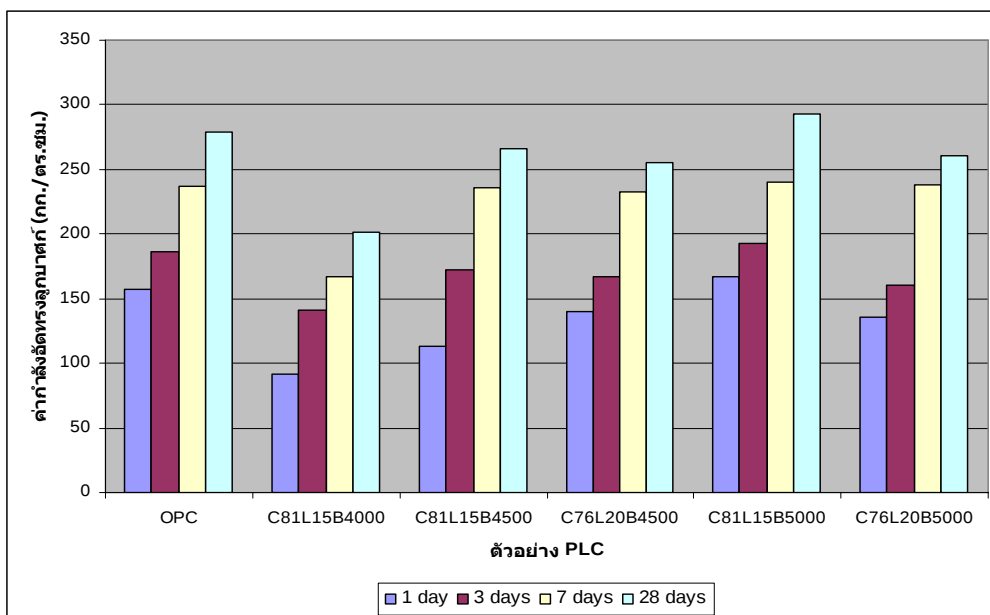
ส่วนผสม	กำลังอัดที่ 28 วัน (กก/ตร.ซม)		w/c	ค่ายุบตัว	ส่วนผสมใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)			
	ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์			ซีเมนต์	ทราย	หิน 3/4	น้ำ
RMX01	180	210	0.69	7.5 +/- 2.5	275	845	1125	190
RMX04	255	300	0.56	7.5 +/- 2.5	340	820	1090	190

หล่อคอนกรีตในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0 ซม. สูง 20.0 ซม. ถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 24 ± 0.5 ชั่วโมง นำไปป้อนในน้ำในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25 ± 1 °C จากนั้นก่อนการทดสอบ 2 วัน ตัดชิ้นส่วนตัวอย่างทรงกระบอกให้ได้ความหนาแต่ละชิ้น 5.0 ซม. นำไปเคลือบอีพ็อกซี ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้อีพ็อกซีแข็งตัว ทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำในหม้อสุญญากาศ นำชิ้นตัวอย่างมาติดตั้งดังรูปที่ 4.25 วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเริ่มต้นและต่อเนื่องทุกๆ 30 นาที จนครบ 6 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณค่าประจุที่ไหลผ่าน

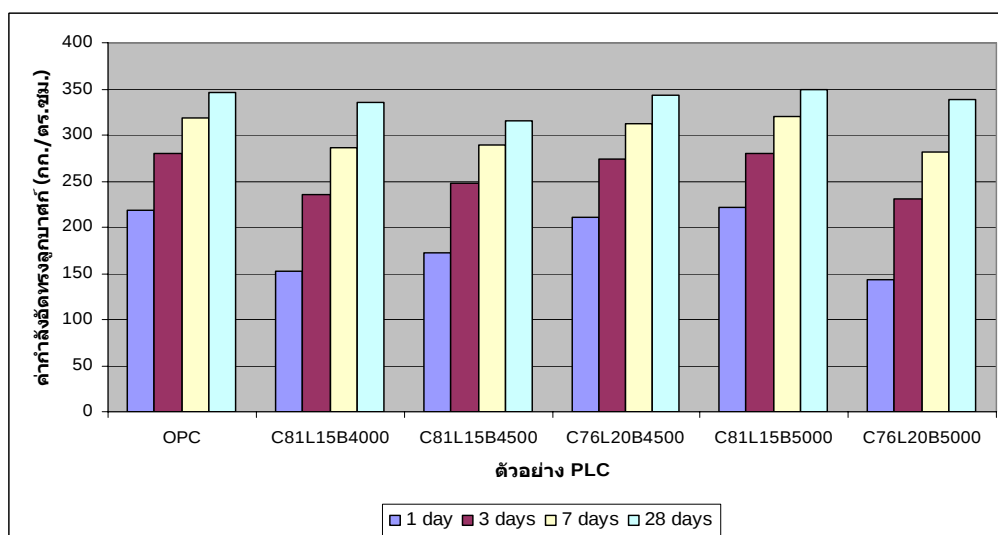


รูปที่ 4.25 การติดตั้งเครื่องมือวัดการซึมผ่านของประจุคลอไรด์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 ซึ่งจะเห็นว่ากำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ในสัดส่วนผสมเพิ่มขึ้นและค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง



รูปที่ 4.26 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX01



รูปที่ 4.27 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆของตัวอย่าง PLC และ OPC ที่สัดส่วนผสม RMX04

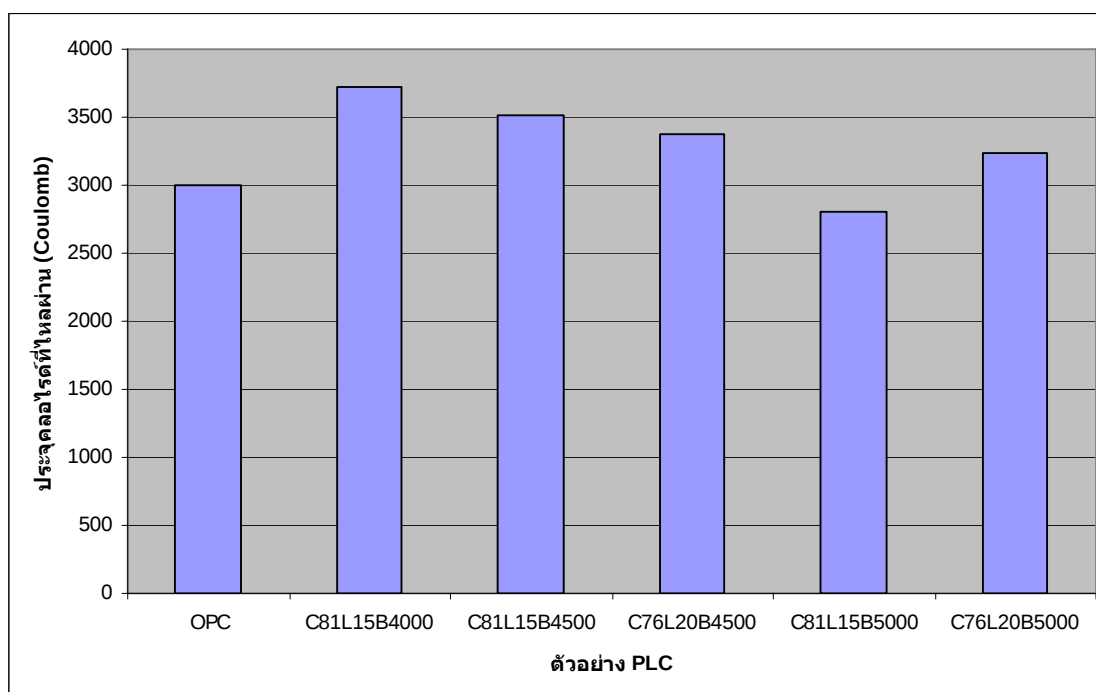
ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.50 และ 4.51 ในรูปที่ 4.28 และ 4.29 ซึ่ง จะเห็นว่าประจุของคลอไรด์ที่ไหลผ่านเข้าไปในคอนกรีตมีค่าประมาณ 2,500-3,200 coulomb ทั้งนี้ ประจุของ คลอไรด์ที่ไหลผ่านมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีปริมาณน้ำในส่วนผสมลดลง กล่าวคือเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดสูง เนื่องจากค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ จะทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี

ตารางที่ 4.50 ผลทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สัดส่วนผสม RMX01

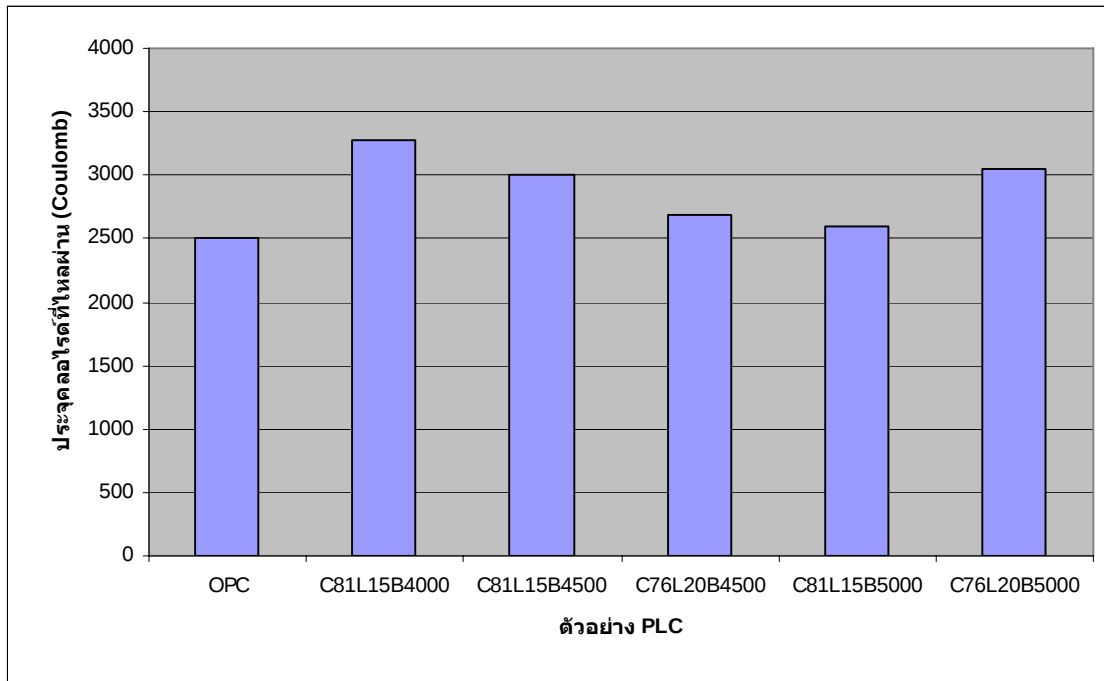
Mixed Design	Sample	Charge (coulomb)
RMX01	OPC	2995
	C81L15B4000	3724
	C81L15B4500	3518
	C76L20B4500	3376
	C81L15B5000	2806
	C76L20B5000	3243

ตารางที่ 4.51 ผลทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สัดส่วนผสม RMX04

Mixed Design	Sample	Charge (coulomb)
RMX04	OPC	2507
	C81L15B4000	3271
	C81L15B4500	3005
	C76L20B4500	2687
	C81L15B5000	2599
	C76L20B5000	3043



รูปที่ 4.28 กราฟแท่งแสดงปริมาณการซึมผ่านของประจุคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สัดส่วนผสม RMX01



รูปที่ 4.29 กราฟแท่งแสดงปริมาณการซึมผ่านของประจุคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสม RMX04

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

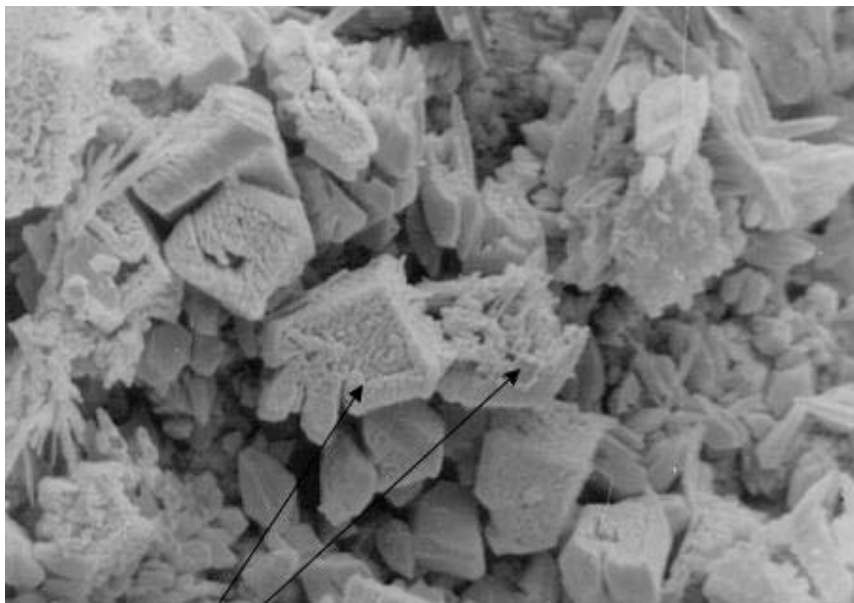
5.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

คุณภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่นำมาใช้ในการทดสอบมีคุณภาพทั้งทางเคมีและฟิสิกส์ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2547 โดยมีค่าองค์ประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณ MgO 1.74 %, SO_3 2.54 %, LOI 1.29 C_3S 58.70 %, C_2S 15.96 %, C_3A 7.20 %, C_4AF 9.97 % และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ค่าความละเอียด 3,550 ตารางเซนติเมตร/กรัม ระยะก่อตัวช่วงต้น (initial setting time) 109 นาที ระยะก่อตัวช่วงปลาย (final setting time) 205 นาที ส่วนค่ากำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน อยู่ที่ 263, 326 และ 427 กก./ตร. ซม. ตามลำดับ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนแต่ละสัดส่วนผสมที่บดได้มีค่าคุณสมบัติทางเคมีที่ใกล้เคียงกันเนื่องการใช้ ปูนเม็ด หินปูนและยิปซัมชนิดเดียวกันเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ ปริมาณ MgO ประมาณ 1.75 % SO_3 ประมาณ 2.53 %, C_3S ประมาณ 60.1 %, C_2S ประมาณ 14.50 %, C_3A ประมาณ 7.20 %, C_4AF 10.0 %

ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพ ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทั้งหมดมีระยะเวลาการก่อตัวสั้นกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีแนวโน้มที่สั้นลงเมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น กำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เล็กน้อยและมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนหินปูนมากขึ้น แต่หากเปรียบเทียบที่สัดส่วนปริมาณหินปูนเท่ากัน ความละเอียดที่สูงขึ้นจะทำให้แนวโน้มของกำลังอัดเพิ่มขึ้น ส่วนค่าน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของหินปูนที่ผสมเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีส่วนสัมพันธ์กับความละเอียดแต่อย่างใด เนื่องจากน้ำหนักที่หายไปเกิดจากปริมาณหินปูนที่ถูกเผาจนระเหิด

สาเหตุที่ถึงแม้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนจะมีปริมาณปูนเม็ดน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ก็ยังให้กำลังอัดช่วงต้นใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นั้น พบว่า นอกจากคุณสมบัติของการอัดตัวกันที่แน่นของอนุภาคไลม์สโตน (particle packing) และการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว บางส่วนของผงหินปูนสามารถที่จะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดสารประกอบที่ชื่อว่าแคลเซียมคาร์โบออลูมินาต (Calciumcarboaluninate) และโมโนคาร์บอนอลูมินาต (Monocarboaluminat) ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความแข็งแรงคล้ายคลึงกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calciumsilicatehydrate) และแคลเซียมอลูมินาตไฮเดรต (Calciumaluminatohydrate)



รูปที่ 4.30 แสดงผลึก CaCO_3 ในซีเมนต์เฟลท์ที่อายุ 1 วัน

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติทั้งทางเคมีและกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนดของมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2547 พบว่าเกือบทั้งหมด ยกเว้นค่าน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) เพียงค่าเดียว ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน มีแนวโน้มในการนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5.2 คุณสมบัติเมื่อนำไปผลิตเป็นคอนกรีตจากการเลือกปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน 5 ตัวอย่าง

5.2.1 ที่สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอยและน้ำยา

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ C81L15B4500, C76L20B4500, C81L15B5000 และ C76L20B5000 เป็นส่วนผสมมีกำลังอัดที่อายุ 28 วันผ่านตามที่ออกแบบไว้ โดยเฉพาะตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ C81L15B5000 มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เกือบทุกสัดส่วนผสม ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ C81L15B4000 มีค่ากำลังอัดน้อยกว่าหรือใกล้เคียงคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5.2.2 ที่สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใส่น้ำยาแต่ไม่ผสมเถ้าลอย

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทุกตัวอย่างมีค่ากำลังอัดผ่านตามที่ออกแบบไว้ที่ 28 วัน และมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผลิตโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5.2.3 ที่สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใส่น้ำยาและผสมเถ้าลอย 20 %

คอนกรีตที่ใช้ตัวอย่าง C81L15B4500 และ C81L15B5000 มีค่ากำลังอัดที่ 28 วันใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนตัวอย่างอื่นมีค่ากำลังอัดที่ค่อนข้างต่ำ

5.2.4 ที่สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใส่น้ำยาและผสมเถ้าลอย 25 %

คอนกรีตที่ใช้ตัวอย่าง C81L15B5000 เท่านั้นที่มีค่ากำลังอัดที่ 28 วันผ่านตามที่ออกแบบไว้ในทุกส่วนผสม แต่ก็ยังมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนตัวอย่างอื่นมีค่ากำลังอัดค่อนข้างต่ำกว่าที่ออกแบบไว้

5.2.5 ที่สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตอัดแรง

คอนกรีตที่ใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตน C81L15B5000 เท่านั้นที่มีค่ากำลังอัดที่อายุ 24 ชั่วโมงเป็นไปตามที่ออกแบบไว้และมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม แต่ที่อายุ 28 วันคอนกรีตที่ใช้ตัวอย่าง C81L15B4500, C76L20B4500 และ C81L15B5000 มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม

5.2.6 ระยะเวลาก่อตัว

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ C81L15B4500, C76L20B4500, C81L15B5000 และ C76L20B5000 เป็นส่วนผสมมีระยะเวลาก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายที่ค่อนข้างสั้นกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม แต่บางสัดส่วนคอนกรีตที่ผสมโดย C81L15B4000 มีระยะเวลาก่อตัวที่ยาวกว่าคอนกรีตที่ผสมโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5.2.7 ความสามารถเทได้

ค่าการยุบตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตนส่วนใหญ่มีค่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีข้อสังเกตคือเนื้อคอนกรีตค่อนข้างนุ่ม เทเข้าแบบได้ง่าย และมีสีขาวกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม

ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตนในสัดส่วนผสมที่ CPM01 – CPM05 ซึ่งเป็นสัดส่วนผสมสำหรับงานคอนกรีตอัดแรงที่ใส่น้ำยาผสมคอนกรีตประเภท superplasticizer นั้น พบว่าเนื้อคอนกรีตสดมีลักษณะค่อนข้างเหนียวกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม

ทั้งนี้ อัตราการสูญเสียค่าความยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮม์สโตนมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมในทุกสัดส่วนผสม

5.3 การทดสอบในแง่ความคงทน

5.3.1 การทดสอบความสามารถในการต้านทานซัลเฟต

ตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าการขยายตัวน้อยกว่าแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีแนวโน้มการขยายตัวลดลงเมื่อมีปริมาณหินปูนเพิ่มขึ้นและความละเอียดเพิ่มขึ้น สาเหตุหลักคาดว่าจะมาจากเมื่อทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน หมายถึงปริมาณ C_3A ในปูนเม็ดที่ลดลง ส่งผลให้ผลให้การทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซัลเฟตลดลง

5.3.2 การทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์

ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนทุกตัวอย่างจะน้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีกำลังและความทึบน้ำอัดที่สูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตน ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตแน่น สารประกอบคลอไรด์จึงซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ยากกว่า ส่วนผลกระทบต่อความต้านทานคลอไรด์ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไลม์สโตนในปริมาณหินปูนที่แตกต่างกันนั้นไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนนัก

ทั้งนี้ จากการทดสอบ พบว่าความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดสูงเนื่องจากค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ จะทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง และสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีขึ้น

บรรณานุกรม

1. ฝ่ายบริการเทคนิคลูกค้า “คู่มืออินทรีคอนกรีต”พิมพ์ครั้งที่ 3 บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) 2551
2. สมชาย รัศมีมาน ผดุงศักดิ์ ทศนสุวรรณ ธนิต ปุริเวทินทร์ “ Cement Data Book ฉบับภาษาไทย” พิมพ์ครั้งที่ 3 บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) 2533
3. ASTM Committee. Annual Book of ASTM Standard, Vol. 4.02 Philadelphia: American Concrete Institute, PA, USA. 1994
4. Adams, Lawrence D., and Race, Ronald M., “Effect of Limestone Additions Upon Drying Shrinkage of Portland Cement Mortar”, Philadelphia, 1990
5. A.M. Neville “ Properties of Concrete ” Fourth Edition, Longman, 1995
6. American Society for Testing and Materials. C 150-02, “Standard Specification for Portland Cement”, 2002 Annual Book of ASTM Standards, 2002
7. American Society for Testing and Materials. C 1157-00a, “Standard Performance Specification for Hydraulic Cement”, 2002 Annual Book of ASTM Standards, 2002
8. ASTM Committee “Annual Book of ASTM Standard, Vol. 4.01” Philadelphia: American Concrete Institute, 1998
9. ASTM Committee “Annual Book of ASTM Standard, Vol. 4.02” Philadelphia: American Concrete Institute, 1998
10. Barker, Alison P., and Copy, Howard P., “The Early Hydration of Limestone-Filled Cements”, Blended Cements in Construction, Elsevier, 1991
11. Baron, Jacques, and Douvre, Christian, “Technical and economical Aspects of the Use of Limestone Filler Additions in Cement”, World Cement, 1987
12. Detwiler, R. J., “Properties of Concretes made with Fly Ash and Cements Containing Limestone”, PCA R&D Serial No. 2082, Illinois, 1996
13. F.M. Lea “ The Chemistry of Cement and Concrete ” Third Edition, Chemical Publishing Company, 1970

14. Jackson, P.J., "Manufacturing Aspects of Limestone-Filled Cements", Building Research establishment, England, 1993
15. Kantro, D. L., "Calcium Carbonate Additions", Paper presented at the Portland Cement Association Cement Chemists Seminar, 1978
16. Nehdi, M., Mindess, S., and Aitcin, P.-C., " Optimization of High strength Limestone Filler Cement Mortars", Cement and Concrete Research, 1996
17. Siebel, Eberhard, and Sprung, Siebert, "Influence of Limestone in Portland Limestone Cement on the Durability of Concrete", Beton, 1991
18. Soroka, I, and Stern, N., "Calcareous Fillers and the Compressive Strength of Portland Cement", Cement and Concrete Research, 1976
19. Steven H. Kosmatka Beatrix Kerkhoff and William C. Panarese, "Design and Control of Concrete Mixtures -14th Edition", Portland Cement Association, 1990
20. Yellepeddi, R., Bapst, A., and Bonvin D., "Determination of Limestone Addition in Cement Manufacture", World Cement, 1993