
กำลังอัดและการหดตัวของคอนกรีตอัดแรงของซีเมนต์ผสมผงหินปูนและผงแคลเซียมคาร์บอเนต

Compressive Strength and Autogenous Shrinkage of
Cement Pastes Containing Limestone Powder and
Calcium Carbonate

ทวิช กล้าแท้*

สาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
วิทยาเขตนครศรีธรรมราช ตำบลท้องเนียน อำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช, 80210

คมสัน มาลีสี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร 10520

Tawich Klathea*

Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology and Management,
Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat Campus,
Thongniam, Khanom, Nakhon Si Thammarat 80210

Komsan Maleesee

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute
of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok Thailand 10520

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการศึกษากำลังอัดและการหดตัวของคอนกรีตอัดแรงของซีเมนต์ผสมผงหินปูนและผงแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน 2 ชนิด คือ ผงหินปูนบด (LP) และผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) ที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 โดยในการทดสอบได้เปรียบเทียบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 3, 7, 28 และ 56 วัน รวมถึงการหดตัวของคอนกรีตอัดแรงที่อายุ 1-56 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LP และ LS ที่ร้อยละ 10 นั้น มีแนวโน้มกำลังอัดที่สูงกว่าและใกล้เคียงซีเมนต์เพสต์ควบคุม (OPC100) และมีการลดลงของกำลังอัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ LP และ LS ที่ร้อยละ 20 และ 30 ตามลำดับ ในส่วนของการหดตัวของคอนกรีต

จีเนียสพบว่าซีเมนต์พิเศษซึ่งมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LP และ LS นั้น มีค่าลดลงและน้อยกว่า OPC100 เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของร้อยละการแทนที่ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ

คำสำคัญ : ผงหินปูน; ผงแคลเซียมคาร์บอเนต; กำลังอัด; การหดตัวแบบออโตจีเนียส

Abstract

This research aims to study compressive strength and autogenous shrinkage of cement pastes containing limestone powder and calcium carbonate. The studied parameter replacement of cement by limestone powder (LP) and calcium carbonate (LS) at 0, 10, 20 and 30 % by weight of binder and the water to binder ratio is controlled at 0.35. Strength development of cement pastes was relatively investigated at ages of 3, 7, 28 and 56 days, and autogenous shrinkage at ages of 1–56 days. The tested results showed that the strength development of cement pastes LP and LS at 10 % was higher than the cement pastes OPC100 and decreased when the percentage in addition of LP and LS in cement increased to 20 and 30 % respectively. For tested the results also showed that the autogenous shrinkage decreased when the percentage of replacement of cement pastes LP and cement pastes LS in cement increased at 10, 20 and 30 % respectively.

Keywords: limestone powder; calcium carbonate; compressive strength; autogenous shrinkage

1. บทนำ

ปัจจุบันกำลังการผลิตปูนซีเมนต์ของโลกอยู่ที่ระดับประมาณ 3,758 ล้านตันต่อปี โดยประเทศที่มีการผลิตปูนซีเมนต์มากที่สุดในโลกคือ จีน ซึ่งมีการผลิตปูนซีเมนต์สูงถึงประมาณ 2,350 ล้านตันต่อปี ประเทศที่มีผลผลิตปูนซีเมนต์รองลงมาคือ อินเดีย สำหรับประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศผู้ผลิตปูนซีเมนต์รายใหญ่ในอาเซียน โดยมีการผลิตประมาณ 36 ล้านตันต่อปี [1] ซึ่งอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญของประเทศ เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งมีความสำคัญสำหรับเศรษฐกิจของประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ของภาครัฐ (megaproject) ส่งผลให้ปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์สูงขึ้น ซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ดังกล่าวมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมากส่งผลกระทบต่อภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งมีผลต่อภาวะโลกร้อน (global warming) โดยในการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะเกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 1 ตัน [2] เมื่อก๊าซเหล่านี้มีการสะสมมากขึ้นในชั้นบรรยากาศรอบผิวโลกจะทำหน้าที่คล้ายเรือนกระจก ทำให้เกิดการดูดกลืนและคายรังสีอินฟราเรดของก๊าซในบรรยากาศมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศบนโลกสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอากาศบริเวณใกล้ผิวโลกและน้ำในมหาสมุทร จากการศึกษาพบว่าในช่วง 100 ปี ที่ผ่านมาอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นถึง 0.74 ± 0.18 องศาเซลเซียส [3] ดังนั้นบทความวิจัยฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาซีเมนต์พิเศษที่ผสมผงหินปูน เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ และเพื่อนำ

ผลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีต นอกจากนี้ยังเป็นการส่งเสริมการรักษาสภาพแวดล้อม อีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งจะนำไปสู่การใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ อย่างเหมาะสมและเป็นทางเลือกใหม่ต่อไปในอนาคต

ผงหินปูน (limestone powder) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO_3) เป็นสารผสมเพิ่มลักษณะเป็นผงปูนสีขาวสามารถใช้ปรับปรุงสมบัติของคอนกรีต เช่น การเร่งการพัฒนาแรงอัดในช่วงต้น ทำให้คอนกรีตแข็งตัวได้เร็วเพื่อลดเวลาถอดแบบสำหรับคอนกรีตอัดแรง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุเฉื่อย (inert) จึงไม่สามารถเปลี่ยนรูปองค์ประกอบทางเคมีได้อีกตลอดการใช้งานของคอนกรีต นอกจากนี้แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เข้าไปในคอนกรีต ควรมีอนุภาคที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถแยกกระจายซีเมนต์ออกจากกันรวมทั้งปริมาณน้ำที่เหมาะสมนี้ จะช่วยทำให้ซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำผสมได้อย่างทั่วถึงและเสร็จสมบูรณ์เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตแข็งตัวและมีกำลังอัดช่วงต้นได้เร็วขึ้น ในขณะที่กำลังอัดที่ 28 วัน หรือในระยะยาวยังคงสูงและไม่แตกต่างกับค่ากำลังอัดในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว [4] โดยผงแคลเซียมคาร์บอเนตได้นำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตอย่างแพร่หลายทั่วโลก ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนนั้นมีอยู่หลายขนาดขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการของคอนกรีตในแต่ละประเภทของงาน โดยการทำงานคล้ายกับการเพิ่มอนุภาคละเอียดในคอนกรีตซึ่งจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เร็วยิ่งขึ้นพร้อมกับสมบัติการเติมเต็มช่องว่าง (filling effect) ทำให้ผิวของคอนกรีตเนียนขึ้นอีกทั้งยังปรับปรุงสมบัติในด้านความคงทนของคอนกรีตบางประการ [5] จากการศึกษาของ อติศักดิ์ และบุรฉัตร พบว่าปริมาณหินปูนที่ใส่เพิ่มในสัดส่วนต่าง ๆ และการบดปูนให้ได้ความละเอียดต่าง ๆ เพื่อหา

จุดเหมาะสมที่สามารถนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โลมส์โตน มาใช้งานจริงได้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์รวมทั้งงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ ปริมาณของหินปูนร้อยละ 15-20 ที่ความละเอียด 4,500-5,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม [6] อีกทั้ง Bouasker และคณะ ได้ศึกษาความทนทานด้านการหดตัวในอายุช่วงต้นภายใน 24 ชั่วโมง ของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนโดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.40 ในขณะที่กำหนดอัตราการใช้ผงหินปูนทดแทนปูนซีเมนต์เท่ากับ ร้อยละ 0, 25 และ 67 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าผงหินปูนช่วยเร่งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างมากในช่วงตั้งแต่เริ่มต้นของปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบอีกว่าผงหินปูนไม่ส่งผลต่อกระบวนการหดตัวช่วงต้นของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ [7]

2. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 (OPC), ASTM C150 [8]

2.1.2 ผงหินปูน (LP) จาก บริษัท คอนกรีตติเวล ลอปเมนต์ จำกัด

2.1.3 ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) จาก บริษัท สุรินทร์ ออมยา เคมิคอล (ประเทศไทย) จำกัด

2.1.4 น้ำสะอาด

2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.2.1 อัตราส่วนผสมระหว่างผงหินปูนและผงแคลเซียมคาร์บอเนตกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซีเมนต์ โดยนำมาทดแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภทที่ 1 จำนวน 4 อัตราส่วนผสม คือ ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 โดยเปรียบเทียบกับ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยอัตราส่วนผสมวัสดุประสานและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 Mixture Proportions

Symbol	kg. / 1 m. ³			
	OPC	LP	LS	Water
OPC100	1,394	-	-	487.9
OPC90LP10	1,255	139	-	487.9
OPC80LP20	1,115	279	-	487.9
OPC70LP30	976	418	-	487.9
OPC90LS10	1,255	-	139	487.9
OPC80LS20	1,115	-	279	487.9
OPC70LS30	976	-	418	487.9

OPC = ordinary portland cement type I; LP = limestone powder; LS = calcium carbonate

2.2.2 การทดสอบสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุ ได้แก่ การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี (XRF) การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI) ความถ่วงจำเพาะ ASTM C188 [9] ความละเอียดแบบเบลน ASTM C204 [10] ลักษณะทางจุลภาค (SEM) องค์ประกอบความเป็นผลึก (XRD) ระยะเวลาการก่อตัว ASTM C191 [11] โดยอัตราส่วนผสมวัสดุประสานที่ใช้ แสดงในตารางที่ 1

2.2.3 การทดสอบกำลังอัด ก้อนซีเมนต์เพสต์ขนาด 50×50×50 มม. โดยกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ทุกส่วนผสมจะควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 56 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 109 [12] โดยมีอัตราการแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภทที่ 1 ด้วยส่วนผสมทั้ง 4 ส่วนผสม คือ ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดย

น้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งผลของค่ากำลังอัดที่ได้จะเปรียบเทียบผลการทดสอบกับซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยค่าเฉลี่ยของกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ แต่ละอัตราส่วนผสมได้จากการทดสอบซีเมนต์เพสต์ 3 ก้อนตัวอย่าง

2.2.4 การหดตัวแบบออโตจีเนียส (auto genous shrinkage) ตามมาตรฐาน ASTM C490 [13] โดยหล่อก้อนซีเมนต์เพสต์ขนาด 25×25×285 มม. ทุกส่วนผสมจะควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 ที่อายุการบ่ม 1-56 วัน โดยมีอัตราการแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภทที่ 1 ด้วยส่วนผสมทั้ง 4 ส่วนผสมคือ ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แต่ละอัตราส่วนผสมได้จากการทดสอบซีเมนต์เพสต์ 3 ก้อนตัวอย่าง การหดตัวแบบออโตจีเนียสเป็นการหดตัวที่ไม่มี การสูญเสียความชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกใส 5 ชั้น วัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบว่ามีน้ำระเหยออกจากตัวอย่างหรือไม่ การสูญเสีย น้ำหนักต้องไม่เกินร้อยละ 0.05 ของน้ำหนักเริ่มต้น เก็บตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ 25±2 °C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50±5 ตลอดการทดสอบ [14]

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุ

3.1.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุ

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง x-ray fluorescence analysis (XRF) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ผงหินปูน (LP) และผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) ดังแสดงใน

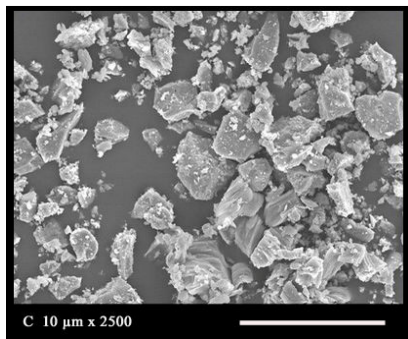
ตารางที่ 2 พบว่าค่าออกไซด์ต่าง ๆ ของ OPC, LP และ LS มีค่าใกล้เคียงกัน โดย OPC มีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 64.97 เปรียบเทียบกับปริมาณ CaO ของ LP และ LS โดยมีค่าร้อยละ 65.40 และ 57.30 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณ CaO ของ LP มีค่าสูงกว่า OPC และ LS ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติด้านกำลัง ส่วนองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) พบว่าใน OPC มี SiO₂ เป็นองค์ประกอบร้อยละ 20.80 ในขณะที่ LP และ LS มี SiO₂ เป็นองค์ประกอบร้อยละ 3.25 และ 0.98 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618 Class N ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับวัสดุพอลิโกลานจากธรรมชาติโดยมีสมบัติของวัสดุที่ไม่ได้ตามมาตรฐานหลายประการ เช่น ผลรวมร้อยละต่ำสุดของซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และไอออนออกไซด์ [15] ซึ่งกล่าวได้ว่า LP และ LS ไม่สามารถจัดให้เป็นวัสดุประเภทพอลิโกลาน

ตารางที่ 2 แสดงผลการศึกษาศักยภาพทางกายภาพพบว่า LP มีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายแป้งฝุ่น เมื่อสัมผัสจะรู้สึกมีเนื้อเนียนลื่น มีสีคล้ายคลึงกับ OPC คือ เทาอ่อนแต่มีสีอ่อนกว่านิดหน่อย และ LS มีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้งฝุ่นเช่นกัน แต่มีสีขาว โดยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า OPC โดย LP และ LS มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.84 และ 0.86 เท่าของ OPC ตามลำดับ โดยที่ LP มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า LS ประมาณ 0.98 เท่า การทดสอบ laser particle size พบว่า LP มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 6.50 μm ซึ่งเล็กกว่า OPC ที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 16.50 μm อยู่ 2.54 เท่า แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแทรกเข้าไปในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ ทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นได้ ในส่วนของ LS มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 12.00 μm ซึ่งเล็กกว่า OPC 1.38 เท่า จากผลการทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface

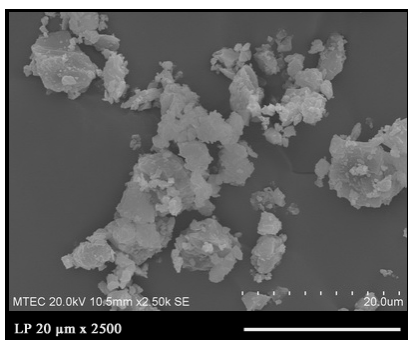
area) ของ LP และผง LS พบว่า LP มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 12,230 cm^2/g ซึ่งมากกว่า OPC ที่มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3,400 cm^2/g อยู่ 3.60 เท่า ส่วน LS มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 7,940 cm^2/g ซึ่งมากกว่า OPC 2.34 เท่า อย่างไรก็ตาม LP มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งมากกว่า LS อยู่ 1.54 เท่า ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐาน ASTM C 150 [8] กำหนด คือ ต้องไม่ต่ำกว่า 2,800 cm^2/g

ตารางที่ 2 Chemical composition and physical properties of ordinary portland cement type I (OPC), limestone powder (LP), calcium carbonate (LS)

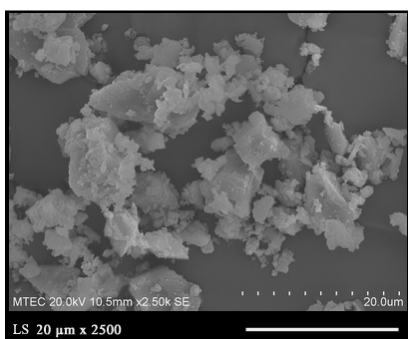
Chemical and physical properties		OPC	LP	LS
chemical composition (%)	SiO ₂	20.8	3.25	0.98
	Al ₂ O ₃	5.5	1.5	0.31
	Fe ₂ O ₃	3.16	1.28	0.15
	CaO	64.97	65.4	57.3
	MgO	1.06	1.32	0.39
	K ₂ O	0.55	0.26	0.02
	Na ₂ O	0.08	NA	0.01
	SO ₃	2.96	NA	0.05
	LOI	1.4	26.15	40.6
physical properties	specific gravity	3.15	2.66	2.70
	median particle size, d ₅₀ (μm)	16.5	6.5	12.0
	blaine fineness (cm^2/g)	3,400	12,230	7,940



(a) portland cement type 1 (2,500X)



(b) limestone powder (2,500X)



(c) calcium carbonate (2,500X)

รูปที่ 1 The image of materials from SEM at 2,500 magnification

3.1.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุ (SEM)

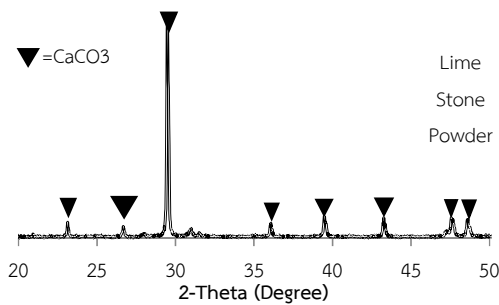
รูปที่ 1a - 1c แสดงภาพถ่ายการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ผงหินปูน

(LP) และผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า พบว่าลักษณะอนุภาคของ OPC จะมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมขรุขระและมีรูปทรงไม่แน่นอนอาจเป็นเพราะขนาดของอนุภาคที่มีขนาดไม่ละเอียดมากนักปะปนกันอยู่ ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยการบดปูนเม็ด (clinker) ให้เป็นปูนซีเมนต์ผงตามที่ใช้กันอยู่ทั่วไป และเมื่อเปรียบเทียบกับ LP และ LS โดยทั้งสองชนิดมีลักษณะรูปร่างของอนุภาคที่คล้ายคลึงกัน คือ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมเช่นเดียวกับ OPC แต่มีความละเอียดและมีความพรุนต่ำเนื่องจากมีช่องว่างอยู่น้อย โดยลักษณะของรูปร่างประกอบด้วยอนุภาคเล็ก ๆ เกาะกันเป็นกลุ่มอย่างหลวม ๆ ซึ่งสังเกตได้ว่าขนาดของอนุภาคจะมีขนาดที่ใกล้เคียงกันระหว่าง LP และ LS แต่ LP จะมีความละเอียดสูงกว่า จึงส่งผลให้ความสามารถในการลดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ทำให้เนื้อแน่นที่บ่มน้ำมากขึ้น จึงส่งผลดีไปยังสมบัติด้านอื่น ๆ ของซีเมนต์เพสต์ด้วย

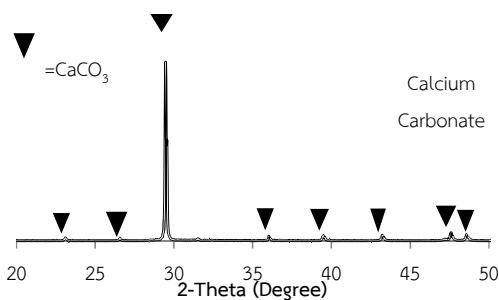
3.1.3 องค์ประกอบความเป็นผลึกของวัสดุ (XRD)

โดยทั่วไปสารประกอบด้วย 2 สถานะ คือ สถานะผลึก (crystalline) ซึ่งมีความเฉื่อยและความสามารถในการทำปฏิกิริยาค่า เนื่องจากโครงสร้างจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และอีกสถานะหนึ่ง คือ สถานะอสัณฐาน (amorphous) เป็นสถานะที่มีแนวโน้มที่จะสามารถทำปฏิกิริยาได้ สารที่อยู่ในสถานะอสัณฐานนี้จึงเป็นค่าที่บ่งบอกว่าสารมีความสามารถในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้าง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซ์เรย์ด้วยเทคนิค x-ray diffraction (XRD) รูปที่ 2a และ 2b แสดงผลจากการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซ์เรย์ของผงหินปูน (LP)

และผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) ด้วยเทคนิค x-ray diffraction (XRD) พบว่า LP และ LS มีสถานะเป็นผลึก (crystalline) <calcite (CaCO_3)> และพบว่าจุดยอด (peak intensity) ของผลึกระหว่าง LP และผง LS มีความแตกต่างกันไม่มากนัก โดยจะปรากฏแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยเมื่อพิจารณาที่มุมสะท้อน 2 Theta เท่ากับ 29.487 และ 29.482 ตามลำดับ ซึ่งสถานะออสถุฐานของแคลเซียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ดีเนื่องจากโครงสร้างจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ [16]



(a) ผลการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซเรย์ด้วยเทคนิค x-ray diffraction (XRD) ของผงหินปูน (LP)



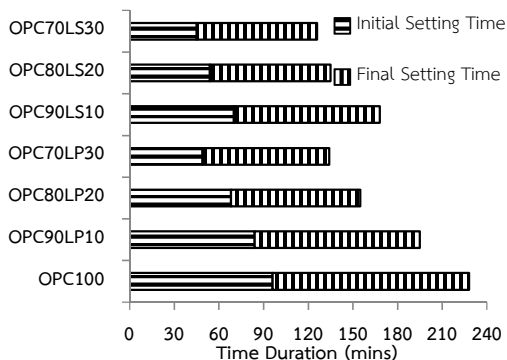
(b) ผลการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซเรย์ด้วยเทคนิค x-ray diffraction (XRD) ของผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS)

รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซเรย์ด้วยเทคนิค x-ray diffraction (XRD) ของวัสดุ

3.1.4 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ (setting time)

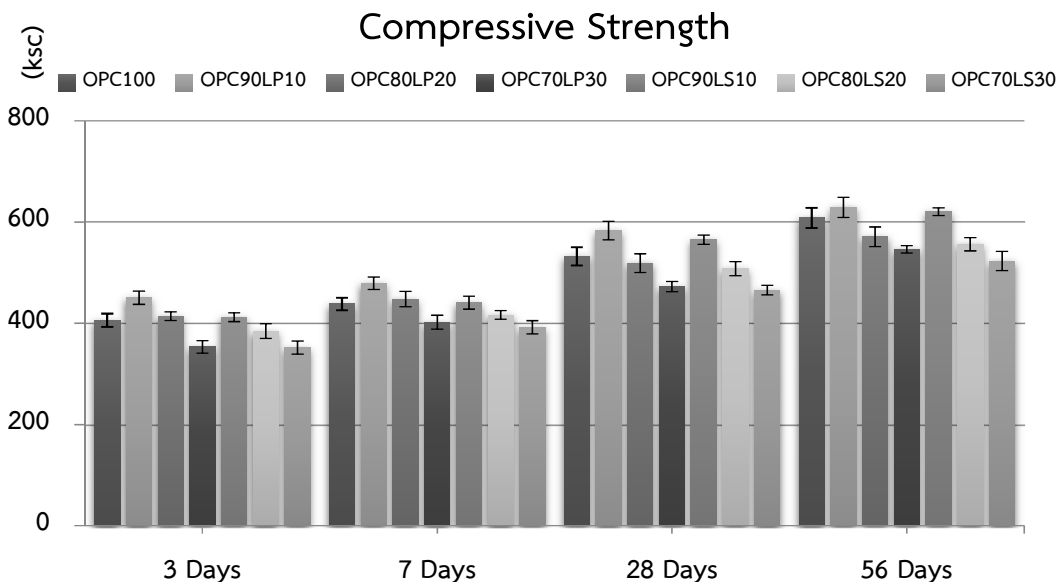
ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ด้วยชุดทดสอบไวแคทตามมาตรฐาน ASTM C191 [11] ของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (LP) และซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายโดย OPC 100 มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) เท่ากับ 96 นาที ส่วนเวลาการก่อตัวระยะปลาย (final setting time) เท่ากับ 228 นาที ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทั่วไป [8] ที่มีการก่อตัวระยะต้นภายใน 60-240 นาที และการก่อตัวระยะปลายภายใน 180-360 นาที สำหรับซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LP และซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LS ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่ามีระยะเวลาการก่อตัวในระยะต้นตั้งแต่ 45-84 นาที และระยะปลายตั้งแต่ 126-195 นาที ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าการนำ LP และ LS แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนนั้น ช่วยเร่งให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ โดยเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ขึ้น ก็จะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์จะยิ่งลดลงอย่างชัดเจน อาจเป็นเพราะช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์นั้นมีปริมาณลดลง เนื่องจากการแทนที่ด้วย LP และ LS มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้ไปช่วยในการลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ รวมถึงส่งผลให้วัสดุผสมมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มาก ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เร็วขึ้น แนวโน้มของระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและ

ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย จึงลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ



รูปที่ 3 ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (LP) และซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS)

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการนำ LP และ LS แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนนั้น ทำให้การก่อตัวของซีเมนต์เร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการก่อตัวเริ่มแรกของซีเมนต์เพสต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบ C_3S เป็นหลัก ดังนั้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LP และ LP แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนนั้น ทำให้ปริมาณ C_3S ของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น และเร่งเวลาการก่อตัวให้เร็วขึ้นตามสัดส่วนการแทนที่ของ LP และ LS ดังจะเห็นได้จากซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วย LP และ LS ในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีระยะเวลาการก่อตัวทั้งในระยะต้นและระยะปลายเร็วกว่าที่อัตราส่วนการแทนที่อื่นๆ โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวเนื่องจาก LP และ LS จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสม ความละเอียดและองค์ประกอบทางเคมีของ LP และ LS โดยเฉพาะ LP และ LS ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตสูงจะดูดซึมน้ำมาก ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์เร็วขึ้นอย่างมาก

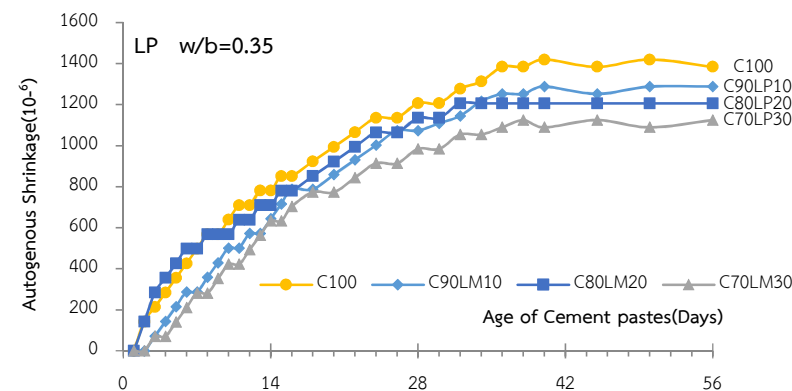


รูปที่ 4 ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 56 วัน โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35

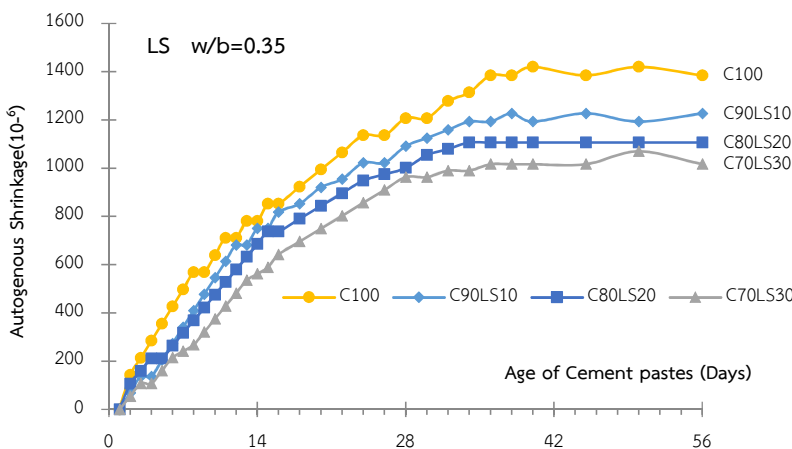
3.2 ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

รูปที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (LP) และซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) ที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LP ที่ร้อยละ 10 นั้น มีแนวโน้มค่ากำลังอัดที่สูงกว่า ซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LS และ OPC100 โดยอายุในการบ่ม 3, 7, 28 และ 56 วัน ซีเมนต์เพสต์ (OPC90LP10) และ (OPC90LS10) ให้ค่ากำลังอัด

เท่ากับ 451, 479, 583, 629 ksc และ 412, 441, 565, 620 ksc ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 111, 109, 110, 103 และ 101, 101, 106, 102 ของ OPC100 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่า LP และ LS สามารถช่วยเพิ่มสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้นและส่งผลถึงค่ากำลังรับแรงอัดในระยะยาว ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีจากองค์ประกอบหลักที่เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ในปูนซีเมนต์และน้ำ (H₂O) ทำให้ได้ผลผลิตที่เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CaO-SiO₂-H₂O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในการรับกำลังได้ดี



(a) ค่าการหดตัวแบบออโตเจเนียสของซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (LP) เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (OPC100)



(b) ค่าการหดตัวแบบออโตเจเนียสของซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (OPC100)

รูปที่ 5 ค่าการหดตัวแบบออโตเจเนียสของซีเมนต์เพสต์

3.3 การหาค่าการหดตัวของซีเมนต์เพสต์

รูปที่ 5a และ 5b แสดงค่าการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (LP) และซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) ที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.35 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วย LP นั้นสามารถช่วยลดการค่าการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ OPC100 จะเห็นว่าร้อยละการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์จะลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของ LP ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยซีเมนต์เพสต์ (OPC70LP30) และ (OPC70LS30) สามารถลดค่าการหดตัวของแบบอโตจีเนียสเท่ากับ 19 และ 27 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าการหดตัวของแบบอโตจีเนียส OPC100

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (LP) และซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) ที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง 0.35 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วย LP นั้นสามารถช่วยลดค่าการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์เมื่อเปรียบเทียบกับ OPC100 จะเห็นว่าร้อยละการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์จะลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของ LP ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ

ซึ่งอาจส่งผลมาจากปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ของ LP และ LS ซึ่งมีปริมาณ

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (LP) และซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) กับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (OPC100)

Specimen	Autogeneous shrinkage ($\times 10^{-6}$) - (% of OPC100)	SEM ($\times 10^{-6}$)
OPC100	1384 (100)	7.219
OPC90LP10	1288 (93)	7.265
OPC80LP20	1206 (87)	7.024
OPC70LP30	1125 (81)	7.638
OPC90LS10	1227 (89)	8.819
OPC80LS20	1106 (80)	8.090
OPC70LS30	1016 (73)	7.219

ตัวเลขในคอลัมน์แรก คือ ค่าการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 56 วัน ในวงเล็บ () คอลัมน์ที่สอง คือ อัตราส่วนของการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (OPC100) คอลัมน์ที่ 3 คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของตัวอย่าง (standard error of measurement, SEM) ซึ่งกำหนดไม่มากกว่า 0.01 % ของค่าเฉลี่ย ตามมาตรฐาน ASTM C490 [13]

มากกว่าเมื่อเทียบกับ OPC โดยปริมาณของ (CaCO_3) มีผลโดยตรงต่อการหดตัวของแบบอโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ เพราะเมื่อ CaCO_3 เริ่มทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เพื่อสร้างผลผลิตที่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตไฮเดรต (calcium carboaluminate hydrate) โดยปฏิกิริยาระหว่าง C_3A และ CaCO_3 จะให้ผลผลิต ที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับเอ็ทริงไกต์ (ettringite) ซึ่งโครงสร้างของ ettringite จะมีลักษณะคล้ายผลึกเข็ม โดยผลึกดังกล่าวจะมีการ

พัฒนาโครงสร้างขยายออกในแนวของเข็ม ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มจำนวนโพรงที่ละเอียด (finer pores) ให้มีปริมาณมากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการขยายตัวซึ่งทำให้การหดตัวของบ่อโตนีเยสของซีเมนต์เพสต์ที่ผสม LP และ LS มีค่าลดลงอย่างชัดเจน

4. การวิเคราะห์ราคาค่าต้นทุนในการผลิต

ผลการศึกษากำลั้งอัดและการหดตัวของบ่อโตนีเยสของซีเมนต์เพสต์ผสมผงหินปูนและผงแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น เมื่อนำมาวิเคราะห์หาราคาค่าต้นทุนในการผลิต การใช้ผงหินปูน (LP) ซึ่งมีราคาประมาณ กิโลกรัมละ 1.25 บาท ในขณะที่ผงแคลเซียมคาร์บอเนต LS มีราคาประมาณ 2.25 บาทต่อกิโลกรัม โดยรวมค่าขนส่งแล้ว ซึ่งมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ซึ่งมีราคาประมาณ 2.93 บาทต่อกิโลกรัม (ราคากลาง ณ เดือนกันยายน 2560) ดังนั้นการใช้ผงหินปูนและผงแคลเซียมคาร์บอเนต จึงเป็นวัสดุทางเลือกในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งนอกจากจะสามารถประหยัดพลังงาน และลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากจากการกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยตรงแล้ว ยังสามารถประหยัดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลงได้อีกด้วย

5. สรุป

5.1 ผงหินปูน (LP) และผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) เร่งการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ให้เร็วขึ้น

5.2 ซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (LP) และผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) มีความสามารถในการเพิ่มค่ากำลังอัดได้ โดยที่ร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังอัดมากที่สุด และกำลังอัดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ 20 และ 30 ตามลำดับ

5.3 ผงหินปูน (LP) และผงแคลเซียมคาร์บอเนต

(LS) มีความสามารถในการช่วยลดการหดตัวของบ่อโตนีเยสของซีเมนต์เพสต์ได้ โดยจะมีค่าการหดตัวที่ลดลง เมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ 10 , 20 และ 30 ตามลำดับ

5.4 การใช้ผงหินปูน (LP) และผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) สามารถประหยัดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต และลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากจากการกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

5.5 ปริมาณการใช้ผงหินปูน (LP) และผงแคลเซียมคาร์บอเนต (LS) เป็นวัสดุทดแทนที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เนื่องจากมีแนวโน้มค่ากำลังอัดที่สูงกว่าและใกล้เคียงซีเมนต์เพสต์ที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (OPC100) อีกทั้งยังสามารถลดการหดตัวของบ่อโตนีเยสของซีเมนต์เพสต์ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท คอนกรีต ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด และบริษัท สุรินทร์ ออมยา เคมิคอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้อเฟื้อวัสดุในการทดสอบ และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

6. รายการอ้างอิง

- [1] จรินทร์ ชลไพศาล, 2560, สถานการณ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์, กลุ่มวิเคราะห์สถานการณ์เศรษฐกิจ สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 5 น.
- [2] Fairbairn, E.M.R., Americano, B.B., Cordeiro, G.C., Paulaa, T.P., Toledo Filho, R.D. and Silvosoa, M.M., 2010, Cement replacement by sugar cane bagasse ash:

- CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits, J. Environ. Manage. 9 1 : 1864-1871.
- [3] โองการ วณิชชาชีวะ, 2556, ผลกระทบจากภาวะโลกร้อนที่มีต่อความหลากหลายทางชีวภาพ, ว. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 21(5): 474-485.
- [4] วชิรวิทย์ สำราญรัมย์, 2553, สมบัติเชิงกลและความทนทานของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนและเถ้าแกลบดำบด, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 218 น.
- [5] กฤติยา แก้วมณี และสมนึก ตั้งเต็มสิริกกุล, 2551, คุณสมบัติพื้นฐานและความคงทนของคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃), ว.คอนกรีต 2:
- [6] อติศักดิ์ ยี่มวัน และบุรฉัตร ฉัตรวีระ, 2554, การศึกษาปริมาณหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮดรอสโตนที่เหมาะสมสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน EN 197-1, ว. วิจัยและพัฒนา มจร. 34(1): 45-58.
- [7] Bouasker, M., Mounanga, P., Turcry, P., Loukill, A. and khelij, A., 2008, Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early: Effect of limestone filler and granular inclusions, Cem. Con. Com. 30: 13-22.
- [8] ASTM Standard C150, American Society for Testing and Materials, 2015, Standard Specification for Portland Cement, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 4.01, Pennsylvania.
- [9] ASTM Standard C188, American Society for Testing and Materials, 2009, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, Pennsylvania.
- [10] ASTM Standard C204, American Society for Testing and Materials, (2011), Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4.11, Pennsylvania.
- [11] ASTM Standard C191, American Society for Testing and Materials, 2013, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 4.11, Pennsylvania.
- [12] ASTM Standard C109, American Society for Testing and Materials, 2008, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), Annual Book of ASTM Standard, Vol. 4.01, Pennsylvania.
- [13] ASTM Standard C490, American Society for Testing and Materials, 2009, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 4.02, Pennsylvania.
- [14] สนธยา ทองอรุณศรี, สรัณกร เหมะวิบูลย์, พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกกุล, 2558, ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานร่วม

- สองชนิด, ว.วิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย 3(1): 1-8.
- [15] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวัชรกร วงศ์คำจันทร์, 2544, พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกบละเอียด, ว.วิจัยและพัฒนา มจร. 24(3): 327-342.
- [16] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และเพิ่มพล ศรีนวล, 2555, การศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกบลบดและผงหินปูน, ว.วิจัยและพัฒนา มจร. 35(2): 201-218.