ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อกำลังอัดประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

Effect of Fineness of Limestone Powder on Compressive and Splitting Tensile Strengths and Modulus of Elasticity of Concrete mixed with Fly Ash and Limestone Powder

สุรสิทธิ์ เพาะบุญ[1] และ ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาของผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยทำการศึกษาผงหินปูนที่มีความละเอียด (d_{50}) เท่ากับ 2, 8 และ 15 ไมครอน (μm) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 20 ร่วมกับเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 30, 25, 20 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนวัสดุได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน และคุณสมบัติทางกล ได้แก่ กำลังอัดประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่น จากผลการสอบพบว่า กำลังอัดประลัยที่อายุช่วงต้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีแนวโน้มมากกว่าคอนกรีตปกติ ในขณะที่คอนกรีตผสมผงหินปูนและเถ้าลอยมีค่ากำลังอัดประลัยที่ระยะยาวมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตปกติ ส่วนค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกำลังอัดประลัย นอกจากนั้นความละเอียดของผงหินปูนมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกล โดยผงหินปูนที่มีความละเอียดสูงกว่ามีผลทำให้คุณสมบัติทางกลสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดต่ำกว่า

คำสำคัญ : คอนกรีต, ผงหินปูน, ความละเอียด, กำลัง, โมดูลัสยืดหยุ่น

Abstract

This paper presents the study results of the effect of fineness of limestone powder on the mechanical properties of concrete mixed with fly ash and limestone powder. Limestone powder with having fineness by representing as a mean particle size (d_{50}) equal to 2, 8 and 15 micrometers (μm) was taken into account by replacing in Type 1 Portland cement of the replacement percentage of 0%, 5%, 10% and 20% by weight and blended with fly ash at replacement percentage of 30%, 25%, 20% and 10% by weight. The basic properties of all materials which are chemical composition, physical properties including specific gravity and Blaine fineness were investigated. Mechanical properties which are the compressive and splitting tensile strengths and modulus of elasticity were tested. Results show that the compressive strengths of early-age concrete containing limestone powder have higher tendency than those of conventional concretes. In addition, the limestone powder-fly ash concretes have also higher long-term

[1] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[2] อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

compressive strength than those of conventional concretes. Furthermore, the splitting tensile strength and the modulus of elasticity of concrete containing fly ash and limestone powder have a similar tendency to theirs compressive strength. In summary, the fineness of limestone powder has directly effect on mechanical properties, which has higher fineness limestone powder has higher mechanical properties than lower one.

Keywords : Concrete, Fineness, Limestone Powder, Modulus of Elasticity, Compressive Strength

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนทำให้มีเถ้าเหลือทิ้ง (By product) ทั้งชนิดเถ้าลอย (Fly Ash) และเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) เกิดขึ้นในปริมาณสูงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉลี่ยเถ้าลอยมีปริมาณ 3 ล้านตันต่อปี [1] ทางเลือกที่สำคัญทางหนึ่งของการกำจัดเถ้าดังกล่าวซึ่งหากปล่อยทิ้งไว้จะมีส่วนในการสร้างผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมคือ การนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตคอนกรีตและวัสดุซีเมนต์ในหลากหลายประเภท [2] โดยจากงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศซึ่งได้ดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องมากกว่า 20 ปี ระบุข้อสรุปไว้ตรงกันของการใช้เถ้าลอยคือ การใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในซีเมนต์เพสต์ลดลงและยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เถ้าลอยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตได้ดีขึ้น [3] แต่อย่างไรก็ตามข้อด้อยประการหนึ่งของเถ้าลอยที่มีต่อคอนกรีตคือ อัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ช้าในช่วงต้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นและทำให้อัตราการพัฒนากำลังรับแรงลดลงตามไปด้วย ดังนั้นในงานคอนกรีตที่ต้องการการพัฒนากำลังในช่วงต้นที่สูงหรือคอนกรีตกำลังสูงจึงไม่นิยมใช้เถ้าลอยเป็นส่วนประกอบ ทางแก้ปัญหาดังกล่าวจึงควรมีการเพิ่มศักยภาพในช่วงต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยโดยอาศัยหลักการทางเลือกสองประการได้แก่ ประการแรกคือ ใช้เถ้าลอยร่วมกับวัสดุที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานระดับสูง อาทิเช่น การใช้เถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟูม แต่เนื่องจากข้อด้อยในเรื่องของราคาที่สูงจึงยังไม่เป็นนิยมใช้กับงานคอนกรีตปกติในประเทศไทย ประการที่สองคือ การคัดสรรวัสดุทางเลือกใหม่ที่ผลิตได้ในประเทศและมีความสามารถในการเติมแทรกเข้าไปสู่ภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ได้ดีซึ่งจะมีผงหินปูน (Limestone Powder) ที่เกิดจากกระบวนการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และมวลรวมที่ใช้ในงานคอนกรีตที่คุณสมบัติดังกล่าว ด้วยสาเหตุที่ผงหินปูนซึ่งเป็น วัสดุเฉื่อย (Inert Material) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างได้ดีทำให้กำลังรับแรงในตอนต้นสามารถพัฒนาได้ดียิ่งขึ้น [3-7] อย่างไรก็ตามการใช้ผงหินปูนยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักถึงแม้ว่าจะมีราคาที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์อยู่ก็ตามเนื่องจากยังขาดองค์ความรู้ทั้งในตัววัสดุและการประยุกต์ใช้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดเป้าหมายที่การพัฒนาการใช้ผงหินปูนร่วมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยเป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการเลือกใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนเพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง

จากที่กล่าวมาข้างต้น ในการพัฒนาการใช้วัสดุร่วมทั้งสองชนิดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะต้องอยู่บนหลักของการพิจารณาศักยภาพและหน้าที่ของแต่ละวัสดุ โดยจากงานวิจัยจะพบว่า เถ้าลอยมีศักยภาพในการทำ

ปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีในช่วงหลังแต่ไม่ดีในช่วงต้น ในขณะที่ผงหินปูนมีศักยภาพในการทำปฏิกิริยาได้ต่ำหรือถึงกับไม่ทำปฏิกิริยา ดังนั้นปัจจัยที่สำคัญของการประยุกต์ใช้ผงหินปูนร่วมกับปูนซีเมนต์ตามกลไกของการเติมแทรก (Filling Effect) จึงอยู่ที่ขนาดของอนุภาคเป็นสำคัญ ซึ่งโดยปกติแล้วผงหินปูนเหล่านี้จะมีขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ไมครอน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดวัตถุประสงค์เฉพาะที่ต้องการศึกษาผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตเถ้าลอย โดยเน้นผงหินปูนที่ขนาด 2,8 และ 15 ไมครอน ซึ่งมีการผลิตและใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆ ของในประเทศไทยอยู่ในปัจจุบัน และคุณสมบัติที่ศึกษาประกอบด้วยทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและผงหินปูน และสมบัติทางกลของคอนกรีตซึ่งได้แก่ กำลังอัดประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีกและโมดูลัสยืดหยุ่น

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย

1) ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 [8]

2) เถ้าลอย ใช้เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3) ผงหินปูน ใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิตมีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท โดยมีความละเอียด 2, 8 และ 15 ไมครอน

4) ทราย ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนออกจนสะอาด นำไปทำการอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated-Surface Dry)

5) หินเบอร์ 2 นำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆออกจนสะอาด นำไปทำการอบและปรับหินให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

6) น้ำ ใช้น้ำประปามีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในช่วง 7 ถึง 8

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับกำลังอัดประลัยและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 สูง 30 ซม. โดยทำการหล่อ 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปทำการบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่ 3, 14, 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัดประลัยและแรงดึงใช้วิธีทดสอบแบบผ่าซีกตามมาตรฐาน ASTM C 39 [9] และ ASTM C 496 [10] ตามลำดับ และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 469 [11]

2.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษามีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ขนาดของผงหินปูน (d_{50}) (ไมครอน)			เถ้าลอย	ทราย	หิน	น้ำ
		2	8	15				
C[*]	332	–	–	–	–	790	1080	183
C-5LP2[**]	315	17	–	–	–	790	1080	183
C-5LP8	315	–	17	–	–	790	1080	183
C-5LP15	315	–	–	17	–	790	1080	183
C-10LP2	299	33	–	–	–	790	1080	183
C-10LP8	299	–	33	–	–	790	1080	183
C-10LP15	299	–	–	33	–	790	1080	183
C-20LP2	266	67	–	–	–	790	1080	183
C-20LP8	266	–	67	–	–	790	1080	183
C-20LP15	266	–	–	67	–	790	1080	183
C-30FA[***]	232	–	–	–	100	790	1080	183
C-5LP2-25FA[****]	332	17	–	–	83	790	1080	183
C-5LP8-25FA	332	–	17	–	83	790	1080	183
C-5LP15-25FA	332	–	–	17	83	790	1080	183
C-10LP2-20FA	332	33	–	–	67	790	1080	183
C-10LP8-20FA	332	–	33	–	67	790	1080	183
C-10LP15-20FA	332	–	–	33	67	790	1080	183
C-20LP2-10FA	332	67	–	–	33	790	1080	183
C-20LP8-10FA	332	–	67	–	33	790	1080	183
C-20LP15-10FA	332	–	–	67	33	790	1080	183

หมายเหตุ

[*]C หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

[**]C-xLPy หมายถึง คอนกรีตที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก และผงหินปูนมีขนาด y ไมครอน

[***]C-30FA หมายถึง คอนกรีตที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย โดยมีเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 30

[****]C-xLPy-zFA หมายถึง คอนกรีตที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนและเถ้าลอย โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก และผงหินปูนมีขนาด y ไมครอน และมีเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ z โดยน้ำหนัก

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

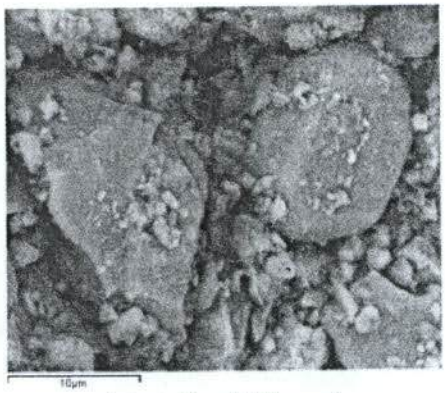
3.1 สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและผงหินปูน

ตารางที่ 2 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยและผงหินปูนขนาดต่างๆ พบว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.12 ในขณะที่ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 2.47 ส่วนผงหินปูนที่มีขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน (μm) มีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันคือ 2.70, 2.69 และ 2.68 ตามลำดับ สำหรับความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (3,250 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม) ส่วนความละเอียดของเถ้าลอยนั้นมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3,550 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ในขณะที่ผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้มีค่าความละเอียดคือ 11,180, 10,450 และ 9,350 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

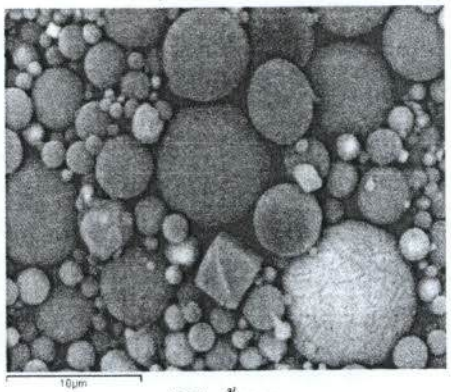
ตารางที่ 2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สมบัติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน ขนาด (ไมครอน)		
			2	8	15
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.47	2.70	2.69	2.68
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	3,250	3,550	11,180	10,450	9,350

รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้โดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว (รูปที่ 1 (ก))



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



(ข) เถ้าลอย

(ค) ผงหินปูน

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยและผงหินปูน

ส่วนกรณีของอนุภาคของเถ้าลอย (รูปที่ 1 (ข)) พบว่ามีลักษณะที่แตกต่างจากกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีลักษณะที่กลม ผิวเรียบ ในขณะที่กรณีของผงหินปูน (รูปที่ 1 (ค)) มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ขนาดของอนุภาคจะมีขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเปรียบเทียบกัน

ตารางที่ 3 แสดงถึงองค์ประกอบเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ วัสดุประสานดังกล่าวได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน พบว่าซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ของเถ้าลอยมีค่าสูงเท่ากับร้อยละ 40.93 เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 19.50 ในขณะที่ของผงหินปูนมี SiO_2 น้อยมาก (ร้อยละ 0.46) ในกรณีของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 22.42 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนเท่ากับร้อยละ 4.97 และ 3.87 ตามลำดับ ส่วนในกรณีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) นั้นพบว่าของเถ้าลอย (ร้อยละ 13.63) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 65.38) และของผงหินปูนมีค่า (CaO) ประมาณร้อยละ 55.20

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

ออกไซด์ (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน ขนาด (ไมครอน)		
			2	8	15
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	19.50	40.93	0.46	0.45	0.44
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	4.97	22.42	0.06	0.05	0.06
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.78	13.64	0.03	0.03	0.02
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.38	13.63	55.25	55.20	55.23
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.08	2.93	0.37	0.34	0.36
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.16	1.92	< 0.01	< 0.01	< 0.01
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	< 0.01	0.89	< 0.01	< 0.01	< 0.01
โปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.47	2.39	0.01	0.014	0.01
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	2.27	0.46	43.79	3.12	43.01
แคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO)	1.00	0.22	–	–	–
Insoluble Residue	0.28	–	–	–	–

3.2 สมบัติทางกลของคอนกรีต

3.2.1 กำลังอัดประลัย (Compressive Strength)

รูปที่ 2 และ 3 แสดงกำลังอัดประลัย ของคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้ โดยเป็นกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 10 ซม.) ซึ่งมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) (รูปที่ 2) และผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1-30FA) (รูปที่ 3) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 โดยศึกษาตัวอย่างคอนกรีตที่อายุถึง 91 วัน สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

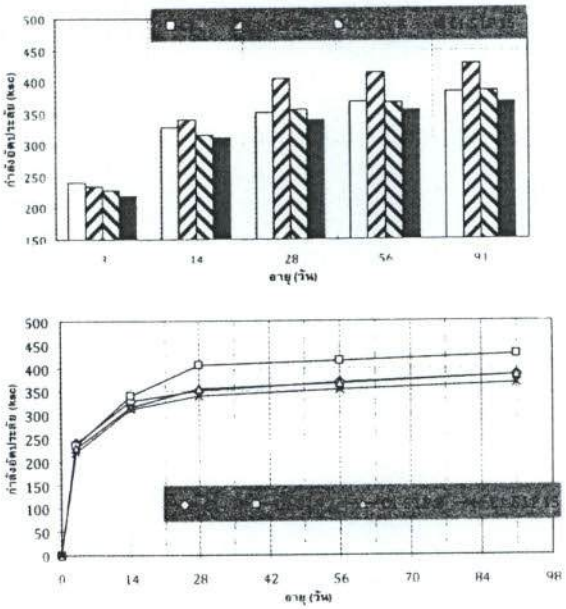
จากรูปที่ 2 พบว่า เมื่อคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 91 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) มีค่าเท่ากับ 352 และ 383 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ส่วนที่สำคัญตามปริมาณการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนที่ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง ในส่วนที่ 1 ที่อัตราส่วนการที่ร้อยละ 5 มีประเด็นในการเปรียบเทียบ 3 ส่วนด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ในกรณีของผงหินปูนขนาด 2 ไมครอน (รูปที่ 3 (ก)) คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดตลอดช่วงอายุ 91 วัน สูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกตัวอย่างเช่น ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 405 กก./ซม.^{2} สูงกว่าร้อยละ 115 ในขณะที่อายุ 91 วันที่ค่าสูงกว่าร้อยละ 11 ส่วน คอนกรีตผสมผงหินปูนขนาด 8 ไมครอน (รูปที่ 3 (ข)) มีกำลังอัดประลัยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ร้อยละ 96 และ 100 ที่อายุดังกล่าว นอกจากนั้นคอนกรีตผสมผงหินปูนขนาด 15 ไมครอน (รูปที่ 3 (ค)) มีกำลังอัดประลัยคิดเป็นร้อยละ 94 และ 96 ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ข้อสันนิษฐานที่ได้จากผลดังกล่าวคือ โดยรูปแบบของพฤติกรรมผงหินปูนในปูนซีเมนต์จะไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีร่วมกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหรือต่อเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่จะกลไกทางด้านขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เข้าไปเติมแทรก (Filling Effect) ดังนั้น แนวโน้มที่สำคัญคือ ยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์จะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในเนื้อคอนกรีตได้ดีขึ้น ซึ่งหมายถึง เนื้อภายในคอนกรีตมีความอัดแน่นหรือหนาแน่นเพิ่มขึ้นและส่งผลต่อเนื่องกำลังอัดประลัยที่ เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาในส่วนของคอนกรีตที่ทำการแทนที่ด้วยผงหินปูนในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นพบว่า แนวโน้มของการเพิ่มขึ้นมีลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ผงหินปูนขนาด 2 ไมครอน มีผลทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) ส่วนผงหินปูนขนาด 8 และ 15 ไมครอน มีผลต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใกล้เคียงและต่ำกว่าคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามลำดับ

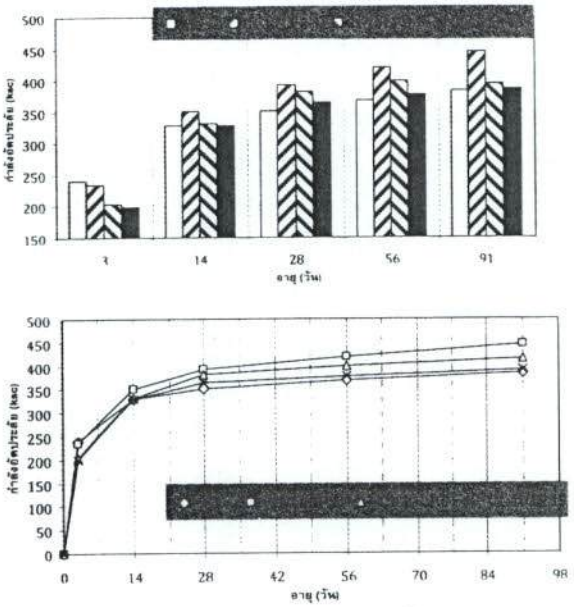
เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดประลัยที่อายุช่วงต้น (28 วันแรก) พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ของผงหินปูนเท่ากับร้อยละ 5 ให้ค่าอัตราการพัฒนากำลังอัดประลัยของคอนกรีตสูงที่สุดตามมาด้วยร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ ทั้งนี้ด้วยเหตุที่ว่า การแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีตผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ลดลง ผลที่ได้คือ กำลังอัดประลัยมีอัตราการพัฒนาที่ลดลงตามไปด้วย

ในส่วนของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ระยะยาว ผงหินปูนไม่ส่งผลกระทบมาก ดังจะเห็นตัวอย่างได้จากคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

และผงหินปูนโดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง (รูปที่ 3 (ค)) กำลังอัดประลัยที่อายุ 91 วัน ไม่มีความแตกต่างไปจากที่อายุ 56 วัน มากทั้งนี้ด้วยผลของผงหินปูนไม่ได้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องร่วมกับปูนซีเมนต์จึงเป็นเพียงการเติมแทรกช่องว่างทางกายภาพเท่านั้น

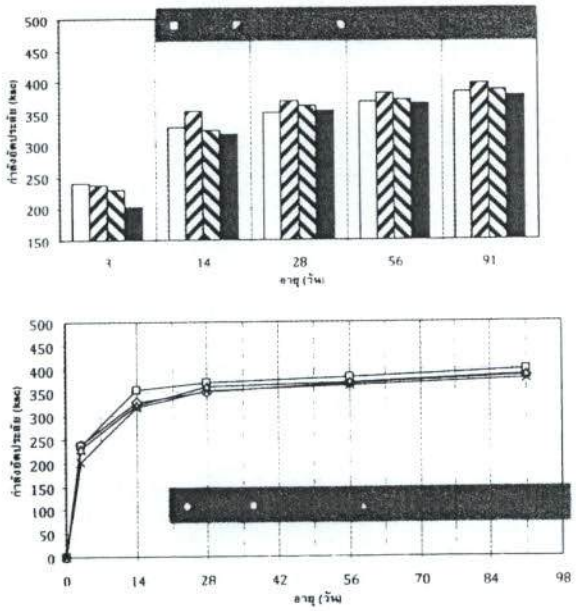


(ก) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง



(ข) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง

รูปที่ 2 (ต่อ) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1)



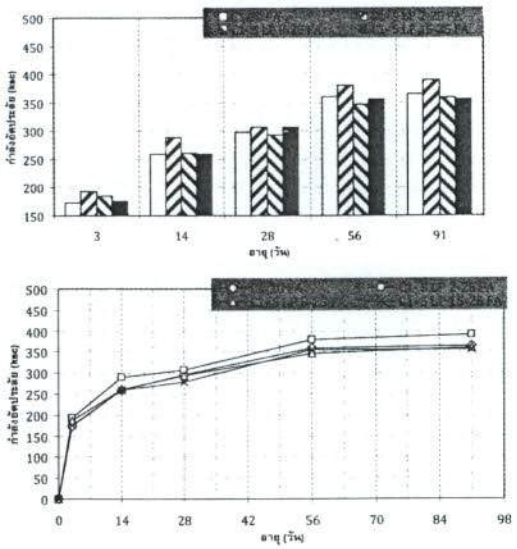
(ค) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง

รูปที่ 3 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยในกรณีนี้จะพิจารณาผลกระทบของปฏิกิริยาปอซโซลานร่วมกับการเติมแทรกด้วยซึ่งจะกำหนดขอบเขตของวัสดุแทนที่ทั้งสอง (ผงหินปูนและเถ้าลอย) เท่ากับร้อยละ 30 ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงหินปูนต่อเถ้าลอยเท่ากับ 5:25 (รูปที่ 3 (ก)), 10:20 (รูปที่ 3 (ข)) และ 20:10 (รูปที่ 3 (ค)) ตามลำดับ และทำการเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีผสมเถ้าลอย ร้อยละ 30 (C1-30FA)

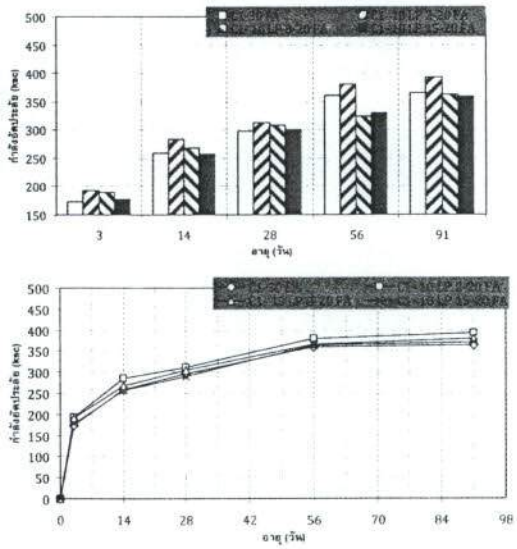
จากรูปที่ 3 (ก) คอนกรีตผสมผงหินปูนต่อเถ้าลอยที่อัตราส่วนเท่ากับ 5:25 โดยผงหินปูนมีขนาด 2 ไมครอน มีการพัฒนากำลังอัดประลัยที่สูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยล้วนร้อยละ 30 ยกตัวอย่างที่อายุ 3 และ 14 วัน แรก คอนกรีตผสมผงหินปูนมีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 186 และ 201 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นร้อยละ 111 และ 112 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างเดียว สาเหตุสำคัญของการพัฒนาดังกล่าวมาจากผลของความละเอียดของผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ทำให้กลไกการเติมแทรกเป็นไปได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ผลของความละเอียดของผงหินปูนมีน้อยลงซึ่งจะดูได้จากในช่วงหลังจากคอนกรีตมีอายุ 14 วัน ถึง 28 วัน อัตราการพัฒนากำลังอัดประลัยมีค่าลดลงมาก (เส้นกราฟลดความชันลงอย่างเห็นได้ชัด) แต่ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย เถ้าลอยจะที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องหลังจากอายุคอนกรีตที่ 14 วัน ภายใต้สภาวะความชื้นภายในเพียงพอจึงส่งผลให้ในช่วง 14 วัน ถึง 56 วัน [7] คอนกรีตมีอัตราการพัฒนากำลังที่สูงเนื่องจากคอนกรีตมีปริมาณแคลเซียม-ซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่อผ่านช่วง 56 วัน ไปจนที่อายุ 91 วัน

ในรูปที่ 3 (ก) เช่นเดียวกัน เมื่อขนาดของผงหินปูนเพิ่มขึ้นเป็น 8 และ 15 ไมครอน การพัฒนากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีแนวโน้มค่อนข้างออกไปทางใกล้เคียงหรือต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เล็กน้อย ทั้งนี้ด้วยผลของเติมแทรกที่ลดลงเนื่องจากขนาดของผงหินปูนที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ระยะยาวเถ้าลอยกลับมีส่วนช่วยในการพัฒนากำลังอัดประลัยได้เป็นอย่างดี

ในส่วนของคอนกรีตผสมผงหินปูนต่อเถ้าลอยที่อัตราส่วนเท่ากับ 10:20 (รูปที่ 3 (ข)) และ 20:10 (รูปที่ 3 (ค)) มีแนวโน้มของการพัฒนากำลังประลัยที่มีลักษณะเดียวกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงหินปูนต่อเถ้าลอยเท่ากับ 5:25 แต่จะเห็นได้ว่าในช่วงคอนกรีตที่อายุ 14 วัน ถึง 28 วัน อัตราการพัฒนากำลังอัดประลัยกลับมีค่าที่สูงกว่า เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะมีการเสริมกันของกลไกการเติมแทรกของผงหินปูนร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยขึ้น ส่วนในช่วงอายุ 28 วัน ถึง 91 วัน คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนสามารถพัฒนากำลังอัดประลัยได้ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 350 ถึง 400 กก./ซม.^{2}

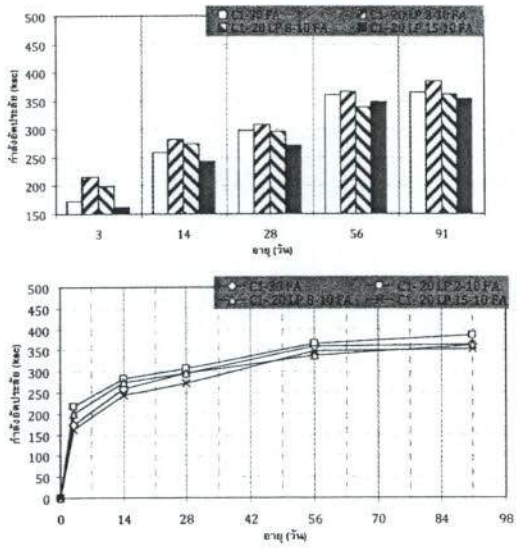


(ก) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุผง



(ข) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง

รูปที่ 3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1-30FA)



(ค) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง

รูปที่ 3 (ต่อ) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1-30FA)

3.2.2 กำลังดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength)

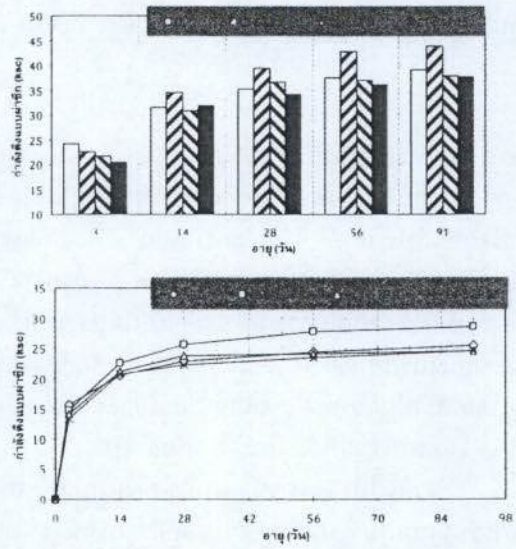
กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) และคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนและเถ้าลอย เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1-30FA) แสดงในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4 การพัฒนากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน มีแนวโน้มเดียวกับการพัฒนากำลังอัดประลัย แต่จะเห็นได้ว่าคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนที่มีขนาด 2 ไมครอน มีการพัฒนากำลังดึงแบบผ่าซีกสูงกว่าผงหินปูนขนาดอื่น ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 4 (ก) คอนกรีต

ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2 ไมครอน ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีค่าสูงร้อยละ 112 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

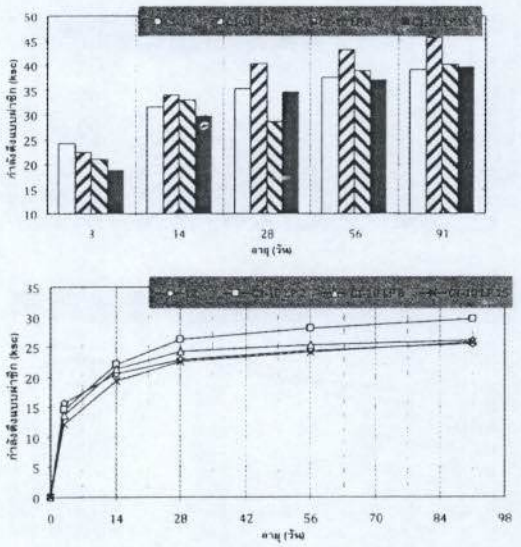
ดังแสดงในรูปที่ 5 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1-30FA) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกำลังอัดประลัย กล่าวคือ คอนกรีตผสมผงหินปูนที่มีขนาด 2 ไมครอน มีกำลังดึงสูงกว่า 8 และ 15 ไมครอน ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น

จากรูปเดียวกัน มีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยและผงหินปูนมีกำลังดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3 วัน มากกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยล้วน ซึ่งเป็นผลมากจากการการเติมแทรกร่วมกันของอนุภาคเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

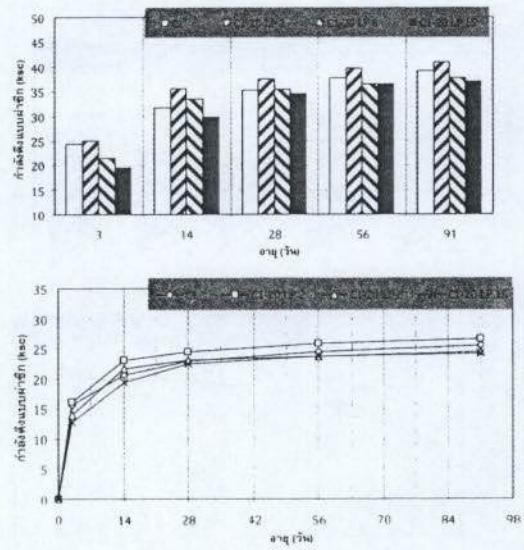


(ก) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง

รูปที่ 4 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1)

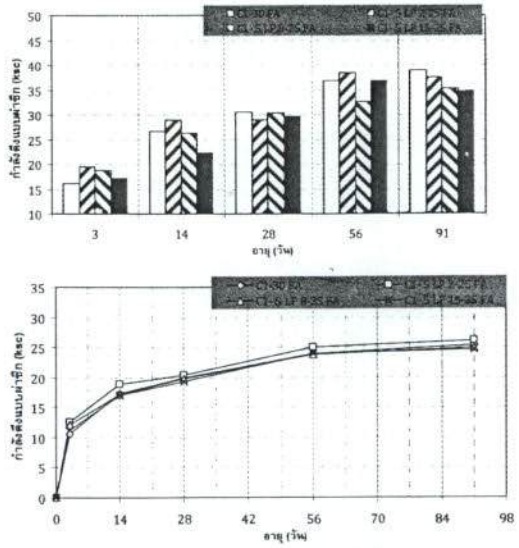


(ข) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง

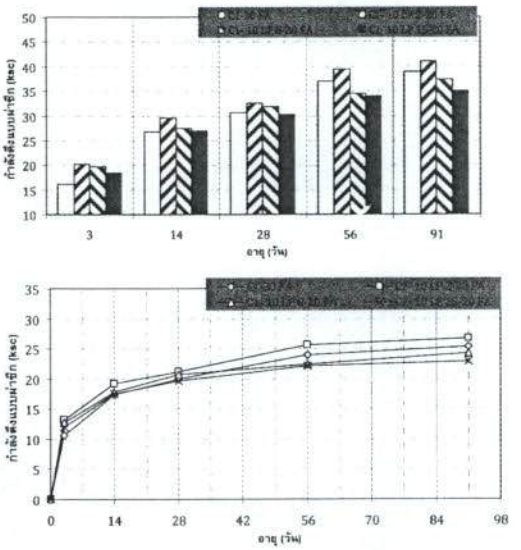


(ค) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง

รูปที่ 4 (ต่อ) กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1)

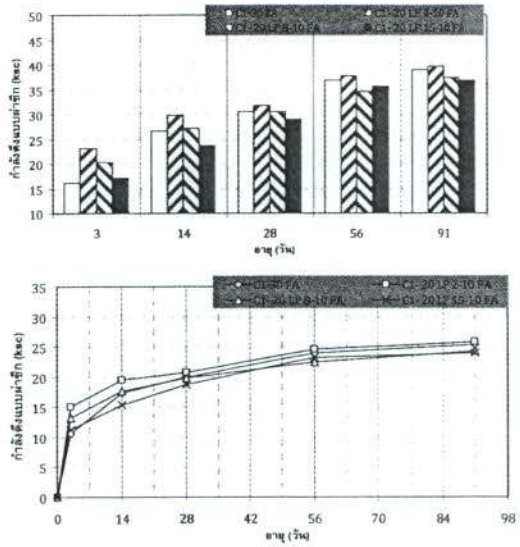


(ก) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุผง



(ข) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง

รูปที่ 5 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1-30FA)



(ค) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมครอน ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง

รูปที่ 5 **(ต่อ)** กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1-30FA)

3.2.3 โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นดัชนีสมบัติทางกลในการบ่งชี้ความสามารถในด้านทานการเสียรูปภายใต้น้ำหนักกระทำ [6] โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1-30FA) แสดงตามรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนอยู่ในช่วง 2.91 x 10^5 ถึง 3.59 x 10^5 กก./ซม.^{2} ในขณะที่คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยและผงหินปูนมีค่าอยู่ในช่วง 2.55 x 10^5 ถึง 3.30 x 10^5 กก./ซม.^{2} ในที่นี้คอนกรีตผสมผงหินปูนที่มีขนาด 2 ไมครอน แทนที่ใน

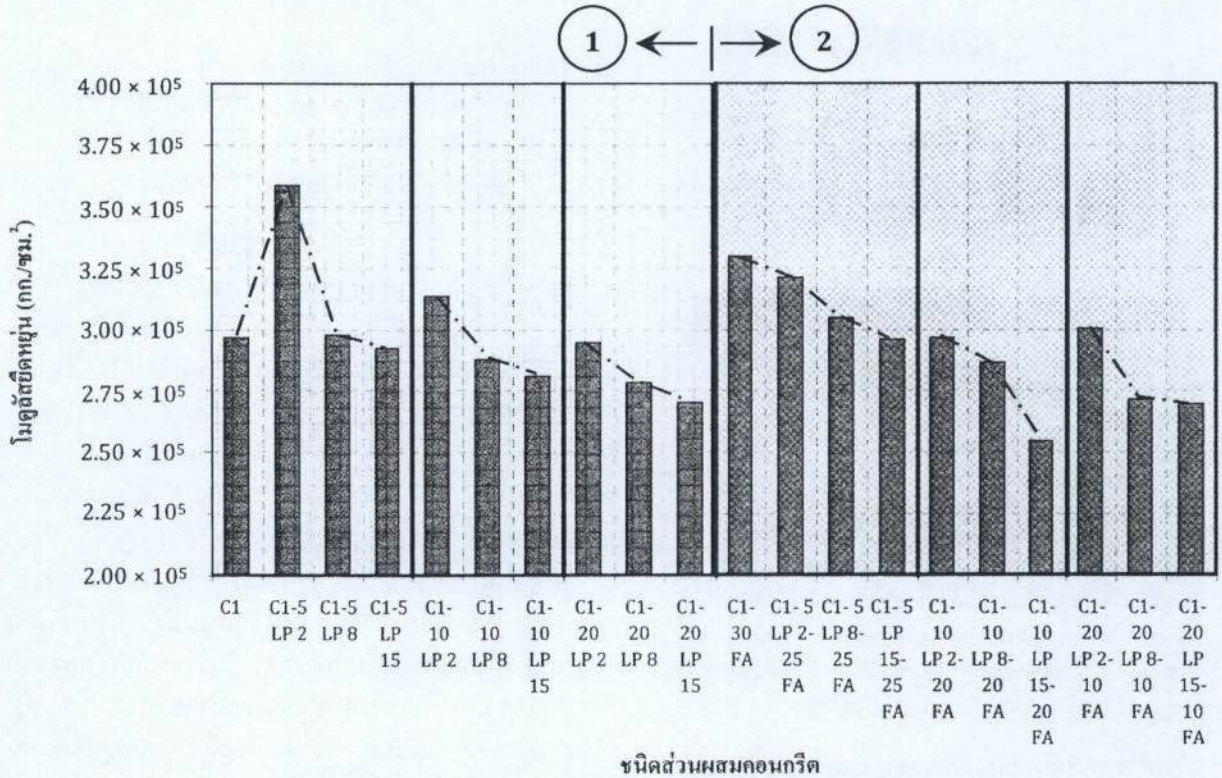
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.59 x 10^5 กก./ซม.^{2} ในขณะที่คอนกรีตผสมผงหินปูนที่มีขนาด 15 ไมครอน แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 10 และมีเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์อร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะเห็นแนวโน้มของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีลักษณะเดียวกับค่ากำลังอัดประลัยและกำลังดึงแบบผ่าซีก

โดยการแบ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตออกเป็นสองส่วนเช่นเดียวกับค่ากำลังอัดประลัย ส่วนที่ 1 คอนกรีตผสมผงหินปูนพบว่าผงหินปูนที่มีขนาด 2 ไมครอน มีค่าสูงสุด โดยเฉพาะที่อัตราส่วนการแทนที่เท่ากับร้อยละ 5 ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างที่มีความอัดแน่นมากที่สุด ในขณะที่การผงหินปูนที่มีขนาด 8 และ 15 ไมครอน กลับมีค่าลดต่ำลง และส่วนที่ 2 คือ คอนกรีตผสมผงหินปูนและเถ้าลอย มีแนวโน้มลักษณะเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบทั้งสองกลุ่มแล้ว คอนกรีตผสมผงหินปูนและเถ้าลอยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสูงกว่ากลุ่มคอนกรีตผสมผงหินปูน ด้วยเหตุผลจากปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C–S–H) เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย

4. สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อกำลังอัดประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. ความละเอียดของผงหินปูนมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของทั้งของคอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยผงหินปูนที่มีความละเอียดสูงกว่ามีผลทำให้คุณสมบัติทางกลสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดต่ำกว่า



รูปที่ 6 โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วันของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอย เปรียบเทียบกับเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1–30FA)

2. ความละเอียดของผงหินปูนที่มีขนาด 2 ไมครอน ให้ค่ากำลังอัดประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีกและโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุด

เอกสารอ้างอิง

[1] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2552. **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**, พิมพ์ครั้งที่ 2, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[2] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543. **ความคงทนของคอนกรีต**, พิมพ์ครั้งที่ 1.

[3] ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, 2550.การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน, **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3**, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี.

[4] N. Voglisa, G. Kakalia, E. Chaniotakisb, S. Tsivilisa, 2005. Portland--limestone cement. Their properties and hydration compared to those of other composite cements, **Cement & Concrete Composites**, Vol. 27, pp. 191-196.

[5] จตุพร ชูตาภา และ วรพจน์ แสงราม, 2552. **แคลเซี่ยมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate: $CaCO_3$)**, วิหารแดง, ปีที่ 1, ฉบับที่ 6 มิถุนายน.

[6] Neville, A.M., 1981. **Properties of Concrete**. Pittmen Book Limited, London.

[7] D. P. Bentz, Taijiro Sato, Igor de la Varga, W. Jason Weiss, 2012. Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures, **Cement & Concrete Composites**, Vol. 34, pp.11-17.

[8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1.**

[9] American Society for Testing and Materials. 2012. ASTM C39 / C39M - 12a Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, **Annual book of ASTM standards vol.04.02**, Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.

[10] American Society for Testing and Materials, 2011. ASTM C496 / C496M - 11 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, **Annual book of ASTM standards vol.04.02**, Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.

[11] American Society for Testing and Materials, 2010. ASTM C469 / C469M - 10 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, **Annual book of ASTM standards vol.04.02**, Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.