

อิทธิพลของเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

Influence of PFA and Limestone Powder on Mechanical Properties of Concrete

บุรฉัตร ฉัตรวิระ^[1] และ ณรงค์ศักดิ์ มากุล^[2]

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

โทรศัพท์: (+66) 2564-3001-9 ต่อ 3105 โทรสาร: (+66) 2564-3010

E-mail: ^[1]cburacha@engr.tu.ac.th และ ^[2]shinomomo7@hotmail.com

บทคัดย่อ:

บทความนี้เป็นการนำเสนออิทธิพลร่วมของเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง และผงฝุ่นหินปูนที่ได้จากกระบวนการย่อยหินปูนชนิดโคโลไมท์ โดยศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูน ตลอดจนคุณสมบัติของคอนกรีตได้แก่ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดและค่าความต้องการสารลดน้ำเมื่อควบคุมค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตในช่วงเท่ากับ 6.0 ± 2.0 ซม. กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ตัวแปรที่ใช้คือ อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 18 และ 36 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.24, 0.27 และ 0.30 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างค่าสุดท้ายของมวลรวมในสถานะอัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.1, 1.2 และ 1.3 ตามลำดับ รวมทั้งเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนกับคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม จากผลการทดสอบ พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนมีค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดและความต้องการสารลดน้ำอย่างแรง (Superplasticizer) ในช่วงค่าการยุบตัวที่กำหนดน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ในส่วนกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยโดยน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 18 มีค่ากำลังอัดที่อายุตั้งแต่ 3 วันขึ้นไปสูงกว่าคอนกรีตปกติ ในขณะที่อายุ 28 วันขึ้นไป คอนกรีตซึ่งมีส่วนของเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนเท่ากับร้อยละ 36 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติ อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม นอกจากนั้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนในปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น

Abstract:

This paper presents the cooperative influence of Pulverized Fuel Ash (PFA) and Limestone Powder (LSP) on mechanical properties of concrete. The PFA from electrical generating process using lignite coal as fuel, and the LSP, Dolomite-typed, from limestone rock crushing process, were used in this study. The basic properties of PFA and LSP, and properties of concrete i.e., unit weight, superplasticizer requirement for the controlled initial slump of concrete in the range of 6.0 ± 2.0 cm, compressive strength, and modulus of elasticity at the age of 28 days were studied. The parametric variables were the replacement percentages of PFA and LSP by weight in ordinary Portland cement type I (18% and 36%), water to binder materials ratios (w/b) (0.24, 0.27, and 0.30), and the ratios of paste volume to the minimum volume of void content in compacted aggregates (γ) of 1.1, 1.2, and 1.3 respectively. In addition, the compressive strength of PFA-and/or LSP-concrete were compared to the condensed silica fume concrete. The test results found that the unit weight of fresh concrete, water and superplasticizer requirement in the controlled range of initial slump of PFA-LSP concrete was lower than those of the conventional concrete. The compressive strength of PFA-LSP-concrete, with the replacement percentage of both PFA and LSP in Portland cement of 18%, were higher than that of the normal concrete at the age of 3 days and later. Whereas, at the age of 28 days and beyond and the percentage of PFA and LSP as Portland cement replacement of 36%, the long-term compressive strength of concrete were higher than those of the conventional concrete. However, the compressive strength of concrete containing PFA and LSP were lower than those of the condensed silica fume concrete. Furthermore, the moduli of elasticity of concrete at the age of 28 were decreased when increasing the replacement percentage of PFA and LSP in Portland cement type I.

1. บทนำ

สืบเนื่องการนำจากผลพลอยได้หรือของเสีย (By-product/Waste) จากหลากหลายอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมมาพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์เป็นประเด็นสำคัญของวงการวัสดุก่อสร้างของประเทศไทย ถึงแม้ในหลายๆ มุมมองจะถูกมองว่าเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่ม (Value Added) ที่มีมูลค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ แต่ด้วยปริมาณการใช้คอนกรีตในแต่ละปีที่สูง การลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์และราคาของคอนกรีต และคุณสมบัติของคอนกรีตที่ดีขึ้นทำให้ทางเลือกนี้มีอัตราการเจริญเติบโตในวงการก่อสร้างได้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในประเทศไทยซึ่งนักวิจัยได้ดำเนินการศึกษาเพื่อนำเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตคุณภาพสูง (High Performance Concrete) [1] แต่เป็นการศึกษาที่แยกกันของแต่ละวัสดุ ดังนั้นจึงได้เกิดแนวคิดที่จะนำเถ้าลอยและฝุ่นหินปูน (Limestone Powder) มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ จากการศึกษาทั้งในและต่างประเทศ พบว่าเถ้าลอยมีคุณสมบัติที่ทำให้คอนกรีตในสถานะสดและแข็งตัวแล้วมีคุณสมบัติดีขึ้น [2 - 4] แต่ในขณะเดียวกัน ข้อด้อยของเถ้าลอยคือ สภาพภาพการทำปฏิกิริยาที่ต่ำในช่วงแรก [5 - 7] ในขณะที่ผงฝุ่นหินปูนก็มีคุณสมบัติที่ลดการแยกตัวและการหดตัวของคอนกรีต [8] และมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูนมีกำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมสารปอชโซลานประเภทอื่น [9] แต่สิ่งที่ต้องพัฒนาต่อไปเพื่อสร้างมีตินอกเหนือจากมีติของปูนซีเมนต์กับสารปอชโซลานประเภทเดียวนั้นคือการนำข้อดีของแต่ละวัสดุมาประยุกต์ผสมกัน ภายใต้สภาวะของการใช้งานที่เหมาะสม จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่พยายามรวมข้อดีของทั้งเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนมาใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตคอนกรีต และศึกษาผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนที่นำมาใช้ผสมคอนกรีต
- 2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยร่วมกับผงฝุ่นหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต และทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติกับคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม

3. วิธีการศึกษา

3.1 ขอบเขตของการศึกษา

3.1.1 อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยและ/หรือกับฝุ่นหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 18 และ 36 ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมมีอัตราส่วนการแทนที่ของซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

3.1.2 อัตราส่วน น้ำต่อ วัสดุผง (Water to Binder Ratio, w/b) (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และฝุ่นหินปูน) เท่ากับ 0.24, 0.27 และ 0.30 ตามลำดับ

3.1.3 อัตราส่วนโดยปริมาตรของเฟสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดของมวลรวมที่สภาวะอัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.1, 1.2 และ 1.3 ตามลำดับ

3.2 รายละเอียดการทดสอบ

3.2.1 วัสดุที่ใช้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
2. เถ้าลอย ใช้เถ้าลอยอำเภอแม่เมาะที่ได้จากจังหวัดลำปาง
3. ฝุ่นหินปูน เป็นฝุ่นหินปูนประเภทโดโลไมท์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากขบวนโมหินปูน จากโรงโมหินปูนจังหวัดกาญจนบุรี
4. ทราย ใช้ทรายแม่น้ำที่มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.91
5. หิน ใช้เป็นหินปูน มีขนาดโตสุด 12.7 มม. และขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33
6. น้ำ ใช้น้ำประปา
7. สารเคมีผสมเพิ่ม ใช้ไนยาผสมเพิ่มชนิดซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (Superplasticizer) ประเภทซัลโฟเนต แพนธาซีนฟอรัมอร์ดีไฮด์ (Sulfonated Naphthalene Formaldehyde)
8. ซิลิกาฟูม (Condensed Silica Fume)

3.2.2 วิธีการทดสอบ

1. การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด ตามมาตรฐาน ASTM C 138
2. การทดสอบหาค่าความยวบตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 143
3. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 39 โดยทดสอบที่อายุ 3, 7, 28, 56, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ และใช้ตัวอย่างเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ความสูง 20 ซม.
4. การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 469

3.2.3 สัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

สัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ท้ายบทความในตารางที่ ก.1

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ต-

แลนด์ประเภทที่ 1 ผุ่นหินปูน และเถ้าลอย

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผุ่นหินปูนและเถ้าลอยแสดงในตารางที่ 1 พบว่าปูนซีเมนต์ ผุ่นหินปูน และเถ้าลอยมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 66.59, 34.33 และ 11.20 ตามลำดับ และในปูนซีเมนต์มีซิลิกอน ไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 21.21 ในขณะที่ผุ่นหินปูนและเถ้าลอยมีซิลิกอน ไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 0.26 และ 41.94 ตามลำดับ ซึ่งการที่เถ้าลอยมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ดังนั้นเมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยจึงมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้แคลเซียมซิลิเกต/อะลูมิเนตไฮเดรต (C-S/A-H) เพิ่มขึ้น

คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ ผุ่นหินปูน และเถ้าลอยแสดงในตารางที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และซิลิกาฟูมมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 0.19, 0.11 และ 3.0 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผุ่นหินปูน และเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 3.15, 2.84 และ 2.10 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าความชื้นเหลวปกติซึ่งบ่งชี้ถึงความต้องการน้ำที่ทำให้ส่วนผสมอยู่ในสภาวะพลาสติก พบว่าความความชื้นเหลวปกติของเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าผุ่นหินปูน และปูนซีเมนต์ ตามลำดับ โดยปูนซีเมนต์ ผุ่นหินปูน และเถ้าลอยมีความชื้นเหลวปกติร้อยละ 25.5, 24.5 และ 24.0 ตามลำดับ เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของความละเอียดด้วยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์มีค่าสูงกว่าผุ่นหินปูนจึงทำให้ความต้องการน้ำมากกว่าผุ่นหินปูน และเถ้าลอย ตามลำดับ ในขณะที่รูปร่างของเถ้าลอยที่กลมและผิวเรียบทำให้ความต้องการน้ำของผุ่นหินปูนมีค่ามากกว่าเถ้าลอย

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซิลิกาฟูม

(Condensed Silica Fume) ผุ่นหินปูน และเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1	ผุ่น หินปูน	เถ้าลอย
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	21.21	0.26	41.94
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	5.02	0.07	23.20
ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.16	0.09	15.46
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	66.59	34.33	11.20
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.36	23.08	2.76
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.30	0.00	2.74
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.78	0.03	1.04

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซิลิกาฟูม

(Condensed Silica Fume) ผุ่นหินปูน และเถ้าลอย

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูน ซีเมนต์	ซิลิกาฟูม ¹⁾	ผุ่นหินปูน	เถ้าลอย
1. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.19	3.0	1.25	0.11
2. พื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของ ความละเอียดด้วยวิธีเบลน (ตร.ซม./กรัม)	3,449	250,000	1,775	2,217
3. ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.20	2.84	2.10
4. ดัชนีกำลังอัด ที่อายุ 28 วัน (ร้อยละ)	100	100	80	75
5. การสูญเสียน้ำหนักเนื่อง จากการเผาไหม้ (ร้อยละ)	1.13	6.0	43.98	0.91
6. ระยะเวลาการก่อตัว				
6.1 การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	86	-	93	97
6.2 การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	190	-	190	200
7. ค่าความคงตัว (ร้อยละ)	0.00	-	0.03	-0.01

หมายเหตุ ¹⁾ Elkem ASA Materials; Co.,Ltd.

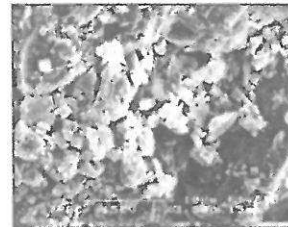
จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของผุ่นหินปูน และเถ้าลอยกับมาตรฐาน ASTM C 618 ในตารางที่ 3 ซึ่งนิยมใช้จำแนกประเภทของวัสดุปอซโซลานที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ โดยผุ่นหินปูนที่ได้มาจากการขบวนการไม่หินในงานคอนกรีตเป็นวัสดุจากธรรมชาติ และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในขณะที่เถ้าลอยที่ได้มาจากการเผาด่านหินลิกไนต์และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) เมื่อพิจารณาตามคุณสมบัติตามมาตรฐานในหมวด C เมื่อเปรียบเทียบกับผุ่นหินปูนที่ใช้ในการทดสอบกับคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C 618 หมวด N ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าผุ่นหินปูนมีคุณสมบัติที่ไม่ได้ตามมาตรฐานหลายประการคือ ผลรวมร้อยละต่ำสุดของซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และไอรอนออกไซด์ต่ำกว่ามาตรฐาน นอกจากนั้นร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้สูงกว่ามาตรฐานข้อกำหนด ในขณะที่เถ้าลอยสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ตามมาตรฐาน ASTM C 618 หมวด C อีกทั้งเถ้าลอยมีดัชนีกำลังที่อายุ 28 วัน สูงถึงร้อยละ 75 เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 3 การจำแนกประเภทของสารปอซโซลานตามคุณสมบัติของ
ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยกับมาตรฐาน ASTM C 618 [10]

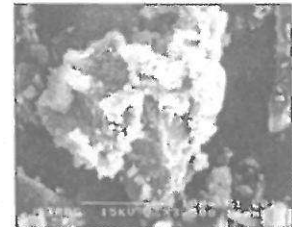
คุณสมบัติ	หมวด ปอซโซลาน			ฝุ่นหินปูน โคโคไมท์	เถ้าลอย เอไมะ
	N	F	C		
	องค์ประกอบทางเคมี				
1. ร้อยละต่ำสุดของ ซิลิกอนไดออกไซด์ + อะลูมิเนียม ออกไซด์ + ไอรอนออกไซด์	70.00	70.00	50.00	0.42	80.60
2. ร้อยละสูงสุดของซิลเฟอร์- ไดรอกไซด์	4.00	5.00	5.00	0.03	1.04
3. ร้อยละสูงสุดของสารอัลคาไลน์	1.50	1.50	1.50	0.10	0.60
คุณสมบัติทางกายภาพ					
1. ร้อยละค้ำสูงสุดบนตะแกรง ขนาด 45 ไมโครเมตร	34.00	34.00	34.00	43.5	27.4
2. คำนวณค่าต่ำสุด (เทียบกับตัวอย่างปูนซีเมนต์) ที่อายุ 7 วัน (ร้อยละ)	75	75	75	76	65
ที่อายุ 28 วัน (ร้อยละ)	75	75	75	80	75
3. ความต้องการน้ำสูงสุด (ร้อยละ)	115	105	105	90	97
4. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก การเผาไหม้สูงสุด (ร้อยละ)	10.00	6.00	6.00	43.98	0.91
5. ปริมาณความชื้นสูงสุด (ร้อยละ)	3.00	3.00	3.00	1.25	0.11

สำหรับลักษณะพื้นผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ฝุ่นหินปูน เถ้าลอย และซิลิกาฟุ้งซึ่งถ่ายด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า แสดงในรูปที่ 1 พบว่า อนุภาคฝุ่นหินปูนส่วนที่มีขนาดใหญ่มีผิวค่อนข้างเรียบ เป็นเหลี่ยมมุม และมีอนุภาคขนาดเล็กเกาะอยู่ที่ผิว ในขณะที่ปูนซีเมนต์มีอนุภาคขนาดเล็ก ผิวขรุขระเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่าทำให้ปูนซีเมนต์สามารถเก็บกักน้ำไว้ในอนุภาคมากกว่าฝุ่นหินปูน ส่วนเถ้าลอยมีพื้นผิวเรียบเป็นกลมมนทำให้เถ้าลอยมีความสามารถเก็บกักไว้ในอนุภาคได้น้อยกว่าฝุ่นหินปูน (ปริมาณน้ำที่กักเก็บในอนุภาคประกอบด้วยสองส่วนคือ ปริมาณน้ำดูดซึม (Absorbed Water) เป็นน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และความละเอียดของอนุภาค และปริมาณน้ำดูดซับ (Adsorbed Water) เป็นน้ำที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวอนุภาคขึ้นอยู่กับประจุที่ผิวอนุภาคและลักษณะทางกายภาพที่ผิวของอนุภาค [11]) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฝุ่นหินปูนกับเถ้าลอย พบว่าฝุ่นหินปูนมีปริมาณอนุภาคที่มีขนาดในช่วง 4.2 - 56.2 ไมโครเมตร (ร้อยละ 58.0) มากกว่าเถ้าลอย (ร้อยละ 48.09) ประกอบกับการที่ฝุ่นหินปูนมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าเถ้าลอยทำให้

จำนวนช่องว่างภายในอนุภาคลดลง จึงส่งผลให้ความสามารถในการเก็บกักน้ำได้ลดลง ซึ่งหมายถึงความต้องการน้ำของฝุ่นหินปูนที่มีแนวโน้มลดลง



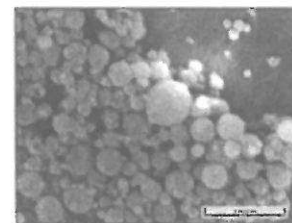
(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) ฝุ่นหินปูน



(ค) เถ้าลอย

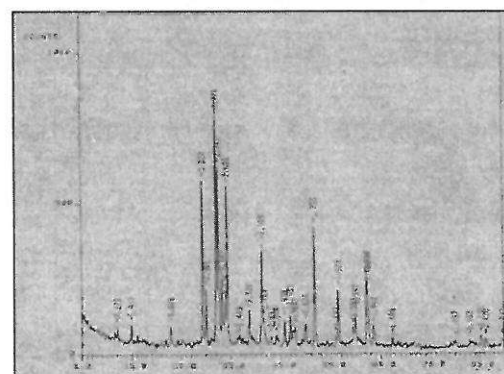


(ง) ซิลิกาฟุ้ง

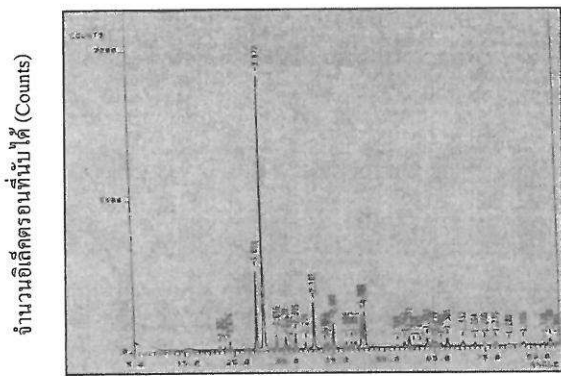
รูปที่ 1 ภาพขยายทางกายภาพของปูนซีเมนต์ ฝุ่นหินปูน เถ้าลอย และซิลิกาฟุ้ง

ผลการวิเคราะห์ระดับพลังงานของวัสดุแสดงในรูปที่ 2 พบว่าทั้งปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและฝุ่นหินปูนมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยผลึก (ระบุโดยใช้ค่าสูงสุด (Peak) ซึ่งแสดงจำนวนของอิเล็กตรอน (Counts)) และที่ไม่เป็นผลึกของธาตุ/สารประกอบที่เป็นองค์ประกอบ แต่ไม่สามารถระบุเป็นปริมาณ (Quantitative) ของระดับพลังงานได้ เพียงแต่ระบุว่าเมื่อมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ในวัสดุทั้งสาม ในขณะที่ซิลิกาฟุ้งมีการยกของโค้งเป็นรูประฆังคว่ำ (Bell Shape) ในช่วงมุม 15 ถึง 45 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ดี [12]

จำนวนอิเล็กตรอนที่นับได้ (Counts)

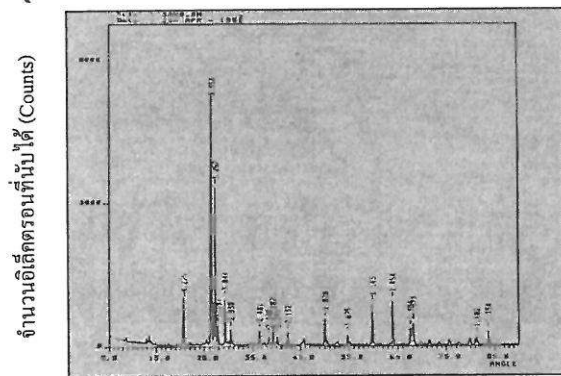


(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



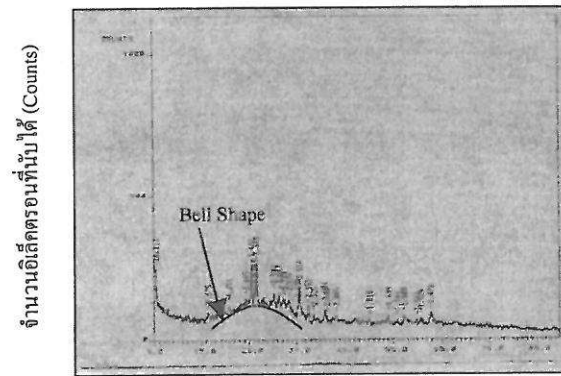
(ข) ฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์

มุม 2θ



(ค) เถ้าลอย

มุม 2θ



(ง) ซิลิกาฟูม

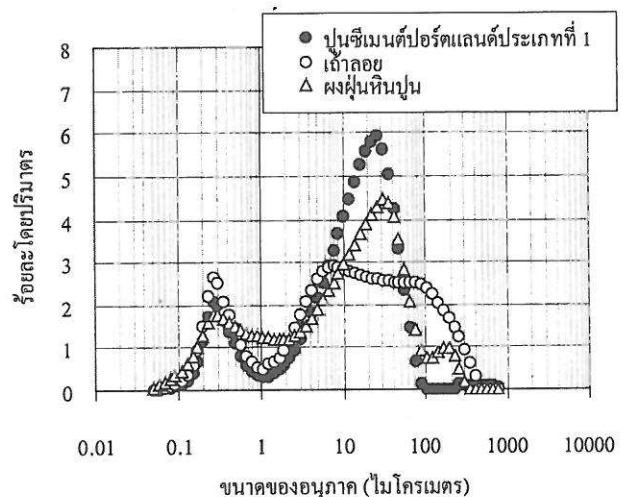
มุม 2θ

รูปที่ 2 ผลการทดสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffraction ของ (ก) ปูนซีเมนต์ (ข) ฝุ่นหินปูน (ค) เถ้าลอย (ง) ซิลิกาฟูม

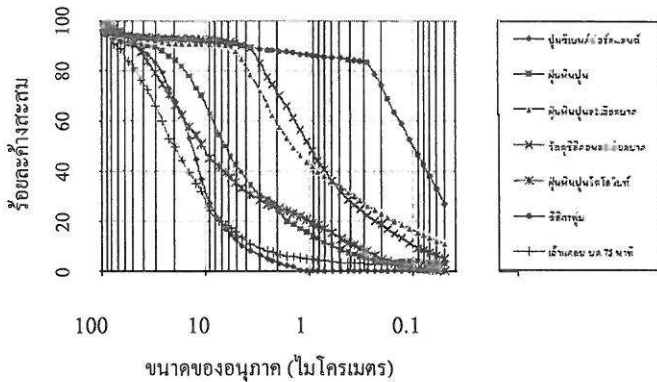
ผลการทดสอบการกระจายของขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอย ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งปูนซีเมนต์ ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 39.1, 29.1 และ 46.4 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในขณะที่การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงขนาด คือ ช่วงขนาดอนุภาคระหว่าง

0.1 - 1.1 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 15.0, 20.6 และ 19.8 โดยน้ำหนักของอนุภาคทั้งหมด ตามลำดับ และขนาดอนุภาคระหว่าง 4.2 - 56.2 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 72.8, 58.0 และ 48.1 ของอนุภาคทั้งหมดตามลำดับ นอกจากนั้นการกระจายขนาดของอนุภาคระหว่างร้อยละ 4.2 - 56.2 ไมโครเมตร ซึ่งมีร้อยละที่สูงกว่าขนาดอนุภาคระหว่าง 0.1 - 1.1 ไมโครเมตรของปูนซีเมนต์ เมื่อพิจารณาฝุ่นหินปูนที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.1 - 1.1 ไมโครเมตร พบว่าฝุ่นหินปูนมีปริมาณอนุภาคในส่วนร้อยละที่สูงกว่าเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบการกระจายขนาดของอนุภาคของฝุ่นหินปูนและวัสดุผสมชนิดอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุที่มีองค์ประกอบขนาดเล็กสำหรับ NATO ASI (North Atlantic Treaty Organization Advanced Science Institutes) เรียกผงละเอียดมากนี้ว่า “อนุภาคนาโน” (Nanoparticles) หรือ “ผงละเอียดมาก” (Ultra-Fine Powders) [12] ในส่วนของแร่ธาตุผสมเพิ่มเติมคำว่า Ultra-Fine Filler หมายถึง แร่ธาตุผสมเพิ่มที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ และขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าแร่ธาตุผสมเพิ่มปกติ (Ultra-Fine Filler มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1 ไมโครเมตร ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ประมาณ 10 - 40 ไมโครเมตร) อาทิเช่น ฝุ่นหินปูน และวัสดุผงละเอียดมาก ซึ่งได้มาจากการบดวัตถุดิบ (Raw Material) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกอน (Siliceous Ultra-Fine Filler from Grinding) [13]

จากผลการทดสอบ พบว่าฝุ่นหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยที่จัดเป็นวัสดุผงละเอียด ในที่นี้จึงให้คำจำกัดความของฝุ่นหินปูน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 29.1 ไมโครเมตร ที่ใช้ในการศึกษาว่า “ฝุ่นหินปูนละเอียด” (Lime Stone-Fine Filler, Fine Filler LS) โดยที่ฝุ่นหินปูนที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าปูนซีเมนต์นี้มีผลต่อการเติมแทรก (Filler Effect) ระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ได้ [14]



รูปที่ 3 การกระจายขนาดของอนุภาคของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย



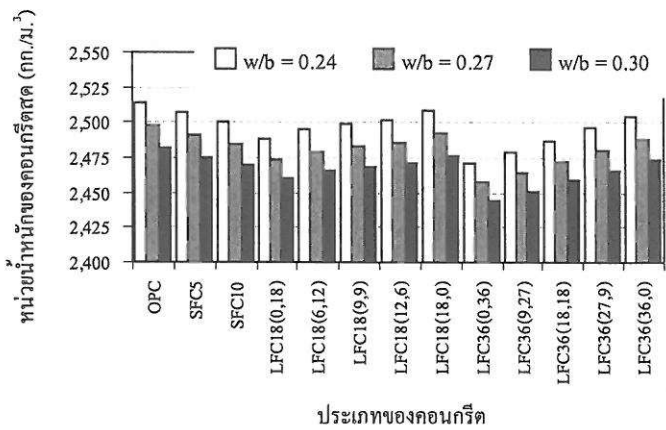
รูปที่ 4 การกระจายขนาดของฝุ่นหินปูนเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่นๆ

4.2 คุณสมบัติของคอนกรีตปกติ คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมและคอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูน

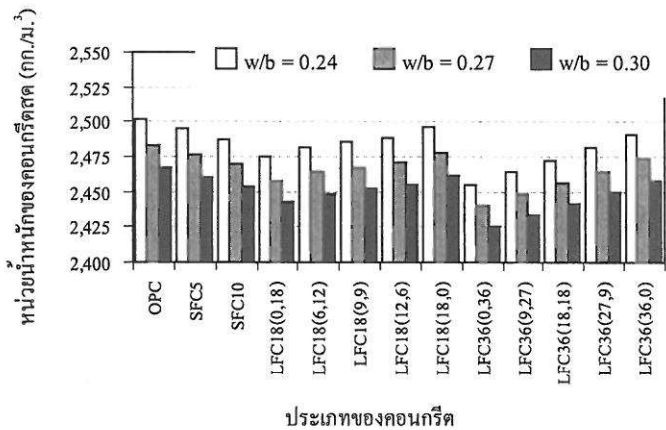
4.2.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด

ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดแสดงในรูปที่ 5 พบว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีคอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูน คอนกรีตปกติ และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.30 มีค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดต่ำที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นผลจากเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณมวลรวมลดลง ซึ่งโดยทั่วไปเถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมทำให้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนปริมาตรเถ้าลอยต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมมากทำให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนปริมาตรเถ้าลอยต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมต่ำ เนื่องจากน้ำมีความถ่วงจำเพาะต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอย เมื่อมีปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้นคอนกรีตจึงมีหน่วยน้ำหนักลดลงตามลำดับ

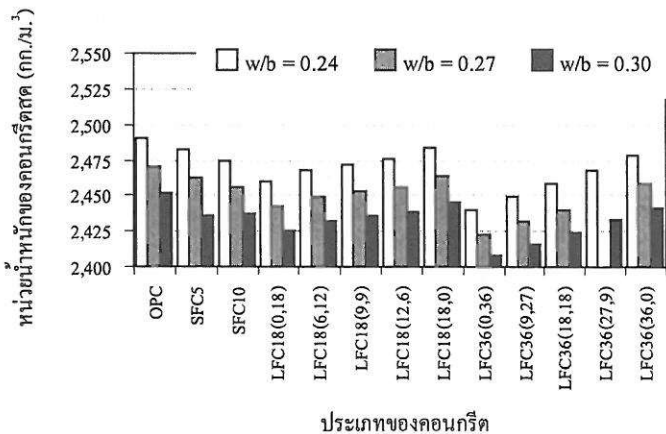
เมื่อพิจารณาผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยร้อยละ 18 และ 36 พบว่าทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตปกติ โดยที่คอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยร้อยละ 18 ซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่า (อยู่ระหว่างร้อยละ 97.3 - 99.4 ของคอนกรีตปกติ) ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยร้อยละ 36 (อยู่ระหว่างร้อยละ 92.1 - 98.5 ของคอนกรีตปกติ) ทั้งนี้เนื่องจากฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้เมื่อมีการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้นทำให้คอนกรีตสดมีหน่วยน้ำหนักลดลง



(ก) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (γ เท่ากับ 1.1)



(ข) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (γ เท่ากับ 1.2)



(ค) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (γ เท่ากับ 1.3)

รูปที่ 5 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด

หมายเหตุ

OPC คือ คอนกรีตปกติซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
SFCA คือ คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม โดยทำการแทนที่ซิลิกาฟูมในปูน
ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ A โดยน้ำหนัก
LFCX(Y,Z) คือ คอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นหินปูนและ/หรือเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ X
โดยน้ำหนัก โดยในการแทนที่ดังกล่าวจะมีสัดส่วนของฝุ่นหินปูนเท่ากับ Y และ เถ้าลอยเท่ากับ Z หรือ X-Y โดยน้ำหนักเช่นเดียวกัน

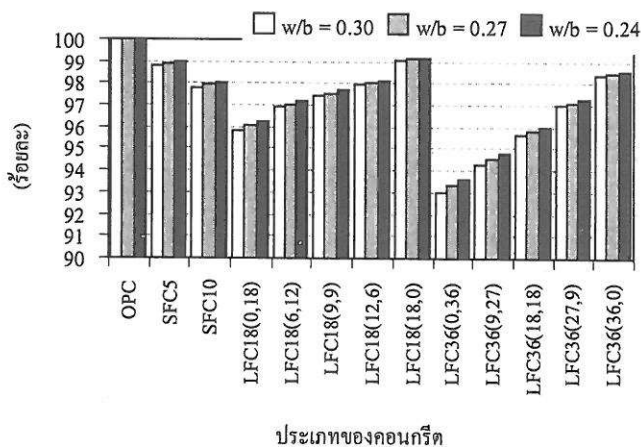
4.2.2 ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตที่อัตรา
การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยที่อัตราส่วนปริมาตร
เพศต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) และทุกอัตราส่วน
น้ำต่อวัสดุผสม (w/b) และค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตทุกสัดส่วน
ผสมซึ่งควบคุมค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 6.0 ± 2.0 ซม. พบว่าคอนกรีต
ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยร้อยละ
18 มีแนวโน้มของความต้องการปริมาณน้ำและสารลดน้ำอย่างแรงสูง
กว่าเมื่อทำการแทนที่ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนร้อยละ 36
นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม
ทั้งอัตราส่วนการแทนที่ของฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 18 และ
36 มีความต้องการปริมาณน้ำและสารลดน้ำอย่างแรงลดลง เนื่องจาก
ฝุ่นหินปูนมีปริมาณอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 60 ไมโครเมตร มากกว่า
ปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะในช่วงขนาดอนุภาคที่มากกว่า 90 ไมโครเมตร
ฝุ่นหินปูนมีปริมาณปูนซีเมนต์อย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งฝุ่นหินปูน และ
เถ้าลอยมีพื้นที่ผิวต่ำกว่าปูนซีเมนต์จึงทำให้ฝุ่นหินปูน และเถ้าลอย
สามารถดูดซับน้ำไว้ที่ผิวเนื่องจากแรงดึงดูดที่ต่ำ นอกจากนี้น้ำบางส่วน
ยังถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยน้อยกว่าอนุภาค
ปูนซีเมนต์ ทำให้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตลดลงส่งผลต่อปริมาณน้ำ
อิสระ (Free Water) ที่มีอยู่ในเพศ ซึ่งปริมาณน้ำอิสระนี้มีผลต่อค่าการ
ยุบตัวของคอนกรีตโดยตรง เนื่องจากช่วยลดแรงเสียดทาน ลดแรงยึด
เหนี่ยวระหว่างอนุภาคของคอนกรีตในสภาพสดและหล่อลื่นให้คอนกรีต
ยุบตัวได้ดีขึ้น เมื่อร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูน และ
เถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นความต้องการปริมาณน้ำอิสระจึงลดลงตามไปด้วย ส่งผล
ให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนมีค่าเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้พื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่ำของฝุ่นหินปูน (1,775 ตร.ซม./กรัม)
ประกอบกับอนุภาคมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมและผิวขรุขระ นอกจากนั้น
พื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยที่มีค่าต่ำ (2,217 ตร.ซม./กรัม) เมื่อเปรียบ
เทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และมีลักษณะเป็นผิวเรียบ กลมมน ใน
ขณะที่ปูนซีเมนต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่าฝุ่นหินปูนและเถ้าลอย (3,449
ตร.ซม./กรัม) มีลักษณะเป็นเหลี่ยมและผิวเรียบ จึงส่งผลให้แรงเสียดทาน

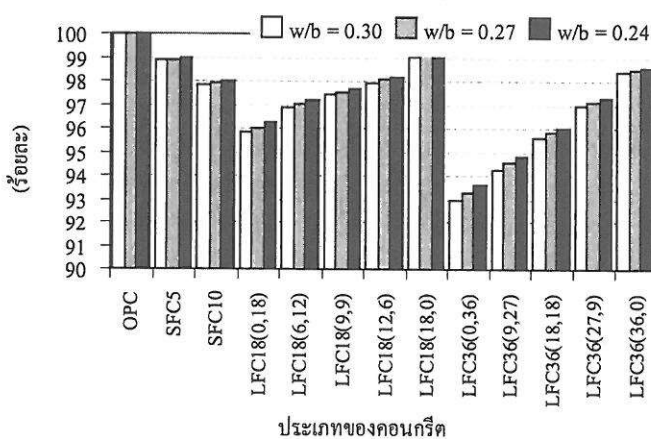
ระหว่างอนุภาคของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนต่ำกว่าคอนกรีต
ปกติ และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมทำให้ค่าการยุบตัวสูง

ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรง เทียบเท่า



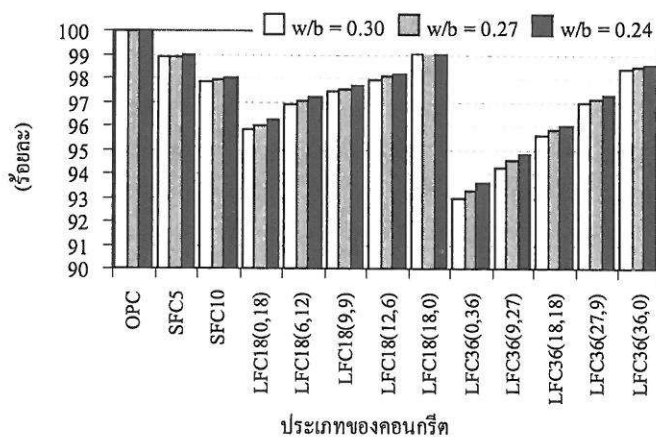
(ก) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (γ เท่ากับ 1.1)

ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรง เทียบเท่า



(ข) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (γ เท่ากับ 1.2)

ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรง เทียบเท่า



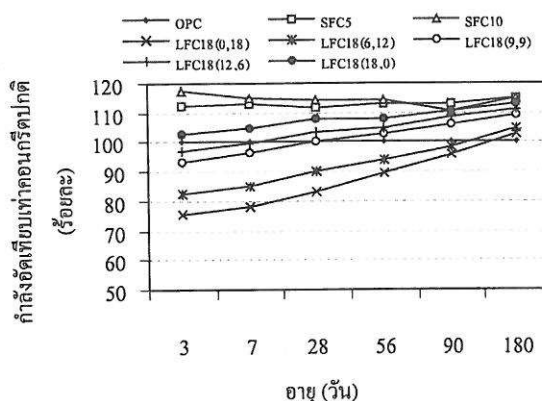
(ค) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (γ เท่ากับ 1.3)

รูปที่ 6 ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตสด

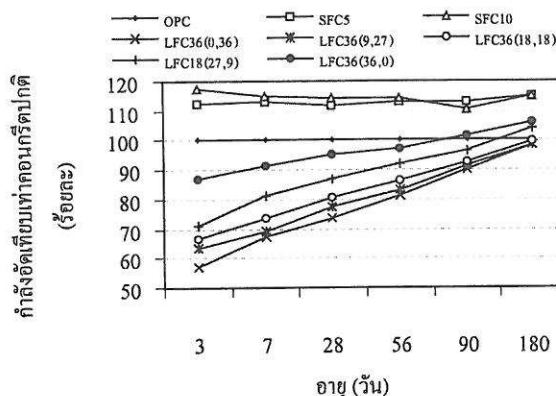
4.2.3 กำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมแสดงในรูปที่ 7 โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.24 และ 0.27 สำหรับทุกอัตราส่วนปริมาตรเศษต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.30 ที่อัตราส่วนปริมาตรเศษต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมเท่ากับ 1.1 มีอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยร้อยละ 18 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติที่อายุตั้งแต่ 3 วันขึ้นไป ที่อัตราการแทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 18 และเถ้าลอยร้อยละ 0 ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยร้อยละ 36 มีการพัฒนา กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติที่อายุตั้งแต่ 28 วัน ขึ้นไป ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 18 และเถ้าลอยร้อยละ 18 มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์เพิ่มเติม (Supplementary Silicon Dioxide) จากเถ้าลอยซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์รวมที่ต้องการ (Total Silica Demand) การทำปฏิกิริยาไฮดรอกซิลและปฏิกิริยาปอซโซลานิกประกอบการมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เพิ่มเติม (Supplementary Calciumoxide) จากฝุ่นหินปูนจึงทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตปกติ ในขณะที่การแทนที่ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 36 ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อันส่งผลต่อเนื่องถึงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ลดลง ซึ่งน่าจะไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้การพัฒนา กำลังอัดลดลง ในขณะที่ทั้งเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้น [15] ดังนั้นจึงเหลือเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อคอนกรีตทำให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตปกติ ในขณะที่คอนกรีตที่มีค่า γ เท่ากับ 1.2 และ 1.3 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.24, 0.27 และ 0.30 พบว่าคอนกรีตซึ่งมีส่วนผสมของเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับร้อยละ 18 โดยมีอัตราส่วนการแทนที่ของฝุ่นหินปูนในปูนซีเมนต์จากร้อยละ 0 ถึง 18 และเถ้าลอยร้อยละ 0 ถึง 18 มีกำลังอัดที่อายุตั้งแต่ 3 วันขึ้นไป สูงกว่าคอนกรีตปกติ ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 36 ที่สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 0 ถึง 36 และเถ้าลอยร้อยละ 0 ถึง 36 ที่อายุ 28 วันขึ้นไป มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติ แต่มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 18 เนื่องจากที่ส่วนผสมดังกล่าว มีการขบตัวสูงกว่าคอนกรีตผสมซิลิกา-ฟูม และคอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 18 ตามลำดับ ทำให้เมื่อทำการเขย่าจึงเกิดการแยกตัว (Segregation) (จากการสังเกตในระหว่างการผสมคอนกรีต)

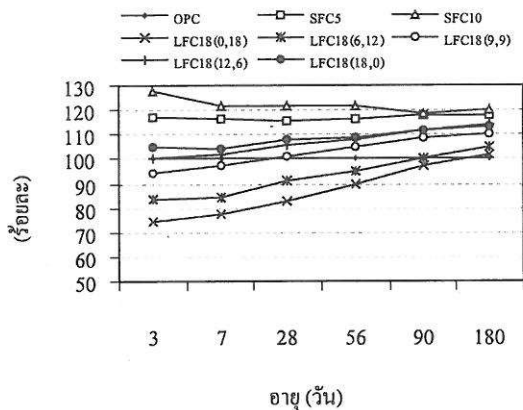
สำหรับคอนกรีตที่อัตราส่วนปริมาตรเศษต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) เท่ากับ 1.1 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.24 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูนร้อยละ 18 และเถ้าลอยร้อยละ 0 สูงกว่าคอนกรีตปกติที่ 7 วันขึ้นไป แต่ต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม (กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนสูงกว่าคอนกรีตปกติคิดเป็นร้อยละ 15, 10, 8, 5 และ 3 ที่อายุ 7, 28, 56, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมสูงกว่าคอนกรีตปกติคิดเป็นร้อยละ 21, 19, 15, 13 และ 9 ที่อายุ 7, 28, 56, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ)



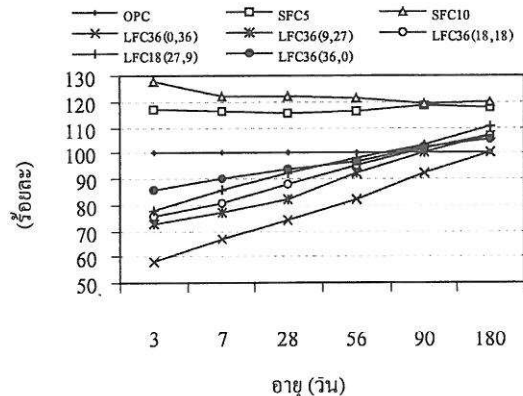
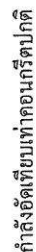
(ก) กำลังอัดเทียบเท่าคอนกรีตปกติของคอนกรีตที่มีค่า γ เท่ากับ 1.1 และ w/b เท่ากับ 0.24 โดยมีสัดส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูน และ/หรือเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก



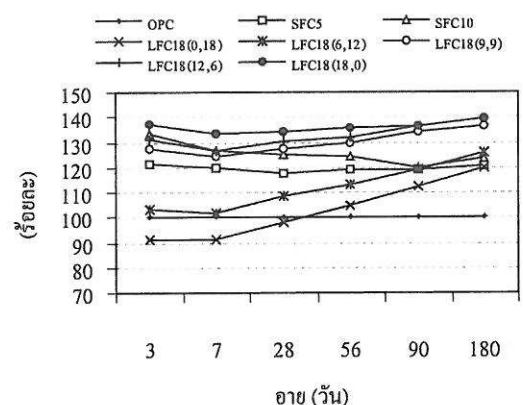
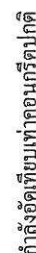
(ข) กำลังอัดเทียบเท่าคอนกรีตปกติของคอนกรีตที่มีค่า γ เท่ากับ 1.1 และ w/b เท่ากับ 0.24 โดยมีสัดส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูน และ/หรือเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 36 โดยน้ำหนัก



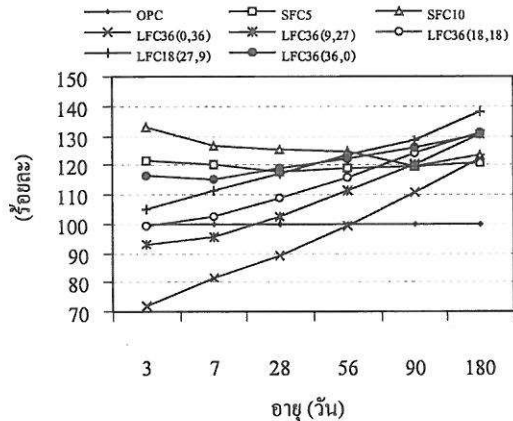
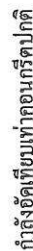
(ค) ถ้าสั่งอัดเทียบเท่าคอนกรีตปกติของคอนกรีตที่มีค่า γ เท่ากับ 1.1 และ w/b เท่ากับ 0.27 โดยมีอัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยฟูนหินปูน และ/หรือเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก



(ง) กำลังอัดเทียบเท่าคอนกรีตปกติของคอนกรีตที่มีค่า γ เท่ากับ 1.1 และ w/b เท่ากับ 0.27 โดยมีสัดส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยฟูนหินปูน และ/หรือเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 36 โดยน้ำหนัก



(จ) กำลังอัดเทียบเท่าคอนกรีตปกติของคอนกรีตที่มีค่า γ เท่ากับ 1.1 และ w/b เท่ากับ 0.30 โดยมีสัดส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยฟูนหินปูน และ/หรือเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก



(ฉ) กำลังอัดเทียบเท่าคอนกรีตปคของคอนกรีตที่มีค่า γ เท่ากับ 1.1 และ w/b เท่ากับ 0.30 โดยมีสัดส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยตัวผสมหินปูน และ/หรือเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 36 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 7 กำลังอัดของคอนกรีต

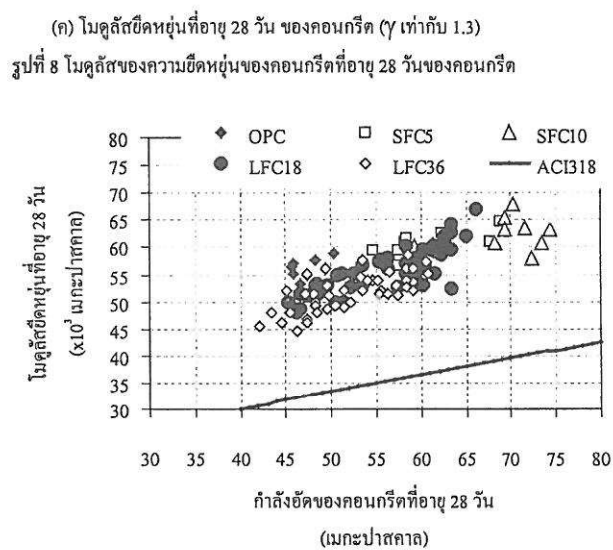
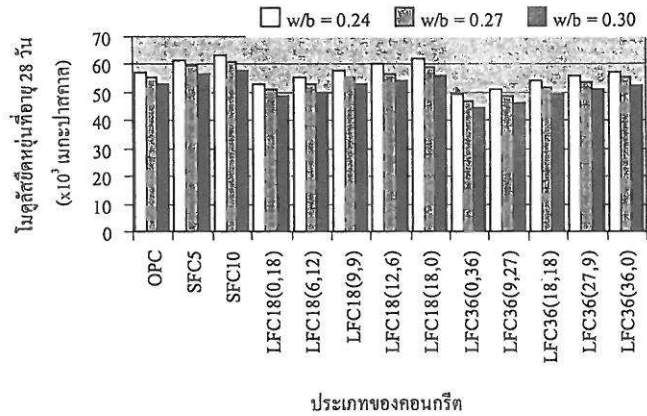
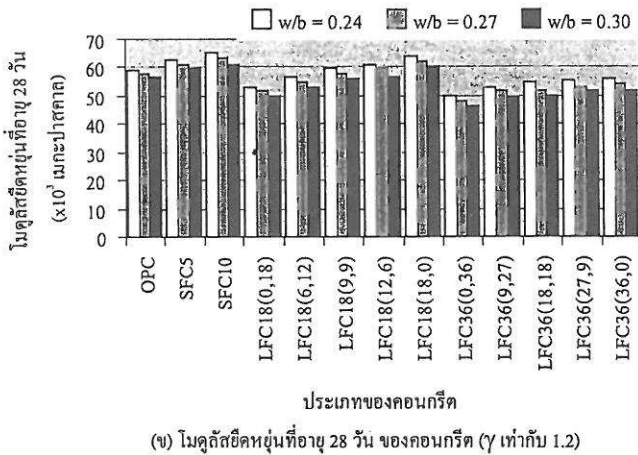
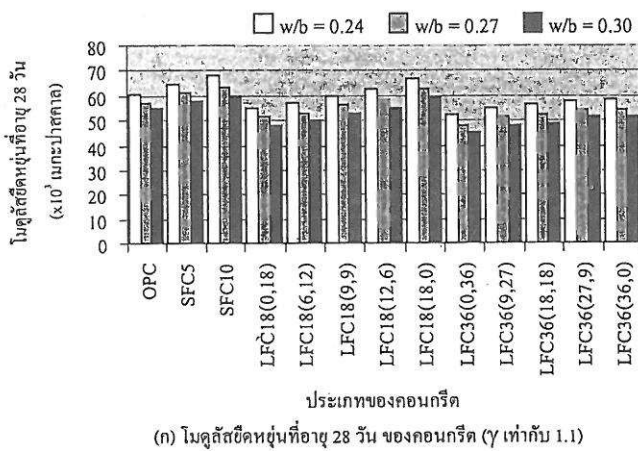
4.2.4 โมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ผลการโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 แสดงในรูปที่ 8 โดยอัตราส่วนปริมาตรเพศต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสม (w/b) และอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฟูนินปูนและถ้ำล่อยเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่มีพฤติกรรมการยืดหยุ่นที่แท้จริง เมื่อได้รับค่าหน่วยแรง (Stress) เพิ่มขึ้นเกินความสามารถที่เพศและมวลรวมรับได้ทำให้เกิดรอยแตกร้าวในคอนกรีต ถ้าเพิ่มค่าหน่วยแรงขึ้นไปอีกการกระจายของรอยแตกร้าวในคอนกรีตก็จะเพิ่มมากขึ้น ความเครียด (Strain) จึงเพิ่มมากยิ่งขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปมวลรวมมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูงกว่าซีเมนต์เพศ ทำให้เมื่อคอนกรีตมีปริมาตรเพศต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตมีปริมาณมวลรวมลดลงในขณะที่มีปริมาณเพศเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นจึงลดลงตามไปด้วย

แคลเซียมซิติเกดไฮดรต (C-S-H) ผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ยิ่งตั้งผลต่อโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตด้วยคือ คอนกรีตที่มีปริมาณแคลเซียมซิติเกดไฮดรตมาก และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ คอนกรีตมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงตามไปด้วย เมื่อมีการผสมฝุ่นหินปูน และเถ้าลอยในคอนกรีตจึงมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ และการกระจายตัวของแคลเซียมซิติเกดไฮดรต จึงส่งผลให้โมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลงตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับตามมาตรฐาน ACI 318 ยังได้กำหนดให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต มาตรฐาน ACI 318 กำหนดให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (E) ของ

คอนกรีตทั่วไปให้ใช้เท่ากับ $4,734 \sqrt{f'_c}$ เมกะปาสกาล โดยที่ f'_c เท่ากับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เมื่อคอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักลดลงเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฟูนหินปูน และถาลอยจึงทำให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมฟูนหินปูนละเอียดและถาลอยที่อายุ 28 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดสอบ โมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมถาลอย และฟูนหินปูนเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318 สำหรับคอนกรีตทั่วไป (ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น E_c เท่ากับ $4,734 \sqrt{f'_c}$ เมกะปาสกาล) พบว่าคอนกรีตผสมถาลอยและฟูนหินปูนละเอียดมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน สูงกว่ามาตรฐาน ACI 318 ในทุกสัดส่วนผสมดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 โมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตปกติ คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมถาลอยและ/หรือ ฟูนหินปูน เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318

5. สรุป

1. หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมถาลอยและฟูนหินปูนที่มีอัตราทดแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถาลอยและฟูนหินปูนเท่ากับร้อยละ 18 มีแนวโน้มของค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสูงกว่าที่อัตราทดแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถาลอยและฟูนหินปูนร้อยละ 36 และหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมถาลอย และ/หรือฟูนหินปูนร้อยละ 18 และ 36 มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติ (คิดเป็นร้อยละ 0.20 ถึง 2.06) และหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมถาลอยและฟูนหินปูนมีค่าลดลงที่สัดส่วนของถาลอยและฟูนหินปูนในคอนกรีตคือ LFC18(0,18), LFC18(6,12), LFC18(9,9), LFC36(0,36), LFC36(9,27), LFC36(18,18) และ C36(27,9) เมื่อเปรียบ

เทียบกับคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมซึ่งมีอัตราส่วนการแทนที่ซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

2. ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเท่ากับร้อยละ 18 และ 36 ที่อัตราส่วนปริมาตรเศษต่อน้ำต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมเท่ากับ 1.1, 1.2 และ 1.3 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยและฝุ่นหินปูน) เท่ากับ 0.24, 0.27 และ 0.30 โดยควบคุมค่าการยุบตัวเริ่มต้นได้ในช่วง 6.0 ± 2.0 ซม. ทำให้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมากกว่าฝุ่นหินปูนมีความต้องการปริมาณน้ำ และสารลดน้ำอย่างแรง (Superplasticizer) ต่ำกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูนมากกว่าเถ้าลอย คอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม (ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก เทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1)

3. คอนกรีตผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 18 ที่สัดส่วนฝุ่นหินปูนร้อยละ 18 และเถ้าลอยร้อยละ 0 มีกำลังอัดที่อายุ 3 วันขึ้นไป สูงกว่าคอนกรีตปกติที่สัดส่วนผสมเดียวกัน (คิดเป็นร้อยละ 3 ถึง 12) และคอนกรีตผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 18 ที่สัดส่วนฝุ่นหินปูน (ร้อยละ 9 ถึง 12) และเถ้าลอย (ร้อยละ 6 ถึง 9) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันขึ้นไปสูงกว่าคอนกรีตปกติที่สัดส่วนผสมเดียวกัน (คิดเป็นร้อยละ 1.5 ถึง 10) นอกจากนั้นกำลังอัดที่อายุ 180 วัน ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 18 สัดส่วนฝุ่นหินปูน (ร้อยละ 9 ถึง 18) และเถ้าลอย (ร้อยละ 0 ถึง 9) มีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม (ร้อยละ 5 และ 10)

4. คอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนร้อยละ 18 ที่มีสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 0 ถึง 9 และปริมาณฝุ่นหินปูนร้อยละ 9 ถึง 18 มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน สูงกว่าคอนกรีตปกติ และสูงกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318 (คอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนร้อยละ 18 มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นคิดเป็นร้อยละ 86 ถึง 113 ของคอนกรีตปกติ ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนร้อยละ 36 มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นคิดเป็นร้อยละ 84 ถึง 101 ของคอนกรีตปกติ)

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ปูนซีเมนต์ในการทดสอบ และการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์เถ้าลอย และฝุ่นหินปูน บริษัท ทีพีโอ คอนกรีต จำกัด (มหาชน) ให้ความอนุเคราะห์เถ้าลอย และฝุ่นหินปูนในการทดสอบ รวมทั้งคุณสุรัช

อำนาจพรเลิศ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในส่วนของ การทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. บรรณานุกรม

- [1] สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. ความคงทนของคอนกรีต. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2543.
- [2] คณะอนุกรรมการคอนกรีตวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, ความคงทนของคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2543.
- [3] Sheinn, A. M. M., "Use of Powdered Stone as Fine Aggregate in Making High Strength Concrete", Thesis No. ST-98-11, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1998.
- [4] Minor, G., "Minor Additional Constituents: Permitted Types and Benefits", Euro - Cement, Impact of ENV 197 ON Concrete Construction, Proceedings of the National Seminar, University of Dundee, September 1994, pp. 37-55.
- [5] พิชัย นิมิคยสกุล และมาโกโตะ อาชิโน, คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชา เรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกในตัมาใช้ประโยชน์ สำนักวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- [6] Lane, R. E., and Best, J. F., "Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete", Concrete International : Design & Construction, Vol. 4, No. 7, July 1982, pp. 81-92.
- [7] Tangtermsirikul, S. et al., "Class C Fly Ash as a Shrinkage Reducer for Cement Paste", Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, Wisconsin, USA, June 1995, pp. 385-402.
- [8] Sakata, K., Ayano, T., and Ogawa, A., "Mixture Proportioning for Highly Flowable Concrete Incorporating Limestone Powder", Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, Wisconsin, USA, June 1995, pp. 153-268.
- [9] Krstulovic, P., Kamenic, N. and Popovic, K., "A New Approach in Evaluation of Filler Effect in Cement : Effect on Strength and Workability of Mortar and Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 24.4, 1994, pp. 721-727.
- [10] ASTM Committee, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 4.01 Philadelphia, 1995.

- [11] Neville, A. M., Properties of Concrete, Harlow: Addison Wesley Longman Limited, 1996.
- [12] Jackson, P. J., "Portland Cement: Classification and Manufacture", Lea's: Chemistry of Cement and Concrete, pp. 25-35, Edited by Peter C. Hewlett, New York, John Wiley&Sons Inc., 1998.
- [13] Matthews, J.D., "Performance of Limestone Filler Cement Concrete", Euro - Cement, Impact of ENV 197 on Concrete Construction, Proceedings of the National Seminar, University of Dundee, September 1994, pp. 113 - 147.
- [14] Moncef Nehdi, Sidney Mindess, and Pierre - Claude Aitcin, "Optimization of High Strength Limestone Filled Cement Mortars", Cement and Concrete Research, Vol. 26.6, 1996, pp. 883 - 893.
- [15] Massazza, F., "Pozzolana and Pozzolanic Cements", Lea's: Chemistry of Cement and Concrete, pp. 471-601, Edited by Peter C. Hewlett, New York, John Wiley&Sons Inc., 1998.

[illegible]

คำอธิบายสัญลักษณ์