คุณสมบัติด้านซีเมนต์และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน
Cementitious Properties and Expansion in Sodium Sulfate Solution of Concrete with Fly Ash and Limestone Powder

ยงยุทธ วัฒนกุล[1] ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2] อิทธิพร ศิริสวัสดิ์[3] และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล[4]

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ (ปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัวของเพสต์ การยุบตัว และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต) และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ (ทั้งประเภทที่ 1 และ 5) ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนเพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะมีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมใกล้เคียงกับกรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ในขณะที่การก่อตัวของเพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกับกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับค่าการยุบตัวของคอนกรีต นั้นมีแนวโน้มที่จะผกผันกับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ และนอกจากนี้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจะมีค่าน้อยกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนกรณีแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตไม่แตกต่างกับกรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีแนวโน้มมากกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการขยายตัวของคอนกรีตเถ้าลอย และคอนกรีตผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างจากกรณีปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน สำหรับการใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) พบว่า การขยายตัวของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงในปริมาณต่ำจะทำให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตมากขึ้น แต่ถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงๆ จะให้ค่าการขยายตัวน้อยลง

คำสำคัญ : คุณสมบัติด้านซีเมนต์, เถ้าลอย, ผงหินปูน, การขยายตัว

Abstract

This research is emphasized on the cementitious properties including normal consistency, setting time of paste, slump and compressive strength of concrete. Moreover, the expansion test of concrete bar exposed to sodium sulfate solution of concrete with fly ash and limestone powder was observed. It was found that the normal consistency of cement paste, cement (type I and V) partially replaced with fly ash, was lower than those of the control mixes. On the other hand, limestone powder replacing cement paste showed equivalent normal consistency to those of the control mixes. Setting time of fly ash cement paste was longer than those of cement only and limestone powder cement pastes. Concrete slump had a tendency to vary inversely with normal consistency of paste. The fly ash concrete exhibited lower strength than limestone concrete and control concrete. Besides, the

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[3]นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
[4]ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

expansion of concrete sample made with type I cement was larger than that of type V cement and concrete with fly ash and limestone powder. For all ternary binder (cement, fly ash and limestone powder), it was found that the expansion exposed to the sodium sulfate solution of concrete sample with the high CaO fly ash at low replacing content exhibited the large expansion. On the contrary, at the high replacing content of fly ash, the expansion of concrete reduced.

Keywords : cementitious, fly ash, limestone powder, expansion

1. บทนำ

การใช้เถ้าลอย (Fly Ash) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในเพสต์ลดลง และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น อย่างเช่นทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตได้ดีขึ้น [1] ส่วนข้อเสียของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน คือทำให้ก่อตัวช้า และกำลังรับแรงในตอนต้นลดลง จึงไม่นิยมใช้เถ้าลอยในงานที่ต้องการกำลังรับแรงในตอนต้นหรือต้องการถอดแบบเร็ว ในขณะที่การใช้ผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างทำให้กำลังรับแรงในตอนต้นมีค่าเพิ่มขึ้น [2] อย่างไรก็ตามการใช้ผงหินปูนยังไม่แพร่หลายถึงแม้ว่าราคาจะถูกกว่าปูนซีเมนต์ก็ตาม การพัฒนาวัสดุประสานร่วมซึ่งได้แก่ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกัน เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการเลือกใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน โดยเฉพาะปัจจุบันประเทศไทยใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีผลผลิต (By product) ที่เหลือใช้เป็นเถ้าลอยของถ่านหิน (Fly Ash) ในขณะที่ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตนอกจากจะมุ่งเน้นถึงคุณสมบัติด้านกำลังอัดแล้ว สิ่งสำคัญอีกอย่างที่ต้องคำนึงถึงคือความคงทนของคอนกรีต โครงสร้างคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) โดยเฉพาะโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต โดยคอนกรีตจะเกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าว ไม่สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบ

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงได้ศึกษาถึงคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน พร้อมทั้งการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้คอนกรีตดังกล่าวให้เหมาะสม

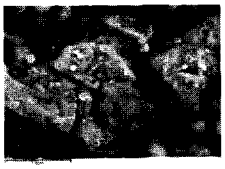
2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

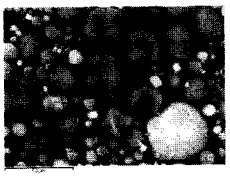
สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 เถ้าลอย (จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง) และผงหินปูนความละเอียดขนาด 3 ไมโครเมตร ส่วนมวลรวมใช้ทรายแม่น้ำ และหินเบอร์ 2 และสารโซเดียมซัลเฟต ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเป็นภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) กำลังขยาย 3,500 เท่า และ ภาพที่ 2 ซึ่งแสดงการกระจายขนาดสะสม (Size Distribution) ของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา โดยพิจารณาที่การกระจายขนาดร้อยละ 50 พบว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ประเภท

ที่ 5 เถ้าลอย และผงหินปูน มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค (Mean Particle Size) เท่ากับ 15.14, 14.43, 17.74 และ 4.46 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

(ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1



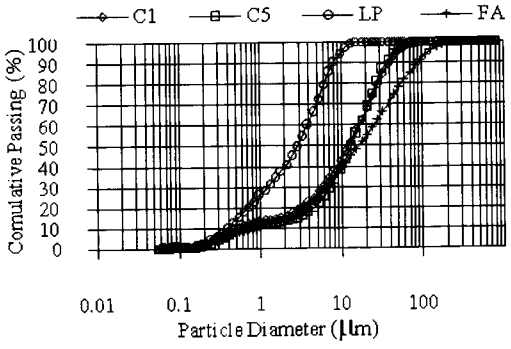
(ข) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5



(ค) เถ้าลอย

(ง) ผงหินปูนขนาด 3 ไมโครเมตร

ภาพที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคของวัสดุประสาน ซึ่งเป็นภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า



ภาพที่ 2 การกระจายขนาดของอนุภาคของวัสดุประสาน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสาน

รายการ	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5	เถ้าลอย	ผงหินปูน 3ต
SiO_2, %	19.50	21.87	40.93	0.46
Al_2O_3, %	4.97	3.87	22.42	0.06
Fe_2O_3< %	3.78	4.34	13.64	0.03
CaO, %	65.38	64.56	13.63	55.25
MgO, %	1.08	1.11	2.93	0.37
Na_2O, %	<0.01	<0.01	0.89	<0.01
K_2O, %	0.47	0.24	2.39	0.01
SO_3, %	2.16	2.08	1.92	<0.01
TiO_2, %	0.25	0.21	0.43	<0.01
P_2O_3, %	0.07	0.05	0.15	0.01
Free Lime, %	1.00	0.76	0.22	-
LOI, %	2.27	1.59	0.46	43.79
Insoluble Residue %	0.28	0.23	-	-
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	3.18	2.46	2.79
ความละเอียด, cm^2/g	3,250	3,340	3,550	12,160

2.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในครั้งนี้ได้ใช้สัดส่วนผสมคอนกรีตจำนวน 18 รูปแบบ กล่าวคือวัสดุประสานนั้นประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (C1) และประเภทที่ 5 (C5) ล้วน และเมื่อใช้วัสดุประสานร่วม 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1 FA30, C5 FA30) และ 50 (C1 FA50, C5 FA50) และแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (C1 LP10, C5 LP10) และ 20 (C1 LP20, C5 LP20) และใช้เมื่อวัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด แทนที่ทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 คือ เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (C1 FA20 LP10, C5 FA20 LP10) เถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (C1 FA10 LP20, C5 FA10 LP20) เถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (C1 FA40 LP10, C5 FA40 LP10)

และเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (C1 FA30 LP20, C5 FA30 LP20) โดยรายละเอียดของรูปแบบส่วนผสมคอนกรีตดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ศึกษา

สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม. โดยน้ำหนัก (กก.)					
	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
C1	332	0	0	790	1080	182
C5	332	0	0	790	1080	182
C1 FA30	233	99	0	790	1080	182
C1 FA50	166	166	0	790	1080	182
C1 LP10	299	0	33	790	1080	182
C1 LP20	266	0	66	790	1080	182
C5 FA30	233	99	0	790	1080	182
C5 FA50	166	166	0	790	1080	182
C5 LP10	299	0	33	790	1080	182
C5 LP20	266	0	66	790	1080	182
C1 FA20 LP10	233	33	66	790	1080	182
C1 FA10 LP20	233	66	33	790	1080	182
C1 FA40 LP10	166	133	33	790	1080	182
C1 FA30 LP20	166.5	99	66.5	790	1080	182
C5 FA20 LP10	233	33	66	790	1080	182
C5 FA10 LP20	233	66	33	790	1080	182
C5 FA40 LP10	166	133	33	790	1080	182
C5 FA30 LP20	166.5	99	66.5	790	1080	182

หมายเหตุ

C1 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน

C5 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

C1 FA30 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

C1 LP10 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

C1 FA20 LP10 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

2.3 รายละเอียดของการศึกษา

2.3.1 คุณสมบัติด้านซีเมนต์

สำหรับคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้มีดังนี้

1) ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) และการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 187 และ ASTM C191

2) ค่ายุบตัว (Slump) ของคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 143

3) กำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ของคอนกรีตกระทำตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881 โดยใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 ซม.^{3} ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และ 1 ปี

2.3.2 การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

การศึกษาการขยายตัว (Expansion) ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้ขนาดตัวอย่าง 7.5x7.5x28.5 ซม.^{3} ทดสอบที่อายุ 4, 8, 13, 26, 38 สัปดาห์และทุกๆ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

สำหรับสารละลายโซเดียมซัลเฟตใช้ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก กล่าวคือใช้สารโซเดียมซัลเฟต 50 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร โดยการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

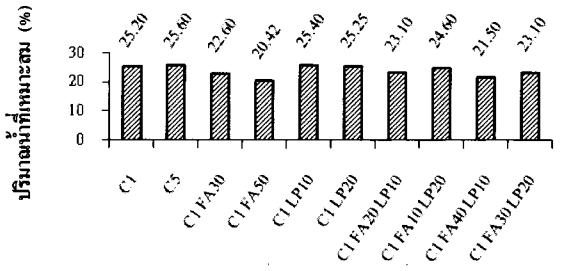
3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

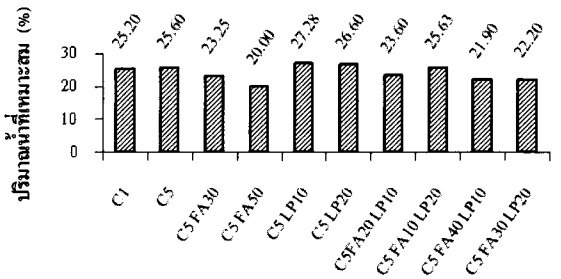
3.1.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

จากการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ (ภาพที่ 3) สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีของเพสต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่ำกว่ากรณีไม่แทนที่ โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณมากขึ้นจะได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่ำลง ทั้งนี้เป็นเพราะลักษณะของอนุภาคที่กลมของเถ้าลอยช่วยในการไหลลื่น ทำให้มีความต้องการน้ำน้อย ส่วนกรณีแทนที่ด้วยผงหินปูนพบว่าจะให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมใกล้เคียงกับกรณีปูนซีเมนต์ล้วน หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับ

ผงหินปูนนั้นมีแนวโน้มว่าจะต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เพราะผลจากเถ้าลอยที่เป็นส่วนผสมร่วม



(ก) แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

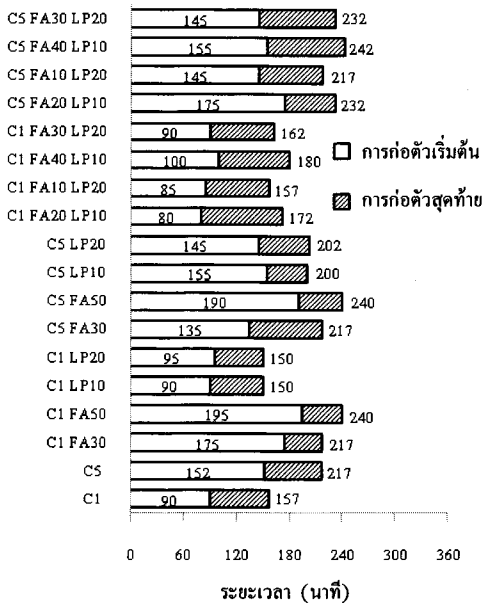


(ข) แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ของวัสดุประสาน

3.1.2 การก่อตัวของเพสต์

ภาพที่ 4 แสดงระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ทั้งการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาการก่อตัว (ทั้งเริ่มต้นและสุดท้าย) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ช้ากว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเพสต์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะให้ระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่ากรณีไม่แทนที่ โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวยิ่งช้าขึ้น ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อีกทั้งเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานซึ่งการทำปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น สำหรับการแทนที่ด้วยผงหินปูน (ร้อยละ 10 และ 20) ในปูนซีเมนต์ (ทั้งปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5) นั้น ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ล้วน อย่างไรก็ตามการก่อตัวของเพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนให้แนวโน้มว่าจะช้ากว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เพราะผลจากเถ้าลอยที่เป็นส่วนผสมร่วม โดยเฉพาะกรณีแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น



ภาพที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของเพสต์

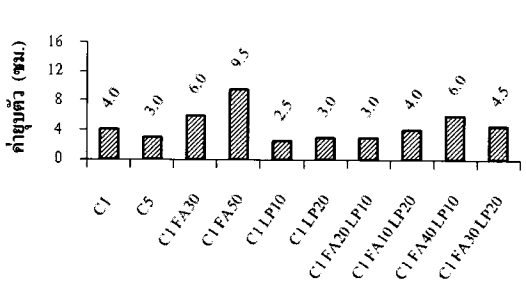
3.1.3 ค่ายุบตัวของคอนกรีต

ตารางที่ 4 และภาพที่ 5 แสดงค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน พบว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าใกล้เคียงกันคือเท่ากับ 4 และ 3 ซม. ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อแทนที่เถ้าลอยจะได้ค่ายุบตัวที่มากกว่ากรณีไม่แทนที่ โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะลักษณะของอนุภาคที่กลมของ

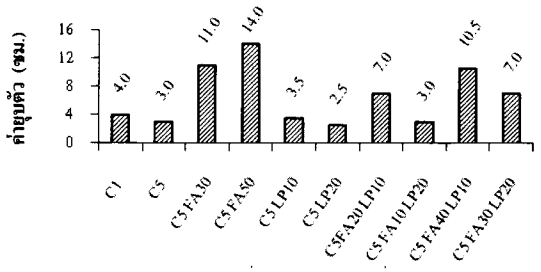
เถ้าลอยช่วยในการไหลลื่นทำให้ค่าการยุบตัวมากเพิ่มขึ้น สำหรับค่ายุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยผงหินปูน พบว่า จะให้ค่าใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความละเอียดของผงหินปูนที่มีมากกว่าของปูนซีเมนต์จึงต้องการน้ำมากกว่า ในขณะที่คอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีแนวโน้มว่าจะมากกว่าของปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากเถ้าลอยที่เป็นส่วนผสมร่วมโดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น

ตารางที่ 4 ค่ายุบตัว และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตซึ่งมีส่วนผสมในรูปแบบต่างๆ

อัตราส่วนผสม	ค่ายุบตัว (ซม.)	กำลังอัดประลัย (กก./ซม.^{2})	
		28 วัน	1 ปี
C1	4	394	452
C1 FA30	6	297	465
C1 FA50	9.5	290	449
C1 LP10	2.5	373	429
C1 LP20	3	337	365
C1 FA20LP10	3	343	436
C1 FA10LP20	4	320	376
C1 FA40LP10	6	271	405
C1 FA30LP20	4.5	276	413
C5	3	453	566
C5 FA30	11	320	528
C5 FA50	14	301	456
C5 LP10	3.5	370	551
C5 LP20	2.5	347	486
C5 FA20LP10	7	344	501
C5 FA10LP20	3	329	406
C5 FA40LP10	10.5	293	438
C5 FA30LP20	7	306	459



(ก) แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

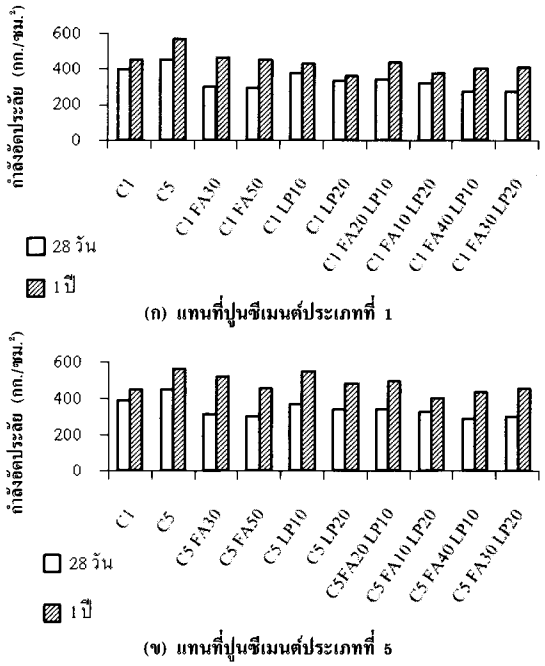


(ข) แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 5 ค่ายุบตัวของคอนกรีต

3.1.4 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กรณีกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน และ 1 ปี ของคอนกรีต (ตารางที่ 4 และภาพที่ 6) พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน มีมากกว่าคอนกรีตซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนคอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ ให้ค่ากำลังอัดประลัย (อายุ 28 วัน) น้อยกว่ากรณีไม่แทนที่โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณมากขึ้นค่ากำลังอัดยิ่งลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดช้า อย่างไรก็ตามเมื่ออายุ 1 ปี จะเห็นได้ว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าลอยมีการพัฒนาใกล้เคียงกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เพราะผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับคอนกรีตที่แทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์พบว่ากำลังอัดประลัยใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่แทนที่ อย่างไรก็ตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนให้แนวโน้มว่า เมื่ออายุต้น (28 วัน) กำลังอัดจะต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ล้วน แต่เมื่ออายุมากขึ้น (1 ปี) มีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ล้วน ผลจากเถ้าลอยซึ่งเป็นส่วนผสมร่วมโดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่ได้พัฒนากำลังของตัวอย่างคอนกรีตตามลำดับ



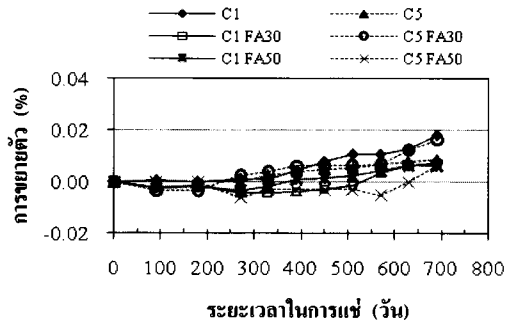
ภาพที่ 6 กำลังอัดประลัยที่อายุ 28 วัน และ 1 ปี (เมื่อบ่มในน้ำ)

3.2 การขยายตัวของแท่งตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

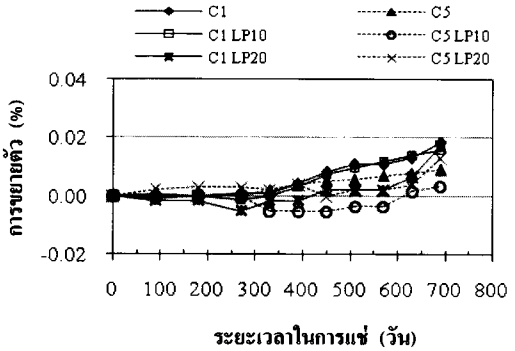
ผลการทดสอบค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของแท่งตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาครั้งนี้แสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตกับระยะเวลาการในแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตโดย ภาพที่ 7 (ก) เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าลอย (ร้อยละ 30 และ 50) พบว่า ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนมีแนวโน้มมากกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน เป็นเพราะปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มี C_3A น้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ทำให้เกิด เอททริงไจท์ (Ettringite) น้อยกว่า ส่วนการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5) มีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะช่วยลดปริมาณ C_3A และปริมาณ $Ca(OH)_2$ จึงทำให้เกิดเอททริงไจท์น้อยลง

สำหรับคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (ภาพที่ 7 (ข)) พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีค่าไม่แตกต่างจากกรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีแนวโน้มว่าจะใกล้เคียงหรือน้อยกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

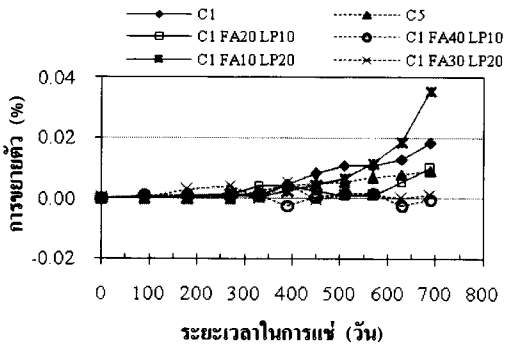
กรณีวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ภาพที่ 7 (ค) และ (ง)) ซึ่งเป็นการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และที่ 5 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ตามลำดับ พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตให้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ก็มีแนวโน้มว่าทุกสัดส่วนของการใช้วัสดุร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) จะมีค่าการขยายตัวน้อยกว่ากรณีตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยไม่แตกต่างกับค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นตัวอย่างคอนกรีตเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซึ่งให้ค่าการขยายตัวค่อนข้างมากอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตสัดส่วนผสมอื่น ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงๆ (13.63%) ในปริมาณการแทนที่ต่ำ (ร้อยละ 10) ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดน้อย ทำให้ลด $Ca(OH)_2$ จึงทำให้เกิดเอททริงไจท์ มากขึ้น แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยดังกล่าวในปริมาณที่สูง ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมาก สามารถลด $Ca(OH)_2$ ได้มาก การขยายตัวจึงน้อยลง ซึ่งก็สอดคล้องกับการศึกษาของ ปิติศานต์ [3] แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีแทนที่วัสดุในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกันและมีค่าใกล้เคียงกับกรณีคอนกรีตที่ใช้ปูซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน



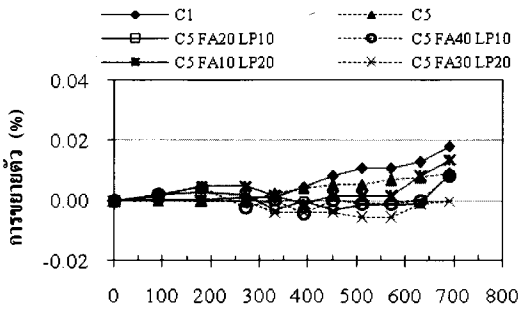
(ก) วัสดุประสานร่วม 2 ชนิด เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าลอย



(ข) วัสดุประสานร่วม 2 ชนิด เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยผงหินปูน



(ค) วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1



(ง) วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนกับระยะเวลาในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

4. สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ (ทั้งประเภทที่ 1 และ 5) ด้วยเถ้าลอยใน จะมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่แทนที่ ส่วนปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะมีค่าใกล้เคียงกับการไม่แทนที่ หรือมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ของวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) ก็มีแนวโน้มที่จะต่ำกว่ากรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

2. การก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย พบว่าจะช้ากว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การก่อตัวของเพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะมีค่าไม่แตกต่างกับเพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และกรณีวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด การก่อตัวของเพสต์ดังกล่าวมีแนวโน้มว่าจะช้ากว่าเพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนโดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง

3. ค่ายุบตัวของคอนกรีตพบว่า จะไปในทิศทางผกผันกับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือ ถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มีค่าต่ำจะส่งผลให้ค่ายุบตัวของคอนกรีตมากขึ้น และถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีค่าสูงจะส่งผลให้ค่ายุบตัวน้อยลง

4. กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีจะค่าน้อยกว่าเมื่อไม่แทนที่ โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง ส่วนเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตไม่แตกต่างกับกรณีไม่แทนที่ และเมื่อใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตมีแนวโน้มที่จะต่ำกว่ากรณีปูนซีเมนต์ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น

5. จากกราฟตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟตพบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนมีแนวโน้มที่มากกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (ร้อยละ 30 และ 50) หรือแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (ร้อยละ 10 และ 20) จะทำให้การขยายตัวที่ไม่แตกต่างกับการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน หรือปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) มีแนวโน้มว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตจะต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง ในปริมาณต่ำ ร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้มจะให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตมากขึ้น โดยจะมากกว่าทั้งกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทสยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Krammart P. and Tangtermsisrikul S., 2002. "Strength Reduction and Expansion of Mortar with Fly Ash," Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand, V. 13, No. 3, 2002, pp. 9-16.

[2] Voglis N.,Kakali G., Chanitakis E., Tsivilis S., 2005. Portland-Limestone cement Their properties and hydration compared to those of other composite cements. Cement & Concrete Composites, V.27:pp.191-196.

[3] Krammart P. and Tangtermsisrikul S., 2004. "Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution," ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT, V12.