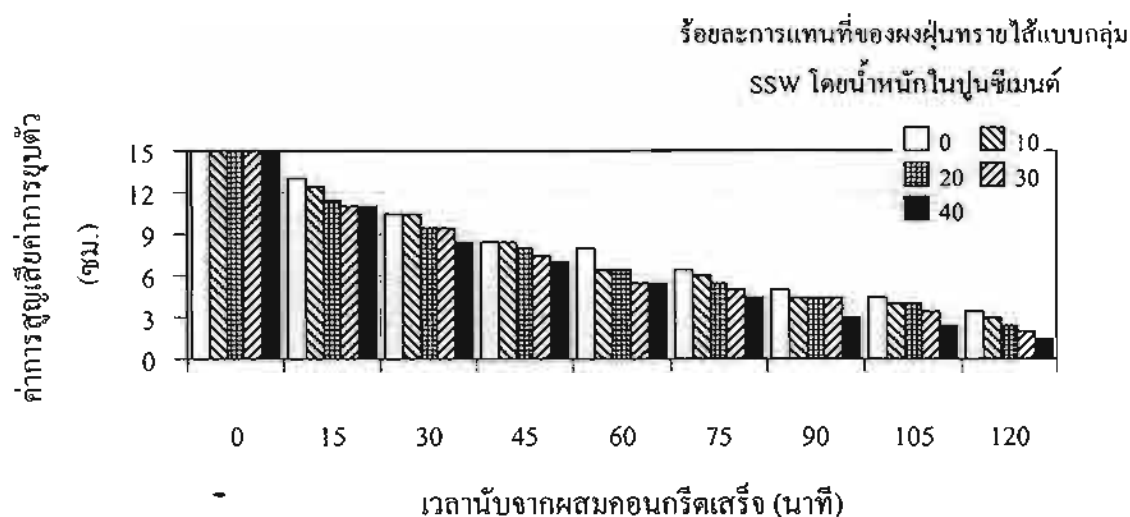
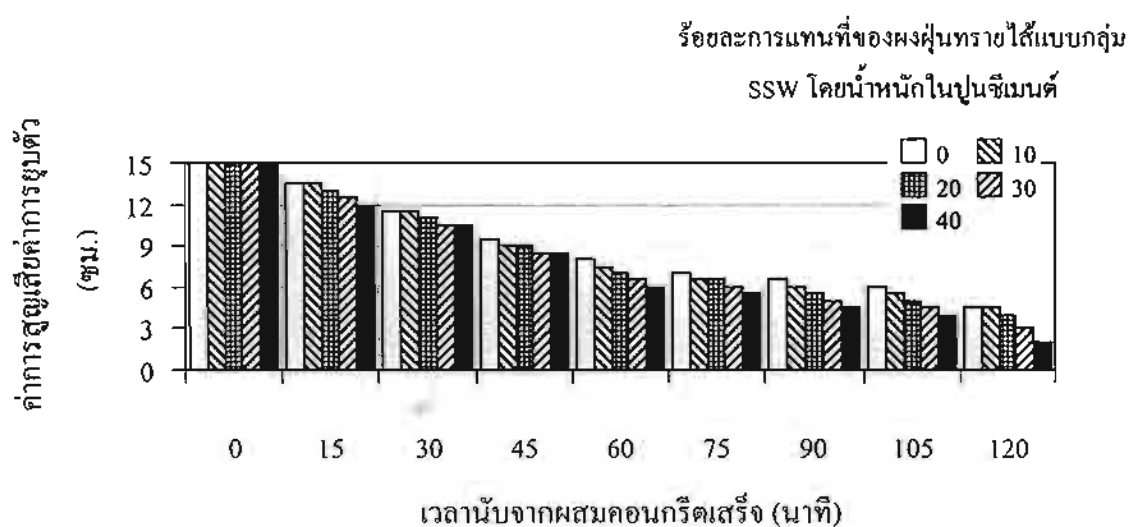
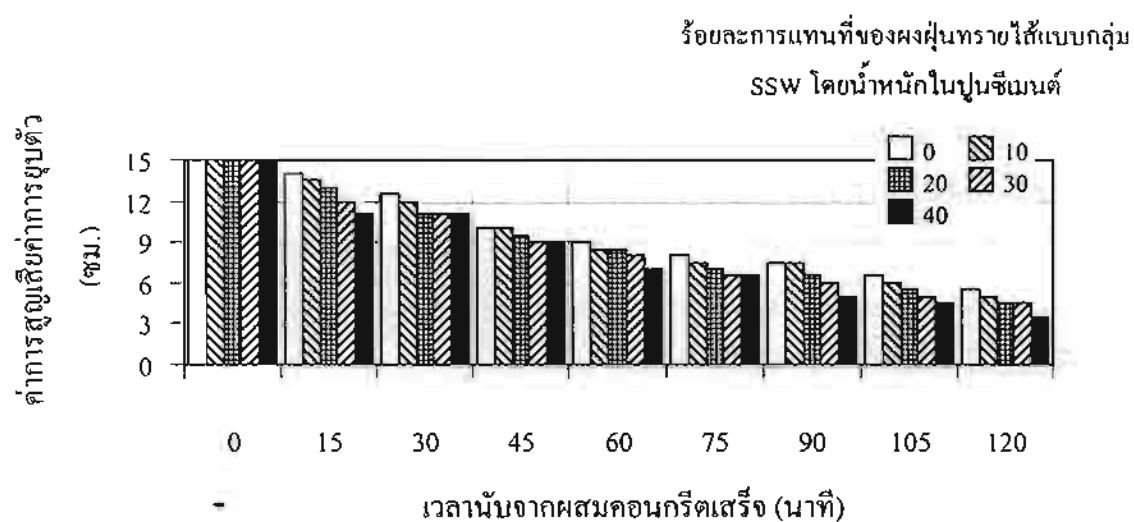




ภาพที่ 5.15 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.16 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.17 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ชม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

5.2.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต (Setting Time)

ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทราย ใต้แบบกลุ่ม SSW ซึ่งกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. แสดง ในตารางที่ 5.5 พบว่าคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบมีระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้าย เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติและมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามสัดส่วน การแทนที่ของผงฝุ่นทรายใต้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณา คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ มีเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) เพิ่มขึ้นจาก 136 นาที ในกรณีของคอนกรีต ปกติเป็นมีค่า 147, 149, 151 และ 155 นาที สำหรับคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบใน ปูนซีเมนต์เท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการลดลงของ ปริมาณปูนซีเมนต์ซึ่งหมายถึงการลดลงของปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ในส่วนผสม ของคอนกรีต (ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) เป็นสารประกอบหลักที่สามารถทำปฏิกิริยา ไฮเดรชันกับน้ำแล้วเกิดการแข็งตัวภายใน 2 ถึง 3 ชั่วโมงแรก) ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงตาม ไปด้วย ทำให้อายุสุดท้ายของคอนกรีตแข็งตัวช้าลงอันเนื่องมาจากปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ลดลง และผลของการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบดังกล่าวได้ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัว ระยะสุดท้าย (Final Setting Time) ที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น อีกทั้งสารประกอบหนึ่งที่มี ผลต่อระยะเวลาการก่อตัวคือ ปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ที่มีปริมาณลดลงเช่นเดียวกัน จึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น (Sidney M. et al., 2000, p. 211)

เมื่อพิจารณาในประเด็นของการเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุผง (ปูนซีเมนต์และผงฝุ่นทราย ใต้แบบ) จาก 300 กก./ม.³ เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ ตามลำดับ พบว่าผลของการแทนที่ผงฝุ่นทราย ใต้แบบในปูนซีเมนต์ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตทั้งระยะเริ่มต้นและสุดท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันด้วยเหตุผลจากที่กล่าวมา ในขณะที่คอนกรีตที่มีการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใต้แบบ เดียวกันนั้น คอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลง ทั้งนี้เพราะใน คอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ที่สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้นจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่สร้างกำลัง ให้กับคอนกรีต (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นเป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าการ แทนที่ของผงฝุ่นทรายใต้แบบทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ในขณะที่เมื่อพิจารณา ในส่วนของร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใต้แบบเดียวกัน คอนกรีตที่ค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นจะทำให้ ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการที่ปริมาณน้ำในคอนกรีตเพิ่มขึ้นทำให้อนุภาค

ปูนซีเมนต์กระจายตัวมากขึ้น อันจะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตที่เกิดจากแต่ละอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยามีความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous) ดังนั้นกระบวนการแข็งตัวจึงต้องใช้เวลานานขึ้น (Neville, A.M., 1999, p. 19)

ตารางที่ 5.5

ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW

ปริมาณวัสดุผง (กก./ม ³)	ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ซม.)	ร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่น ทรายได้แบบในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนัก	ระยะเวลาการก่อตัว (นาที)	
			เริ่มต้น	สุดท้าย
300	5 ± 0.5	0	136	196
		10	147	203
		20	149	204
		30	151	214
		40	155	217
300	10 ± 0.5	0	145	207
		10	150	212
		20	157	215
		30	159	220
		40	164	231
300	15 ± 0.5	0	155	218
		10	162	226
		20	165	232
		30	167	242
		40	175	251
350	5 ± 0.5	0	105	169
		10	110	177
		20	121	184
		30	124	195
		40	125	200
350	10 ± 0.5	0	138	182
		10	140	191
		20	143	196
		30	147	206
		40	154	215
350	15 ± 0.5	0	143	201
		10	152	209
		20	154	216
		30	157	229
		40	165	235

ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW

ปริมาณวัสดุผง (กก./ม. ³)	ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ซม.)	ร้อยละการแทนที่ของผงปูน ทรายไส้แบบในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนัก	ระยะเวลาการก่อตัว (นาที)	
			เริ่มต้น	สุดท้าย
400	5 ± 0.5	0	89	144
		10	103	148
		20	107	169
		30	112	173
		40	115	180
400	10 ± 0.5	0	127	162
		10	134	172
		20	135	177
		30	142	183
		40	145	190
400	15 ± 0.5	0	135	176
		10	140	187
		20	141	192
		30	143	198
		40	150	209

หมายเหตุ วัสดุผง (Powder Materials) ที่เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตครอบคลุมทั้ง 2 กรณี คือ

1. กรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ส่วน ผสมทำคอนกรีต
2. กรณีที่มีผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW เป็นส่วนประกอบ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW โดยน้ำหนัก

5.3 คุณสมบัติของทางกลคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม SSW

5.3.1 กำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยกำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ และค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. แสดงในภาพที่ 5.18 ตามลำดับ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไล่แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มขึ้น อาทิเช่น กำลังอัดของคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. ที่อายุ 3 วัน มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 83, 64, 57 และ 43 ของคอนกรีตปกติ เมื่อทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไล่แบบในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ อันเป็นผลจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงทำให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ซึ่งเป็นสารประกอบที่สร้างกำลังให้คอนกรีตลดลง ทำให้กำลังอัดลดลงตามไปด้วย ประกอบกับศักยภาพของผงฝุ่นทรายไล่แบบมีความเฉื่อยในการทำปฏิกิริยา (ผงฝุ่นทรายไล่แบบมีซิลิโคนไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นผลึก (Crystal Structure) ในปริมาณมาก ซึ่งดูได้จากผลการทดสอบขององค์ประกอบทางเคมีและการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี XRD ทำให้โครงสร้างที่เสถียรและมีความยากต่อการทำปฏิกิริยาเคมี) นอกจากนั้นในช่วงต้นของการทำปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณไม่เพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (ปฏิกิริยาของซิลิโคนไดออกไซด์ (SiO_2) และ/หรือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ของสารปอซโซลานิกทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2)) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิโคนไดออกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์) ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามอัตราการผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลงจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นหลัก ในขณะที่เมื่ออายุของคอนกรีตภายใต้การบ่มน้ำเพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไล่แบบมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตซึ่งมีสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไล่แบบเท่ากับร้อยละ 40 ที่อายุ 180 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 81 ของคอนกรีตปกติ ซึ่งเพิ่มขึ้นมากกว่าคอนกรีตที่อายุ 3 ถึงร้อยละ 38 ซึ่งแสดงว่าในช่วงหลังผงฝุ่นทรายไล่แบบได้เริ่มทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อย่างต่อเนื่องได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์

(C-S-H) ทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกเหนือจากแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

จากภาพแสดงผลการทดสอบ จะสังเกตเพิ่มเติมได้ว่าในช่วงต้นสามารถแบ่งสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดออกเป็น 2 กลุ่มคือ การแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW เท่ากับร้อยละ 10, 20 และ 30 มีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ ในขณะที่คอนกรีตที่มีอัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบเท่ากับร้อยละ 40 มีค่ากำลังอัดลดลงมาก (ผลต่างของร้อยละกำลังอัดตามสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบที่ติดกันมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 30) เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนการแทนที่ในกลุ่มแรก สำหรับในช่วงหลังความแตกต่างระหว่าง 2 กลุ่ม กลับมีค่าลดลงและมีแนวโน้มใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เพราะผงฝุ่นทรายได้แบบทำปฏิกิริยาปอซโซลานี้อย่างต่อเนื่อง

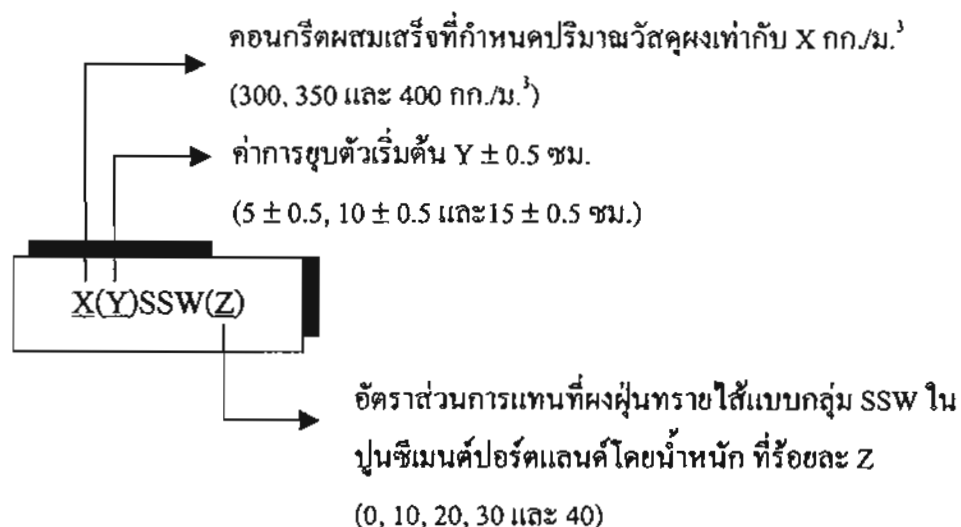
เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ซึ่งใช้เป็นมาตรฐานสำหรับควบคุมคุณภาพและใช้งานคอนกรีตผสมเสร็จ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ และค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. มีค่าเป็นร้อยละ 86, 77, 73 และ 64 ของคอนกรีตปกติ เมื่อ สัดส่วนแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ

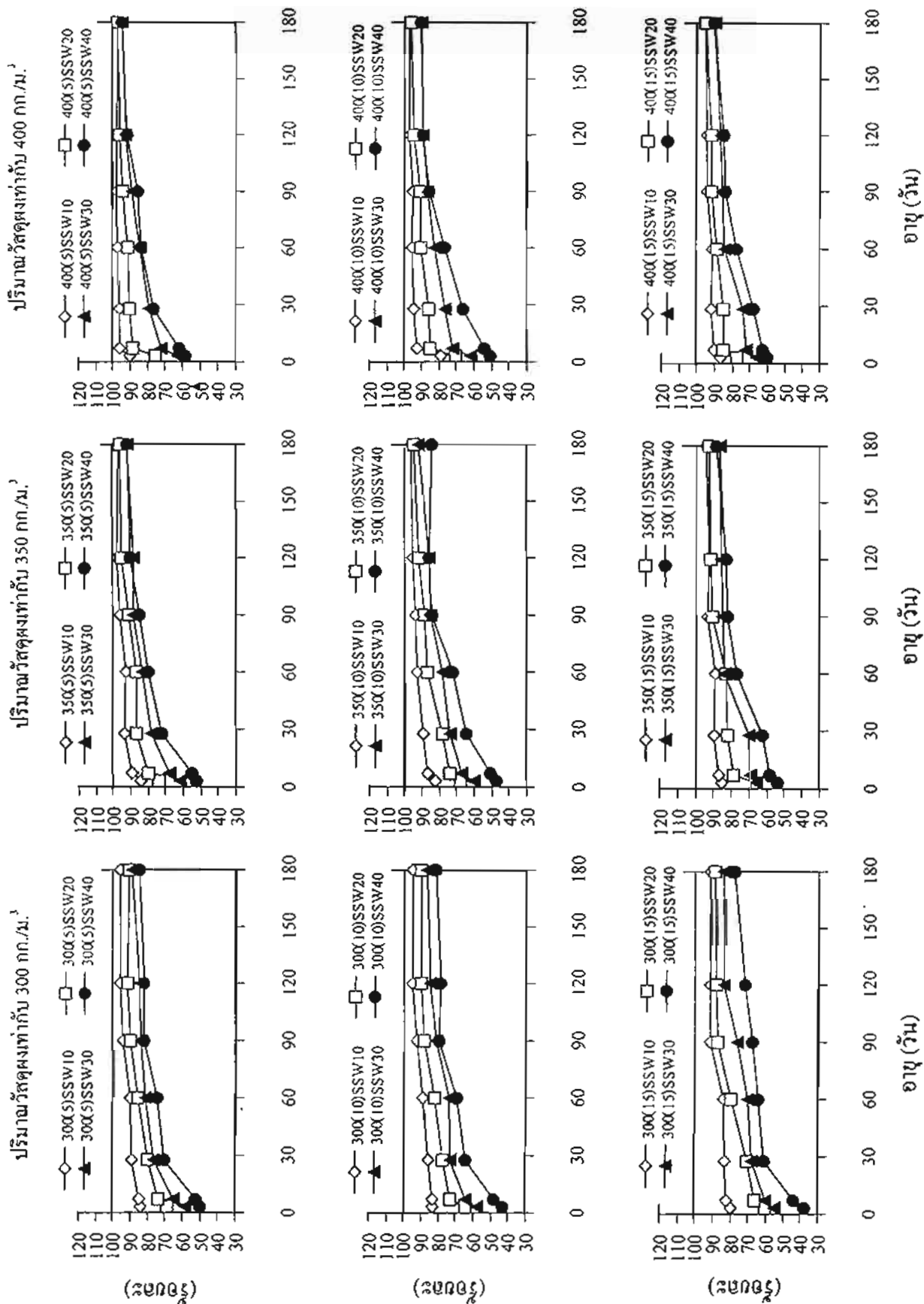
ในส่วนของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 350 และ 400 กก./ม.³ พบว่าแนวโน้มของการพัฒนากำลังเช่นเดียวกับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ โดยค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ มีค่าร้อยละ 82, 68, 60 และ 47 ของคอนกรีตปกติ (ผลต่างของค่าร้อยละกำลังอัดเทียบเท่าตามสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 20) และค่ากำลังอัดเทียบเท่าของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ มีค่าร้อยละ 79, 70, 62 และ 51 ของคอนกรีตปกติ (ผลต่างของร้อยละกำลังอัดตามสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบที่ติดกันมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 18) โดยในช่วงแรกเมื่อการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW เพิ่มขึ้น มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามลำดับ ในขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงหลังมีการพัฒนาเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานี้อย่างต่อเนื่องทำให้ค่าความแตกต่างของกำลังอัดกับคอนกรีตปกติลดลงมาก

สำหรับคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. พบว่าคอนกรีตซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ และผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW เป็นส่วนประกอบมีค่ากำลังอัดเทียบเท่าที่ทุกอายุของการบ่มจนถึง 180 วัน น้อยกว่าคอนกรีตปกติ โดยกำลังอัดในช่วงต้นมีอัตราลดลงมากเมื่อทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น

ในขณะที่ช่วงหลังคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบมีการพัฒนากำลังจนความแตกต่างของกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ ซึ่งเป็นผลจากมาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ผลิตกันซ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกที่เพิ่มขึ้น

คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. พบว่าคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 15 ± 0.5 ซม. มีค่ากำลังอัดเทียบเท่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มของการพัฒนากำลังที่เป็นไปในลักษณะเดียวกัน โดยคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบมีอัตราของการพัฒนากำลังในช่วงแรกสูง และมีอัตราลดลงจนเข้าใกล้เคียงค่าคงที่เมื่ออายุคอนกรีตภายใต้การบ่มในน้ำเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5.18 ซึ่งกำหนดสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้



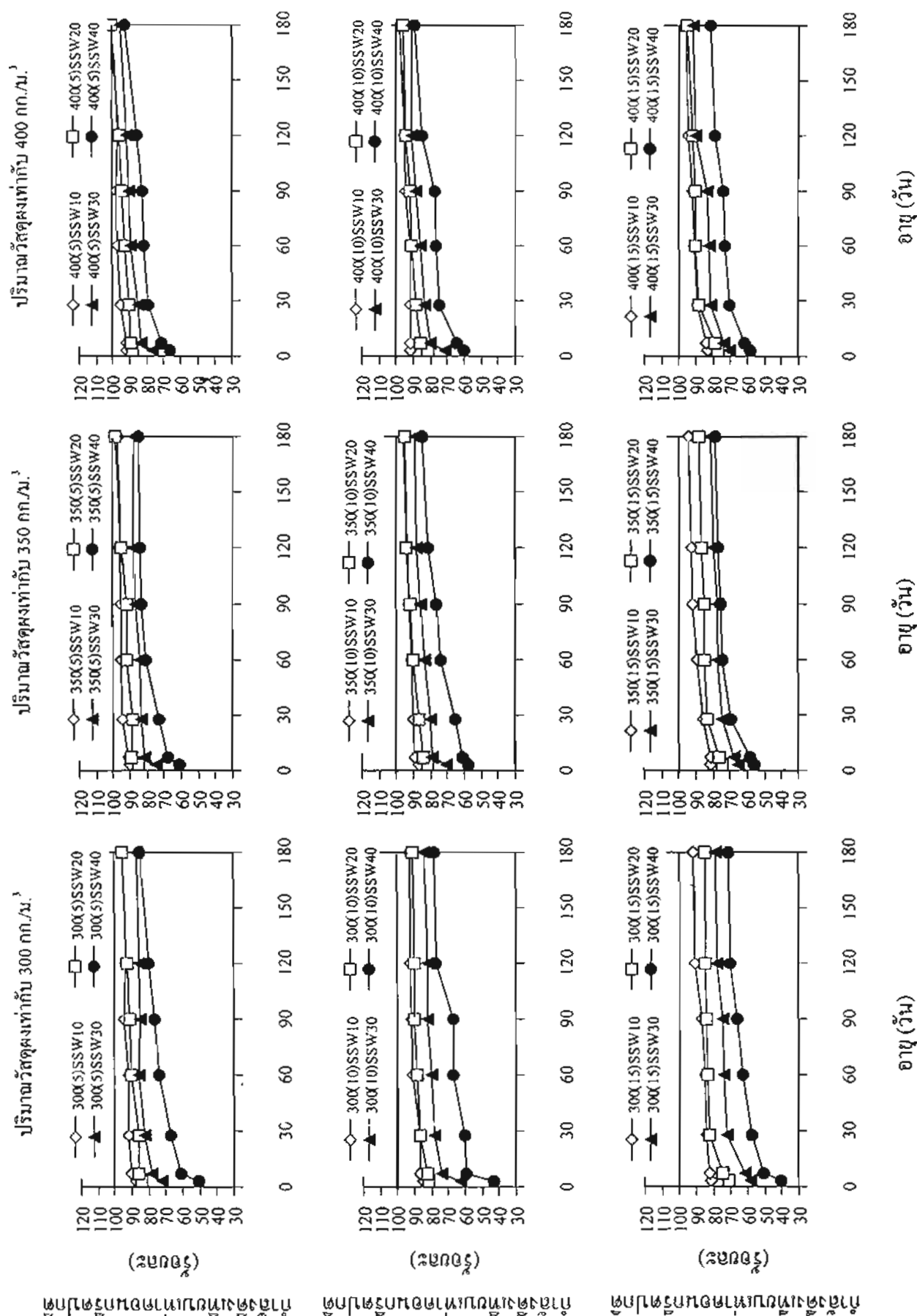
ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.

ภาพที่ 5.18 กำลังอัดเทียบเท่าของคอนกรีตผสมผงปูนทรายใช้แบบกลุ่ม SSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

5.3.2 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength)

ผลการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทราย ไล่แบบกลุ่ม SSW แสดงในภาพที่ 5.19 พบว่าแนวโน้มของกำลังดึงแบบผ่าซีกมีลักษณะเดียวกันกับ กำลังอัดของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไล่แบบกล่าวคือ กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีค่าลดลง ทุกอายุเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300 กก./ม.³ และ ค่าการ ยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และคอนกรีตที่อายุ 3 และ 7 วัน กำลังดึงแบบผ่าซีกมีค่าลดลง ตั้งแต่ร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไล่แบบเท่ากับ 10 จนถึงร้อยละ 40 โดยมีค่าร้อยละ 85 และ 43 ของคอนกรีตปกติที่อายุ 3 วัน เป็นต้น ทั้งนี้เพราะผงฝุ่นทรายไล่แบบมีความเฉื่อยในการทำ ปฏิกิริยา ประกอบกับปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา ไฮเดรชันมีไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ในช่วงต้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ตามอัตราการของการผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลงจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง ดังนั้น กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตจึงมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นหลัก ในขณะที่อายุ ของคอนกรีตภายใต้การบ่มน้ำเพิ่มขึ้นทำให้กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทราย ไล่แบบมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาคอนกรีตผสมเสร็จที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นทำให้กำลังดึงแบบผ่าซีกมีค่าลดลง อันเนื่องมาจาก ความพรุนของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเกาะยึดกับระหว่างเนื้อพาสต์กับ มวลรวมลดลงเพราะมีช่องว่างในบริเวณนั้น (บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อพาสต์กับมวลรวมเรียกว่า ช่วงทรานซิชัน (Interfacial Transition Zone)) ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณผงฝุ่นทรายไล่แบบ กลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกลดลง ตามลำดับ โดยเป็นผลของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าลดลง ผลที่ตามมาคือ ปริมาณ ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาลดลง ตามลำดับ นอกจากนั้นในการทำปฏิกิริยาของ ผงฝุ่นทรายไล่แบบมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์จึงมีผลให้กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตลดลง

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.

ภาพที่ 5.19 กำลังคิดแบบผ่าซีกเพื่อหาของคอนกรีตผสมผ้งผู้พรายใช้แบบกลุ่ม SSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

5.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จทั้งคอนกรีตชนิดปกติและคอนกรีตผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW แสดงในภาพที่ 5.20 พบว่ากำลังดึงแบบผ่าซีกมีค่าเป็นปฏิภาคกับกำลังอัดของคอนกรีต โดยอาศัยความสัมพันธ์พื้นฐานดังแสดงในสมการที่ (5.2) (Neville, A.M., 1996, pp. 309 – 310)

$$f_t = af_c^b \quad (5.2)$$

โดย f_t คือ กำลังดึงแบบผ่าซีกในหน่วยเมกะปาสกาล

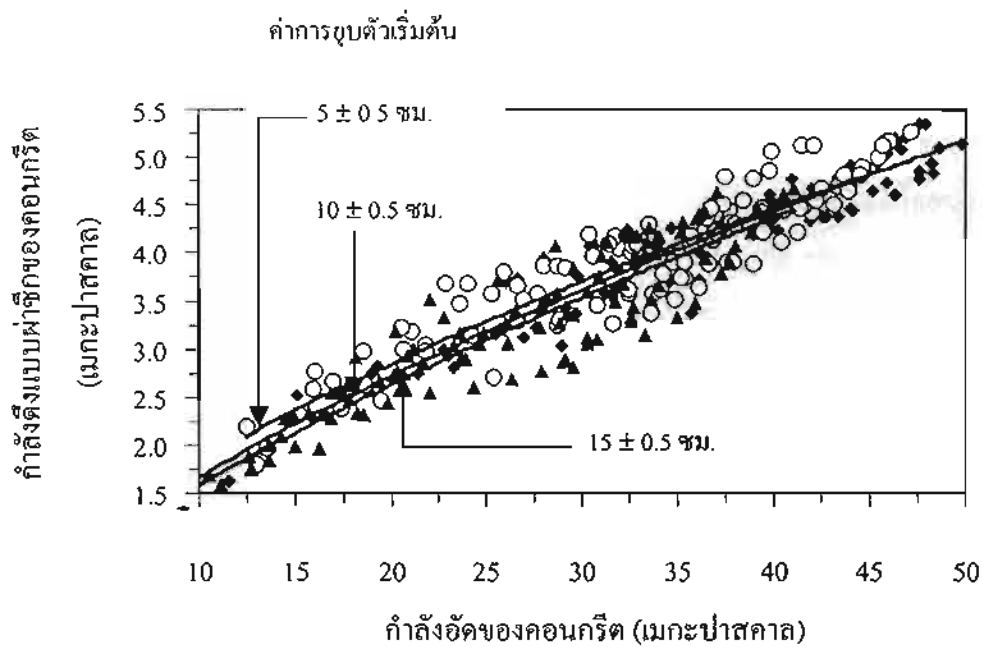
f_c คือ กำลังอัดในหน่วยเมกะปาสกาล

a และ b คือ ค่าคงที่

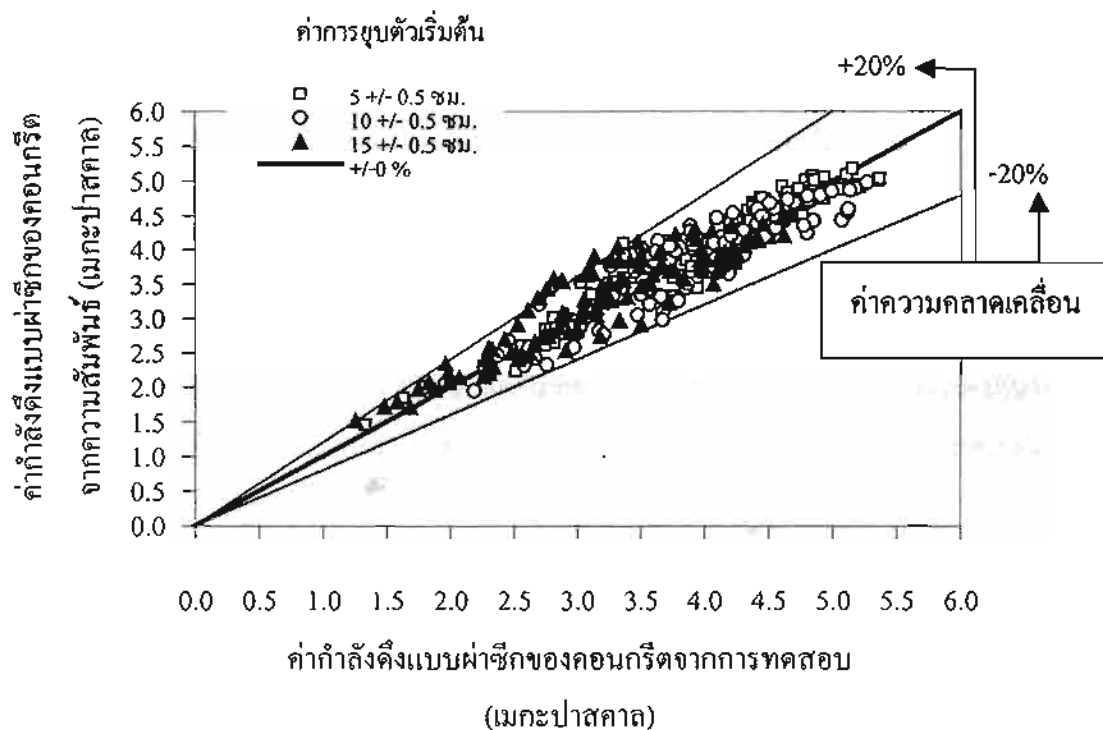
จากความสัมพันธ์พื้นฐานสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ดังสมการที่ (5.3) และภาพที่ 5.20

$$\begin{aligned} f_t &= 0.401f_c^{0.653} \text{ ที่ } R^2 = 0.8663 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 5 \pm 0.5 \text{ ซม.} \\ f_t &= 0.323f_c^{0.707} \text{ ที่ } R^2 = 0.9366 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 10 \pm 0.5 \text{ ซม.} \\ f_t &= 0.289f_c^{0.736} \text{ ที่ } R^2 = 0.8774 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 15 \pm 0.5 \text{ ซม.} \end{aligned} \quad (5.3)$$

เมื่อเปรียบเทียบของค่าเลขยกกำลังกับค่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานของสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา (American Concrete Institute, ACI) พบว่าค่าของเลขยกกำลังอยู่ในช่วงมีค่าเท่ากับ 0.5 ถึง 0.75 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของความสัมพันธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 20



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลึงอัดและค่าลึงดิ่งแบบผ่าซีก



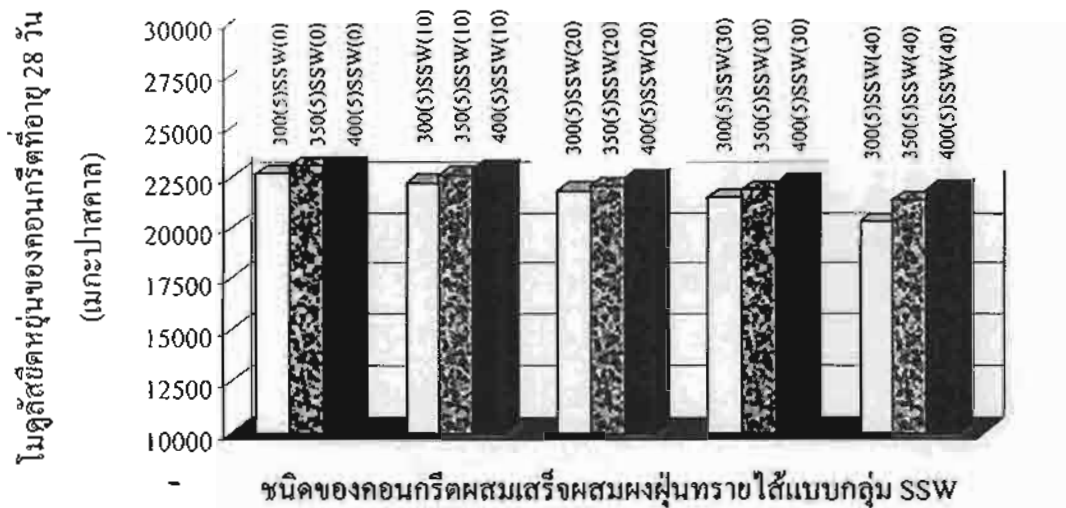
(ข) ค่าเปรียบเทียบระหว่างค่าลึงดิ่งแบบผ่าซีกจากการทดสอบกับความสัมพันธ์ที่ได้

ภาพที่ 5.20 ความสัมพันธ์และค่าเปรียบเทียบระหว่างค่าลึงอัดและค่าลึงดิ่งแบบผ่าซีกของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW

5.3.4 โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน ของคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก แสดงในภาพที่ 5.21 ถึง 5.23 สำหรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มขึ้นทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลงเช่นเดียวกับกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีก ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตปกติที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ และค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 22,589 เมกะปาสกาล ในขณะที่คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 มีค่าเท่ากับ 22,170, 21,799, 21,445 และ 20,259 เมกะปาสกาล ตามลำดับ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการแทนที่ผงฝุ่นทรายในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเท่ากับเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ซึ่งส่งผลต่อปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีตมีปริมาณลดลงทำให้กำลังรับแรงลดลง (โมดูลัสยืดหยุ่นลดลง) ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเป็น 350 และ 400 กก./ม.³ ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

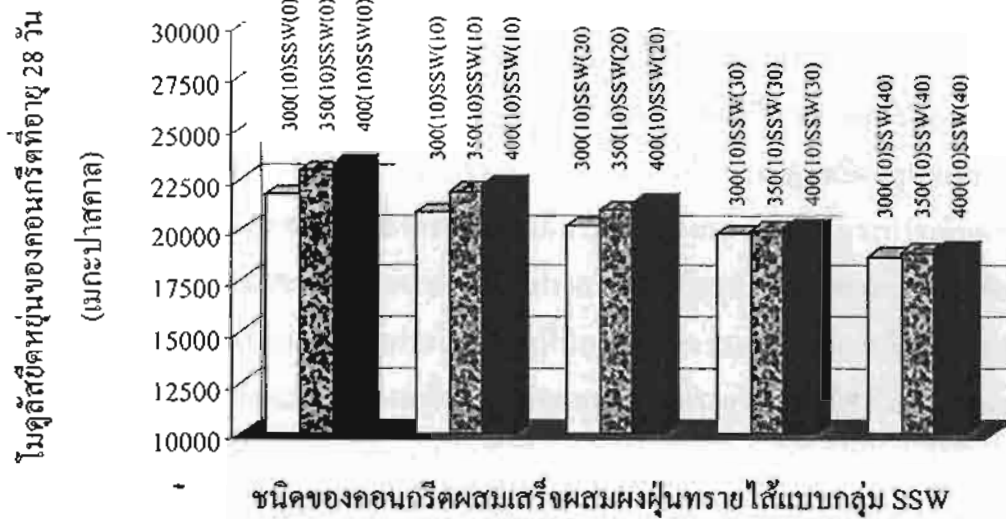
เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318-02 (Building Code Requirements for Structural Concrete) ซึ่งกำหนดไว้คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (E_c) ของคอนกรีตปกติเท่ากับ $0.043w_c^{1.5}\sqrt{f'_c}$ เมกะปาสกาล โดยที่ w_c คือหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (กก./ม.³) และ f'_c คือกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ในหน่วยเมกะปาสกาล โดยคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีคุณสมบัติทั้งค่าน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ลดลงเมื่อสัดส่วนของผงฝุ่นทรายไส้แบบเพิ่มขึ้นทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง



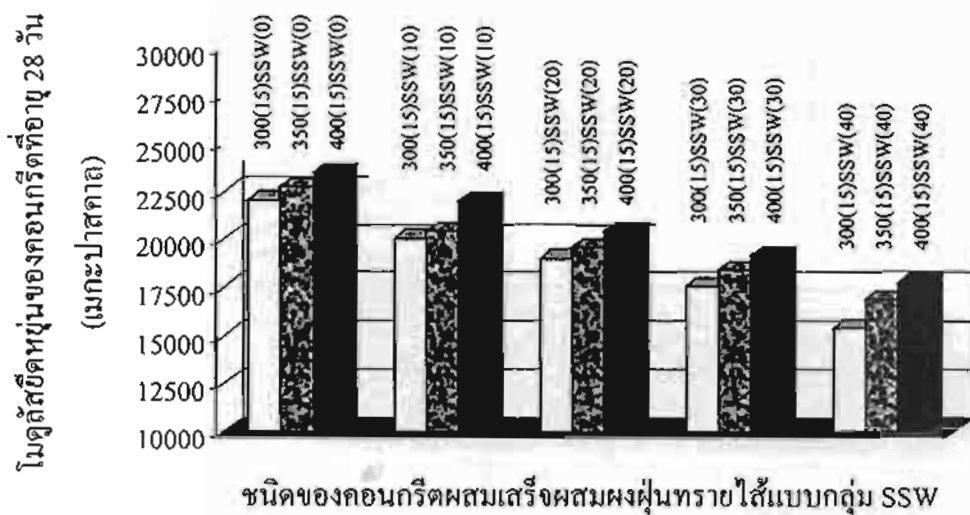
ภาพที่ 5.21 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ที่อายุ 28 วัน โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.

หมายเหตุ สัญลักษณ์ X(Y)SSW(Z) คือ คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ X กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นเป็นมีค่าเท่ากับ 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. แสดงผลการทดสอบในภาพที่ 5.22 และ 5.23 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเช่นเดียวกัน โดยคอนกรีตที่ผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบและกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงในสัดส่วนที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 และ 10 ± 0.5 ซม. นอกจากนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเมื่อค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้น (ปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) เพิ่มขึ้น) ทั้งนี้เป็นเพราะความพรุนในโครงสร้างคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของซีเมนต์เพสต์ลดลง (Sidney M. et al., 2002, p. 312)



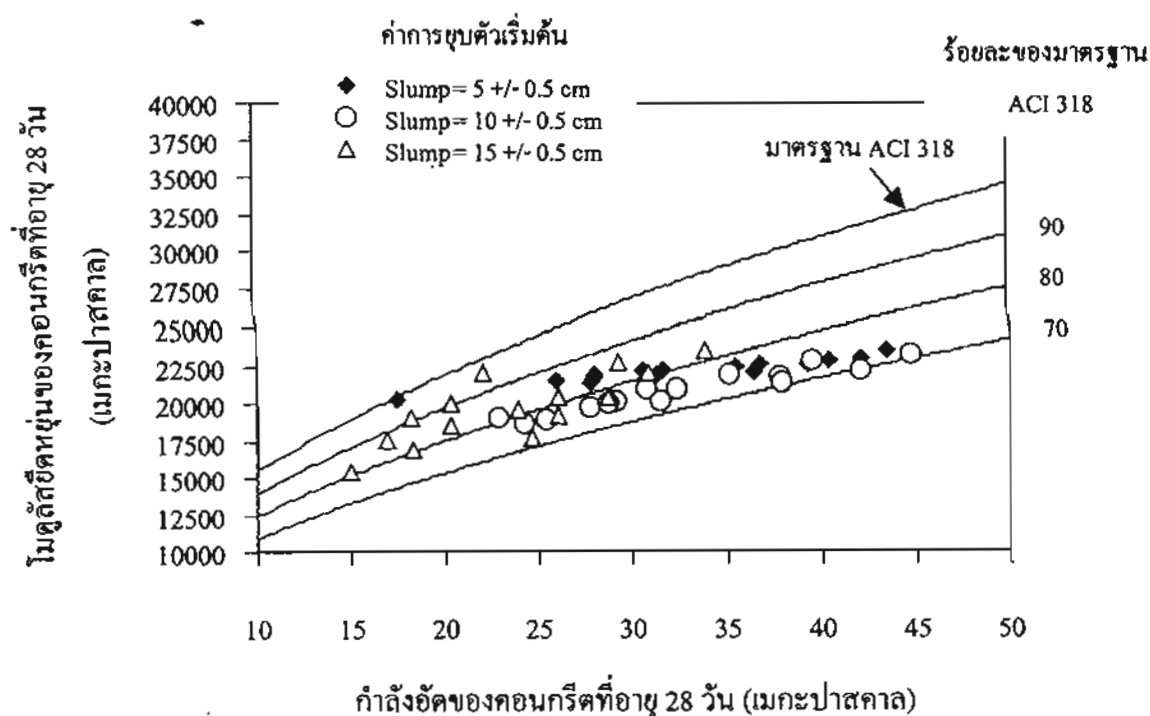
ภาพที่ 5.22 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ที่อายุ 28 วัน โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม.



ภาพที่ 5.23 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ที่อายุ 28 วัน โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม.

หมายเหตุ สัญลักษณ์ X(Y)SSW(Z) คือ คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ X กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

จากความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 5.24 พบว่าคอนกรีตผสมเสร็จทั้งคอนกรีตปกติและที่ผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW โดยส่วนใหญ่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วันต่ำกว่าที่มาตรฐาน ACI 318 ได้กำหนดไว้ โดยเฉพาะคอนกรีตที่มีสัดส่วนการแทนที่ของผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด กล่าวคือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตอยู่ในช่วงร้อยละ 70 ถึง 80 ของค่าที่มาตรฐานข้างต้นระบุไว้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มผงฟูนทรายได้แบบเข้าไปทำให้มีผลกระทบต่อความสามารถในการเสีรูปได้ของคอนกรีตหรือกล่าวในอีกนัยคือ ผงฟูนทรายได้แบบจัดเป็นประเภทวัสดุที่มีความอ่อน (Soft Material) จึงทำให้การเสีรูปเมื่อถูกแรงกระทำเกิดขึ้นมาก ซึ่งหมายถึงคอนกรีตผสมผงฟูนทรายได้แบบมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำลง



ภาพที่ 5.24 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318

5.4 คุณสมบัติทางด้านการทนทานคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW

5.4.1 การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water)

การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตเกิดขึ้นด้วย 2 สาเหตุคือ การดูดซับน้ำของซีเมนต์เจล (Cement Gel) โดยโมเลกุลของน้ำมีแรงต้านกับแรงยึดเหนี่ยวและผลึกโมเลกุลของซีเมนต์เจลออกจากกัน (Neville, A.M., 1999, pp. 425 – 426) และการขยายตัวเนื่องจากดูดซับน้ำขององค์ประกอบทางเคมี อาทิเช่น ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) โดยจากผลการทดสอบการขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ซึ่งมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ แสดงในภาพที่ 5.25 ซึ่งพบว่าคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการขยายตัวในน้ำจนถึงอายุของการบ่มเท่ากับ 28 วัน มีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะการที่ผงฝุ่นทรายได้แบบซึ่งมีปริมาณของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และแคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free CaO) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีค่าเท่ากับ 0.03 และ 0.35 ตามลำดับ (ค่าเฉลี่ยจากการเก็บตัวอย่าง) ในขณะที่ปูนซีเมนต์มีค่า 2.41 และ 0.57 ซึ่งออกไซด์ดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้น (Moisture) เกิดการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีปริมาตรเพิ่มขึ้น

จากกราฟแสดงค่าการขยายตัวของคอนกรีต พบว่าในช่วงแรกคอนกรีตมีอัตราการขยายตัวมากที่สุดคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบ เนื่องจากการดูดซับน้ำผ่านโพรงคาพิวลาไร่มากทำให้การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นและขยายตัวได้ดี ในขณะที่ช่วงหลังซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณและขนาดของโพรงคาพิวลาไรลดลง ดังนั้นน้ำจากภายนอกจึงเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในคอนกรีตลดลง ซึ่งหมายถึงการขยายตัวที่ลดลงตามลำดับ

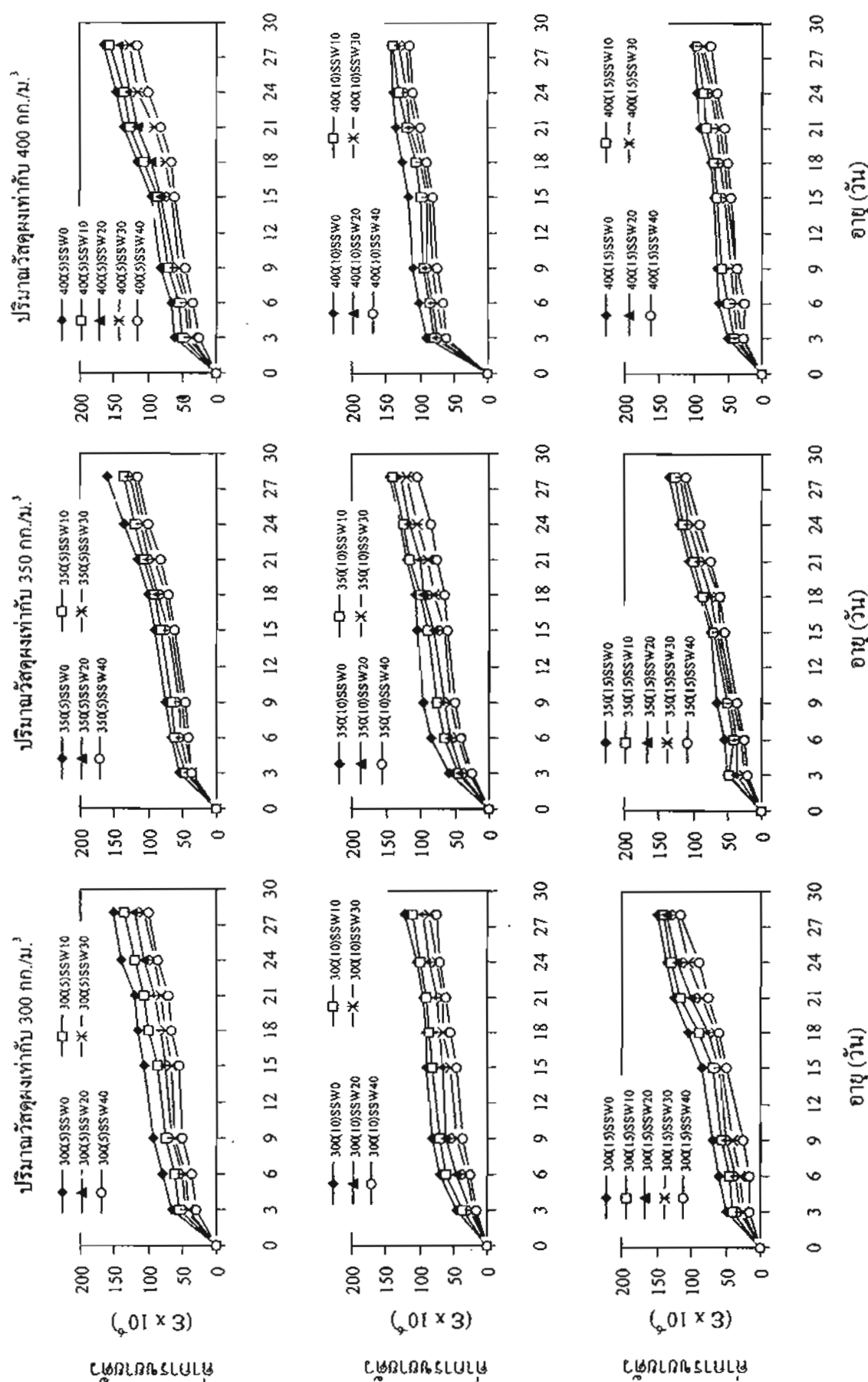
เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่าปริมาณวัสดุผง (ปูนซีเมนต์และผงฝุ่นทรายได้แบบ) ในคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 350 และ 400 กก./ม.³ พบว่าค่าการขยายตัวในน้ำมีค่าลดลง ซึ่งเป็นเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความตึงน้ำของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ตามไปด้วย ดังนั้นน้ำจากภายนอกเข้าสู่ภายในได้ยากขึ้น ประกอบการที่คอนกรีตมีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งทำให้ออกไซด์ที่ก่อให้เกิดการขยายตัวถูกขังอยู่ภายในโครงสร้างของเพสต์และทำปฏิกิริยาแล้วขยายตัวได้ลดลงมาก

สำหรับในประเด็นการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในคอนกรีตหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัว

เริ่มต้นจากเท่ากับ 5 ± 0.5 เป็นเท่ากับ 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของการขยายตัวของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาของการบ่มในน้ำเพิ่มขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ในขณะที่คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าการขยายตัวในน้ำลดลงตามลำดับ เมื่อสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลในลักษณะเดียวกันที่กล่าวข้างต้น

สำหรับกรณีที่คอนกรีตมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันจะเห็นว่าค่าการขยายตัวในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการเพิ่มของปริมาณน้ำคอนกรีตทำให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้นซึ่งหมายถึง การเพิ่มขึ้นของจำนวนโพรงคาพิวลารีและรวมไปถึงขนาดของโพรงดังกล่าวทำให้โมเลกุลของน้ำจากภายนอกสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในเนื้อพาสต์และทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และแคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free CaO) ได้น้อยลง ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเกิดการขยายตัวมีค่าลดลง

เนื่องจากในปัจจุบันไม่มีมาตรฐานในการพิจารณาขอบเขตที่ยอมรับได้ของการขยายตัวในน้ำของคอนกรีตในช่วงสั้นๆ (ใช้เวลาของการบ่มในช่วง 28 วันแรกหลังการหล่อ) ประกอบกับการทดสอบค่าขยายตัวในน้ำเป็นผลพลอยได้ของการทดสอบหาค่าการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ดังนั้นจึงสรุปได้เพียงแนวโน้มของการขยายตัวของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติซึ่งผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ในสัดส่วนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการขยายตัวในน้ำมีค่าลดลง

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.

ภาพที่ 5.25 ค่าการขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมผงฟูทรายใช้แบบกลุ่ม SSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

5.4.2 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

5.4.2.1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีต (Length Change)

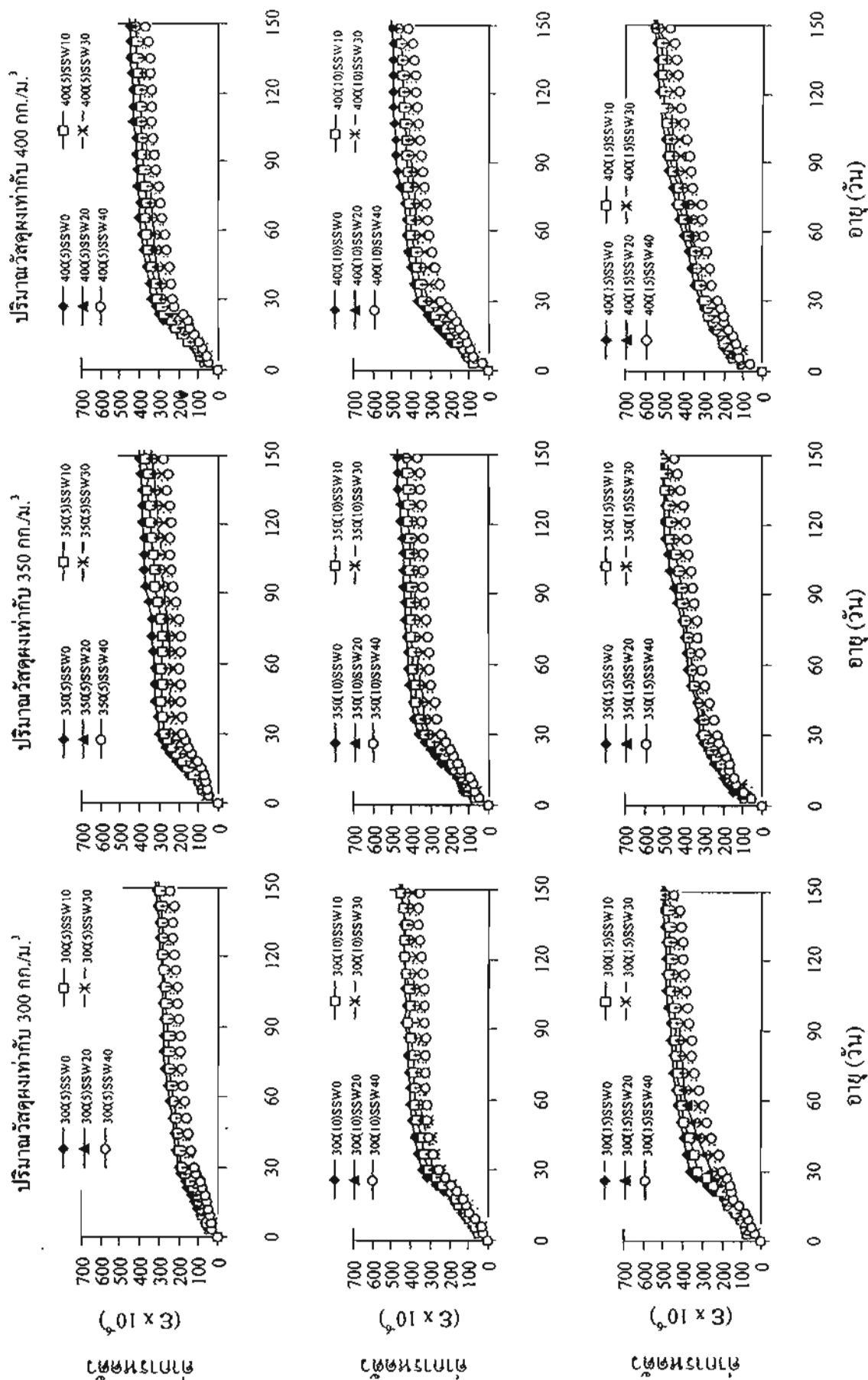
การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเป็นการหดตัวที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียน้ำหรือความชื้น (Moisture) ซึ่งประกอบด้วยน้ำอิสระ (Free Water) และน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และอยู่ในสภาวะอากาศที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Water) และเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible) กล่าวคือ เมื่อนำคอนกรีตไปผ่านสภาวะที่มีความชื้นจะไม่สามารถทำให้คอนกรีตกลับมามีปริมาตรเท่ากับปริมาตรเริ่มต้น (Neville, A.M., 1999, pp. 426 – 427) โดยผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW แสดงในภาพที่ 5.26 สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ พบว่าสำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300 กก./ม.³ มีค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาของการบ่มในสภาวะที่ทำการควบคุมอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 60 ± 5 เพิ่มขึ้นทั้งคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ โดยในช่วง 30 วันแรก ค่าการหดตัวของคอนกรีตมีอัตราการหดตัวมีค่าสูง (ความชันของค่าการหดตัวกับเวลา) อันเนื่องมาจากในช่วงแรกน้ำอิสระซึ่งมีปริมาณมากสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกโดยผ่านทางช่องคาพิลลารี (Capillary) ได้ง่าย จนกระทั่งเมื่อน้ำอิสระมีปริมาณลดลงทำให้น้ำที่เป็นส่วนประกอบภายในโครงสร้างของเจลและแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) แทรกออกมา แต่กระนั้นความสามารถในการเคลื่อนตัวออกมามีค่าต่ำมาก (Neville, A.M., 1999, pp. 427) เนื่องจากถูก โครงสร้างของเจลและแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลาของการทำการปฏิบัติที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งไว้ (Restrained) ประกอบจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ทำให้ช่องคาพิลลารีมีขนาดเล็กลง น้ำหรือความชื้นจึงเคลื่อนที่ออกได้ยากขึ้น ส่งผลให้ การหดตัวแบบแห้งจึงมีอัตราของการหดตัวลดลงจนกระทั่งมีแนวโน้มคงที่

เมื่อพิจารณาการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีแนวโน้มนៃค่าการหดตัวน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของผงฝุ่นทรายไส้แบบทำให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณและขนาดของช่องคาพิลลารีลดลง ปริมาณของน้ำจะออกสู่ภายนอกได้น้อยลง ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุผงจาก 300 กก./ม.³ เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ค่าการหดตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของซีเมนต์เฟสที่เกิดจากการทำการปฏิบัติไฮเดรชัน (Neville, A.M., 1999, pp. 430) ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวที่เพิ่มขึ้น

แต่กระนั้นการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณน้ำเพื่อทำให้ค่าการยุบตัวเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ด้วยปัจจัยที่ตรงกันข้ามจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำที่ขึ้นทำให้การหดตัวมีการเปลี่ยนแปลงลดลง

สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 เป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าแนวโน้มของค่าการหดตัวมีลักษณะเช่นเดียวกันกับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. กล่าวคือ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น คอนกรีตมีค่าการหดตัวที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรกคอนกรีตมีอัตราในการหดตัวสูงและมีค่าลดลงตามลำดับจนการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราการหดตัวมีค่าคงที่เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนปริมาณผงฟูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้คอนกรีตมีค่าการหดตัวแบบแห้งลดลงตามลำดับ ในขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นมากขึ้นหรือปริมาณน้ำในส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลในหลายประการตั้งแต่ การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำทำให้ปริมาณของมวลรวมทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดซึ่งทำหน้าที่ในการยึดรั้งการหดตัวที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตลดลง ประกอบกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมีผลต่อความพรุนของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งคือ ขนาดและจำนวนของโพรง คาพิวลารีที่ความชื้นสามารถเคลื่อนตัวออกจากคอนกรีตมีมากขึ้นทำให้ค่าการหดตัวมีค่าเพิ่มขึ้น

ในกรณีของการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณการแทนที่ของผงฟูนทรายไส้แบบในปูนซีเมนต์ทำให้ค่าการหดตัวมีค่าลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะผงฟูนทรายไส้แบบเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการหดตัวแบบแห้งในลักษณะเช่นเดียวกันกับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.

ภาพที่ 5.26 ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใช้แบบกลุ่ม SSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

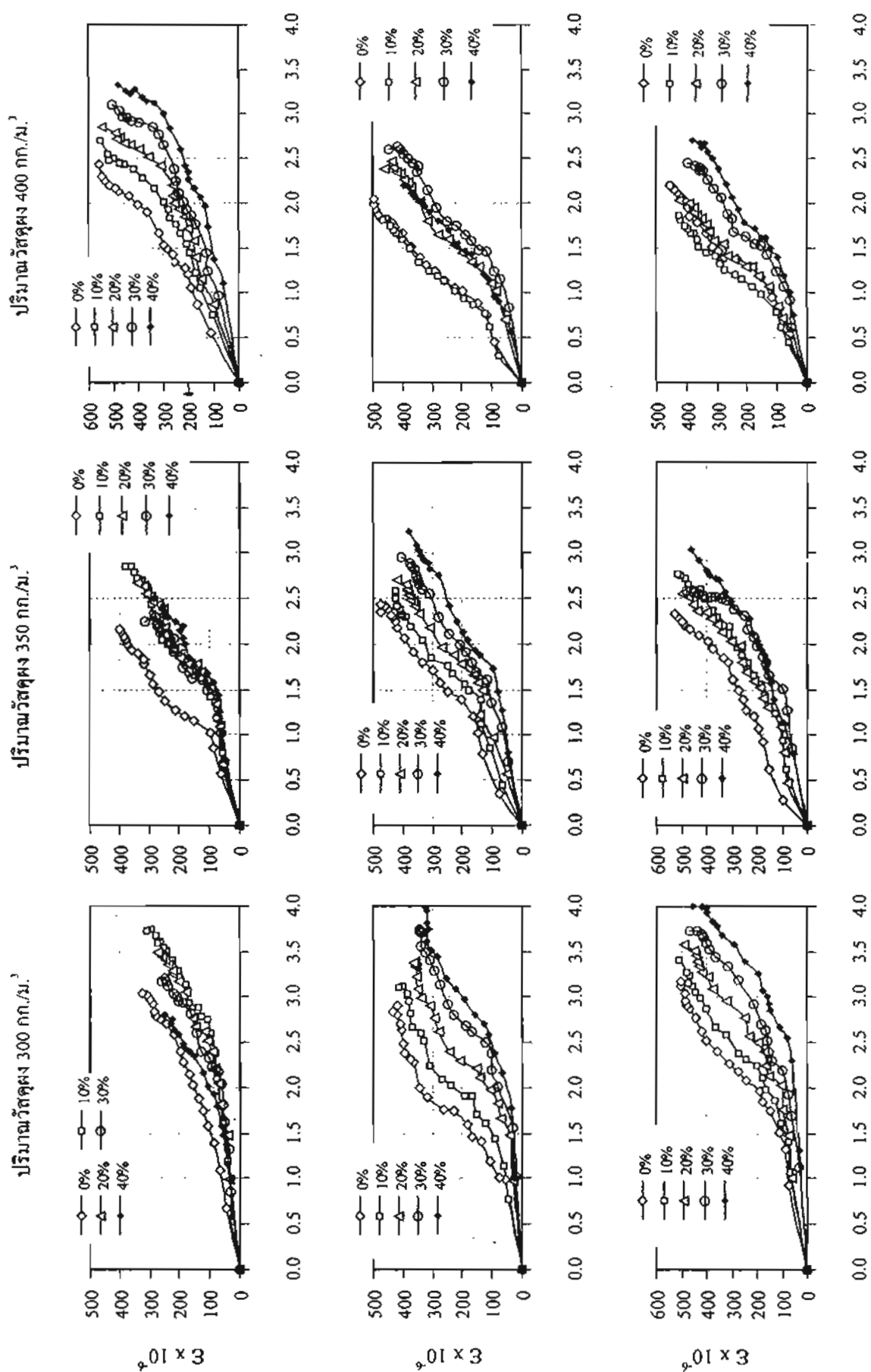
5.4.2.2 การหดตัวแบบแห้งเนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักจากการระเหยของน้ำ (Drying Shrinkage due to Weight Loss from Water Evaporation)

การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) เกิดขึ้นจากการสูญเสียน้ำ (Water) หรือ ความชื้น (Moisture) จากภายในคอนกรีตให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งมีความชื้นที่ต่ำกว่า โดยจากความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของน้ำหนักน้ำที่สูญเสียบนน้ำหนักตัวอย่างกับค่าการหดตัวแบบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 5.27 สามารถสรุปโดยภาพรวมคือ เมื่อปริมาณการสูญเสียน้ำที่เพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตมีค่าการหดตัวแบบแห้งในรูปของความเครียด ($\epsilon \times 10^{-6}$) เพิ่มขึ้น ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของคอนกรีตที่ลดลงไม่เท่ากับปริมาณของน้ำที่สูญเสียน้ำทั้งนี้ เป็นผลเนื่องจากการยืดยืดของทั้งโครงสร้างเพสต์และมวลรวมที่ด้านทานการหดตัวที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบที่ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำเท่ากัน พบว่าเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวแบบแห้งเมื่อมีการสูญเสียน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งดูตัวอย่างได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. ที่ค่าการสูญเสียน้ำเท่ากับร้อยละ 1.5 คอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ มีค่าการหดตัวแบบแห้งเท่ากับ 100, 272 และ 305 ไมครอน ตามลำดับ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตเท่ากับเป็นการลดปริมาณของมวลรวมลดลงไปด้วย โดยปกติเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเสีรูปร่างของวัสดุทั้งสอง มวลรวมจะมีความสามารถในการต้านต่อการเสีรูปร่างหรือมีเสถียรภาพเชิงปริมาตร (Volume Stability) ได้ดีกว่าเพสต์ เนื่องด้วยการจัดเรียงตัวของโครงสร้างมวลรวมเป็นระเบียบกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างของเพสต์ที่มีไม่เป็นระเบียบสูงมาก ดังนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานต่อการเสีรูปร่างเนื่องจากสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงการหดตัวแบบที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาในประเด็นการเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ปริมาณน้ำ) ที่เพิ่มขึ้น พบว่าการเพิ่มค่าการยุบตัวมีผลทำให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการเพิ่มปริมาณในคอนกรีตทำให้ความพรุนของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือปริมาณและขนาดโพรงคาพิวูลาร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณความชื้นจากภายในคอนกรีตสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกผ่านปริมาณและขนาดของโพรงที่เพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวแบบแห้งมีมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุผงในคอนกรีตเท่ากับ 400 กก./ม.³ และมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 ซม. เป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. มีค่าการหดตัวแบบแห้งที่ค่าร้อยละของการสูญเสียน้ำของคอนกรีตเท่ากับร้อยละ 1.5 เท่ากับ 325, 382 และ 425 ไมครอน ตามลำดับ เป็นต้น

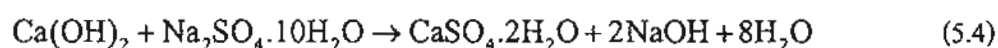
ในกรณีของคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ดังแสดงในภาพที่ 5.50 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำเดียวกัน คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบมีการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตลดลง ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิกของผงฝุ่นทรายได้แบบทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) มีปริมาณของเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้ปริมาณและขนาดของโพรงคาพิวลารีลดลง ดังนั้นปริมาณน้ำจะเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกได้จึงมีน้อยลง นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุผงจาก 300 กก./ม.³ เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ ตามลำดับนั้น ทำให้การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ค่าการหดตัวของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของซีเมนต์เฟสที่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Neville, A.M., 1999, p. 431) ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวที่เพิ่มขึ้นและปริมาณมวลรวมซึ่งต้านทานการหดตัวลดลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณน้ำเพื่อทำให้ค่าการยุบตัวเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. มีค่าเพิ่มขึ้นตามปัจจัยที่ตรงกันข้ามจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวมีการเปลี่ยนแปลงลดลง

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.



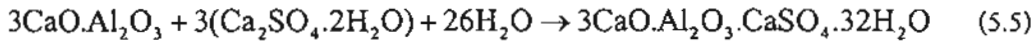
5.4.3 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต (Sulfate Attack)

ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากสารละลายซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้น 50 มก./ล. โดยทำการควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในช่วง 6 ถึง 8 ด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) (ความเป็นกรดด่างของสารละลายซัลเฟตในธรรมชาติ อาทิเช่น ในน้ำใต้ดินมีค่าอยู่ในช่วง 6 ถึง 8) โดยความต้านทานเนื่องจากสารละลายซัลเฟตสามารถวัดในรูปของการขยายตัวเชิงเส้น (Linear Expansion) ของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ดังแสดงในภาพที่ 5.28 พบว่าคอนกรีตที่ผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบมีค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตน้อยกว่าคอนกรีตปกติ โดยสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงซึ่งค่าการขยายตัวในช่วงประมาณ 130 วันแรก มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ทั้งคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ทั้งนี้เพราะในช่วงแรกที่ปริมาณของยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และเอ็ททริงไกต์มีน้อยกล่าวคือ ปฏิริยาของโซเดียมซัลเฟตกับเพสต์ในคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ โดยเริ่มจากการเกิดยิปซัม โดยโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดผลิตภัณฑ์เป็นยิปซัม ดังแสดงในสมการที่ (5.4) ซึ่งในช่วงแรกผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) มีปริมาณน้อยและส่วนใหญ่ถูกกักอยู่กับโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟตมีน้อย นอกจากนั้น พบว่าการเพิ่มขึ้นของผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง อันเนื่องมาจากการลดลงของปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงยิ่งลดลงตามลำดับ



สำหรับในช่วงที่ 2 (หลังจาก 130 วัน (โดยประมาณ)) พบว่าคอนกรีตมีค่าขยายตัวเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็วมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงแรก โดยเป็นลักษณะแบบทันทีทันใด (Expansion Increase Suddenly) อันเป็นผลของปริมาณของยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และเอ็ททริงไกต์ โดยเฉพาะเอ็ททริงไกต์ ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวมากขึ้น (โดยเฉลี่ยสารประกอบเอ็ททริงไกต์มีปริมาณเพิ่มขึ้นร้อยละ 104 ถึง 121 ของปริมาตรเริ่มต้น (Bensted, J. and Barnes, P., 2002, pp. 204 – 205)) โดยเอ็ททริงไกต์ (AFt-phase) ได้จากยิปซัมที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่

- (5.4) จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เกิดเอ็ททริงไกต์ ดังแสดงในสมการที่ (5.5) จึงส่งผลให้การขยายตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นกับ 5 ± 0.5 ซม. และปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม³. พบว่าเมื่อคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งเป็นผลของการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะองค์ประกอบหลักที่เป็นไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3$) ซึ่งทำปฏิกิริยากับซัลเฟตในขั้นตอนที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นเอ็ททริงไกต์ ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 32H_2O$) โดยเฉพาะเมื่อมีซัลเฟตจากภายนอกในระหว่างการบ่มในสารละลายซัลเฟตจึงยังทำให้มีเอ็ททริงไกต์เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและมีปริมาณมากในที่สุด อันจะนำมาซึ่งการขยายตัวของคอนกรีต ซึ่งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นทรายได้แบบจะเห็นว่าถึงแม้ปริมาณของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีค่าร้อยละ 3.32 (จากผลการทดสอบในครั้งที่ 1 ในตารางที่ 5.1) ในขณะที่ปูนซีเมนต์มีค่าร้อยละ 3.30 แต่กระนั้นผงฝุ่นทรายได้แบบมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีปริมาณร้อยละ 1.73 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์มาก (ร้อยละ 66.28) ทำให้การขยายตัวจากการทำปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตซึ่งเป็นสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ลดลงตามลำดับตามปริมาณของผงฝุ่นทรายได้แบบที่เพิ่มขึ้น

สำหรับอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุผงจาก 300 เป็น 350 และ 400 กก./ม³ พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้การขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลของการที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3$) มีปริมาณเพิ่มขึ้น

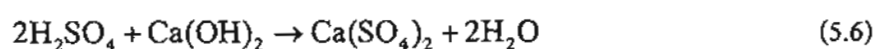
เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 เป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าแนวโน้มของการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็นไปลักษณะเดียวกัน โดยคอนกรีตที่มีสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น แต่กระนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นซึ่งก็คือปริมาณน้ำในคอนกรีตที่มีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทำให้การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อันเนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้นอันส่งผล

ค่าไอออนของซัลเฟตที่สามารถเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและทำปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดการขยายตัวได้เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำทำให้น้ำอิสระในคอนกรีตเพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีค่าความสามารถในการละลาย (Solubility) ที่สูงละลายแล้วอยู่สถานะของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่พร้อมจะทำปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ได้ดียิ่งขึ้น

5.4.4 การกระทำเนื่องจากกรด (Acid Attack)

5.4.4.1 การกระทำเนื่องจากกรดซัลฟริก (Sulfuric Acid Attack)

ผลการทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟริกในรูปของอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ) ของคอนกรีตเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่กำหนดค่าการดูดตัวเริ่มต้นและปริมาณปูนซีเมนต์ ในคอนกรีตเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และ 300 กก./ม.³ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 5.29 พบว่าการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 5.6 กล่าวคือ เมื่อทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงเนื่องจากสัดส่วนของปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับกรดซึ่งก็คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ลดลง ด้วยเหตุนี้ทำให้ปริมาณสารประกอบดังกล่าวเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ที่ทำให้คอนกรีตเกิดการกัดกร่อนลดลงตามไปด้วย และจากความสามารถในการละลาย (Solubility) ของแคลเซียมซัลเฟตที่มีค่าน้อย (0.256 กรัมในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้เมื่อเกิดแคลเซียมซัลเฟตที่ผิวหน้าคอนกรีตจะเป็นการปิดกั้นให้อิออนของกรดที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น นอกจากนั้นองค์ประกอบหลักของผงฝุ่นทรายไส้แบบเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ทำให้ยังเป็นการลดสารประกอบแคลเซียมของคอนกรีตทั้งที่มาจากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต) และมวลรวมหยาบ (หิน) ให้ลดลงทำให้โดยรวมกรดทำปฏิกิริยาได้ลดลง ส่งผลให้การกัดกร่อนลดลงตามลำดับ



ในกรณีของการกัดกร่อนเนื่องจากกรด พบว่าในช่วงแรกอัตราการกัดกร่อนในรูปอัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าสูงและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุของการแช่ในสารละลายกรดมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะในช่วงแรกปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (สารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับกรด) มีอยู่เป็นจำนวนมากและโดยปกติแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถละลายออกมาสู่ภายนอกได้ดีในช่วงแรกทำให้อิออนของกรดเข้าทำปฏิกิริยาได้มาก ในขณะที่เมื่อเวลาในการแช่ในสารละลายกรดเพิ่มขึ้นอิออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ที่ละลายออกสู่ภายนอกทำให้สารละลายอยู่ในสถานะอิ่มตัว (Saturated Solution) และพบว่าในช่วงแรกที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ละลายออกสู่ภายนอกจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระที่แตกตัวแล้ว เมื่อสารประกอบดังกล่าว

ละลายออกหมดเหลือเพียงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีโครงสร้างติดกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งละลายออกมาได้ยากกว่า ส่งผลให้การละลายลดลง กรดจึงทำปฏิกิริยาได้น้อยลง

เมื่อพิจารณาที่อายุของการแช่ในสารละลายกรดเพิ่มขึ้นทำให้การกัดกร่อนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสังเกตเห็นว่าตั้งแต่ที่อายุของการแช่ในกรดเท่ากับ 7 วัน คอนกรีตที่ผสมผงปูนทรายใส่แบบมีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตปกติ และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของวัสดุผงในคอนกรีตเป็น 350 และ 400 กก./ม.³ ทำให้การสึกกร่อนของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับกรดได้เพิ่มขึ้น

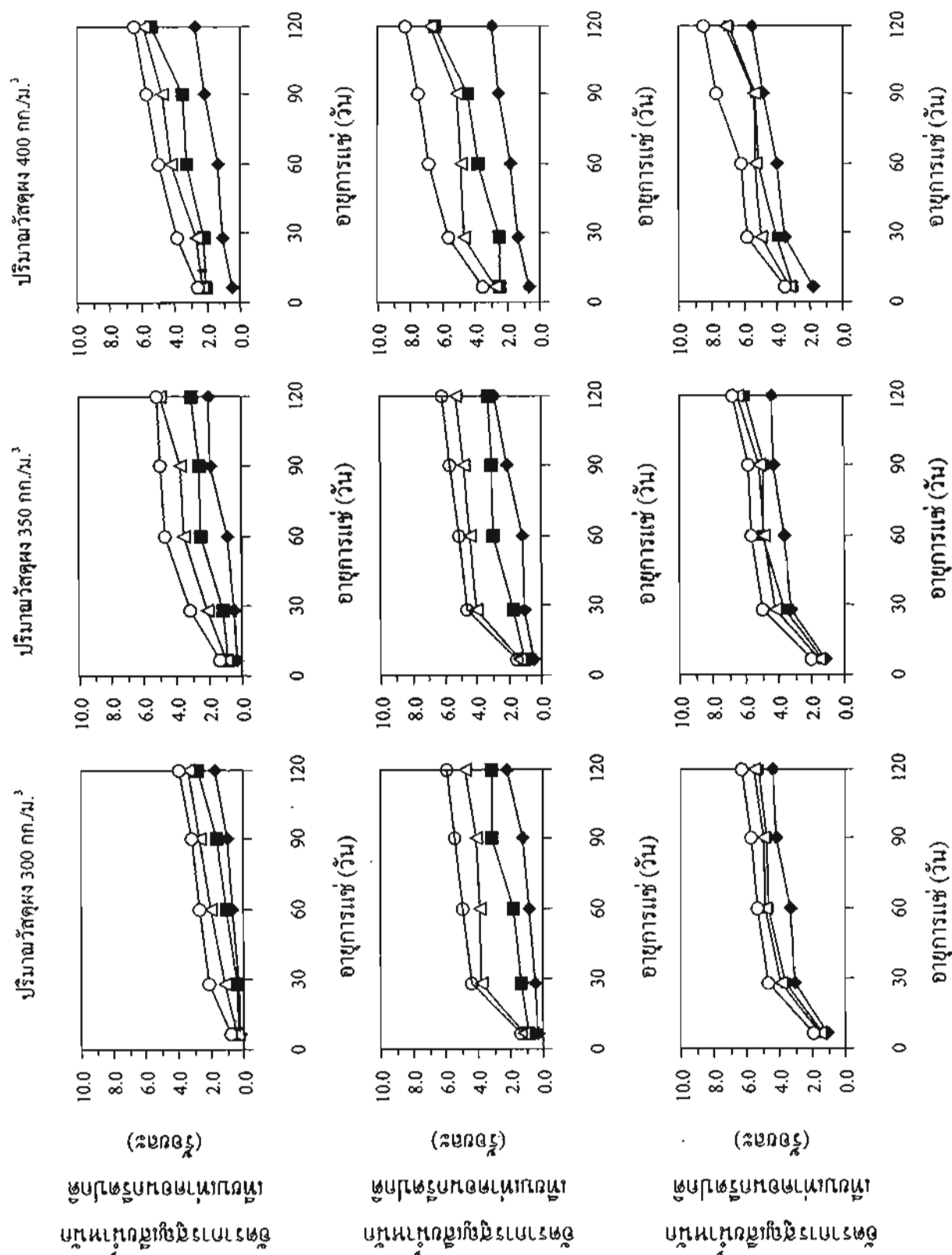
สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นเป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ การเพิ่มปริมาณน้ำในคอนกรีตจะทำให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันจะส่งผลต่อจำนวนและปริมาณโพรงคาพิลลารี (โพรงที่น้ำและอากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ และเป็นมีขนาดใหญ่มากที่สุดที่เกิดขึ้นในคอนกรีต) ในคอนกรีตทำให้กรดสามารถผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น นอกเหนือจากการที่กระทำที่ผิวของคอนกรีตสัมผัสกับกรด และเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณทำให้ในคอนกรีตมีน้ำอิสระ (Free Water) เพิ่มขึ้น จากการเพิ่มขึ้นดังกล่าวทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งโดยปกติมีความสามารถในการแตกตัวได้สูง โดยแตกตัวออกเป็นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) อันจะช่วยเสริมการทำปฏิกิริยากับไอออนของกรดได้ ดังนั้นค่าการกัดกร่อนจึงเพิ่มขึ้น

สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น พบว่าคอนกรีตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามปริมาณผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในสมการที่ 5.6 ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น) ทำให้อัตราค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามความพรุนของโครงสร้างของวัสดุที่เพิ่มขึ้นทำให้กรดสามารถเข้าทำลายโครงสร้างของคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น

ร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนัก

○ ร้อยละ 10 △ ร้อยละ 20 ■ ร้อยละ 30 ◆ ร้อยละ 40

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.



ภาพที่ 5.29 อัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการครัดตัวปริกเทียบท่าคอนกรีตปกติของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW

5.4.4.2 การกระทำเนื่องจากกรดอะซิติก (Acetic Acid Attack)

จากภาพที่ 5.30 แสดงค่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดอะซิติก (CH_3COOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 นอร์มอลิตี (ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2.56 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ พบว่าแนวโน้มของความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนมีแนวโน้มลักษณะเดียวกับการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกกล่าวคือ ในช่วงแรกของการแช่ในสารละลายกรดมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงและจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น นอกจากนั้นจะเห็นว่าการเพิ่มร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ทำให้เพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดอะซิติกได้ดี ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (5.7) พบว่าการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้กรดทำปฏิกิริยาได้ลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกมีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทำปฏิกิริยากับกรดได้แคลเซียมอะซิเตต ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้มาก (52.0 กรัม ในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดการชะล้างได้ง่าย อันส่งผลให้อิออนของกรดสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง



สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นเป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ พบว่าค่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการคือการเพิ่มปริมาณน้ำในคอนกรีตทำให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันส่งผลต่อจำนวนและปริมาณโพรงคาพิลลารี (โพรงที่น้ำและอากาศสามารถผ่านเข้าออกได้และเป็นมีขนาดใหญ่มากที่สุดที่เกิดขึ้นในคอนกรีต) ในคอนกรีตทำให้กรดสามารถผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น นอกเหนือจากการที่กระทำที่ผิวของคอนกรีตสัมผัสกับกรด และเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวทำให้ในคอนกรีตมีน้ำอิสระเพิ่มขึ้น จากการเพิ่มขึ้นดังกล่าวทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งโดยปกติมีความสามารถในการแตกตัวได้สูง โดยแตกตัวออกเป็นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) ซึ่งช่วยเสริมการทำปฏิกิริยากับไอออนของกรดได้ ดังนั้นการกัดกร่อนจึงเพิ่มขึ้น

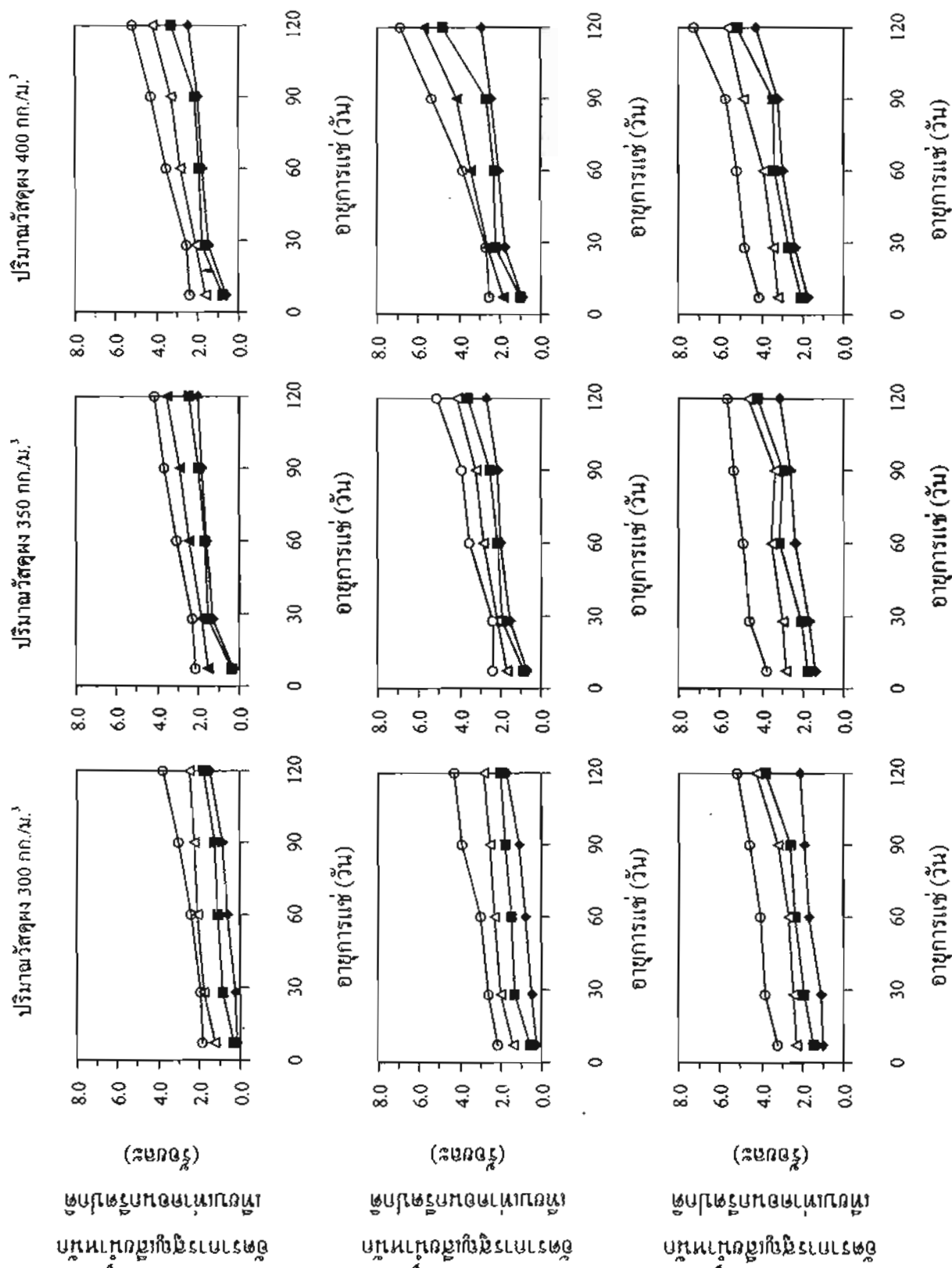
สำหรับกรณีที่คอนกรีตมีปริมาณวัสดุผงเพิ่มขึ้นเป็น 300 และ 400 กก./ม.³ พบว่าค่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของผงฝุ่นทรายไส้แบบเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพราะการที่คอนกรีตมีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้มีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นมากขึ้น โดยเฉพาะปริมาณ

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับกรดได้เพิ่มขึ้น แต่กระนั้นการที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นยังทำให้มีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้กรดเข้าไปทำลายได้น้อยลง ในขณะที่เมื่อทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักลดลงตามลำดับ ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น

สำหรับกรณีของคอนกรีตที่มีค่าการยุบเพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 ซม. เป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าค่าการยุบที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะการเพิ่มขึ้นของปริมาณทำให้โครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีความพรุนเพิ่มขึ้น ประกอบกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำทำให้ปริมาณรวมทั้งขนาดของโพรงคาพิลลารีมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) จากค่าการยุบตัวเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นในโพรงคาพิลลารีมากขึ้นส่งผลให้อิออนของกรดสามารถละลายเข้าไปภายในคอนกรีต จนทำให้โครงสร้างภายในถูกทำลาย นอกเหนือจากการกัดกร่อนของกรดที่ผิวของคอนกรีต

ร้อยละ 10 $\triangle$ ร้อยละ 20 $\blacksquare$ ร้อยละ 30 $\blacklozenge$ ร้อยละ 40

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.



ภาพที่ 5.30 อัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแทรกซึมของน้ำของคอนกรีตที่บ่มภายใต้แบบกลุ่ม SSW

5.5 สรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ที่มีต่อคอนกรีต

จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลกระทบของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จสามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.5.1 คุณสมบัติพื้นฐานของผงฝุ่นทรายใต้แบบ

คุณสมบัติพื้นฐานของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากระบวนการหล่อเครื่องยนต์ประกอบด้วย องค์ประกอบเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ และศักยภาพเบื้องต้นในงานซีเมนต์และคอนกรีตมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผงฝุ่นทรายใต้แบบ (Foundry Sand Powder) ซึ่งได้จากระบวนการทำให้แบบหล่อภายในอาทิเช่น ลูกสูบ เป็นต้น ได้ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) เป็นผลพลอยได้ โดยมีองค์ประกอบเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่ระหว่างร้อยละ 83 ถึง 90 ในขณะที่แคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีปริมาณน้อยมาก (ร้อยละ 1.73) อนุภาคมีน้ำตลพื้นผิวขรุขระและมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 102.85 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (63.44 ไมโครเมตร)

สำหรับศักยภาพของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ทางด้านซีเมนต์ โดยพิจารณาจากค่าดัชนีกำลัง (Strength Index) เมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW มีค่าเท่ากับร้อยละ 78 และ 82 ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ มากกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ (ร้อยละ 75 ทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่สามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้

5.5.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้กลุ่ม Shell Sand Waste (SSW)

ผลกระทบของการใช้ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จปกติที่ไม่ผสมสารเคมีผสมเพิ่ม (Admixtures) โดยทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในสภาพสด

1.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (Unit Weight) ในสภาพสด โดยคอนกรีตผสมเสร็จที่มีส่วนผสมของผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีค่าหน่วยน้ำหนักที่ทุกอัตราส่วนของปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่าคอนกรีตปกติในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 1.6 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของผงฟูนทรายได้แบบเพิ่มขึ้น โดยค่าหน่วยน้ำหนักที่ลดลงไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเสร็จ

1.2 ค่าปริมาณน้ำ (Water Requirement) ที่ทำให้คอนกรีตผสมเสร็จมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ โดยการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความต้องการน้ำที่ทำให้เกิดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 1.1 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ซึ่งมีค่าน้อยมากและไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเสร็จ

1.3 คอนกรีตซึ่งผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีอัตราการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) มากกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่ากำลังรับแรง เนื่องจากการดูดซับน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีความพรุนสูงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงมีค่าลดลง

1.4 คอนกรีตเสร็จผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้าย (Initial and Final Setting Times) เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยสามารถสรุประยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้นได้ในตารางที่ 5.6

2. คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW

2.1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ (Compressive Strength) ที่ทุกค่าการยุบตัวเริ่มต้น (5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม.) และปริมาณวัสดุผง (300, 350 และ 400 กก./ม.³) และทุกอายุมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตปกติและมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณการแทนที่ของผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่ออายุของคอนกรีตภายใต้การบ่มในน้ำเพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมผงฟูนทรายได้แบบมีการพัฒนาอย่างค่อยเป็น

2.2 กำลังดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength) ของคอนกรีตผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตปกติและมีแนวโน้มของกำลังลดลง เมื่อสัดส่วนการแทนที่ของผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (f_c) และแรงดึงแบบผ่าซีก (f_t) ของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW เป็นไปตามสมการที่ (5.3)

ตารางที่ 5.6

ระยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW

ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	ค่าการยุบตัวเริ่มต้น ± ค่าความ คลาดเคลื่อน (ชม.)	ปริมาณผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในคอนกรีต (กก./ม. ³) ร้อยละการแทนที่ของผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์									
		ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น [เวลาที่เพิ่มขึ้น] (นาที)					ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย [เวลาที่เพิ่มขึ้น] (นาที)				
300	ค่าการยุบตัว	0[0]	30[10]	60[20]	90[30]	120[40]	0[0]	30[10]	60[20]	90[30]	120[40]
	5 ± 0.5	136[0]	147[11]	149[13]	151[15]	155[17]	196[0]	203[7]	204[8]	214[18]	217[21]
	10 ± 0.5	145[0]	150[5]	157[12]	157[14]	164[12]	207[0]	212[5]	215[8]	220[13]	231[24]
	15 ± 0.5	155[0]	162[7]	165[10]	167[12]	175[17]	218[0]	226[8]	232[14]	242[24]	251[33]
350	ค่าการยุบตัว	0[0]	35[10]	70[20]	105[30]	140[40]	0[0]	35[10]	70[20]	105[30]	140[40]
	5 ± 0.5	105[0]	110[5]	121[16]	124[19]	125[20]	169[0]	177[8]	184[15]	195[26]	200[31]
	10 ± 0.5	138[0]	140[2]	143[5]	147[9]	154[16]	182[0]	191[9]	196[14]	206[24]	215[33]
	15 ± 0.5	143[0]	152[9]	154[11]	157[14]	165[22]	201[0]	209[8]	216[15]	229[28]	235[34]
400	ค่าการยุบตัว	0[0]	40[10]	80[20]	120[30]	160[40]	0[0]	40[10]	80[20]	120[30]	160[40]
	5 ± 0.5	89[0]	103[4]	107[8]	112[13]	115[16]	144[0]	148[4]	169[25]	173[29]	180[36]
	10 ± 0.5	127[0]	134[7]	135[8]	142[15]	145[18]	162[0]	172[10]	177[15]	183[21]	190[28]
	15 ± 0.5	135[0]	140[5]	141[6]	143[8]	150[15]	176[0]	187[11]	192[16]	198[22]	209[33]

$$\begin{aligned}
 f_t &= 0.401f_c^{0.653} \text{ ที่ } R^2 = 0.8663 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 5 \pm 0.5 \text{ ซม.} \\
 f_t &= 0.323f_c^{0.707} \text{ ที่ } R^2 = 0.9366 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 10 \pm 0.5 \text{ ซม.} \\
 f_t &= 0.289f_c^{0.736} \text{ ที่ } R^2 = 0.8774 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 15 \pm 0.5 \text{ ซม.}
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

2.3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) โดยเมื่อร้อยละของการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง นอกจากนี้ คอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐานของ American Concrete Institute (ACI 318 (Building Code Requirements for Structural Concrete)) โดยมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานในช่วงไม่เกินร้อยละ 30 เนื่องจากการที่ผงฝุ่นทรายได้แบบเป็นวัสดุอ่อน (Soft Material)

3. คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW)

3.1 การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water) ของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการขยายตัวในน้ำจนถึงที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลง

3.2 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ในรูปของการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีต (Length Change) พบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีแนวโน้มของค่าการหดตัวน้อยกว่าคอนกรีตปกติ โดยสรุปการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบที่อายุ 28 วัน มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด (ความเครียด (E) ไม่เกิน 530 ไมครอน)

3.3 คอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากสารละลายโซเดียม (Na_2SO_4) ต่ำกว่าคอนกรีตปกติ

3.4 ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) ที่ความเข้มข้น 1 นอร์มอลิตี (N) ของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีความทนทานในรูปของค่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่อายุน้อยกว่า 120 วัน มากกว่าคอนกรีตปกติ

บทที่ 6

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลกระทบจากการใช้ผงฝุ่นทรายใต้แบบ

กลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ผสมคอนกรีต

6.1 คุณสมบัติพื้นฐานของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) และทรายแม่น้ำประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) พื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของความละเอียดด้วยวิธีเบลน (Blaine Fineness) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) การกระจายขนาดผลของอนุภาค (Particle Size Distribution) การวิเคราะห์ระดับจุลภาค (Microscopic Analysis) ได้แก่ ภาพขยายลักษณะของอนุภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ที่ได้จากการสุ่มเก็บตัวอย่างเมื่อเริ่มต้นทำการทดสอบ (ครั้งที่ 1: มกราคม พ.ศ. 2546) เปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ แสดงได้ในตารางที่ 6.1 พบว่าผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เนื่องจากวัตถุดิบในการผลิตเป็นทรายจากประเทศออสเตรเลียซึ่งมีสารประกอบดังกล่าวถึงร้อยละ 85.88 ทั้งนี้เพราะผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW เป็นผลพลอยได้จากการทำแบบหล่อภายนอกซึ่งต้องการความแข็งแรงมากกว่าแบบหล่อภายใน ดังนั้นจึงต้องเติมสารผสมเพิ่มซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็กจำพวกเฟอร์โรแมงกานีสและเฟอร์โรโครเมียมในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นจากการที่ทรายใต้แบบแบบหล่อภายนอกต้องทนความร้อนของน้ำเหล็กในกระบวนการเทลงใต้แบบถึงอุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ทำให้ต้องใส่สารเชื่อมประสานจำพวกเรซินเพิ่มขึ้นอีก จึงส่งผลให้ปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ลดลง นอกจากนั้นผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 0.45 ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ (ร้อยละ 0.23)

สำหรับการเก็บตัวอย่างตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา (ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2546) โดยกระทำทุกๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 12 เดือน เพื่อนำมาตรวจสอบความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นทรายใต้แบบและคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นในการนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีต ดังแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 6.2 สรุปได้ว่าจากค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นทรายใต้แบบทั้งกลุ่ม GSW ไม่แตกต่างไปจากคุณสมบัติของผงฝุ่นทรายใต้แบบที่ได้จากการเก็บตัวอย่างเมื่อเริ่มต้นการศึกษาและนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญซึ่งได้แก่ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW มีค่าเฉลี่ยมากกว่าปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เพราะในกระบวนการทำแม่แบบ ดังที่แสดงในภาพที่ 2.1 จะเห็นว่าใต้แบบภายนอกจะผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,400 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิในการทดสอบหาค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ตามมาตรฐาน ASTM C 311 (Standard Test Method of Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Cement) ดังนั้นจึงไม่ควรปรากฏค่าของ LOI ที่ได้จากการทดสอบ ที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้คือ ประการแรก เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปใต้แบบ ทรายใต้แบบจะได้รับอุณหภูมิที่สูงมาก (1,400 องศาเซลเซียส) เพียงชั่วขณะที่ทำให้ปริมาณของคาร์บอนในส่วนผสมของทรายถูกกำจัดไปเพียงบางส่วนซึ่งมีความแตกต่างจากการทดสอบหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้จะเผาผงฝุ่นทรายใต้แบบที่อุณหภูมิ 950 ± 50 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ส่งผลการบ่อนที่ตกค้างอยู่สลายตัว ประกอบกับการปรับปรุงคุณสมบัติของทรายใต้แบบที่ต้องใส่สารเคมีผสมเพิ่ม เมื่อผ่านกระบวนการเทน้ำเหล็กและแกะใต้แบบออก ทรายใต้แบบส่วนที่ไม่ได้สัมผัสกับน้ำเหล็กจึงมีสารผสมเพิ่มตกค้างอยู่และจะสลายตัวไปเมื่อผ่านการทดสอบค่า LOI

ในกรณีของค่าความละเอียด (Fineness) ด้วยวิธีเบลน ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW มีค่าความละเอียดเท่ากับ 708 ซม.²/ก. ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลจากการปรับปรุงคุณภาพของใต้แบบภายนอกที่ต้องมีคุณสมบัติเชื่อมประสานอย่างดีและทนต่อน้ำเหล็กในขณะที่ทำการหล่อซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง 1,400 องศาเซลเซียส เมื่อหลังจากแกะทรายใต้แบบจึงทำให้เศษทรายส่วนใหญ่อยู่ในสถานะที่มีการเกาะยึดกันเป็นกลุ่มเม็ดทรายส่งผลให้ความละเอียดมีค่าต่ำดังที่ปรากฏ

ตารางที่ 6.1

องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) เปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ทรายแม่น้ำ (ร้อยละ)	ครั้งที่ 1 (ม.ค. 2546 ถึง ก.พ. 2546)	ครั้งที่ 2 (มี.ค. 2546 ถึง เม.ย. 2546)	ครั้งที่ 3 (พ.ค. 2546 ถึง มิ.ย. 2546)	ครั้งที่ 4 (ก.ค. 2546 ถึง ส.ค. 2546)	ครั้งที่ 5 (ก.ย. 2546 ถึง ต.ค. 2546)	ครั้งที่ 6 (พ.ย. 2546 ถึง ธ.ค. 2546)
1. ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO ₂)	89.36	77.05	70.46	73.19	75.22	73.46	74.59
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	4.92	1.58	9.27	8.05	8.02	7.81	7.79
3. ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	0.47	4.43	3.49	4.10	3.99	4.18	3.91
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.23	0.45	3.12	2.70	1.84	2.63	2.58
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.06	0.13	1.89	1.96	1.19	1.59	1.69
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	2.96	0.16	0.63	0.56	0.54	0.53	0.54
7. โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	2.41	0.17	1.97	1.78	1.62	1.48	1.59
8. ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก จากการเผาไหม้ (LOI)	0.54	1.00	1.78	1.36	1.44	1.89	1.29
คุณสมบัติทางกายภาพ	ทรายแม่น้ำ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
1. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.01	2.56	3.88	2.23	2.86	2.57	1.21
2. ความถ่วงจำเพาะ	2.58	2.57	2.57	2.59	2.60	2.56	2.57

หมายเหตุ ในการเก็บตัวอย่างผงฝุ่นทรายได้แบบกระทำทุกๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2546

ตารางที่ 6.2

ค่าสถิติแสดงความผันแปรขององค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายใต้แบบ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW	
	ค่าเฉลี่ย	SD
1. ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	74.00	2.219
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	7.09	2.753
3. ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	4.02	0.314
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	2.22	0.961
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.41	0.683
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.49	0.167
7. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	1.44	0.643
8. ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้	1.46	0.328
คุณสมบัติทางกายภาพ		
1. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	2.21	0.881
2. พื้นที่ผิวจำเพาะ (ความละเอียดด้วยวิธีเบลน (ชม. ² /ก.))	708	143
3. ความถ่วงจำเพาะ	2.58	0.021
4. ร้อยละค้ำตะแกรงร่อน		
- ขนาด 38 ไมโครเมตร	57.20	3.959
- ขนาด 45 ไมโครเมตร	54.67	1.447
- ขนาด 90 ไมโครเมตร	27.27	5.525

6.1.2 ลักษณะของอนุภาค

6.1.2.1 ทรายจากประเทศออสเตรเลีย (Australia Sand) ทรายแม่น้ำ และผงฝุ่นทราย ไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)

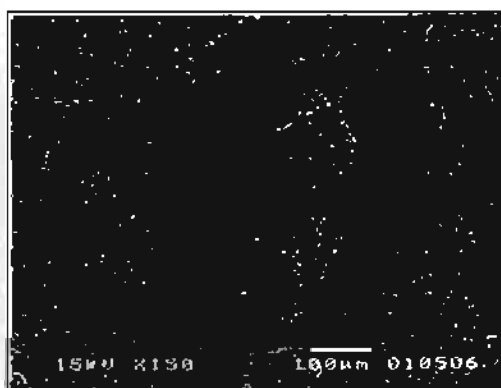
จากลักษณะอนุภาคของทรายที่ใช้ทำแบบหล่อทั้งแบบหล่อภายในและภายนอกซึ่งเป็นทรายที่นำเข้ามาจากประเทศออสเตรเลียด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ทรายแม่น้ำ และผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ดังแสดงในภาพที่ 6.1(ก) พบว่าที่กำลังขยาย 150 เท่า (ภาพที่ 6.1(ก)) ทรายมีลักษณะเป็นก้อนมีเหลี่ยมมุม พื้นผิวของอนุภาคทรายมีลักษณะค่อนข้างเรียบเช่นเดียวกับทรายแม่น้ำ (ภาพที่ 6.1(ข)) ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบมีขนาดเล็กกว่าทรายจากประเทศออสเตรเลียซึ่งแสดงว่าอนุภาคทรายมีการแตกออกเป็นชิ้นเล็กกลมากกว่า SSW อันเนื่องจากในกระบวนการทำแบบหล่อทรายดังกล่าวต้องผ่านอุณหภูมิถึง 1,400 องศาเซลเซียส ทำให้ผงฝุ่นทรายไส้แบบมีสีคล้ำออกเทาจนถึงเป็นสีทรายไหม้และมีพื้นผิวความขรุขระ ดังแสดงในภาพที่ 6.1(ค)



(ก) ทรายจากประเทศออสเตรเลีย



(ข) ทรายแม่น้ำ

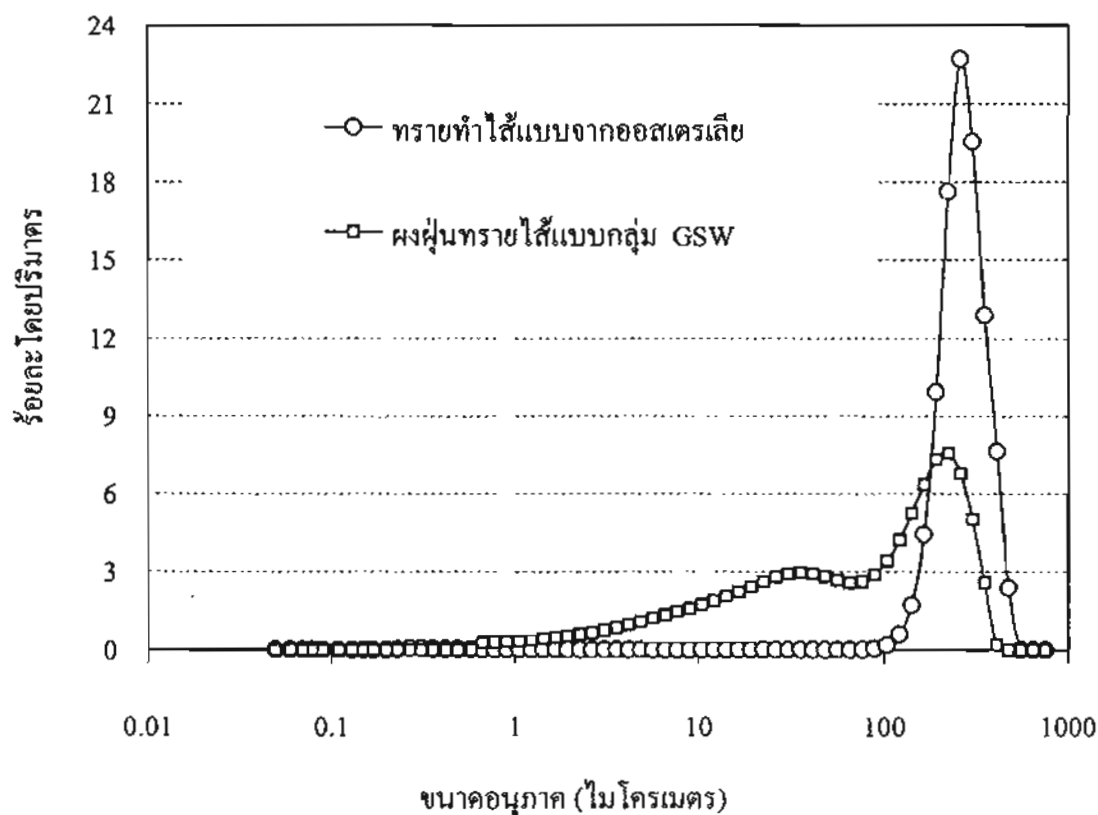


(ค) ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)

ภาพที่ 6.1 ลักษณะของอนุภาคทรายจากประเทศออสเตรเลีย (Australia Sand) ทรายแม่น้ำ และผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ที่กำลังขยาย 150 เท่า

6.1.3 การกระจายขนาดคละของอนุภาคผงฝุ่นทรายได้แบบ

ผลการทดสอบการกระจายขนาดคละของอนุภาคของปูนซีเมนต์และผงฝุ่นทรายได้แบบทั้งกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) แสดงในภาพที่ 6.2 ทรายวัตถุดิบจากประเทศออสเตรเลียมีอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงขนาด 100 ถึง 1000 ไมโครเมตร แต่เมื่อผ่านกระบวนการใช้งานได้ผงฝุ่นทรายได้แบบ พบว่าผงฝุ่นทรายได้แบบมีอนุภาคกระจายตัวกว้างกว่าทรายที่เป็นวัตถุดิบ โดยผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีอนุภาคในช่วงขนาด 0.05 ถึง 200 ไมโครเมตร ในขณะที่อนุภาคของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW อยู่ในช่วงขนาด 0.05 ถึง 400 ไมโครเมตร



ภาพที่ 6.2 การกระจายขนาดคละของอนุภาคทรายทำแบบหล่อจากออสเตรเลีย และผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW เปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ

เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเชิงปริมาตร (Volume Moment Mean) จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (5.1) พบว่าขนาดอนุภาคของทรายวัตถุดิบซึ่งนำเข้ามาจากประเทศออสเตรเลีย ผงฝุ่นทรายใต้แบบชนิด GSW มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 283.69 และ 165.41 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคนูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (63.44 ไมโครเมตร)

6.1.4 ความเป็นผลึกของอนุภาค

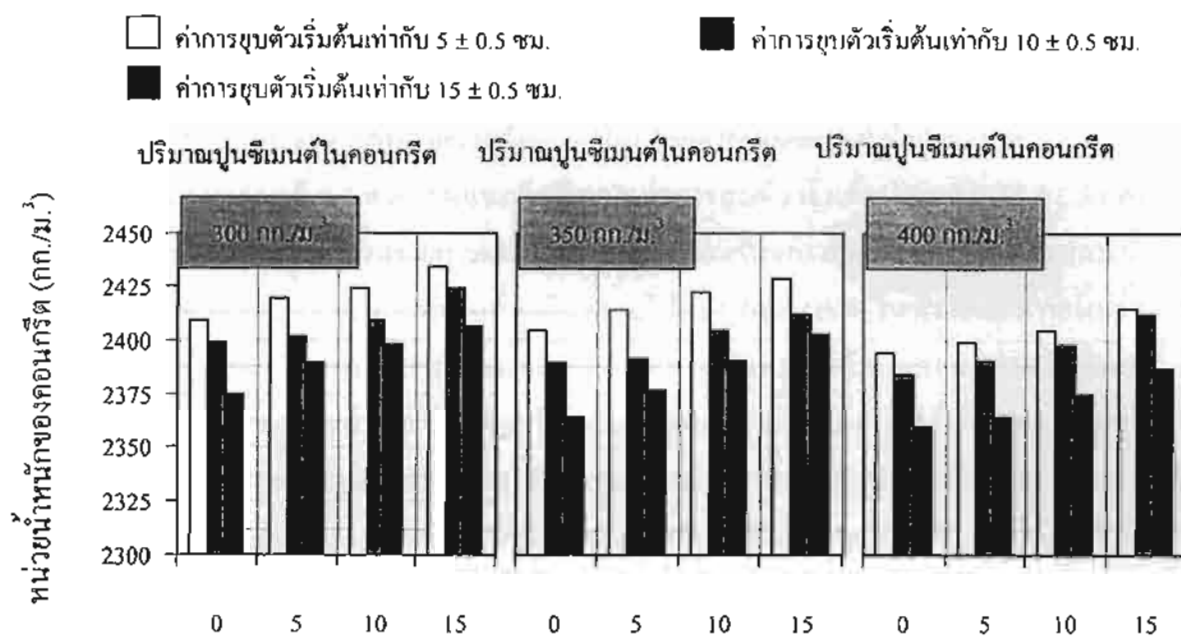
ผลจากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของผงฝุ่นทรายใต้แบบทั้งกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction ดังแสดงในภาพที่ 6.3 ตามลำดับ พบว่าผงฝุ่นทรายใต้แบบมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยผลึกของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) มากที่สุด ดังปรากฏค่าของพีค (Peak) ซึ่งแสดงจำนวนของอิเล็กตรอน (Counts) แบบสัมพัทธ์เปรียบเทียบเทียบกับสารประกอบที่มีจำนวนอิเล็กตรอนที่นับได้มากที่สุด นอกจากนั้นยังมีสารประกอบไฮดรอกไซด์ (Fe_3O_4) และเหล็ก (Fe) เป็นสารประกอบที่แทรกอยู่ในอนุภาค โดยยังมีค่าจำนวนนับของ อิเล็กตรอนมากชี้ให้เห็นถึงว่าโครงสร้างมีความเป็นผลึกมากเนื่องการจัดเรียงที่มีความเป็นระเบียบจึงส่งผลให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบซึ่งมีผลการการสลายพันธะต้องใช้พลังงานมาก ดังนั้นปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้ยากขึ้นซึ่งจะส่งผลกระทบต่อแนวโน้มการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ลดลงได้

6.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในสถานะสด

6.2.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (Unit Weight)

ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดแสดงในภาพที่ 6.4 พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นของการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำมีผลทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดเพิ่มขึ้น อาทิเช่น คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 300 กก./ม.³ และค่ายุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. พบว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 0.4, 0.6 และ 1.0 เมื่อสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำเท่ากับร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะจากผลการกระจายขนาดผลของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW จะเห็นว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่มดังกล่าวมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ ดังแสดงการกระจายขนาดผลในภาพที่ 1.1 ทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กของผงฝุ่นทรายไส้แบบสามารถแทรกเข้าไประหว่างอนุภาคของทรายหรือการเติมแทรก (Filling Effect) ส่งผลให้สามารถลดปริมาณช่องว่างและฟองอากาศ (Air Content) ภายในคอนกรีตได้ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นซึ่งหมายถึงหน่วยน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าลดลง ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW พบว่าคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นสูงกว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยน้ำหนักคอนกรีตสดมากกว่าคอนกรีตที่กำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นต่ำกว่า ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ และพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายแม่น้ำเท่ากับร้อยละ 15 เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยน้ำหนักร้อยละ 1.5 สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. ในขณะที่คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. มีค่าการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักคอนกรีตเท่ากับร้อยละ 1.0 ซึ่งดูกันว่ามีความแตกต่างกันเพียงร้อยละ 0.5 หรือคิดเป็นผลต่างในรูปหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 6.9 กก. เป็นต้น



ร้อยละการแทนที่ของผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW โดยน้ำหนัก ในทรายแม่น้ำ

ภาพที่ 6.4 หน่วยน้ำหนักในสถานะสดของคอนกรีตผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW และมีปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³

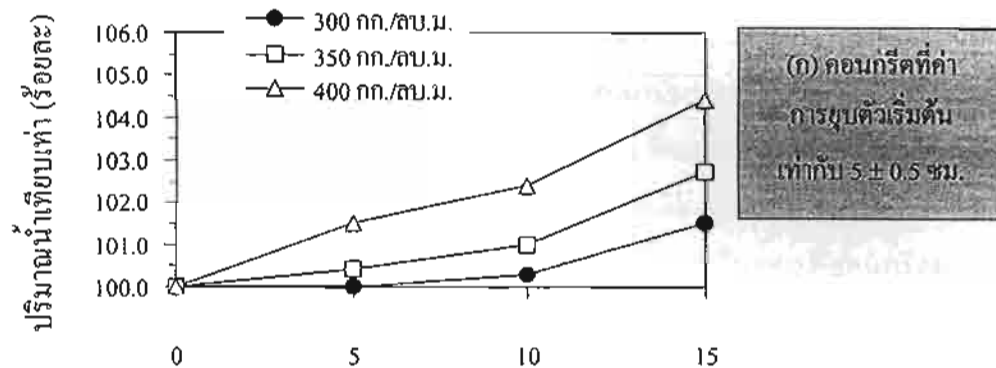
6.2.2 ปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดค่าการยุบตัว (Water Requirement) ของคอนกรีต

จากผลการทดสอบค่าความต้องการน้ำ (Water Requirement) ซึ่งกำหนดค่าการยุบตัว เริ่มต้นแสดงในภาพที่ 6.5 พบว่า คอนกรีตที่ทุกๆ ค่าการยุบตัว เริ่มต้น (5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม.) ได้รับผลกระทบจากการแทนที่ในลักษณะเดียวกันกล่าวคือ ทำให้ค่าความต้องการน้ำ มีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับหัวข้อหน่วยน้ำหนักกล่าวคือ ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดตะแกรงเบอร์ 50 (ขนาดช่องเปิด (Opening) เท่ากับ 0.3 มม.) (ภาพที่ 1.1) อยู่ในปริมาณมากกว่าทรายแม่น้ำทำให้อนุภาคของ ผงฝุ่นทรายได้แบบสามารถแทรกตัวตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของทรายขนาดซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าได้ ดังนั้นการที่มีส่วนละเอียดเพิ่มขึ้นจึงทำให้ต้องการน้ำเพิ่มเติมหรือการเพิ่มน้ำอิสระเพื่อช่วยหล่อลื่นให้อนุภาคของมวลรวมละเอียดสามารถเคลื่อนที่ได้ซึ่งคือ คอนกรีตเกิดค่าการยุบตัว (Slump) นอกจากนั้นจากกระบวนการทำแบบหล่อทรายดังกล่าวต้องผ่านอุณหภูมิถึง 1,400 องศาเซลเซียส ทำให้ผงฝุ่นทรายได้แบบมีสีคล้ำออกเทาจนถึงเป็นสีทรายไหม้และพื้นผิวมีความขรุขระมากกว่าทรายแม่น้ำซึ่งค่อนข้างกลมมน ทำให้ความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

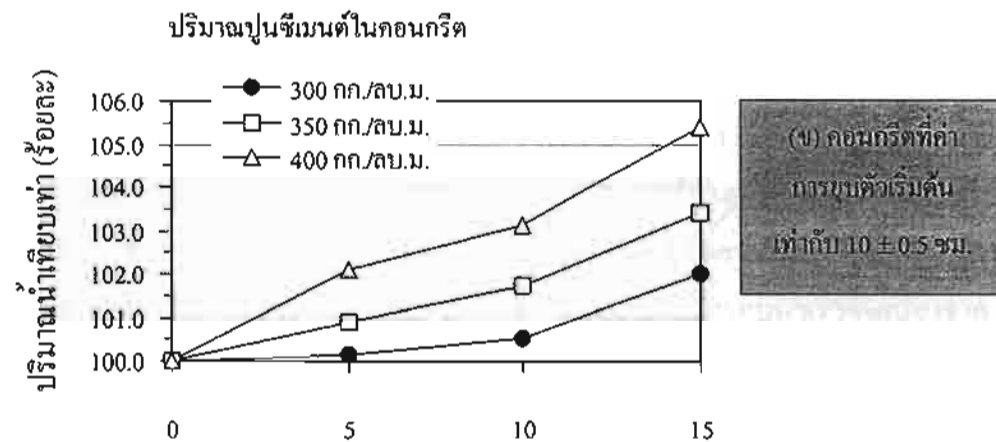
เมื่อพิจารณาผลของปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการน้ำเพิ่มดังเช่น คอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ มีแนวโน้มของปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ (เส้นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบและปริมาณน้ำ เทียบเท่าขนานกัน) ในขณะที่คอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ มีแนวโน้มใกล้เคียงกันจนถึงอัตราส่วนการแทนที่เท่ากับร้อยละ 10 ส่วนที่การแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบเท่ากับร้อยละ 15 พบว่าค่าความต้องการน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 และ 350 กก./ม.³ ทั้งนี้จะมาจากกรณีที่ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของทรายลดลง ซึ่งก็คือปริมาณผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ลดลงด้วยเช่นกัน เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW สูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณทรายลดลงทำให้อิทธิพลของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม โดยเฉพาะส่วนละเอียด (Fine Particles) และเป็นผงฝุ่น (Powder) มีปริมาณมากขึ้นทำให้มีผลต่อความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้น

สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่ายุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมเสร็จจาก 5 ± 0.5 ซม. (ภาพที่ 6.5(ก)) เป็น 10 ± 0.5 ซม. (ภาพที่ 6.5(ข)) และ 15 ± 0.5 ซม. (ภาพที่ 6.5(ค)) พบว่าแนวโน้มของค่าความต้องการน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายเพิ่มขึ้น

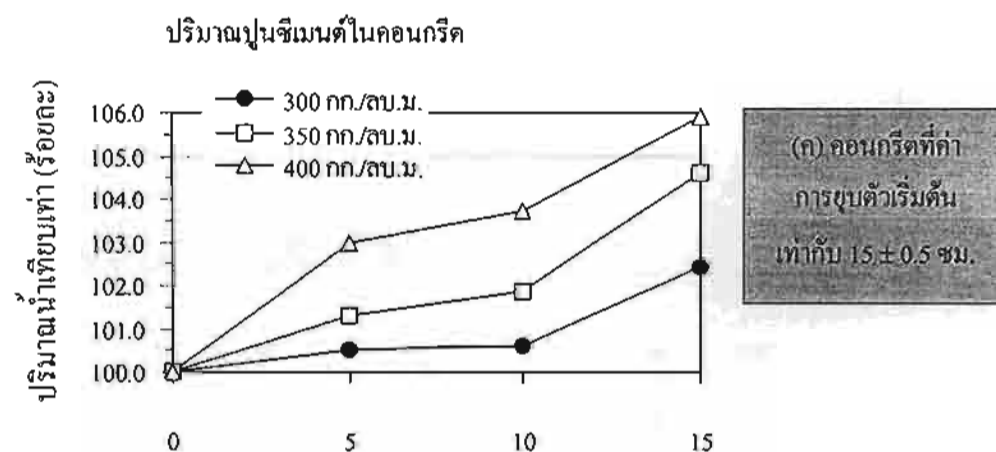
ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีต



การแทนที่ของผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)



การแทนที่ของผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

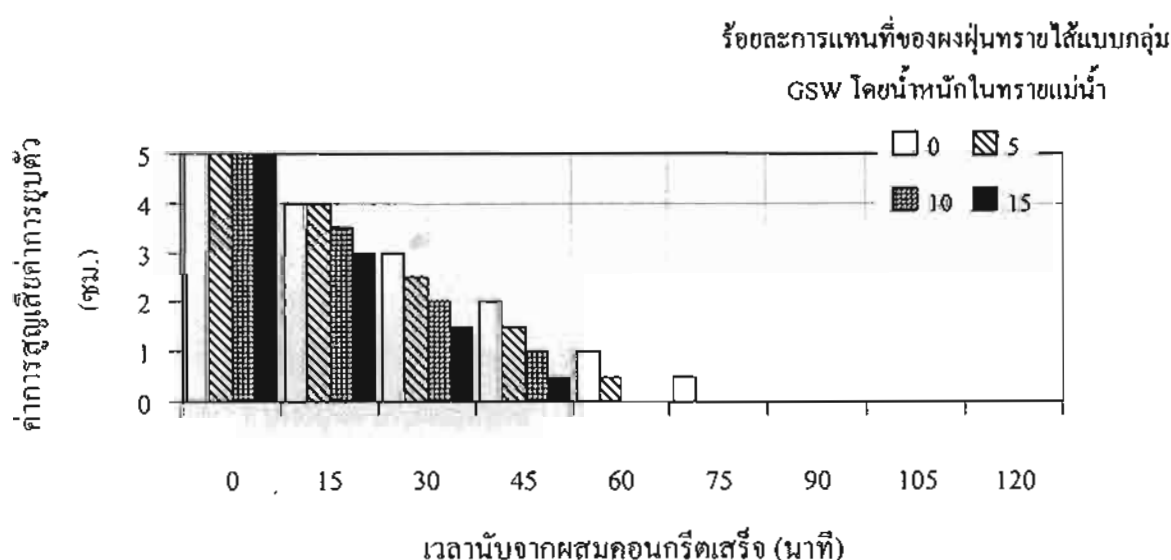


การแทนที่ของผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 6.5 ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีตผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW เทียบเท่าปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีตซึ่งผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

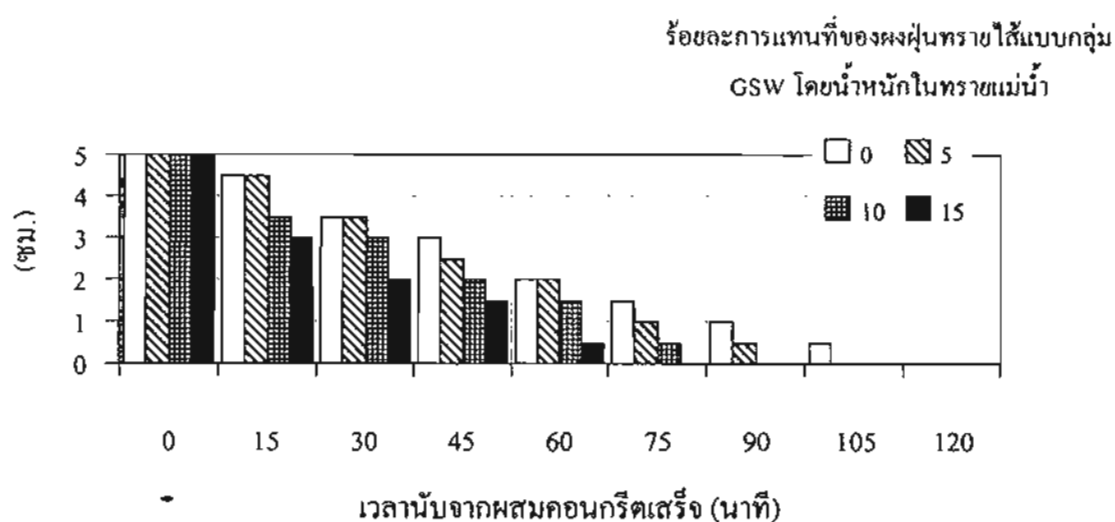
6.2.3 ค่าการยุบตัวเริ่มต้นและการสูญเสียค่าการยุบตัว (Initial Slump and Slump Loss)

ผลการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตซึ่งกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. แสดงในภาพที่ 6.6 พบว่าคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบมีการสูญเสียค่าการยุบตัวที่เพิ่มขึ้นและมากกว่าคอนกรีตปกติ เมื่อร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาในกรณีของคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ คอนกรีตปกติมีเวลาที่ค่าการยุบตัวเท่ากับศูนย์เท่ากับ 90 นาที ในขณะที่คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 75 และ 60 นาที เมื่อร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบเท่ากับร้อยละ 5 และ 10 ตามลำดับ และ มีเวลาเป็น 60 นาที ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 15 ซึ่งในกรณีนี้มีเงื่อนไขต่างไปจากกรณีของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ที่ใช้การแทนที่ในปูนซีเมนต์ โดยกรณีที่ทำการแทนที่ในทรายแม่น้ำ พบว่าอนุภาคผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่าทรายแม่น้ำทำให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นในการทำให้คอนกรีตสามารถทำงานได้หรือเกิดค่าการยุบตัวได้ ส่งผลให้ปริมาณน้ำโดยรวมของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และจากคุณสมบัติของ ผงฝุ่นทรายได้แบบสามารถกักเก็บน้ำได้บางส่วน ทำให้การสูญเสียน้ำอิสระจากการระเหยลดลงตามไปด้วย ผลคือ ค่าการยุบตัวยังคงมีค่ามากกว่าคอนกรีตปกติที่เวลาเดียวกัน และเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วขึ้นเนื่องจากน้ำอิสระถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้น



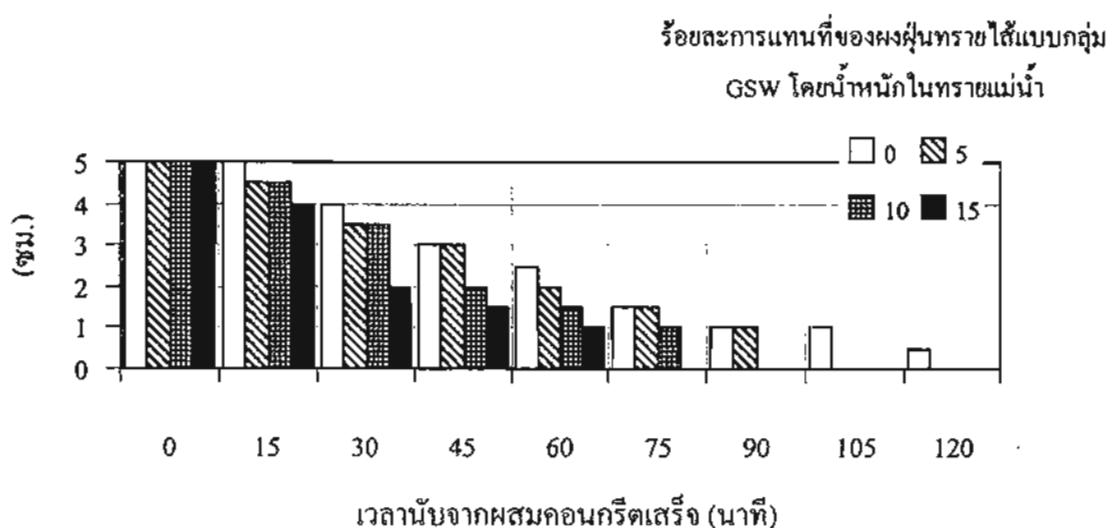
ภาพที่ 6.6 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัว



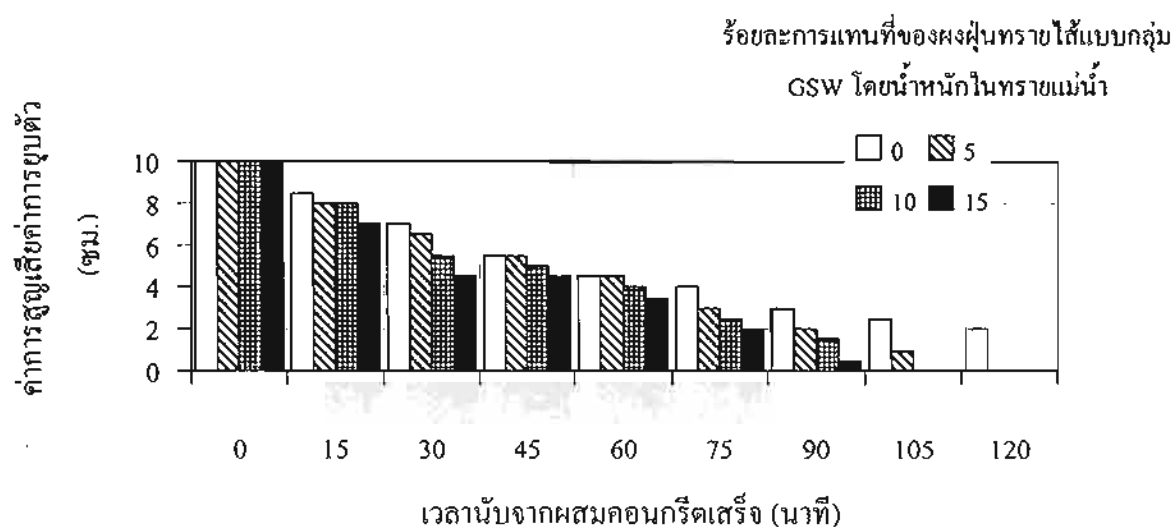
ภาพที่ 6.7 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ชม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัว

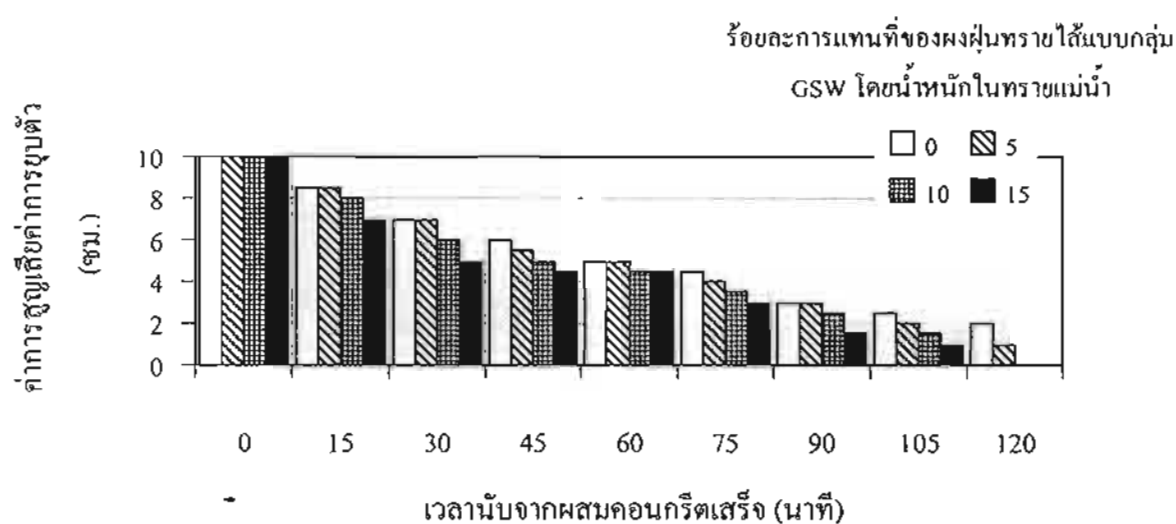


ภาพที่ 6.8 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ชม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

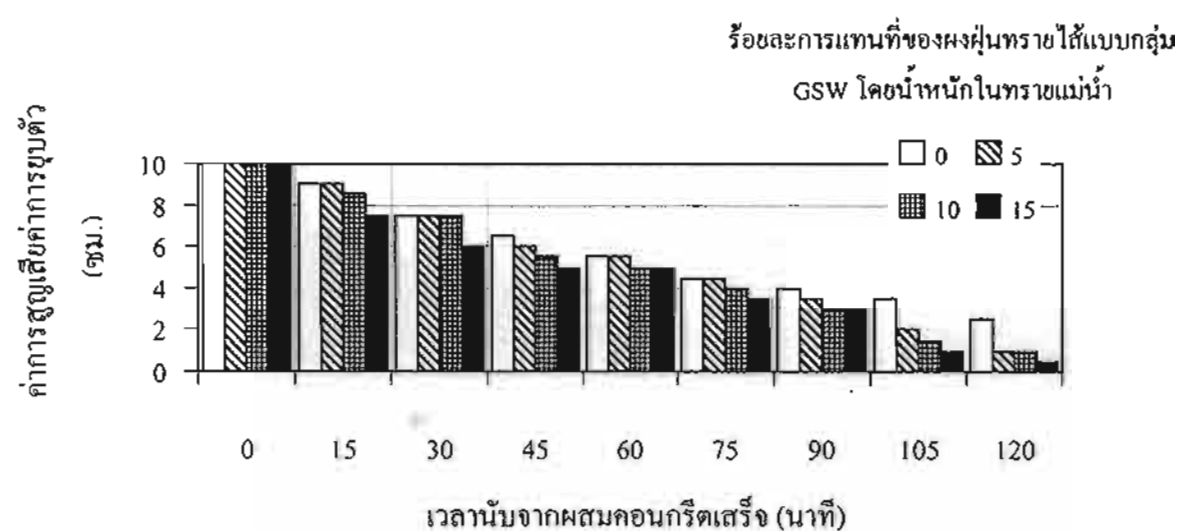
สำหรับคอนกรีตที่กำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. (ภาพที่ 6.9 ถึง 6.11) และ 15 ± 0.5 ซม. (ภาพที่ 6.12 ถึง 6.14) พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำมีค่ามากกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากสาเหตุดังกล่าวข้างต้น แต่สังเกตว่าอัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. ทั้งนี้เพราะคอนกรีตมีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) เพิ่มขึ้น ทำให้ที่อัตราการดูดซับเดียวกัน (สภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเดียวกัน) คอนกรีตที่มีปริมาณน้ำอิสระเริ่มต้นมากกว่ามีอิสระมากกว่าเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนั้นจะเห็นว่าน้ำอิสระส่วนหนึ่งจะถูกกักเก็บไว้ด้วยอนุภาคที่ละเอียดของผงฝุ่นทรายใส่แบบ โดยการกักเก็บมีทั้งการกักเก็บที่ผิว (Surface Retainability) และการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) เข้าไปในอนุภาคดังจะเห็นได้จากผลการที่ค่าความต้องการน้ำ (Water Requirement) มีค่าร้อยละ 106 ซึ่งมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ล้วน ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตทำให้อัตราในการสูญเสียค่าการยุบตัวมากขึ้น ดังเช่นคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW



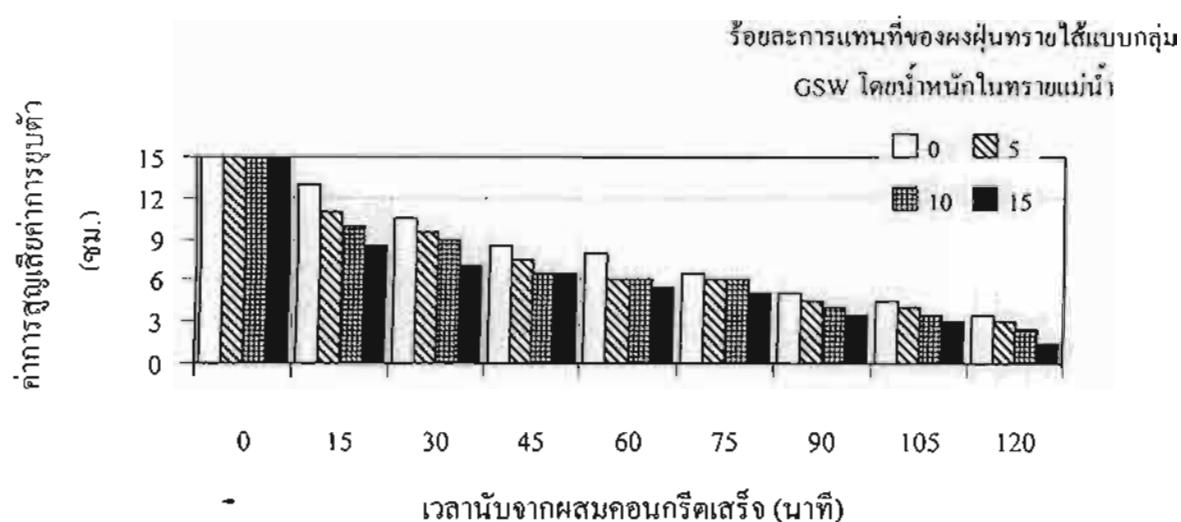
ภาพที่ 6.9 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



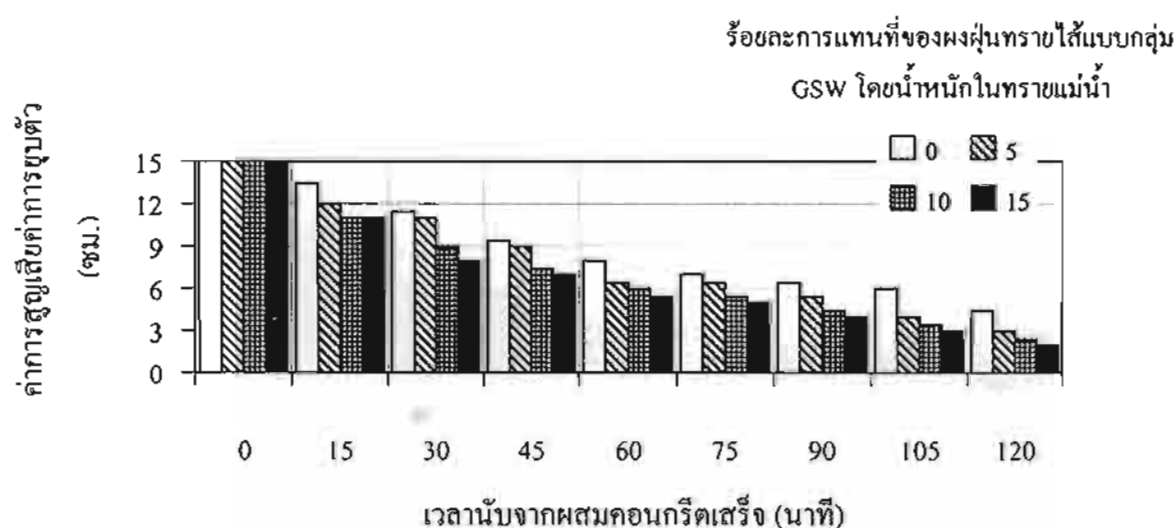
ภาพที่ 6.10 ค่าการสูญเสียค่าการขุดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการขุดตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ชม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



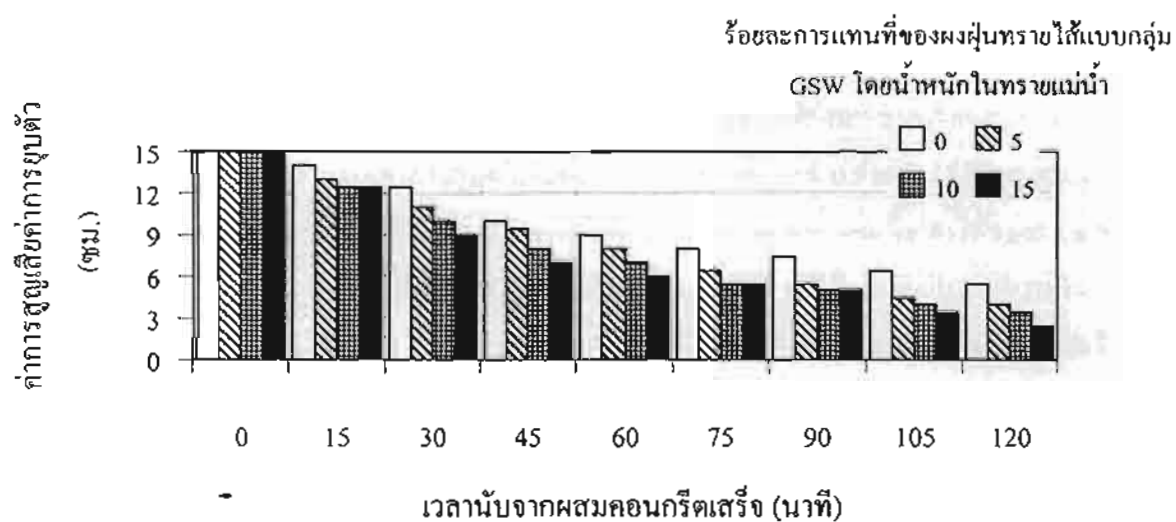
ภาพที่ 6.11 ค่าการสูญเสียค่าการขุดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการขุดตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ชม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 6.12 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ชม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 6.13 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ชม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 6.14 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

5.2.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต (Setting Time)

ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ซึ่งกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. แสดงในตารางที่ 6.3 พบว่าการแทนที่ของผงปูนทรายได้แบบในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับคอนกรีตผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW แต่ในกรณีของคอนกรีตผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังเช่นกรณีของคอนกรีตที่กำหนดค่าปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ และค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 136, 138, 139 และ 145 นาที ในขณะที่มีระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 196, 207, 215 และ 227 นาที สำหรับคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงปูนทรายได้แบบเท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการแทนที่ผงปูนทรายได้แบบในทรายแม่น้ำไม่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตจึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตไม่แตกต่าง และผลกระทบจากการแทนที่ของผงปูนทรายได้แบบดังกล่าวทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติเช่นกันเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 350 และ 400 กก./ม.³ ในขณะที่คอนกรีตที่มีสัดส่วนการแทนที่ของผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้นมีระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายเพิ่มขึ้น

ในกรณีการเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่มต้นเป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าคอนกรีตมีค่าระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละการแทนที่ของผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในคอนกรีต (ค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้น) ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 6.3

ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW

ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ซม.)	ร้อยละการแทนที่ของผงปูน ทรายได้แบบในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนัก	ระยะเวลาการก่อตัว (นาที)	
			เริ่มต้น	สุดท้าย
300	5 ± 0.5	0	136	196
		5	138	207
		10	139	215
		15	145	227

ตารางที่ 6.3 (ต่อ)

ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW

ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ซม.)	ร้อยละการแทนที่ของผงปูน ทรายได้แบบในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนัก	ระยะเวลาการก่อตัว (นาที)	
			เริ่มต้น	สุดท้าย
300	10 ± 0.5	0	145	207
		5	149	213
		10	155	224
		15	165	232
300	15 ± 0.5	0	155	218
		5	165	228
		10	183	237
		15	185	245
350	5 ± 0.5	0	105	169
		5	110	173
		10	127	184
		15	129	189
350	10 ± 0.5	0	138	182
		5	140	197
		10	147	208
		15	152	214
350	15 ± 0.5	0	143	201
		5	153	213
		10	162	223
		15	167	225
400	5 ± 0.5	0	89	144
		5	98	150
		10	107	157
		15	116	168
400	10 ± 0.5	0	127	162
		5	131	171
		10	140	180
		15	150	184
400	15 ± 0.5	0	135	176
		5	146	184
		10	153	190
		15	161	201

6.3 คุณสมบัติของทางกลคอนกรีตผสมผงฟู่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW

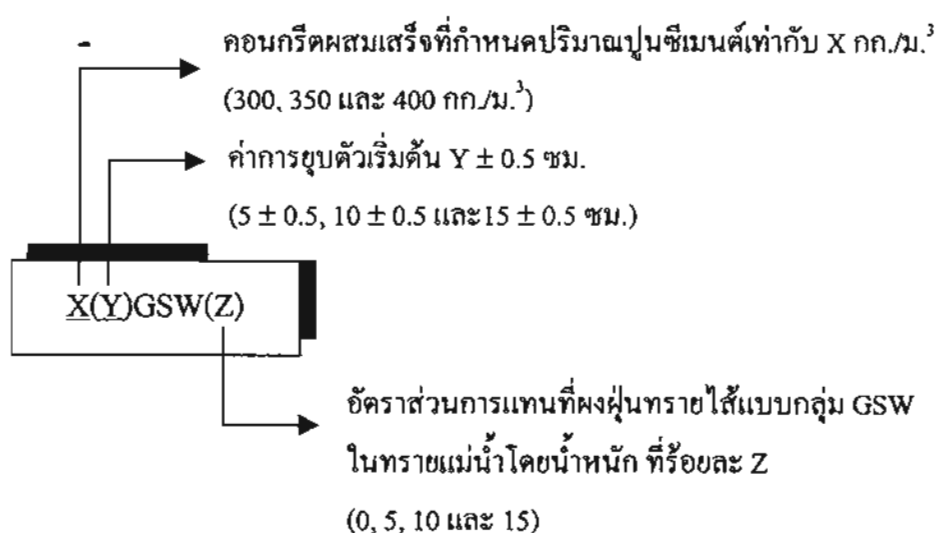
6.3.1 กำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)

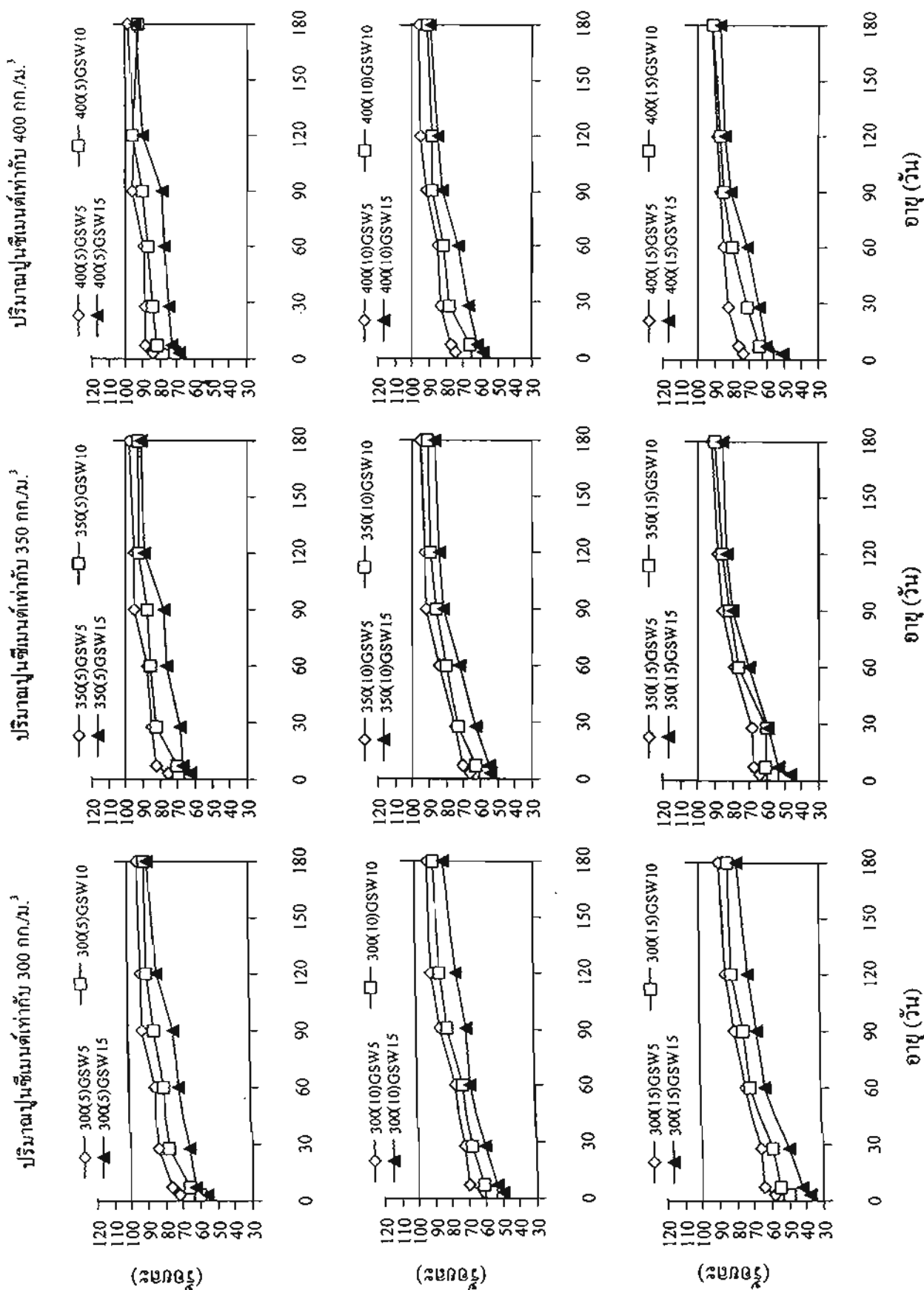
ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งทำการแทนที่ผงฟู่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำที่อัตราส่วนร้อยละ 0 (ทรายแม่น้ำ), 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก โดยคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ และค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. แสดงในภาพที่ 6.15 พบว่าสัดส่วนของผงฟู่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติซึ่งผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน โดยการลดลงของกำลังอัดดังกล่าวมีความแตกต่างจากคอนกรีตปกติมากในช่วงแรก ในขณะที่ช่วงหลังมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ ซึ่งสามารถพิจารณาจากปัจจัยที่แตกต่างกันของการแทนที่ผงฟู่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในหัวข้อ ดังกล่าวข้างต้นซึ่งมีผลทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลงและอัตราการปฏิกิริยาปอซโซลานิกในช่วงต้นมีค่าต่ำ แต่ในกรณีนี้เมื่อพิจารณาที่ปริมาณน้ำ (ค่าการยุบตัว) และปริมาณปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณเท่ากัน โดยการแทนที่ผงฟู่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำเท่ากับเป็นการเพิ่มส่วนที่ละเอียดให้กับคอนกรีต ดังนั้นอนุภาคของผงฟู่นทรายได้แบบจึงเข้าไปคลุกกับอนุภาคปูนซีเมนต์มากขึ้นทำให้โดยรวมแล้วจึงไม่แตกต่างไปจากกรณีของการแทนที่ (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่กลับเป็นการเพิ่ม (Adding) ส่งผลให้เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งมีอนุภาคของผงฟู่นทรายได้แบบคั่นกลาง ส่งผลให้โครงสร้างมีความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous) มากขึ้น กล่าวคืออนุภาคของผงฟู่นทรายได้แบบเป็นตัวกั้นความต่อเนื่องในระหว่างการตกผลึก (Crystallization) ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตดังกล่าว ในขณะที่เมื่อพิจารณาในส่วนของอนุภาคผงฟู่นทรายได้แบบที่สัมผัสกับเนื้อเฟสจะมีการยึดแน่น (Bonding) ในช่วงทรานซิชัน (Interfacial Transition Zone) น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมประเภทคาร์บอนต ดังนั้นเพราะผงฟู่นทรายได้แบบเป็นมวลรวมประเภทซิลิกา (Neville, A.M., 1999, pp. 118 - 119)

สำหรับการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมผงฟู่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีแนวโน้มลักษณะเดียวกันกับคอนกรีตที่ผสมผงฟู่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW กล่าวคือมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ยกตัวอย่าง ในกรณีของการแทนที่ผงฟู่นทรายได้แบบเท่ากับร้อยละ 15 ในทรายแม่น้ำ ของคอนกรีตที่ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และมีปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเท่ากับ 300

กก./ม.³ มีกำลังอัดที่อายุ 3 วัน เท่ากับร้อยละ 56 ของคอนกรีตปกติ ในขณะที่คอนกรีตที่อายุ 180 วัน มีค่าร้อยละ 88 แสดงว่าผงฟูนทรายได้แบบทำปฏิกิริยาทำให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น

ในกรณีของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าเมื่อทำการแทนที่ของผงฟูนทรายในทรายได้แบบกลุ่ม GSW ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงตามลำดับ และมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันและสาเหตุการลดลงของกำลังอัดสามารถอธิบายเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ดังแสดงในภาพที่ 6.15 โดยกำหนดสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้

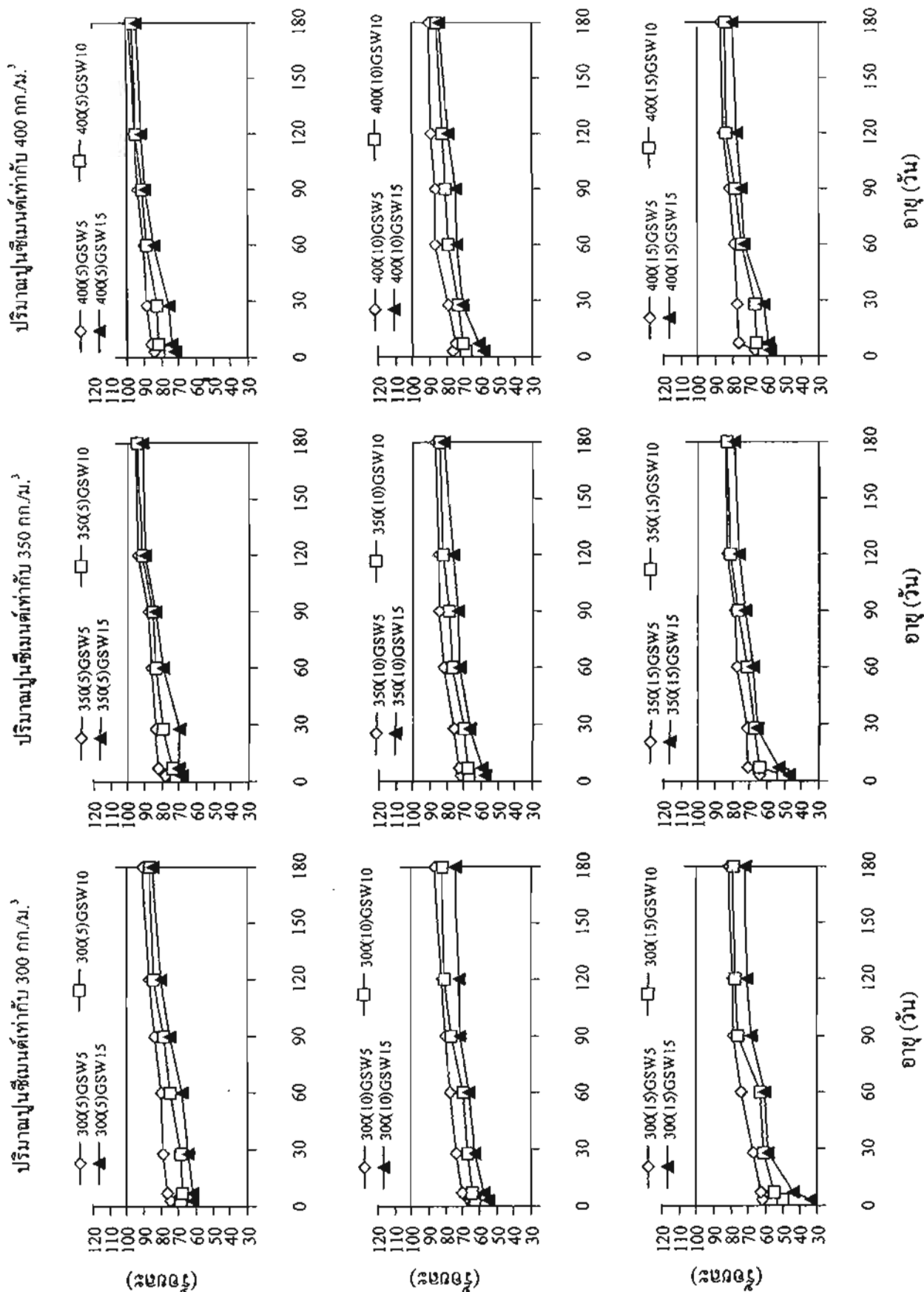


ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.

ภาพที่ 6.15 กำลังอัดเทียบท่าของคอนกรีตผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

6.3.2 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength)

ผลการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทราย ใต้แบบ พบว่าค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในแม่น้ำแสดงในภาพที่ 6.16 โดยสำหรับคอนกรีตมีค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทราย ใต้แบบในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้นทำให้กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีค่าลดลงมาก อาทิเช่น กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ที่อายุ 3 วัน มีค่าร้อยละ 72, 68 และ 62 ของคอนกรีตปกติที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 ตามลำดับ เนื่องจากผลกระทบของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ที่มีต่อความสามารถในการยึดเหนี่ยวมวลรวมแตกต่างจากผงฝุ่นทรายใต้แบบในกลุ่มแรก กล่าวคือ การใช้แทนที่ในมวลรวมละเอียด ซึ่งจากผลการทดสอบการกระจายขนาดละเอียด ผงฝุ่น พบว่าทรายใต้แบบกลุ่ม GSW มีความละเอียดมากกว่าทรายแม่น้ำ ดังนั้น โอกาสที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบจะแทรกตัว (Filling) เข้าไปภายในระหว่างรอยต่อเนื้อเพสต์และมวลรวม (Interfacial Transition Zone) จึงเป็นไปได้มาก แต่เนื่องจากความสามารถในการทำปฏิกิริยาของผงฝุ่นทรายใต้แบบ ได้ผลิตภัณฑ์ในการเชื่อมประสานมีน้อยมาก จึงยังส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวในบริเวณดังกล่าวซึ่งปกติเป็นบริเวณที่มีกำลังต่ำที่สุดในคอนกรีตมีค่ายิ่งต่ำลง ดังนั้นค่ากำลังดึงจึงลดลงตามลำดับ ในขณะที่เมื่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าผลกระทบจากการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบในทรายแม่น้ำมีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่าอิทธิพลของปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงมีค่าลดลงมากกว่าการเพิ่มปริมาณของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW



ภาพที่ 6.16 กำลังดึงแบบผ่าซีกเทียบเท่าของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใช้แบบกลุ่ม SSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

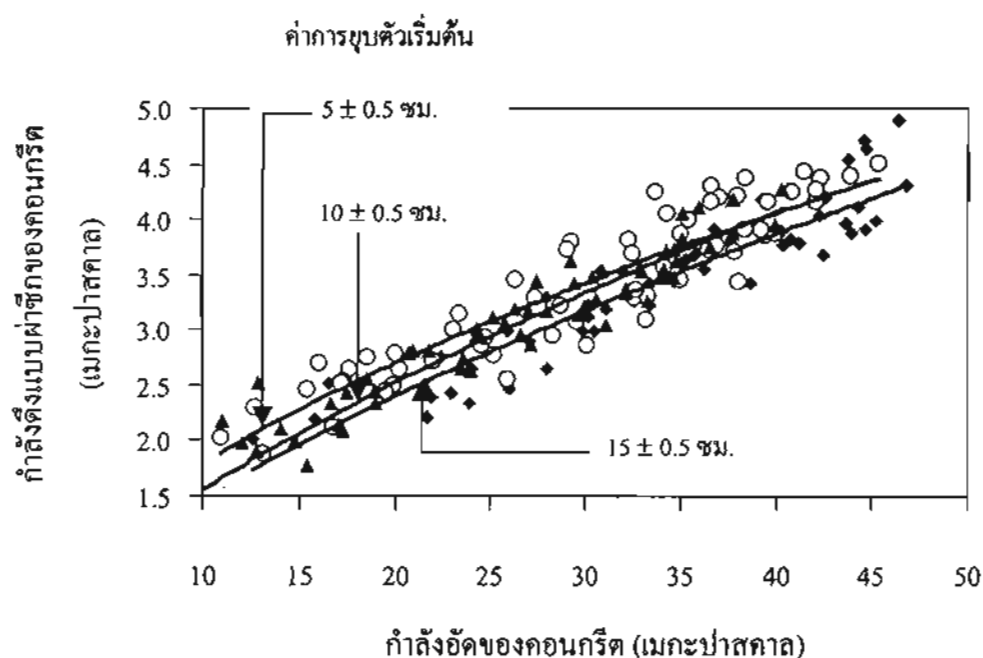
6.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จทั้งคอนกรีตชนิดปกติและคอนกรีตผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW แสดงในภาพที่ 6.17 ตามลำดับ พบว่ากำลังดึงแบบผ่าซีกมีค่าเป็นปฏิภาคกับกำลังอัดของคอนกรีต โดยอาศัยความสัมพันธ์พื้นฐานดังแสดงในสมการที่ (5.2) (Neville, A.M., 1996, pp. 309 – 310)

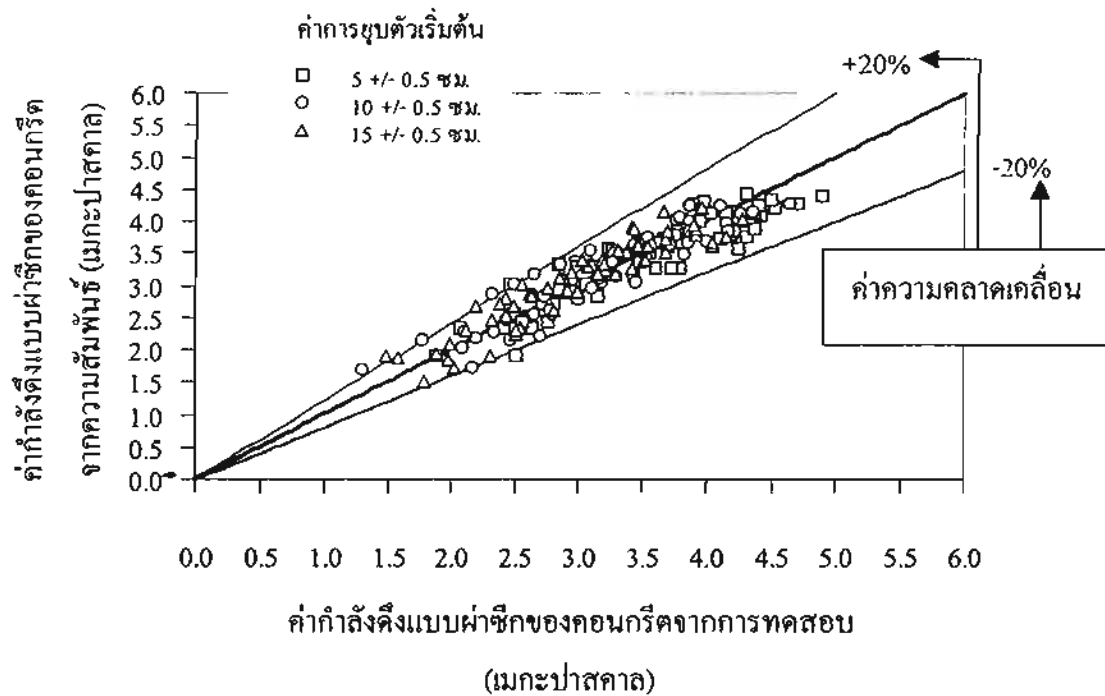
จากความสัมพันธ์พื้นฐานสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ดังสมการที่ (6.3)

$$\begin{aligned} f_t &= 0.455f_c^{0.593} \text{ ที่ } R^2 = 0.8595 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 5 \pm 0.5 \text{ ซม.} \\ f_t &= 0.314f_c^{0.695} \text{ ที่ } R^2 = 0.5934 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 10 \pm 0.5 \text{ ซม.} \\ f_t &= 0.301f_c^{0.736} \text{ ที่ } R^2 = 0.8711 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 15 \pm 0.5 \text{ ซม.} \end{aligned} \quad (6.3)$$

เมื่อเปรียบเทียบของค่าเลขยกกำลังกับค่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานของสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา (American Concrete Institute, ACI) พบว่าค่าของเลขยกกำลังอยู่ในช่วงมีค่าเท่ากับ 0.5 ถึง 0.75 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของความสัมพันธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 20



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีก

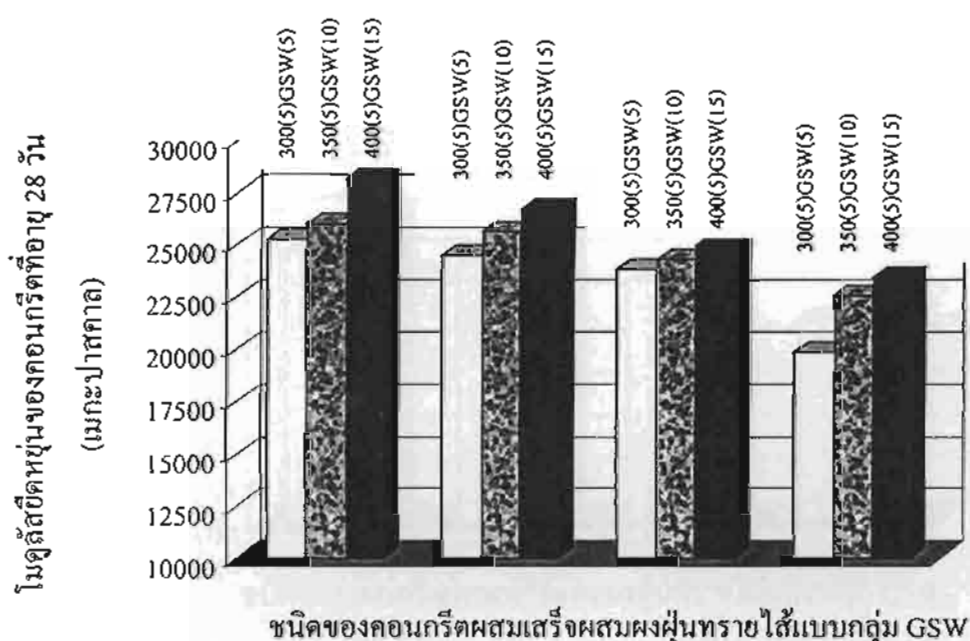


(ข) ค่าเปรียบเทียบระหว่างกำลังคิ่งแบบผ่าซีกจากการทดสอบกับความสัมพันธ์ที่ได้

ภาพที่ 6.17 ความสัมพันธ์และค่าเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดและกำลังคิ่งแบบผ่าซีกของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW

6.3.4 โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

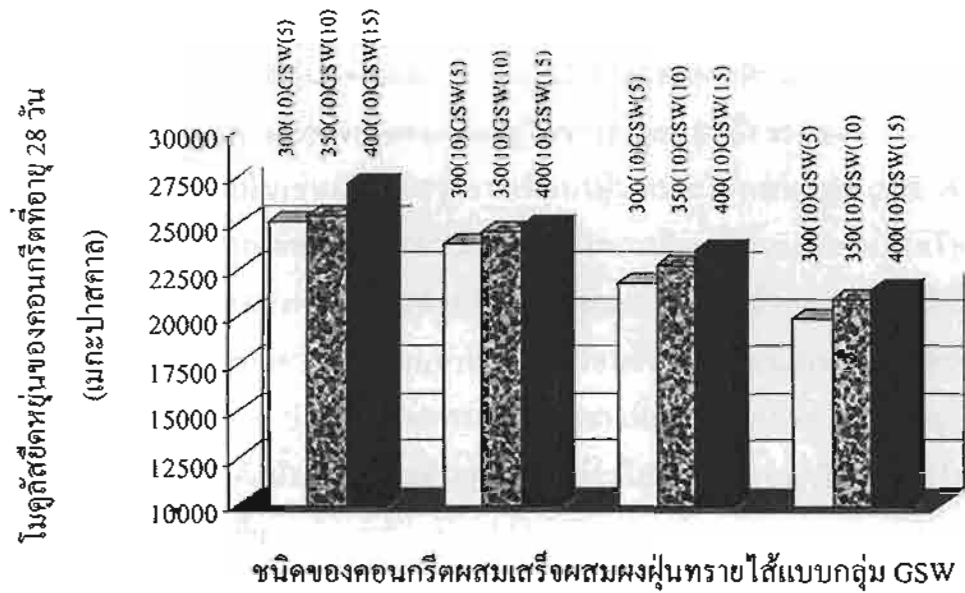
ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน ของคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งทำการแทนที่ผงฟูทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำ ดังแสดงในภาพที่ 6.18 ถึง 6.20 พบว่าคอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของผงฟูทรายไส้แบบดังเช่นคอนกรีตผสมผงฟูทรายไส้แบบกลุ่ม SSW และมีการลดลงในสัดส่วนที่มากเมื่อเพิ่มการแทนที่ของผงฟูทรายไส้แบบเท่ากับร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เนื่องจากอนุภาคส่วนที่ละเอียดและมีปริมาณมากของผงฟูทรายไส้แบบที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาเชื่อมประสานมีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ความต่อเนื่องของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตลดลง โดยคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ และมีการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. (ภาพที่ 6.18) มีเท่ากับ 19,898 เมกะปาสคาล ในขณะที่คอนกรีตปกติมีค่าเท่ากับ 22,589 เมกะปาสคาล นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มตามกำลังของซีเมนต์เฟสและการขัดเหนี่ยวกับมวลรวม และการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงตามไปด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น



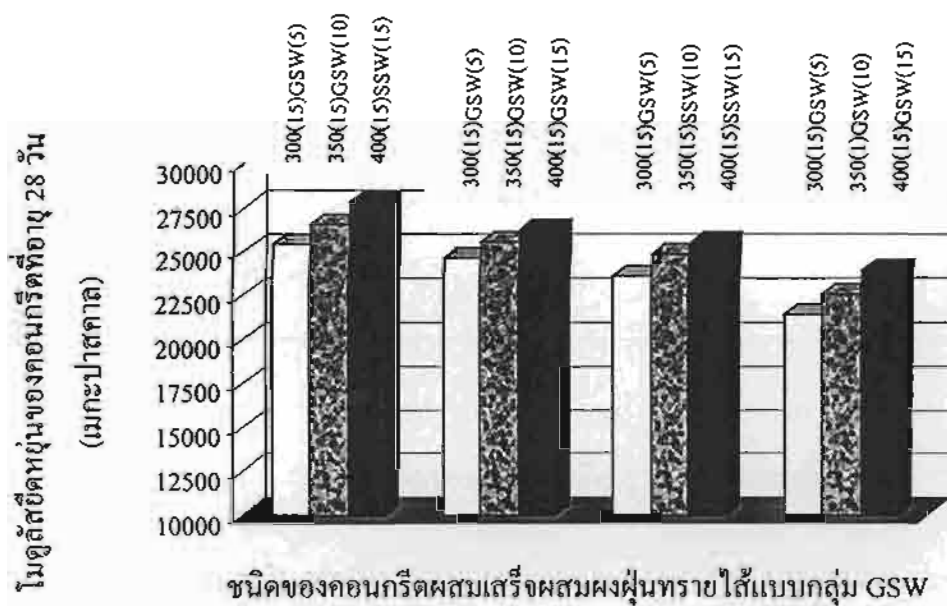
ภาพที่ 6.18 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฟูทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ที่อายุ 28 วัน

โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.

หมายเหตุ สัญลักษณ์ X(Y)GSW(Z) คือ คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงฟูทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

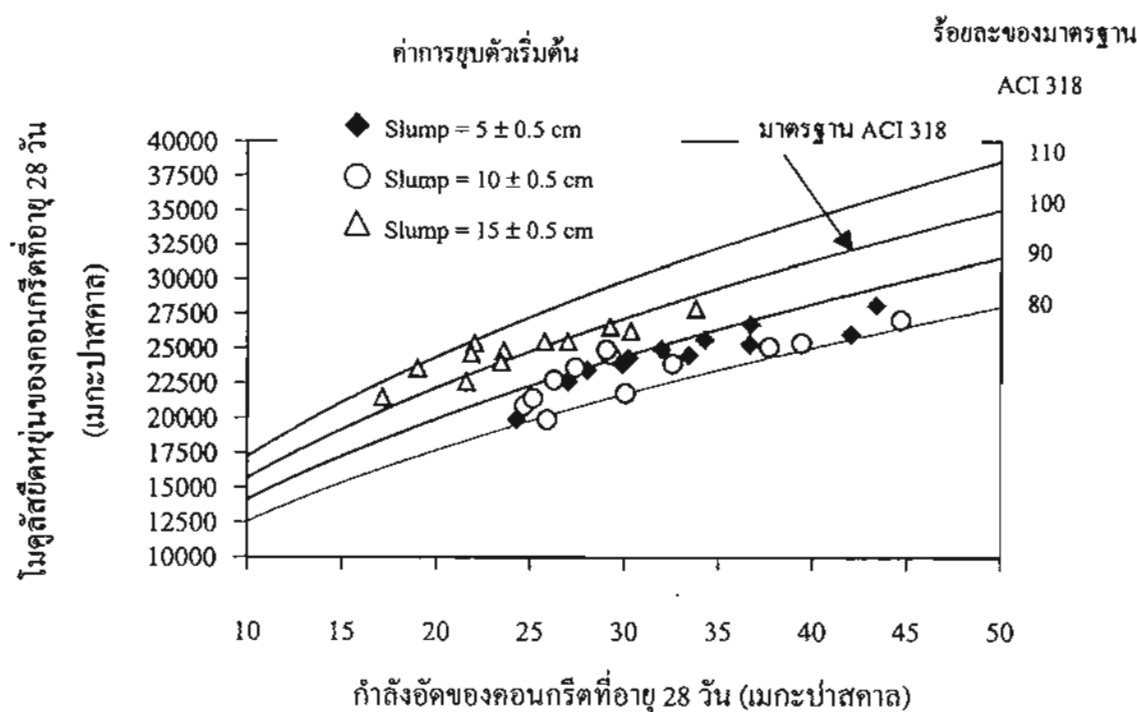


ภาพที่ 6.19 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ที่อายุ 28 วัน
โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม.



ภาพที่ 6.20 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ที่อายุ 28 วัน
โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม.

สำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฟูนทรายไส้แบบกลุ่ม GSW (ภาพที่ 6.21) พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐาน ACI 318 ได้กำหนดไว้ กล่าวคือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตอยู่ในช่วงร้อยละ 80 ถึง 90 ของค่าที่มาตรฐานข้างต้นระบุไว้ ซึ่งแสดงให้เห็นเช่นเดียวกันว่าการเพิ่มผงฟูนทรายไส้แบบกลุ่ม GSW เข้าไปแทนที่ทรายแม่น้ำทำให้มีผลกระทบต่อความสามารถในการเสีรูปได้ของคอนกรีตหรือผงฟูนทรายไส้แบบจัดเป็นประเภทวัสดุที่มีความอ่อน (Soft Material) โดยถึงแม้ว่าผงฟูนทรายไส้แบบจะเป็นทรายประเภทหนึ่ง แต่ได้ผ่านกระบวนการให้ความร้อนจึงทำให้พันธะการยึดเหนี่ยวของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ลดลง ประกอบการการเพิ่มสารผสมเพิ่มที่เป็นของเหลวส่วนใหญ่เพื่อปรับปรุงคุณภาพของไส้แบบ ดังนั้นเมื่อนำผงฟูนทรายดังกล่าวไปใช้ผสมคอนกรีตจึงมีผลให้การเสีรูปเมื่อถูกแรงกระทำเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 6.21 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฟูนทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318

6.4 คุณสมบัติทางด้านการทนทานคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW

6.4.1 การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water)

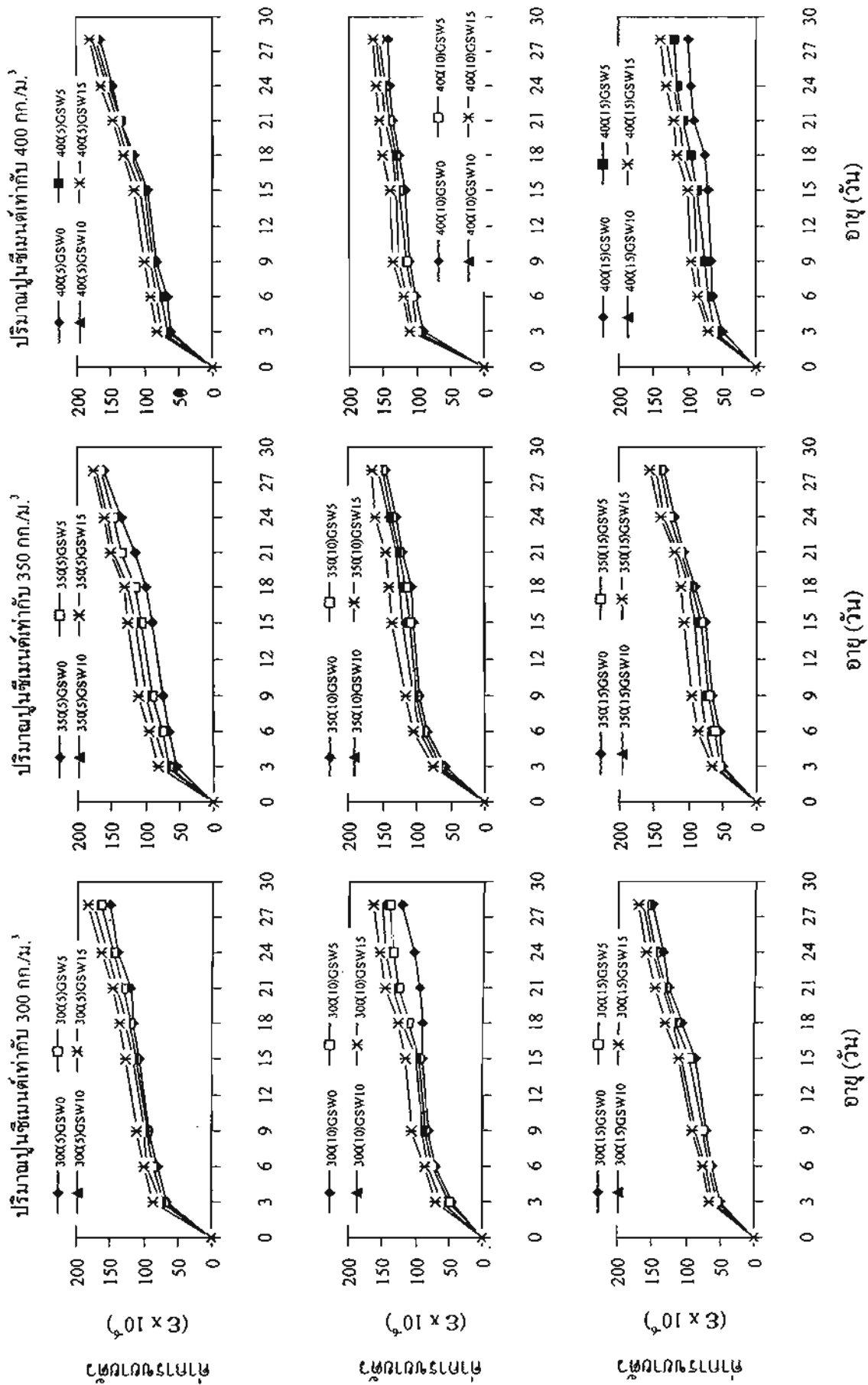
ผลการทดสอบการขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ซึ่งมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ แสดงในภาพที่ 6.22 พบว่าเมื่อร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายแม่น้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการขยายตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีปริมาณของร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเผาไหม้ (LOI) (ร้อยละ 1.00) มีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย (ร้อยละ 0.96) ทำให้เมื่อผงฝุ่นทรายไส้แบบดูดซับความชื้น ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวมากขึ้น ประกอบการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบซึ่งมีความละเอียดมากกว่าทรายธรรมชาติทำให้ค่าความต้องการน้ำของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น (Sidney M. et al., 2002, pp. 350 – 351) ซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของขนาดและปริมาณของโพรงคาวาลาร์ทำให้น้ำหรือความชื้นจากภายนอกสามารถเข้าไปสู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้มากขึ้น เมื่อปริมาณในคอนกรีตเพิ่มขึ้นนั่นคือ การที่ซีเมนต์เจลดสามารถดูดซับและเกิดการขยายตัวได้มากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนั้นจะสังเกตว่าในช่วงแรกของการบ่มในน้ำคอนกรีตมีอัตราการขยายตัว (ความชื้นของค่าการขยายตัวในน้ำกับเวลา) สูงและมีค่าลดลงเมื่ออายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะในช่วงแรกน้ำสามารถเข้าไปสู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้มากซึ่งเป็นผลจากการที่น้ำภายในถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้น้ำภายในมีปริมาณลดลงทำให้น้ำจากภายนอกจึงสามารถเข้าไปสู่ภายในได้เพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบค่าการขยายตัวในน้ำของคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจาก 300 กก./ม.³ เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ พบว่าคอนกรีตซึ่งมีส่วนผสมของผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าการขยายตัวน้ำไม่ต่างไปจากคอนกรีตซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน โดยมีค่ามากกว่าคอนกรีตปกติเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตทำให้ค่าการขยายตัวในน้ำลดลง ซึ่งเป็นมาจากการที่คอนกรีตมีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจากปริมาณของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และอื่นๆ) ที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีค่าการขยายตัวในน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่

ของผงฝุ่นทรายได้แบบในทรายธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น แต่กระนั้นค่าการขยายตัวมีค่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตปกติมาก เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่กำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. พบว่าคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นมีค่าการขยายตัวในน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้น (ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น) นั้นคือปริมาณน้ำในคอนกรีตทั้งที่เป็นส่วนประกอบภายใน โครงสร้างของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและน้ำอิสระซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ น้ำที่อยู่ในโพรงที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้และน้ำที่อยู่ภายใน โพรงคาพิลลารี (Capillary Pores) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่แลกเปลี่ยนกับความชื้นภายนอกมีปริมาณมากขึ้น จึงเท่ากับเป็นการปิดกั้นน้ำหรือความชื้นจกภายนอกที่จะเข้าไปสู่ภายในได้มากขึ้น

จากผลการทดสอบการขยายตัวในน้ำของคอนกรีต สามารถสรุปได้แนวโน้มของการขยายตัวของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติซึ่งผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำในสัดส่วนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการขยายตัวในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม.ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.

ภาพที่ 6.22 ค่าการขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมผงปูนทรายใช้แบบกลุ่ม GSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

6.4.2 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

6.4.2.1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีต (Length Change)

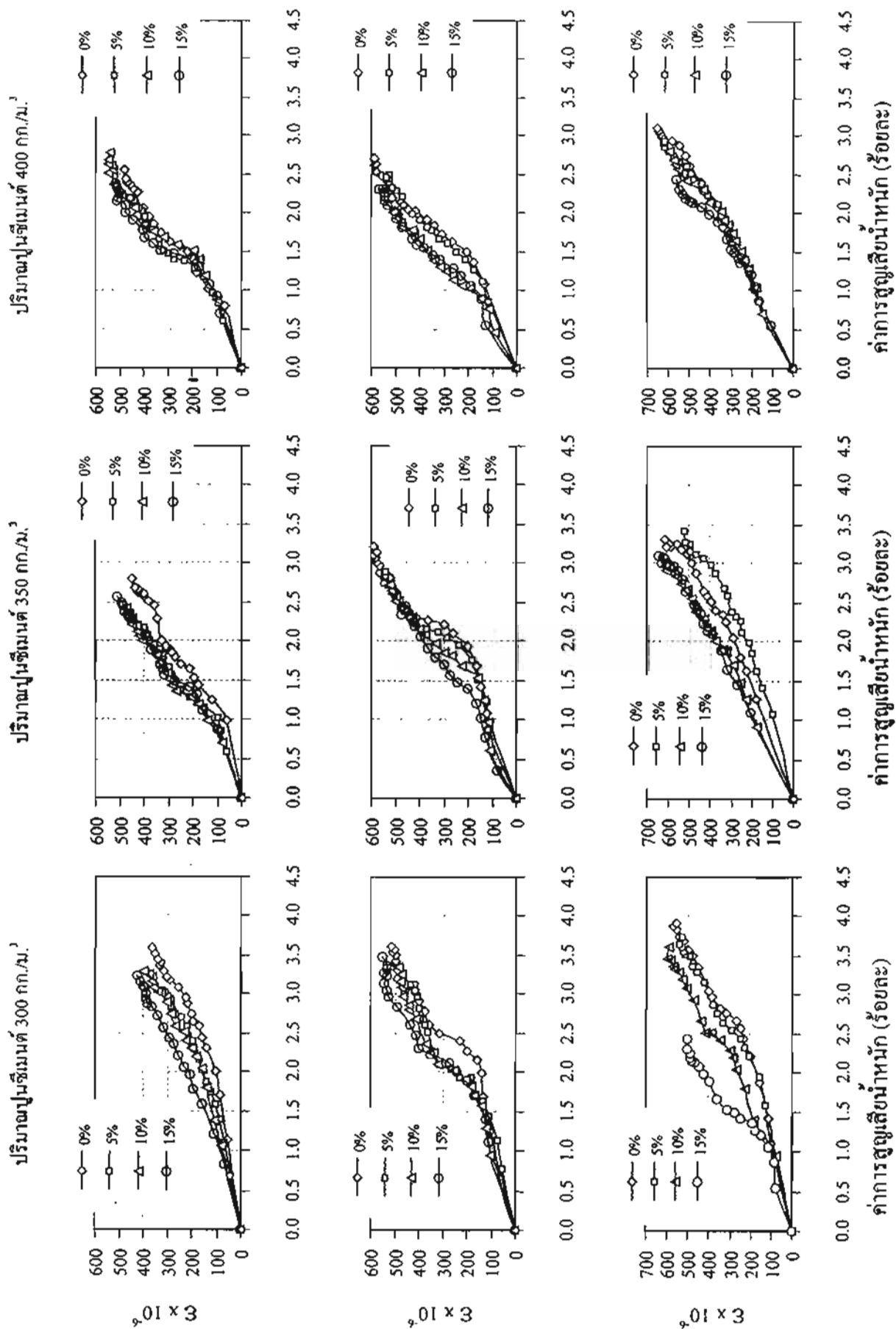
ผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบของคอนกรีตปกติเปรียบเทียบกับคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำ โดยคอนกรีตมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ แสดงในภาพที่ 6.23 พบว่าในทุกๆ อัตราส่วนของคอนกรีตมีค่าการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงในช่วง 30 วันแรก และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ดังมีเหตุผลเช่นเดียวกันกับคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSF นอกจากนั้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในทรายธรรมชาติเพิ่มมีผลทำให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผล 2 คือ ขนาดอนุภาคของผงฝุ่นทรายได้แบบที่มีส่วนความละเอียดมากกว่าทรายธรรมชาติ ดังจะดูได้จากการกระจายขนาดผลในภาพที่ 1.1 ซึ่งส่งผลต่อช่องว่าง (Voids) ขนาดใหญ่ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น (Neville, A.M., 1999, pp. 434) ประกอบการที่ผงฝุ่นทรายได้แบบบางส่วนมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ทำให้อนุภาคของผงฝุ่นทรายได้แบบสามารถแทรกระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินไป ผงฝุ่นทรายได้แบบจะเป็นตัวปิดกั้นความต่อเนื่องภายในโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งหมายถึง ความพรุนภายในเนื้อของเพสต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวแบบแห้งจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ค่าการยุบเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. และมีปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ พบว่าแนวโน้มของค่าการหดตัวแบบแห้งมีลักษณะเช่นเดียวกับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. โดยคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบมีค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีตปกติ อันเนื่องมาจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำ (ค่าการยุบตัวเริ่มต้นมากขึ้น) ทำให้ค่าการหดตัวแบบแห้งมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนั้นปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีค่าของการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากัน

6.4.2.2 การหดตัวแบบแห้งเนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักจากการระเหยของน้ำ (Drying Shrinkage due to Weight Loss from Water Evaporation)

การหดตัวแบบแห้งเกิดขึ้นจากการสูญเสียความชื้น (Moisture) จากภายในคอนกรีต กับสิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งมีความชื้นที่ต่ำกว่า โดยจากความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของน้ำหนักน้ำที่สูญเสียไปต่อน้ำหนักตัวอย่างกับค่าการหดตัวแบบแห้ง

สำหรับผลการทดสอบระหว่างค่าการหดตัวของคอนกรีตผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW กับค่าร้อยละการสูญเสียของน้ำเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมทรายแม่น้ำ ดังแสดงในภาพที่ 6.24 พบว่าคอนกรีตมีค่าการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการแทนที่ของผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW โดยน้ำหนักในทรายแม่น้ำ นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบที่ค่าการสูญเสียน้ำเดียวกันซึ่งได้ว่าคอนกรีตมีค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีตปกติ ดังเช่นคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และมีปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเท่ากับ 300 กก./ม.³ ที่ค่าการสูญเสียน้ำหนักของน้ำมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.0 คอนกรีตมีค่าการหดตัวแบบแห้งเท่ากับ 187, 190, 267 และ 412 ไมครอน สำหรับอัตราส่วนการแทนที่ของผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำโดยน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ เป็นต้น เนื่องจากขนาดอนุภาคของผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีความละเอียดมากกว่าทรายแม่น้ำและผิวมีลักษณะขรุขระทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำมีมากขึ้น น้ำที่ดูดซับไว้เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำมีโอกาสที่สูญเสียไปเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการหดตัวแบบแห้งจึงเกิดได้มากขึ้นตามลำดับ



ภาพที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหาค่าความเสียหายและค่าการสูญเสียเล็กน้อย (ร้อยละ) ของคอนกรีตผสมผงเถ้าลอย GSW

6.4.3 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต (Sulfate Attack)

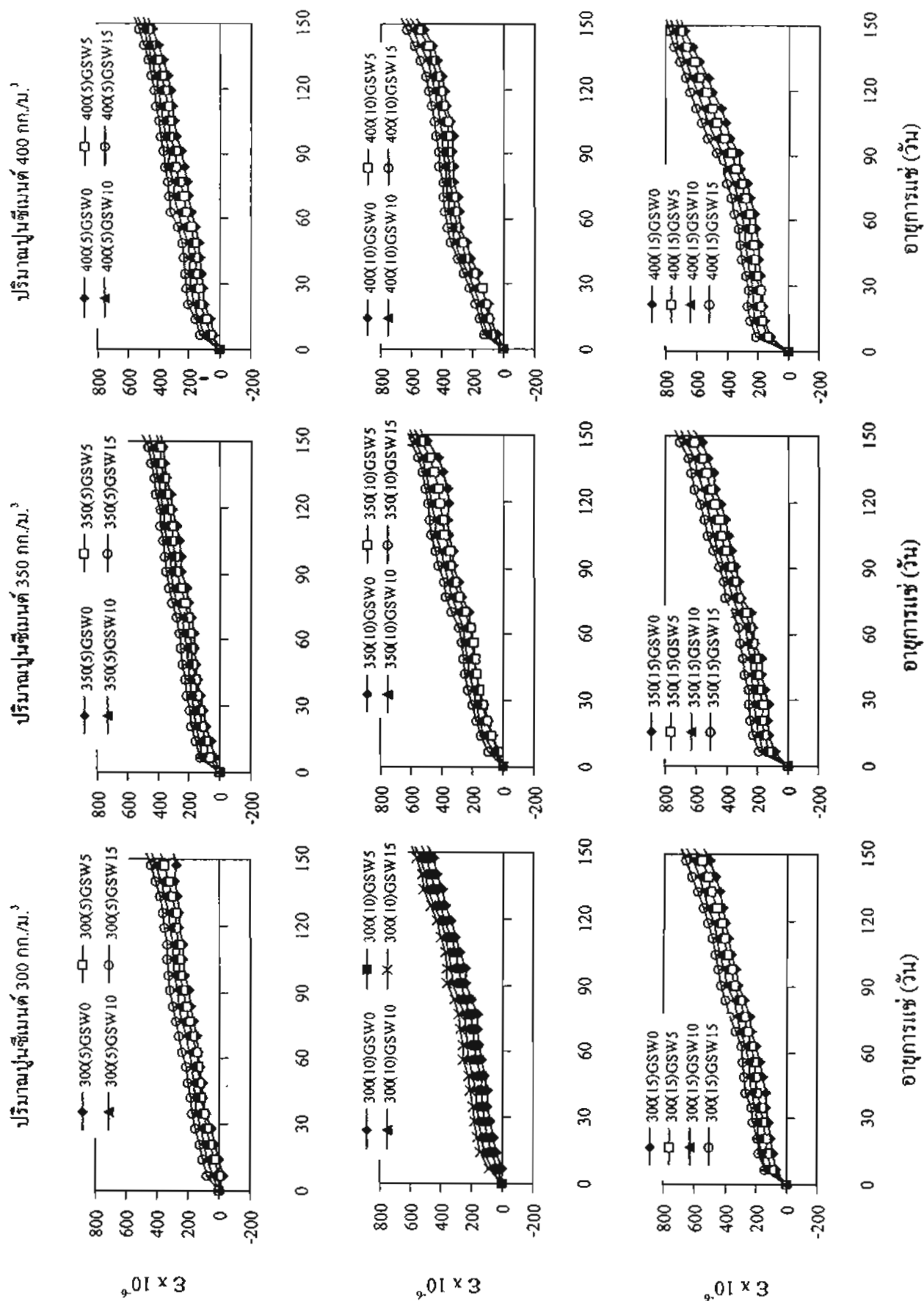
ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากสารละลายซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้น 50 มก./ล. โดยทำการควบคุมค่าความเป็นกรดค่า (pH) ในช่วง 6 ถึง 8 ด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) (ความเป็นกรดค่าของสารละลายซัลเฟตในธรรมชาติ อาทิเช่น ในน้ำใต้ดินมีค่าอยู่ในช่วง 6 ถึง 8) โดยความต้านทานเนื่องจากสารละลายซัลเฟตสามารถวัดในรูปแบบของการขยายตัวเชิงเส้น (Linear Expansion)

ผลการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตซึ่งทำการผึ่งผืนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติ พบว่าทั้งคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. และมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ ดังแสดงในภาพที่ 6.25 มีค่าการขยายตัวเป็นไปลักษณะเดียวกันกล่าวคือ ในช่วงแรกของการบ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต คอนกรีตมีค่าการขยายตัวที่ไม่แตกต่างไปจากคอนกรีตปกติ อันเป็นจากของปริมาณของยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และเอพิทริงไกต์ที่มีน้อยทำให้การขยายตัวเกิดขึ้นไม่มาก (Santhanam, M., 2001, pp. 915 – 921) และในช่วงที่สองการขยายตัวเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ผสมผึ่งผืนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ซึ่งได้ผลกระทบจากปริมาณของสารประกอบทั้งสองที่ทำให้เกิดการขยายตัว

สำหรับการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนปริมาณผึ่งผืนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติมีผลทำให้การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่ผึ่งผืนทรายได้แบบมีความละเอียดที่มากกว่าทรายธรรมชาติทำให้เป็นการเพิ่มความต้องการน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต อันจะนำไปสู่ความพรุนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงไอออนของซัลเฟตสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในคอนกรีตผ่านโครงกาพิวลารีแล้วทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์จาก 300 กก./ม.³ เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ พบว่าจะให้ผลของการแทนที่ของผึ่งผืนทรายได้แบบในทรายธรรมชาติในลักษณะเดียวกัน และเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 เป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.



ภาพที่ ๔.๗๔ ค่าการหดตัวใบสารละลายโซเดียมเตตระฟอสเฟต (Na₂SO₄) ของคอนกรีตผสมผงเถ้าภูเขาไฟใช้แทนปูนซีเมนต์

6.4.4 การกระทำเนื่องจากกรด (Acid Attack)

6.4.4.1 การกระทำเนื่องจากกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid Attack)

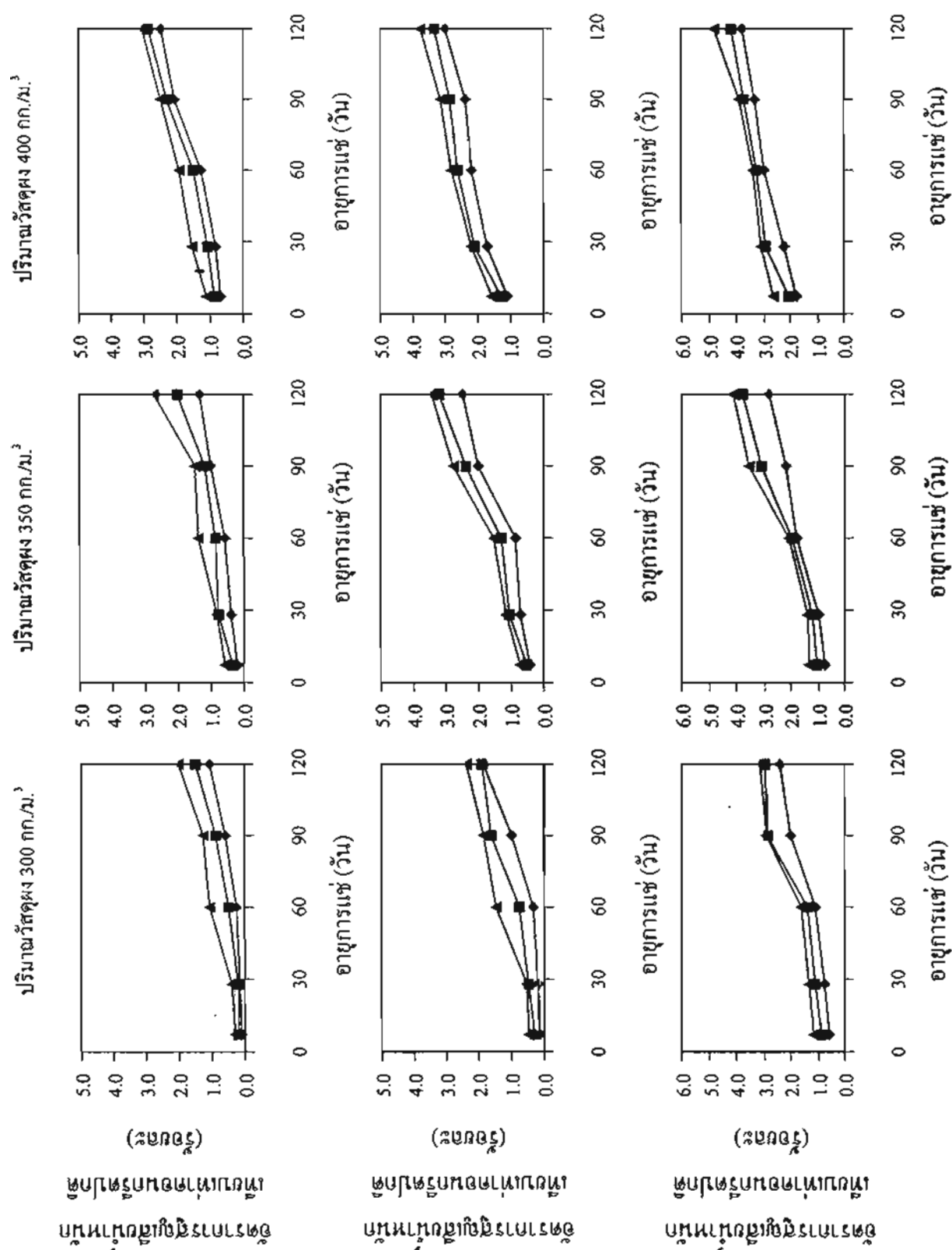
ผลการทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกในรูปของอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ) ของคอนกรีตเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่กำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นและปริมาณปูนซีเมนต์ ในคอนกรีตเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และ 300 กก./ม.³ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 6.26 พบว่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 นอร์มอลิตี (Normality, N) ของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ทรายแม่น้ำเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ พบว่าคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบมีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตปกติ โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบซึ่งความละเอียดมากกว่าทรายธรรมชาติจึงมีความไปได้ที่อนุภาคของผงฝุ่นทรายได้แบบสามารถดูดซับกรดซัลฟูริกไว้ที่ผิวหรือการดูดซับเข้าไปภายในอนุภาคผงฝุ่นทรายได้แบบได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำซึ่งมีพื้นผิวที่มีความเรียบ (พิจารณาจากภาพขยายที่ 6.1) จากผลดังกล่าวทำให้กรดกระทำต่อเพสต์ได้น้อยลงส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักจึงมีค่าลดลง

สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจาก 300 เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ พบว่าคอนกรีตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามปริมาณผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 5.6 ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น) ทำให้อัตราค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามความพรุนของโครงสร้างของเพสต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้กรดสามารถเข้าทำลายโครงสร้างของคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น

ร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนัก

◆ ร้อยละ 5 ■ ร้อยละ 10 ▲ ร้อยละ 15

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.



ภาพที่ ๘.๗ อัตราการยุบตัวของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนัก

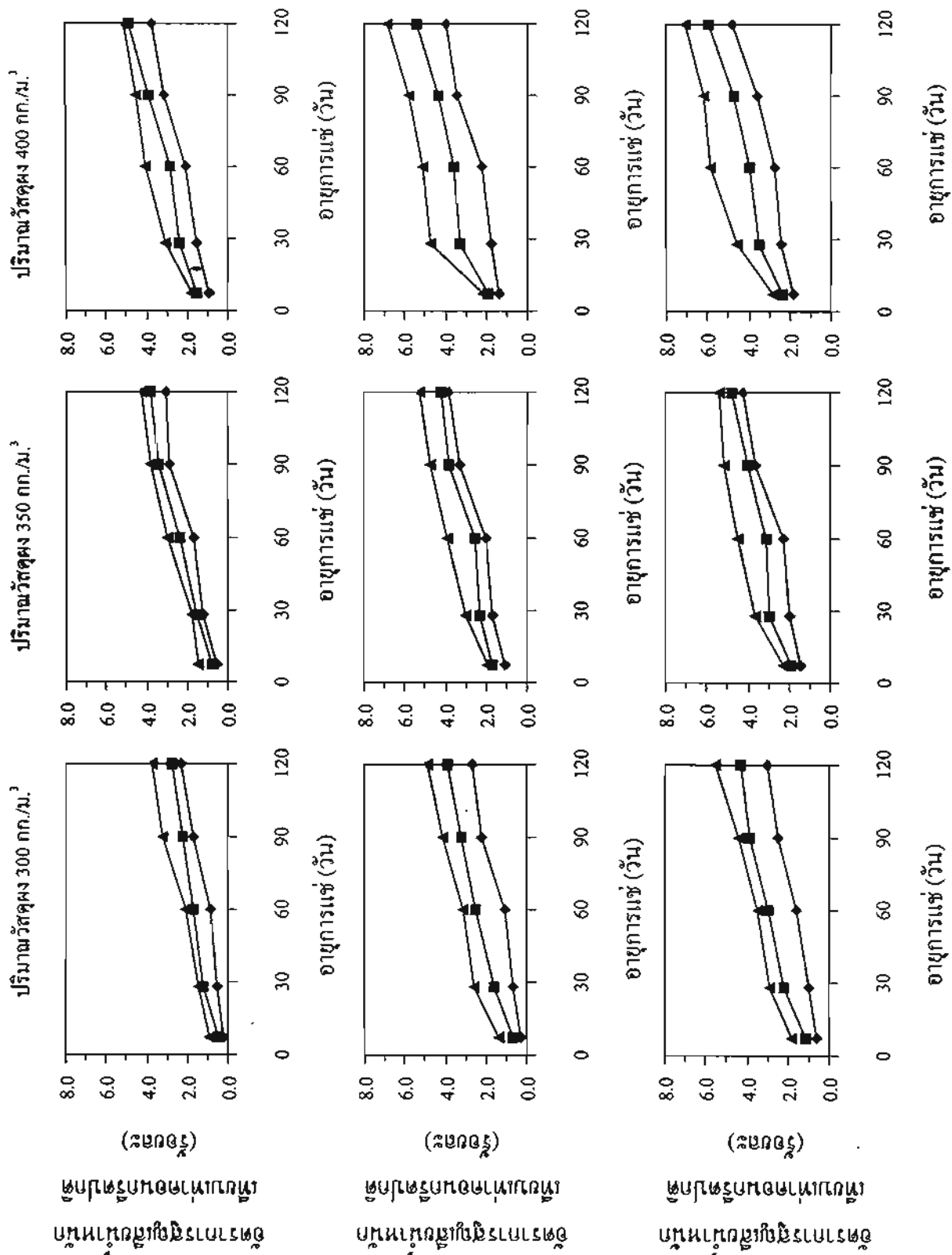
6.4.4.2 การกระทำเนื่องจากกรดอะซิติก (Acetic Acid Attack)

ผลการทดสอบค่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดอะซิติก (CH_3COOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 นอร์มอลิตี (ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2.56 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ แสดงในภาพที่ 6.27 พบว่าแนวโน้มของความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนมีแนวโน้มลักษณะเดียวกับการกัดกร่อนของกรดซัลฟริก กล่าวคือ ในช่วงแรกของการแช่ในสารละลายกรดมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงและจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น นอกจากนั้นจะเห็นว่าการเพิ่มร้อยละการแทนที่ของผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ทำให้เพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดอะซิติกได้ดี ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (5.7) พบว่าความทนทานของคอนกรีตในรูปของค่าการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการกัดกร่อนของกรดอะซิติก (CH_3COOH) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 นอร์มอลิตี (Normality, N) ซึ่งมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 2.56 ของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ทรายแม่น้ำและมีการยวบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมผงปูนทรายไส้แบบมีน้อยกว่าคอนกรีตปกติเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มของการสูญเสียน้ำหนักลดลงเมื่ออัตราส่วนของการแทนที่ของผงปูนทรายไส้แบบในทรายธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการแทนที่ของผงปูนทรายไส้แบบซึ่งความละเอียดมากกว่าทรายธรรมชาติจึงมีความไปได้ที่อนุภาคของผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม GSW สามารถอุดซบกรดยึดติดบางส่วนไว้ที่ผิวหรือกระทั่งการอุดซบเข้าไปภายในอนุภาคผงปูนทรายไส้แบบได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทรายธรรมชาติซึ่งมีพื้นผิวที่เรียบ (พิจารณาจากภาพขยายที่ 6.1) ซึ่งจากผลดังกล่าวทำให้กรดกระทำต่อเพสต์ได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกมีค่าลดลง

สำหรับอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณ 300 เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ พบว่าคอนกรีตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากกรดเพิ่มขึ้นตามปริมาณผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นดังสมการที่ 5.7 ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่าการยวบตัวเริ่มต้นซึ่งก็คือปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามความพรุนของโครงสร้างของเพสต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้กรดสามารถเข้าทำลายโครงสร้างของคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น

ร้อยละ 5 ■ ร้อยละ 10 ▲ ร้อยละ 15

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.



ภาพที่ 6.27 อัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยของน้ำก่อนการปิดกั้นการซึมผ่านของผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยแบบกลุ่ม GSW

6.5 สรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ที่มีต่อคอนกรีต

จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลกระทบของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จสามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

6.5.1 คุณสมบัติพื้นฐานของผงฝุ่นทรายใต้แบบ

คุณสมบัติพื้นฐานของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากระบวนการหล่อเครื่องยนต์ประกอบด้วย องค์ประกอบเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ และศักยภาพเบื้องต้นในงานซีเมนต์และคอนกรีตมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 70 ถึง 77 และจากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction ร่วมด้วยทำให้สรุปว่าผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW มีสารประกอบของไฮดรอกไซด์และเหล็กเพิ่มเติม อนุภาคมีสีคล้ำจนถึงเป็นสีเทาไหม้ พื้นผิวขรุขระและมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 165.41 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เช่นเดียวกัน นอกจากนั้น จากค่าดัชนีกำลังของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่มดังกล่าวเมื่อนำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 56 และ 60 ตามลำดับซึ่งต่ำกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนด ดังนั้นจึงมีแนวทางใหม่ในการนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) และจากมาตรฐานของมวลรวมละเอียด (ASTM C 33) สามารถสรุปอัตราส่วนการนำผงฝุ่นทรายใต้แบบมาใช้แทนที่ในทรายแม่น้ำได้ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

6.5.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้กลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จปกติที่ไม่ผสมสารเคมีผสมเพิ่ม โดยทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติหรือทรายแม่น้ำ โดยน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 5, 10 และ 15 ตามลำดับ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในสภาพสด

1.1 คอนกรีตที่ผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำทำให้หน่วยน้ำหนักในสภาพสด (Unit Weight) เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตผสมเสร็จที่มีส่วนผสมของผงทรายใต้แบบกลุ่ม GSW

มีค่าหน่วยน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตปกติในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 1.4 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบเพิ่มขึ้น โดยค่าหน่วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเสร็จ

1.2 การแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติ ทำให้ค่าความต้องการน้ำ (Water Requirement) ของคอนกรีตผสมเสร็จมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 0.3 ถึง 12.0 ซึ่งมากกว่าคอนกรีตผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW และการลดลงของกำลังอัดด้วยปัจจัยเช่นเดียวกัน

1.3 อัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีค่ามากกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งเป็นมาจากความเหนียวและสารเคมีผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพของได้แบบระหว่างกระบวนการผลิตที่ลงเหลือในผงฝุ่นทรายได้แบบ

1.4 ระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายของคอนกรีตเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติและมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในทรายธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยสรุประยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้นในตารางที่ 6.4

2. คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)

2.1 คอนกรีตผสมเสร็จซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำที่ร้อยละ 0 (ทรายแม่น้ำ), 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก พบว่าการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติและสัดส่วนของผงฝุ่นทรายได้แบบในคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความแตกต่างของค่ากำลังอัดที่ลดลงจากคอนกรีตปกติมากในช่วงแรก ในขณะที่ช่วงหลังมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ

2.2 คอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำมีค่ากำลังดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength) ต่ำกว่าคอนกรีตปกติและมีแนวโน้มของการลดลงเช่นเดียวกับกำลังอัดของคอนกรีต เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้นทำให้กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตในช่วง 3 วันแรก มีค่าลดลงมากที่สุดถึงร้อยละ 65 และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (f_c) และแรงดึงแบบผ่าซีก (f_t) ของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW เป็นไปตามการที่ (6.3)

$$\begin{aligned} f_t &= 0.455f_c^{0.593} \text{ ที่ } R^2 = 0.8595 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 5 \pm 0.5 \text{ ซม.} \\ f_t &= 0.314f_c^{0.695} \text{ ที่ } R^2 = 0.5934 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 10 \pm 0.5 \text{ ซม.} \\ f_t &= 0.301f_c^{0.736} \text{ ที่ } R^2 = 0.8711 \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ } 15 \pm 0.5 \text{ ซม.} \end{aligned} \quad (6.3)$$

ตารางที่ 6.4

ระยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตผสมผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW

ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	ค่าการยุบตัวเริ่มต้น ± ค่าความ คลาดเคลื่อน (ซม.)	ปริมาณผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในคอนกรีต (กก./ม. ³) [ร้อยละการแทนที่ของผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำ]								
		ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น [เวลาที่เพิ่มขึ้น] (นาที)				ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย [เวลาที่เพิ่มขึ้น] (นาที)				
		0[0]	5[42]	10[84]	15[126]	0[0]	5[42]	10[84]	15[126]	
300	ค่าการยุบตัว									
	5 ± 0.5	136[0]	138[2]	139[3]	145[12]	196[0]	207[11]	215[19]	227[31]	
	10 ± 0.5	145[0]	149[4]	155[10]	165[20]	207[0]	213[6]	224[17]	232[25]	
	15 ± 0.5	155[0]	165[10]	183[28]	185[30]	218[0]	228[10]	237[19]	245[27]	
	ค่าการยุบตัว	0[0]	5[41]	10[81]	15[122]	0[0]	5[41]	10[81]	15[122]	
	5 ± 0.5	105[0]	110[5]	127[22]	129[24]	169[0]	173[4]	184[15]	189[20]	
350	10 ± 0.5	138[0]	140[2]	147[9]	152[14]	182[0]	197[15]	208[26]	214[32]	
	15 ± 0.5	143[0]	153[10]	162[19]	167[24]	201[0]	213[12]	223[22]	225[24]	
	ค่าการยุบตัว	0[0]	5[37]	10[74]	15[111]	0[0]	5[37]	10[74]	15[111]	
400	5 ± 0.5	89[0]	98[9]	107[18]	116[27]	144[0]	150[6]	157[13]	168[24]	
	10 ± 0.5	127[0]	131[4]	140[13]	150[23]	162[0]	171[9]	180[18]	184[22]	
	15 ± 0.5	135[0]	146[11]	153[18]	161[26]	176[0]	184[8]	190[14]	201[25]	

2.3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน (Modulus of Elasticity at the age of 28 days) ของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้น และคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 80 ถึง 110 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318

3. คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่มผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW

3.1 การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water) ของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตปกติร้อยละ 0.1 ถึง 2.5

3.2 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ในรูปของการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีต (Length Change) ของคอนกรีตปกติเปรียบเทียบกับคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติ โดยเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น

3.3 คอนกรีตที่มีปริมาณของการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากโซเดียม (Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ลดลง โดยทำให้การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น

3.4 ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) โดยคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำมีค่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่อายุไม่เกิน 120 วัน มากกว่าคอนกรีตปกติ และอัตราการสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW เพิ่มขึ้น

บทที่ 7

สรุปการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้ได้นำเสนอข้อสรุปของการศึกษาซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.1 สรุปผลการศึกษา

จากการนำผงฝุ่นทรายไส้แบบ (Foundry Sand) จากอุตสาหกรรมหล่อเครื่องยนต์และชิ้นส่วนภายใน (Automobile Foundry Industry) มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จปกติที่ไม่ใส่สารเคมีผสมเพิ่ม (Admixtures) ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ และค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ โดยนำผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) มาทำการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ และผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) มาทำการแทนที่ในทรายแม่น้ำที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สามารถสรุปในประเด็นดังต่อไปนี้

7.1.1 ผลกระทบของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ

ก.1 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในสภาพสด

ก.1.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (Unit Weight) ในสภาพสด โดยคอนกรีตผสมเสร็จมีค่าหน่วยน้ำหนักลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบเพิ่มขึ้น โดยค่าหน่วยน้ำหนักที่ลดลงไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเสร็จ

ก.1.2 การแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าความต้องการน้ำ (Water Requirement) เพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 1.1 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ และไม่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเสร็จ

ก.1.3 คอนกรีตซึ่งผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีอัตราการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) มากกว่าคอนกรีตปกติ

ก.1.4 คอนกรีตเสริมผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้าย (Initial and Final Setting Times) เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น

ข. คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมเสริมผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW

ข.2.1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเสริม (Compressive Strength) และกำลังดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength) มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตปกติและมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้น

ข.2.2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน (Modulus of Elasticity) โดยเมื่อร้อยละของการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง และมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดมาตรฐานของ American Concrete Institute (ACI 318 (Building Code Requirements for Structural Concrete)) ไม่เกินร้อยละ 30

ค. คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตผสมเสริมผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW)

ค.3.1 การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการขยายตัวในน้ำจนถึงที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลง โดยสรุปการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบที่อายุ 28 วัน มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด (ความเครียด (E) ไม่เกิน 530 ไมครอน)

ค.3.2 คอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากสารละลายโซเดียม (Na_2SO_4) ต่ำกว่าคอนกรีตปกติ ในขณะที่ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) ที่ความเข้มข้น 1 นอร์มอลลิต์ (N) ของคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตปกติ

7.1.2 ผลกระทบของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสริม

ก. คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสริมผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในสภาพสด

ก.1.1 คอนกรีตที่ผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำทำให้น้ำหนักในสภาพสด (Unit Weight) เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตผสมเสริมที่มีส่วนผสมของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีค่าหน่วยน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตปกติในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 1.4

ก.1.2 การแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติ ทำให้ค่าความต้องการน้ำ (Water Requirement) ของคอนกรีตผสมเสริมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 0.3 ถึง 12.0

ก.1.3 อัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีค่ามากกว่าคอนกรีตปกติ

ก.1.4 ระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายของคอนกรีตเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีค่าเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นอย่าง ค่อนข้างตามสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในทรายธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

ข. คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)

ข.2.1 การแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำมีผลทำให้กำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติและสัดส่วนของผงฝุ่นทรายได้แบบในคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความแตกต่างของค่ากำลังอัดที่ลดลงจากคอนกรีตปกติมีมากในช่วงแรก ในขณะที่ช่วงหลังมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ

ข.2.2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วันของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้น และคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 80 ถึง 110 ของมาตรฐาน ACI 318

ก. คุณสมบัติทางด้านการทนทานของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่มผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW

ก.3.1 การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water) ของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตปกติร้อยละ 0.1 ถึง 2.5 ในขณะที่การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในทรายแม่น้ำ

ก.3.2 คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากโซเดียม (Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ลดลง โดยทำให้การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) ลดลง โดยคอนกรีตมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW เพิ่มขึ้น

7.1.3 จากผลการศึกษาสรุปว่า สามารถใช้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อผลิตคอนกรีตผสมเสร็จได้ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ขึ้นกับคุณสมบัติที่ต้องการใช้งาน เช่น ค่าการยุบตัวและกำลังอัด เป็นต้น ในขณะที่สามารถนำผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW มาแทนที่ในแม่น้ำ โดยน้ำหนัก ได้ถึงร้อยละ 15

7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 จากการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ โดยทำการแทนที่ผงฝุ่นทราย ใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และทำการแทนที่กลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำซึ่งใช้คอนกรีตผสมเสร็จประเภทปกติที่ไม่มีการผสมสารผสมเพิ่ม (Admixture) ดังนั้นจึงควรศึกษาผลกระทบของสารผสมเพิ่มเติม อาทิเช่น ผลของสารลดน้ำอย่างแรง (Superplasticizer) และ สารหน่วงการก่อตัว (Retarding Agent) ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบ ทั้งนี้เพราะในคอนกรีตผสมเสร็จโดยทั่วไปต้องใส่สารผสมเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีต

7.2.2 ในกรณีของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ควรขยายขอบเขตอัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใต้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ซึ่งทำการแทนที่ในทรายธรรมชาติที่กำหนดไว้ในขอบเขตการศึกษาที่เท่ากับร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในเรื่องขนาดผลตามมาตรฐาน ASTM C 33 แต่จากผลการทดสอบ พบว่าผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมาก ดังนั้นจึงควรศึกษาในกรณีที่อัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้นไปจนกระทั่งใช้ผงฝุ่นทรายใต้แบบเพื่อทดแทนทรายแม่น้ำ

7.2.3 ในส่วนของผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม ควรทำการศึกษาคุณสมบัติของผงฝุ่นทรายใต้แบบเพิ่มเติม โดยจะเห็นว่าผงฝุ่นทรายใต้แบบเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม ดังนั้นการศึกษาในเรื่องการสะสมสารพิษที่ตกค้างจึงเป็นประเด็นที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมถึงแม้ว่าจะมีผลการทดสอบว่าผงฝุ่นทรายใต้แบบมีปริมาณสารพิษตกค้างไม่เกินกว่าค่าที่กำหนดของกระทรวงอุตสาหกรรม (ตารางที่ 2.1) โดยทำการศึกษาคุณสมบัติ อาทิเช่น การชะล้าง (Leachate) ของสารพิษในระยะยาว เป็นต้น

บรรณานุกรม

- คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์บริษัท จุฑาทอง จำกัด, 2543.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร, 2544.
- บัญชา ธนบุญสมบัติ. การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคไฟฟ้าแรงดัน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2544.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- American Concrete Institute. "ACI 318 Building Code Requirements for Structural Concrete" An ACI Standard. Farmington Hills, Michigan, USA, 2002.
- Asgeirsson, H. and Gudmunwon, G., "Pozzolanic Activity of Silica Dust". Cement and Concrete Research ,1979, pp. 249-252.
- ASTM Committee, "ASTM C 33 Standard Specification for Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
- ASTM Committee, "ASTM C 39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
- ASTM Committee, "ASTM C 94 Standard Specification for Ready-mixed Concrete", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, "ASTM C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregate", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, "ASTM C 138 Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, "ASTM C 143 Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, "ASTM C 403 Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, "ASTM C 469 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete Compression", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, "ASTM C 496 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, "ASTM C 618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, "ASTM C 1012 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

Bensted, J. and Barnes, P., Structure and Performance of Cements. Second Edition, New York: Spon Press, 2002.

Hewlett, P. C., Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Fourth Edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998.

McIntyre, S., Rundman, K., Bailhood, C., Rush, P., Sandell, J., and Stillwell, B., "Benefication and Reuse of Foundry Sand Residuals: A Preliminary Report", AFS Transaction, 1992, No. 92, pp. 201 – 208.

Mindress, S., Young J. F., and Darwin, D., Concrete. Second Edition. United State of America: Prentice Hall, 2002.

Naik, T., and Kraus, R., "Development of Controlled Low Strength Materials", Report No. Rep – 274 Submitted to Kohler Company, 1995.

Naik, T., Patel, V. M., Parikh, D.M., and Tharaniyall, M.P., "Utilization of Used Foundry Sand in Concrete", Journal of Material in Civil Engineering, 1994, No. 2 : pp. 254 – 263.

Neville, A.M., Properties of Concrete. Fourth Edition, London: Pitman Books Limited, 1996.

Santhanam, M., Cohen, M. D., and Olek J., "Mechanism of Sulfate Attack: A Fresh Look Part I: Summary of Experimental Results". Cement and Concrete Research, 2001: pp. 915 – 921.

Santhanam, M., Cohen, M. D., and Olek J., "Mechanism of Sulfate Attack: A Fresh Look Part 2: Proposed Mechanisms". Cement and Concrete Research, 2002 : pp. 341 – 346.

U.S. Department of Transportation, "Foundry Sand Facts for Civil Engineers", A Report, 2003, pp. 1 – 68.

Wang, S.Y. and Vipulanandan, C., "Foundry Sand for Highway Application", Transportation Research Record, 1995, No. 1486 : pp. 213 – 222.

Wang, S. C. and Vipulanandan C., "Use of Foundry Sand in Transpotation Application", Journal of Transpotation, 1995, Vol. 9 No. 2 : pp. 492 – 499.

ภาคผนวกแสดงข้อมูลผลการทดสอบ
ตั้งแต่หน้า 178 – 274
แสดงในแผ่น COMPACT DISK มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผนวก ก คุณสมบัติของมวลรวมและการคำนวณสารละลายกรดที่ใช้ในการทดสอบ

- ก.1 คุณสมบัติของมวลรวม
- ก.2 การกระจายของขนาดอนุภาคทรายที่ใช้ในการทดสอบ
- ก.3 การคำนวณสารละลายกรดที่ใช้ในการทดสอบ

ผนวก ข คุณสมบัติคอนกรีตในสภาพสด

- ข.1 ผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด
- ข.2 ผลการทดสอบหาค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)
- ข.3 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

ผนวก ค คุณสมบัติทางกลคอนกรีต

- ค.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต
- ค.2 ผลการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าสี่ของคอนกรีต
- ค.3 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ผนวก ง คุณสมบัติทางด้านความทนทานคอนกรีต

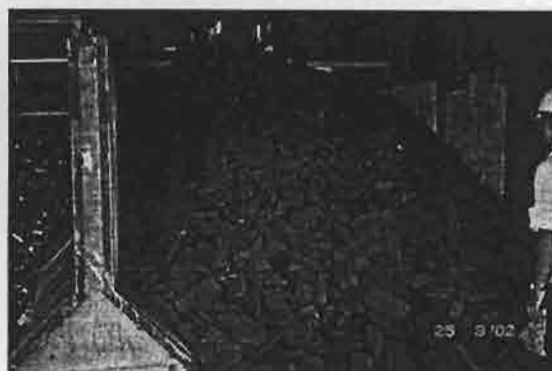
- ง.1 ผลการทดสอบการขยายตัวในน้ำ
- ง.2 ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง
- ง.3 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักอันเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้ง
- ง.4 ผลการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟต (Expansion in Sodium Sulfate)
- ง.5 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริก
- ง.6 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติก

ภาคผนวกที่ จ.1

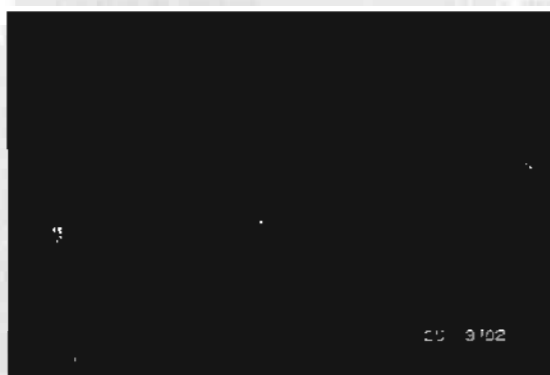
โรงงานหล่อชิ้นส่วนรถยนต์ของบริษัท โตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดชลบุรี



ภาพที่ จ.1.1 โรงงานหล่อชิ้นส่วนรถยนต์ของ
บริษัท โตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด



ภาพที่ จ.1.2 Pig Iron วัตถุดิบซึ่งใช้ในกระบวนการ
การหล่อหล่อชิ้นส่วนรถยนต์



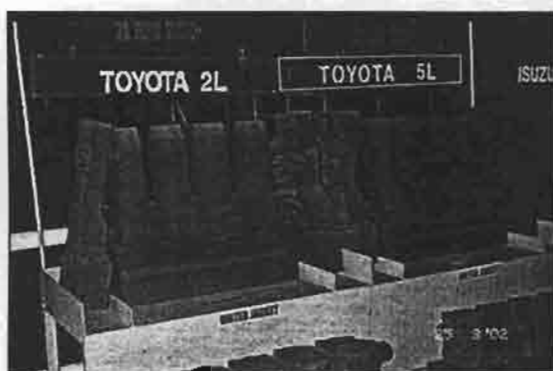
ภาพที่ จ.1.3 Scrap (Mild Steel) วัตถุดิบ
ที่ใช้ในกระบวนการหล่อชิ้นส่วนรถยนต์



ภาพที่ จ.1.4 สถานที่กองเก็บทรายที่ใช้ทำ
ไส้แบบกระบวนการหล่อชิ้นส่วนรถยนต์



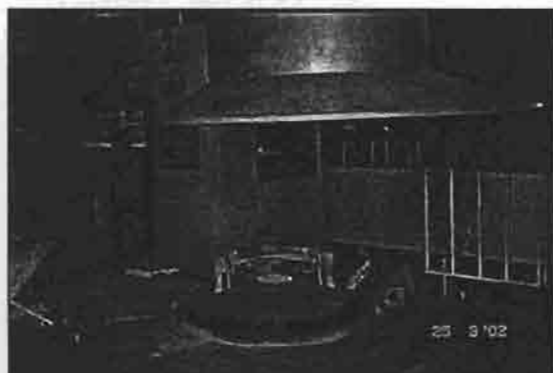
ภาพที่ จ.1.5 ทรายที่ใช้ในกระบวนการหล่อชิ้นส่วนรถยนต์ซึ่งนำเข้ามาจากประเทศออสเตรเลีย



ภาพที่ จ.1.6 แม่แบบซึ่งทำจากทรายใช้ใน
กระบวนการหล่อชิ้นส่วนรถยนต์



ภาพที่ จ.1.7 บริเวณเตาหลอมโลหะ



ภาพที่ จ.1.8 เตาหลอมโลหะ



ภาพที่ จ.1.9 ผงฝุ่นทรายได้แบบได้แบบกลุ่ม
Green Sand และ Molding Waste (TDC-0002)

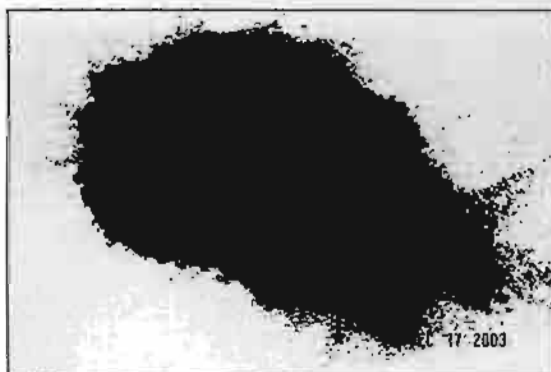


ภาพที่ จ.1.10 ผงฝุ่นทรายได้แบบได้แบบ
กลุ่ม Finishing Waste (TDC-0003)



ภาพที่ จ.1.11 ผงฝุ่นทรายได้แบบได้แบบ
กลุ่มที่มาจาก Shell Sand Waste (TDC-0006)

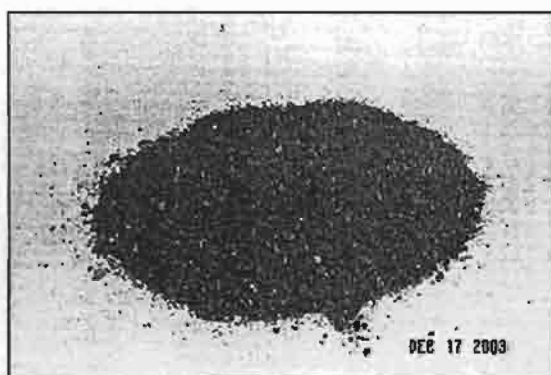
ภาคผนวกที่ จ.2
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ จ.2.1 ผงฝุ่นทรายได้แบบได้แบบชนิด
Green Sand and Molding Waste (GSW)



ภาพที่ จ.2.2 ผงฝุ่นทรายได้แบบได้แบบชนิด
Shell Sand Waste (SSW)



ภาพที่ จ.2.3 ทราเชอรรมาติ



ภาพที่ จ.2.4 โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

ภาคผนวกที่ จ.3

การทดสอบการกระจายขนาดคละของอนุภาคผงฝุ่นทรายใต้แบบ

ภาพที่ จ.3.1 ขนาดของตะแกรงที่ใช้ใน
การทดสอบการกระจายขนาดคละ



ภาพที่ จ.3.2 การชั่งตะแกรง



ภาพที่ จ.3.3 การชั่งตัวอย่างทดสอบ
จำนวน 500 กรัม



ภาพที่ จ.3.4 การเขย่าในเครื่องเขย่า (Sieve)

ภาคผนวกที่ จ.4

การปรับเทียบถังสำหรับการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก



ภาพที่ จ.4.1 การชั่งน้ำหนักถัง



ภาพที่ จ.4.2 การเทน้ำลงในถัง



ภาพที่ จ.4.3 ถังที่ใส่น้ำ หลังจากนำกระกมาปรับระดับน้ำให้เสมอขอบถัง
รวมทั้งวัดอุณหภูมิของน้ำเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

ภาคผนวกที่ จ.5

ภาพแสดงการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จในโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของ
บริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด



ภาพที่ จ.5.1 โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของ
บริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด



ภาพที่ จ.5.2 แบบหล่อที่ใช้ในการหล่อ
ตัวอย่างคอนกรีตผสมเสร็จ



ภาพที่ จ.5.3 เครื่องผสมคอนกรีตผสมเสร็จ



ภาพที่ จ.5.4 การซังผงปูนทรายใส่แบบก่อน
นำไปใส่ในเครื่องผสมคอนกรีตผสมเสร็จ



ภาพที่ จ.5.5 การบรรจุคอนกรีตผสมเสร็จลงรถโม



ภาพที่ จ.5.6 การขนถ่ายคอนกรีตผสมเสร็จ
ลงจากรถโม



ภาพที่ จ.5.7 การเติมน้ำในรตผสม
คอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัว
(Slump) ของคอนกรีตได้ตามกำหนดไว้



ภาพที่ จ.5.8 การบรรจุคอนกรีตลงในแบบหล่อ



ภาพที่ จ.5.9 คอนกรีตหลังจากการถอดแบบ



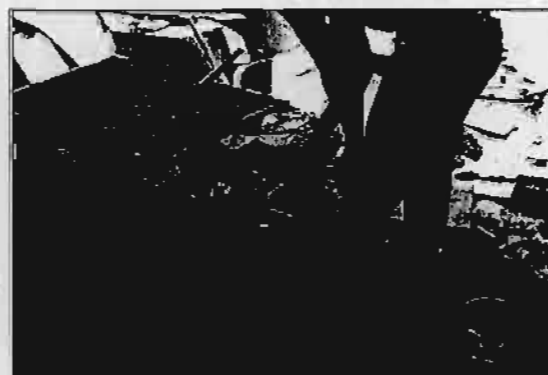
ภาพที่ จ.5.10 การบ่มคอนกรีตในบ่อบ่มที่
สร้างในโรงงานของบริษัทฯ

ภาคผนวกที่ จ.6

การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด (Unit Weight)



ภาพที่ จ.6.1 คอนกรีตผสมเสร็จ



ภาพที่ จ.6.2 การใส่คอนกรีตลงในถังทดสอบ



ภาพที่ จ.6.3 การตำคอนกรีตในถังทดสอบ



ภาพที่ จ.6.4 การเคาะที่บริเวณด้านข้างของ
ถังเพื่อไล่ฟองอากาศ



ภาพที่ จ.6.5 การปาดหน้าคอนกรีต



ภาพที่ จ.6.6 การชั่งน้ำหนักของคอนกรีต

ภาคผนวกที่ จ.7

การทดสอบค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)



ภาพที่ จ.7.1 คอนกรีตผสมเสร็จ



ภาพที่ จ.7.2 การตักคอนกรีตลงในกรวยทดสอบ



ภาพที่ จ.7.3 การดำคอนกรีตในกรวยทดสอบ



ภาพที่ จ.7.4 การวัดค่าการยุบตัว

ภาคผนวกที่ จ.8

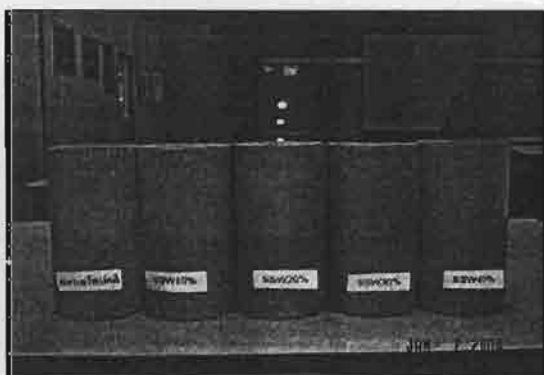
การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว



ภาพที่ จ.8.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

ภาคผนวกที่ จ.9

ตัวอย่างคอนกรีตผสมเสร็จหลังจากการถอดแบบ



ภาพที่ จ.9.1 คอนกรีตผสม SSW



ภาพที่ จ.9.2 คอนกรีต GSW

ภาคผนวกที่ จ.10

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



ภาพที่ จ.10.1 การวัดตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ จ.10.2 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด
ของคอนกรีต



ภาพที่ จ.10.3 การตัดตัวอย่างคอนกรีต



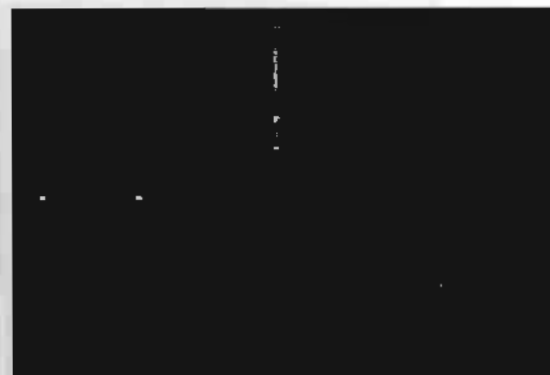
ภาพที่ จ.10.4 สภาพของคอนกรีตหลัง
การทดสอบ

ภาคผนวกที่ จ.11

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าสี่ของคอนกรีต



ภาพที่ จ.11.1 การตัดตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ จ.11.2 สภาพของคอนกรีตหลัง
การทดสอบ

ภาคผนวกที่ จ.12

การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน



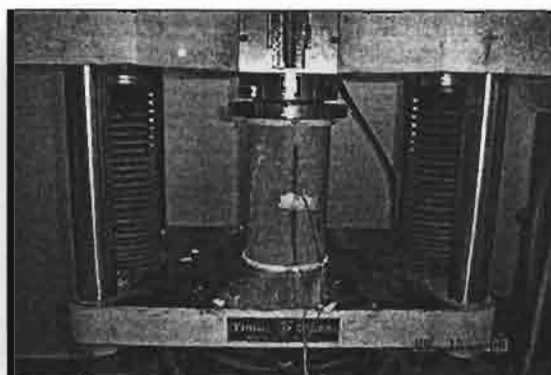
ภาพที่ จ.12.1 การแปรรูปคอนกรีต



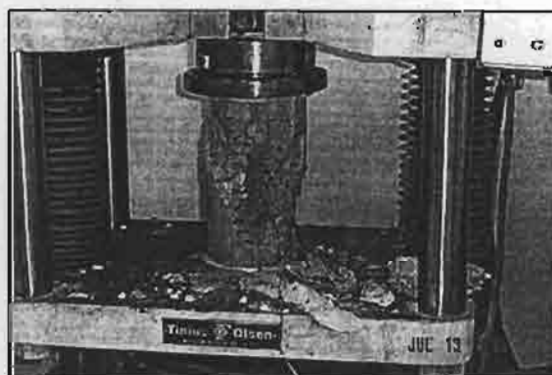
ภาพที่ จ.12.2 คอนกรีตที่ทำการแปรรูป
เป็นที่เรียบร้อย



ภาพที่ จ.12.3 เครื่องทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น



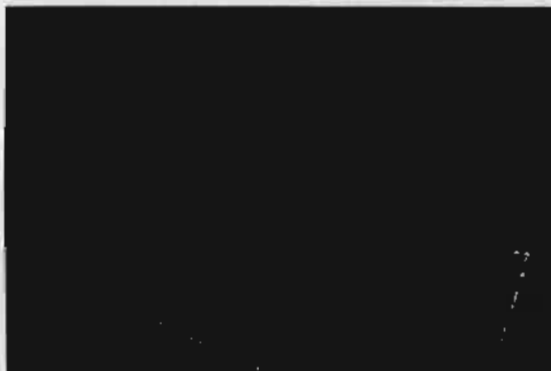
ภาพที่ จ.12.4 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเข้า
กับอุปกรณ์วัดการยืด/หดตัว



ภาพที่ จ.12.7 สภาพของคอนกรีตหลังการทดสอบ

ภาคผนวกที่ จ.13

การทดสอบหาค่าหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต



ภาพที่ จ.13.1 การบ่มคอนกรีตในน้ำ



ภาพที่ จ.13.2 คอนกรีตขณะทำการทดสอบ



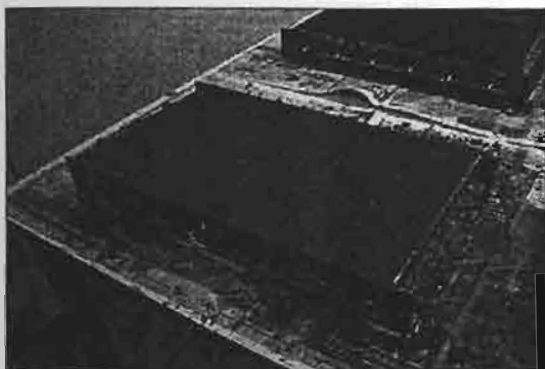
ภาพที่ จ.13.3 เครื่องทดสอบชนิด
Digital Length Comparator



ภาพที่ จ.13.4 การวัดค่าการหดตัวของคอนกรีต

ภาคผนวกที่ จ.14

การทดสอบความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีต



ภาพที่ จ.14.1 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต

ผสม GSW



ภาพที่ จ.14.2 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต

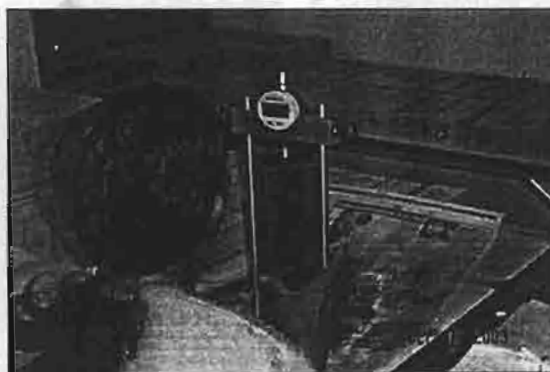
ผสม SSW



ภาพที่ จ.14.3 การบ่มตัวอย่างในน้ำ



ภาพที่ จ.14.4 การบ่มตัวอย่าง
ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



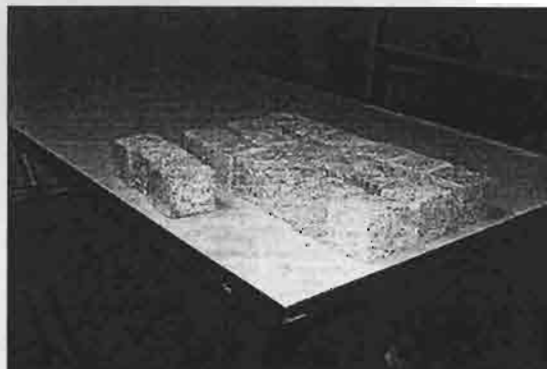
ภาพที่ จ.14.5 การวัดการขยายตัว

ภาคผนวกที่ จ.15

การทดสอบการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากกรด



ภาพที่ จ.15.1 การบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ



ภาพที่ จ.15.2 คอนกรีตก่อนการแช่กรด



ภาพที่ จ.15.3 การชั่งน้ำหนักเริ่มต้น



ภาพที่ จ.15.4 การเรียงตัวอย่างในถังแช่กรด



ภาพที่ จ.15.5 ตัวอย่างคอนกรีตที่เรียงเสร็จแล้ว



ภาพที่ จ.15.6 กรดที่ใช้ในการทดสอบ
(ก) ซัลฟูริก (H_2SO_4) (ข) อะซิติก (CH_3COOH)



ภาพที่ จ.15.7 การเทกรดในถังผสมสารละลาย



ภาพที่ จ.15.8 การคนสารละลายกรด



ภาพที่ จ.15.9 การเทสารละลายกรดในถังแช่ตัวอย่าง



ภาพที่ จ.15.10 การเรียงถังแช่กรด



ภาพที่ จ.15.11 ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการบ่ม
ในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ซึ่งมีสีขาว



ภาพที่ จ.15.12 ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการบ่ม
ในกรดอะซิติก (CH_3COOH) ซึ่งมีสีน้ำตาล

ประวัติการศึกษา



ชื่อ

นายณรงค์ศักดิ์ มากุล

วันเดือนปีเกิด

7 กันยายน พ.ศ. 2520

วุฒิการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์