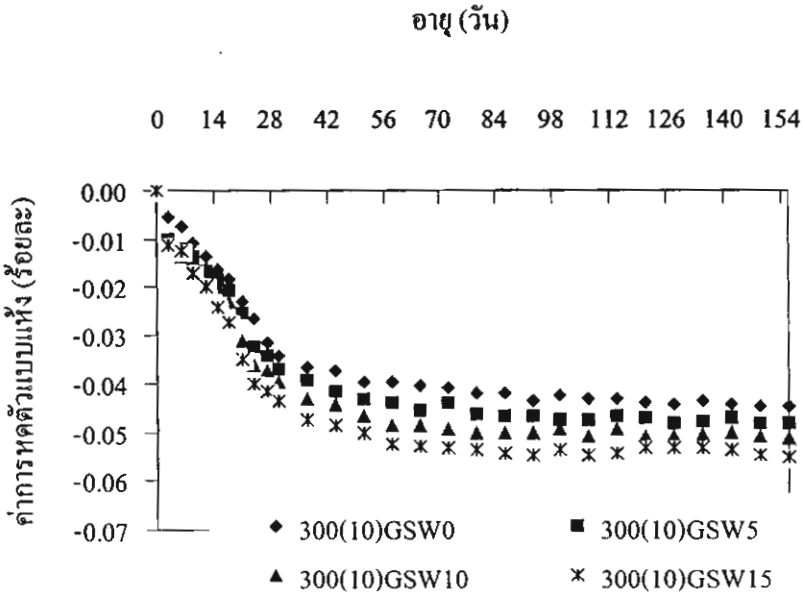
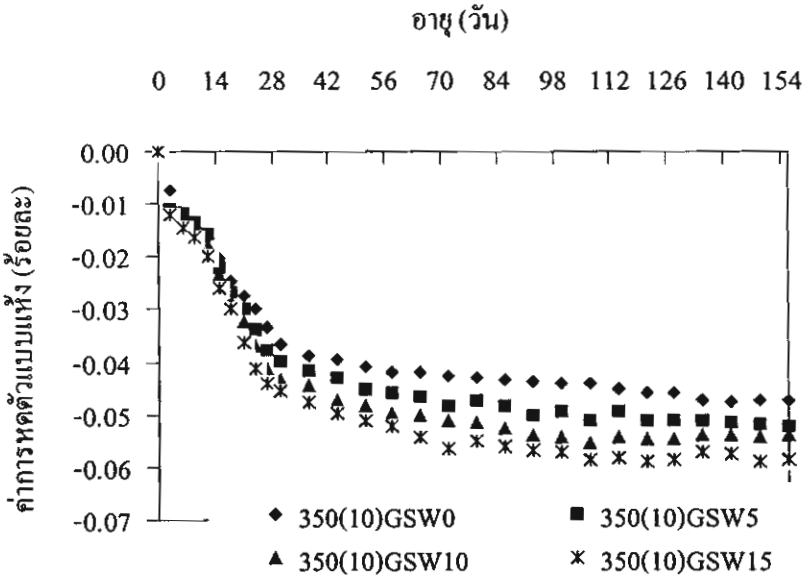
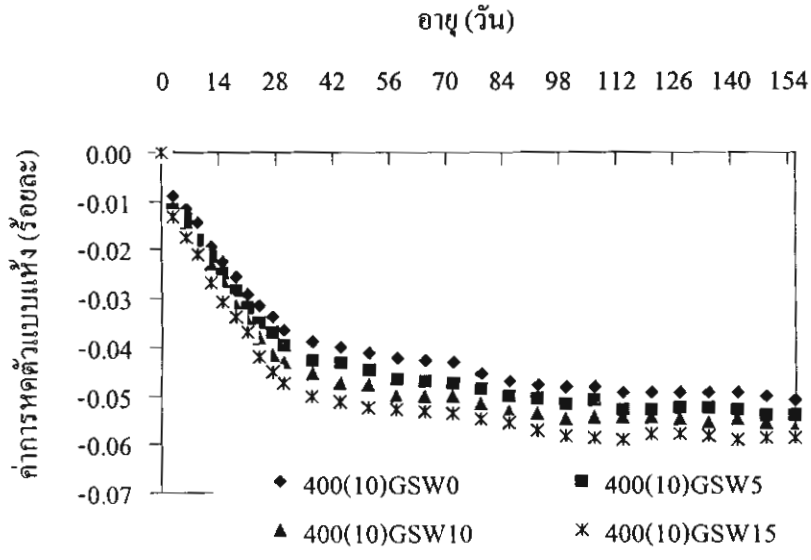
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ค่าการยุบเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. และมีปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.^{3} แสดงในภาพที่ 5.120 ถึง 5.128 ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของค่าการหดตัวแบบแห้งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. โดยคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีตปกติ อันเนื่องมาจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำ (ค่าการยุบตัวเริ่มต้นมากขึ้น) ทำให้ค่าการหดตัวแบบแห้งมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนั้นปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต เมื่อกำหนดค่าของการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากัน



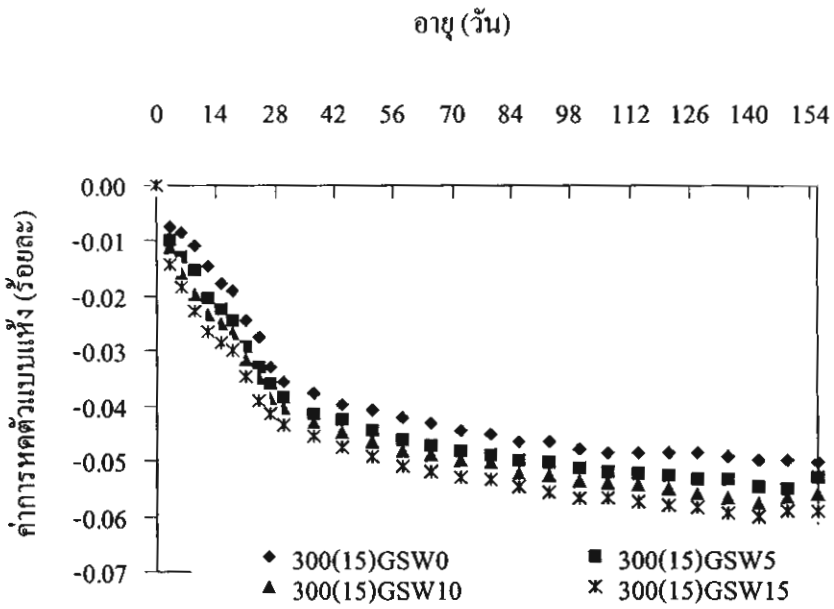
ภาพที่ 5.123 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



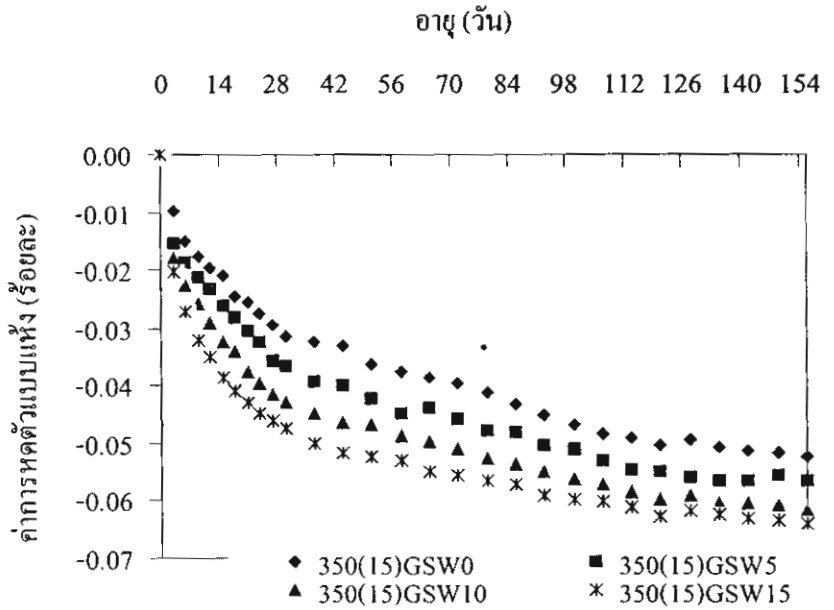
ภาพที่ 5.124 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



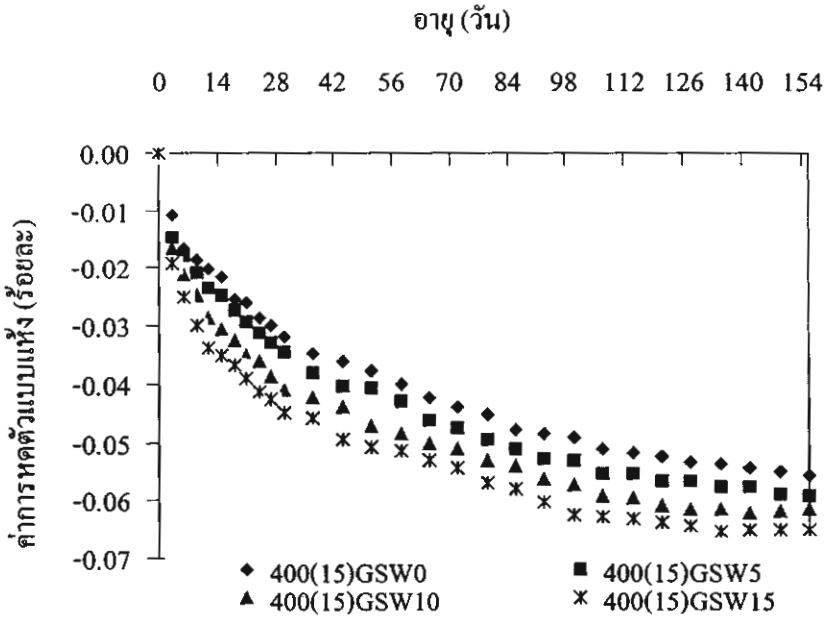
ภาพที่ 5.125 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.126 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.127 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.128 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

5.4.3 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต (Sulfate Attack)

ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากสารละลายซัลเฟต ($Na(SO_4)$) ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในช่วง 6 ถึง 8 ด้วยกรดซัลฟุริก (H_2SO_4) (ความเป็นกรดด่างของสารละลายซัลเฟตในธรรมชาติอาทิเช่น ในน้ำใต้ดินมีค่าอยู่ในช่วง 6 ถึง 8) โดยความต้านทานเนื่องจากสารละลายซัลเฟตสามารถวัดในรูปของการขยายตัวเชิงเส้น (Linear Expansion) ของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ดังแสดงในภาพที่ 5.129 ถึง 5.137 พบว่าคอนกรีตที่ผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตน้อยกว่าคอนกรีตปกติ โดยสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงซึ่งค่าการขยายตัวในช่วงประมาณ 130 วันแรก มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ทั้งคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ทั้งนี้เพราะในช่วงแรกที่ปริมาณของยิปซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) และเอ็ททริงไกด์มีน้อยกล่าวคือ ปฏิกิริยาของโซเดียมซัลเฟต ($Na(SO_4)$) กับเพสต์ในคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ โดยเริ่มจากการเกิดยิปซั่ม โดยโซเดียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดผลิตภัณฑ์เป็นยิปซั่ม ดังแสดงในสมการที่ (5.3) ซึ่งในช่วงแรกผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) มีปริมาณน้อยและส่วนใหญ่ถูกกักอยู่กับโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟตมีน้อย นอกจากนั้น พบว่าการเพิ่มขึ้นของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง อันเนื่องมาจากการลดลงของปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงยิ่งลดลงตามลำดับ

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4.10H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NaOH + 8H_2O \qquad (5.3)$$

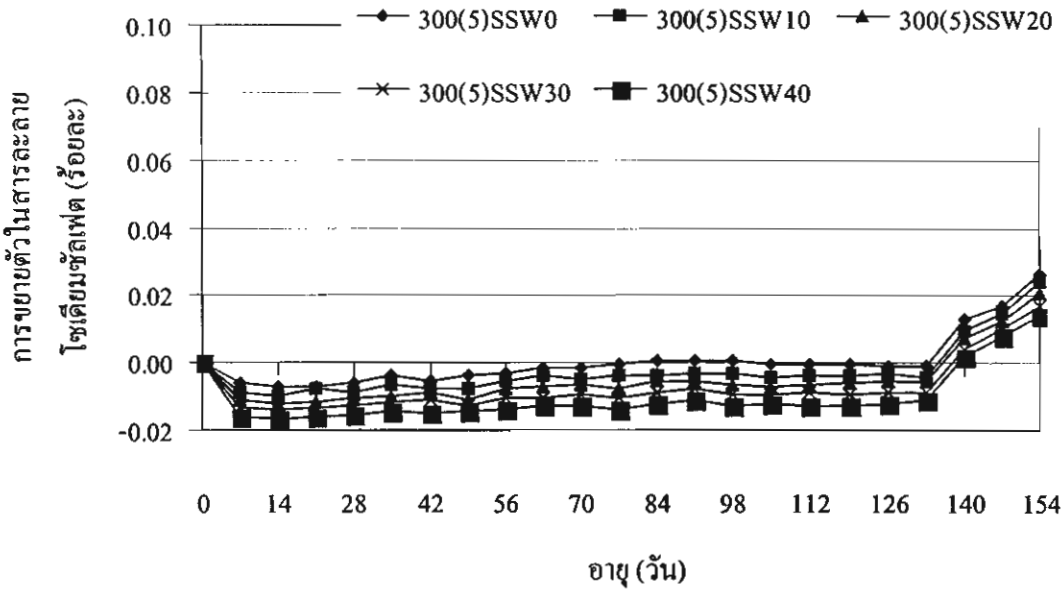
สำหรับในช่วงที่ 2 (หลังจาก 130 วัน (โดยประมาณ)) พบว่าคอนกรีตมีค่าขยายตัวเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็วมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงแรก โดยเป็นลักษณะแบบทันทีทันใด (Expansion Increase Suddenly) อันเป็นผลของปริมาณของยิปซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) และเอ็ททริงไกด์ โดยเฉพาะเอ็ททริงไกด์ ($3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.32H_2O$) ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวมากขึ้น (โดยเฉลี่ยสารประกอบเอ็ททริงไกด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นร้อยละ 104 ถึง 121 ของปริมาตรเริ่มต้น) โดยเอ็ททริงไกต์ (AFt-phase) ได้จากยิปซั่มที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (5.3) จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับไตร

แคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เกิดเอ็ททริงไกต์ ดังแสดงในสมการที่ (5.4) จึงส่งผลให้เกิดการขยายตัวที่เพิ่มสูงขึ้น

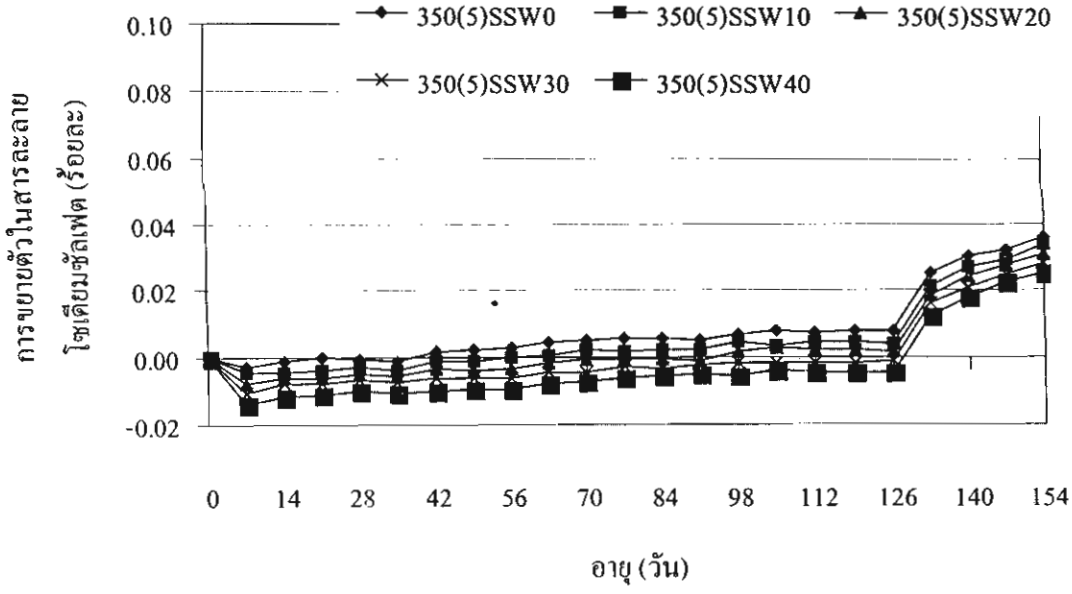
$$3CaO.Al_2O_3 + 3(Ca_2SO_4.2H_2O) + 26H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.32H_2O \quad (5.4)$$

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นกับ 5 ± 0.5 ซม. และปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม^3. ดังแสดงในภาพที่ 5.129 ถึง 5.131 ตามลำดับ พบว่าดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเมื่อคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งเป็นผลของการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะองค์ประกอบหลักที่เป็นไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$) ซึ่งทำปฏิกิริยากับซัลเฟตในยิปซั่มที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดผลิตภัณฑ์เป็นเอ็ททริงไกต์ ($3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.32H_2O$) โดยเฉพาะเมื่อมีซัลเฟตจากภายนอกในระหว่างการบ่มในสารละลายซัลเฟตจึงยิ่งทำให้มีเอ็ททริงไกต์เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและมีปริมาณมากในที่สุด อันจะนำมาซึ่งการขยายตัวของคอนกรีต ซึ่งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นทรายไส้แบบจะเห็นว่าถึงแม้จะมีปริมาณของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีค่าร้อยละ 3.32 (จากผลการทดสอบในครั้งที่ 1 ในตารางที่ 5.1) ในขณะที่ปูนซีเมนต์มีค่าร้อยละ 3.30 แต่กระนั้นผงฝุ่นทรายไส้แบบมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีปริมาณร้อยละ 1.73 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์มาก (ร้อยละ 66.28) ทำให้การขยายตัวจากการทำปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตซึ่งเป็นสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ลดลงตามลำดับตามปริมาณของผงฝุ่นทรายไส้แบบที่เพิ่มขึ้น

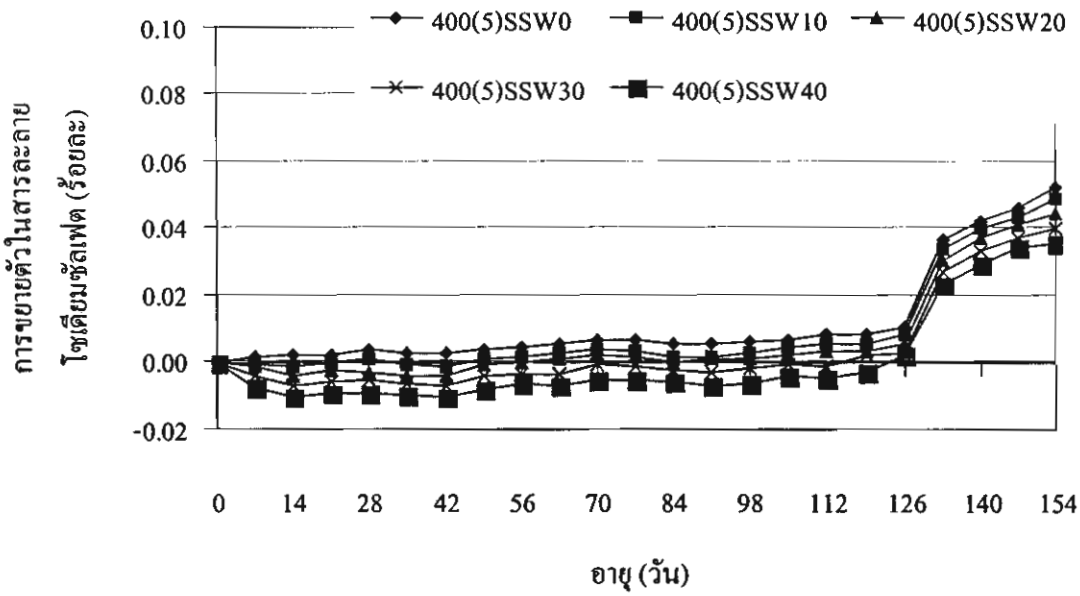
สำหรับอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์จาก 300 เป็น 350 และ 400 กก./ม.^{3} พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้การขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลของการที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$) มีปริมาณเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5.129 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

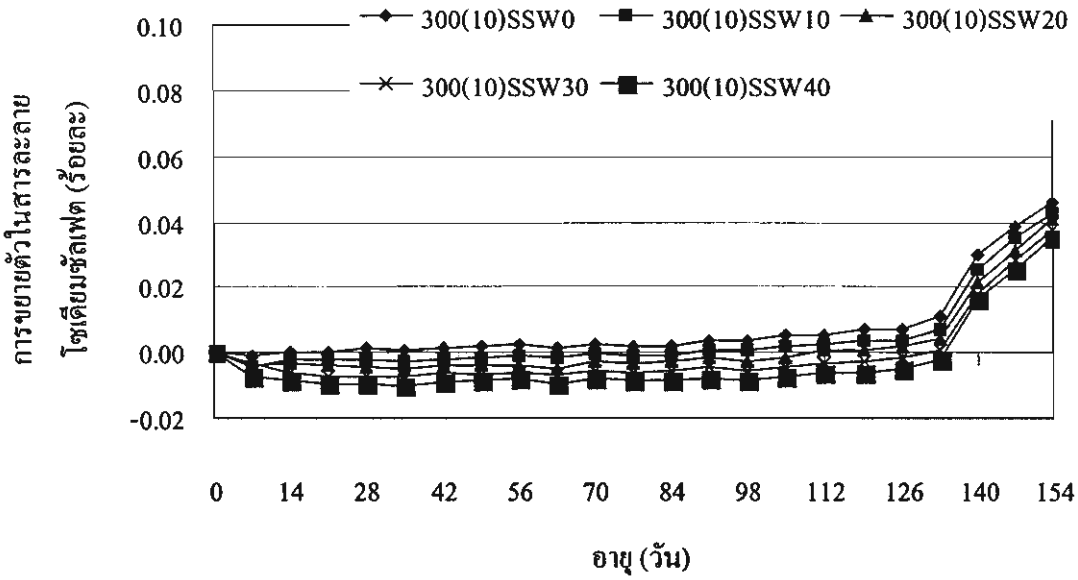


ภาพที่ 5.130 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

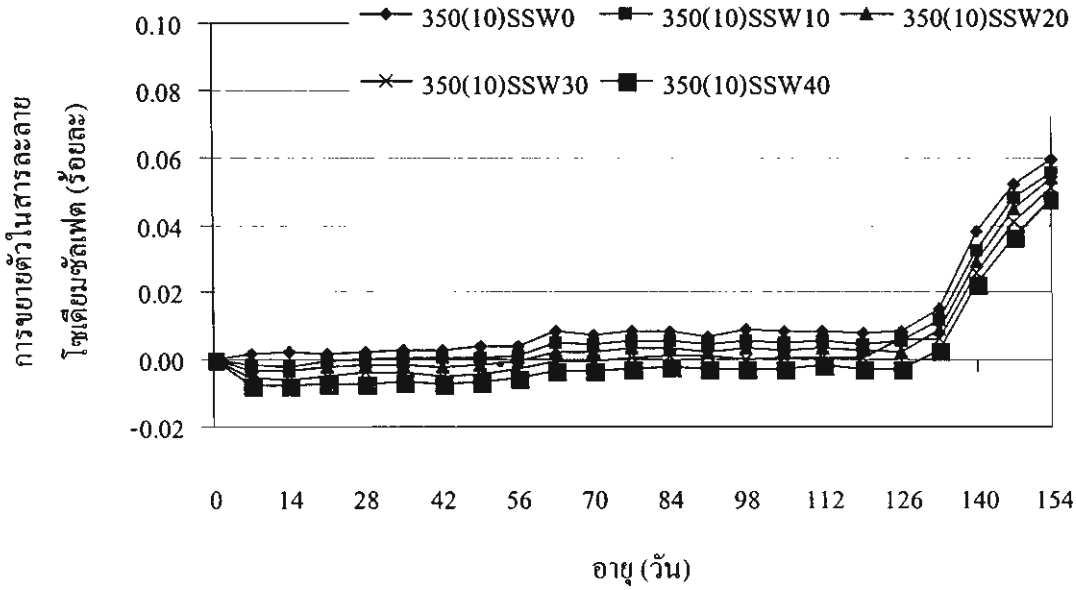


ภาพที่ 5.131 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

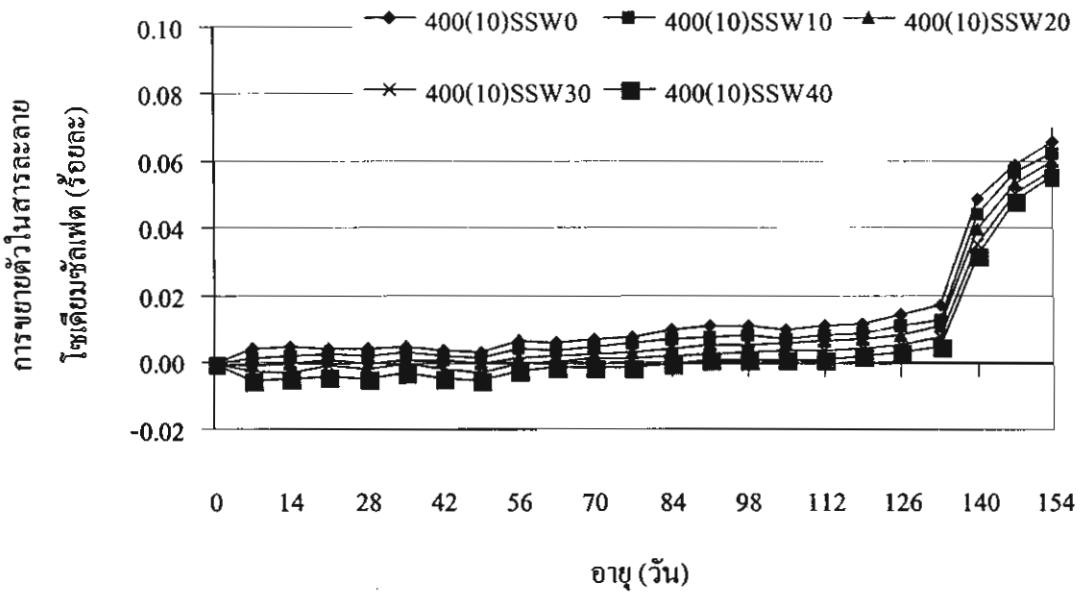
เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 เป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. แสดงในภาพที่ 5.132 ถึง 5.137 ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็นไปลักษณะเดียวกัน โดยคอนกรีตที่มีสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น แต่กระนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นซึ่งก็คือปริมาณน้ำในคอนกรีตที่มีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทำให้การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อันเนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้นอันส่งผลต่อไอออนของซัลเฟตที่สามารถเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและทำปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดการขยายตัวได้เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำทำให้น้ำอิสระในคอนกรีตเพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีค่าความสามารถในการละลาย (Solubility) ที่สูงละลายแล้วอยู่สภาวะของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่พร้อมจะทำปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ได้ดียิ่งขึ้น



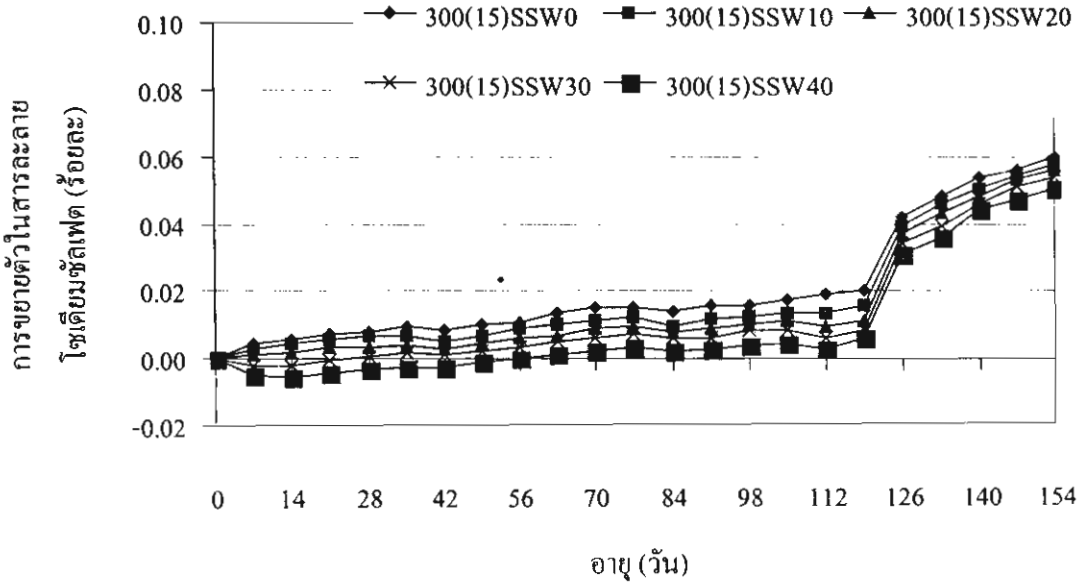
ภาพที่ 5.132 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



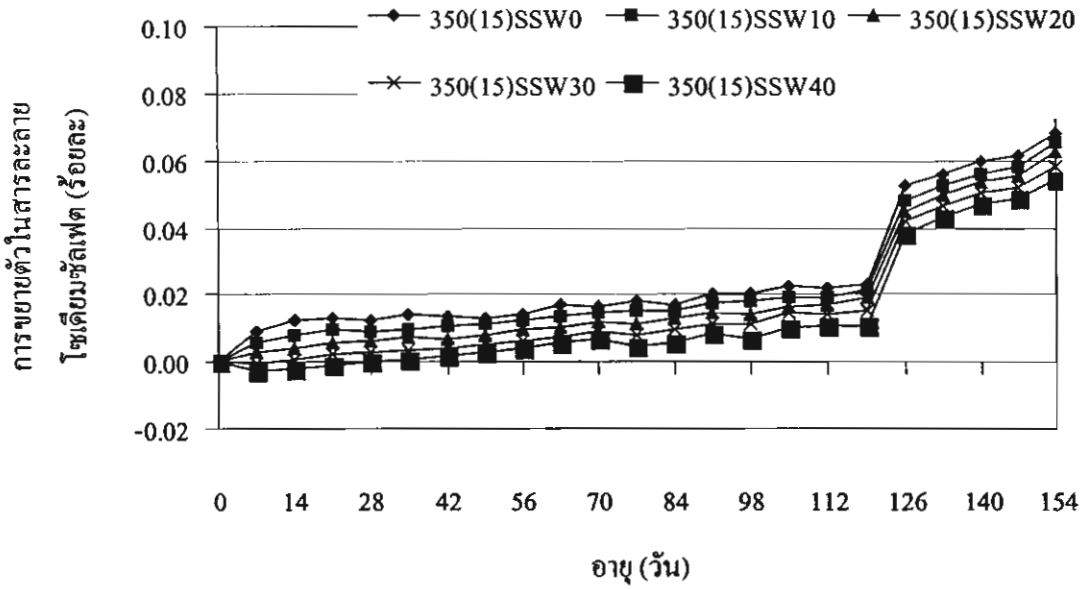
ภาพที่ 5.133 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



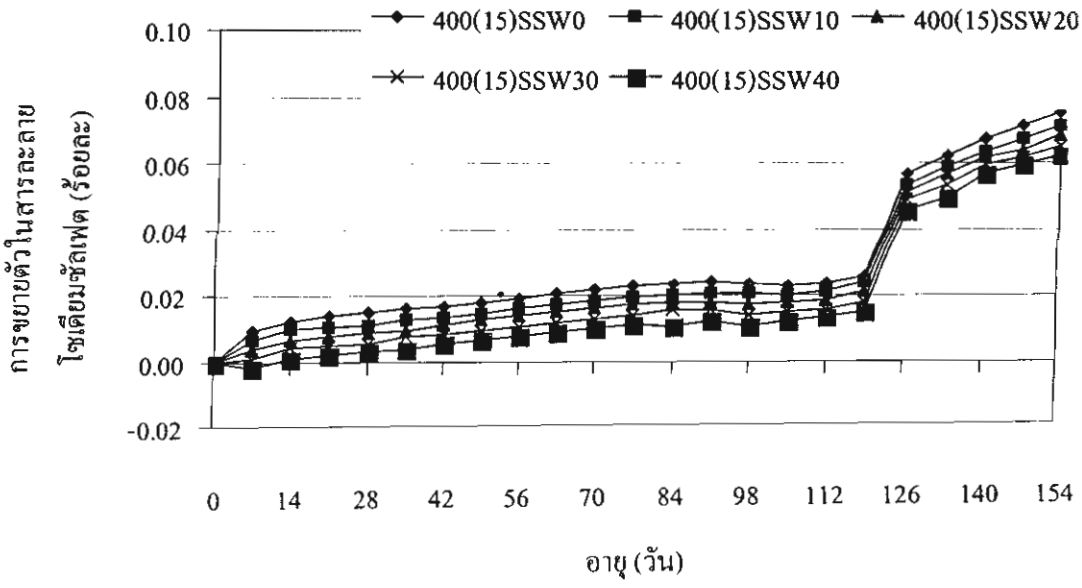
ภาพที่ 5.134 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.135 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.136 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

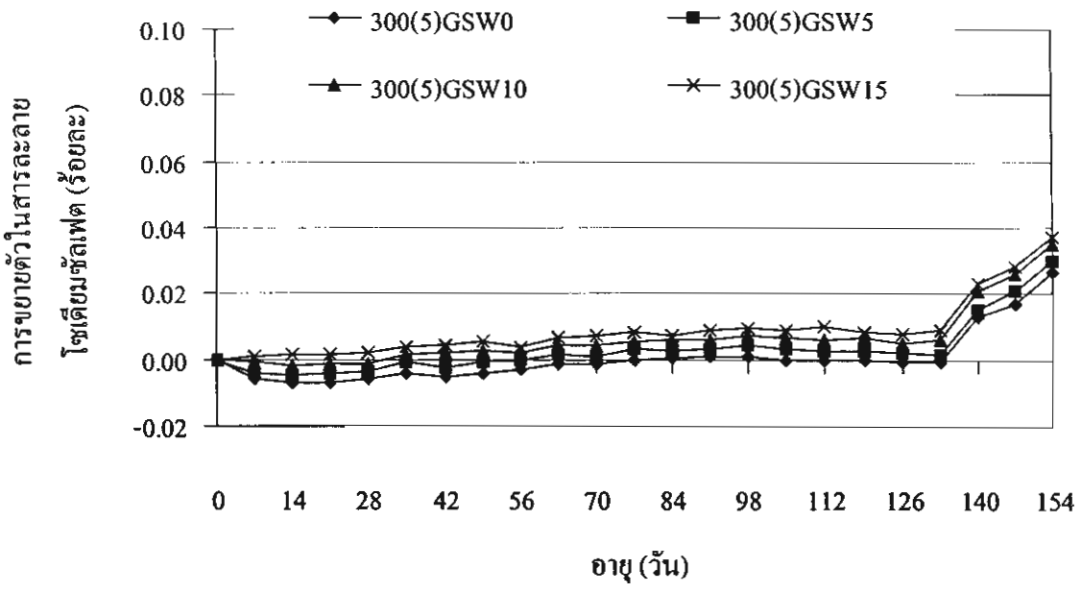


ภาพที่ 5.137 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

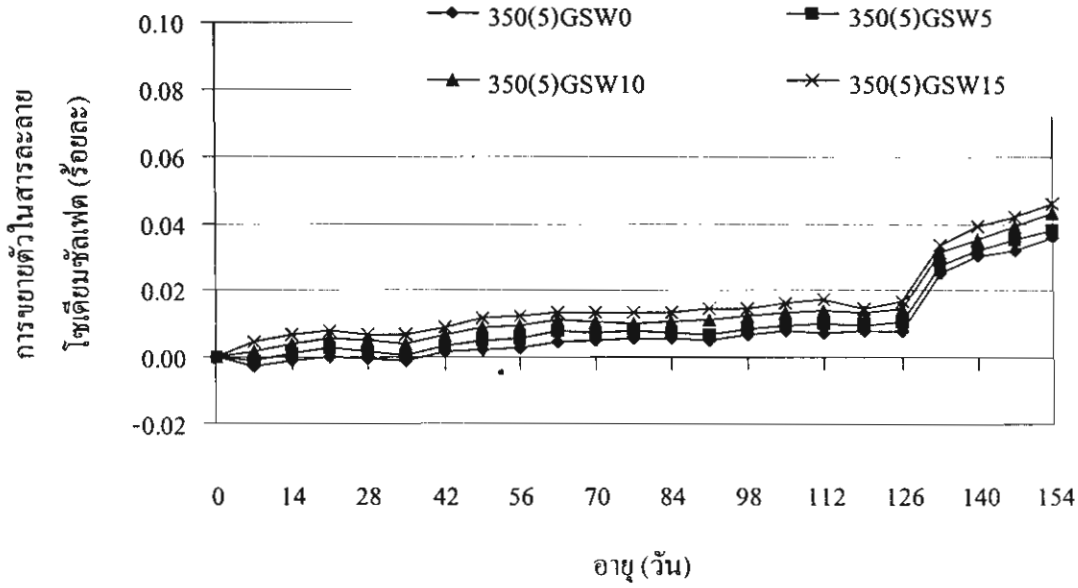
ผลการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตซึ่งทำการผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติ พบว่าทั้งคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5, 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. และมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.^{3} ดังแสดงในภาพที่ 5.139 ถึง 5.146 มีค่าการขยายตัวเป็นไปลักษณะเดียวกันกล่าวคือ ในช่วงแรกของการบ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต คอนกรีตมีค่าการขยายตัวที่ไม่แตกต่างไปจากคอนกรีตปกติ อันเป็นจากของปริมาณของยิปซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) และเอ็ททริงไกด์ที่มีน้อยทำให้การขยายตัวเกิดขึ้นไม่มาก (Santhanam, M., pp. 915 – 921) และในช่วงที่สองการขยายตัวเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ซึ่งได้ผลกระทบจากปริมาณของสารประกอบทั้งสองที่ทำให้เกิดการขยายตัว

สำหรับการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนปริมาณผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติมีผลทำให้การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบมีความละเอียดที่มากกว่าทรายธรรมชาติทำให้เป็นการเพิ่มความต้องการน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต อันจะนำไปสู่ความพรุนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงไอออนของซัลเฟตสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภานในคอนกรีตผ่านโพรงคาพิวลารีแล้วทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เพิ่มมากขึ้น

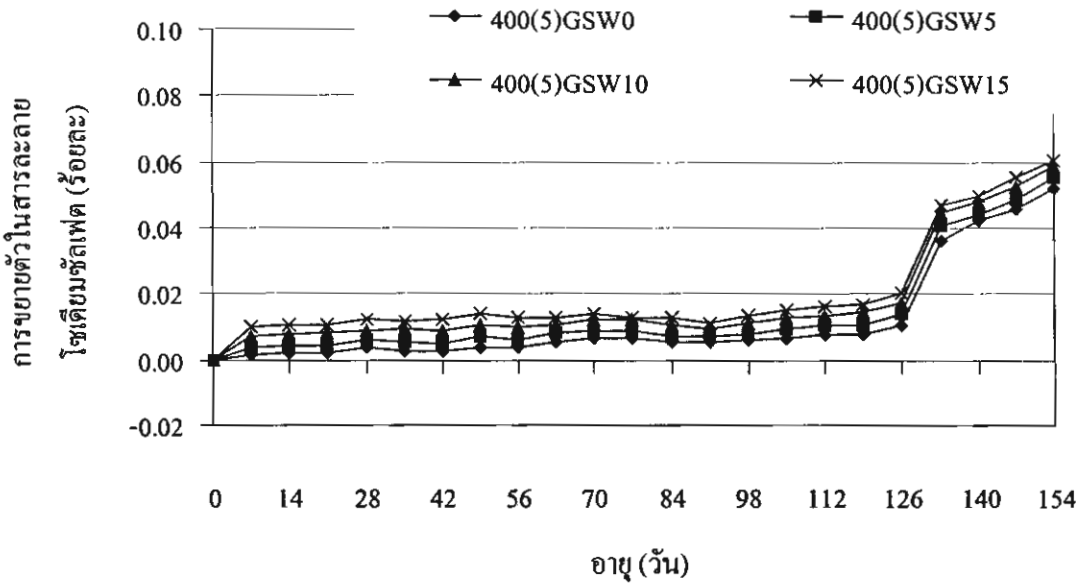
เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์จาก 300 กก./ม.^{3} เป็น 350 และ 400 กก./ม.^{3} พบว่าจะให้ผลของการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายธรรมชาติในลักษณะเดียวกัน และเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 เป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ



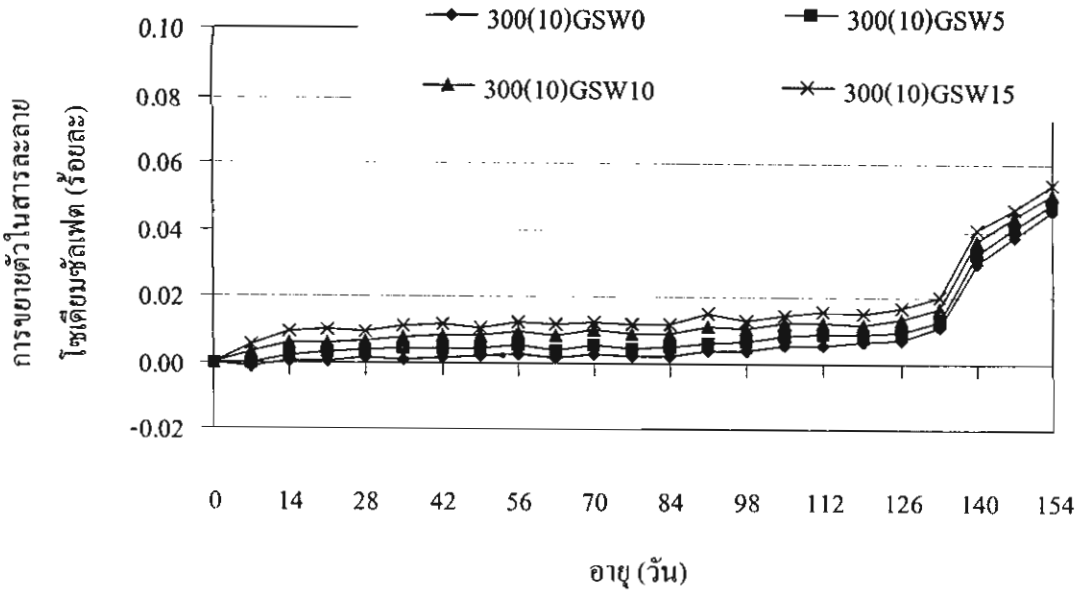
ภาพที่ 5.138 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



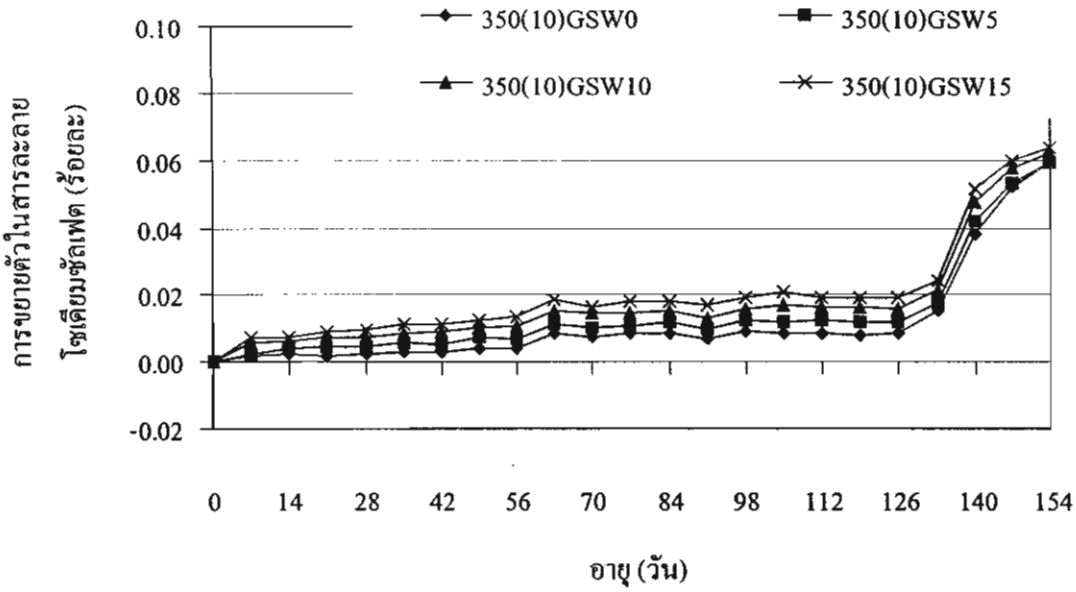
ภาพที่ 5.139 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



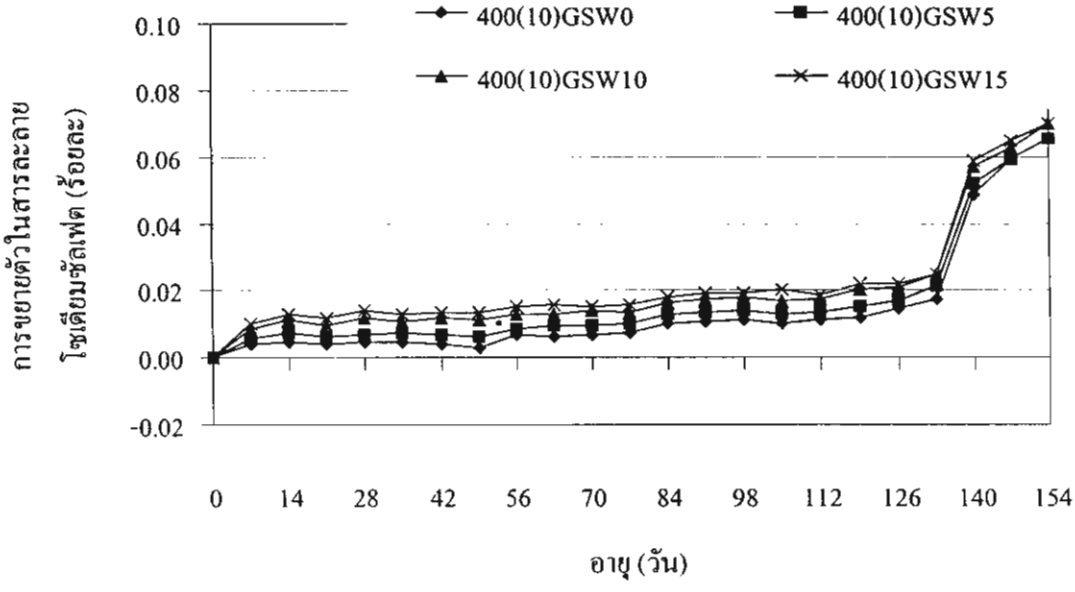
ภาพที่ 5.140 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



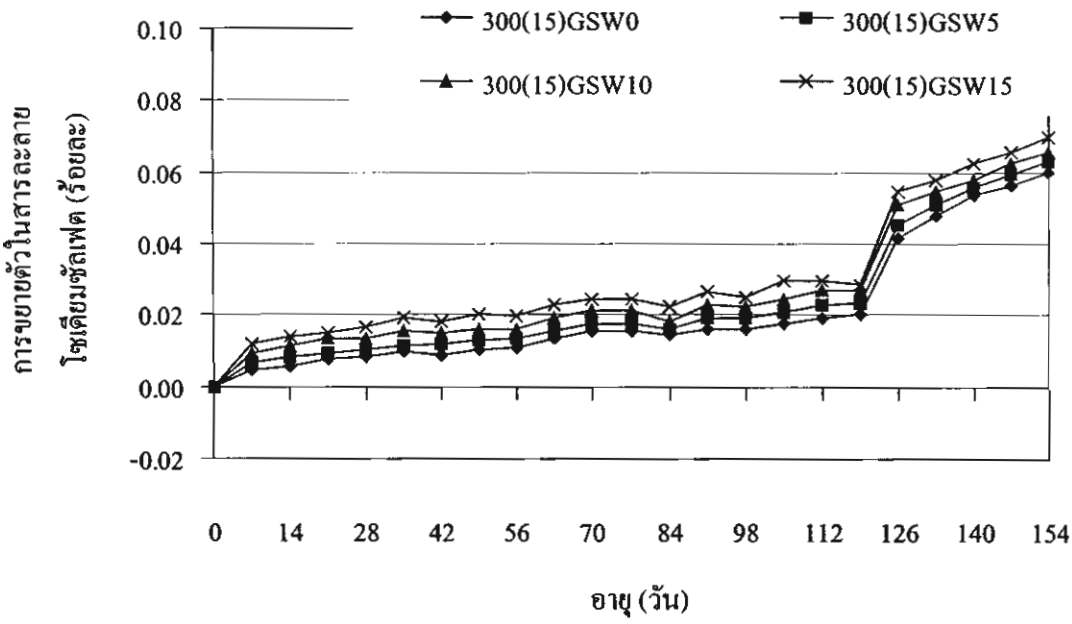
ภาพที่ 5.141 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



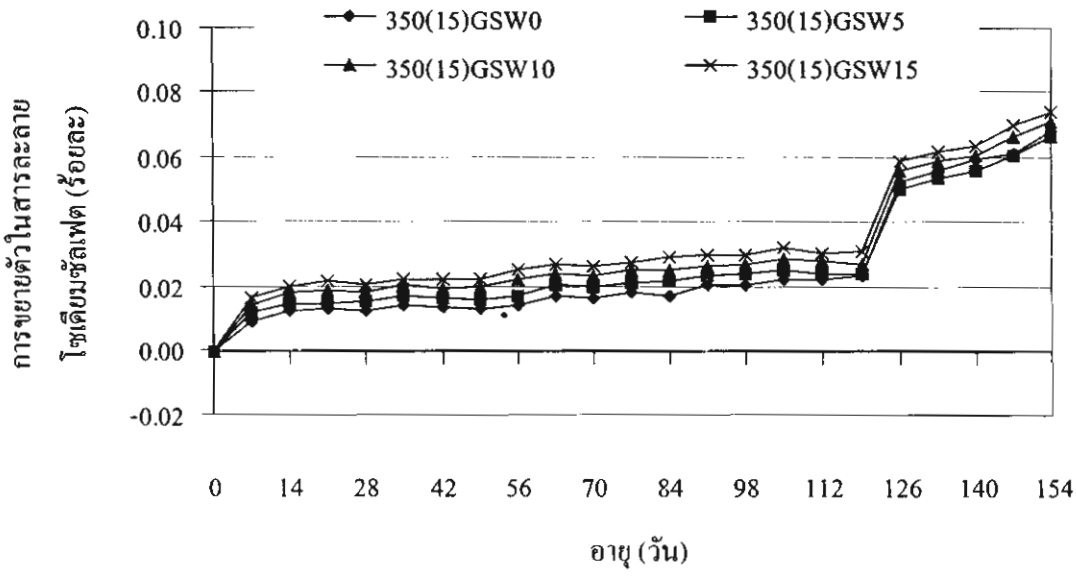
ภาพที่ 5.142 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



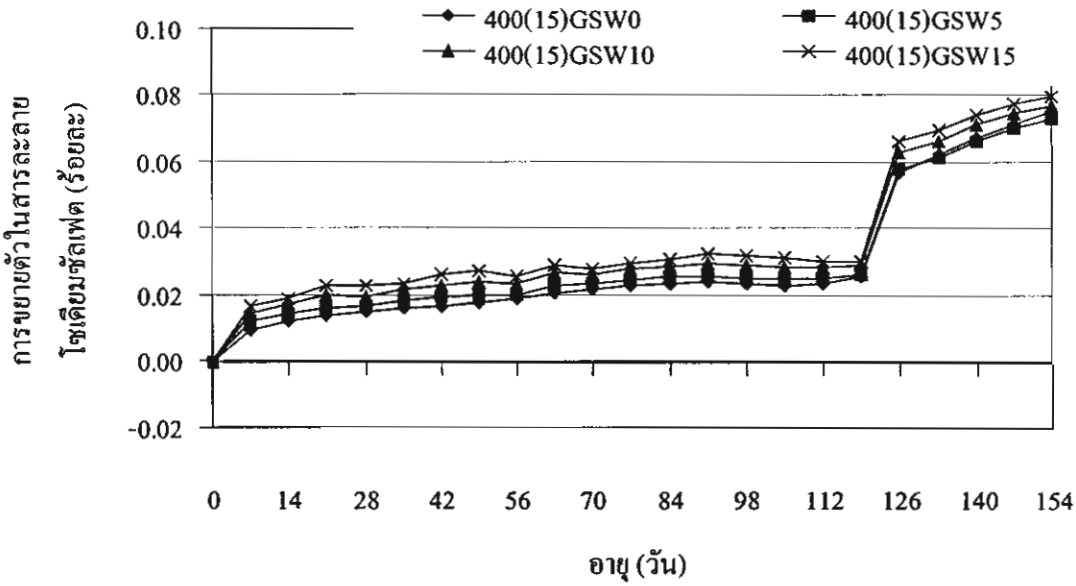
ภาพที่ 5.143 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.144 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.145 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.146 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

5.4.4 การกระทำเนื่องจากกรด (Acid Attack)

5.4.4.1 การกระทำเนื่องจากกรดซัลฟุริก (Sulfuric Acid Attack)

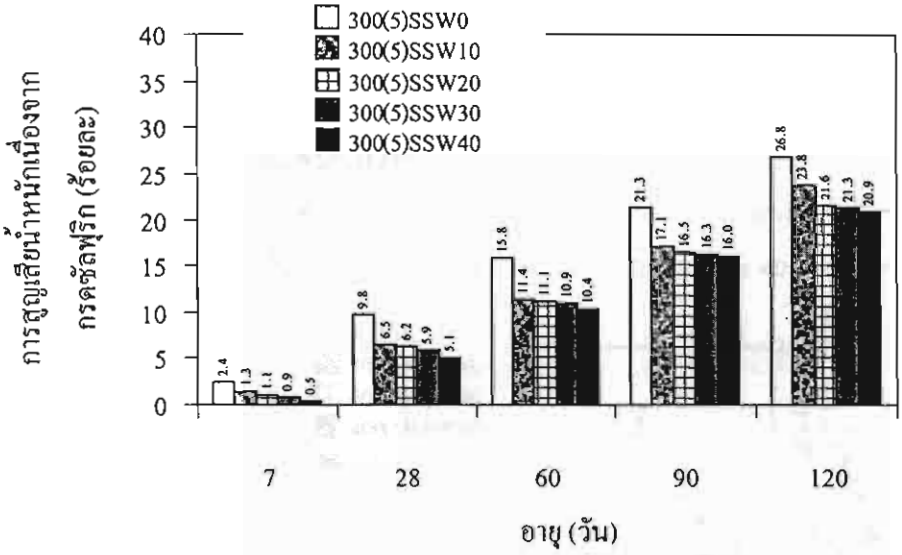
ผลการทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟุริกในรูปของร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่กำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นและปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และ 300 กก./ม.^{3} ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 5.147 พบว่าการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียน้ำหนักลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 5.5 กล่าวคือ เมื่อทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงเนื่องจากสัดส่วนของปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสามารถทำปฏิกิริยากับกรดซึ่งก็คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ลดลง ด้วยเหตุนี้ทำให้ปริมาณสารประกอบดังกล่าวเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ที่ทำให้คอนกรีตเกิดการสึกกร่อนกร่อนลดลงตามไปด้วย และจากความสามารถในการละลาย (Solubility) ของแคลเซียมซัลเฟตมีค่าน้อย (0.256 กรัมในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้เมื่อเมื่อเกิดแคลเซียมซัลเฟตที่ผิวหน้าสัมผัสคอนกรีตจะเป็นการปิดกั้นให้ไอออนของกรดที่จะมาทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น นอกจากนั้นองค์ประกอบหลักของผงฝุ่นทรายไส้แบบเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ทำให้เป็นการลดสารประกอบแคลเซียมของคอนกรีตทั้งที่มาจากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและและแคลเซียมไฮดรอกไซด์) และมวลรวมหยาบ (หิน) ลดลงทำให้โดยรวมกรดจะทำปฏิกิริยาได้ลดลง ส่งผลให้การกัดกร่อนลดลงตามลำดับ

$$2H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(SO_4)_2 + 2H_2O \qquad (5.5)$$

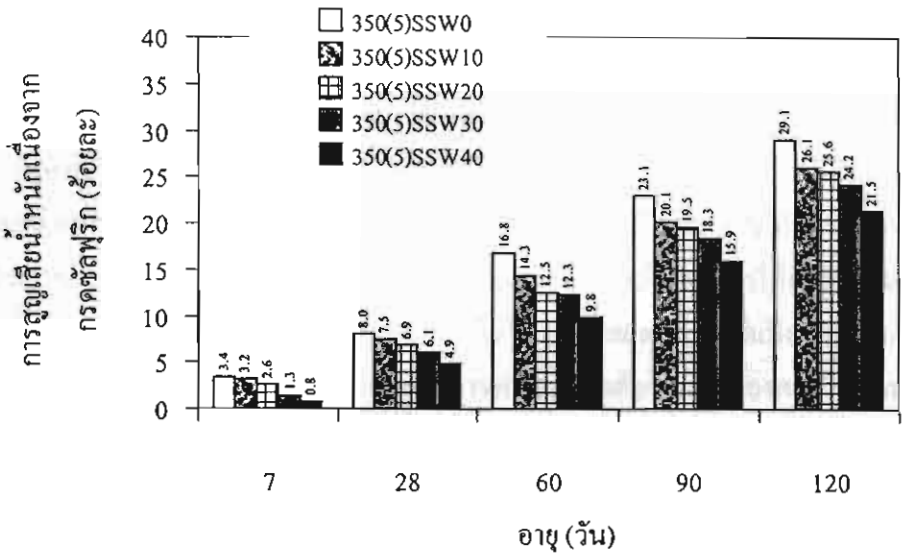
ในกรณีของการกัดกร่อนเนื่องจากกรดจะพบว่า ในช่วงแรกอัตราการกัดกร่อนในรูปอัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าสูงและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุของการแช่ในสารละลายกรดมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะในช่วงแรกปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (สารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับกรด) มีอยู่เป็นจำนวนมากและโดยปกติแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถละลายออกมาสู่ภายในนอกได้ดีในช่วงแรกทำให้ไอออนของกรดเข้าทำปฏิกิริยาได้มาก ในขณะที่เมื่อเวลาในการแช่ในสารละลายกรดเพิ่มขึ้นไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ที่ละลายออกสู่ภายนอกทำให้สารละลายอยู่ในสถานะอิ่มตัว (Saturated Solution) และพบว่าในช่วงแรกที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ละลายออกสู่ภายนอกจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระที่แตกตัวแล้ว เมื่อสารประกอบดังกล่าวละลายออกหมดเหลือเพียง

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีโครงสร้างติดกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งจะละลายออกมาได้ยากกว่า ส่งผลให้การละลายลดลง กรดจึงทำปฏิกิริยาได้น้อยลง

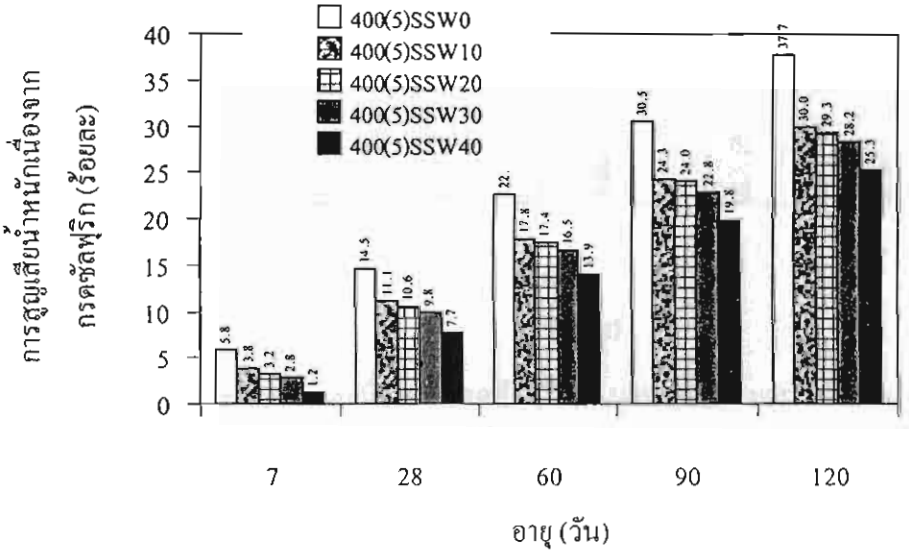
เมื่อพิจารณาที่อายุของการแช่ในสารละลายกรดเพิ่มขึ้นจะทำให้การกัดกร่อนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสังเกตเห็นว่าตั้งแต่ที่อายุของการแช่ในกรดเท่ากับ 7 วัน คอนกรีตที่ผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตปกติ และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเป็น 350 และ 400 กก./ม.^{3} ในภาพที่ 5.148 และ 5.149 ตามลำดับทำให้การสึกกร่อนของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยากับกรดได้เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5.147 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

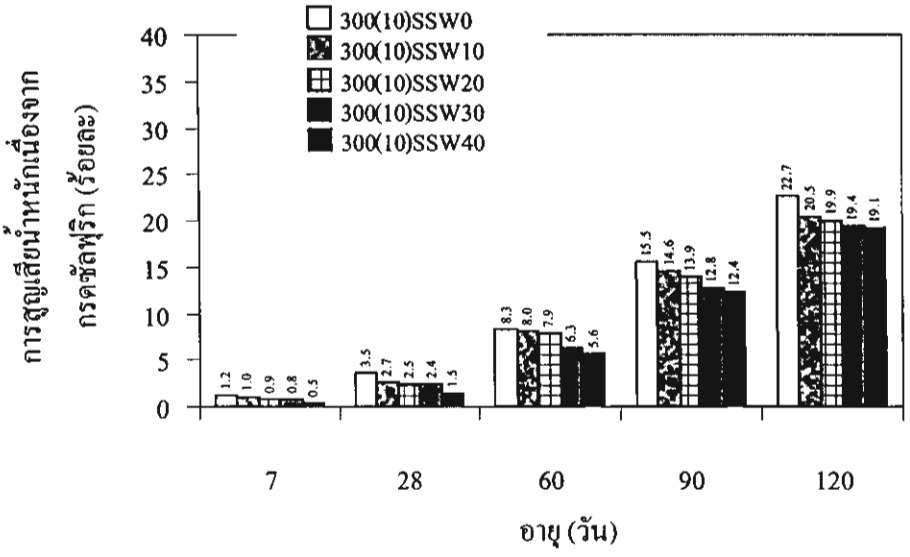


ภาพที่ 5.148 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

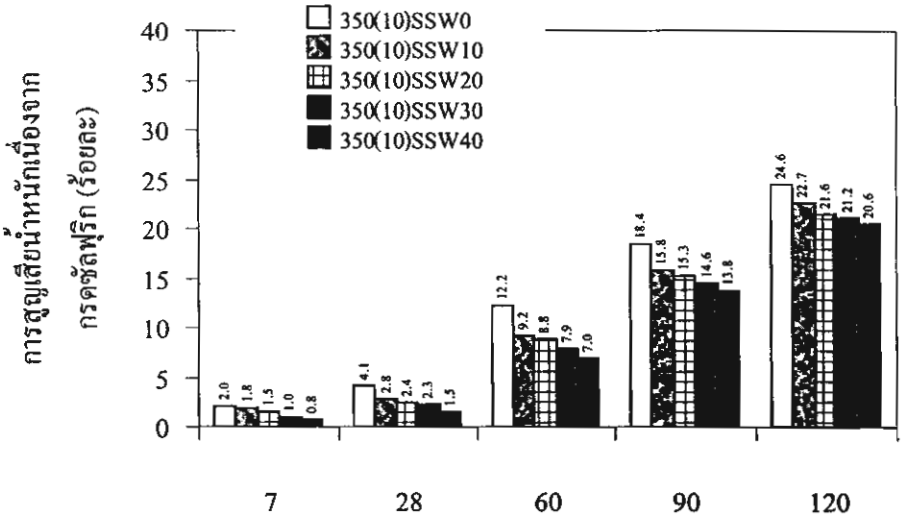


ภาพที่ 5.149 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

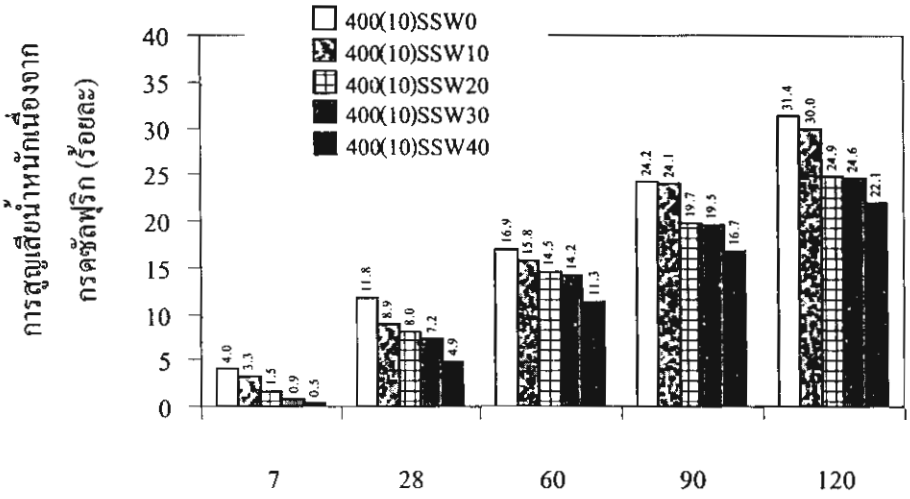
สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นเป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ แสดงในภาพที่ 5.150 ถึง 5.155 พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ การเพิ่มปริมาณน้ำในคอนกรีตจะทำให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันจะส่งผลต่อจำนวนและปริมาณโพรงคาพิวลารี (โพรงที่น้ำและอากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ และเป็นมีขนาดใหญ่ที่สุดที่เกิดขึ้นในคอนกรีต) ในคอนกรีตทำให้กรดสามารถผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น นอกเหนือจากการที่กระทำที่ผิวของคอนกรีตสัมผัสกับกรด และเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณทำให้ในคอนกรีตมีน้ำอิสระ (Free Water) เพิ่มขึ้น จากการเพิ่มขึ้นดังกล่าวทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งโดยปกติจะมีความสามารถในการแตกตัวได้สูง โดยแตกตัวออกเป็นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) อันจะช่วยเสริมการทำปฏิกิริยากับไอออนของกรดได้ ดังนั้นการกัดกร่อนจึงเพิ่มขึ้น



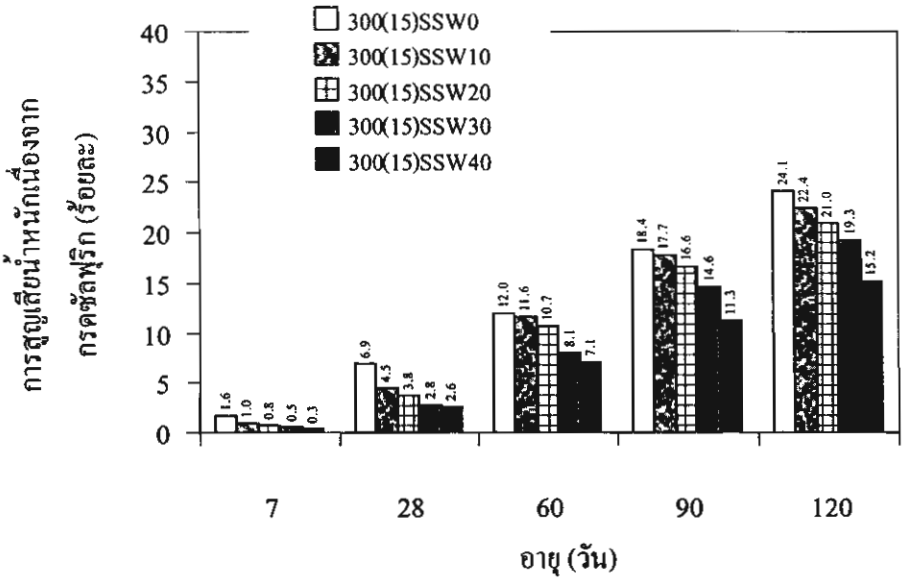
ภาพที่ 5.150 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



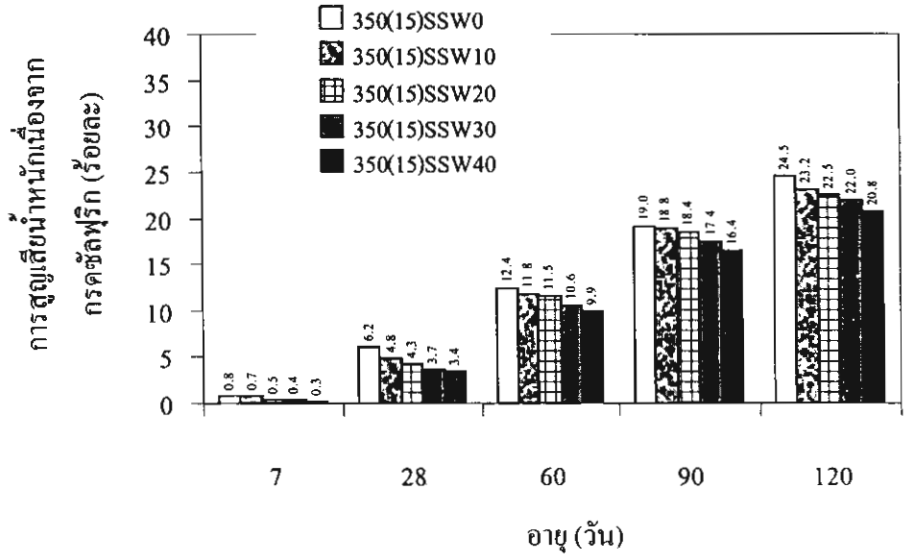
ภาพที่ 5.151 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



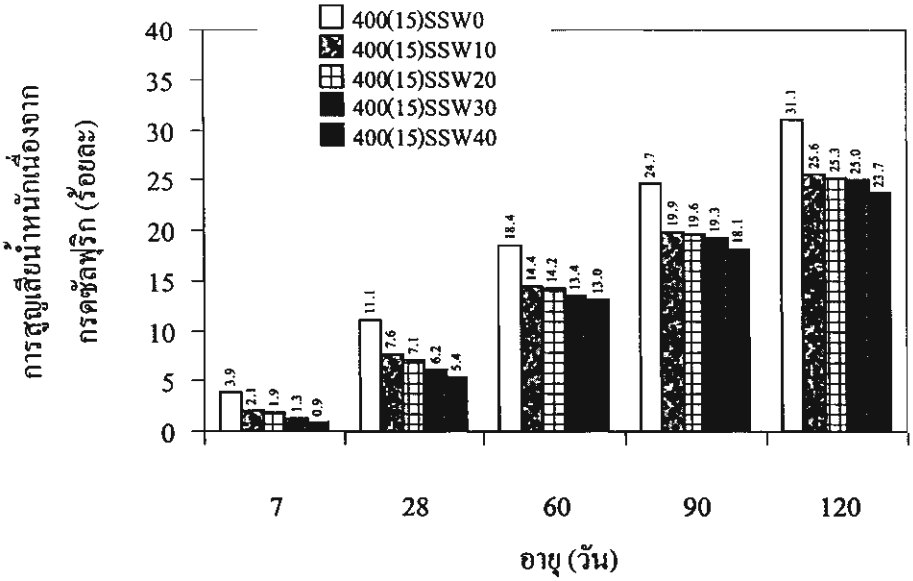
ภาพที่ 5.152 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.153 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



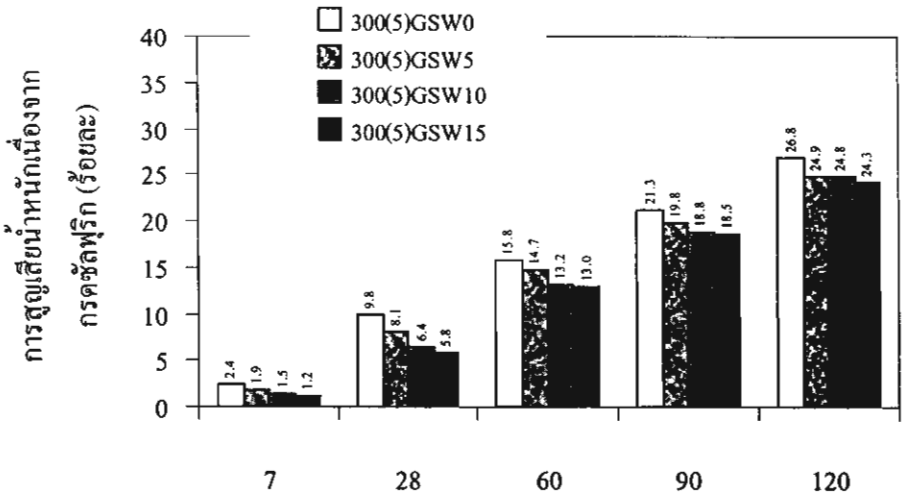
ภาพที่ 5.154 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



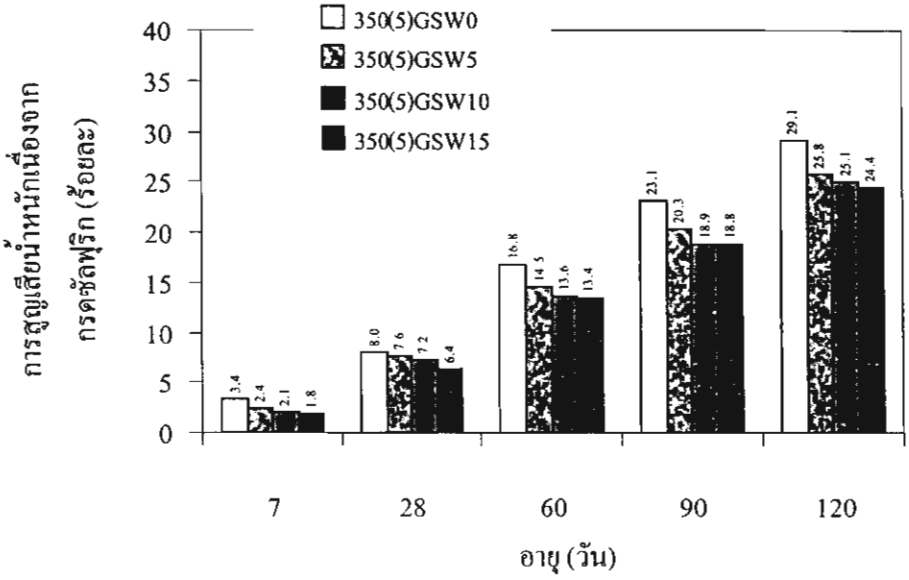
ภาพที่ 5.155 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 นอร์มอลิตี้ (Normality, N) ซึ่งมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เท่ากับ 0.66 ของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ทรายธรรมชาติ แสดงในภาพที่ 5.156 ถึง 5.164 พบว่าคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตปกติเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบซึ่งความละเอียดมากกว่าทรายธรรมชาติและใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์จึงมีความไปได้ที่อนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบจะสามารถดูดซับกรดซัลฟุริกไว้ที่ผิวหรือการดูดซับเข้าไปภายในอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบได้ดีกว่าเมื่อเปรียบกับทรายธรรมชาติซึ่งมีพื้นผิวที่มีความเรียบ (พิจารณาจากภาพขยายที่ 5.5 และ 5.6) จากผลดังกล่าวทำให้กรดกระทำต่อเพสต์ได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักจึงมีค่าลดลง

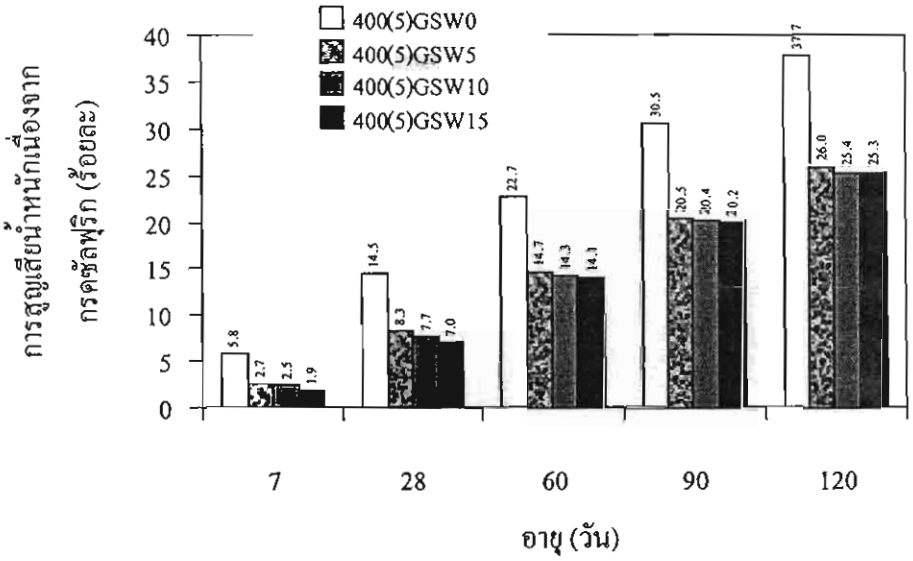
สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจาก 300 เป็น 350 และ 400 กก./ม.^{3} พบว่าคอนกรีตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามปริมาณผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เพิ่มขึ้นดังสมการที่ 5.5 ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น) ทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามความพรุนของโครงสร้างของเพสต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้กรดสามารถเข้าทำลายโครงสร้างของคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น



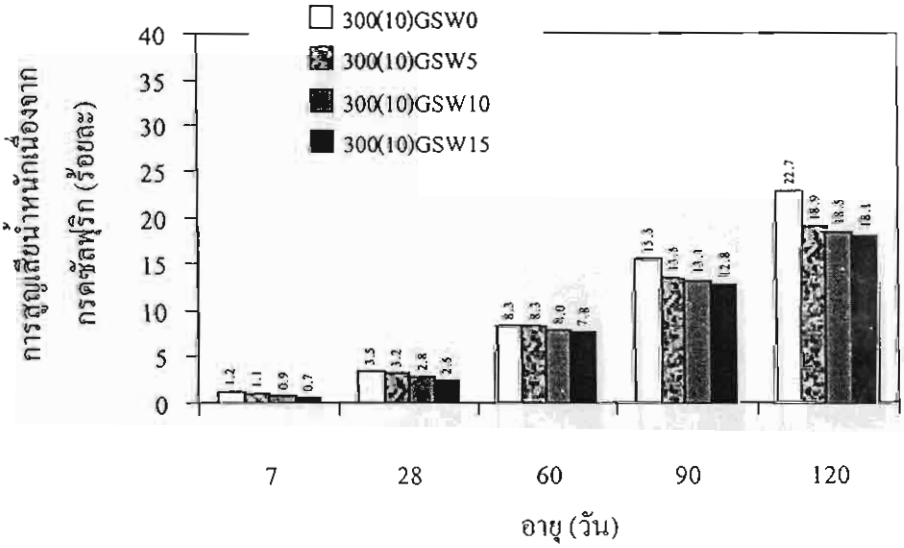
ภาพที่ 5.156 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



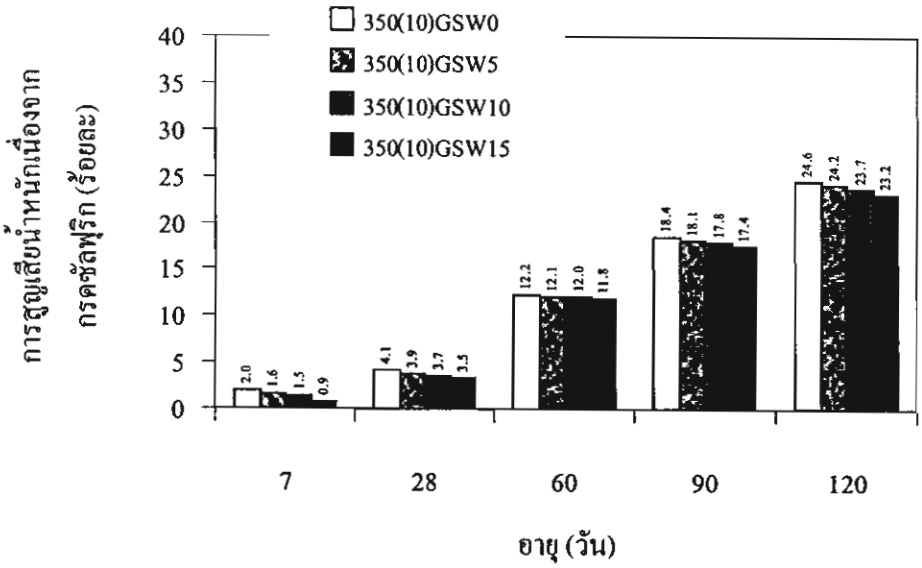
ภาพที่ 5.157 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



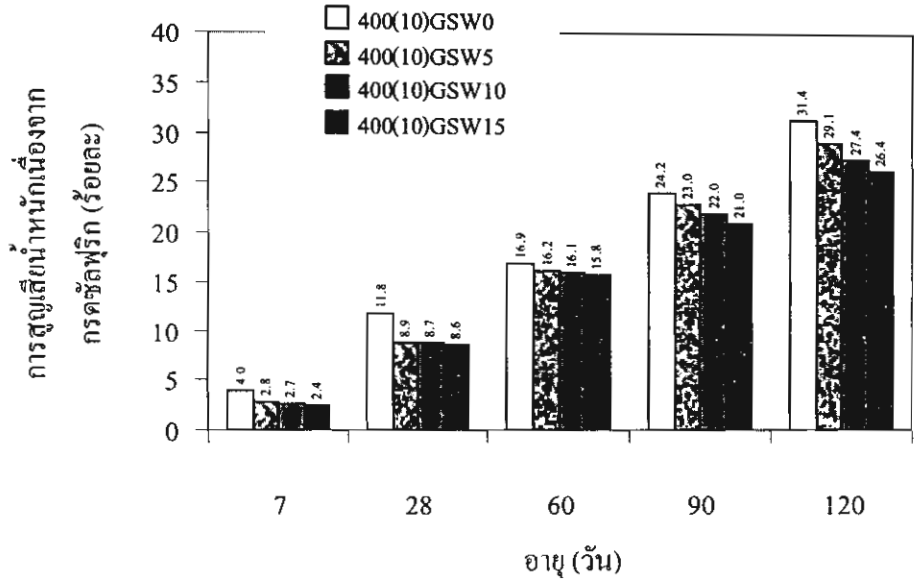
ภาพที่ 5.158 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



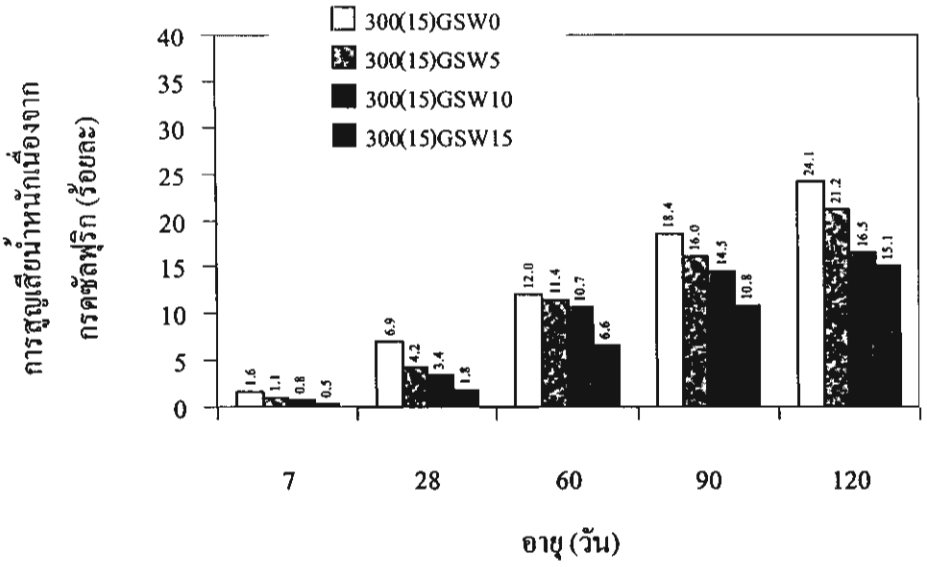
ภาพที่ 5.159 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



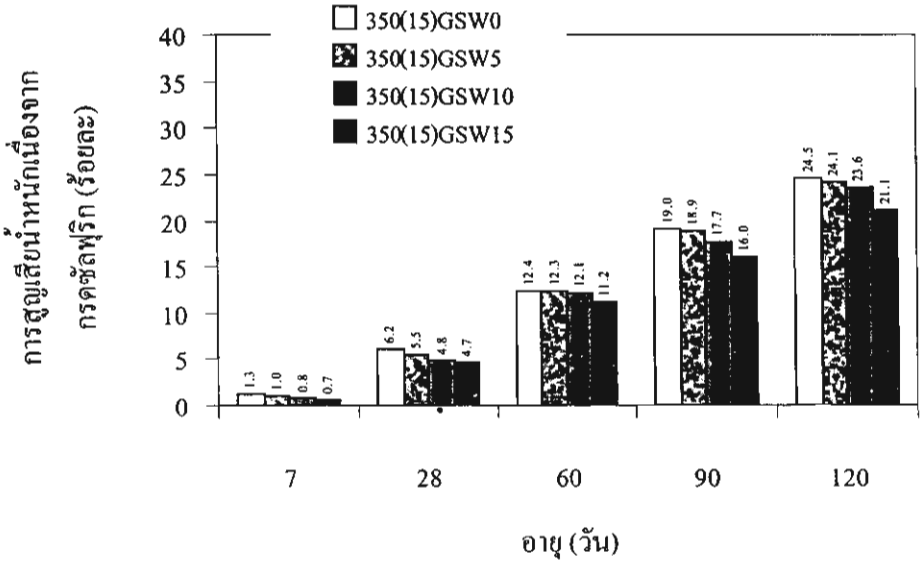
ภาพที่ 5.160 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



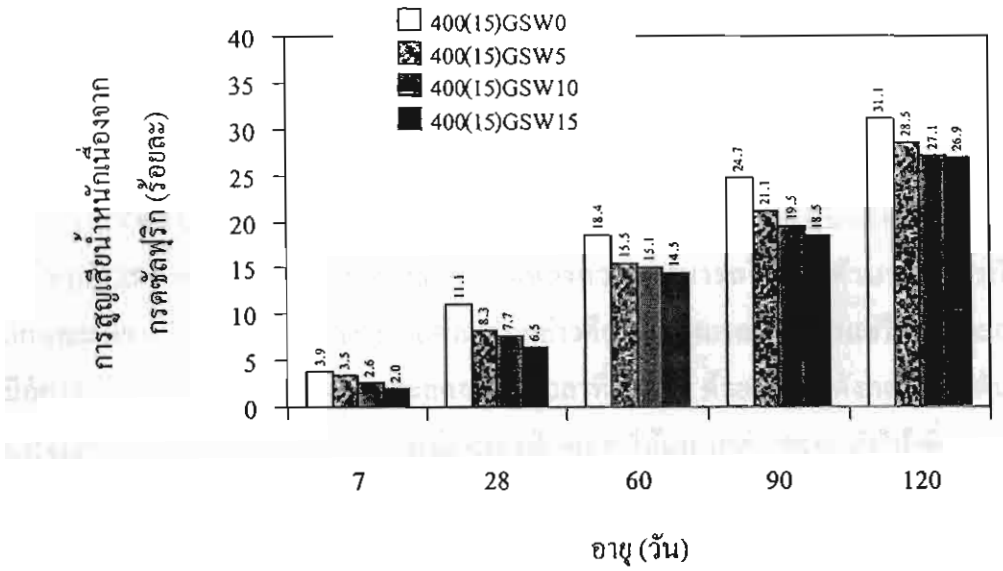
ภาพที่ 5.161 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.162 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.163 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

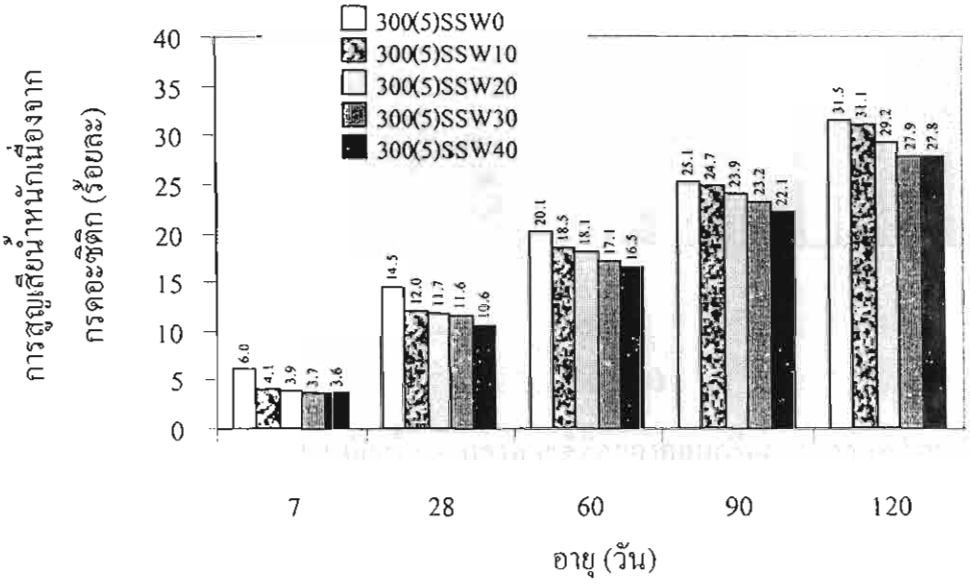


ภาพที่ 5.164 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟุริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

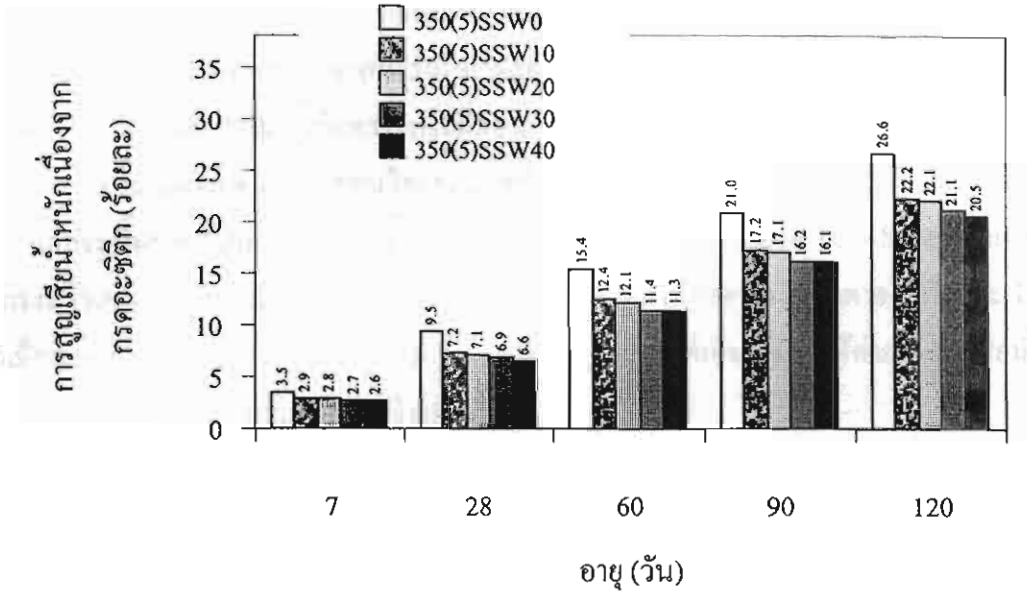
5.4.4.2 การกระทำเนื่องจากกรดอะซิติก (Acetic Acid Attack)

ในภาพที่ 5.165 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดอะซิติก (CH_3COOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 นอร์มอลิตี้ (ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 2.56 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) พบว่าแนวโน้มของความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนมีลักษณะเดียวกับการกัดกร่อนของกรดซัลฟุริกกล่าวคือ ในช่วงแรกของการแช่ในสารละลายกรดจะมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงและจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น นอกจากนั้นจะเห็นว่าการเพิ่มร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ทำให้เพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดอะซิติกได้ดี ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (5.6) พบว่าการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลให้กรดทำปฏิกิริยาได้ลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟุริกจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทำปฏิกิริยากับกรดจะได้แคลเซียมอะซิเตรต ($Ca(CH_3COO)_2$) ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้มาก (52.0 กรัม ในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดการชะล้างได้ง่าย อันส่งผลให้กรดสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง

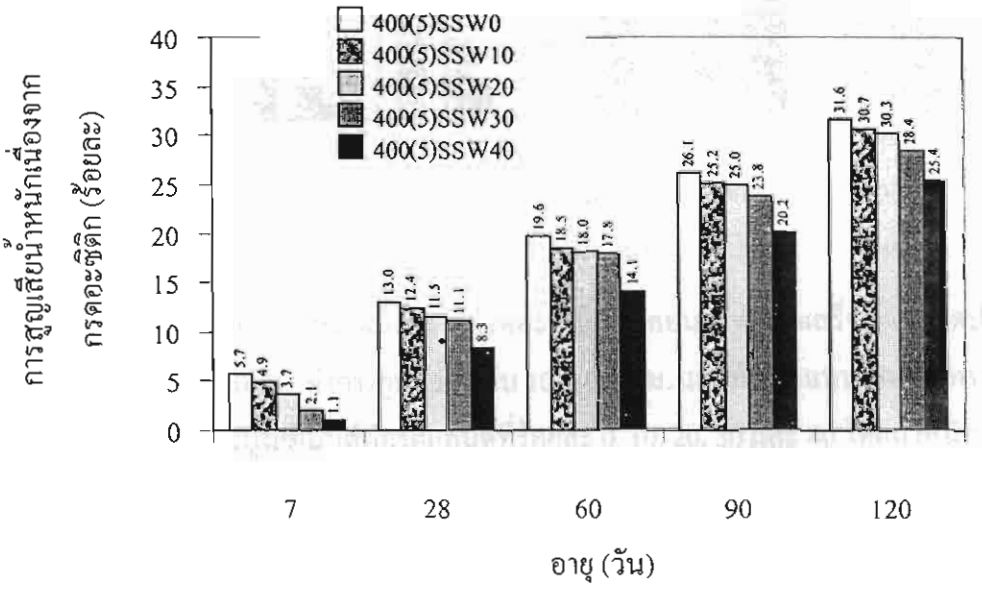
$$2CH_3COOH + Ca(OH)_2 \rightarrow (Ca(CH_3COO)_2) + 2H_2O \qquad (5.6)$$



ภาพที่ 5.165 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

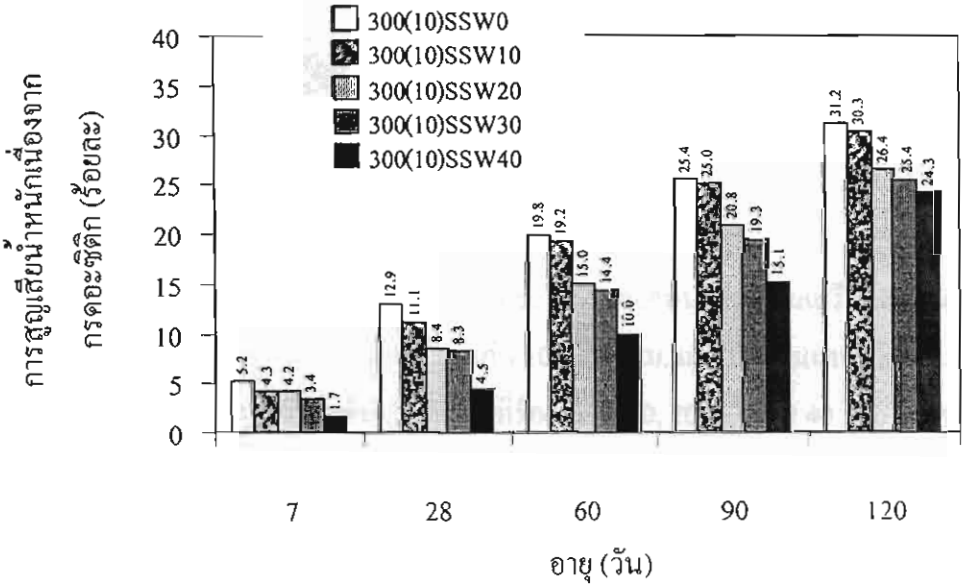


ภาพที่ 5.166 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.167 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

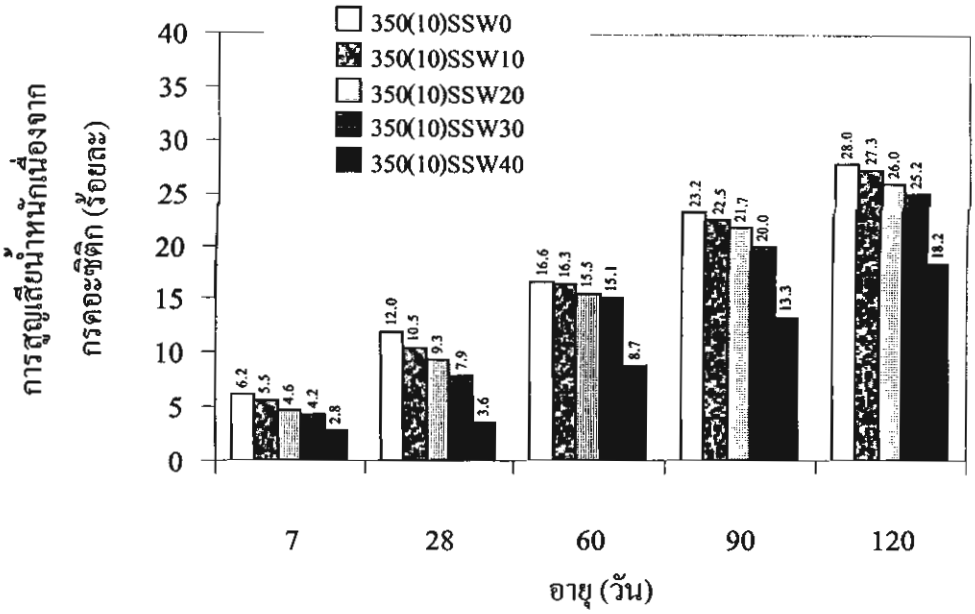
สำหรับกรณีที่คอนกรีตมีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 300 และ 400 กก./ม.^{3} ดังแสดงในภาพที่ 5.166 และ 5.167 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของผงฝุ่นทรายไส้แบบเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพราะการที่คอนกรีตมีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้มีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นมากขึ้น โดยเฉพาะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับกรดได้เพิ่มขึ้น แต่กระนั้นการที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นยิ่งทำให้มีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C-S-H$) อันจะทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้กรดเข้าไปทำลายได้น้อยละ ในขณะที่เมื่อทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักลดลงตามลำดับ ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น



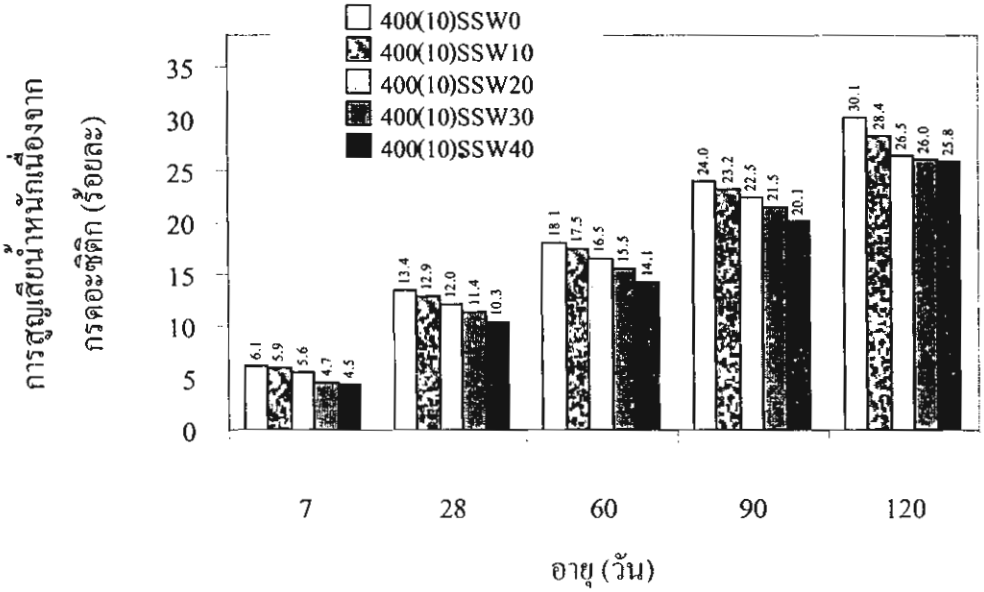
ภาพที่ 5.168 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

ในกรณีของคอนกรีตที่มีค่าการยุบเพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 ซม. เป็น 10 ± 0.5 และ 10 ± 0.5 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 5.168 ถึง 5.170 ตามลำดับ พบว่าค่าการยุบเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะการเพิ่มขึ้นของปริมาณทำให้โครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกรตไฮเดรตมีความพรุนเพิ่มขึ้น ประกอบการการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำทำให้ปริมาณรวมทั้งขนาดของโพรงคาพิวลารีมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) จาก

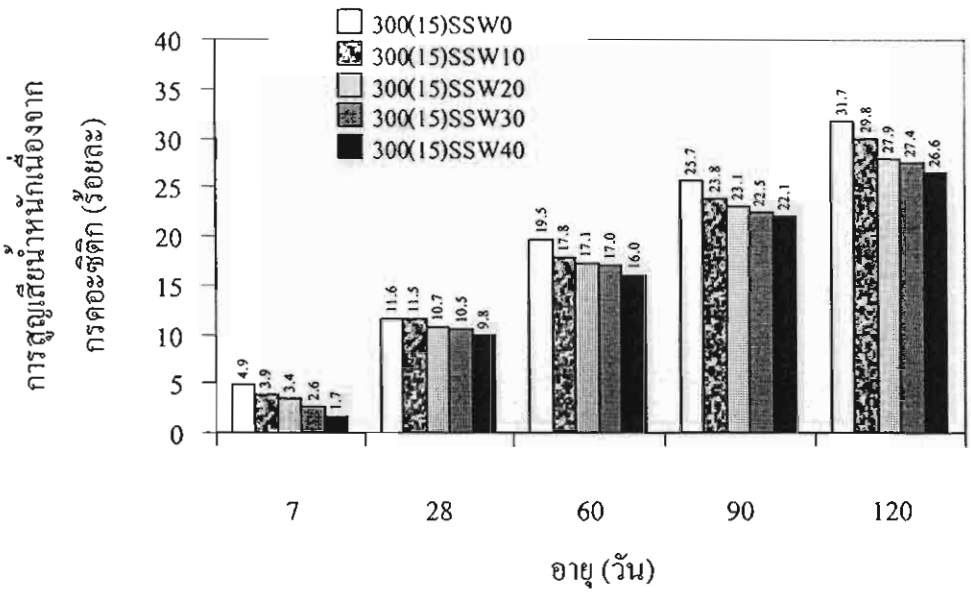
ค่าการยุบตัวเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นในโพรงคาพิวลารีมากขึ้นส่งผลให้ไอออนของกรดสามารถละลายเข้าไปภายในคอนกรีต จนทำให้โครงสร้างภายในถูกทำลาย นอกเหนือจากที่ทำงายที่ผิวของคอนกรีต



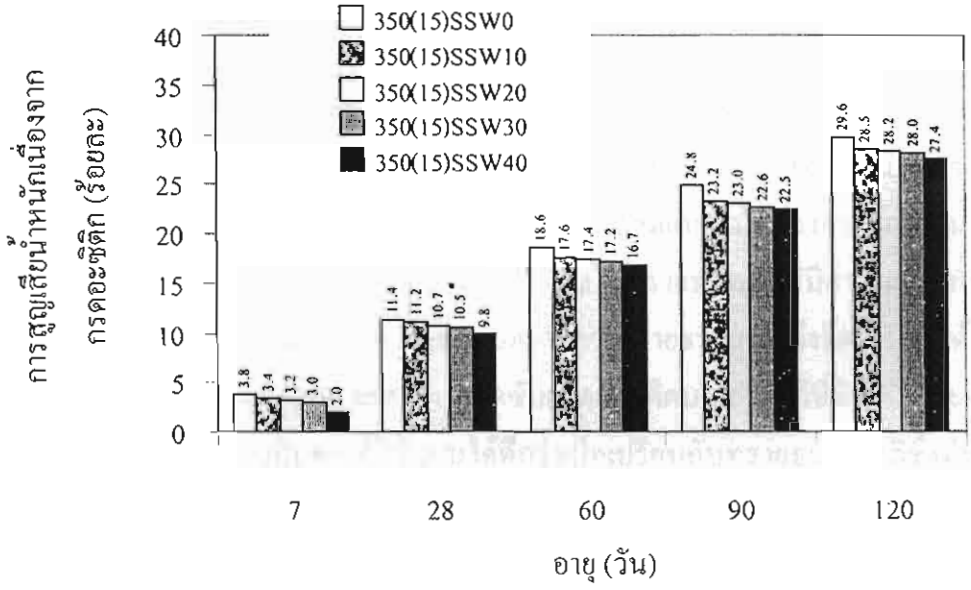
ภาพที่ 5.169 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



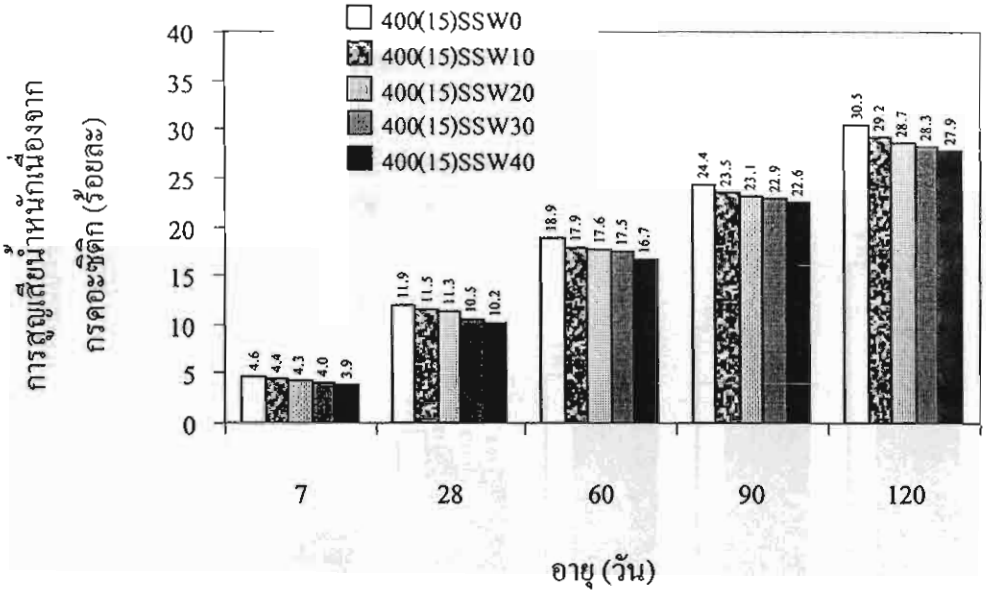
ภาพที่ 5.170 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.171 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.172 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

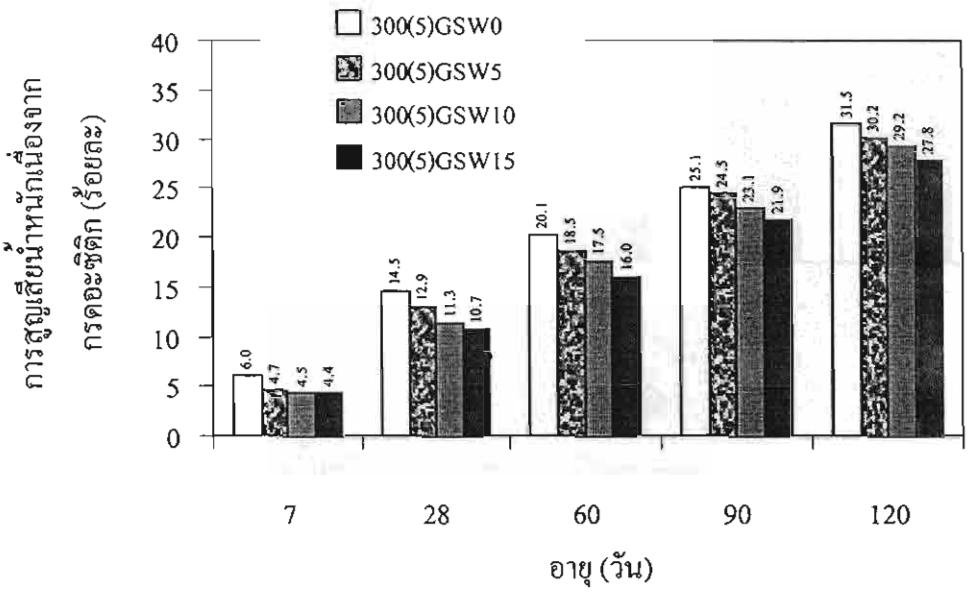


ภาพที่ 5.173 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

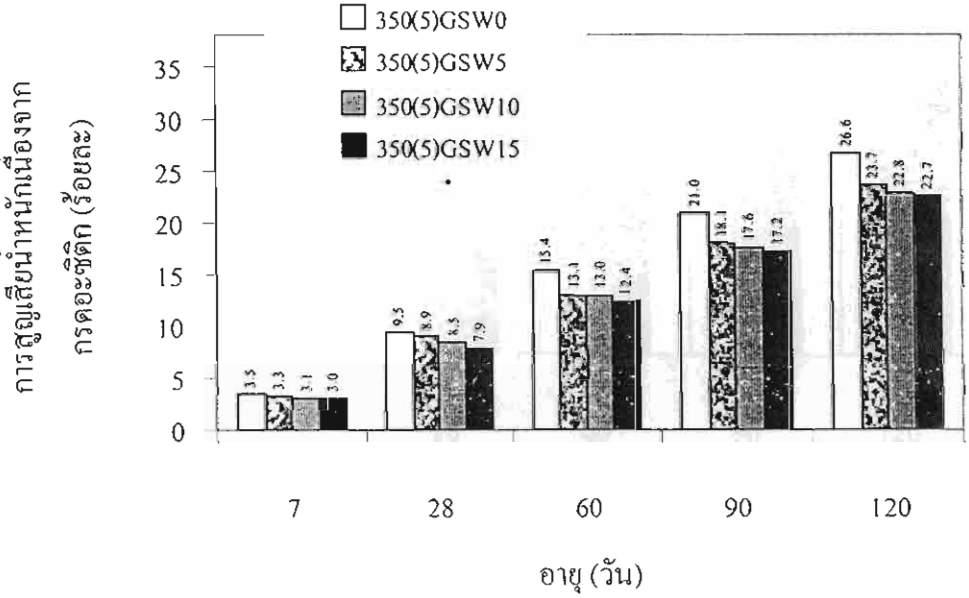
จากผลการทดสอบหาความทนทานของคอนกรีตในรูปของค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดอะซิติก (CH_3COOH) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 นอร์มอลิตี้ (Normality, N) ซึ่งมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เท่ากับ 2.56 ของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ทรายธรรมชาติ แสดงในภาพที่ 5.174 ถึง 5.184 พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีน้อยกว่าคอนกรีตปกติเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มของการสูญเสียน้ำหนักลดลงเมื่ออัตราส่วนของการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบซึ่งความละเอียดมากกว่าทรายธรรมชาติจึงมีความไปได้ที่อนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW จะสามารถดูดซับกรดอะซิติกบางส่วนไว้ที่ผิวหรือกระทั่งการดูดซับเข้าไปภายในอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบได้ดีกว่าเมื่อเปรียบกับทรายธรรมชาติซึ่งมีพื้นผิวที่มีความเรียบ (พิจารณาจากภาพขยายที่ 5.5 และ 5.6) ซึ่งจากผลดังกล่าวทำให้กรดกระทำต่อเพสต์ได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกมีค่าลดลง

สำหรับอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณ 300 เป็น 350 และ 400 กก./ม.^{3} พบว่าคอนกรีตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกัดกร่อนเนื่องจากกรดเพิ่มขึ้นตามปริมาณผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เพิ่มขึ้นดังสมการที่ 5.6 ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่ม

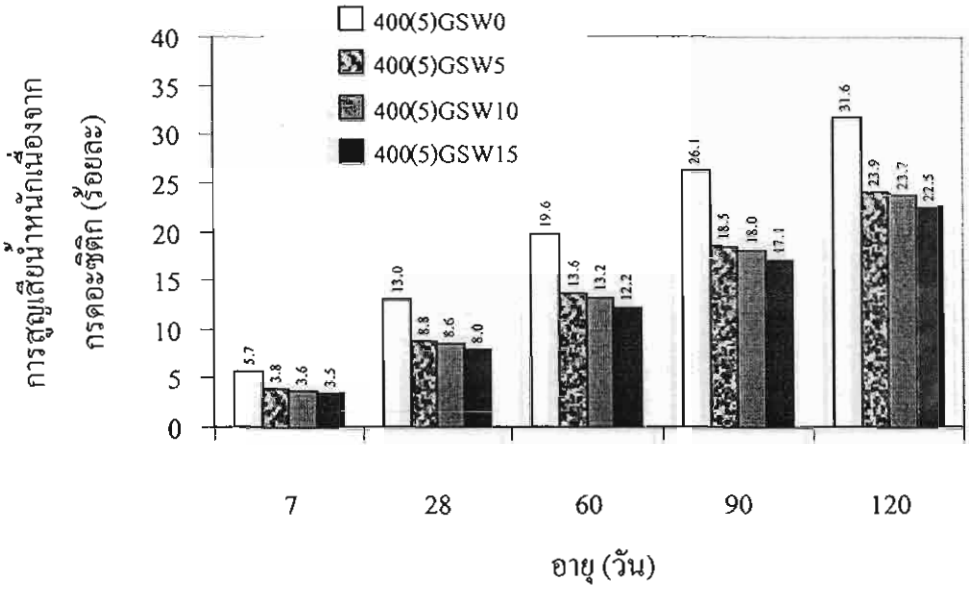
ต้นซึ่งก็คือปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามความพรุนของโครงสร้างของเพสต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้กรดสามารถเข้าทำลายโครงสร้างของคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น



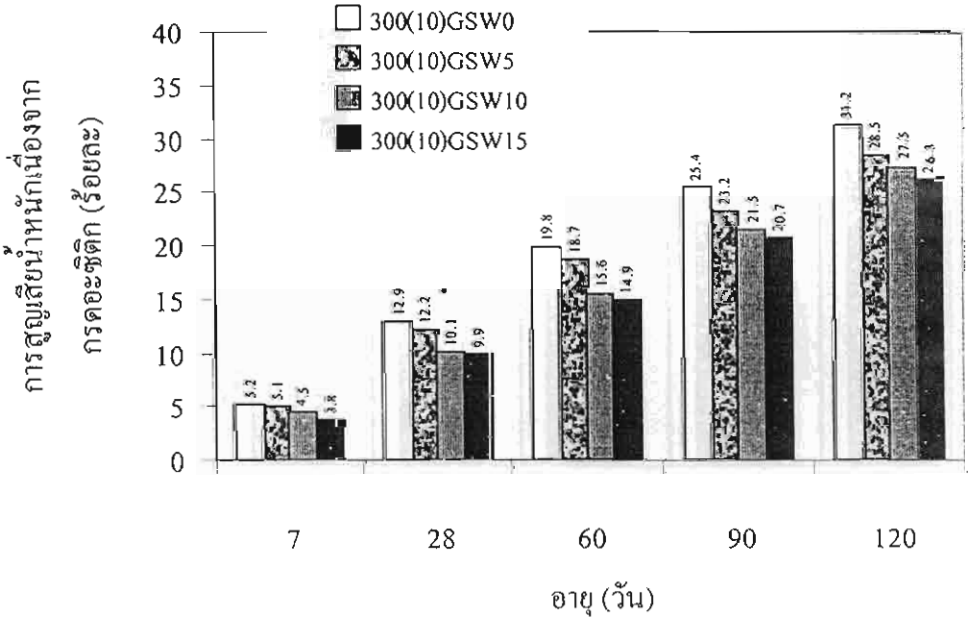
ภาพที่ 5.174 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



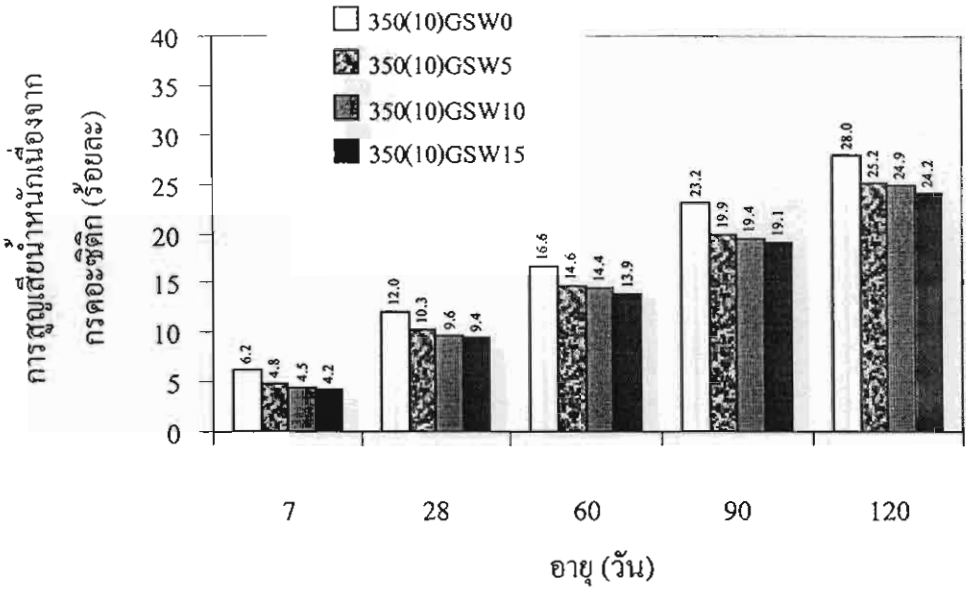
ภาพที่ 5.175 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



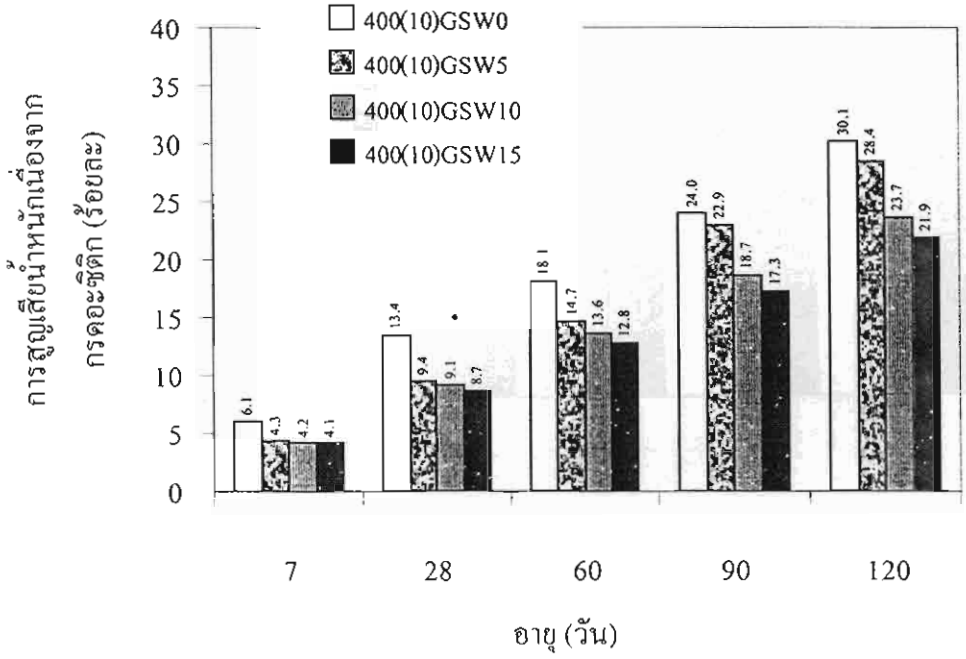
ภาพที่ 5.176 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



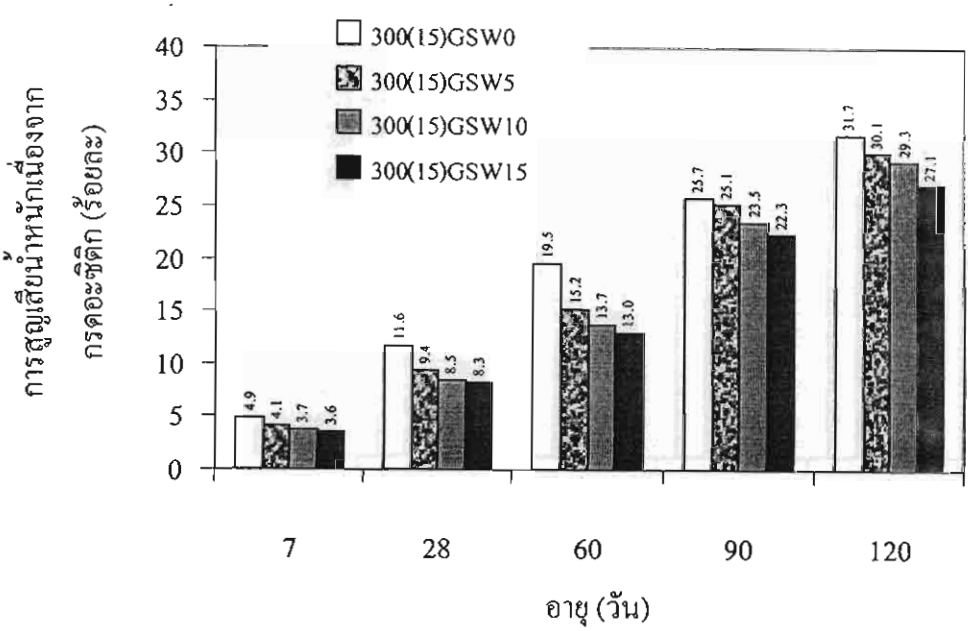
ภาพที่ 5.177 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



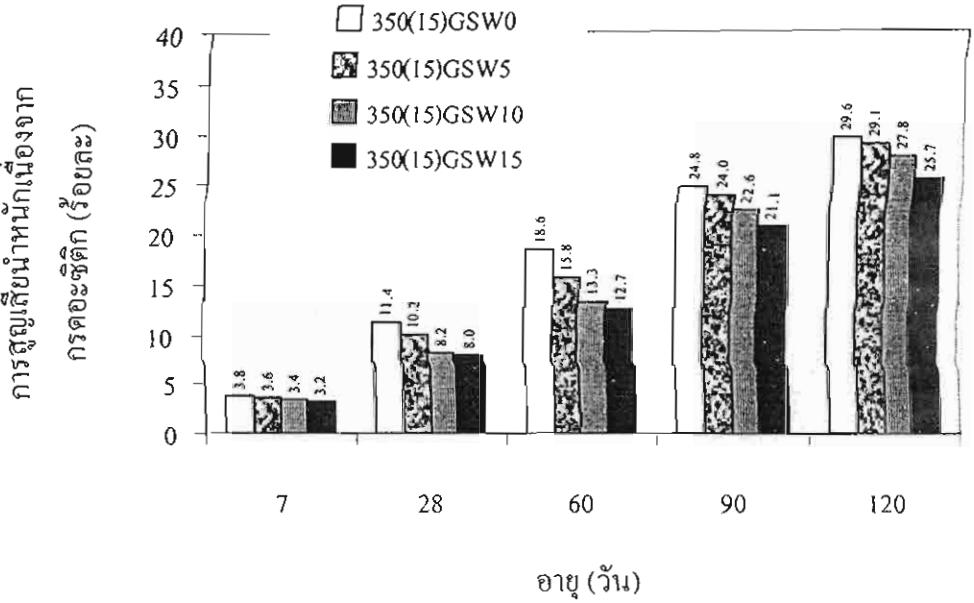
ภาพที่ 5.178 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



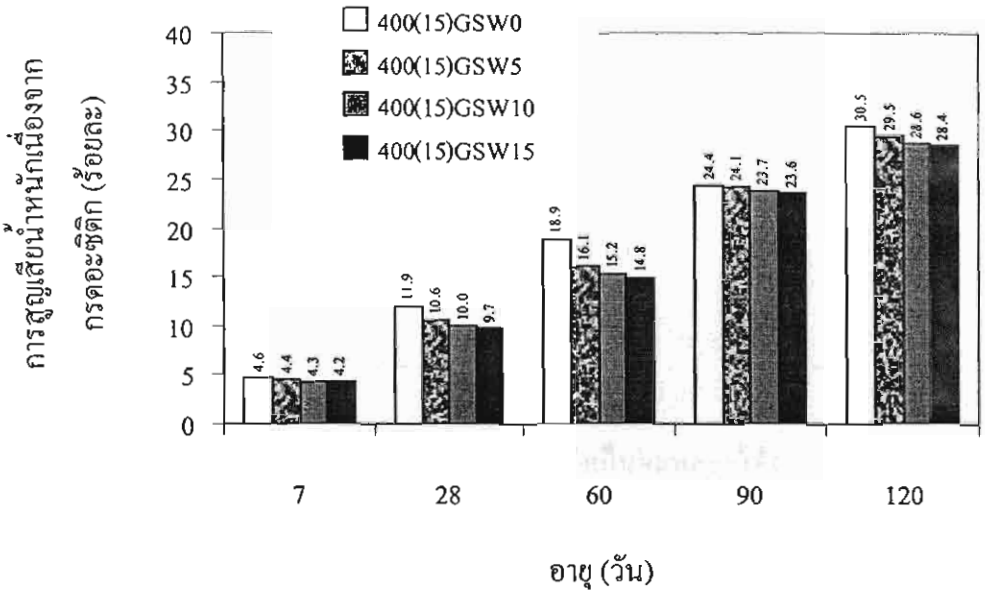
ภาพที่ 5.179 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.180 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.181 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.182 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 $\pm$ 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

6.1.1 คุณสมบัติของผงฝุ่นทรายไส้แบบ

1. ผงฝุ่นทรายไส้แบบ (Foundry Sand Powder) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกระบวนหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดชลบุรี แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ที่ได้จากกระบวนการทำแบบหล่อภายนอก และจากกระบวนการทำแบบหล่อภายในได้ผงฝุ่นทรายกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ถึงร้อยละ 83 ถึง 90 ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีปริมาณร้อยละ 70 ถึง 77 นอกจากนั้นผงฝุ่นทรายไส้แบบมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และจากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction ตามลำดับ พบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีสารประกอบของไอรอนออกไซด์และเหล็กเพิ่มเติม

2. อนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีสีเทาน้ำตาลและพื้นผิวขรุขระ ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีสีคล้ำจนถึงเป็นสีทรายไหม้และพื้นผิวมีความขรุขระ นอกจากนั้นผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW และ GSW มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 102.85 และ 165.41 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (63.44 ไมโครเมตร)

3. ศักยภาพของผงฝุ่นทรายไส้แบบทางด้านซีเมนต์เมื่อนำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ต-แลนด์ประเภทที่ 1 จากค่าดัชนีกำลัง (Strength Index) โดยผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าร้อยละ 78 และกลุ่ม GSW มีค่าร้อยละ 55 ที่อายุ 7 วัน ในขณะที่อายุ 28 วัน ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าร้อยละ 82 และผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีค่าร้อยละ 60 และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกันเกณฑ์มาตรฐานของสารปอซโซลานมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ASTM C 618 (Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete)) ได้ว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ซึ่งมีแนวโน้มที่สามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ที่ไม่ผ่านข้อ