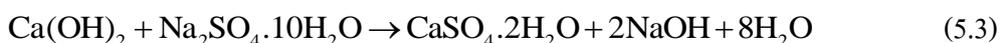


5.4.3 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต (Sulfate Attack)

ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากสารละลายซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 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 5.129 ถึง 5.137 พบว่าคอนกรีตที่ผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบมีค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตน้อยกว่าคอนกรีตปกติ โดยสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงซึ่งค่าการขยายตัวในช่วงประมาณ 130 วันแรก มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ทั้งคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ทั้งนี้เพราะในช่วงแรกที่ปริมาณของยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และเอ็ททริง-ไกด์มีน้อยกล่าวคือ ปฏิกิริยาของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) กับเพสต์ในคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ โดยเริ่มจากการเกิดยิปซัม โดยโซเดียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดผลิตภัณฑ์เป็นยิปซัม ดังแสดงในสมการที่ (5.3) ซึ่งในช่วงแรกผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) มีปริมาณน้อยและส่วนใหญ่ถูกกักอยู่กับโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟตมีน้อย นอกจากนั้น พบว่าการเพิ่มขึ้นของผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง อันเนื่องมาจากการลดลงของปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงยิ่งลดลงตามลำดับ



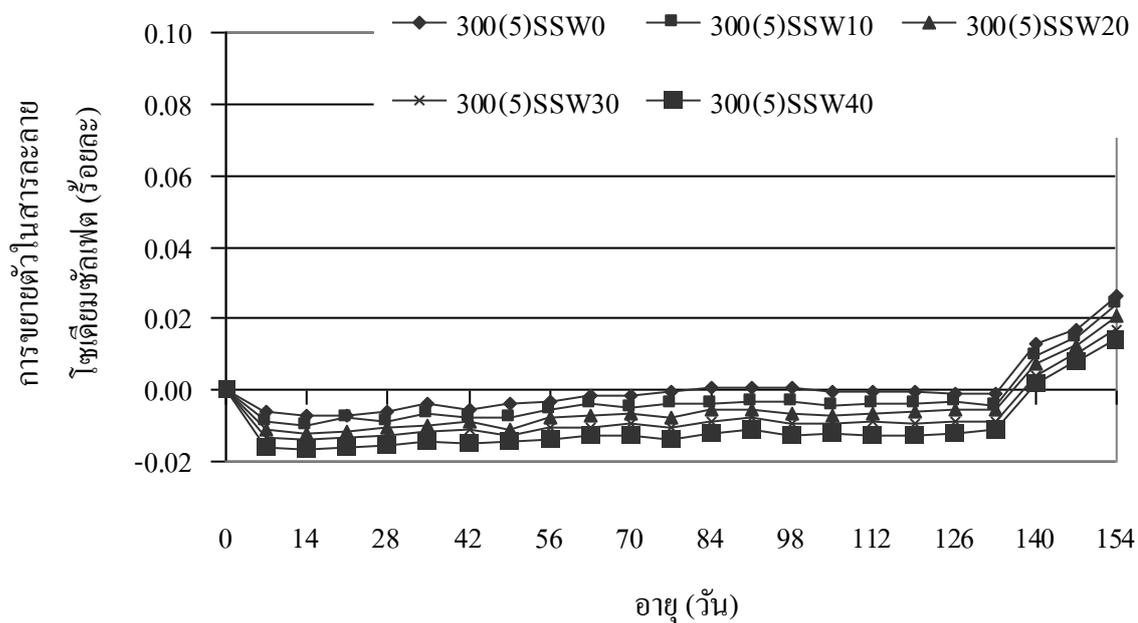
สำหรับในช่วงที่ 2 (หลังจาก 130 วัน (โดยประมาณ)) พบว่าคอนกรีตมีค่าขยายตัวเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็วมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงแรก โดยเป็นลักษณะแบบทันทีทันใด (Expansion Increase Suddenly) อันเป็นผลของปริมาณของยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และเอ็ททริงไกด์ โดยเฉพาะเอ็ททริงไกด์ ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวมากขึ้น (โดยเฉลี่ยสารประกอบเอ็ททริงไกด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นร้อยละ 104 ถึง 121 ของปริมาตรเริ่มต้น) โดยเอ็ททริงไกด์ (AFt-phase) ได้จากยิปซัมที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (5.3) จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับไตร

แคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เกิดเอ็ทริงไคต์ ดังแสดงในสมการที่ (5.4) จึงส่งผลให้เกิดการขยายตัวที่เพิ่มสูงขึ้น

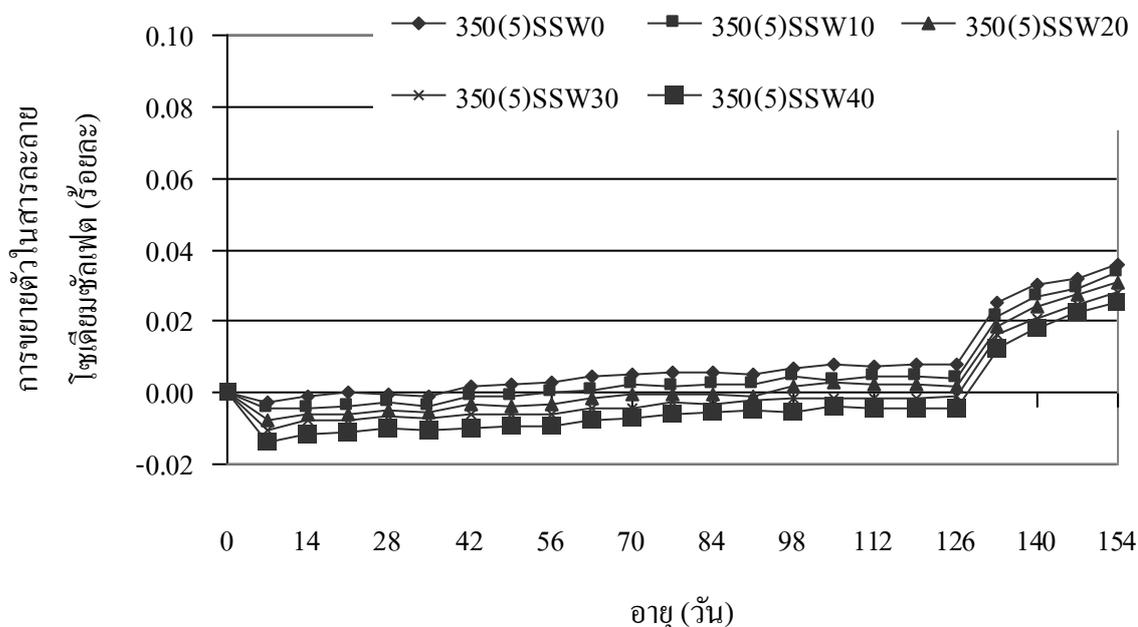


เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นกะับ 5 ± 0.5 ซม. และปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม³. ดังแสดงในภาพที่ 5.129 ถึง 5.131 ตามลำดับ พบว่าดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเมื่อคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งเป็นผลของการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะองค์ประกอบหลักที่เป็นไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3$) ซึ่งทำปฏิกิริยากับซัลเฟตในยิปซัมที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดผลิตภัณฑ์เป็นเอ็ทริงไคต์ ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 32H_2O$) โดยเฉพาะเมื่อมีซัลเฟตจากภายนอกในระหว่างการบ่มในสารละลายซัลเฟตจึงยิ่งทำให้มีเอ็ทริงไคต์เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและมีปริมาณมากในที่สุด 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

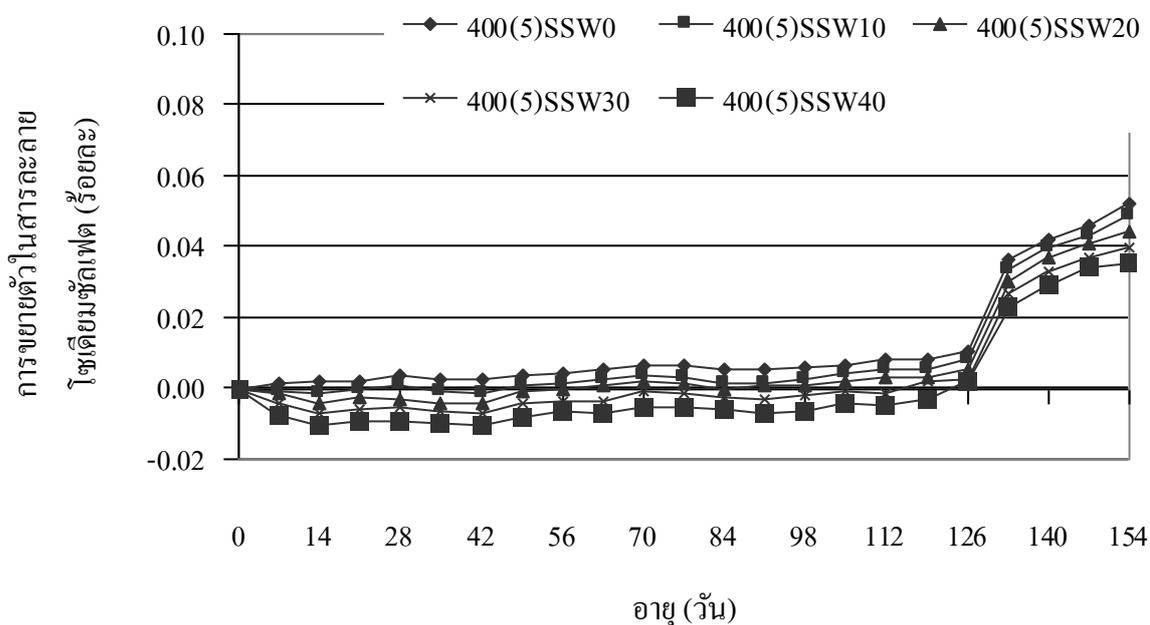
สำหรับอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์จาก 300 เป็น 350 และ 400 กก./ม³ พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้การขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลของการที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3$) มีปริมาณเพิ่มขึ้น



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

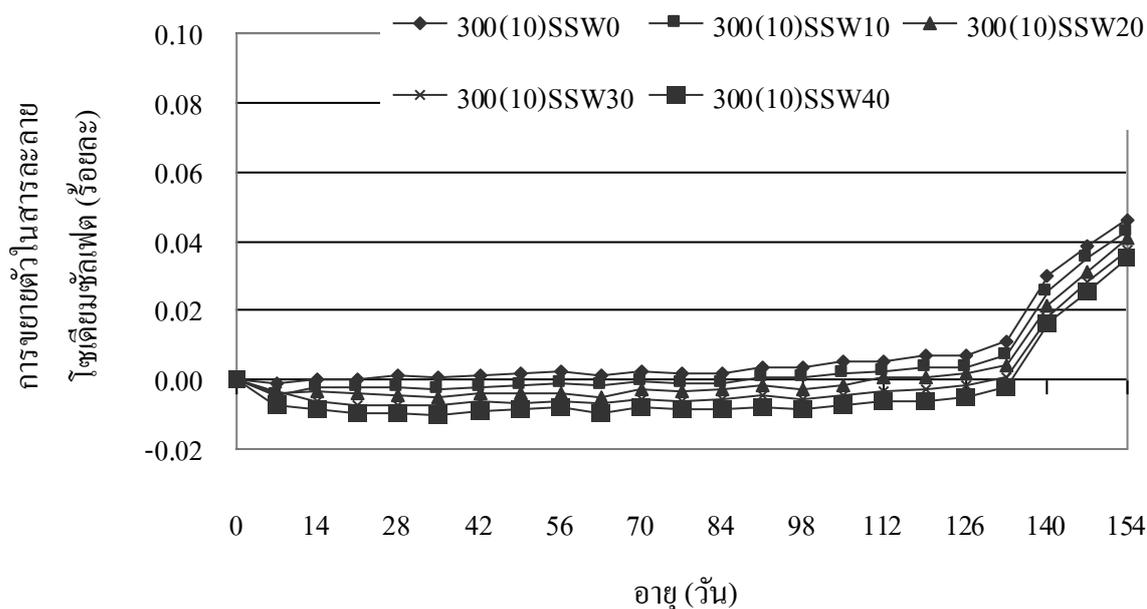


ภาพที่ 5.130 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

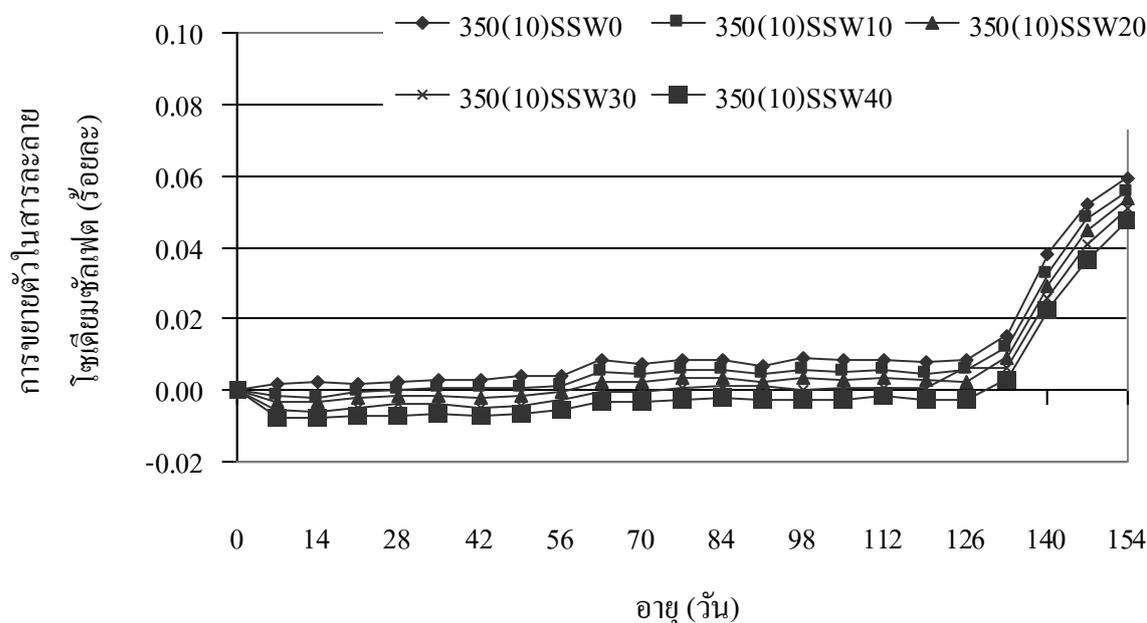


ภาพที่ 5.131 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

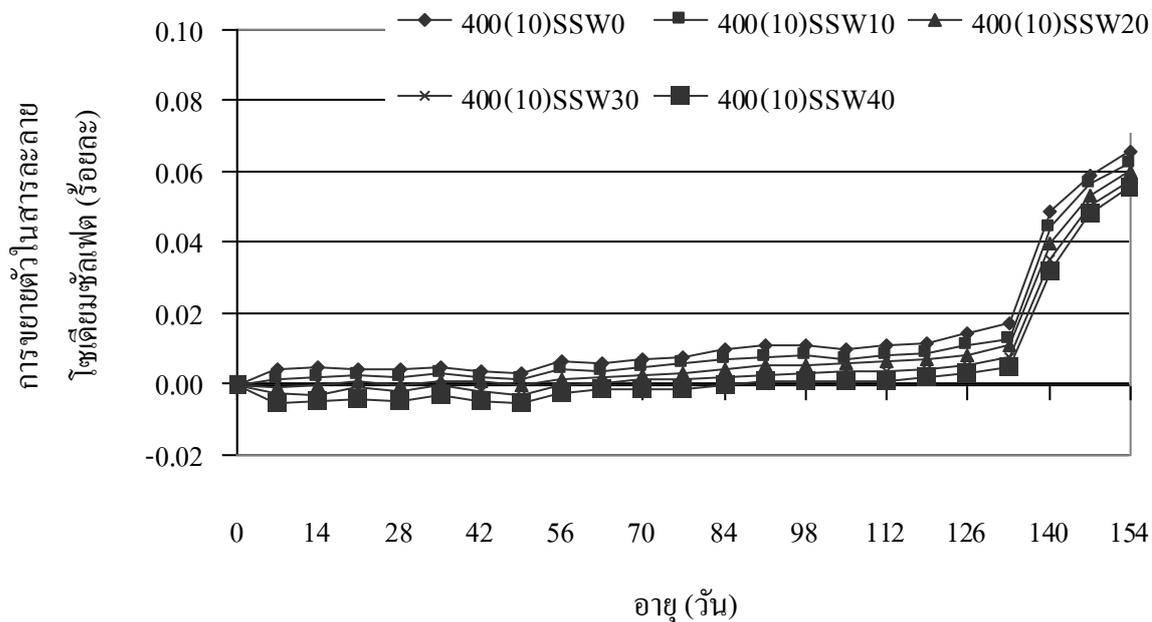
เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 เป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. แสดงในภาพที่ 5.132 ถึง 5.137 ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็นไปลักษณะเดียวกัน โดยคอนกรีตที่มีสัดส่วนการแทนที่ของผงฟูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ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



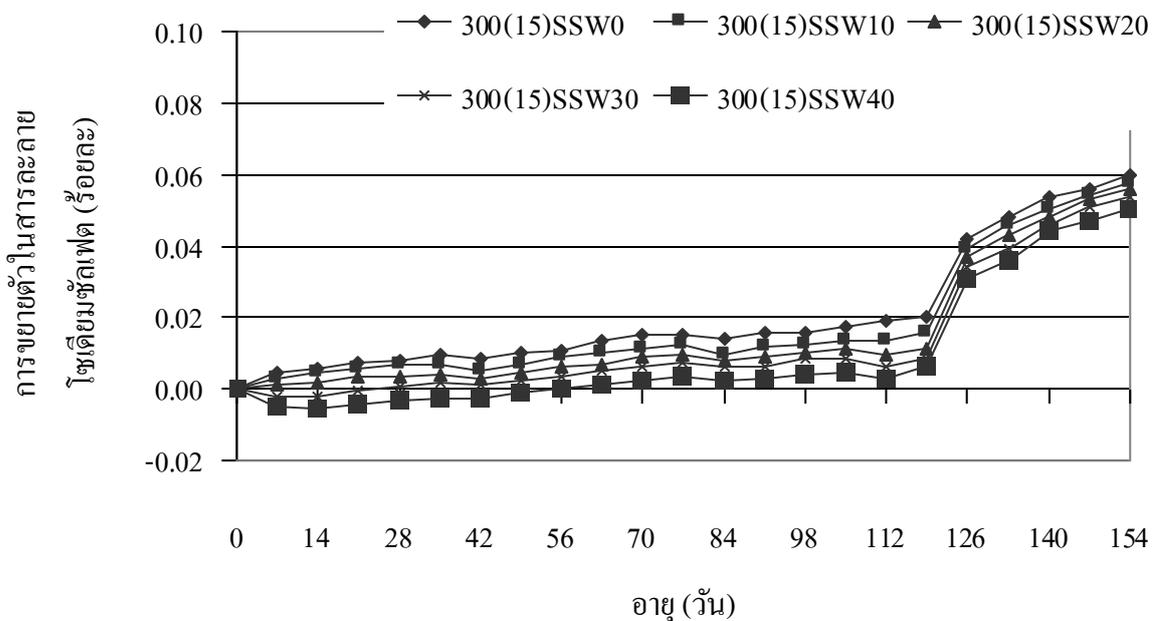
ภาพที่ 5.132 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยวบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



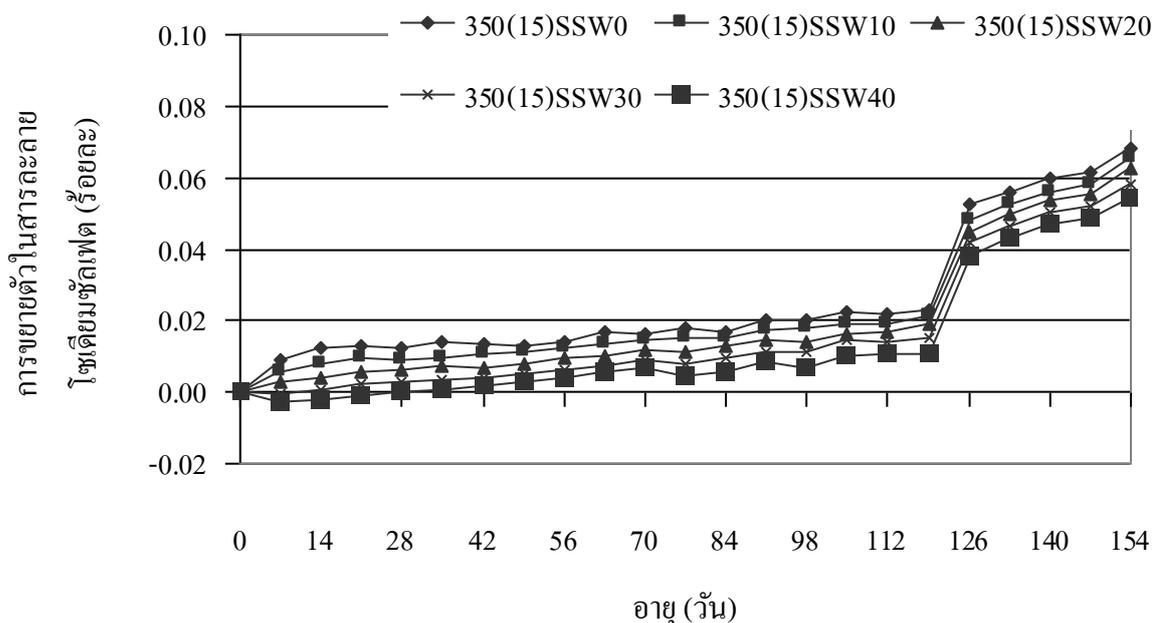
ภาพที่ 5.133 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยวบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



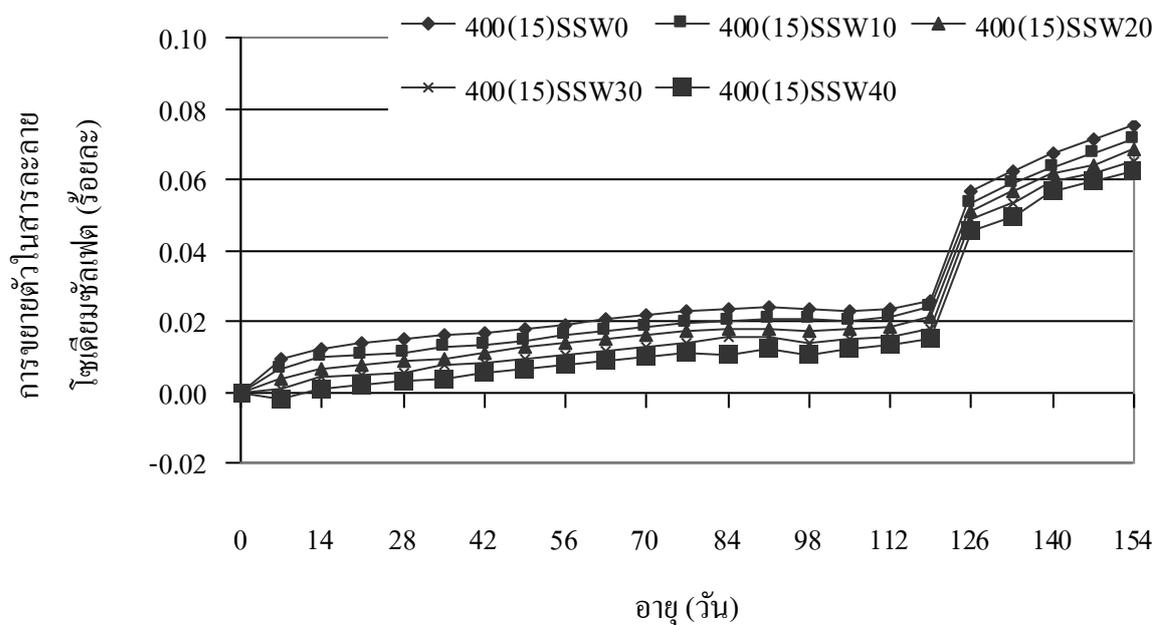
ภาพที่ 5.134 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



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



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

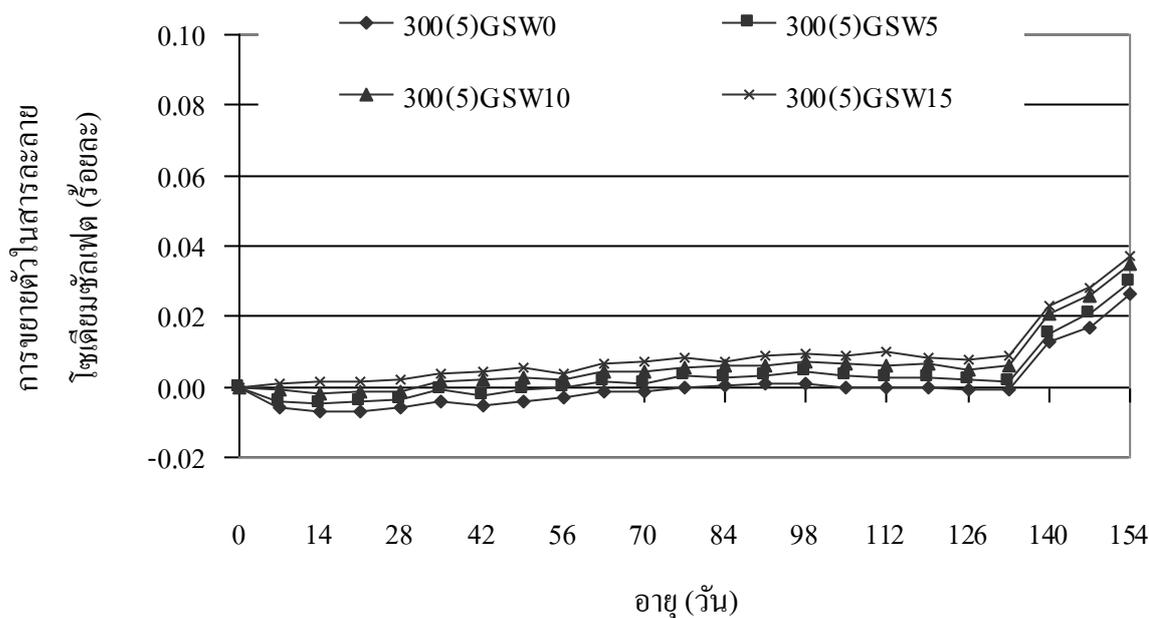


ภาพที่ 5.137 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

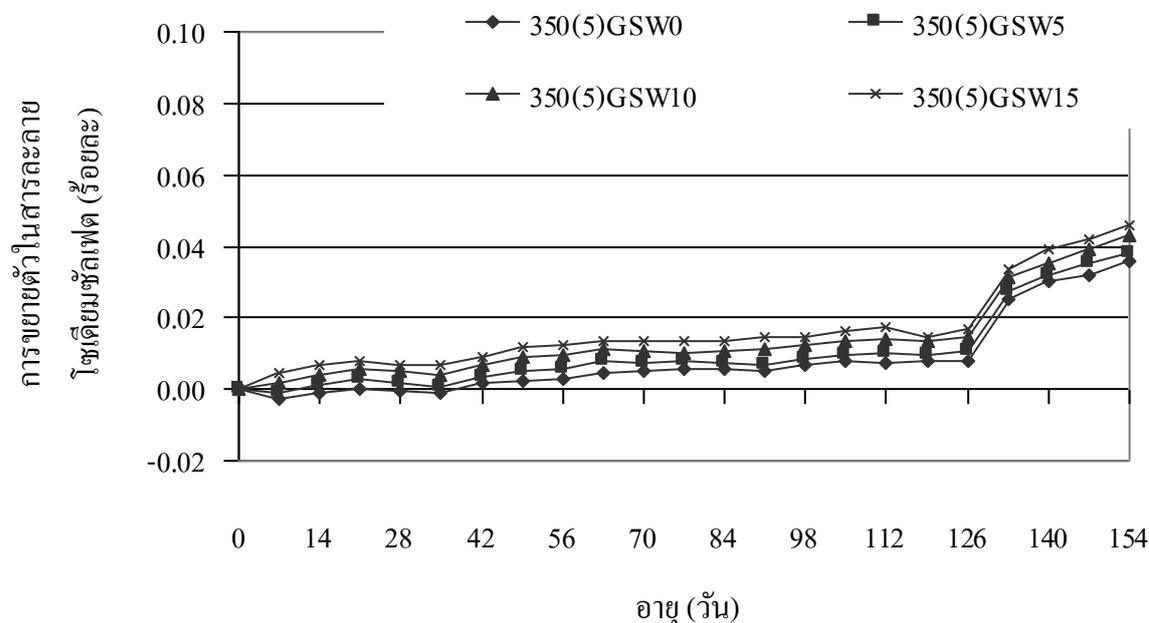
ผลการทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตซึ่งทำการผสมปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติ พบว่าทั้งคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. และมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ ดังแสดงในภาพที่ 5.139 ถึง 5.146 มีค่าการขยายตัวเป็นไปลักษณะเดียวกันกล่าวคือ ในช่วงแรกของการบ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต คอนกรีตมีค่าการขยายตัวที่ไม่แตกต่างไปจากคอนกรีตปกติ อันเป็นจากของปริมาณของยิปซั่ม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และเอ็ททริงไคต์ที่มีน้อยทำให้การขยายตัวเกิดขึ้นไม่มาก (Santhanam, M., pp. 915 – 921) และในช่วงที่สองการขยายตัวเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ผสมผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ซึ่งได้ผลกระทบจากปริมาณของสารประกอบทั้งสองที่ทำให้เกิดการขยายตัว

สำหรับการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนปริมาณผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติมีผลทำให้การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่ผงปูนทรายใส่แบบมีความละเอียดที่มากกว่าทรายธรรมชาติทำให้เป็นการเพิ่มความตึงเครียดในส่วนผสมของคอนกรีต อันจะนำไปสู่ความพรุนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงไอออนของซัลเฟตสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในคอนกรีตผ่านโพรงคาพิลลารีแล้วทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เพิ่มมากขึ้น

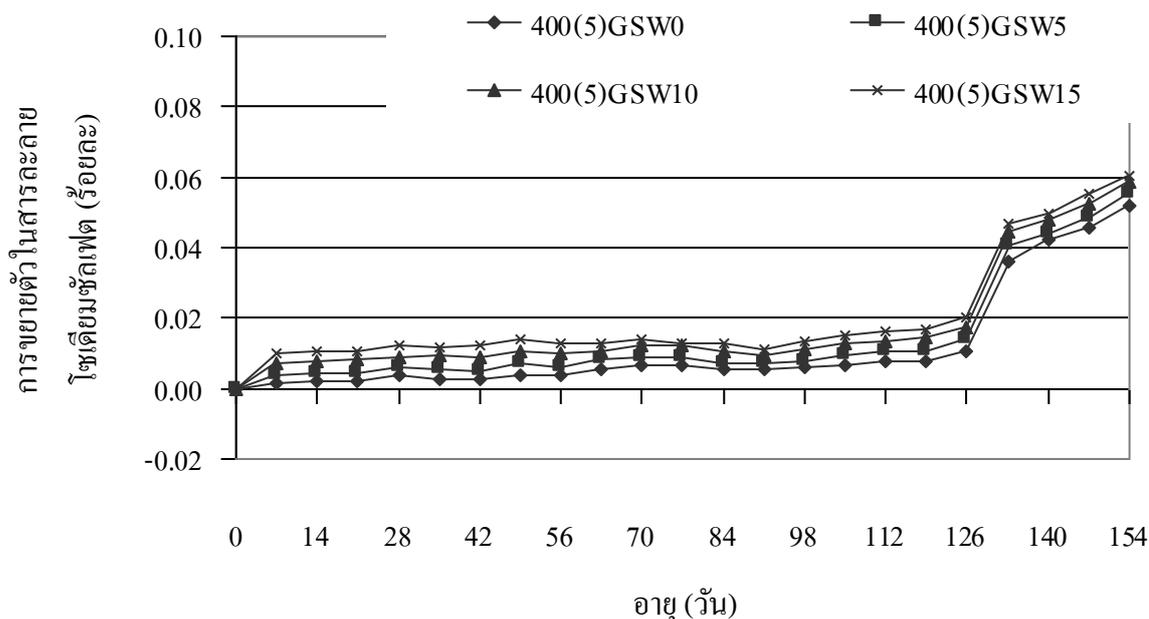
เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์จาก 300 กก./ม.³ เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ พบว่าจะให้ผลของการแทนที่ของผงปูนทรายใส่แบบในทรายธรรมชาติในลักษณะเดียวกัน และเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 เป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ



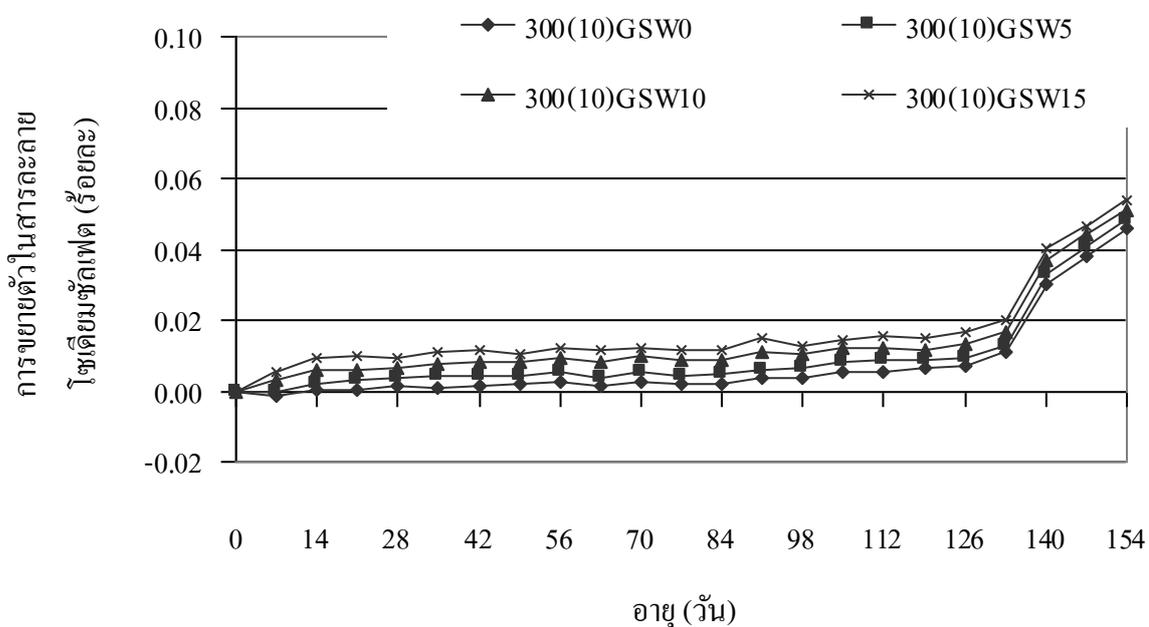
ภาพที่ 5.138 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



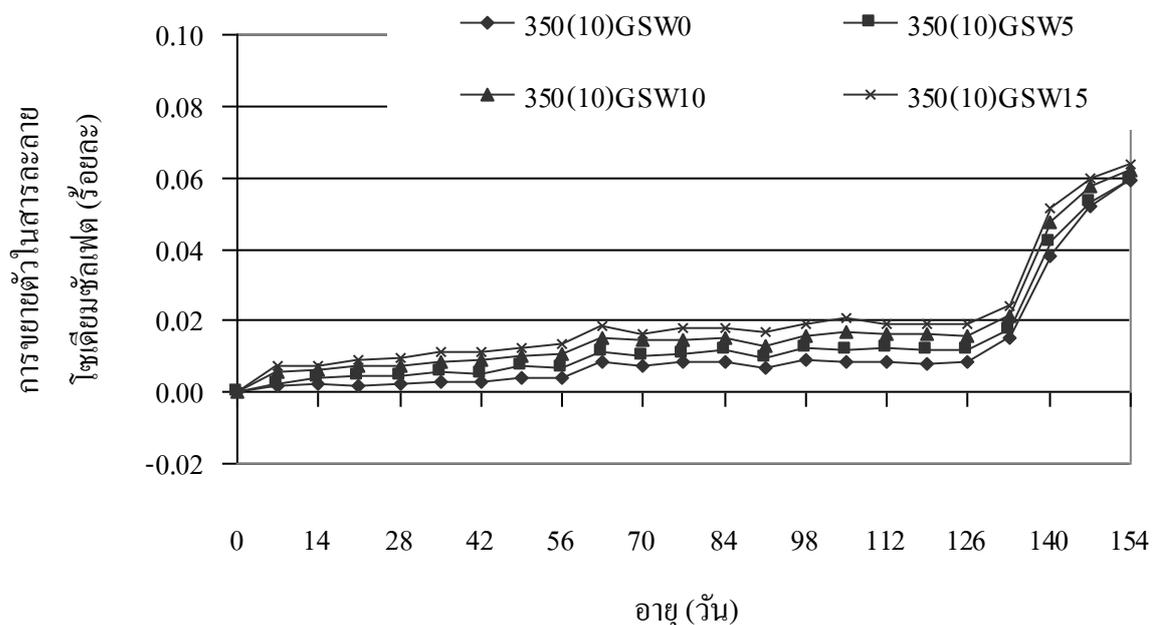
ภาพที่ 5.139 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



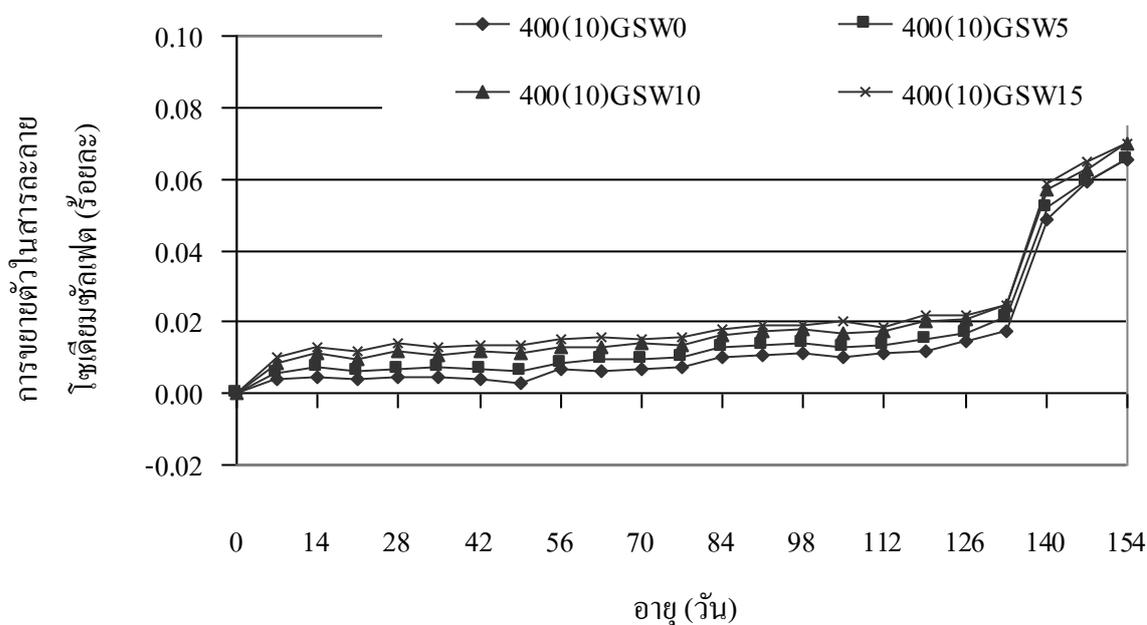
ภาพที่ 5.140 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



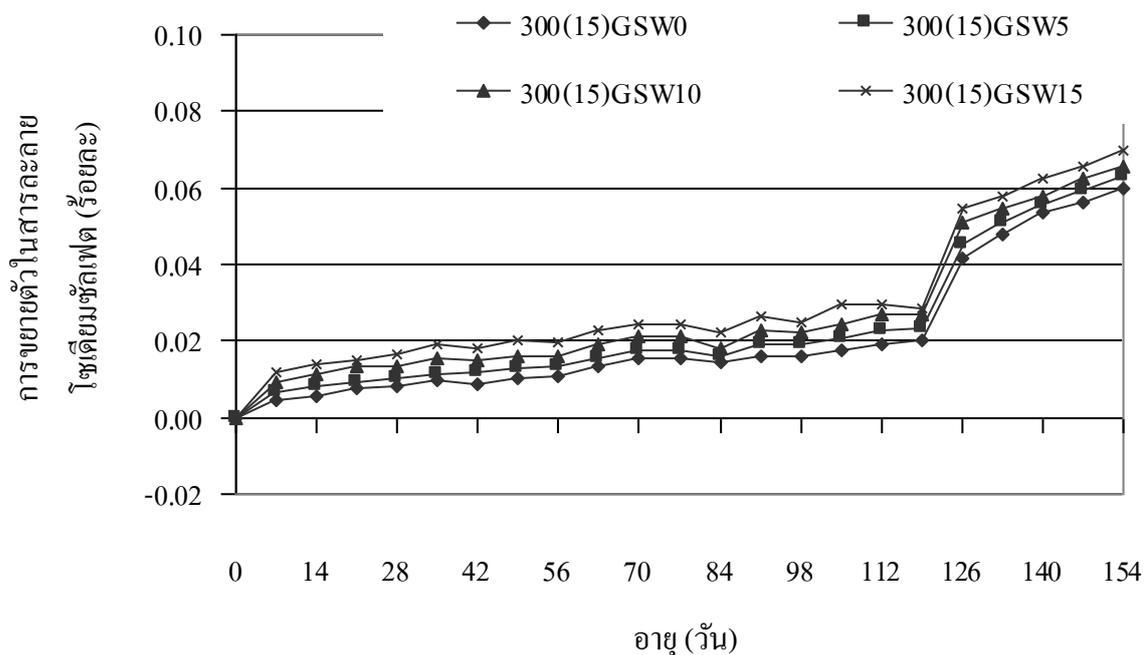
ภาพที่ 5.141 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



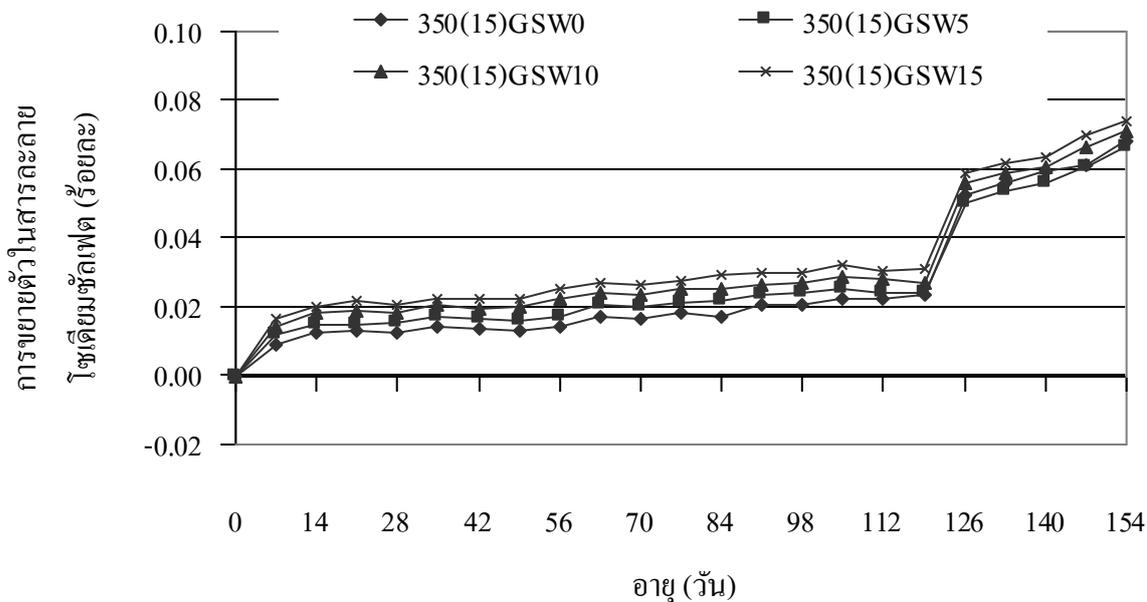
ภาพที่ 5.142 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



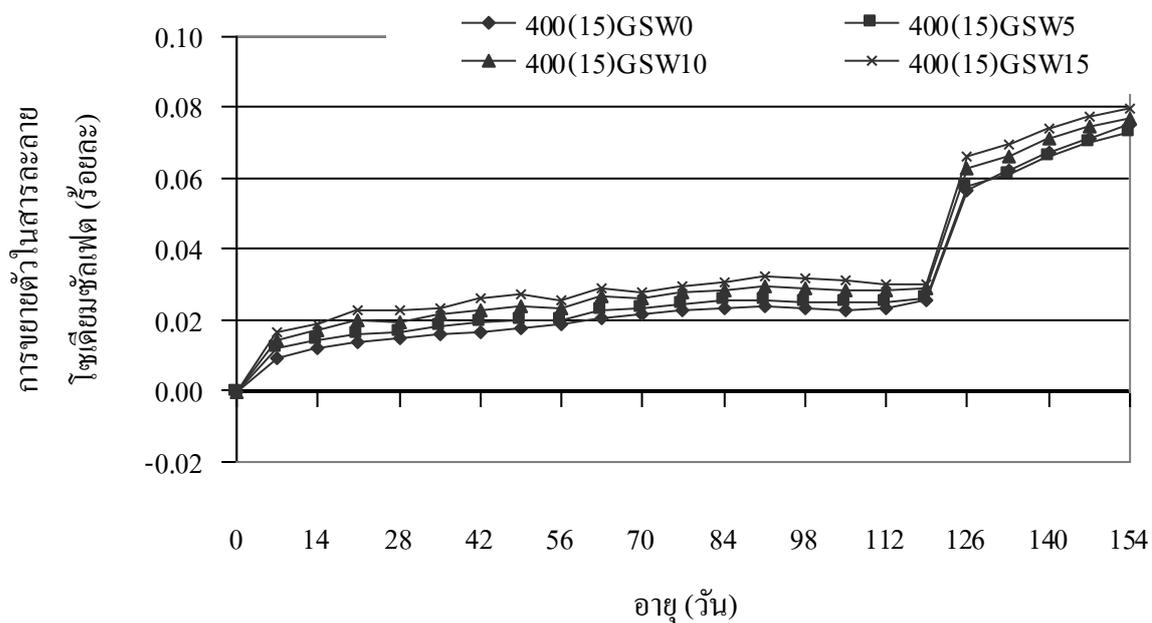
ภาพที่ 5.143 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.144 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยวบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5.145 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยวบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก



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