บทที่ 4
การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ปฏิกิริยาทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูมวิเคราะห์จากปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับผลกระทบทางกลเกี่ยวกับกำลังของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ กัน การที่คัลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างซีเมนต์กับน้ำถูกใช้ไปด้วยปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมเกิดเป็นคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งชี้บ่งถึงการเพิ่มกำลังเชิงกล ในการศึกษานี้ได้มีการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานทั้งในสภาพเหลวและในสภาพแข็งตัวเพื่อยืนยันความเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงตามขอบข่ายของการวิจัยและมีการวิเคราะห์ผลจากการผสมซิลิกาฟูมทั้งในส่วนของทางเคมีและทางกลดังรายละเอียด

4.1 การวิเคราะห์ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์

คัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรคัลเซียมซิลิเกตและไดคัลเซียมซิลิเกตในซีเมนต์กับน้ำ แต่เมื่อมีการผสมซิลิกาฟูมเข้าไปด้วยคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกใช้ไปจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะเป็นผลรวมทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ก่อให้เกิดคัลเซียมไฮดรอกไซด์และปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีการใช้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ให้ลดลง

ในรูปที่ 4.1 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้ในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงในช่วง 7 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มจะลดลงซึ่งแสดงถึงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุ ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นเพียงเฉพาะในช่วง 7 วันแรกโดยอัตราการเพิ่มน้อยกว่าในซีเมนต์เพสต์ธรรมดา และเมื่อหลังจาก 7 วันปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงตามอายุซึ่งเป็นการชี้บ่งว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะใช้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ให้ปริมาณคงเหลือลดลง ด้วยการศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมใช้วิธีการผสมกับซีเมนต์เพสต์แบบแทนที่ (Substitution) ดังนั้นในการหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ล้วนจะสามารถทราบได้จากการทดสอบโดยตรงแต่ในการหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมจะต้องเทียบสัดส่วนการเกิด ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมจะมีปริมาณซีเมนต์ลดลงตามสัดส่วนการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูม ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูมหาจากอัตราปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เพสต์ธรรมดาตามปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม

ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 - 4.6 เป็นการเทียบส่วนการเกิดคัลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมจากผลการทดสอบของเพสต์ที่มีซีเมนต์ล้วน โดยที่ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมจะลดลงตามปริมาณซิลิกาฟูมที่แทนที่ทำให้ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากซีเมนต์ลดลงตามสัดส่วนของซีเมนต์ เมื่อซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูม 5 - 25 % จะให้ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นตามสัดส่วนของซีเมนต์ที่มีอยู่ในแต่ละส่วนผสมตามอายุที่ทดสอบ ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่หายไปเป็นที่มั่นใจว่าเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูม

ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้จากการทดสอบ TGA จะเป็นปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในขณะนั้น ซึ่งจะรวมปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์และปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูม ดังนั้นเมื่อรู้ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะสามารถหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Percent Consumption of Calcium Hydroxide) ได้

$$P = H * (1 - R/100) - F \qquad 4.1$$

เมื่อ

P = ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานิก (%)

R = ปริมาณแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมโดยน้ำหนัก (%)

H = ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่วัดปฏิกิริยาของซีเมนต์เพสต์อย่างเดียว (%)

F = ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่วัดปฏิกิริยาของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม (%)

จะเห็นว่าซิลิกาฟูมเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ตั้งแต่อายุ 1 วันดังแสดงในรูปที่ 4.7 แต่ที่ปริมาณซิลิกาฟูมน้อย ๆ (5 - 10 %) การใช้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ในปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดน้อยกว่าเมื่อปริมาณซิลิกาฟูม 15 , 20 และ 25 % ด้วยอัตราที่แตกต่างกันมาก แต่ที่อายุ 3 - 7 วัน พบว่าปริมาณการใช้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณ 5 % น้อยสุด ส่วนที่ 10 % มีการใช้ปานกลาง และที่ 15 , 20 และ 25 % มีอัตราการใช้สูงสุดโดยมีค่าใกล้เคียงกัน ในทำนองเดียวกันที่อายุมากขึ้นที่ 28 วันและ 56 วัน จะมีอัตราการใช้คัลเซียมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามเวลาและที่ปริมาณการใช้ซิลิกาฟูม 5 , 10 และ 15 % ดูจะเป็นสัดส่วนกัน แต่เมื่อปริมาณเกินกว่านี้พบว่าปริมาณซิลิกาฟูมจะมีผลน้อยต่อปริมาณการใช้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ ในรูปที่ 4.8 เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับปริมาณซิลิกาฟูม พบว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะ

เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเพิ่มขึ้น จากรูปยืนยันปริมาณการใช้ซิลิกาฟูมที่ 5 % มีผลต่อการใช้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ได้น้อยมากโดยเฉพาะที่อายุน้อยกว่า 7 วัน ส่วนที่ปริมาณ 10 % ดูดีขึ้นที่อายุ 7 วัน และที่ปริมาณการผสมที่ต้องการผลการใช้คัลเซียมไฮดรอกไซด์สูงในช่วงอายุยังน้อยอยู่ที่ 15 % ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.2 การหาปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)

ปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูมมี 2 อย่างคือ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์กับปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมดังแสดงในสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

$$\text{Cement} + \text{น้ำ} \longrightarrow Ca(OH)_2 + \text{CSH} \qquad 4.2$$

$$\text{Silica Fume} + Ca(OH)_2 \longrightarrow \text{CSH} \qquad 4.3$$

ผลผลิตที่สำคัญซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมี 2 อย่างคือ คัลเซียมไฮดรอกไซด์และคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต จากผลการทดสอบ TGA สามารถทราบปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนผสม ณ เวลาใด ๆ ทำให้สามารถคาดคะเนปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ตามหลักสมการดุลเคมี ในทำนองเดียวกันผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกคือคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งจากตารางที่ 4.1 แสดงค่าปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้คำนวณหาปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกตามหลักสมการดุลเคมีได้เช่นเดียวกัน

Rixom[3] ได้เสนอข้อสมมุติฐานสำหรับการคำนวณหาปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์จะเกิดจากไตรคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและไดคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเท่านั้น ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150, มอก. 15 - 2523 ถูกกำหนดให้มีไตรคัลเซียมซิลิเกตไม่น้อยกว่า 52 % และไดคัลเซียมซิลิเกต 20 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์

2. ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะประกอบด้วยคัลเซียมไฮดรอกไซด์ $[Ca(OH)_2]$ และคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งสามารถคำนวณน้ำหนักโมเลกุลจากสูตรเคมีคือ $Ca(OH)_2$ และ $3CaO.2SiO_2.3H_2O$ ตามลำดับ

3. ส่วนประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ [SiO_2] จำนวนมากดังนั้น ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะได้คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จากสารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่านั้น

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรคัลเซียมซิลิเกตและไดคัลเซียมซิลิเกตอาจเขียน.เป็นสมการทางเคมีดังแสดงในสมการที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

$$2[3CaO.SiO_2] + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad 4.4$$

$$2[2CaO.SiO_2] + 4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \qquad 4.5$$

ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมโดยซิลิกอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ดังสมการเคมีที่ 4.6

$$2SiO_2 + 3Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \qquad 4.6$$

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight , MW.) ของสารประกอบต่าง ๆ ได้คำนวณดังรายละเอียดในภาคผนวก สรุปได้คือ

$3CaO.2SiO_2.3H_2O$	มี MW. = 342
$3CaO.SiO_2$	มี MW. = 228
$2CaO.SiO_2$	มี MW. = 172
$Ca(OH)_2$	มี MW. = 74
H_2O	มี MW. = 18
SiO_2	มี MW. = 60

จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสามารถทดสอบหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นได้โดยตรงในซีเมนต์เพสต์ล้วน แต่สำหรับเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมด้วยการแทนที่ซีเมนต์ การหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะต้องใช้วิธีการเทียบสัดส่วนจากการทดสอบของซีเมนต์เพสต์ล้วนตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ในตารางที่ 4.1 ปริมาณ $Ca(OH)_2$ คงเหลือคือค่าที่วัดได้จากตัวอย่างทดสอบ ส่วน

ปริมาณ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้จากการเทียบสัดส่วนจากผลการทดสอบซีเมนต์เพสต์ล้วนตามปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม และปริมาณ $Ca(OH)_2$ ที่ถูกใช้ไปได้จากการหักลบปริมาณ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นด้วยปริมาณ $Ca(OH)_2$ คงเหลือ ดังนั้นปริมาณของคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะสามารถคำนวณตามน้ำหนักโมเลกุลด้วยการเทียบโมลโมเลกุลจากสมการเคมีที่ 4.4 และ 4.5 ดังรายละเอียดการคำนวณไว้ในภาคผนวก และปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเป็นไปตามกระบวนการใช้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการเคมีที่ 4.6 ในทำนองเดียวกันดังรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ในกรณีของตัวอย่างทดสอบที่เป็นซีเมนต์เพสต์ล้วนคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทั้งหมดจะเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพียงอย่างเดียว แต่ในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทั้งหมดจะเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิกรวมกันดังผลที่แสดงในตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.9 - 4.13 กราฟแสดงปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิกรวมกันในเพสต์ผสมซิลิกาฟูมที่ 5 - 25 % พบว่าปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเพิ่มขึ้นตามอายุ โดยในช่วง 7 วันแรกอัตราการเกิดคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นไปในอัตราที่สูงและจะค่อย ๆ ลดลงตามลำดับเมื่ออายุมากขึ้น อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะช่วยเพิ่มปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตให้มากขึ้น แม้ในช่วงแรกที่อายุเริ่มแรก (1 - 3 วัน) ปริมาณจะเพิ่มไม่มากนักแต่หลังจาก 7 วันขึ้นไปปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะช่วยเพิ่มปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในอัตราที่สูงขึ้นตามลำดับ

จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตของเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม 5 - 25% พบว่าที่อายุเริ่มแรก (1 - 3 วัน) ปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตดูจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบของซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เพราะใช้การผสมแบบแทนที่ ปริมาณซีเมนต์ของเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมจะลดลงตามส่วนจึงทำให้ปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลงตามโดยเฉพาะในส่วนผสมที่มีปริมาณการแทนที่สูง แม้จะมีคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกก็ตามแต่สามารถทดแทนได้เพียงบางส่วนเท่านั้น หลังจาก 7 วันขึ้นไปปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมจะเริ่มแสดงผลสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดาโดยพบว่าที่ส่วนผสมซิลิกาฟูมที่ 15 % จะมีปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นสูงที่สุดทั้งที่อายุ 7 วัน , 28 วัน และ 56 วัน ตามลำดับ

4.3 กำลังอัดของคอนกรีต

การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงจากผลการทดสอบกำลังอัดแสดงในตารางที่ 3.6 - 3.17 ในบทที่ 3 ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 1 วันและ 28 วัน มีค่ามากกว่า 300 และ 600 กก. ต่อตร.ซม. ตามลำดับ ในรูปที่ 4.15 แสดงอัตราการพัฒนากำลังของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม

เทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน ซึ่งกราฟนี้หาได้โดยการนำค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมที่อายุต่าง ๆ หารด้วยกำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 5 - 25 % ที่อายุเริ่มแรกและระยะยาวจะแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด พบว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม ที่อายุ 1 วันจะมีกำลังอัดประมาณ 50 - 60 % ของคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน ที่อายุ 3 วัน ประมาณ 80 - 85 % ส่วนที่อายุ 7 วัน คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 5 และ 25 % จะมีค่าประมาณ 90 % แต่ที่ซิลิกาฟูม 10 , 15 และ 20 % จะมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน ประมาณ 10 - 15 % ซึ่งแสดงถึงการพัฒนากำลังอัดในระยะแรกได้ดีมาก ส่วนกำลังอัดในระยะยาวคือที่อายุ 28 วันขึ้นไปคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมจะมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน ประมาณ 20 - 40 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมยังช่วยเพิ่มกำลังอัดในระยะยาว

ส่วนรูปที่ 4.16 แสดงค่ากำลังอัดที่ปริมาณซิลิกาฟูมแตกต่างกัน พบว่าในช่วงอายุแรก ๆ (1 - 3 วัน) คอนกรีตที่ใส่ซิลิกาฟูมและคอนกรีตธรรมดาจะมีค่ากำลังอัดไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ในระยะยาวคือหลังจาก 7 วันขึ้นไปพบว่าคอนกรีตที่ใส่ซิลิกาฟูมจะมีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตธรรมดา คือคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 5 - 25 % จะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 10 - 25 % ในด้านกำลังอัดเพียงอย่างเดียวคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 15 % จะให้กำลังอัดสูงที่สุด ส่วนในด้านกำลังอัดและความสามารถทำงานได้พร้อมกัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 5 % ที่อัตราส่วนน้ำต่อออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.32 จะเหมาะสมที่สุด โดยให้ค่ากำลังอัดที่ 1 วัน 340 กก.ต่อตร.ซม. ที่ 28 วัน เท่ากับ 740 กก. ต่อตร.ซม. มีค่าการยุบตัว 21 ซม. และค่าการไหลแผ่ 50 ซม.

4.4 <u>การพัฒนากำลังอัดกับปริมาณการเกิด CSH</u>

คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมในลักษณะแทนที่ซีเมนต์แม้ว่าจะมีปริมาณซีเมนต์น้อยกว่าจากการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมบางส่วนเพราะฉะนั้นปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตน่าจะมีน้อยกว่า แต่จากการศึกษาพบว่าในช่วงอายุ 1 และ 3 วัน ปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่คำนวณได้ในคอนกรีตที่ใส่ซิลิกาฟูมมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาไม่มาก แสดงว่าซิลิกาฟูมทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้รวดเร็วมากทำให้เกิดคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นมาทดแทนซีเมนต์ที่หายไปได้แม้ในช่วงเวลาเพียง 1 วัน ส่วนที่อายุ 7 , 28 , 56 วัน คอนกรีตที่ใส่ซิลิกาฟูมมีปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 3 %, 7 %, 12 % ตามลำดับ เนื่องจากคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นตามเวลาทำให้ในระยะยาวคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตธรรมดา

จากรูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตกับปริมาณซิลิกาฟูมจะเป็นเส้นโค้งคว่ำโดยมีค่าสูงสุดที่ปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 15 % เปรียบเทียบกับกำลังอัดตามปริมาณซิลิกาฟูมในรูปที่ 4.16 พบว่าความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับปริมาณซิลิกาฟูมจะเป็นเส้นโค้งคว่ำโดยมีค่าสูงสุด

ที่ปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 15 % เช่นเดียวกัน ในการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตดังแสดงในรูปที่ 4.17 เป็นกราฟไร้หน่วย (Dimensionless) ที่แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ เทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน [$f_c'/f_c'(28\ days)$] กับอัตราส่วนของปริมาณ CSH ที่อายุต่าง ๆ เทียบกับปริมาณ CSH ที่อายุ 28 วัน [CSH / CSH(28 days)] พบว่าความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเส้นตรงแสดงว่ากำลังอัดของคอนกรีตแปรผันโดยตรงกับปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต นอกจากนี้ยังศึกษาอัตราส่วนของกำลังอัดแบบไร้หน่วย [$f_c'/f_c'(28\ days)$] กับปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตแบบไร้หน่วย [CSH / CSH(28 days)] ที่ปริมาณซิลิกาฟูม 5 - 25 % ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าอัตราส่วนดังกล่าวที่ปริมาณซิลิกาฟูม 5 - 25 % จะมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 1 โดยมีความผิดพลาดเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยในรูปสัมประสิทธิ์การแปรปรวนที่ 0.95 - 1.05 เท่านั้น แสดงว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีอยู่ในส่วนผสม เพราะฉะนั้นในคอนกรีตที่มีคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมากกว่าย่อมมีกำลังอัดมากกว่าด้วยเพื่อยืนยันผลดังกล่าวในรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะแปรผันโดยตรงต่อปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหมายความว่าเมื่อคอนกรีตมีปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสูงขึ้นก็จะมีกำลังอัดมากขึ้นตาม เพราะฉะนั้นในคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม 15 % เมื่อมีปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสูงสุดทำให้มีกำลังอัดสูงสุดด้วย

ตารางที่ 4.1 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานิก(% by weight of cementitious)

Mix No.	Age (Days)	$Ca(OH)_2$ ปริมาณคงเหลือ (Tested)	$Ca(OH)_2$ * จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Proportioned)	$Ca(OH)_2$ ปริมาณถูกใช้ไป Consumption
Ca-00-1	1	10.07	10.07	-
Ca-00-3	3	11.51	11.51	-
Ca-00-7	7	13.91	13.91	-
Ca-00-28	28	15.29	15.29	-
Ca-00-56	56	15.73	15.73	-
Ca-05-1	1	9.40	9.57	0.17
Ca-05-3	3	10.64	10.93	0.29
Ca-05-7	7	12.51	13.21	0.70
Ca-05-28	28	12.34	14.53	2.19
Ca-05-56	56	12.08	14.94	2.86
Ca-10-1	1	8.58	9.06	0.48
Ca-10-3	3	9.18	10.36	1.18
Ca-10-7	7	10.79	12.52	1.73
Ca-10-28	28	10.50	13.76	3.26
Ca-10-56	56	9.99	14.16	4.17
Ca-15-1	1	7.07	8.56	1.49
Ca-15-3	3	7.81	9.78	1.97
Ca-15-7	7	8.63	11.82	3.19
Ca-15-28	28	8.68	13.00	4.32
Ca-15-56	56	7.94	13.37	5.43
Ca-20-1	1	6.84	8.06	1.22
Ca-20-3	3	7.29	9.21	1.92
Ca-20-7	7	8.15	11.13	2.98
Ca-20-28	28	7.88	12.23	4.35
Ca-20-56	56	7.17	12.58	5.41
Ca-25-1	1	6.08	7.55	1.47
Ca-25-3	3	6.54	8.63	2.09
Ca-25-7	7	7.64	10.43	2.79
Ca-25-28	28	7.16	11.47	4.31
Ca-25-56	56	6.43	11.80	5.37

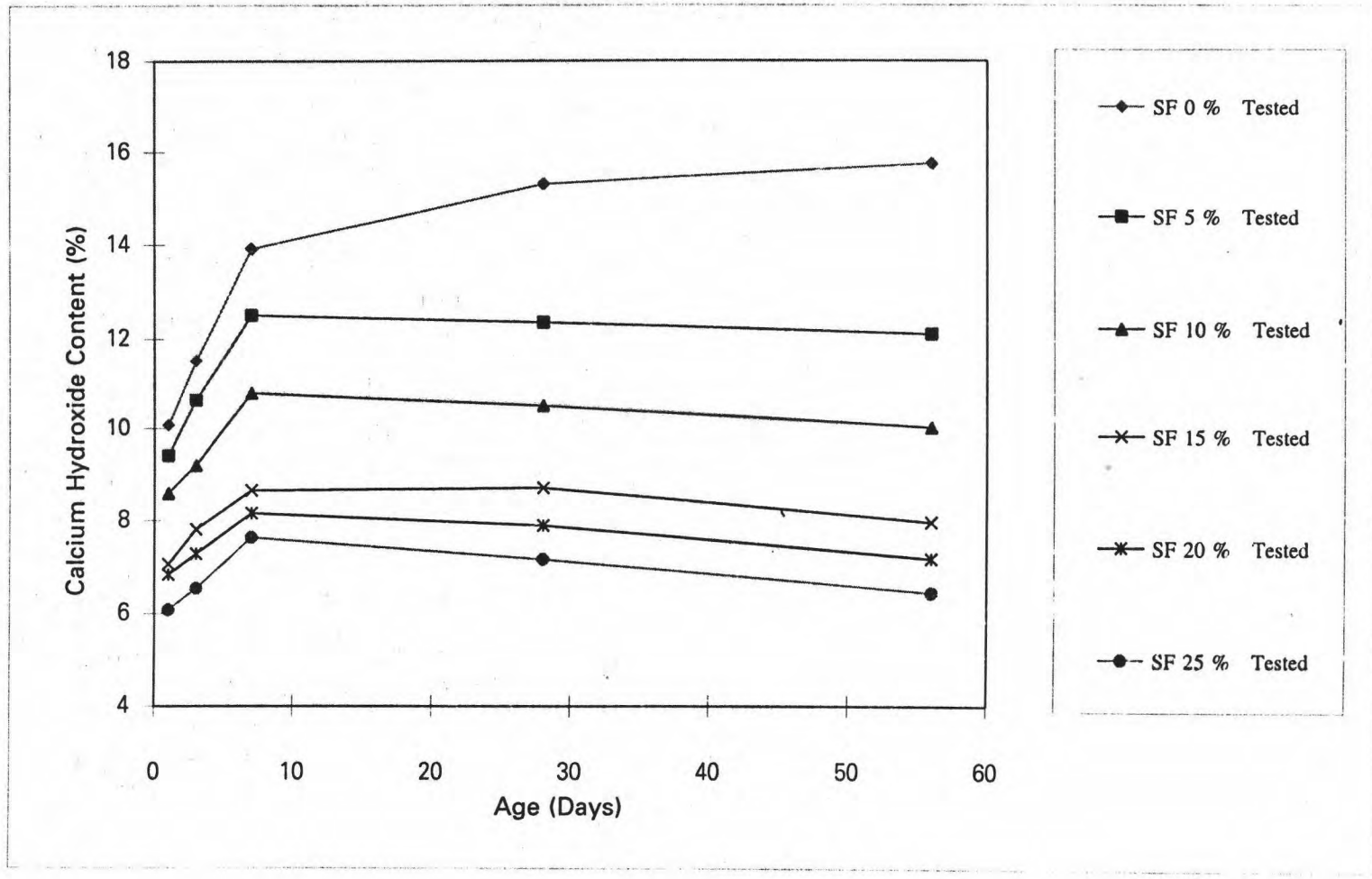
หมายเหตุ * เทียบสัดส่วนจากผลการทดสอบของซีเมนต์เพสต์ล้วน

ตารางที่ 4.2 ปริมาณ $Ca(OH)_2$ และ CSH ที่ได้จากการคำนวณเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยคิดจากปริมาณอนุภาคละเอียด (ซีเมนต์และซิลิกาฟูม) 100 กรัม

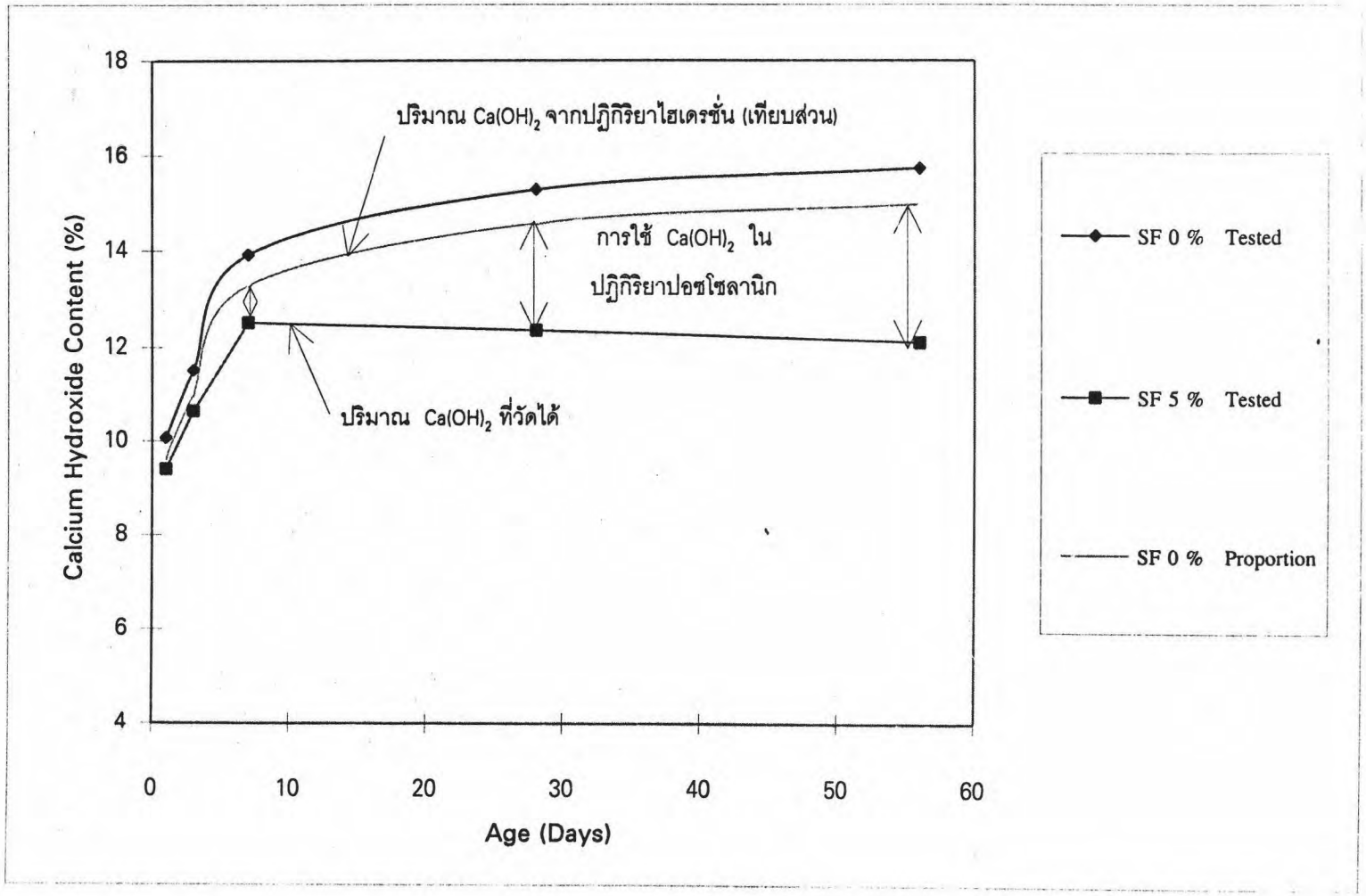
%	Cement		SF	$Ca(OH)_2$ (g.) contributed by			CSH (g.) contributed by			
Silica Fume	C_3S (g.)	C_2S (g.)	SiO_2 (g.)	C_3S (g.)	C_2S (g.)	Total.	C_3S (g.)	C_2S (g.)	SiO_2 (g.)	Total.
SF 0 %	52.00	20.00	-	25.32	4.30	29.62	39.00	19.88	-	58.88
SF 5 %	49.40	19.00	4.75	24.05	4.09	28.14	37.05	18.89	13.54	69.48
SF 10 %	46.80	18.00	9.50	22.78	3.87	26.66	35.10	17.90	27.08	80.07
SF 15 %	44.20	17.00	14.25	21.52	3.66	25.18	33.15	16.90	38.79	88.84
SF 20 %	41.60	16.00	19.00	20.25	3.44	23.69	31.20	15.91	36.50	83.60
SF 25 %	39.00	15.00	22.50	18.99	3.23	22.21	29.25	14.91	34.22	78.38

ตาราง 4.3 ผลรวมของปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่คำนวณจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูม

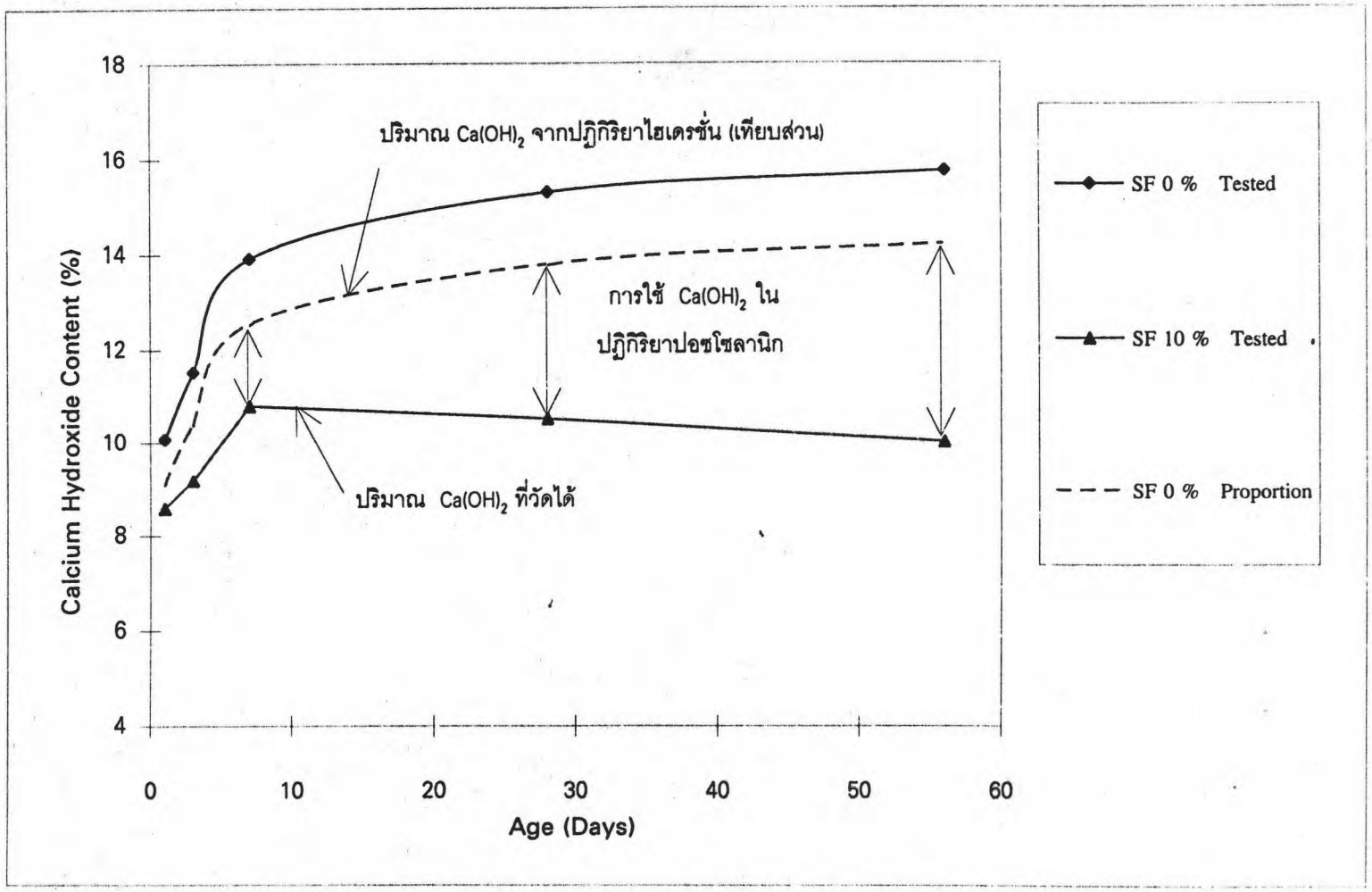
% Silica Fume	CSH (g.)				
	1 Day	3 Days	7 Days	28 Days	56 Days
0	20.02	22.88	27.65	30.40	31.27
5	19.29	22.18	27.40	31.89	34.11
10	18.75	22.41	27.56	32.05	34.58
15	19.31	22.48	28.41	32.50	34.95
20	17.90	21.27	26.72	31.02	33.34
25	17.27	20.38	25.03	29.44	31.73



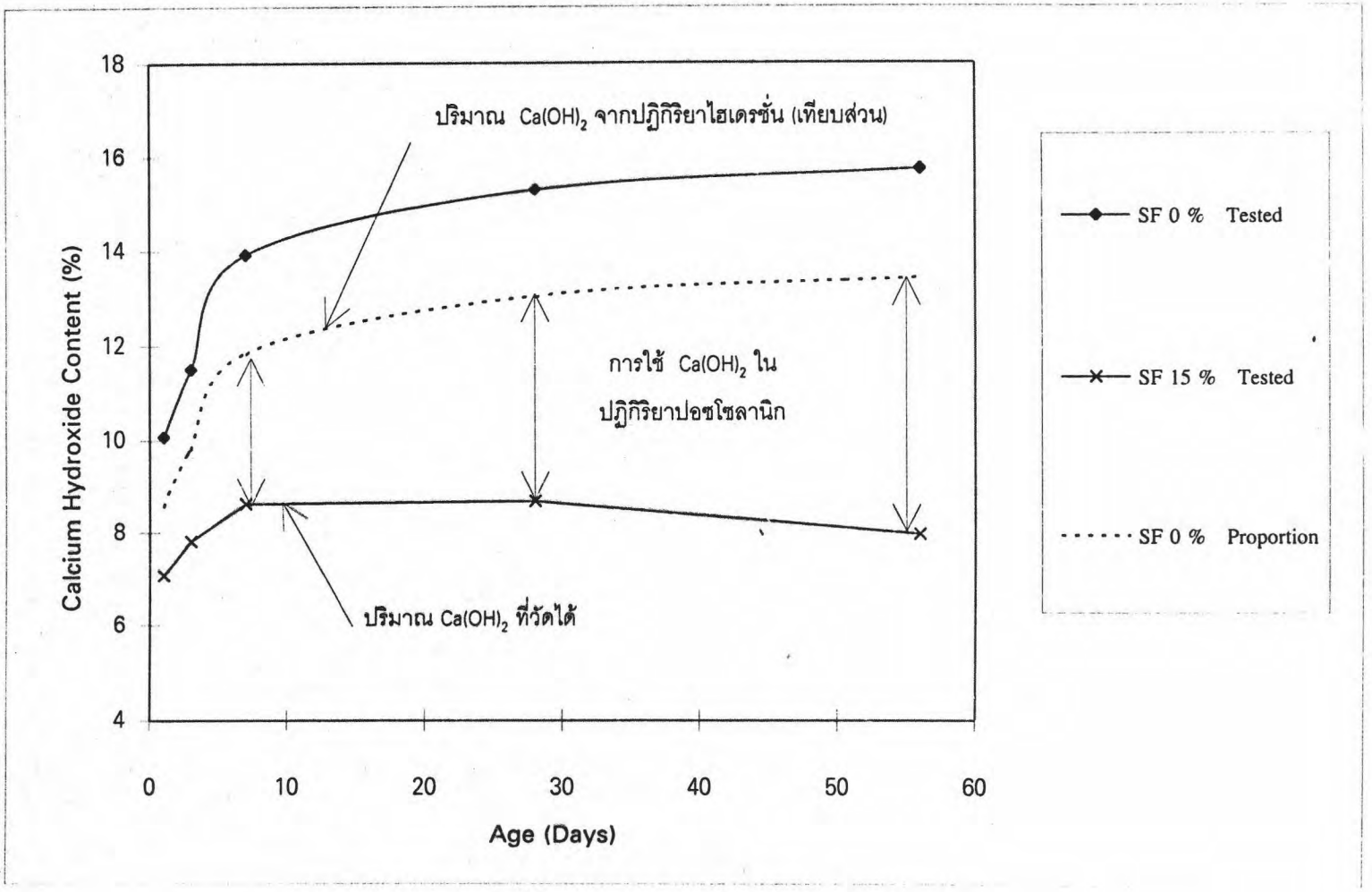
รูปที่ 4.1 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมตามอายุ



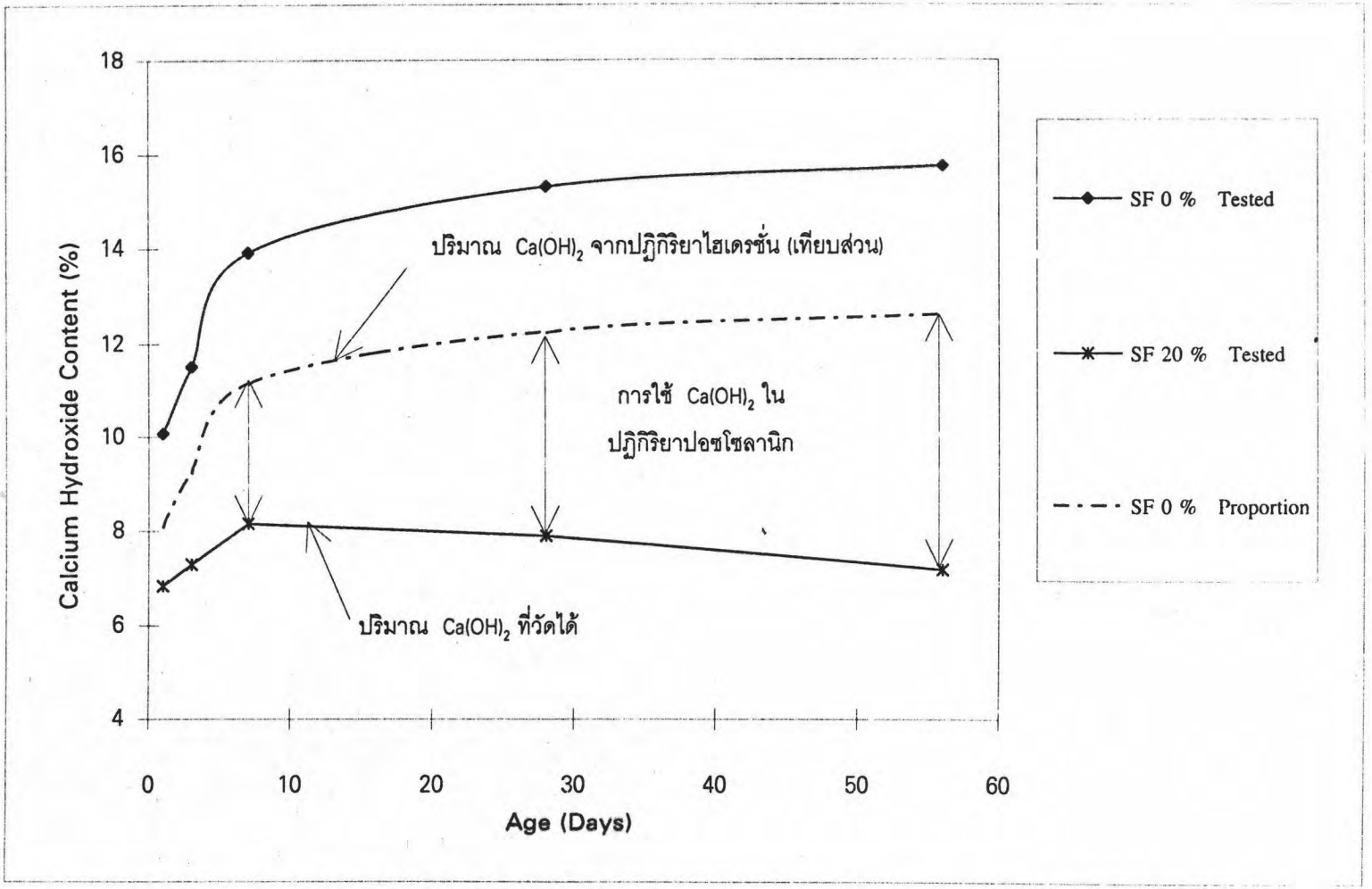
รูปที่ 4.2 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม 5 %



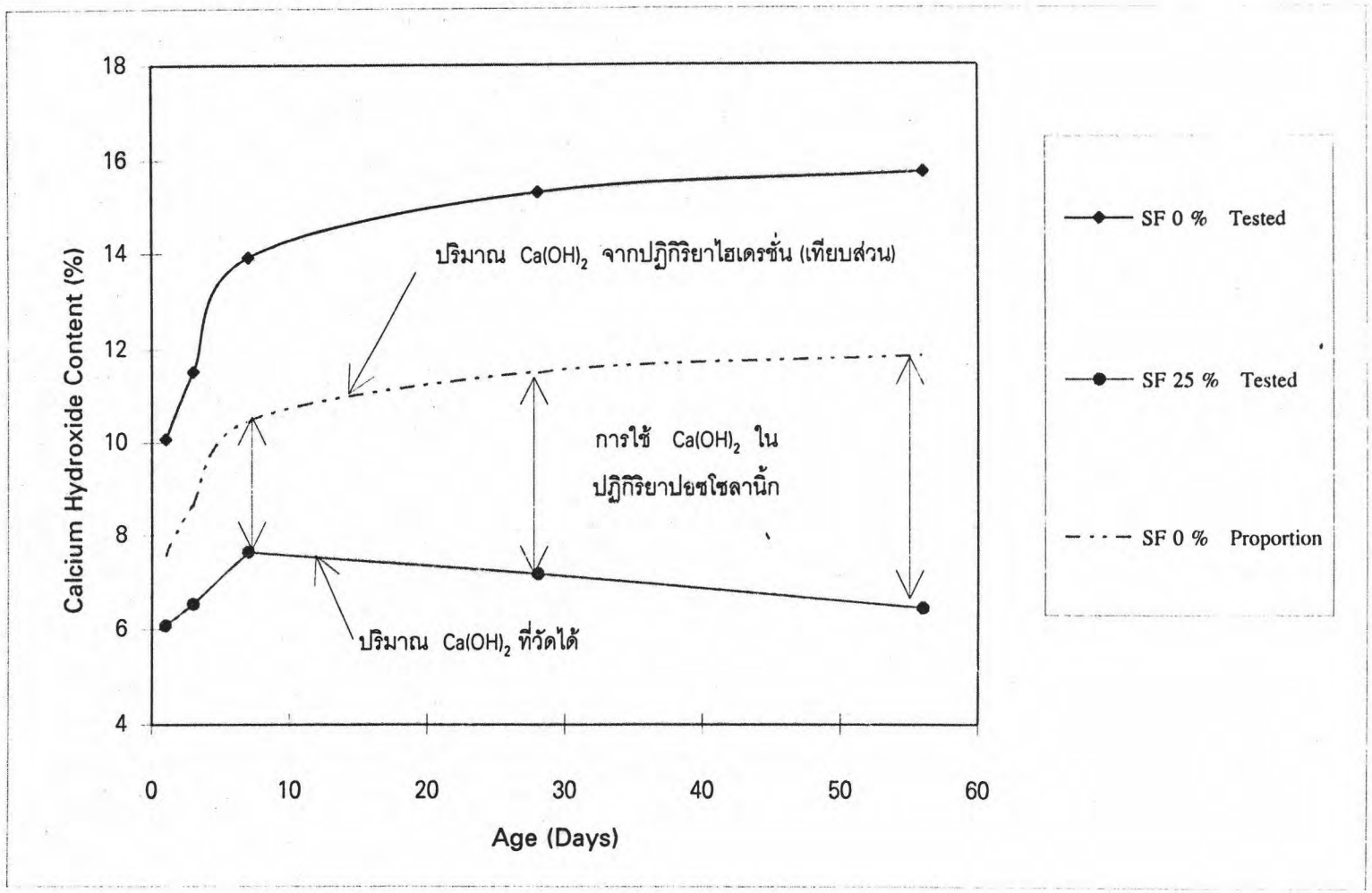
รูปที่ 4.3 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม 10%



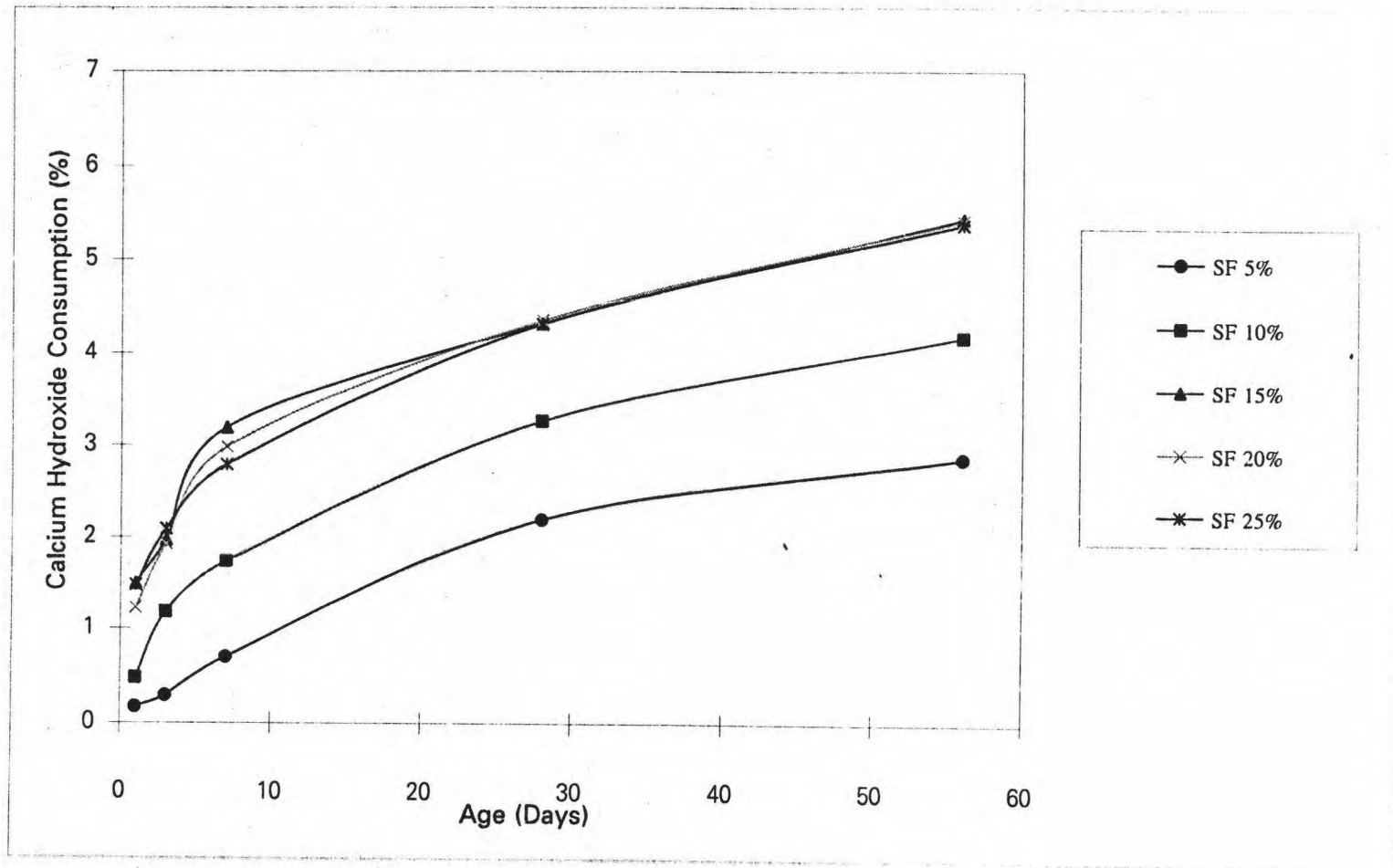
รูปที่ 4.4 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม 15 %



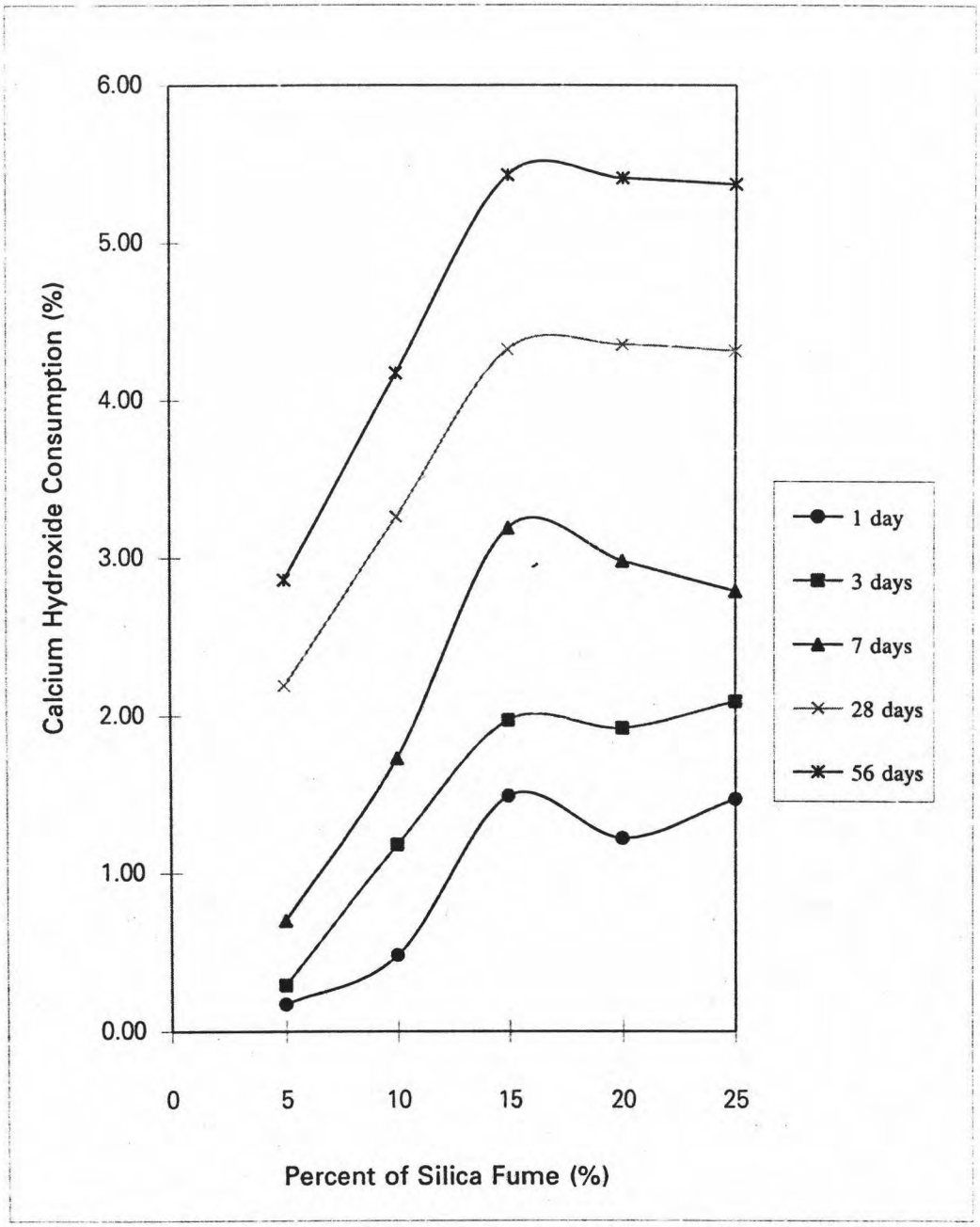
รูปที่ 4.5 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม 20 %



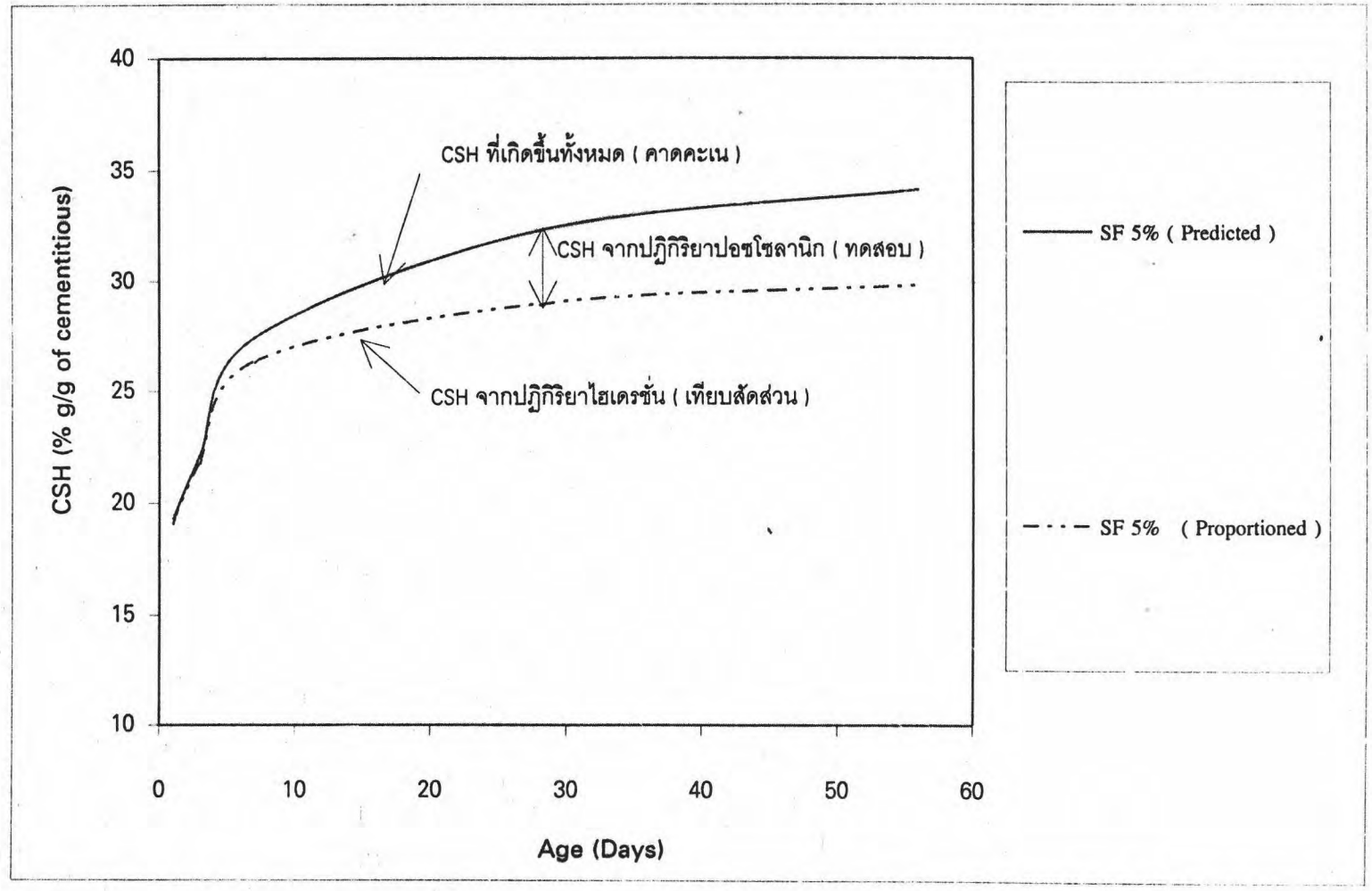
รูปที่ 4.6 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม 25 %



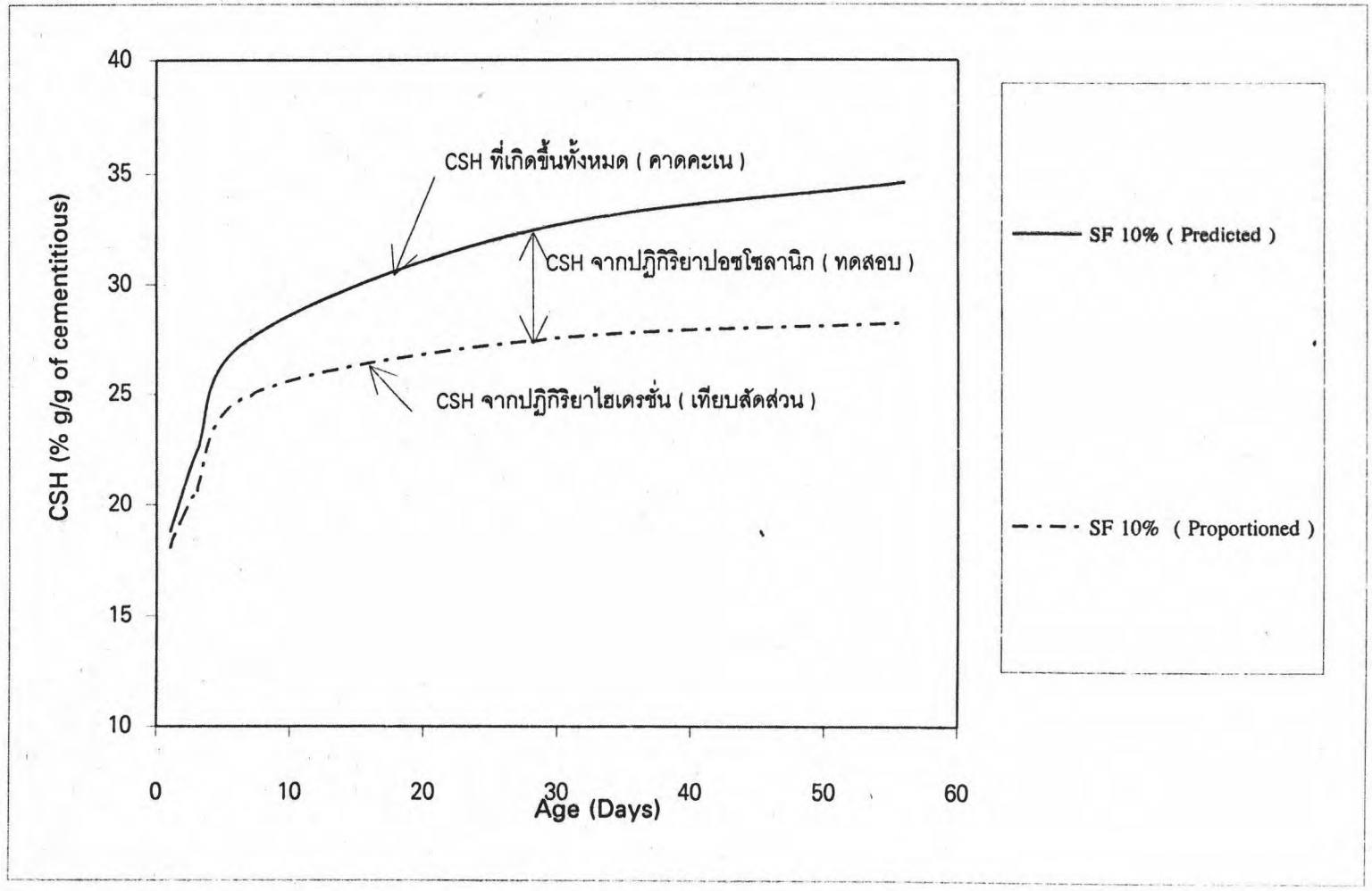
รูปที่ 4.7 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิกตามเวลาและสัดส่วนผสมของซิลิกาฟูม



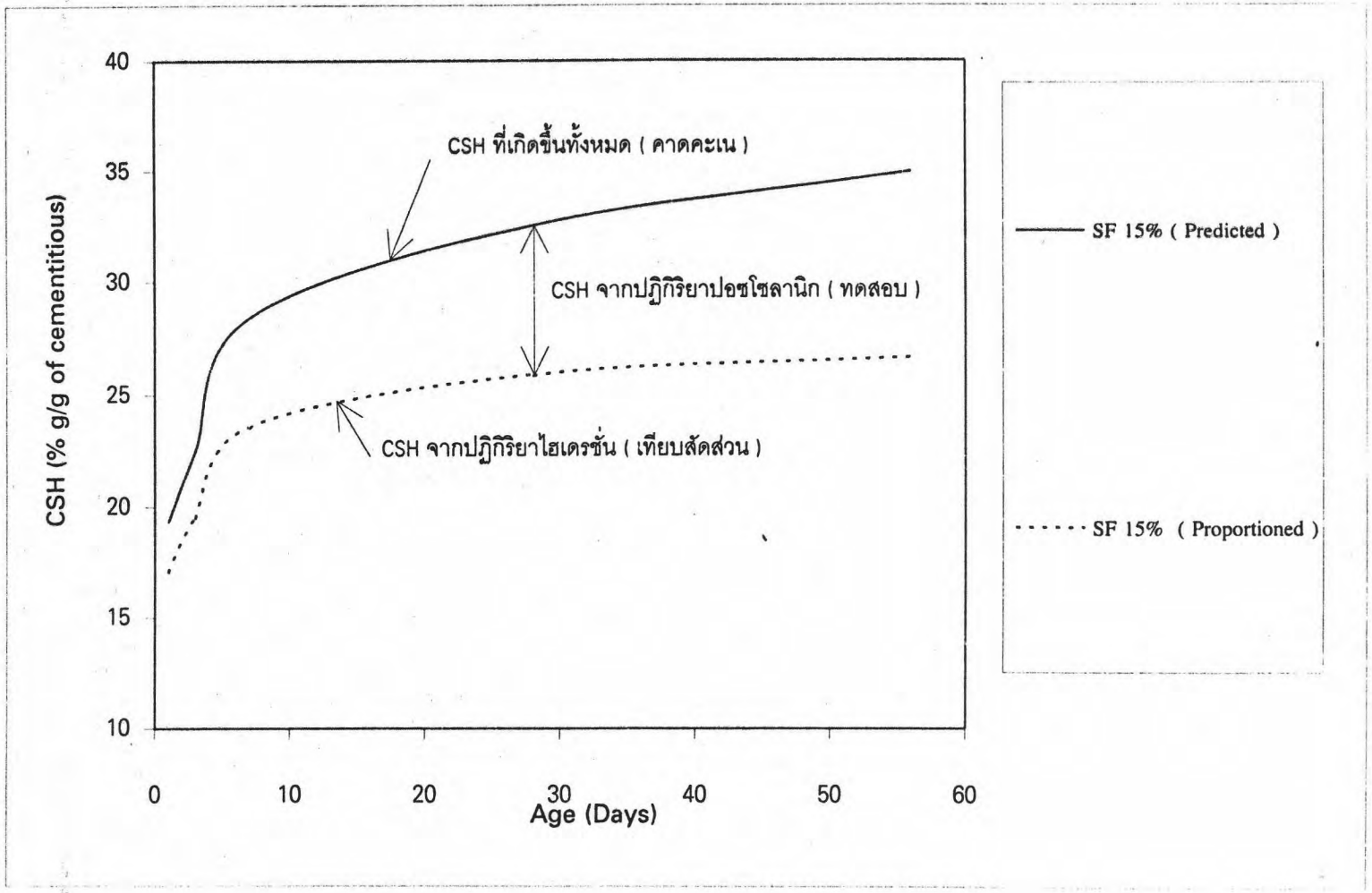
รูปที่ 4.8 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานิกตามปริมาณซิลิกาฟูม



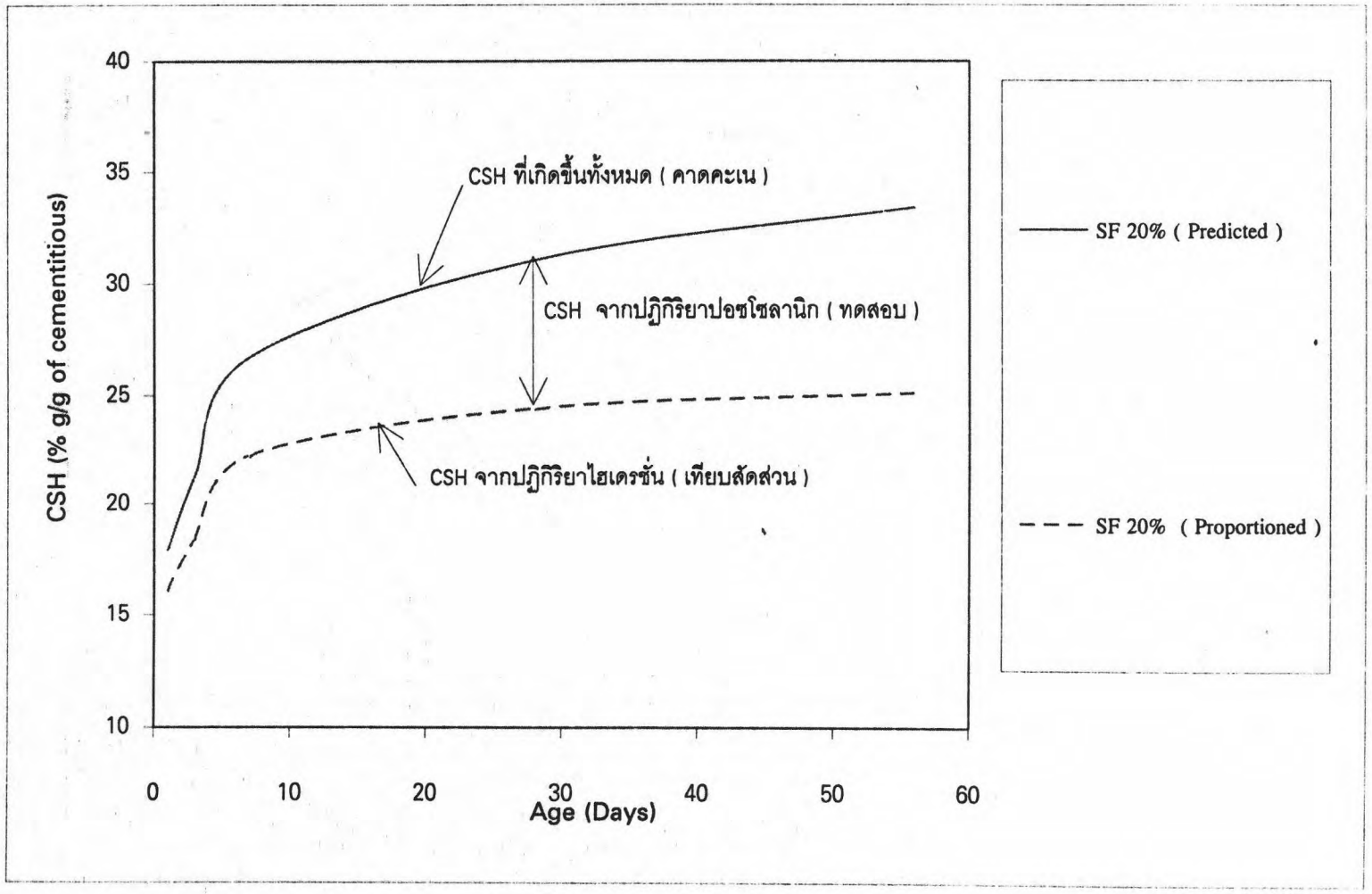
รูปที่ 4.9 ปริมาณ CSH ตามเวลาเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 5 %



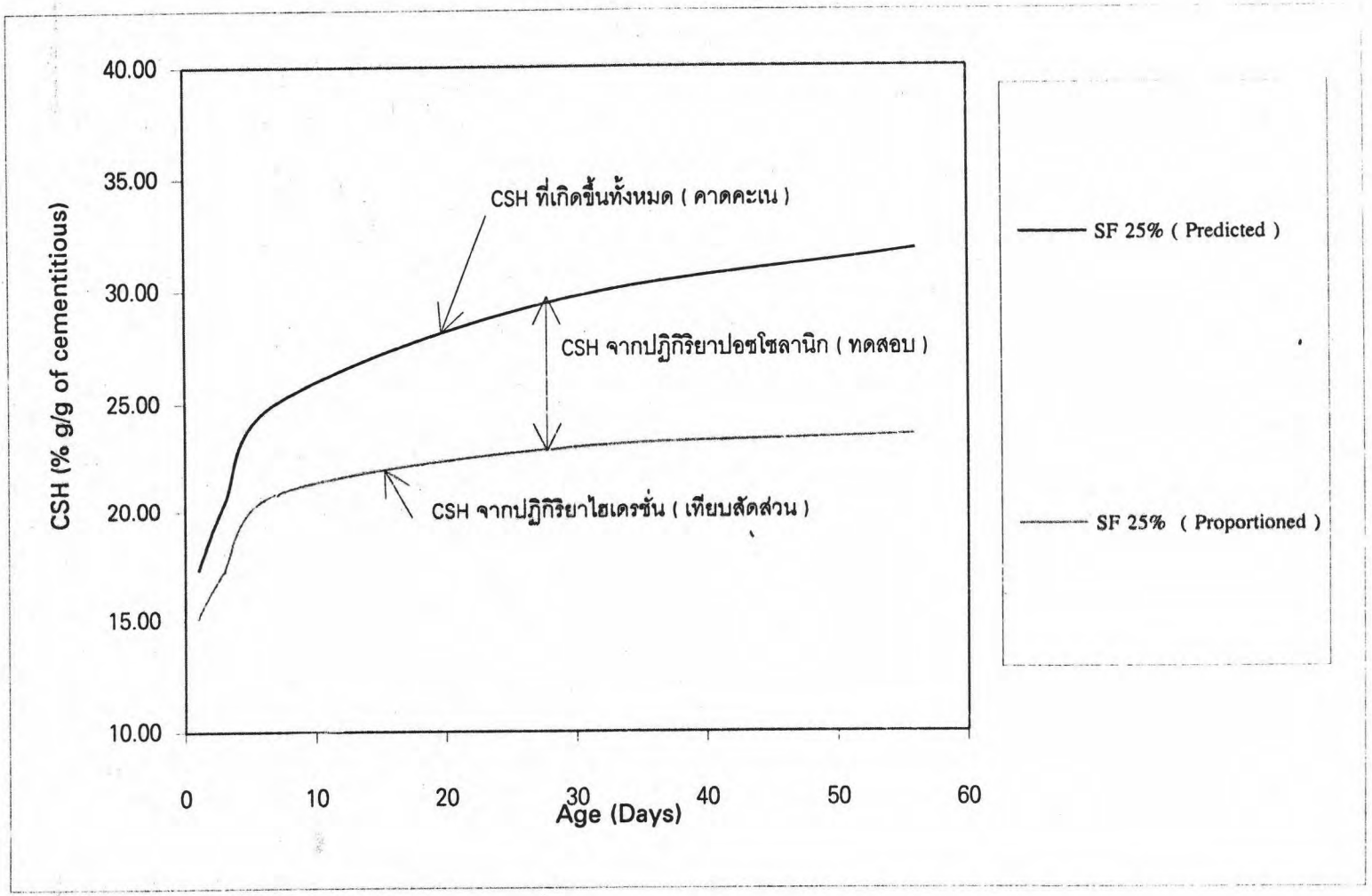
รูปที่ 4.10 ปริมาณ CSH ตามเวลาเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 10 %



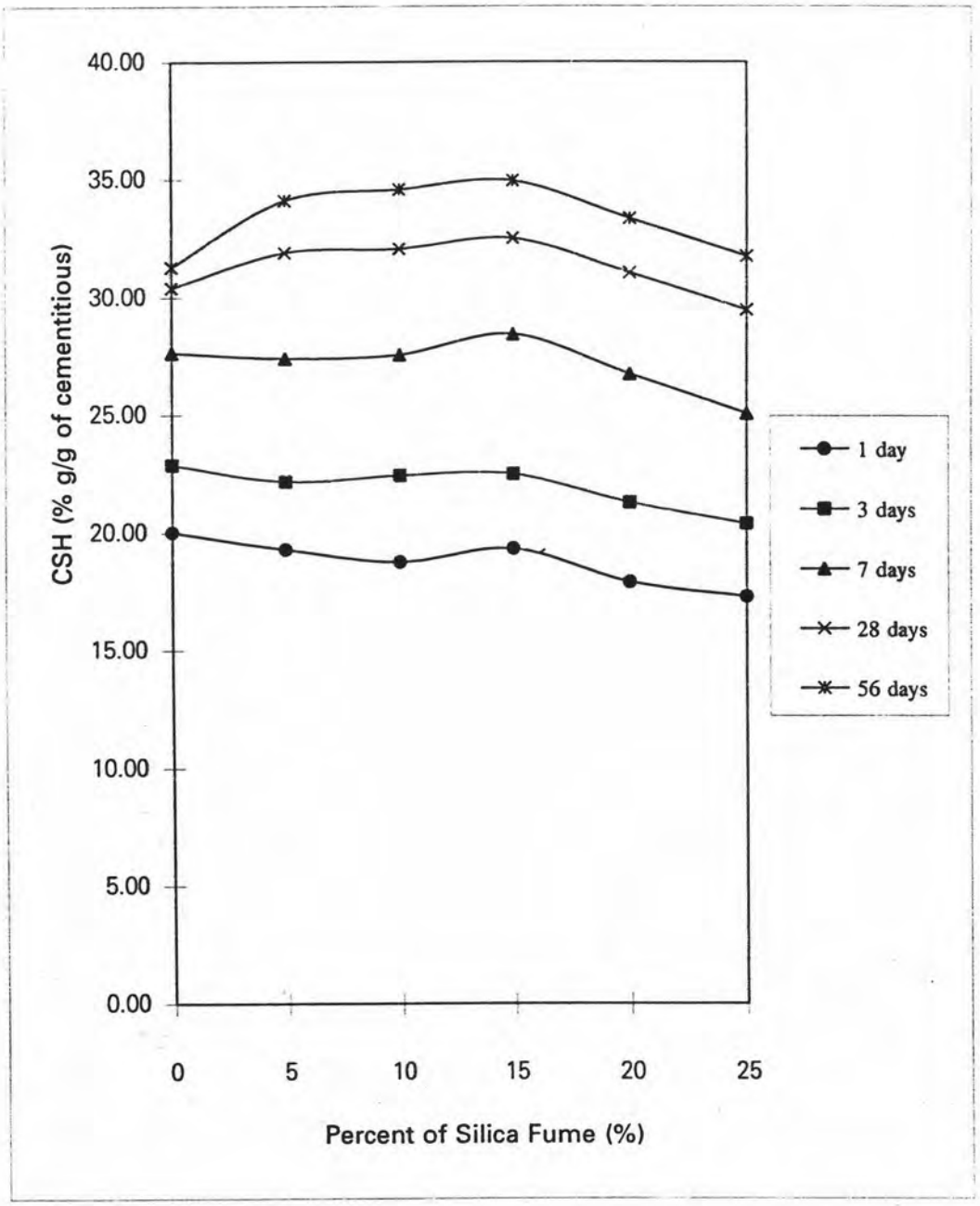
รูปที่ 4.11 ปริมาณ CSH ตามเวลาเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 15 %



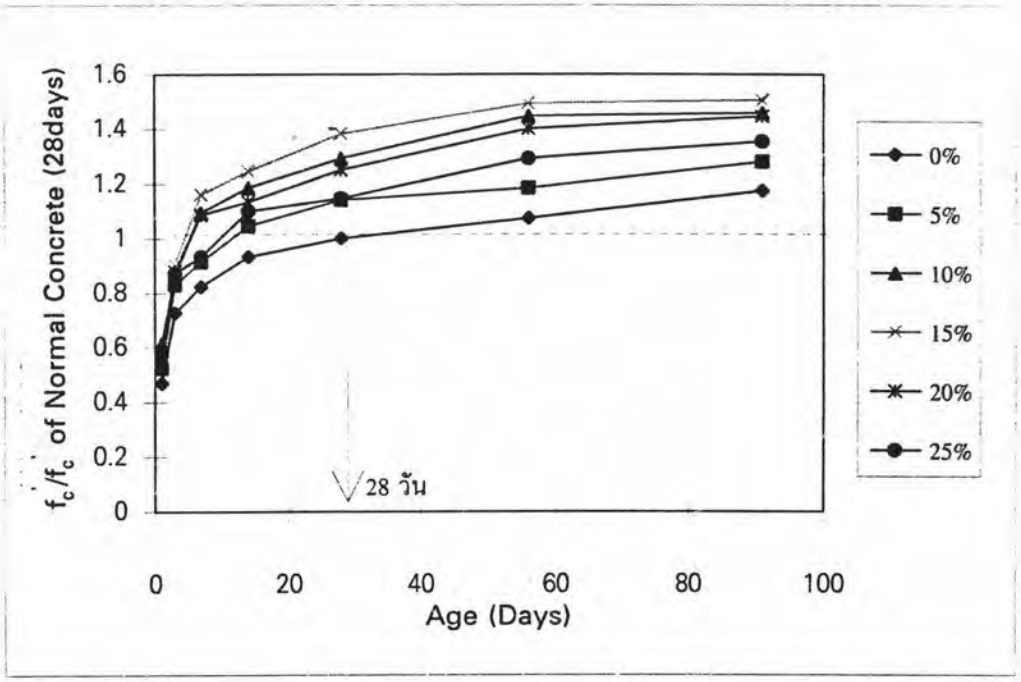
รูปที่ 4.12 ปริมาณ CSH ตามเวลาเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 20 %



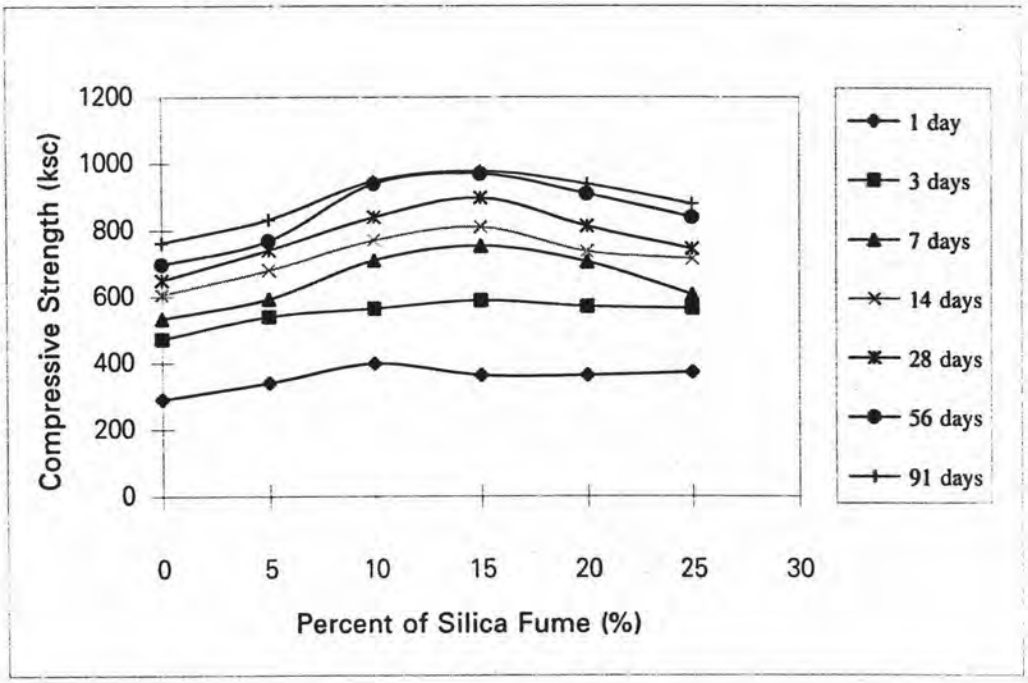
รูปที่ 4.13 ปริมาณ CSH ตามเวลาเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 25 %



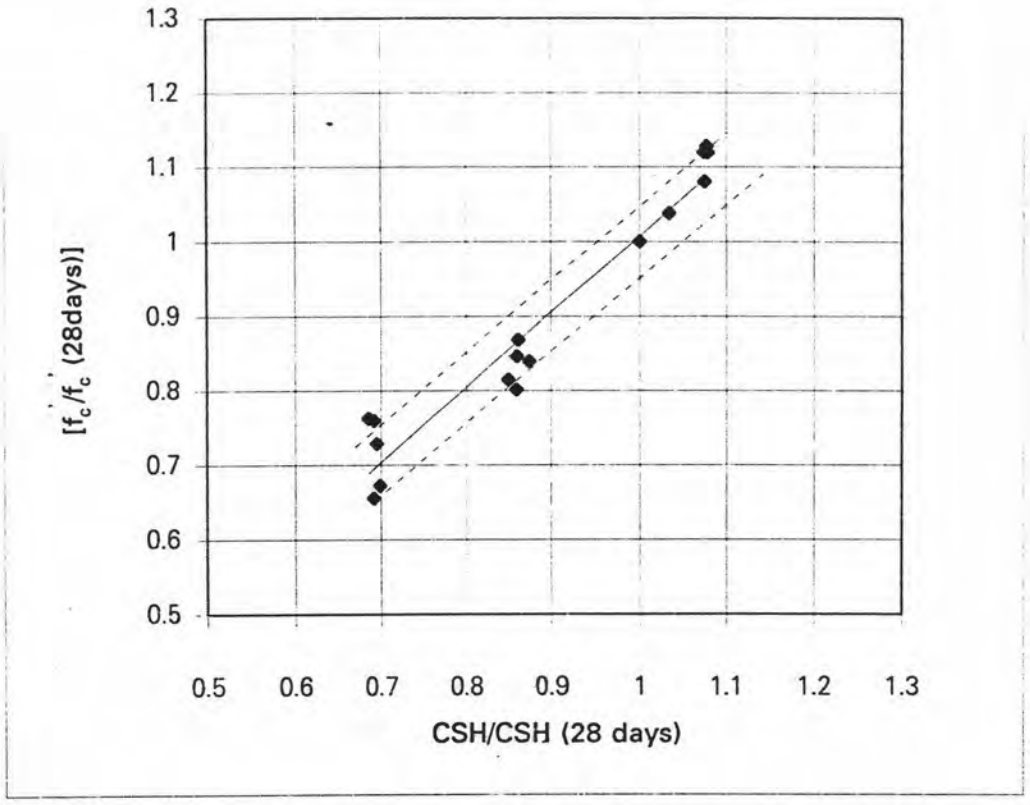
รูปที่ 4.14 ปริมาณของ CSH ตามสัดส่วนของซิลิกาฟูม



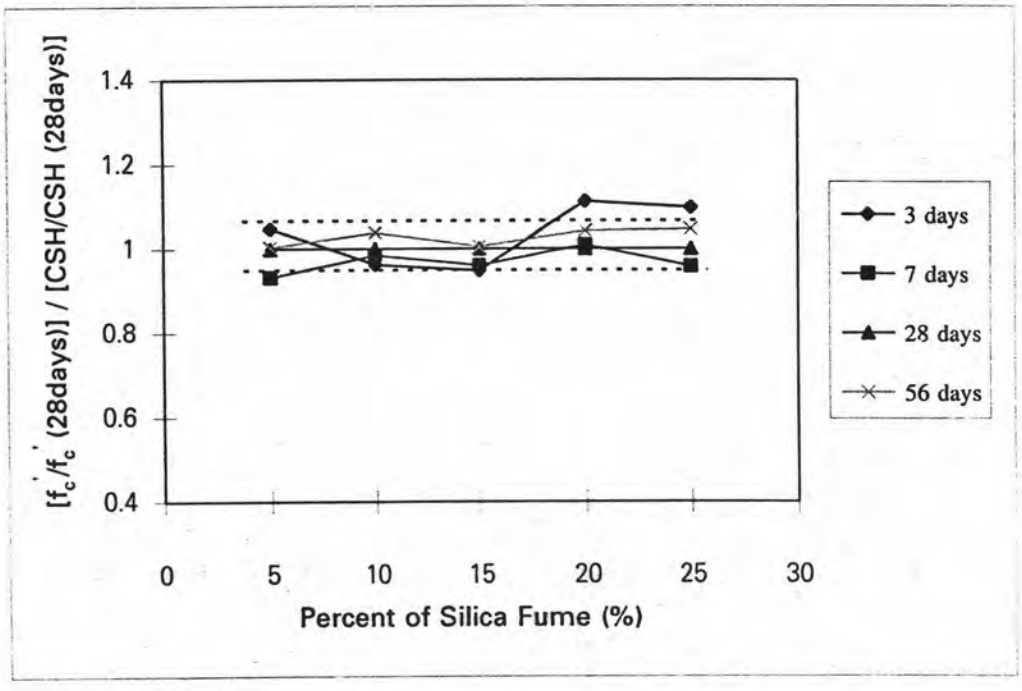
รูปที่ 4.15 อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมเทียบกับคอนกรีตธรรมดา(อายุ 28 วัน)



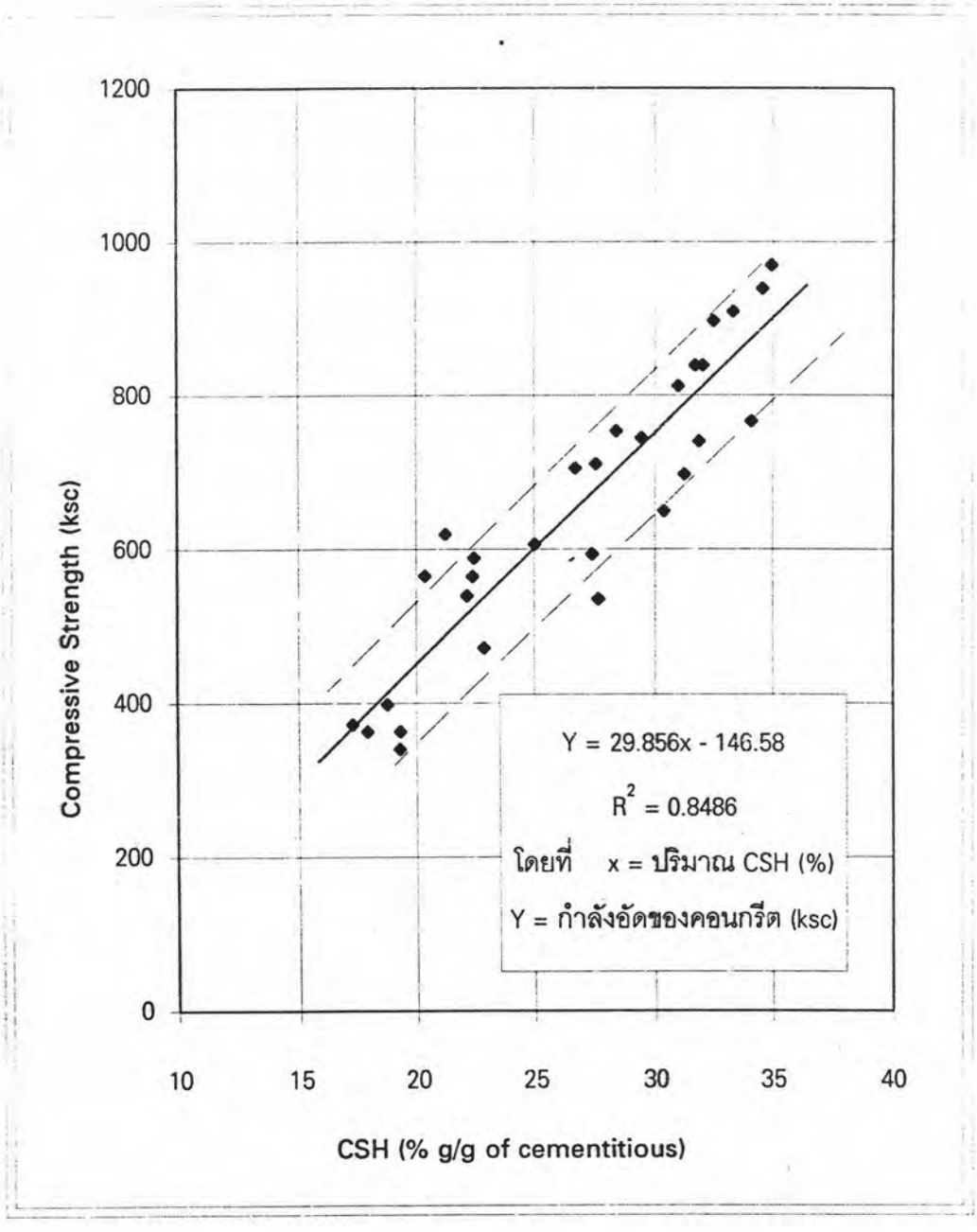
รูปที่ 4.16 ค่ากำลังอัดตามปริมาณซิลิกาฟูมที่ w/(c+sf) = 0.32



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของ [fc'/fc'(28 days)] กับ [CSH/CSH(28 days)]



รูปที่ 4.18 อัตราส่วนของ [fc'/fc'(28 days)] / [CSH/CSH(28 days)] ตามปริมาณซิลิกาฟูม



รูปที่ 4.19 ปริมาณ CSH เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม