# บทที่ 4

## การวิเคราะห์ผลทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย โดยการทดสอบด้วยวิธี Thermogravimetry Analysis, (TGA) แล้วทำการคำนวณหาปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย และทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของคอนกรีตสมรรถนะสูง ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าการยุบตัว, ค่าการไหล, ค่าโมดุลัสความยืดหยุ่น, ความคงตัว และค่าการหดตัว การทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอยในสัดส่วนผสมที่กำหนดไว้

### 4.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีในซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย

เมื่อนำซีเมนต์มาผสมกับน้ำ ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซี่ยมซิลิเกต และปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซี่ยมซิลิเกต เกิดสารแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสารแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตจะเป็นสารที่เพิ่มกำลังของคอนกรีต โดยทำหน้าที่เป็นตัวยึดเหนี่ยวเนื้อคอนกรีต ส่วนแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะเป็นสารที่เหลือ อยู่แทรกในช่องว่างของคอนกรีต ซึ่งจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา แต่เมื่อนำซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยมาผสมกับน้ำ ขี้เถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ ได้สารแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรต ทำให้ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ลดลง แต่ปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตมากขึ้น ส่งผลทำให้กำลังเพิ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ในช่วงอายุเริ่มต้น ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของขี้เถ้าลอยยังเกิดขึ้นน้อย เนื่องมาจากความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำในช่องว่าง ยังไม่สามารถละลาย Glass Phase ของขี้เถ้าลอยได้ หลังจากที่แคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์มีปริมาณมากขึ้น จะละลายในน้ำที่อยู่ในโครงสร้างซีเมนต์เพส ทำให้ความเป็นด่างของน้ำในช่องว่างมีความเข้มข้นมากขึ้นจนสามารถละลาย Glass Phase ของขี้เถ้าลอยได้ ปฏิกิริยาทางเคมีของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น

### 4.2 การหาปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์

ในซีเมนต์เพสปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ซึ่งจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซี่ยมซิลิเกตและปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซี่ยมซิลิเกต แต่ในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของขี้เถ้าลอย โดยแคลเซี่ยมไฮดรอก

ไซด์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และจะลดลงเนื่องจากถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของขี้เถ้าลอย ดังนั้นปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงพร้อม ๆ กัน นอกจากนี้ในขี้เถ้าลอยยังประกอบไปด้วยสารแคลเซี่ยมออกไซด์ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้สารแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์อีกด้วย ดังแสดงในสมการที่ 4.4

จากผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 3.6 และจากรูปที่ 4.3-4.5 พบว่าปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมเป็นหลัก และจะเห็นได้ว่าปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยในอัตราส่วนต่าง ๆ มีแนวโน้มที่จะลดลงในอัตราส่วนเดียวกันกับปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม (ปริมาณ $C_3S$ และ $C_2S$ ในส่วนผสม) จากรูปที่ 4.3 พบว่าแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดสอบ (เส้นทึบ) มีแนวโน้มที่จะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณขี้เถ้าลอยในส่วนผสม โดยปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะลดลงประมาณ 10 % ทุก ๆ การแทนที่ 10 % ของขี้เถ้าลอย ทั้งนี้พบว่าแนวโน้มเกิดขึ้นสำหรับทุกอายุที่ทดสอบ

ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (แคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก $C_3S$ และ $C_2S$) สามารถคำนวณได้จากการเทียบสัดส่วนโดยตรงตามปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม โดยแสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 4.3 ผลต่างระหว่างแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดสอบเทียบกับแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่คำนวณได้เนื่องจากซีเมนต์เพียงอย่างเดียวแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 และจากรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะเห็นได้ว่าปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในอายุเริ่มต้นของซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย จะมีปริมาณที่มากกว่าแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากซีเมนต์เพสธรรมดา ซึ่งปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ส่วนที่เพิ่มขึ้นนี้ จะเกิดขึ้นเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาระหว่างแคลเซี่ยมออกไซด์ในขี้เถ้าลอยกับน้ำ โดยพบว่าที่อายุ 1 วัน แคลเซี่ยมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้สารแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 ของปริมาณเพสทั้งหมด หลังจากนั้นปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะเริ่มลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก จนกระทั่งอายุประมาณ 14 วัน (ดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.5) ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย จะลดลงต่ำกว่าปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นแสดงว่าในช่วงอายุที่มากกว่า 14 วัน ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแคลเซี่ยมออกไซด์ในขี้เถ้าลอย จะมีผลน้อยกว่าปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิก ดังจะเห็นได้ว่าปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย มีค่าน้อยกว่าปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสธรรมดา และมีแนวโน้มที่จะลดลงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.6 พบว่าที่อายุ 1 วัน ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยจะเกิดขึ้นประมาณ 27-34 % เมื่อเทียบกับแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้าลอยในส่วนผสม ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะลดลง 10 % ทุก ๆ การแทนที่ 10 % ของขี้เถ้าลอย และที่อายุ 28 วัน ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยจะเกิดขึ้นประมาณ 31-41 % ของปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเมื่อปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์

และที่อายุ 56 วัน ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นประมาณ 29-39 % เทียบกับแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดเมื่อปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ทั้งนี้เมื่อปริมาณขี้เถ้าลอยในส่วนผสมมีปริมาณมากขึ้น ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะลดลงประมาณ 10 % ทุก ๆ การแทนที่ 10 % ของขี้เถ้าลอย โดยพบว่าแนวโน้มเกิดขึ้นสำหรับทุกอายุที่ทดสอบ

จากรูปที่ 4.6 พบว่าในซีเมนต์เพส ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุเริ่มต้น หลังจากนั้นจะเพิ่มในอัตราที่น้อยลง โดยที่อายุ 56 วัน แคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 3 % เมื่อเทียบกับ 28 วัน แต่เมื่อผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 15 % พบว่าปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงอายุเริ่มต้นเนื่องจากปฏิกิริยาของแคลเซี่ยมออกไซด์ในขี้เถ้าลอยกับน้ำ หลังจากนั้นเมื่ออายุมากกว่า 14 วัน ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะลดลงในอัตราที่มากกว่าแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น และปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะลดลงในอัตราที่มากขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา ซึ่งเป็นการลดลงเนื่องมาจากแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิก ดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.6

ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้โดยตรงจากวิธี TGA เป็นปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเวลานั้น ๆ ซึ่งจะเป็นปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นรวมทั้งที่ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก เรียกปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ส่วนนี้ว่า "ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้" ซึ่งสามารถหาปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้จากการทดสอบ TGA ในซีเมนต์เพสธรรมดา และสามารถคำนวณหาแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยได้ โดยการเทียบสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสม แต่เนื่องจากขี้เถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ลดลง เรียกปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซ์ที่ลดลงนี้ว่า "ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก. (Percent Consumption of Calcium Hydroxide)" สามารถคำนวณหาได้จากการเปรียบเทียบปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากซีเมนต์เพสธรรมดากับซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย ดังแสดงในสมการที่ 4.1

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

เมื่อ

P = ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิก (%)

R = ปริมาณแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอย โดยน้ำหนัก (%)

H = ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้จากคอนกรีตธรรมดา (%)

F = ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้จากคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย (%)

ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย จะมีค่าน้อยกว่าแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสธรรมดา เนื่องมาจากแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยจะถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิก จากตารางที่ 4.4 พบว่าที่อายุ 28 วัน แคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยจะมีค่าน้อยกว่าซีเมนต์เพสธรรมดาประมาณ 0.6-0.8 % ของปริมาณเพสทั้งหมด และที่อายุ 56 วัน แคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยจะมีค่าน้อยกว่าซีเมนต์เพสธรรมดาประมาณ 1.38-1.56 % โดยมีแนวโน้มที่จะลดลงในอัตราที่ใกล้เคียงกันในทุก ๆ สัดส่วนผสม จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่ออายุเพิ่มขึ้นปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Calcium Hydroxide Consumption, %) จะแปรผันเป็นสัดส่วนยกกำลังตามเวลา แต่เมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้าลอยในส่วนผสม ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณขี้เถ้าลอย โดยจะลดลงประมาณ 10 % ทุก ๆ การแทนที่ 10 % ของขี้เถ้าลอย และจากรูปที่ 4.4-4.5 พบว่าปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์จะเริ่มลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกเมื่อซีเมนต์เพสมีอายุประมาณ 14-20 วัน

แคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสมีผลต่อความทนทานของคอนกรีตทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับไอออนต่าง ๆ เช่น ซัลเฟตไอออน หรือคลอไรด์ไอออน ที่มีอยู่ในน้ำใต้ดิน, น้ำเสีย หรือน้ำทะเล จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์กับไอออนเหล่านั้น เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซี่ยมกับไอออนต่าง ๆ เช่น แคลเซี่ยมซัลเฟต ซึ่งแคลเซี่ยมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซี่ยมอลูมิโนโมโนซัลเฟต และไตรแคลเซี่ยมอลูมิเนต ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นผลึกแทรกในช่องว่างของคอนกรีตและก่อให้เกิดแรงดันในเนื้อคอนกรีตเนื่องมาจากการขยายตัวของปริมาตร ส่งผลทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว และทำให้สารต่าง ๆ สามารถซึมผ่านเข้าไปทำลายเนื้อคอนกรีตได้ นอกจากนี้แคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ยังทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดสอบและวิเคราะห์พบว่าเมื่อมีความชื้นจะเกิดกรดคาร์บอนิก (Carbonic Acid) ได้สารแคลเซี่ยมคาร์บอเนต ตามพฤติกรรมของการเกิดคาร์บอเนชั่นในคอนกรีต ทำให้เกิดการหดตัวภายใน (Carbonic Shrinkage) และก่อให้คุณสมบัติของคอนกรีตเสื่อมสภาพลง เมื่อผสมขี้เถ้าลอยในคอนกรีต ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตจะลดลงจากการใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิก ดังนั้นคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจึงมีความทนทานมากกว่าคอนกรีตธรรมดา

### 4.3 การหาปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)

การคำนวณหาปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย Rison[26] ได้เสนอวิธีคำนวณและข้อสมมุติฐานในการคำนวณหาปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 จะประกอบไปด้วยไตรแคลเซี่ยมซิลิเกตปริมาณ 52 % และไดแคลเซี่ยมซิลิเกตปริมาณ 20 % ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์จะเกิดเนื่องจากสาร 2 ชนิดนี้ตามสัดส่วน

2. สารที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ จะประกอบไปด้วยแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์, ($Ca(OH)_2$) และแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรต,(CSH) ซึ่งสามารถคำนวณน้ำหนักโมเลกุลจากสมการเคมีคือ $3CaO.2SiO_2.3H_2O$

3. สารประกอบในขี้เถ้าลอยที่ทำปฏิกิริยาเคมีกับซีเมนต์ได้สารแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ เกิดจากสารซิลิกอนไดออกไซด์, ($SiO_2$) และแคลเซี่ยมออกไซด์, ($CaO$) เท่านั้น

4. ในการคำนวณหาแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้น จะไม่รวมผลที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของอลูมิโน-ซิลิเกต ของแคลเซี่ยมอลูมิเนตไฮเดรต, (CAH) ในขี้เถ้าลอย

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซี่ยมซิลิเกต, ($C_3S$) และไดแคลเซี่ยมซิลิเกต, ($C_2S$) ดังสมการ

$$2[3CaO.SiO_2] + 6H_2O \text{ ------> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad 4.2$$

$$2[2CaO.SiO_2] + 4H_2O \text{ ------> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \qquad 4.3$$

โดยที่สารต่าง ๆ มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight, MW) คำนวณได้ดังรายละเอียดในภาคผนวก โดยให้ผลคือ

| | |
|---|---|
| $3CaO.2SiO_2.3H_2O$ | 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 |

จากสมการที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C-150 จำนวน 100 กก. จะมีปริมาณสารไตรแคลเซี่ยมซิลิเกต 52 กก. จากการคำนวณจะต้องใช้ปริมาณน้ำ = (52x108)/456 = 12.3 กก. เพื่อทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซี่ยมซิลิเกตอย่างสมบูรณ์และได้สารแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตปริมาณ = (52x342)/456 = 39 กก. และสารแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ = (52x222)/456 = 25.3 กก. ในการคำนวณปฏิกิริยาของไดแคลเซี่ยมซิลิเกตพบว่าต้องใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 4.2 กก. และได้สารแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรต 19.9 กก. และแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ 4.3 กก.

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 100 กก. จะต้องใช้ปริมาณน้ำ 16.5 กก. เพื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างสมบูรณ์ และได้ปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรต 58.9 กก. และแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ 29.6 กก.

เมื่อผสมขี้เถ้าลอยในปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเป็นไปดังสมการที่ 4.4 และสมการที่ 4.5 ดังนี้

$$CaO + H_2O \text{ ------> } Ca(OH)_2 \qquad 4.4$$

$$2SiO_2 + 3Ca(OH)_2 \text{ ------> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O \qquad 4.5$$

โดยที่น้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบในขี้เถ้าลอยมีค่าดังนี้
CaO มี MW. = 56
$SiO_2$ มี MW. = 60

เมื่อผสมขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ 15 % ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะเหลือ 85 กก. ดังนั้นจึงมีปริมาณของ $C_3S$ เหลือเพียง 0.85x52 = 44.2 กก. และ $C_2S$ จะมีปริมาณ 0.85x20 = 17 กก. จากการคำนวณเทียบสัดส่วนของซีเมนต์ที่ไม่ได้แทนที่ด้วยขี้เถ้าลอยพบว่าที่อายุ 1 วัน จะมีปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดเนื่องจาก $C_3S$ เท่ากับ (21.518/(21.518+3.656)) x 8.56 = 7.317 กก. และมีปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจาก $C_2S$ เท่ากับ (3.656/(21.518+3.656)) x 8.56 = 1.243 กก. จากการคำนวณพบว่าจะมีปริมาณของแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดเนื่องจาก $C_3S$ = 11.272 กก. และเนื่องจาก $C_2S$ = 5.745 กก.

ผลการทดสอบพบว่าแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของแคลเซี่ยมออกไซด์ (CaO) เมื่ออายุ 1 วัน มีค่าเท่ากับ 10.181- (0.85*10.066) = 1.625 กก. โดยเทียบจากผลการทดสอบ และสามารถคำนวณหาปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกต-ไฮเดรต ที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เท่ากับ 1.625*342/222 = 2.503 กก. ดังนั้นปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตทั้งหมดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.272 + 5.745 + 2.503 = 19.52 กก. ต่อปริมาณซีเมนต์ 85 กก. และปริมาณขี้เถ้าลอย 15 กก. ดังแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.1

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้าลอยในส่วนผสม ปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกต-ไฮเดรตจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงตามปริมาณขี้เถ้าลอยในส่วนผสม โดยมีแนวโน้มที่จะลดลงในอัตราส่วนเดียวกันกับปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพส นั่นคือแคลเซี่ยมซิลิเกต-ไฮเดรตจะลดลงประมาณ 10 % ทุก ๆ การแทนที่ 10 % ของปริมาณขี้เถ้าลอย ทั้งนี้พบว่าแนวโน้มเกิดขึ้นทุกอายุที่ทดสอบ

และจากรูปที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตในซีเมนต์เพสธรรมดากับซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย พบว่าซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 15 % ปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของขี้เถ้าลอย โดยที่อายุเริ่มต้นจนกระทั่ง 28 วัน ซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยจะมีปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตมากกว่าซีเมนต์เพสธรรมดาประมาณ 5 % แต่ที่อายุ 56 วัน จะมีปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตมากกว่าซีเมนต์เพสธรรมดาประมาณ 10 % แสดงว่าเมื่อผสมขี้เถ้าลอยในซีเมนต์เพส จะทำให้แคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตพัฒนาในระยะยาวอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่งผลทำให้การพัฒนากำลังอัดระยะยาวของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

**4.4 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตตามปริมาณ CSH**

ปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีในคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย สำหรับคอนกรีตจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตจะเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพียงอย่างเดียว ส่วนคอนกรีตจากซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย ปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตจะเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิก ดังนั้นถ้าเปรียบเทียบคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์ที่เท่ากัน คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย จะมีปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตมากกว่า และเริ่มจะมีผลชัดเจนจนกว่าอายุถึง 28 วัน กล่าวคือ คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 5 % ที่อายุ 28 วัน แต่ที่อายุ 56 วัน คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกต-ไฮเดรตมากกว่าประมาณ 10 % แสดงว่าคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยมีการพัฒนาของแคลเซี่ยม-ซิลิเกตไฮเดรตในระยะยาว ส่งผลทำให้กำลังอัดในระยะยาวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา แต่สำหรับการผสมขี้เถ้าลอยโดยการแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณขี้เถ้าลอยในส่วนผสม โดยจะลดลง 10 % ทุก ๆ การแทนที่ 10 % ของปริมาณขี้เถ้าลอย ดังแสดงในรูปที่ 4.8

คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีการพัฒนากำลังอัดในระยะยาว เนื่องมาจากในระยะแรก (1-14 วัน) ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์และแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นน้อย แสดงว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากปริมาณซีเมนต์ลดลงด้วยการแทนที่และปฏิกิริยาปอซ-โซลานิกของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยยังเกิดขึ้นน้อย ส่งผลทำให้การพัฒนากำลังอัดเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ แต่ด้วยระยะยาว ขี้เถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ ได้สารแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรต ทำให้ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ลดลง แต่ปริมาณแคลเซี่ยมซิลิ-เกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น โดยเมื่อปริมาณผสมขี้เถ้าลอยเท่ากับ 15 % จะมีปริมาณแคลเซี่ยมไฮ-ดรอกไซด์ที่ 28 วัน ลดลงน้อยกว่าที่ 1 วัน ประมาณ 16 % และมีปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอก-ไซด์ที่ 56 วัน น้อยกว่าที่ 28 วัน ประมาณ 4 % แสดงว่าปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและจะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.10 และแสดงว่าคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยมีกำลังอัดดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมขี้เถ้าลอย

จากรูปที่ 4.11-4.13 พบว่าเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอยในปริมาณมากขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงอันเนื่องมาจากปริมาณซีเมนต์ที่ใช้น้อยลง ส่งผลทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แท้จริงมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตลดลง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจึงมีค่าลดลงและกำลังรับแรงอัดจะลดลงในอัตราส่วนเดียวกันกับปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตที่ลดลง นั่นคือกำลังอัดจะลดลงประมาณ 10 % ทุก ๆ การแทนที่ 10 % ของขี้เถ้าลอย

ปริมาณขี้เถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับกำลังอัด มีปริมาณเท่ากับ 15 % เนื่องจากมีแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตในคอนกรีตมากที่สุดทุกช่วงอายุของคอนกรีต โดยปริมาณขี้เถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับกำลังอัดในช่วงอายุเริ่มต้นจะมีปริมาณเท่ากับ 15-25 % ซึ่งจะมีกำลังอัดที่ 1 วัน มากกว่า 300 ksc. ทั้งนี้คอนกรีตจะต้องมีอัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดระหว่าง 0.26-0.32 และต้องใช้น้ำยาลดน้ำปริมาณสูงผสมในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่มีอายุ 28 วัน ปริมาณขี้เถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตควรมีค่าเท่ากับ 15-25 % โดยคอนกรีตที่ได้จะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 15 % ของคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตที่ได้จะมีกำลังอัดมากกว่า 700 ksc. ที่อายุ 28 วัน ส่วนคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 30-35 % จะมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 80-85 % ของกำลังคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตในระยะยาว ปริมาณขี้เถ้าลอยที่ใช้ผสมในคอนกรีตควรมีปริมาณ 15-20 % โดยคอนกรีตที่ได้จะมีกำลังอัดที่ 91 วัน มากกว่ากำลังอัดที่ 28 วัน ประมาณ 10 % และคอนกรีตที่ได้จะมีกำลังอัดมากกว่า 800 ksc. ทั้งนี้จะต้องควบคุมอัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.26-0.32 และใช้น้ำยาลดน้ำปริมาณสูงผสมในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.14-4.16

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่อายุต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.17-4.21 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ คอนกรีตธรรมดาจะมีอัตราการลดลงของกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย หรืออาจกล่าวได้ว่าในส่วนผสมคอนกรีตที่มีปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีอัตราการลดลงของกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมขี้เถ้าลอย

## 4.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง

### ความสามารถทำงานได้ (Workability)

จากการทดสอบพบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอยจะสามารถปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต โดยเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้าลอย ค่าการยุบตัวและค่าการไหลของคอนกรีตจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณลักษณะของอนุภาคขี้เถ้าลอย ที่มีลักษณะกลม มน ซึ่งในช่วงอายุเริ่มต้นปฏิกิริยาเคมีของขี้เถ้าลอยยังไม่เกิดเนื่องจากความเป็นด่างในเพสยังไม่เข้มข้นพอที่จะละลาย Glass Phase ของขี้เถ้าลอยได้ นั่นคือขี้เถ้าลอยยังคงลักษณะกลม มน ไม่แตกตัว และการผสมขี้เถ้าลอยโดยการแทนที่ซีเมนต์เป็นการลดปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ในคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะเกิดน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา ทำให้เนื้อเพสมีความลื่นไหลที่ดี ส่งผลทำให้ความสามารถในการทำงานได้

ของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยดีขึ้นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.22-4.23 ซึ่งพบว่าการยุบตัวจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณขี้เถ้าลอยที่ผสมในอัตราที่ใกล้เคียงกันแม้ว่าสัดส่วนของน้ำต่ออนุภาคละเอียด (W/(C+FA)) จะแตกต่างกัน ส่วนค่าการไหลของคอนกรีตจะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณขี้เถ้าลอย โดยที่สัดส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดที่ 0.26 จะทำให้ค่าการไหลน้อยกว่า 50 ซม. แต่ที่สัดส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดที่ 0.29 และ 0.32 จะให้ค่าการไหลเกินกว่า 50 ซม. และมีอัตราเพิ่มขึ้นตามปริมาณขี้เถ้าลอยที่เพิ่มมากขึ้น หากจะพิจารณาถึงค่าการยุบตัวเกินกว่า 20 ซม. และการไหลเกินกว่า 50 ซม. จะต้องมีสัดส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเกินกว่า 0.26 แต่ถ้าจะใช้สัดส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียด 0.26 จะต้องมีส่วนผสมของขี้เถ้าลอยมากกว่า 25 % ของปริมาณซีเมนต์

**ค่าความคงตัว (Soundness)**

ค่าความคงตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีอบไอน้ำด้วยเครื่องอบไอน้ำ Autoclave มีค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอย โดยจะมีค่าเพิ่มอย่างมากเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอยในปริมาณมากกว่า 25 % ดังนั้นจึงควรผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณที่น้อยกว่า 25 % ถ้าต้องการควบคุมค่าความคงตัวให้มีค่าน้อย และเนื่องจาก Free Lime, ($CaO_{free}$) ในขี้เถ้าลอยมีปริมาณน้อย ดังนั้นทุกค่าการแทนที่ยังคงมีความคงตัวตามมาตรฐาน ASTM C 151-77 นั่นคือมีค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวเมื่อเทียบกับความยาวเริ่มต้นน้อยกว่า 0.8 % ดังแสดงในรูปที่ 4.24

**ค่าการหดตัว (Shrinkage)**

จากผลการทดสอบค่าการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำ (Shrinkage) ของมอร์ต้าผสมขี้เถ้าลอย พบว่ามอร์ต้าผสมขี้เถ้าลอยจะมีการหดตัวมากกว่ามอร์ต้าธรรมดา เนื่องมาจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอย จะเป็นการเพิ่มอนุภาคละเอียดในเพส และขี้เถ้าลอยในมอร์ต้าจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้เนื้อมอร์ต้าแน่นขึ้น ส่งผลทำให้ปริมาณเพสต่อปริมาตรทั้งหมดของมอร์ต้าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นมอร์ต้าผสมขี้เถ้าลอยจึงมีการหดตัวมากกว่ามอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมขี้เถ้าลอย โดยมอร์ต้าผสมขี้เถ้าลอยจะมีค่าการหดตัวมากกว่ามอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมขี้เถ้าลอยประมาณ 2-10 % และเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้าลอย การหดตัวจะเพิ่มขึ้นประมาณ 4 % ทุก ๆ การแทนที่ 10 % ของขี้เถ้าลอยที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และการหดตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อมอร์ต้ามีอายุน้อยกว่า 7 วัน หลังจากนั้นจนถึงอายุ 28 วัน ค่าการหดตัวจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย โดยจะมีค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 5 %

**ค่าโมดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)**

ค่าโมดุลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตในคอนกรีต ซึ่งจะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังอัดของคอนกรีต เนื่องจากเมื่อผสมขี้เถ้าลอยในคอนกรีตจะเป็นการเพิ่มมวลละเอียด อีกทั้งขี้เถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้คอนกรีตมีปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดเหนี่ยว

เนื้อคอนกรีต ส่งผลทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น และทำให้ความสามารถรับแรงอัดมีค่ามากขึ้น นั่นคือเมื่อต้องการให้คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยมีค่าความเครียด (Strain) เท่ากับคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะต้องใช้ความเค้น (Stress) ที่มากกว่า และจากการทดสอบค่าโมดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของชนานนท์[29] และมีค่ามากกว่าค่าโมดุลัสความยืดหยุ่นที่ได้จากการคำนวณตามสมการของ ACI Committee 363 ประมาณ 35-40 % ดังแสดงในรูปที่ 4.26

ตารางที่ 4.1 ปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย

| % Fly Ash | CSH (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 Day | 3 Days | 7 Days | 28 Days | 56 Days |
| FA 0% | 20.020 | 22.883 | 27.654 | 30.398 | 31.272 |
| FA 15% | 19.520 | 21.830 | 24.761 | 27.070 | 28.983 |
| FA 20% | 18.929 | - | - | 25.537 | 27.338 |
| FA 25% | 17.797 | - | - | 23.944 | 25.670 |
| FA 30% | 16.666 | - | - | 22.361 | 24.069 |
| FA 35% | 15.549 | - | - | 20.820 | 22.467 |

หมายเหตุ คำนวณจากปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี TGA

ตารางที่ 4.2 ปริมาณ Ca(OH)2 และ CSH ที่ได้จากการคำนวณเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

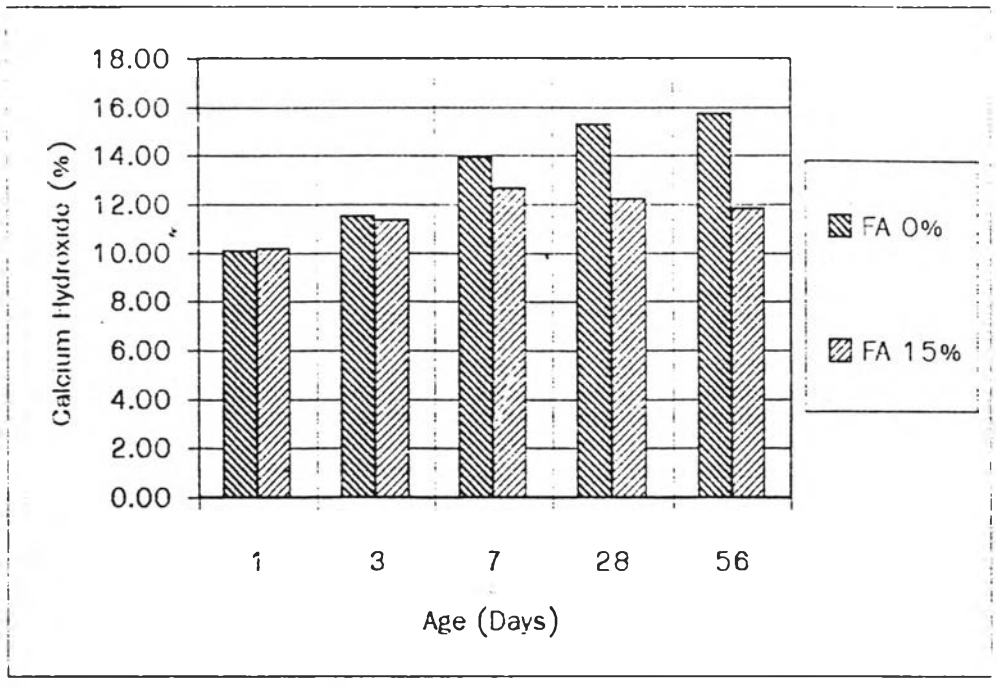
| % Fly Ash | Cement | | FA | | Ca(OH)2 (%) | | | | CSH (%) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C3S(%) | C2S(%) | CaO(%) | SIO2(%) | C3S | C2S | CaO | Total. | C3S | C2S | SIO2 | Total. |
| FA 0 % | 52.00 | 20.00 | - | - | 25.32 | 4.30 | - | 29.62 | 39.00 | 19.88 | - | 58.88 |
| FA 15 % | 44.20 | 17.00 | 3.30 | 5.10 | 21.52 | 3.66 | 4.36 | 29.54 | 33.15 | 16.90 | 14.535 | 64.59 |
| FA 20 % | 41.60 | 16.00 | 4.40 | 6.80 | 20.25 | 3.44 | 5.81 | 29.51 | 31.20 | 15.91 | 19.38 | 66.49 |
| FA 25 % | 39.00 | 15.00 | 5.50 | 8.50 | 18.99 | 3.23 | 7.27 | 29.48 | 29.25 | 14.91 | 24.225 | 68.39 |
| FA 30 % | 36.40 | 14.00 | 6.60 | 10.20 | 17.72 | 3.01 | 8.72 | 29.45 | 27.30 | 13.92 | 29.07 | 70.29 |
| FA 35 % | 33.80 | 13.00 | 7.70 | 11.90 | 16.46 | 2.80 | 10.18 | 29.43 | 25.35 | 12.92 | 33.915 | 72.19 |

ตารางที่ 4.3 ปริมาณ Ca(OH)2 และ CSH ที่เกิดขึ้น (เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์)

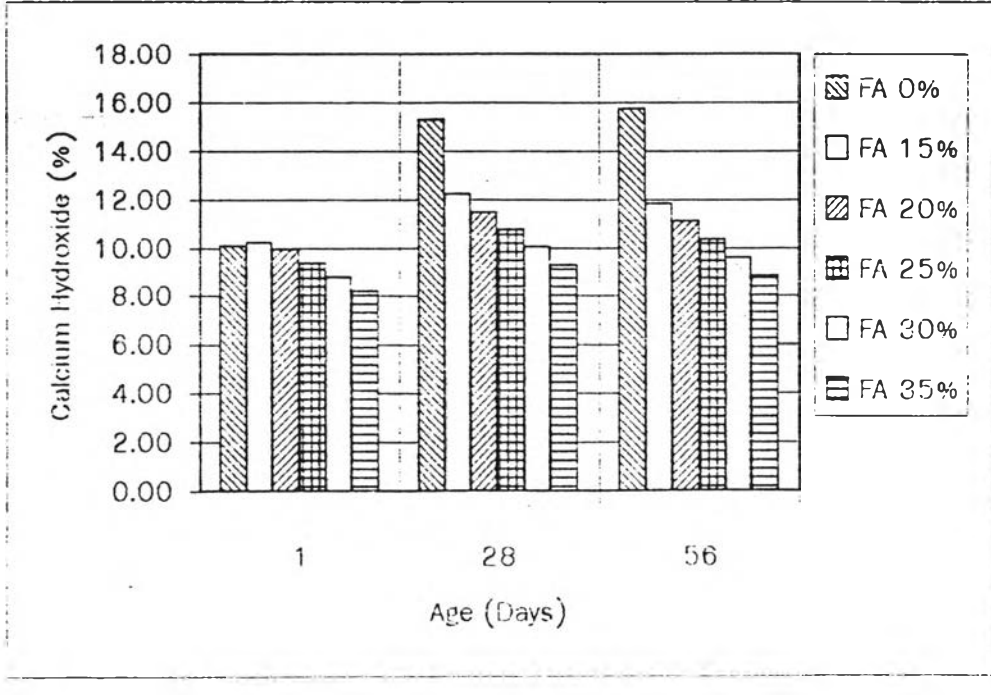
| % Fly Ash | Ca(OH)2 (%) | | | CSH (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 Day | 28 Days | 56 Days | 1 Day | 28 Days | 56 Days |
| FA 0 % | 33.98 | 51.64 | 53.09 | 39.71 | 60.29 | 62.03 |
| FA 15 % | 34.37 | 41.19 | 39.86 | 38.72 | 53.69 | 57.49 |
| FA 20 % | 33.56 | 38.64 | 37.39 | 37.54 | 50.65 | 54.22 |
| FA 25 % | 31.59 | 36.21 | 34.96 | 35.30 | 47.49 | 50.91 |
| FA 30 % | 29.61 | 33.77 | 32.39 | 33.06 | 44.35 | 47.74 |
| FA 35 % | 27.64 | 31.24 | 29.82 | 30.84 | 41.29 | 44.56 |

ตารางที่ 4.4 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิก

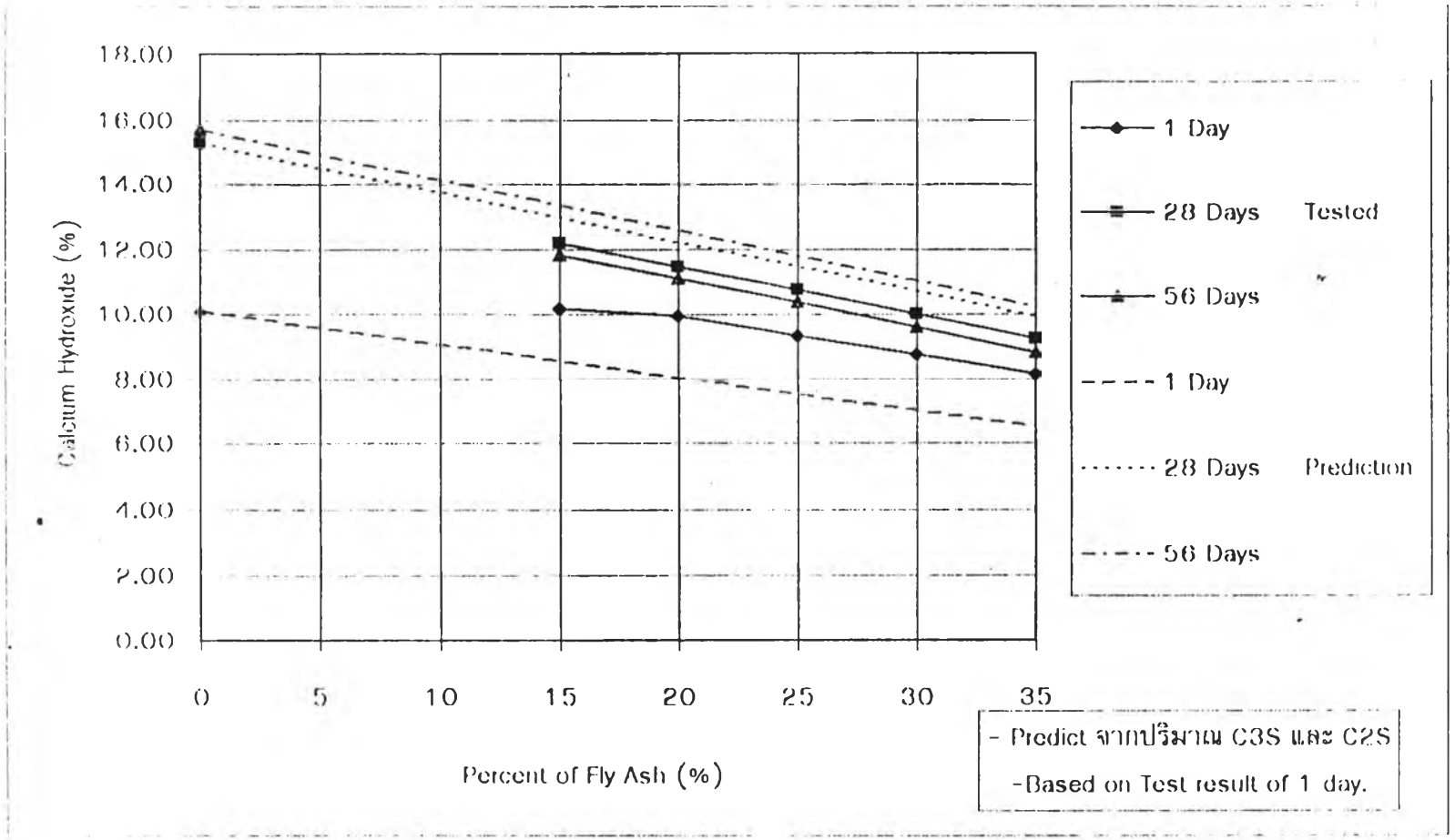
| Mix No. | Type | Days | %Ca(OH)2 From Test | %Ca(OH)2 C2S+C3S | %Consume by pozzolan |
|---|---|---|---|---|---|
| D1-1 | CE | 1 | 10.066 | 10.066 | - |
| D1-3 | CE | 3 | 11.505 | 11.505 | - |
| D1-7 | CE | 7 | 13.910 | 13.910 | - |
| D1-28 | CE | 28 | 15.295 | 15.295 | - |
| D1-56 | CE | 56 | 15.725 | 15.725 | - |
| D2-1 | FA15 | 1 | 10.181 | 8.556 | -1.625 |
| D2-3 | FA15 | 3 | 11.325 | 9.779 | -1.545 |
| D2-7 | FA15 | 7 | 12.638 | 11.824 | -0.815 |
| D2-28 | FA15 | 28 | 12.201 | 13.001 | 0.800 |
| D3-28 | FA20 | 28 | 11.445 | 12.236 | 0.791 |
| D4-28 | FA25 | 28 | 10.727 | 11.471 | 0.744 |
| D5-28 | FA30 | 28 | 10.004 | 10.707 | 0.703 |
| D6-28 | FA35 | 28 | 9.252 | 9.942 | 0.689 |
| D2-56 | FA15 | 56 | 11.807 | 13.366 | 1.559 |
| D3-56 | FA20 | 56 | 11.074 | 12.580 | 1.506 |
| D4-56 | FA25 | 56 | 10.355 | 11.794 | 1.438 |
| D5-56 | FA30 | 56 | 9.593 | 11.008 | 1.414 |
| D6-56 | FA35 | 56 | 8.832 | 10.221 | 1.389 |



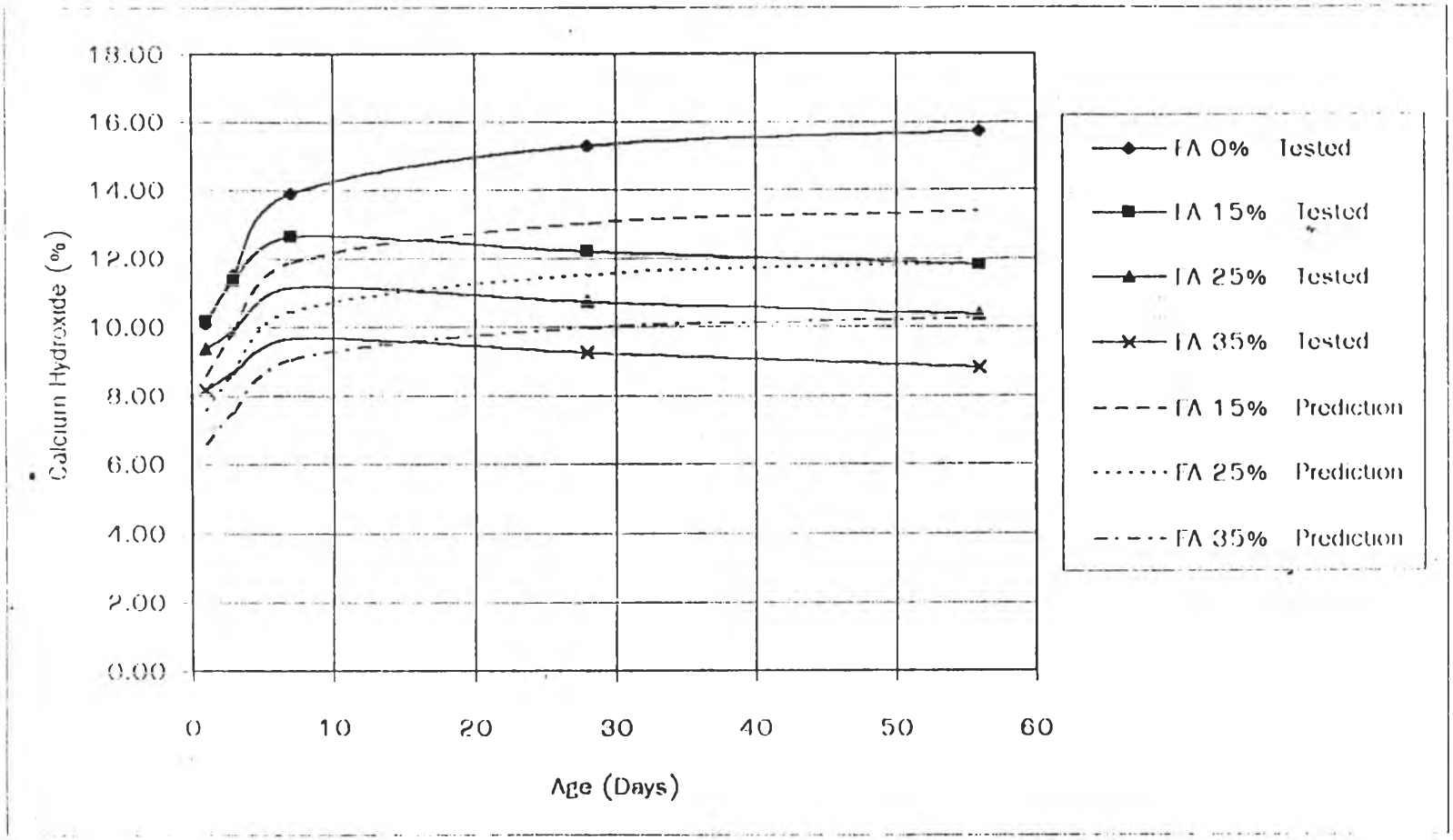

รูปที่ 4.1 ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ (g/g cementitious) ตามเวลา



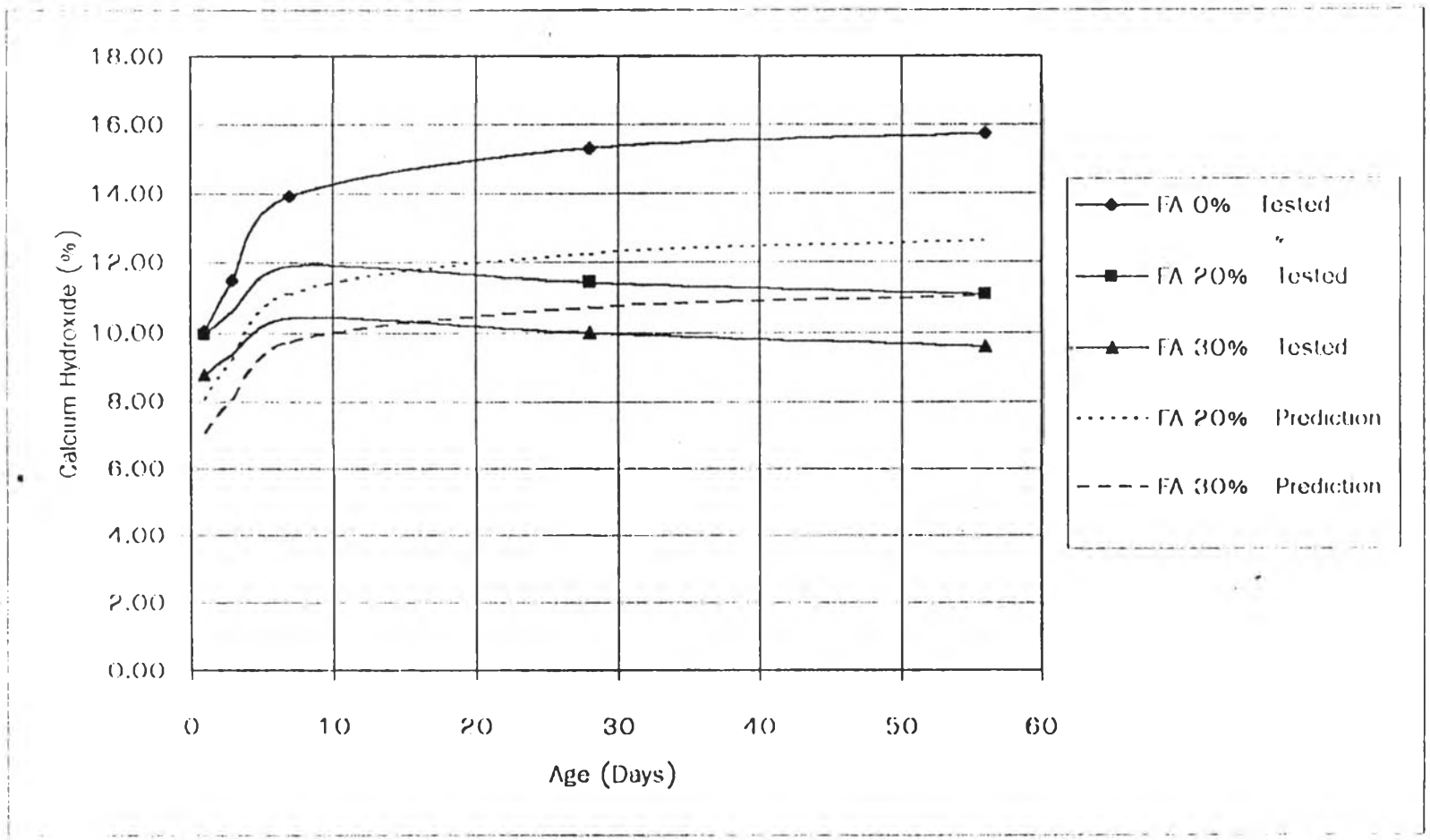

รูปที่ 4.2 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (g/g cementitious) ตามเวลา



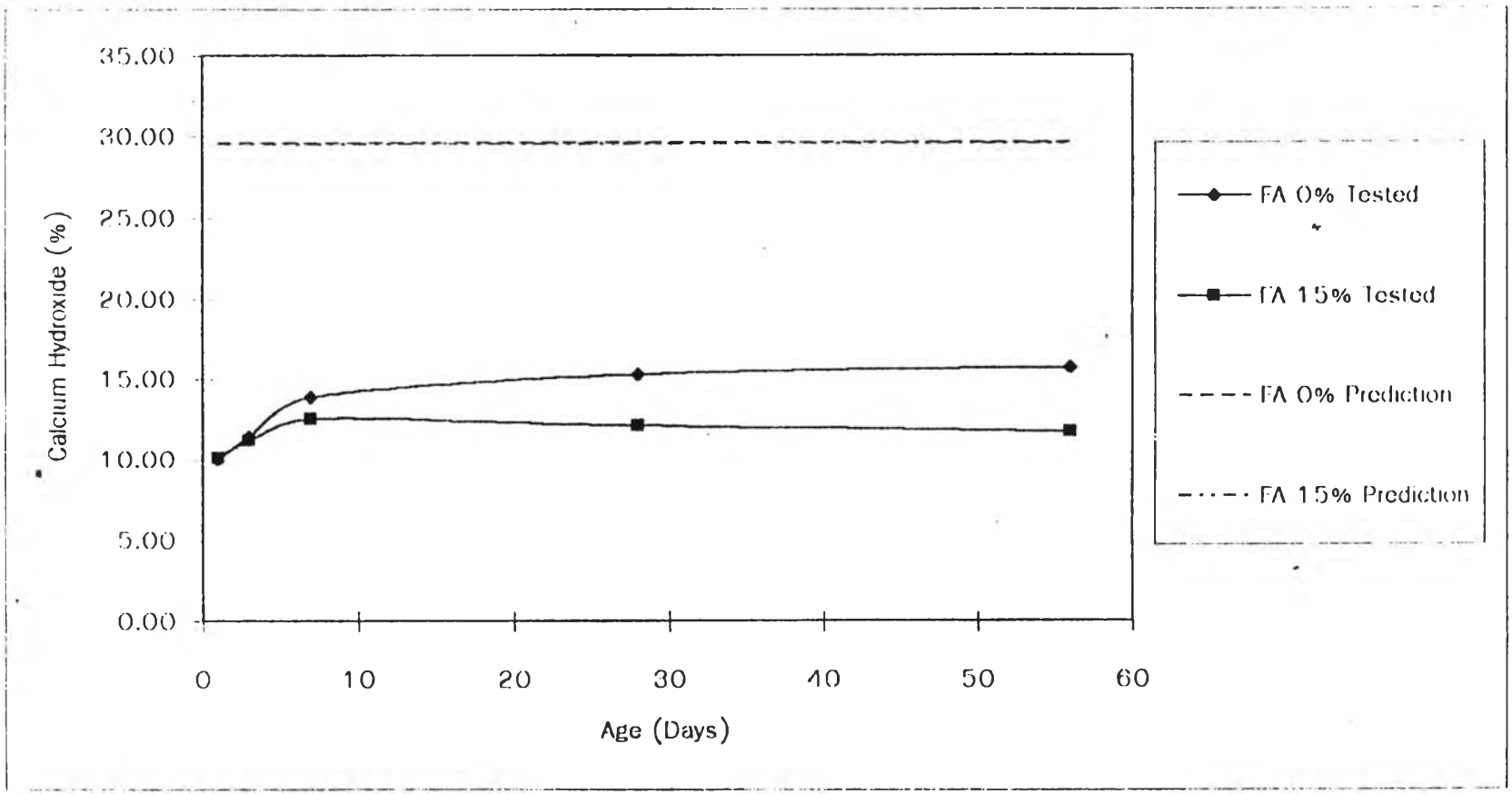

รูปที่ 4.3 ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ตามสัดส่วนวัสดุผสมเพิ่มขี้เถ้าลอย



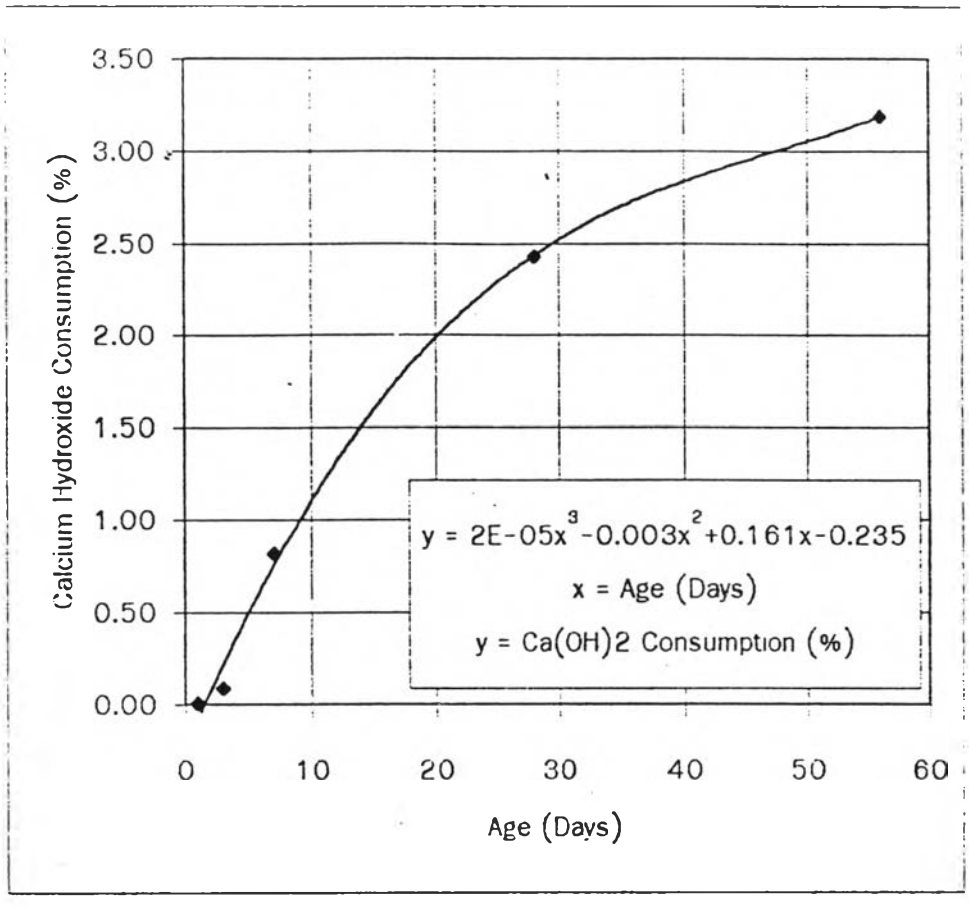

รูปที่ 4.4 ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีเถ้าลอยเทียบกับซีเมนต์ตามเวลาเมื่อปริมาณซีเถ้าลอย 0, 15, 25, 35%



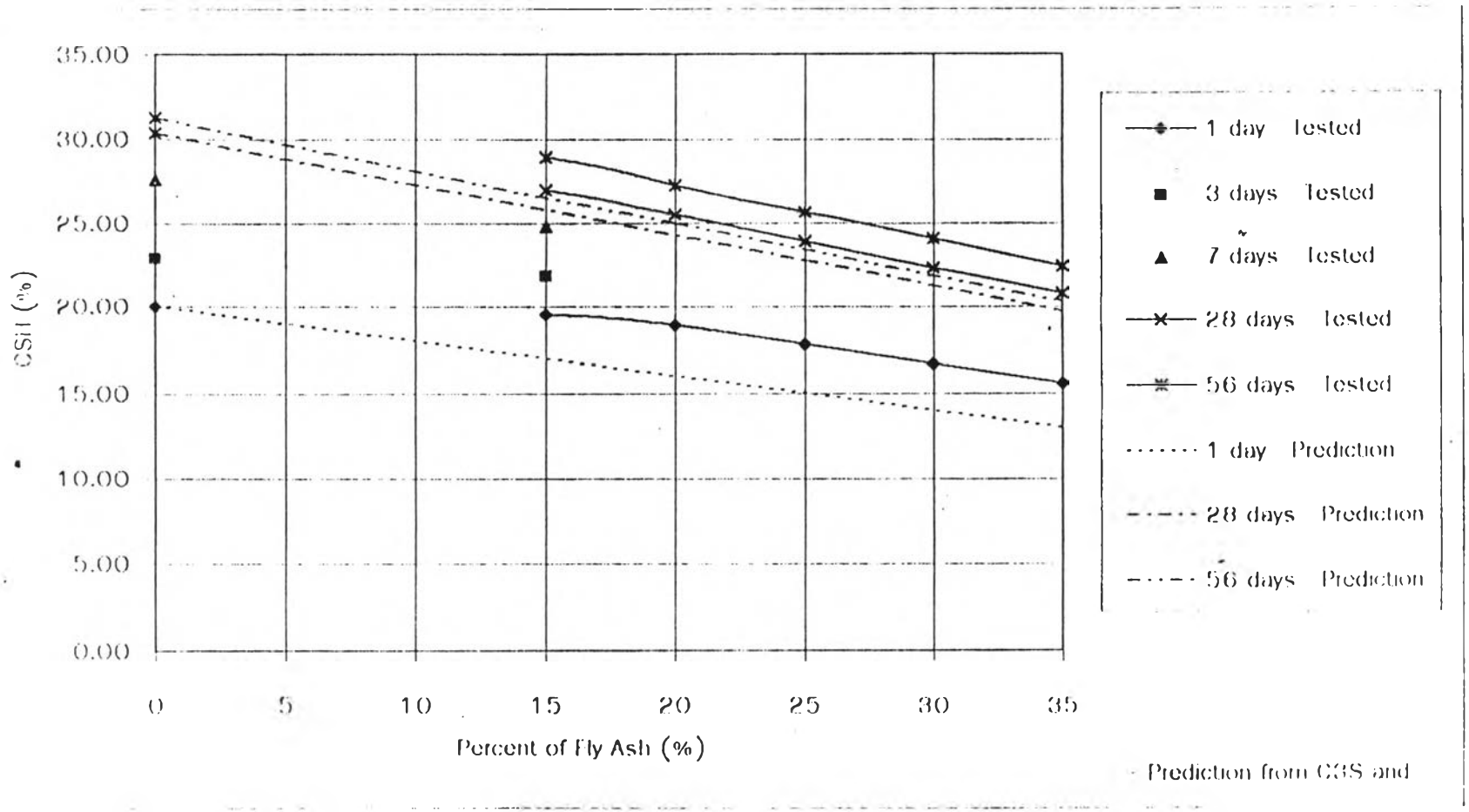

รูปที่ 4.5 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีเม้าลายเทียบกับซีเมนต์ตามเวลาเมื่อปริมาณซีเม้าลายเป็น 0, 20, 30%



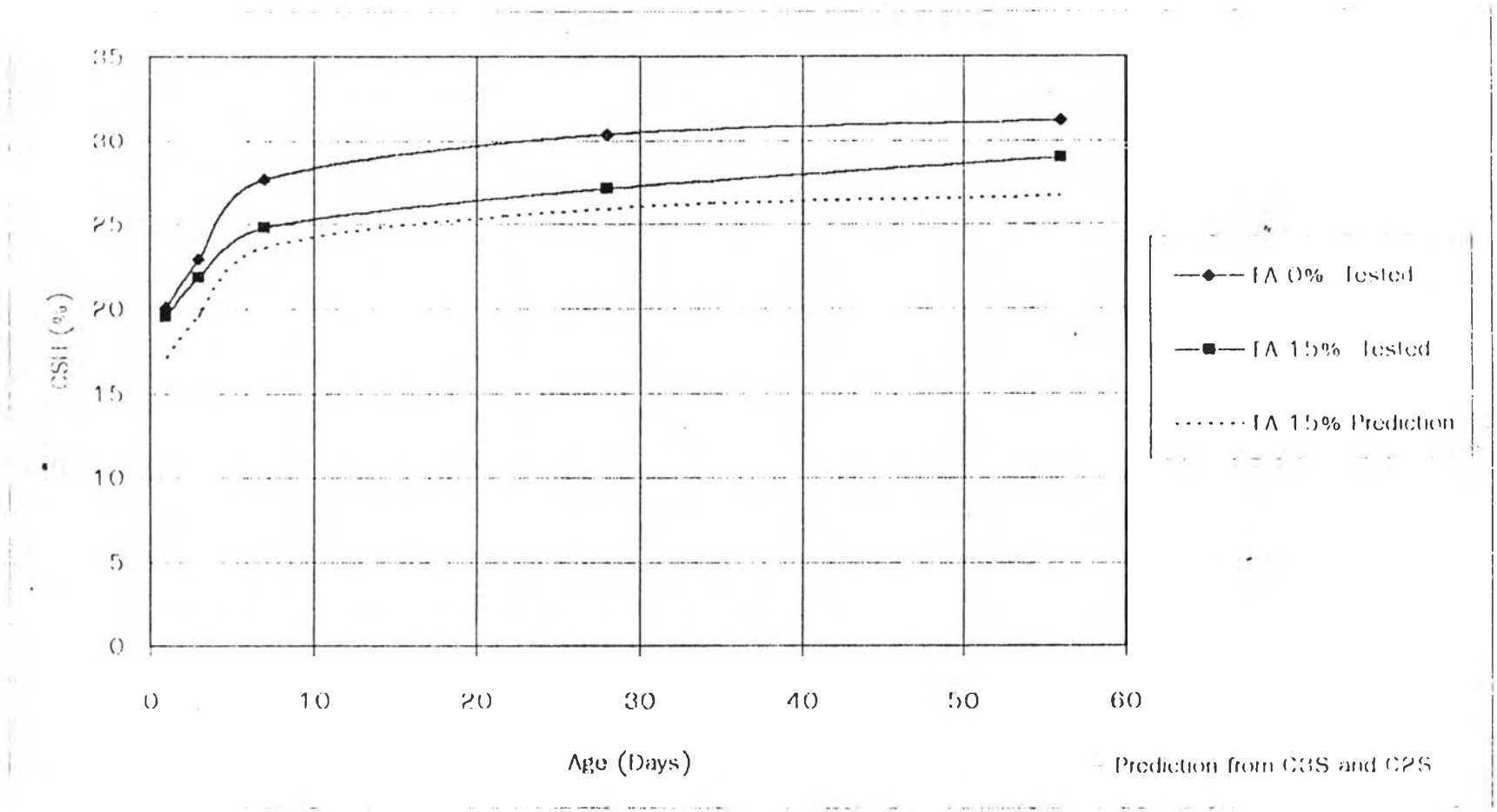

รูปที่ 4.6 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามเวลา



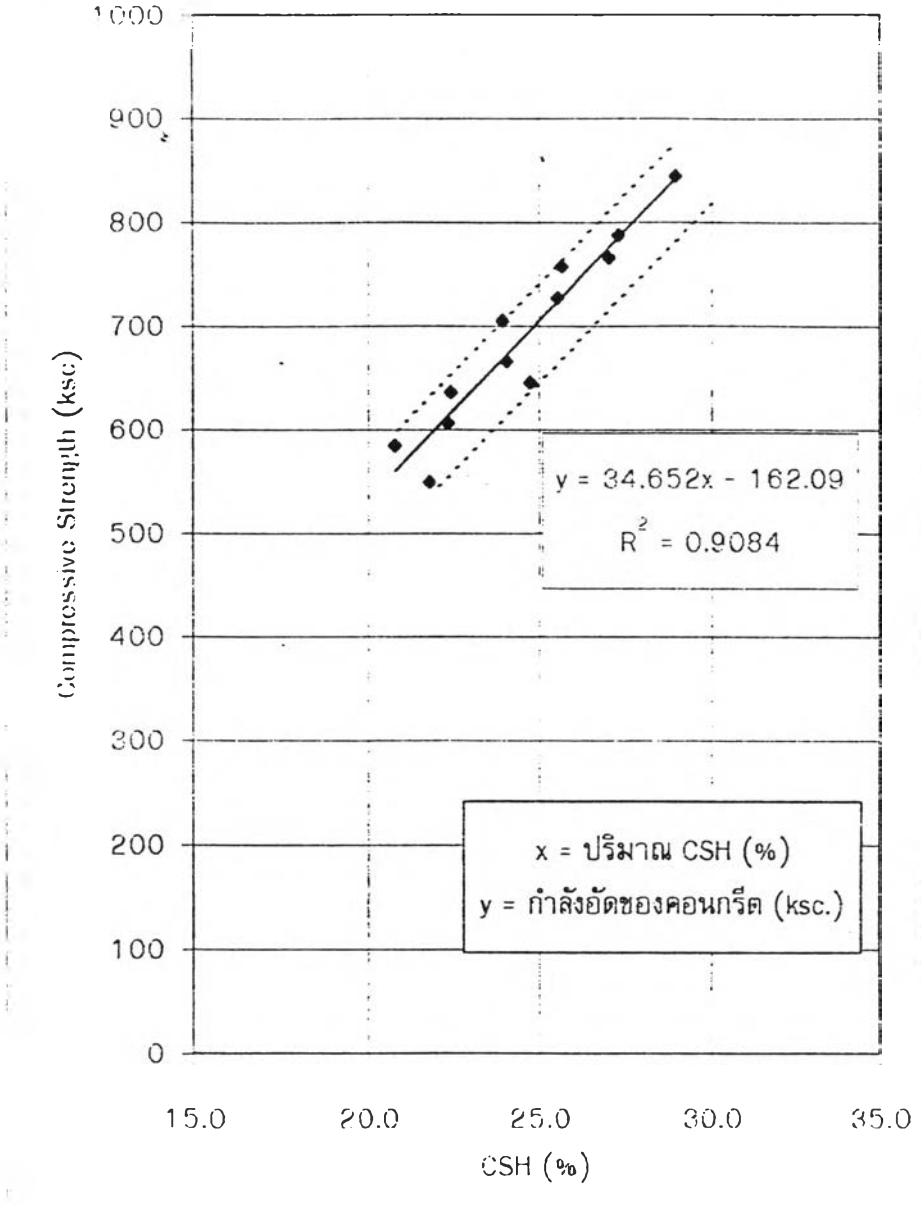

รูปที่ 4.7 ปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ (g/g cementitious) ที่ถูกใช้ไป ในปฏิกิริยาปอซโซลานิกตามเวลา เมื่อปริมาณขี้เถ้าลอย=15%



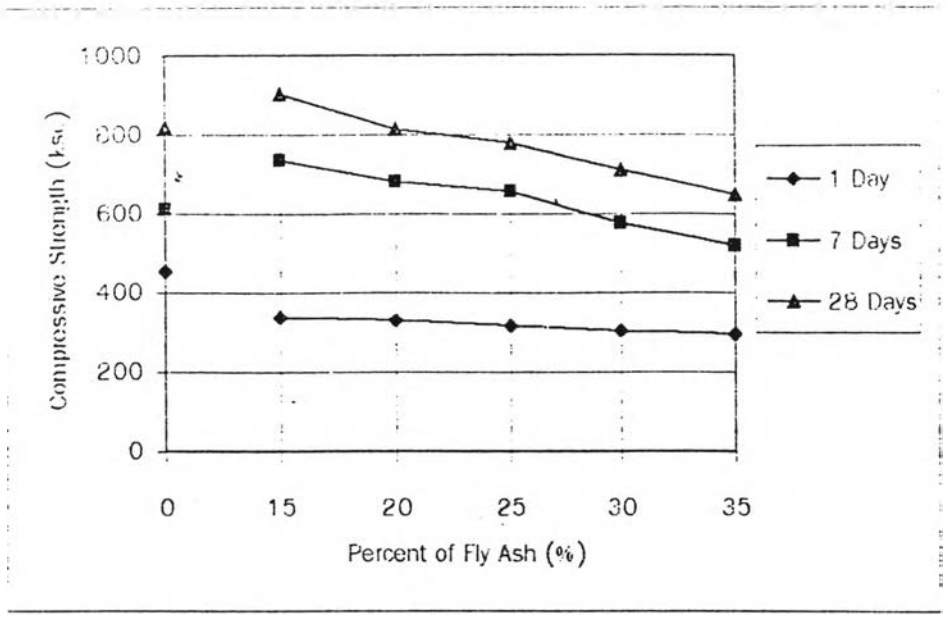

รูปที่ 4.8 ปริมาณ CSH เปรียบเทียบระหว่างขี้เถ้าลอยกับซีเมนต์ ตามสัดส่วนวัสดุผสมเพิ่มขี้เถ้าลอย



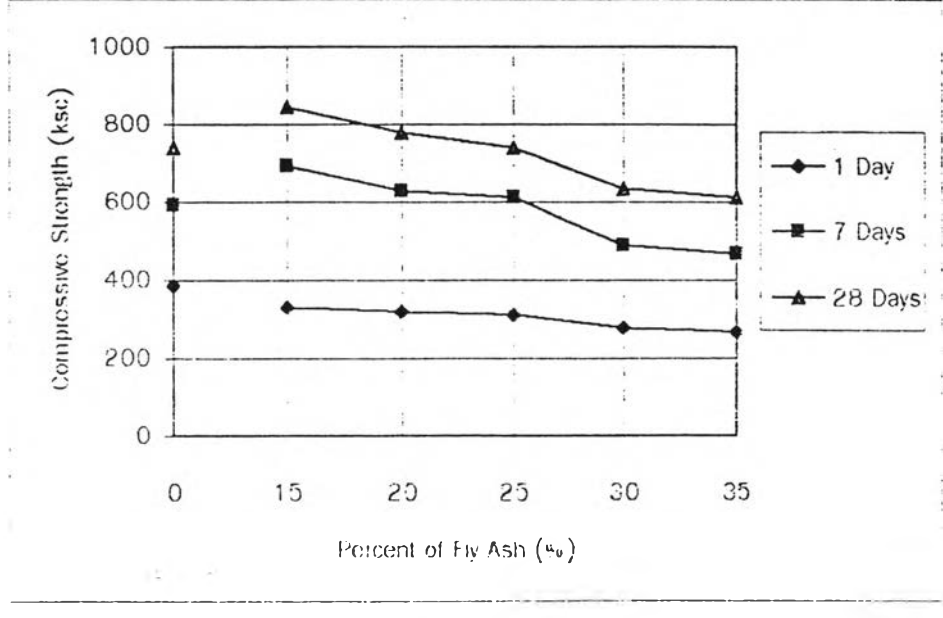

รูปที่ 4.9 ปริมาณ CSH ตามเวลาเมื่อปริมาณขี้เถ้าลอย=15%



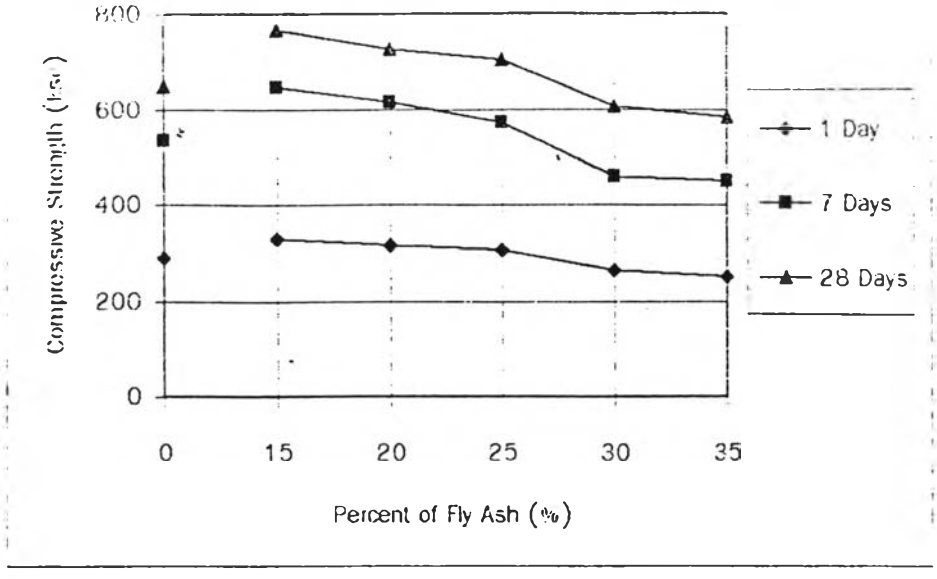

รูปที่ 4.10 ปริมาณ CSH เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย



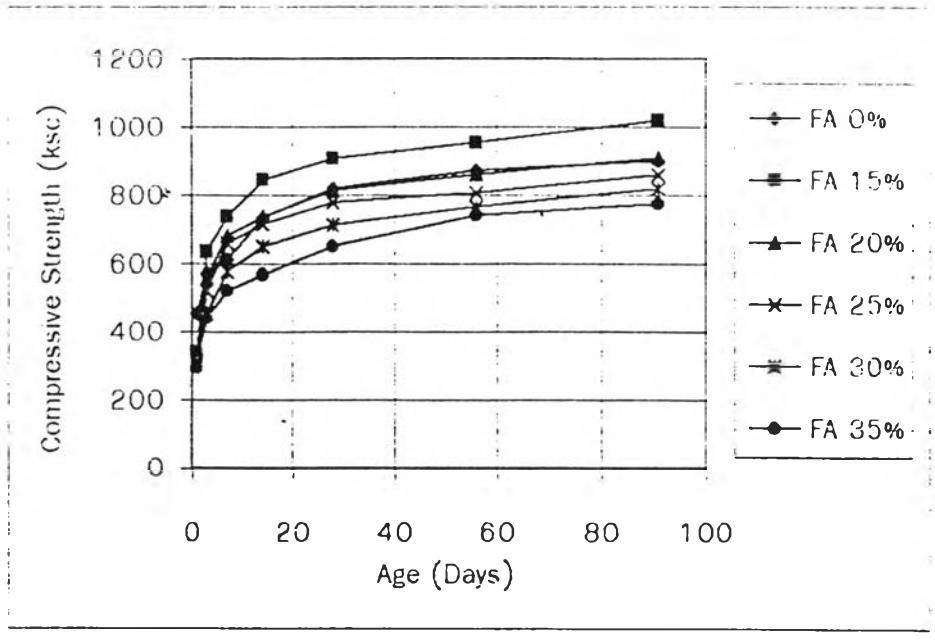

รูปที่ 4.11 ค่ากำลังอัดตามสัดส่วนวัสดุผสมเพิ่มขี้เถ้าลอยที่ W/C=0.26



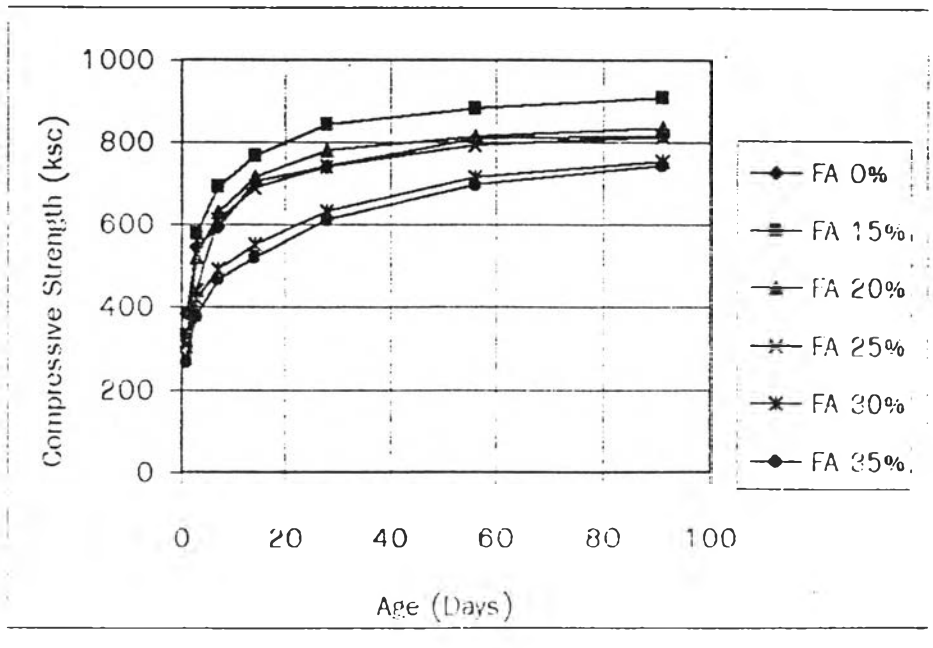

รูปที่ 4.12 ค่ากำลังอัดตามสัดส่วนวัสดุผสมเพิ่มขี้เถ้าลอยที่ W/C=0.29



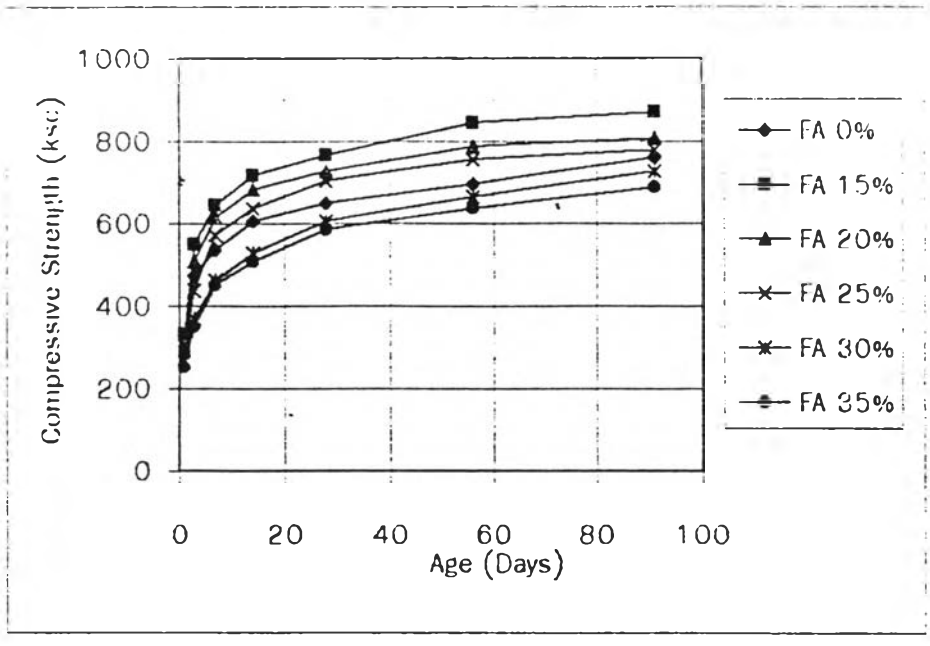

รูปที่ 4.13 ค่ากำลังอัดตามสัดส่วนวัสดุผสมเพิ่มขี้เถ้าลอยที่ W/C=0.32



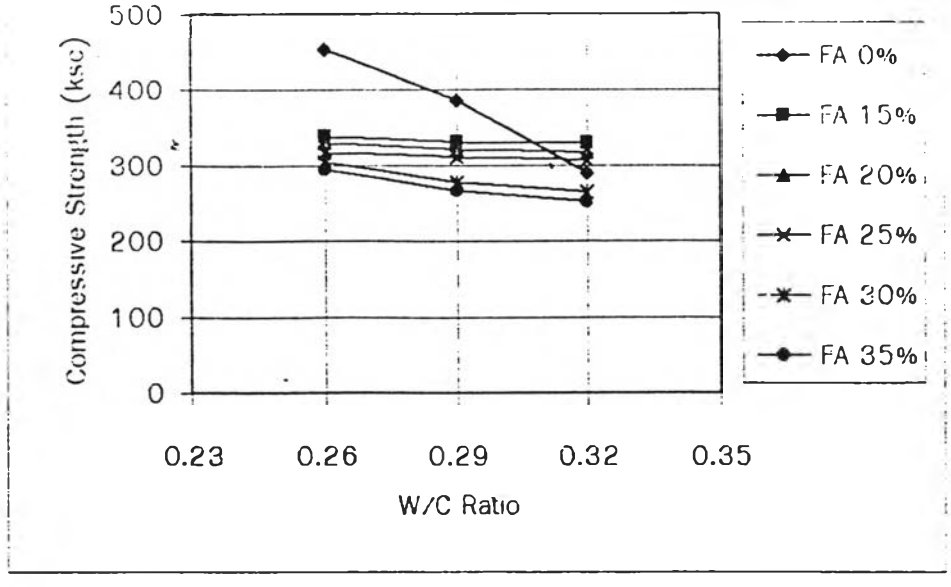

รูปที่ 4.14 กำลังอัดตามเวลาของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่ W/C=0.26



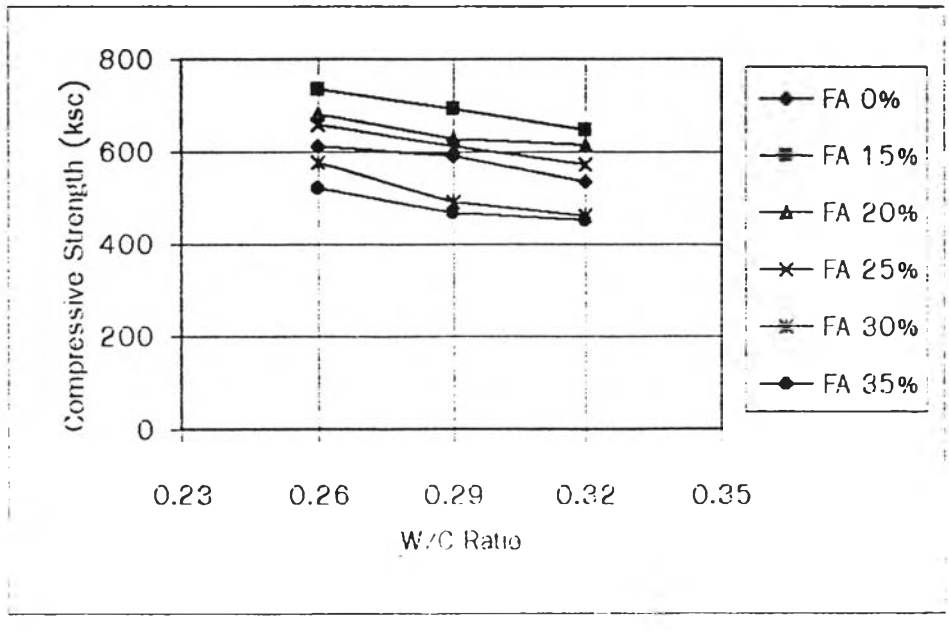

รูปที่ 4.15 กำลังอัดตามเวลาของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่ W/C=0.29



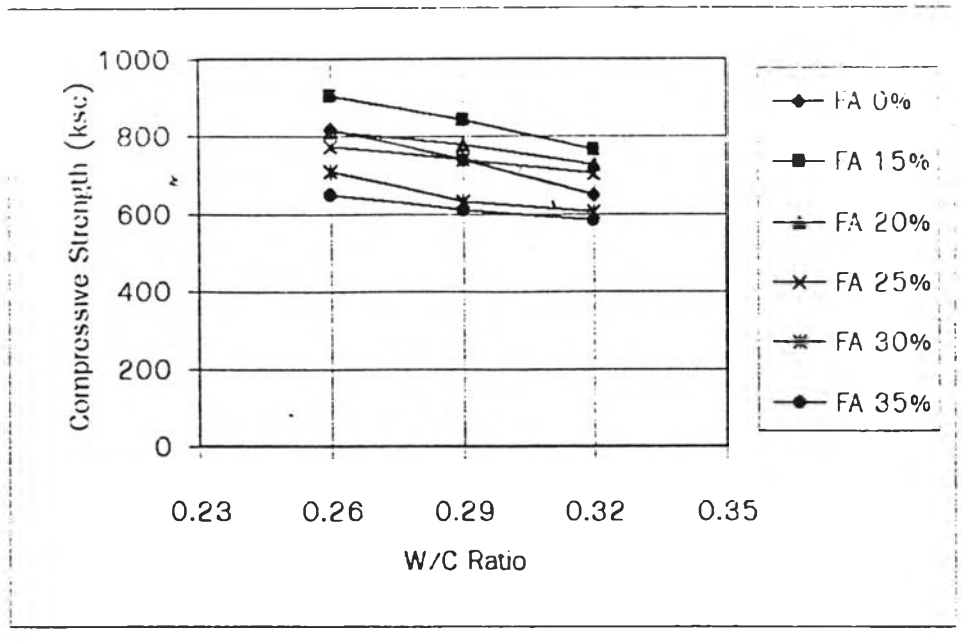

รูปที่ 4.16 กำลังอัดตามเวลาของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่ W/C=0.32



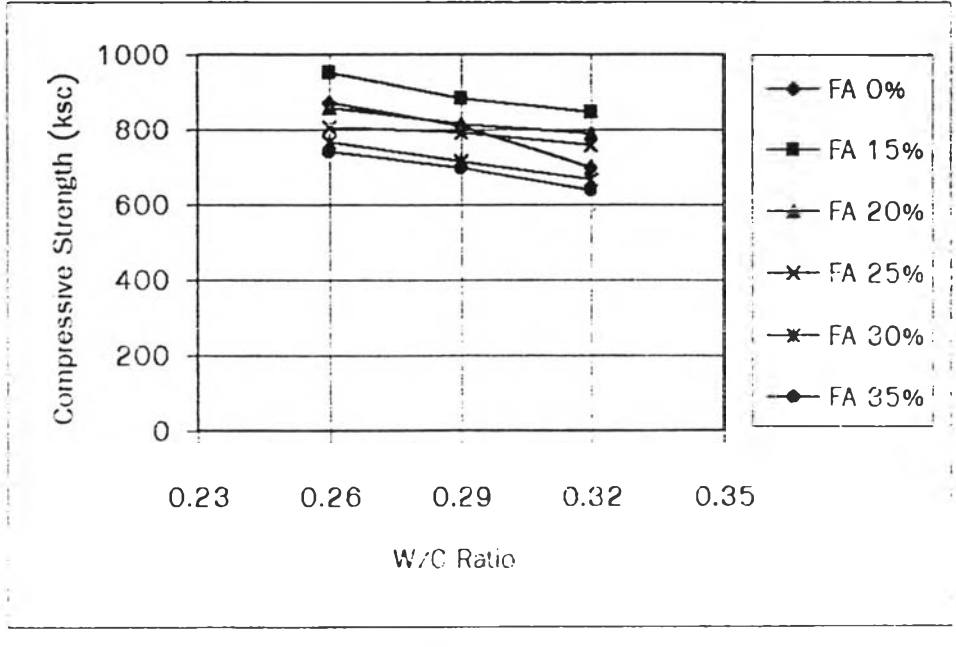

รูปที่ 4.17 กำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่อายุ 1 วัน เทียบกับค่า W/C Ratio



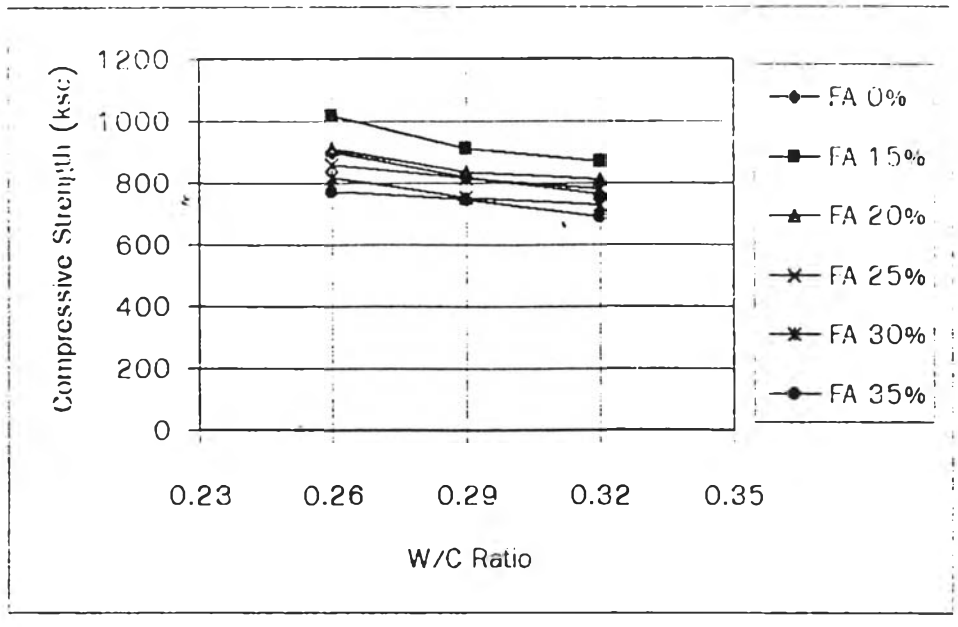

รูปที่ 4.18 กำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่อายุ 7 วัน เทียบกับค่า W/C Ratio



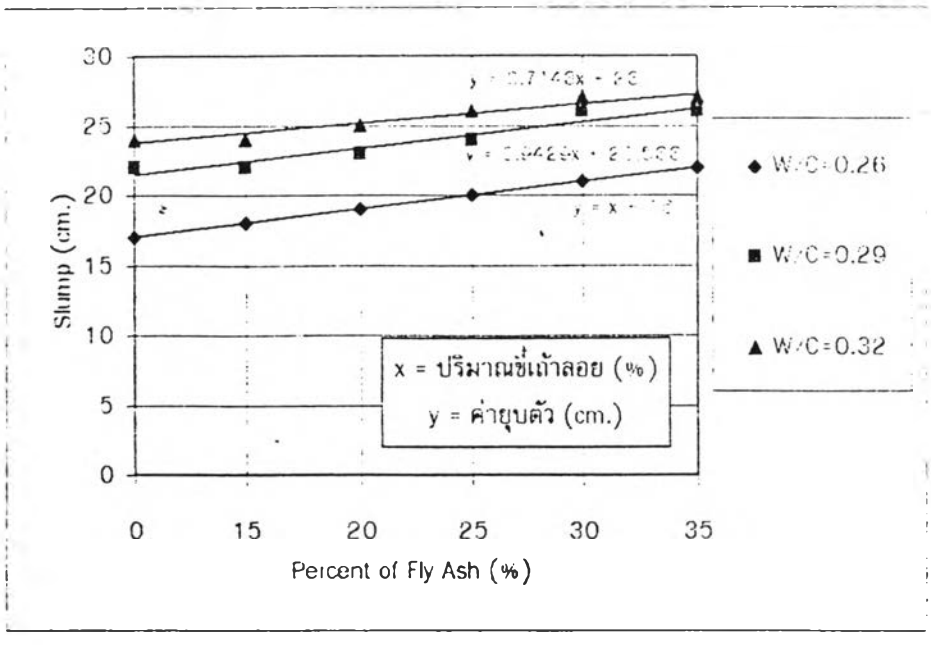

รูปที่ 4.19 กำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่อายุ 28 วัน เทียบกับค่า W/C Ratio



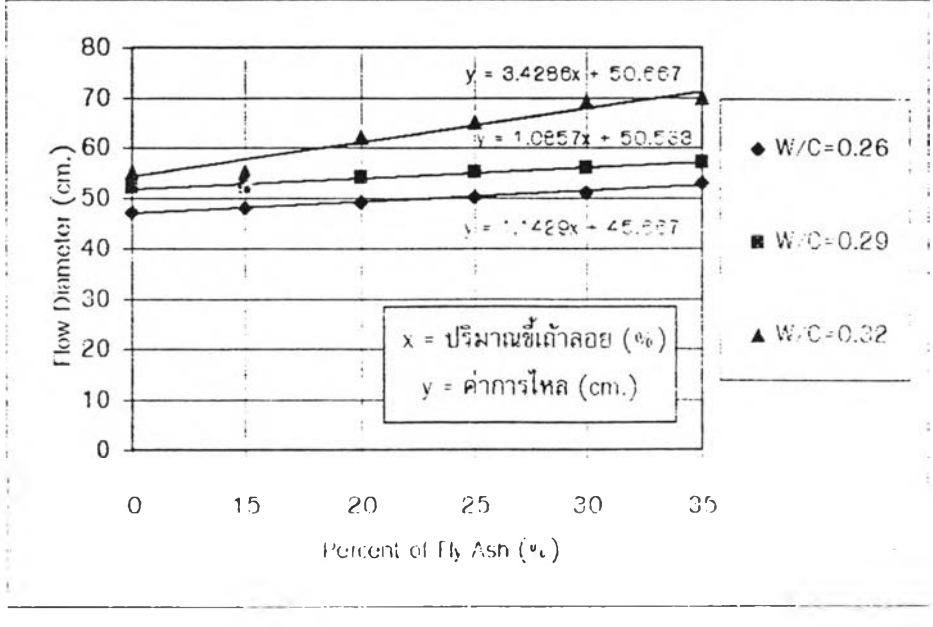

รูปที่ 4.20 กำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่อายุ 56 วัน เทียบกับค่า W/C Ratio



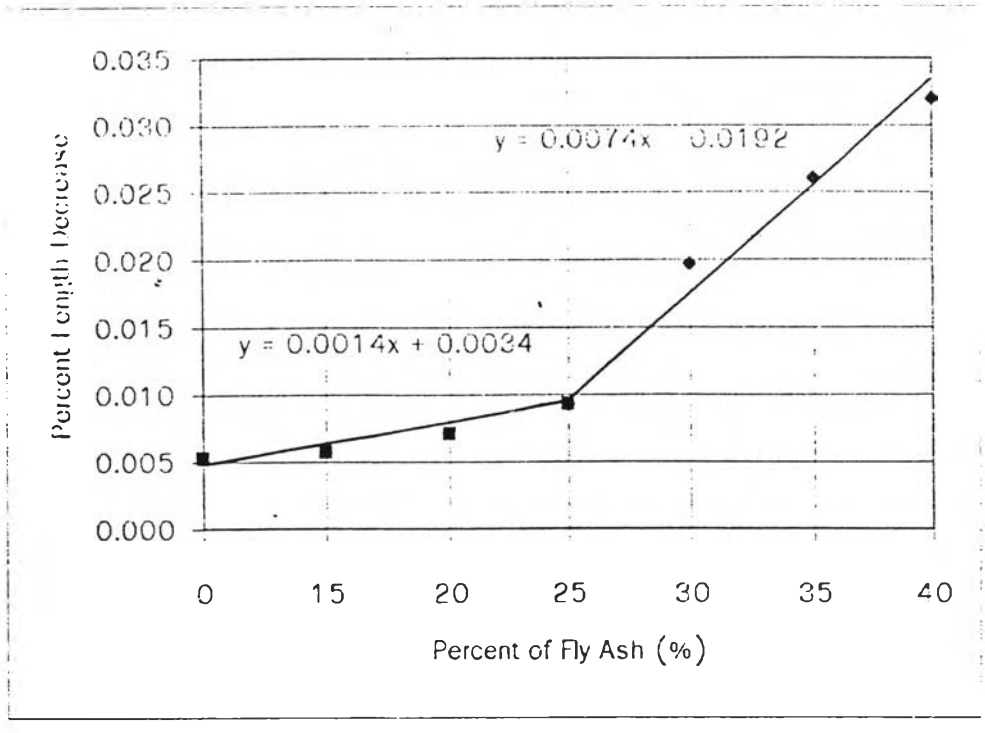

รูปที่ 4.21 กำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่อายุ 91 วัน เทียบกับค่า W/C Ratio



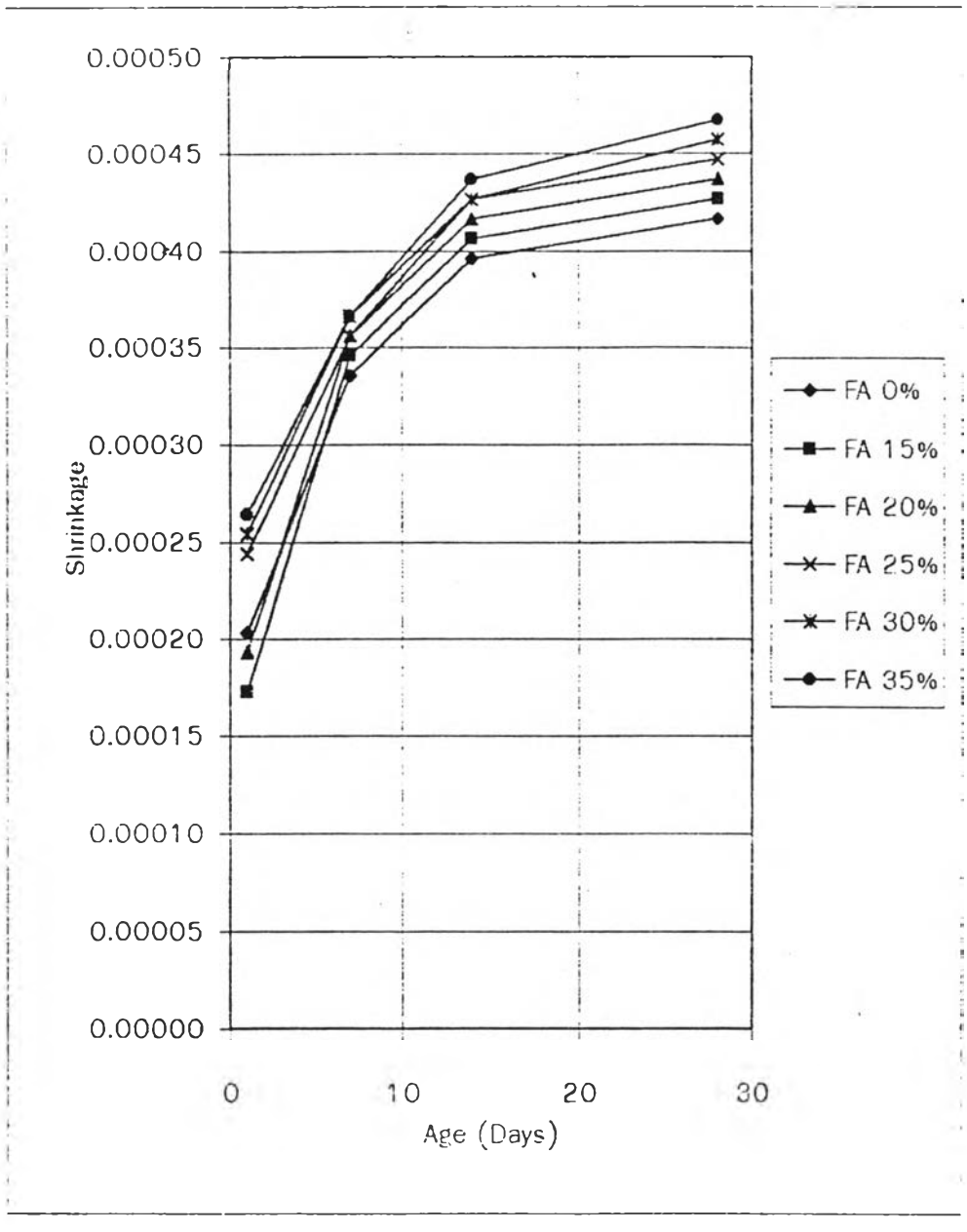

รูปที่ 4.22 ค่า Slump ตามสัดส่วนวัสดุผสมเพิ่ม Fly Ash



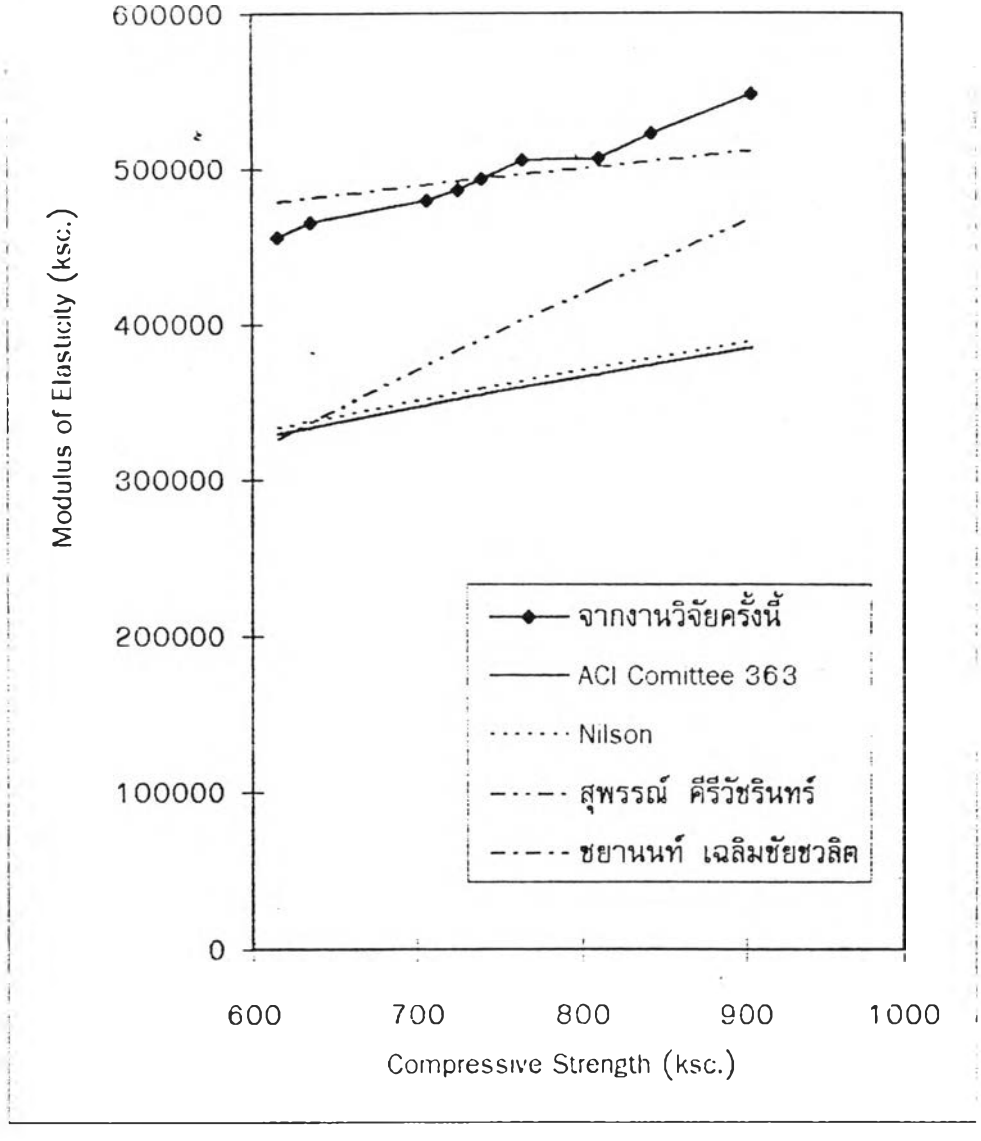

รูปที่ 4.23 ค่า Flow เป็นวัดค่าการแผ่กระจายตามสัดส่วนวัสดุผสมเพิ่ม Fly Ash




รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบความคงตัวของซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย




รูปที่ 4.25 การหดตัวของมอร์ตาตามเวลา




รูปที่ 4.26 ค่าโมดุลัสยืดหยุ่นเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน