ผลกระทบของซิลิกาฟูมในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

นาย สมภพ สุวรรณกวิน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2539

ISBN 974 - 635 - 869 - 3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17138358

EFFECTS OF SILICA FUME IN POZZOLANIC REACTION ON COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Mr. Sompop Suwankawin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Civil Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1996

ISBN 974 - 635 - 869 - 3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของซิลิกาฟูมในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง
โดย	นาย สมภพ สุวรรณกวิน
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นพ. ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม สุริยะมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)

..... กรรมการ

(ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สมภพ สุวรรณกวิน : ผลกระทบของซิลิกาฟูมในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง (EFFECTS OF SILICA FUME IN POZZOLANIC REACTION ON COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE) อ. ที่ปรึกษา : ศ.ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ ,109 หน้า , ISBN 974 - 635 - 869 - 3

ปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมประกอบด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิก ผลผลิตที่สำคัญจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นคือคัลเซียมไฮดรอกไซด์และคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะใช้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ให้เกิดเป็นคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นทำหน้าที่ยึดประสานเนื้อคอนกรีตเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นตามอายุโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ด้วยการวัดน้ำหนักภายใต้ความร้อนสูง, (Thermogravimetry Analysis,(TGA)) แล้วนำมาคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเพื่อหาปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากสมการเคมีได้เพื่อนำไปสู่การอธิบายผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อกำลังอัดของคอนกรีตเปรียบเทียบกับของคอนกรีตธรรมดา ในการทดสอบหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์โดยวิธี TGA จากหลักการที่ว่าคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะสลายตัวทำให้น้ำหนักหายไปที่อุณหภูมิ 450 - 600 °C จึงสามารถวัดค่าในส่วนที่หายไปได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมด้วยการแทนที่ซีเมนต์ปริมาณ 5 - 25 % โดยน้ำหนัก โดยยึดส่วนผสมของคอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์ 500 กก.ต่อลบ.ม. สัดส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียด 0.26 - 0.32 และปรับแก้คุณสมบัติจากผลกระทบของซิลิกาฟูมให้คงสภาพคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งในสภาพเหลวและคอนกรีตแข็งตัวตามอายุ

ผลการทดสอบพบว่าในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามอายุเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นแต่เมื่อผสมซิลิกาฟูมปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดอัตราการเพิ่มหลังจาก 7 วันจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างซิลิกาฟูมกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเริ่มปรากฏผลตั้งแต่อายุยังน้อย แต่ในช่วงแรกอายุ 1 - 3 วันหากใช้ปริมาณซิลิกาฟูมในปริมาณน้อย ๆ 5 - 10 % จะไม่เห็นผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิก แต่ที่ปริมาณเกินกว่า 15 % จะเริ่มเห็นผลของปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เพิ่มขึ้น ส่วนที่อายุเกินกว่า 7 วันปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะปรากฏผลได้แม้ที่ปริมาณซิลิกาฟูมเพียง 5 % กำลังอัดของคอนกรีตจะแปรผันตรงกับปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโดยสมการความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงโดยมีความเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยด้วยสัมประสิทธิ์การแปรปรวนที่ 0.95 - 1.05 เท่านั้น การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมด้วยปริมาณ 15 % จะให้กำลังอัดอายุ 1 , 3 และ 28 วัน เท่ากับ 55 , 90 และ 140 % ของกำลังอัดคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน ในขณะที่คอนกรีตผสมด้วยซิลิกาฟูม 5 % จะพัฒนากำลังที่ 1 , 3 และ 28 วันเท่ากับ 50 , 80 และ 110 % เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่ 28 วัน อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณซิลิกาฟูมเกินกว่า 5 % จะทำให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตเหลวลดลงทั้งจากค่าการยุบตัวและค่าการไหลแผ่จึงต้องมีการปรับแต่งให้มีการไหลลื่นดีขึ้นด้วยการเติมปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพิ่ม ดังนั้นการใช้ซิลิกาฟูมให้มีประสิทธิผลทั้งกำลังอัดและความสามารถทำงานด้วยอัตรา 5 % ที่สัดส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียด 0.32 แต่หากจะพิจารณาเพียงเฉพาะกำลังอัดเพียงอย่างเดียวปริมาณซิลิกาฟูมที่มีประสิทธิผลสูงสุดควรยึดถือที่ 15 % ผนวกกับการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษให้การไหลลื่นดีได้

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต สมภพ สุวรรณกวิน

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม —

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C715319 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEY WORD: SILICA FUME / HYDRATION REACTION / POZZOLANIC REACTION / THERMOGRAVIMETRY ANALYSIS
SOMPOP SUWANKAWIN : EFFECTS OF SILICA FUME IN POZZOLANIC REACTION ON COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE. THESIS ADVISOR : PROFESSOR EKASIT LIMSUWAN, Ph.D. 109 pp. ISBN 974-635-869-3

Significant chemical reactions in cement paste with silica fume consist of hydration reaction of cement and pozzolanic reaction of silica fume. The products of hydration reaction are calcium silicate hydrate and calcium hydroxide while pozzolanic reaction consumes calcium hydroxide to produce calcium silicate hydrate, which is related to the compressive strength of concrete. To determine amount of calcium hydroxide in this study, Thermogravimetry Analysis (TGA) are required, and then the amount of calcium silicate hydrated can be calculated from the molecular weight on the basis of chemical composition. The principal concept of the Thermogravimetry Analysis for calcium hydroxide which is decomposed at 450 - 600 °C so that weight loss can be obtained. The study has considered silica fume as substitution of cement between 5 - 25 % by weight and the concrete mixes are 500 kg./m^3 of cement and the water to fine ratio [w/(c+sf)] of 0.26 - 0.32. Essential high performance concrete properties in fresh and harden states must be maintained and adjusted by means of chemical admixture dosage.

The amount of calcium hydroxide content in cement paste is tested to be increased by age of hydration reaction while the silica fume substitution has shown reduction rate of increment after the age of more than 7 days due to consumption of calcium hydroxide in pozzolanic reaction. The reaction has shown some indication by means of calcium hydroxide consumption since the first day of mixing. However, at early age, the calcium silicate hydrate has shown slightly significant with lower content of silica fume (5 - 10 %) but it will be influenced by amount of silica fume more than 15 %. At the age more than 7 days, the amount of calcium silicate hydrate has significant developed even the amount of silica fume at 5 %. The compressive strength has indicated direct proportion to the amount of calcium silicate hydrate in linear proportion with coefficient of variance at 0.95 - 1.05. Strength development of concrete with 15 % silica fume has shown the most effective in early age and the strength at 1 , 3 and 28 days has been 55 , 90 , 140 % of the control ones at 28 days. On the other hand, the development of low content of silica fume at 5 % has shown 50 , 80 and 110 % at the age of 1 , 3 and 28 days, respectively, in comparison to the control ones. The most effective proportion to comply both strength and workability, the mixes of 5 % silica fume, water to fine ratio 0.32 and the cement content 500 kg/m^3, are the most suitable ones. However, if the only high strength is considered, then the silica fume substitution at 15 % may be used with some adjustment of workability by means of chemical admixture dosage.

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม —

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอกราบของพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่าง ๆ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ผู้เขียนยังขอกราบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม สุริยะมงคล และอาจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม ที่ได้กรุณาตรวจและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และคุณกิตติกร ตันเปาว์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ อันจะทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บริษัท W.R. GRACE Co.,Ltd. และ บริษัท น่ำเฮงคอนกรีต (1992) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งให้การสนับสนุนการทดสอบในงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้เขียนขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในห้องทดสอบคอนกรีต และเจ้าหน้าที่ในศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือตลอดเวลาขณะทำงานวิจัย

คุณประโยชน์อันพึงจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่าน

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณวิศว จักรไพศาล เพื่อนที่ทำงานวิจัยด้วยกันและให้คำปรึกษาเสมอเพื่อนที่ดีตลอดมา

สมภพ สุวรรณกวิน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....จ
กิตติกรรมประกาศ .....ฉ
สารบัญ .....ช
รายการตารางประกอบ .....ฌ
รายการรูปประกอบ .....ญ

บทที่ 1 บทนำ
1.1 บทนำ 1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา 2
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา 7
1.4 การดำเนินการวิจัย 7
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 8

บทที่ 2 คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม
2.1 ซิลิกาฟูม 9
2.2 ปฏิกริยาทางเคมีของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม 10
2.3 อิทธิพลของซิลิกาฟูมที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด 12
2.3.1 ลักษณะของคอนกรีตสด 12
2.3.2 ความสามารถทำงานได้ 12
2.4 อิทธิพลของซิลิกาฟูมที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็ง 13
2.4.1 กำลังรับแรงอัด 13
2.4.2 โมดูลัสยืดหยุ่น 14
2.4.3 การหดตัวของมอร์ตาผสมซิลิกาฟูม 14

หน้า

2.4.4 ความคงตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูม 14
2.5 การหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์โดยวิธี TGA 15
2.5.1 โครงสร้างของไฮเดรตซีเมนต์เพสต์ 15
2.5.2 หลักการของวิธี Thermogravimetry Analysis (TGA) 17
2.5.3 การวิเคราะห์และประเมินค่า 19
2 6 การหาค่าปริมาเนคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดในซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูม 19

บทที่ 3 การทดสอบและผลการทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูง
3.1 การศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อกำลังอัดของคอนกรีต 26
3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต 27
3.3 การหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ 28
3.4 การทดสอบกำลังอัด 29

บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ
4.1 การวิเคราะห์ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ 42
4.2 การหาปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) 44
4.3 กำลังอัดของคอนกรีต 46
4.4 การพัฒนากำลังอัดกับปริมาณการเกิด CSH 47

บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผลงานวิจัย 69
5.2 ข้อเสนอแนะ 71

รายการอ้างอิง 72
ภาคผนวก 75
ประวัติผู้เขียน

รายการตารางประกอบ

ตารางที่ หน้า

2.1 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมเทียบกับของซีเมนต์ 21

2.2 แสดงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาการสลายตัว 18

3.1 รายละเอียดการศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อกำลังอัด 31

3.2 ปริมาณสารลดปริมาณน้ำที่ปรับแก้เพื่อความไหลลื่น 31

3.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพเหลวและกำลังอัดของคอนกรีต ตามอายุ (ชุดที่ 1) 32

3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพเหลวและกำลังอัดของคอนกรีต ตามอายุ (ชุดที่ 2) 33

3.5 ผลการทดสอบหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ 35

3.6 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 0 %) ชุดที่ 1 36

3.7 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 5 %) ชุดที่ 1 36

3.8 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 10 %) ชุดที่ 1 37

3.9 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 15 %) ชุดที่ 1 37

3.10 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 20 %) ชุดที่ 1 38

3.11 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 25 %) ชุดที่ 1 38

3.12 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 0 %) ชุดที่ 2 39

3.13 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 5 %) ชุดที่ 2 39

3.14 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 10 %) ชุดที่ 2 40

3.15 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 15 %) ชุดที่ 2 40

3.16 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 20 %) ชุดที่ 2 41

3.17 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 25 %) ชุดที่ 2 41

4.1 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิก 49

4.2 ปริมาณ $Ca(OH)_2$ และ CSH ที่ได้จากการคำนวณเมื่อปฏิกิริยาเคมี เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ 50

4.3 ปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่คำนวณจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกรวมกัน 51

รายการรูปประกอบ

รูปที่ หน้า

2.1 ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟูมเทียบกับของซีเมนต์ 22
2.2 การแทรกตัวของอนุภาคซิลิกาฟูมระหว่างเม็ดซีเมนต์ 22
2.3 ลักษณะรูปร่างของซิลิกาฟูมจากเครื่องขยายอิเลคตรอนไมโครสโคป 23
2.4 ลักษณะการกระจายของน้ำในซีเมนต์เพสต์ 23
2.5 ผลึกของคัลเซียมไฮดรอกไซด์บริเวณผิวเชื่อมต่อในซีเมนต์เพสต์ 24
2.6 การจำลองผิวเชื่อมต่อระหว่างซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีต 24
2.7 กราฟแสดงผลการทดสอบด้วยวิธี TGA 25
3.1 การชั่งตัวอย่างทดสอบบนเครื่องชั่งละเอียด 41
3.2 การทดสอบปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์โดยวิธี TGA 41
4.1 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมตามอายุ 52
4.2 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม 5 % 53
4.3 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม 10 % 54
4.4 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม 15 % 55
4.5 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม 20 % 56
4.6 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูม 25 % 57
4.7 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิกตามเวลาและ
สัดส่วนผสมของซิลิกาฟูม 58
4.8 ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิกตาม
ปริมาณซิลิกาฟูม 59
4.9 ปริมาณ CSH ตามเวลาเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 5 % 60
4.10 ปริมาณ CSH ตามเวลาเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 10 % 61
4.11 ปริมาณ CSH ตามเวลาเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 15 % 62
4.12 ปริมาณ CSH ตามเวลาเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 20 % 63
4.13 ปริมาณ CSH ตามเวลาเมื่อปริมาณซิลิกาฟูมเท่ากับ 25 % 64

รายการรูปประกอบ

รูปที่ หน้า

4.14 ปริมาณของ CSH ตามสัดส่วนของซิลิกาฟูม 65
4.15 อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมเทียบกับคอนกรีต ธรรมดา (อายุ 28 วัน) 66
4.16 ค่ากำลังรับแรงอัดตามปริมาณซิลิกาฟูมที่ w/(c+sf) = 0.32 66
4.17 ความสัมพันธ์ของ [f_c'/f_c' (28 days)] กับ [CSH / CSH (28 days)] 67
4.18 อัตราส่วนของ [f_c'/f_c' (28 days)] / [CSH / CSH (28 days)] ตามปริมาณซิลิกาฟูม 67
4.19 ปริมาณ CSH เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม 68