

## ซิลิกาฟุ้ง

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือ ซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed Silica Fume) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon Metal และ Ferrosilicon Alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000°C ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO<sub>2</sub> ซึ่งต่อมาจะออกซิไดซ์ (Oxidize) และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคนาขนาดเล็กมากๆของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 mm และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25 ม<sup>2</sup>/ก (โดยวิธี Nitrogen Absorption) ขนาดของซิลิกาฟุ้ง (0.1 mm) เป็นขนาดที่เล็กมากๆ กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่า

เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่เล็กมากๆจึงมีพื้นที่ผิวสูงมากและอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ทำให้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก ปัญหาของซิลิกาฟุ้งที่พบบ่อยเมื่อใช้ในคอนกรีต คือต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิม

สาเหตุเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆของซิลิกาฟุ่มจึงมีการใช้น้ำที่ค่อนข้างสูงในการเคลือบผิวหน้าโรงงานของ Silicon Metal and Ferrosilicon Alloy จะมีผลพลอยได้ของซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 75 หรือมากกว่าจะประกอบด้วยซิลิกอนกว่าร้อยละ 85 ถึง 95 ที่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ซึ่งพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนในโรงงาน Ferrosilicon จะมีผลพลอยได้ของซิลิกอนประมาณร้อยละ 50 และพบว่าซิลิกาที่มีอยู่จะน้อยและเป็นผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟุ่มเหล่านี้ในคอนกรีตไม่คืนกเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ

### องค์ประกอบทางเคมี

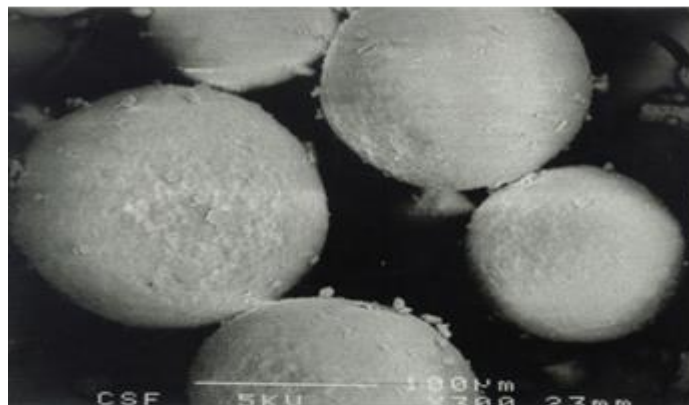
องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ่มคือ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซิลิกาฟุ่มที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักจะมี  $\text{SiO}_2$  ที่สูงมากคือมักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  และออกไซด์อื่นๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ่มมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน จะพบว่ามียังองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์, เถ้าถ่านหิน, และซิลิกาฟุ่ม

ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ประเภท I	เถ้าถ่านหิน	ซิลิกาฟุ่ม
$\text{SiO}_2$	20	48	92
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5	26	0.7
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3	10	1.2
$\text{CaO}$	60	5	0.2
$\text{MgO}$	1.1	2	0.2
$\text{SO}_3$	2.4	0.7	-
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	2.6
LOI.	2	3	-

### คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติ ทางกายภาพของซิลิกาฟุ่มที่เห็นชัดเจนคือเป็นฝุ่นผงสีอ่อนข้างดำหรือเทาหรือ เทาอมขาวที่ละเอียดมาก แต่ถ้าเป็นคอนกรีตซิลิกาฟุ่มจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากการรวมตัวของ ซิลิกาฟุ่มหลายๆเม็ดเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ่มมีค่าประมาณ 2.2 ความละเอียดทดสอบโดยวิธีของเบลนมีค่าประมาณ 150,000 ซม<sup>2</sup>/ก ขณะที่ของปูนซีเมนต์มีค่าเพียง 3400 ซม<sup>2</sup>/ก ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเมื่อขยายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1mm ขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าประมาณ 15 mm เนื่องจากมีขนาดที่เล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย ดังนั้นจึงนิยมนำซิลิกาฟุ่มมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า คอนกรีตซิลิกาฟุ่ม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ่ม, ใ้ถ้าอ่านหิน, และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I สามารถในตารางที่ 2



รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายด้วย SEM ของซิลิกาฟุ่มควบแน่น

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม, ใ้ล่า่านหิน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ I	ใ้ล่า่านหิน	ซิลิกาฟูม
ความละเอียดของเบตน (ชม <sup>2</sup> /ก)	3400	3800	150,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.4	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึงเทาเข้มหรือสีน้ำตาล	เทาดำ,เทาอมขาว

### การใช้ซิลิกาฟูมในคอนกรีต

ในประเทศไทย, อเมริกา และ ยุโรป จะใช้ซิลิกาฟูมในการผสมคอนกรีตโดยการผสม “แยก” กล่าวคือใส่ซิลิกาฟูมในการผสมคอนกรีต แต่ที่ประเทศแคนาดานอกจากการผสมแยกแล้ว ยังมีการใช้ซิลิกาฟูมเป็นส่วนหนึ่งของปูนซีเมนต์ โดยมีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ราวร้อยละ 8

เนื่องจากซิลิกาฟูม มีความละเอียดสูงมากจึงมีปัญหาในเรื่องการขนส่งหรือใช้งานมากพอสมควรเพราะหากไม่ระวังให้ดีอาจปลิวไปตามลมได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการใช้ซิลิกาฟูมในรูปที่ผสมกับน้ำให้อยู่ในรูปของเหลวข้น (Slurry Form) อย่างไรก็ตาม โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จหลายๆแห่งยังคงใช้ซิลิกาฟูมในรูปของผงหรือคอนกรีตซีเมนต์ซิลิกาฟูม เช่นเดิม

สำหรับอันตรายของการสูดซิลิกาฟูมเข้าไปทางลมหายใจยังไม่มีรายงานที่เด่นชัดนัก แต่วัสดุที่ละเอียดขนาดนี้ไม่ว่าจะเป็นอะไรก็ตาม ล้วนเป็นวัสดุหรือสิ่งแปลกปลอมของร่างกายทั้งสิ้น จึงควรหลีกเลี่ยงให้ได้รับเข้าสู่ร่างกายให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ นอกจากนี้ U.S. Occupational Safety and Health Agency (OSHA) ได้ระบุไว้ว่าปริมาณฝุ่น

ในที่ซึ่งปฏิบัติงานไม่ควรสูงเกิน 15 มก/ม<sup>3</sup> ส่วน American Conference of Governmental Industrial Hygienists ให้ค่าที่ต่ำกว่าคือปริมาณของฝุ่นในที่ทำงานไม่ควรมีค่าเกิน 10 มก/ม<sup>3</sup> ซึ่งถ้าปริมาณของฝุ่นที่เกิดในที่ทำงานมีค่าเกินนี้จะต้องใช้หน้ากากกันฝุ่นสวมป้องกันในขณะที่ทำงาน การใช้คอนกรีตซีลิกาฟุ่มแทนซีลิกาฟุ่มจะสามารถลดปัญหานี้ได้เพราะคอนกรีตซีลิกาฟุ่มจะมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และไม่ปลิวลมง่ายนัก

**ผลกระทบของซีลิกาฟุ่มต่อความสามารถในการเทและการเย็บน้ำ** เนื่องจากซีลิกาฟุ่มมีความละเอียดสูงมาก ดังนั้นเมื่อใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตทำให้ต้องใช้น้ำที่มากขึ้น ซึ่งแนวทางแก้ไขในปัญหานี้คือการใช้สารลดน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษเข้าช่วยเพื่อไม่ให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตสูงจนเกินไปเพราะจะทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลงตามกฎของ Abram's ส่วนการเย็บน้ำในคอนกรีตที่มีซีลิกาฟุ่มพบว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้ซีลิกาฟุ่ม

**ผลกระทบต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นในคอนกรีต** พบว่าการใช้ซีลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตไม่ได้ลดอุณหภูมิของคอนกรีต ให้ต่ำลง ดังนั้นการใช้ซีลิกาฟุ่มเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดอุณหภูมิเนื่องจากปฏิกิริยา ไฮเดรชันจึงควรหลีกเลี่ยง

**ผลกระทบต่อกำลังอัด** ซีลิกาฟุ่มนิยมใช้เป็นวัสดุหนึ่งในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมาก (120 MPa ที่อายุ 90 วัน) โดย การใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งคอนกรีตที่ได้นอกจากจะมีกำลังอัดที่สูงมากแล้วยังมีค่าการซึมผ่าน ที่ต่ำมากด้วย เพราะซีลิกาฟุ่มจะไปอุดพวก โครงสร้างของ Pore ของไฮเดรตซีเมนต์เพสต์ไว้ การใช้ซีลิกาฟุ่มในปริมาณที่เหมาะสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต จะมีประสิทธิภาพเหมือนใช้ปูนซีเมนต์ถึง 3 หรือ 4 เท่า เช่น ใช้ซีลิกาฟุ่ม 1 กก. แทนที่ปูนซีเมนต์ 3 หรือ 4 กก. ในคอนกรีตแต่ยังคงให้คอนกรีตที่มีกำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วันที่เท่ากันเพื่อให้เห็นภาพของการใช้ซีลิกาฟุ่มในคอนกรีต ขอยกตัวอย่าง ส่วนผสมคอนกรีตของ R.D. Hooton ที่ตีพิมพ์ใน ACI Material Journal No. 90, March-April

# วารสารคอนกรีต

## TCA e-magazine



1993 ที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 15 และ 20 ของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ + ซิลิกาฟูม) โดยมีผลการทดลองตามตารางที่ 3 ในการทดลองของ Hooton พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมแทนที่ในปูนซีเมนต์มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วันค่อนข้างมาก กล่าวคือคอนกรีตธรรมดา (ไม่มีซิลิกาฟูม) มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 55.6 MPa แต่เมื่อใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ 10 (ส่วนผสมที่ 2), ร้อยละ 15 (ส่วนผสมที่ 3), และร้อยละ 20 (ส่วนผสมที่ 4) ทำให้กำลังอัดมีค่าเป็น 70.7 MPa, 75.2 MPa, และ 74.2 MPa ตามลำดับ แต่คอนกรีตเหล่านี้เมื่อปล่อยให้มียุครบ 5 ปี กลับพบว่าคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมมากๆ (ร้อยละ 20) มีค่ากำลังอัดลดลง กล่าวคือมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 70.3 MPa. ส่วนที่มีซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และ 15 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 79.6 MPa และ 68.6 MPa ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตที่ไม่มีซิลิกาฟูมกลับมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มจาก 55.6 MPa ที่อายุ 28 วันมาเป็น 86.0 MPa ที่อายุ 5 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 10 ของวัสดุประสานจะให้ค่ากำลังที่ดีทั้งที่อายุ 28 วัน และ 5 ปี

### สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ชั้น 3 อาคารสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย 487 รามคำแหง 39 ถ.รามคำแหง แขวงพลับพลา เขตวังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310  
โทรศัพท์ 0-2935-6539 โทรสาร 0-2935-6538 Email : thaitca@gmail.com Homepage : <http://www.thaitca.or.th>

### ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีและไม่มีซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนผสม

ส่วนผสมที่	อัตราส่วนผสม (kg/m <sup>3</sup> )					สาร ลดน้ำ พิเศษ (ml/kg CM)	ค่า ยุบ ตัว (mm)	กำลัง อัดที่ 28 วัน (MPa)	กำลังดึง ผ่าซีก ที่ 28 วัน (MPa)
	ปูนซีเมนต์	ซิลิกา ฟุ่ม	ทราย	หิน	น้ำ				
1	401	0	729	1211	141	16.1	75	55.6	5.2
2	361	40	725	725	141	18.2	75	70.7	6.3
3	341	60	719	719	140	21.4	60	75.2	6.2
4	320	80	716	716	139	26.2	60	74.2	4.6

การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมี จากการวิจัยพบว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มในคอนกรีตช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต, การแทรกซึมของคลอไรด์ รวมถึงการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำเค็ม (น้ำทะเล) ด้วย เหตุที่การกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีข้างต้นลดลง อาจเนื่องมาจากการที่โครงสร้างของ Pore ในคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กลงนั่นเอง

ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา พบว่า การใช้ซิลิกาฟุ่มจะทำให้การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในคอนกรีตลดลง Malhotra กล่าวว่า การใช้ซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 15 ช่วยลดการขยายตัวของปฏิกิริยาของอัลคาไล-ซิลิกาได้ดีเช่นเดียวกับการใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 30 หรือใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 50 ส่วน Hooton รายงานว่า การใช้ซิลิกาฟุ่ม ถึงร้อยละ 20 จะลดการขยายตัวได้มากกว่าการใช้ซิลิกาฟุ่ม ที่ร้อยละ 5, 10, หรือ 15 และการใช้เพียงร้อยละ 10 ก็เพียงพอที่จะลดปัญหาการขยายตัวของปฏิกิริยาของอัลคาไล-ซิลิกาได้

การแข็งตัวและละลายของน้ำสลักกัน การใช้ซิลิกาฟูมจะเพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของ น้ำสลักกัน ได้ดีกว่ากรณีที่ไม่มีซิลิกาฟูม ซึ่งอาจเนื่องมาจากการที่ค่าซึมผ่านน้ำต่ำและ โครงสร้างของ Pore ที่เล็กลง จึงทำให้น้ำที่ค้างอยู่ภายในมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของคอนกรีตทั่วไป

### สรุป

ในปัจจุบันพบว่าซิลิกาฟูมนิยมใช้ในการทำคอนกรีตกำลังสูงและเพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีตเป็นหลัก สิ่งที่ควรระมัดระวังให้มากคือการผสมซิลิกาฟูมในคอนกรีตควรมีความสม่ำเสมอ ตลอดทั่วกัน ควรทำการตรวจสอบว่าซิลิกาฟูมสามารถใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษได้ดีเพียงใด เพื่อที่จะได้ไม่ต้องใช้ปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตมากเกินไป ข้อสำคัญอีกข้อหนึ่งคือควรทำการตรวจสอบทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย เพราะ ราคาของซิลิกาฟูมมีราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์มากเพราะยังไม่สามารถผลิตขึ้นใช้ ได้ภายในประเทศ กล่าวคือในสหรัฐอเมริกาพบว่าราคาของซิลิกาฟูมมีราคาสูงกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา ราว 1 ถึง 3 เท่าแต่ในประเทศไทยมีราคาต่างกันเกือบ 15 ถึง 20 เท่า นอกจากนี้พึงระลึกเสมอว่า ซิลิกาฟูมเป็นผลพลอยได้ ซึ่งในอดีตก่อนที่จะมีการศึกษาเพื่อนำมาใช้งานได้นั้น ซิลิกาฟูมก็คือขยะหรือของเสียที่ต้องนำไปกำจัดทิ้ง เสียทั้งค่าขนส่งและค่าทิ้งจำนวนมาก แต่ขณะนี้ซิลิกาฟูมเป็นวัสดุที่ขายได้ และขายในราคาแพงมากด้วย ส่วนวิศวกรไทยของเรา (รวมทั้งผู้เขียนด้วย) ยังคงเป็นผู้ใช้(ซิลิกาฟูม-ขยะ-ผลพลอยได้) และผู้รับเอาเทคโนโลยีของชาวบ้านมาใช้ได้อย่างได้ผลและซื้อสัตย์อย่างเหนียวแน่น

หมายเหตุ บทความนี้คัดมาจาก โยธาสาร ฉบับเดือน ตุลาคม 2542