

บทที่ 2

คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม

2.1 ซิลิกาฟูม

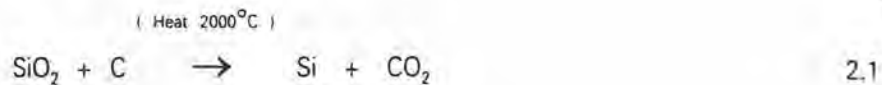
ซิลิกาฟูมเป็นสารปอซโซลานซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเฟอร์โรซิลิกอน (Ferro-silicon) และซิลิกอน (Silicon) ในอดีตนั้นซิลิกาฟูมเป็นของเสียที่ต้องกำจัดทิ้งแต่ในปัจจุบันเป็นที่ประจักษ์ชัดแล้วว่า ซิลิกาฟูมเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษที่มีค่าต่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย เช่น อุตสาหกรรมปุ๋ย , อุตสาหกรรมพลาสติก และในอุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีต เหตุผลที่นำสารปอซโซลานดังกล่าวมาใช้ นอกเหนือจากการขจัดปัญหาของมลภาวะแล้วยังให้คอนกรีตที่มีความทนทานต่อสภาวะสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงได้เช่น น้ำทะเล และ สารเคมี เป็นต้น ซึ่งการปรับปรุงคอนกรีตโดยใช้สารปอซโซลานผสมร่วมกับซีเมนต์ให้ผลที่น่าพอใจในหลายแง่

การศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมที่มีต่อคอนกรีตจะพิจารณาทั้งในสภาพคอนกรีตสดเกี่ยวกับความสามารถทำงานได้และในสภาพคอนกรีตแข็งตัวเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติเกี่ยวกับความทนทานของคอนกรีต ผลของซิลิกาฟูมต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตเกิดได้จาก

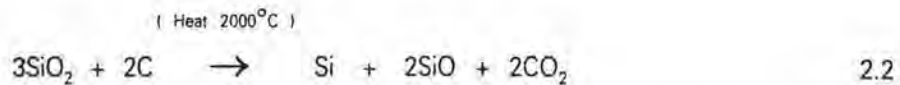
- ผลการอุดช่องว่างของอนุภาค (Microfiller Effect) ด้วยซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า ดังนั้นเมื่อผสมซิลิกาฟูมกับซีเมนต์ อนุภาคของซิลิกาฟูมสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ได้และส่งผลให้ลดช่องว่างภายในคอนกรีตได้หรืออีกนัยอาจกล่าวได้ว่าขนาดอนุภาคของซิลิกาฟูมมีส่วนทำให้ซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้นโดยการแทนที่น้ำภายในช่องว่างของซีเมนต์หรือคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2

- ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Effect) จากที่อนุภาคของซิลิกาฟูมมีโครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัส(Amorphous) จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากและจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำได้คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(C-S-H) ซึ่งเป็นตัวประสานที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับ C-S-H ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

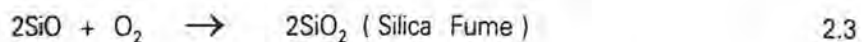
กรรมวิธีการผลิตซิลิกาฟูม จากขบวนการผลิต Silicon และ Ferro-silicon Alloy ซึ่งประกอบด้วยวัตถุดิบคือ หินควอร์ต ถ่านและเหล็ก หลอมรวมกันด้วยความร้อนประมาณ 2000°C จะเกิดปฏิกิริยา 2 แบบ คือ



และ



ปฏิกิริยาแบบแรกให้ซิลิกอน ส่วนปฏิกิริยาแบบหลังจะให้ทั้งซิลิกอนและซิลิกอนโมโนออกไซด์ ซึ่งเป็นต้นตอของซิลิกาฟุ้ง¹⁴⁾ เพราะไอของซิลิกอนโมโนออกไซด์ (SiO) ลอยตัวขึ้นที่สูงและเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศเกิดปฏิกิริยา



ผลที่ได้จากปฏิกิริยาเป็นซิลิกาฟุ้งซึ่งมีรูปร่างทรงกลมขนาดเล็กมากประมาณ 1/100 เท่าของเม็ดซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 0.15 μm

คุณสมบัติของซิลิกาฟุ้งจากขบวนการผลิตในแหล่งเดียวกันจะมีความผันแปรด้านองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก เพราะวัตถุดิบในขบวนการผลิตค่อนข้างบริสุทธิ์และมีสารเจือปนน้อย

คุณลักษณะพิเศษของซิลิกาฟุ้ง คือ รูปร่างอนุภาคเป็นทรงกลม (Spherical) ขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 0.15 μm ดังได้เปรียบเทียบในรูปที่ 2.3 มีพื้นที่ผิวสัมผัสเฉพาะ (Specific Surface Area) ระหว่าง 15 m^2/g ถึง 20 m^2/g แต่ส่วนใหญ่จะมีค่าประมาณ 20 m^2/g วัดด้วยวิธี BET - Method น้ำหนักจำเพาะ (Specific Weight) มีค่าประมาณ 2.2 g/cm^3 โดยที่ความหนาแน่นแบบหลวม (Bulk Density) ประมาณ 0.2 g/cm^3 และความหนาแน่นแบบอัดแน่น (Compacted Density) มีค่าประมาณ 0.6 g/cm^3

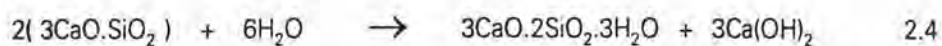
สีของซิลิกาฟุ้งส่วนใหญ่จะมีสีเทาดำ โดยที่ความเข้มของสีตามขบวนการผลิต และส่วนประกอบทางเคมีจะแปรผันตามโลหะแม่ที่ผลิตเช่น Silicon Metal หรือ Ferro-silicon พบว่าซิลิกาฟุ้งที่ได้จะมีปริมาณของซิลิกา (SiO_2) สูงมากประมาณ 85 - 98 % และมีส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O ค่อนข้างน้อยดังแสดงในตาราง 2.1¹²⁶⁾

2.2 ปฏิกิริยาทางเคมีของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ้ง

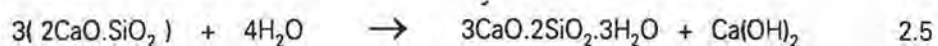
ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) หรือส่วนประกอบทางเคมีเป็น $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ และไดแคลเซียมซิลิเกต

(C₂S) ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีเป็น 2CaO.SiO₂ รวมกันประมาณ 70 - 80 % ซึ่งจะเป็นตัวที่ขี้บ่งเกี่ยวกับกำลังของซีเมนต์ ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาจะประกอบด้วยคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) มีส่วนประกอบทางเคมีเป็น 3CaO.2SiO₂.3H₂O ประมาณร้อยละ 50 - 60 โดยปริมาตร คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ประมาณร้อยละ 20 - 25 โดยปริมาตร คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เพราะมีปริมาณสูงสุดซึ่งเป็นอนุภาคเล็ก ๆ เป็นผลึกที่หยาบให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคและเรซินให้เกิดกำลังต่อน้ำคอนกรีต

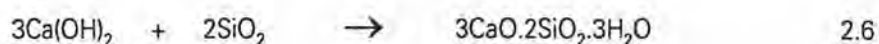
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃S เขียนเป็นสมการเคมี คือ



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₂S เขียนเป็นสมการเคมี คือ



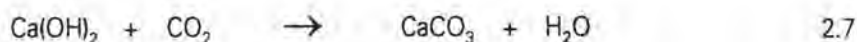
ซิลิกาฟูมโดยคุณสมบัติของสารปอซโซลานตัวมันเองไม่อาจเชื่อมประสานแต่สามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์และเกิดเป็นตัวเชื่อมประสานได้ ดังนั้นถ้าใส่วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมคอนกรีตก็จะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ให้สารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับ C-S-H จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃S และ C₂S ปฏิกิริยาอันนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งเขียนเป็นสมการทางเคมีได้คือ



จากปฏิกิริยาอันนี้ชี้ชัดว่าได้มีการใช้คัลเซียมไฮดรอกไซด์จากส่วนของปฏิกิริยาไฮเดรชันไปได้บางส่วนซึ่งตามหลักการ คัลเซียมไฮดรอกไซด์นอกจากจะไม่มีประโยชน์ใด ๆ ต่อคอนกรีตแล้วยังก่อให้เกิดผลเสียกับคอนกรีต¹³⁾ คือ

1. คัลเซียมไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนเป็นผลึกแทรกตัวอยู่ภายในคอนกรีต เมื่อสัมผัสกับน้ำจะถูกชะล้างออกไปก่อให้เกิดช่องว่าง (void) ภายในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีการซึมผ่าน (Permeability) ที่สูงขึ้น

2. คัลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในบรรยากาศที่ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปทำให้เกิดคัลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ดังปฏิกิริยาทางเคมี



ก่อให้เกิดพฤติกรรมที่เรียกว่าคาร์บอนเนชัน (Carbonation) จะส่งผลเสียในการเปลี่ยนขนาดและปริมาตรของคอนกรีตเรียกว่า “ Carbonation Shrinkage ”

3. คัลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เกิดการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาซัลเฟต

4. คัลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยว (Bond Strength) ระหว่างซีเมนต์เฟสต์กับมวลรวมหยาบ (Aggregate) กล่าวคือคัลเซียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนเป็นผลึกในบริเวณผิวระหว่างซีเมนต์เฟสต์กับมวลรวมทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงได้

ดังนั้นการใส่ซิลิกาฟุ่มเข้าไปในคอนกรีตนอกจากจะทำให้ปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ลดน้อยลงจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ได้คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตแล้วยังทำให้ผลกระทบดังกล่าวข้างต้นให้น้อยลงด้วย

2.3 อิทธิพลของซิลิกาฟุ่มต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด

2.3.1 ลักษณะทั่วไปของคอนกรีตสด

เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีอนุภาคเล็กกว่าซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า ดังนั้นการใส่ซิลิกาฟุ่มร่วมกับซีเมนต์จะช่วยปรับปรุงการกระจายอนุภาคของซีเมนต์โดยซิลิกาฟุ่มจะแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ ทำให้แรงดึงดูดระหว่างมวลของทั้งระบบคือ ซีเมนต์ + ซิลิกาฟุ่ม เพิ่มขึ้นเพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคทั้งระบบเพิ่มขึ้นส่งผลให้เนื้อซีเมนต์เกาะตัวกันดีขึ้น นอกจากนี้การที่อนุภาคของซิลิกาฟุ่มแทรกตัวอยู่ระหว่างซีเมนต์ยังช่วยลดอัตราการไหลของของเหลวภายในซีเมนต์เฟสต์ทำให้เนื้อคอนกรีตมีความหนืดสูงขึ้นช่วยลดการแยกของคอนกรีต ผลของซิลิกาฟุ่มต่อลักษณะเนื้อของคอนกรีตสดดังกล่าวมีประโยชน์ในงานที่สำคัญ ๆ เช่น งานเทคอนกรีตใต้น้ำ , งาน Shotcrete และในงานคอนกรีตบีม เป็นต้น

2.3.2 ความสามารถทำงานได้ (Workability)

ความสามารถทำงานได้เป็นคุณสมบัติหลักของคอนกรีตสด กล่าวคือพลังงานรวมที่จะเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคที่จะก่อให้เกิดการอัดแน่นของคอนกรีตอย่างสมบูรณ์ หมายถึงการที่คอนกรีตสดสามารถเทเข้าแบบหล่อได้ดี ทำให้แน่นตัวง่ายและปราศจากรูโพรงต่าง ๆ กล่าวคือ ซีเมนต์

เพลสต์สามารถแทรกบรรจุได้เต็มช่องว่างระหว่างวัสดุมวลผสม คอนกรีตสามารถโอบหุ้มเหล็กเสริมได้อย่างดี และไม่มีการแยกตัวของส่วนผสมในเนื้อคอนกรีต

การใส่ซิลิกาฟูมในซีเมนต์จะทำให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตลดลงโดยที่ ค่าการยุบตัว และการไหลจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใส่ซิลิกาฟูม ด้วยขนาดอนุภาคของซิลิกาฟูมเล็กมากทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมากขึ้น การใส่ซิลิกาฟูมหากจะให้มีความสามารถเท่าเดิมจะต้องใส่น้ำเพิ่มเติมในคอนกรีต แต่การใส่น้ำเพิ่มเติมเพื่อรักษาความสามารถทำงานได้นั้นจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ของซิลิกาฟูมได้เต็มที่ เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มจะเป็นการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ซึ่งจะมีผลเสียต่อกำลังอัดของคอนกรีต ดังนั้นการรักษาความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตเมื่อใส่ซิลิกาฟูมควรพิจารณาใส่สารเคมีลดน้ำควบคู่ด้วยเสมอ

2.4 อิทธิพลของซิลิกาฟูมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็ง

2.4.1 กำลังรับแรงอัด

กำลังอัดของคอนกรีต ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 อย่าง คือ กำลังของมอร์ตาร์ , กำลังของมวลรวม (Aggregate) และกำลังของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์^{13,27} โดยปกติมวลรวมส่วนมากจะเชื่อมต่อกับปฏิกิริยาเคมีและมีความแข็งแรงกว่ามอร์ตาร์และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์ ดังนั้นมอร์ตาร์และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์จะเป็นตัวกำหนดกำลังอัดของคอนกรีต การใส่ซิลิกาฟูมเข้าไปในคอนกรีตจะช่วยปรับปรุงกำลังในทั้งสองส่วนอันจะนำมาซึ่งกำลังอัดของคอนกรีตโดยรวม

ตามปกติผิวรอยเชื่อมต่อในซีเมนต์เพลสต์ถือเป็นจุดอ่อนที่สุด ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดกำลังของคอนกรีต ลักษณะของผิวเชื่อมต่อ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 ซึ่งจะเป็นส่วนกำหนดกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพราะคอนกรีตเป็นวัสดุเชิงประกอบ ผิวเชื่อมต่อในซีเมนต์เพลสต์จะทำหน้าที่เป็นเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างเมตริกซ์ของมอร์ตาร์กับอนุภาคของมวลรวม แม้ว่ามอร์ตาร์และมวลรวมจะมีความแข็งแรงแต่แรงยึดเหนี่ยวที่ผิวจะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมแม้จะมีค่าต่ำกว่าและจะแตกหักก่อนเพราะช่องว่างและรอยแตกจั่วบริเวณรอยเชื่อมต่อไม่สามารถถ่ายเทหน่วยแรงจากมอร์ตาร์เข้าสู่มวลรวมได้

อิทธิพลของซิลิกาฟูมต่อกำลังอัดของคอนกรีตนั้นจะช่วยปรับปรุงกำลังอัดของมอร์ตาร์ภายในคอนกรีตและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์ โดยที่กำลังของมอร์ตาร์ขึ้นกับรูพรุนภายในคอนกรีตเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟูมจะสามารถแทรกตัวอยู่ในช่องว่างภายในคอนกรีตได้ ซิลิกาฟูมยังสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับซิลิกาไฮดรอกไซด์ได้ซิลิกาไฮดรอกไซด์ได้ซิลิกาไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น

ช่วยลดปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตากับมวลรวม ดังแสดงในรูป 2.7 และ 2.8

2.4.2 โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะแปรผันโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีต ในคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมจะช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของมอร์ต้าและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ต้าทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น ส่งผลให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากขึ้นตาม จากค่าความเครียด (Strain) เดียวกัน คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมจะมีหน่วยแรง (Stress) ที่สูงขึ้นกว่าคอนกรีตธรรมดาเสมอ

2.4.3 การหดตัวของมอร์ต้าผสมซิลิกาฟูม

การหดตัวจากการสูญเสียน้ำด้วยการระเหยออกจากมอร์ต้าเป็นกลไกของการเกิดการหดตัวเริ่มแรกน้ำอิสระ (Free Water) ในมอร์ต้าจะถูกขับออกมาหลังการผสมซึ่งช่วงนี้ยังไม่เกิดการหดตัว (Shrinkage) แต่เมื่อมีการดูดซับน้ำจากส่วนในออกมามอร์ต้าจะเริ่มหดตัวขึ้น แสดงให้เห็นว่าสาเหตุของการหดตัวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของเจลในมอร์ต้ามากกว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและแร่ธาตุในมอร์ต้า^[29] ตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อการหดตัวได้แก่ ขนาดของมวลรวมในมอร์ต้าหรือคอนกรีต อย่างไรก็ตามความชื้นสัมพัทธ์ยังเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการหดตัวของมอร์ต้าและคอนกรีต ถ้าความชื้นสัมพัทธ์รอบมอร์ต้าและคอนกรีตสูงก็จะทำให้เกิดการหดตัวน้อยกว่าที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

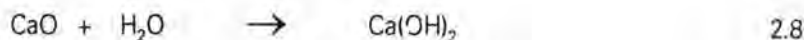
ผลของซิลิกาฟูมที่มีต่อการหดตัวในมอร์ต้ามีแนวโน้มทำให้มอร์ต้าหดตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากซิลิกาฟูมเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำให้มีเพสต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณเพสต์ต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นและเพสต์ในมอร์ต้าเป็นส่วนที่หดตัวจากการสูญเสียน้ำ เมื่อมีเพสต์ต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นทำให้มอร์ต้าเกิดการหดตัวเพิ่มขึ้น

2.4.4 ความคงตัว

ความคงตัวเป็นความสามารถของซีเมนต์เพสต์ , มอร์ต้าหรือคอนกรีต ที่สามารถต้านทานความเค้นภายในที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยไม่เกิดการแตกร้าว หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อส่วนผสมปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้วจะไม่เกิดการขยายตัวของเพสต์ , มอร์ต้า และคอนกรีตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร^[30,31]

การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรมีสาเหตุจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับ Free Lime (CaO_{free}) หรือ Magnesia (MgO_{free}) หรือ ยิบซั่มที่ผสมอยู่ในซีเมนต์ ปกติปฏิกิริยาเหล่านี้จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ดัง

นั้นในการทดสอบจำเป็นต้องเร่งปฏิกิริยาโดยการนำไปอบในเครื่องอบไอน้ำที่มีความดันสูง ปฏิกิริยาของ Free Lime กับน้ำแสดงได้ดังนี้



ผลผลิตของปฏิกิริยา คือ Ca(OH)_2 จะมีปริมาณมากกว่าวัตถุดิบเดิมคือ CaO จึงพยายามดันซีเมนต์เฟสท์ที่แข็งตัวแล้วก่อให้เกิดแรงดันภายในซีเมนต์เฟสท์ทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัวและซำรุดเสียหายได้ ในทำนองเดียวกันปฏิกิริยาของ Magnesia กับน้ำก็จะคล้ายกับ Free Lime ซึ่งผลผลิตของปฏิกิริยา คือ Mg(OH)_2 ทำให้ปริมาณในซีเมนต์เฟสท์เพิ่มขึ้นเกิดผลเสียหายต่อคอนกรีตเช่นเดียวกัน

ผลของซิลิกาฟุ่มต่อความคงตัวของเฟสท์ ส่วนมากไม่ทำให้ความคงตัวของซีเมนต์เฟสท์เสียไป เนื่องจากส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของซิลิกาฟุ่มประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) จำนวนมาก มีส่วนที่เป็น Free Lime (CaO_{free}) และ Magnesia (MgO_{free}) น้อยมาก โอกาสที่ CaO และ MgO จะทำปฏิกิริยากับน้ำหลังจากซีเมนต์เฟสท์แข็งตัวน้อยด้วย

2.5 การหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เฟสท์โดยวิธี TGA

โครงสร้างของไฮเดรตซีเมนต์เฟสท์ประกอบด้วยของแข็งที่เป็นตัวกำหนดบทบาทคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสท์คือ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นตัวอุดประสานซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อกำลังอัดของคอนกรีตและคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีผลเสียต่อคอนกรีตในด้านความคงทน ในการศึกษาเพื่อหาปริมาณของคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ ของโครงสร้างไฮเดรตซีเมนต์เฟสท์เป็นเรื่องที่ค่อนข้างลำบาก แม้ว่าในปัจจุบันจะมีเครื่องมือที่ทันสมัยเช่น เครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งสามารถตรวจพบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้แต่ไม่สามารถหาเป็นปริมาณออกมาได้เนื่องจากคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีโครงสร้างที่ค่อนข้างซับซ้อนและไม่แน่นอน เพราะฉะนั้นในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ณ เวลาใด ๆ ของซีเมนต์เฟสท์นั้นจึงนิยมหาปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นตามเวลามากกว่าเนื่องจากทราบโครงสร้างที่แน่นอน ในขณะที่เดียวกันเมื่อมีคัลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นตามเวลา ก็แสดงว่ามีปริมาณของคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นตามเวลาด้วย ซึ่งวิธีนี้นอกจากจะสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้แล้วยังสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟุ่มได้ โดยดูจากปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลงตามเวลาเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟุ่ม

2.5.1 โครงสร้างของไฮเดรตซีเมนต์เฟสท์

โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มีส่วนประกอบ 3 อย่างคือ ส่วนที่เป็น ของแข็ง , ช่องว่างในเพสต์ (Voids) , และน้ำในไฮเดรตซีเมนต์เพสต์⁽²⁷⁾

1. ของแข็ง ได้แก่ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต, คัลเซียมไฮดรอกไซด์, คัลเซียมซัลโฟลูมิเนต และอนุภาคซีเมนต์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
2. ช่องว่างในเพสต์ ได้แก่ Capillary Voids คือช่องว่างที่ไม่ถูกอุดด้วยส่วนประกอบที่เป็นของแข็งและ Air Voids คือช่องว่างอากาศ
3. น้ำในไฮเดรตซีเมนต์เพสต์ (HCP) น้ำที่อยู่ใน HCP สามารถอยู่ได้หลายรูปแบบ (Form) การแบ่งแยกรูปแบบของน้ำที่อยู่ใน HCP แบ่งโดยดูที่ความยากง่ายในการเคลื่อนย้ายน้ำออกจาก HCP ซึ่งน้ำสามารถออกจาก HCP เมื่อได้รับความร้อน น้ำที่อยู่ใน HCP แสดงในรูปที่ 2.4 และสามารถแบ่งชนิดได้ดังนี้

1. น้ำคาปิลลารี (Capillary Water) คือน้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่กว่า 50 \AA ซึ่งเป็นน้ำที่เป็นอิสระจากอิทธิพลของแรงดึงดูด (Attractive Force) ของของแข็งที่อยู่ในเพสต์ จากพฤติกรรมของน้ำดังกล่าวสามารถแบ่งน้ำคาปิลลารีได้ 2 ชนิด ชนิดที่ 1 คือน้ำที่อยู่ในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 nm เรียกน้ำดังกล่าวว่าน้ำอิสระ (Free Water) เมื่อนำน้ำอิสระออกจากเพสต์แล้วจะไม่ทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลง ส่วนน้ำชนิดที่ 2 เป็นน้ำที่เกิดจากแรงดึงคาปิลลารี (Capillary Tension) ในช่องว่างขนาด $5-50 \text{ nm}$ ซึ่งเมื่อนำน้ำชนิดนี้ออกไปแล้วอาจเป็นสาเหตุทำให้เพสต์เกิดการหดตัว

2. น้ำที่ถูกดูดซับ (Adsorbed Water) คือน้ำที่อยู่ใกล้กับผิวสัมผัสของของแข็งในเพสต์ ซึ่งจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูด (Attractive Force) ของของแข็งที่อยู่ในเพสต์ โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับอยู่รอบ ๆ ผิวสัมผัสของของแข็งในเพสต์ เรียกแรงยึดเหนี่ยวนี้ว่าแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) แรงยึดเหนี่ยวนี้จะมีค่าน้อยลงตามระยะทางระหว่างโมเลกุลของน้ำกับผิวของของแข็ง น้ำประเภทนี้จะถูกขับออกโดยทำให้เพสต์แห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 30 % ซึ่งการสูญเสียน้ำประเภทนี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เพสต์หดตัว

3. น้ำระหว่างชั้น (Interlayer Water) เป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของ C-S-H เนื่องจากโครงสร้างของ C-S-H จะมีลักษณะเป็นชั้น ๆ โดยแรงดึงดูดแต่ละชั้นจะเป็นแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) ที่เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลของน้ำกับ C-S-H แต่ละชั้น น้ำประเภทนี้จะสามารถนำออกจาก HCP ได้โดยการทำให้ HCP แห้งมาก ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 11 % โครงสร้างของ C-S-H จะหดตัวเมื่อสูญเสียน้ำดังกล่าวไป

4. น้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมี (Chemically Water) เป็นน้ำที่เป็นส่วนประกอบของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ (Hydration Product) โดยที่น้ำชนิดนี้ไม่สามารถแยกจากเพสต์ได้

โดยการทำให้แห้งที่ความร้อนต่ำแต่สามารถแยกได้ที่ความร้อนสูง ๆ เช่นการสลายตัวของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็น Hydration Product ได้ CaO กับ น้ำ (H_2O)

2.5.2 หลักการของวิธี Thermogravimetry Analysis (TGA)

หลักการของวิธี Thermogravimetry Analysis (TGA) คือการวิเคราะห์หาสารประกอบและปริมาณของสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา (Sample) โดยการเผาตัวอย่างด้วยอัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสในบรรยากาศไนโตรเจนเพื่อป้องกันซีเมนต์เฟสต์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง อาศัยหลักการที่ว่าสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างจะเกิดการสลายตัวในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ ทำให้น้ำหนักของตัวอย่างที่ทำการทดสอบหายไปในช่วงอุณหภูมินั้น ๆ ซึ่งเครื่องมือทดสอบจะทำการบันทึกน้ำหนักที่หายไปแล้วคำนวณเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้นก่อนเผา

ในการศึกษาโดยวิธี Thermogravimetric Analysis ของ C.J. Fordham และ I.J. Smalley^[28] พบว่า ในโครงสร้างของไฮเดรตซีเมนต์เฟสต์จะประกอบด้วยปฏิกิริยา 6 อย่างด้วยกัน ซึ่งในปฏิกิริยาทั้งหมดนี้มี 4 ปฏิกิริยาที่เป็นปฏิกิริยาที่เอาน้ำออก (Dehydration Reaction) โดยเป็นน้ำที่อยู่ในช่องว่างทั่วไป (Free Water) 1 ปฏิกิริยาและเป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตอีก 3 ปฏิกิริยา ส่วนอีก 2 ปฏิกิริยาที่เหลือเป็นปฏิกิริยาการสลายตัว (Decomposition) คือ ปฏิกิริยาการสลายตัวของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Dehydroxylation Reaction) และ ปฏิกิริยาการสลายตัวของคัลเซียมคาร์บอเนต (Decarbonation Reaction) ซึ่งจากการทดสอบจะแสดงผลเป็นเส้นกราฟที่สำคัญ 2 เส้นคือ

1. เส้นกราฟแสดงน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) ในแต่ละช่วงของอุณหภูมิเรียกว่า TG Curve ซึ่งเส้นกราฟนี้จะแสดง น้ำหนักที่หายไปในแต่ละช่วงของอุณหภูมิมคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้นก่อนทำการทดสอบอันเนื่องมาจากการสลายตัวของสารประกอบที่เป็นส่วนประกอบของตัวอย่างเริ่มต้น

2. เส้นกราฟแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลา ($d(TG)/dt$) เส้นกราฟนี้หาจากอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งในทางคณิตศาสตร์ของเส้น TG Curve ซึ่งแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเทียบกับเวลา ทำให้ทราบการสลายตัวของสารประกอบในแต่ละช่วงอุณหภูมิได้ถูกต้อง จากเส้น $d(TG)/dt$ Curve จะแสดงจุดยอดของอุณหภูมิ (Peak Temperature) ซึ่งแสดงถึงปฏิกิริยาดังกล่าวทั้ง 6 ปฏิกิริยาดังแสดงในตาราง ที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาการสลายตัว (Decomposition Reaction)

Peak	Temperature (°C)	Reaction
1	100	Dehydration of Pore Water
2	180	Dehydration of C-S-H
3	350	Dehydration of C-S-H
4	400	Dehydration of C-S-H
5	600	Dehydroxylation of Ca(OH) ₂
6	780	Decarbonation of CaCO ₃

หมายเหตุ Peak ต่าง ๆ แสดงถึงปฏิกิริยาการสลายตัวของซีเมนต์เฟส Peak ที่ 2 และ 4 จะไม่ปรากฏชัดเจน เนื่องจากอยู่ใกล้กับ Peak ที่ 1 และ 3

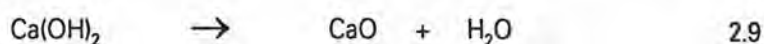
Peak ที่ 1 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำออกของ Pore Water ซึ่งเป็นน้ำอิสระ (Free Water) ที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่สามารถระเหยได้ในอุณหภูมิประมาณ 100 °C

Peak ที่ 2 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำออกของ Capillary Pore Water ซึ่งเป็นน้ำที่เกิดจาก Capillary Tension ในช่องว่างขนาดเล็กในโครงสร้างของ C-S-H

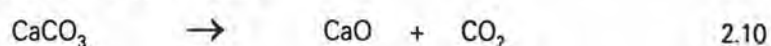
Peak ที่ 3 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำออกของ Adsorbed Water ซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ใกล้กับผิวสัมผัสของของแข็งในโครงสร้างของ C-S-H

Peak ที่ 4 แสดงถึงปฏิกิริยาการเอาน้ำออกของ Interlayer Water ซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ในแต่ละชั้นในโครงสร้างของ C-S-H อันเนื่องมาจากว่าโครงสร้างของ C-S-H มีลักษณะเป็นชั้น ๆ

Peak ที่ 5 แสดงถึงปฏิกิริยาการสลายตัวของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) โดยจะสลายตัวได้คัลเซียมออกไซด์และน้ำ ดังนี้คือ



Peak ที่ 6 แสดงถึงปฏิกิริยาการสลายตัวของคัลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) โดยจะสลายตัวได้คัลเซียมออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนี้คือ



2.5.3 การวิเคราะห์และประเมินค่า

ผลการทดสอบจะได้กราฟซึ่งจะรายงานผลออกมาเป็น TG Curve และ DSC Curve ดังแสดงในรูป 2.7 จากการศึกษาของหลาย ๆ คน เช่น V.S. Ramachandran^[5] พบว่าช่วงอุณหภูมิที่คัลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เฟสต์สลายตัวคือ 450 - 550°C , H.G. Midgley^[6] พบว่าช่วงอุณหภูมิที่คัลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เฟสต์สลายตัวคือ 410 - 560°C , B.EL - Jazairi และ J.M. .LLston^[7] พบว่าช่วงอุณหภูมิที่คัลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เฟสต์สลายตัวคือ 440 - 520°C

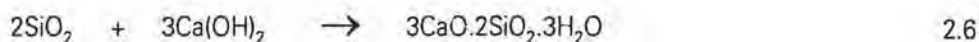
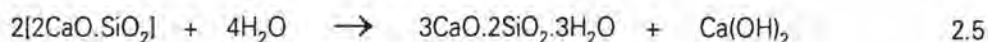
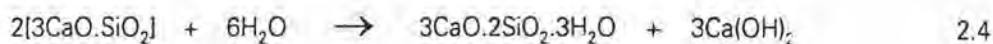
ในการหาปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ในไฮเดรตซีเมนต์เฟสต์โดยวิธี TGA จากปฏิกิริยาการสลายตัวของคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะได้คัลเซียมออกไซด์ซึ่งจะตกตะกอนรวมอยู่ในตัวอย่างที่ทดสอบ โดยน้ำหนักในส่วนนี้จะไม่หายไปไหน และได้น้ำซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จากการทดสอบ TGA จะระเหยออกไปทำให้น้ำหนักในส่วนนี้หายไป สามารถเทียบโมลโมเลกุลของน้ำที่ระเหยไปกับโมลโมเลกุลของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สลายตัวก็จะได้น้ำหนักของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีอยู่ในไฮเดรตซีเมนต์เฟสต์ จากการศึกษาพบว่าปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สลายตัวไปมีค่าเท่ากับปริมาณน้ำที่วัดได้คูณด้วยค่าคงที่เท่ากับ 4.11

2.6 การหาค่าปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดในซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม

ในการศึกษาเพื่อหาปริมาณของคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ ของโครงสร้างไฮเดรตซีเมนต์เฟสต์นั้นเป็นเรื่องยาก แม้ว่าในปัจจุบันจะมีเครื่องมือที่ทันสมัยซึ่งสามารถตรวจพบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้ แต่ไม่สามารถหาเป็นปริมาณออกมาได้เนื่องจากคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีโครงสร้างที่ค่อนข้างซับซ้อนและไม่แน่นอน เพราะฉะนั้นจึงได้ทำการทดสอบหาคัลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วคำนวณย้อนกลับไปหาปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาทางเคมีของซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม โดยมีข้อสมมุติฐานดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะเกิดจากสารประกอบ 2 ชนิดคือไตรคัลเซียมซิลิเกตซึ่งมีปริมาณ 52 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และไดคัลเซียมซิลิเกตซึ่งมีปริมาณ 20 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์
2. ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะประกอบด้วยคัลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสูตรเคมีเป็น Ca(OH)_2 และคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) โดยกำหนดให้สูตรเคมีเป็นดังนี้คือ $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
3. เนื่องจากซิลิกาฟูมมีส่วนประกอบทางเคมีคือ SiO_2 ค่อนข้างมากประมาณ 90 % เพราะฉะนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ได้คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะเกิดจากสารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่านั้น

กำหนดให้สมการเคมีของปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรคัลเซียมซิลิเกตและไดคัลเซียมซิลิเกตเป็นดังสมการที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ ส่วนสมการเคมีของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมเป็นดังสมการที่ 2.6 ดังนี้



โดยที่สารประกอบต่าง ๆ มีมวลโมเลกุล (Molecular Weight , MW.) คำนวณได้ดังรายละเอียดในภาคผนวกดังนี้คือ

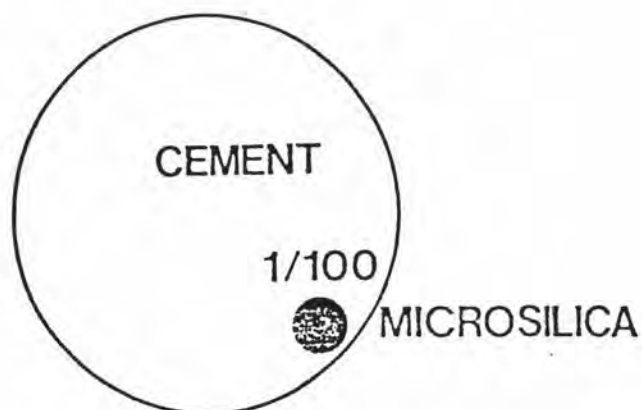
$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	มี MW. = 342
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	มี MW. = 228
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	มี MW. = 172
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	มี MW. = 74
H_2O	มี MW. = 18
SiO_2	มี MW. = 60

เมื่อใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 จะมีสารไตรคัลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) 52 % และสารไดคัลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) 20 % โดยน้ำหนัก จากสมการที่ 2.4 โดยการดุลสมการเคมีเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะได้สารคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เท่ากับ $(52 \times 342) / (2 \times 228) = 39\%$ ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ 2.5 เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะได้สารคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเท่ากับ $(20 \times 342) / (2 \times 172) = 19.88\%$ ซึ่งโดยปกติปฏิกิริยาไม่มีทางเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์เพราะฉะนั้นในการคำนวณจะดูว่าในส่วนผสมเกิดคัลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่าใด จากนั้นเทียบโมลโมเลกุลเพื่อหาว่าจะเกิดคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในปริมาณเท่าใด โดยใช้สมการที่ 2.4 และ 2.5 ซึ่งปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันในแต่ละส่วนผสมสามารถหาได้โดยอาศัยข้อมูลปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้จากซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ใส่ซิลิกาฟูม แล้วเทียบสัดส่วนซีเมนต์ที่มีอยู่ในแต่ละส่วนผสม

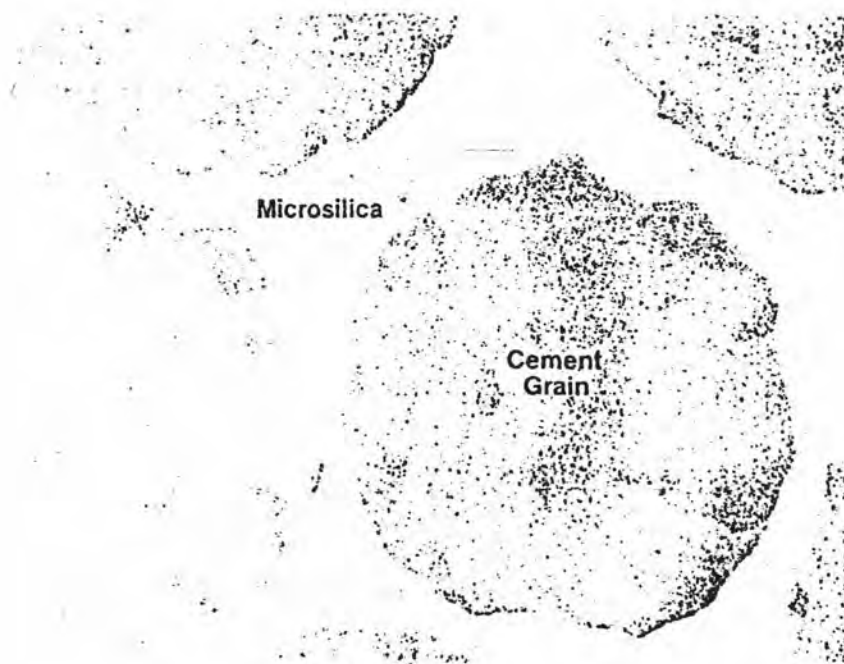
เมื่อผสมซิลิกาฟุ่มแทนที่ซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกตามสมการ 2.6 ก็สามารถหาปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้ โดยคำนวณหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่หายไปอันเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก แล้วไปเทียบโมลโมเลกุลเพื่อหาว่าเมื่อคัลเซียมไฮดรอกไซด์หายไปแล้วจะเกิดคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในปริมาณเท่าใด ซึ่งรายละเอียดการคำนวณทั้งหมดแสดงในหัวข้อ 4.3

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟุ่มเทียบกับของซีเมนต์

สารประกอบ	Cement	Silica Fume
SiO ₂	21.3 %	92-98 %
Al ₂ O ₃	4.5 %	0.5 %
Fe ₂ O ₃	4.0 %	2.1 %
MgO	2.4 %	0.3 %
CaO	63.1 %	0.8 %
Na ₂ O	0.1 %	0.1 %
K ₂ O	1.2 %	1.0 %
SO ₃	2.2 %	0.2 %



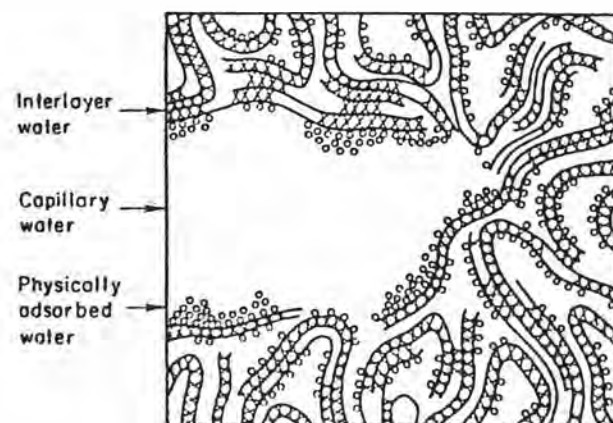
รูปที่ 2.1 ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ่มเทียบกับของซีเมนต์



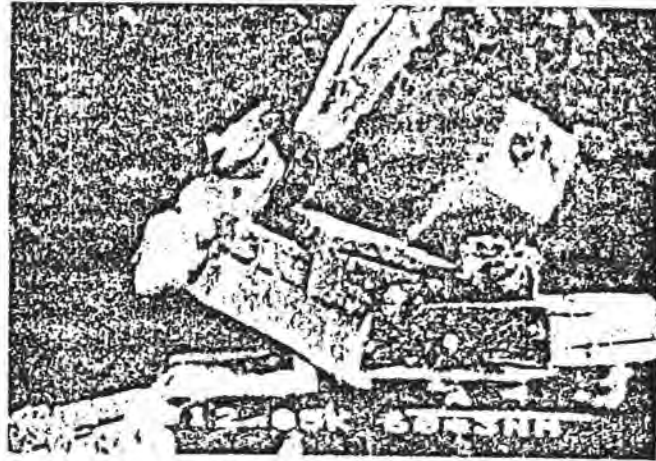
รูปที่ 2.2 การแทรกตัวของอนุภาคซิลิกาฟุ่มระหว่างเม็ดซีเมนต์



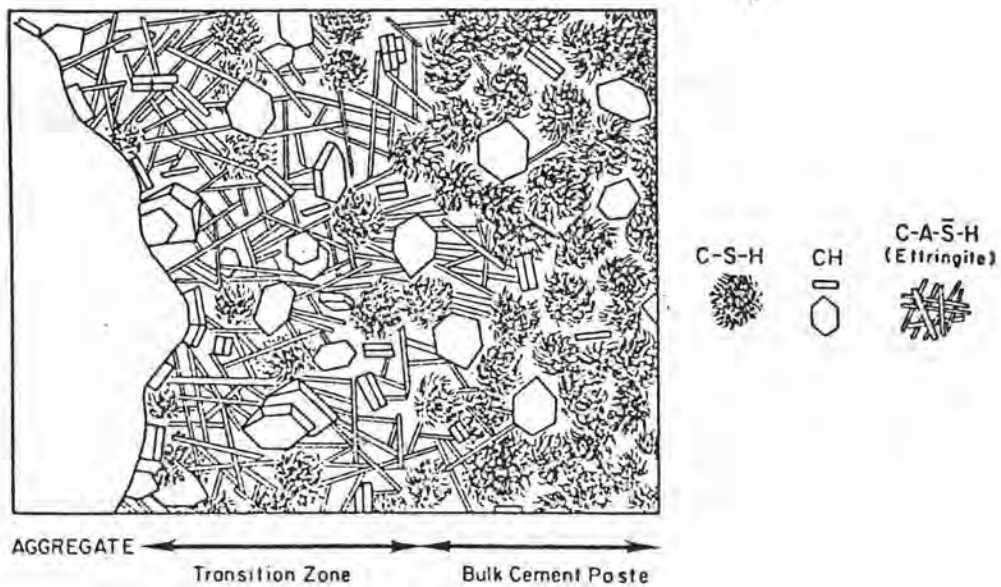
รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปร่างของซีลิกาฟุ้งจากเครื่องขยายอิเล็กตรอนไมโครสโคป



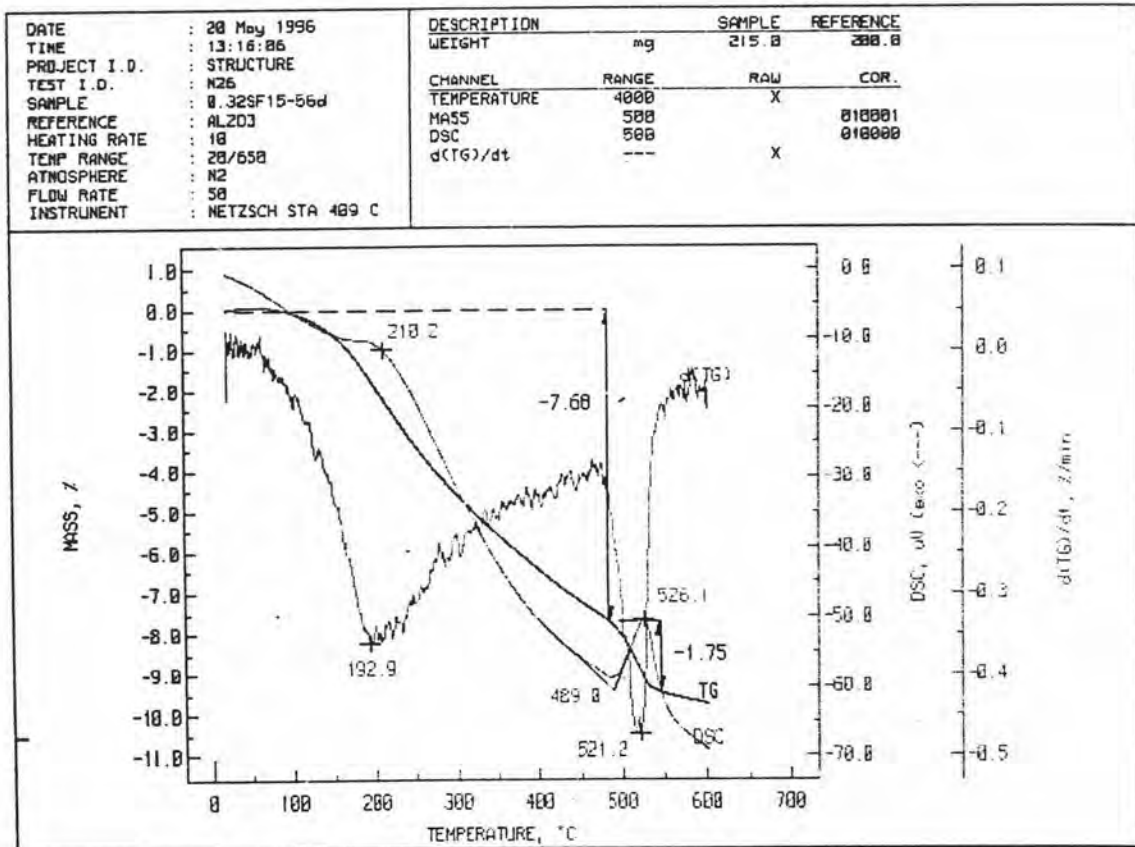
รูปที่ 2.4 ลักษณะการกระจายของน้ำในซีเมนต์เฟส



รูปที่ 2.5 ผลึกของซิลิเกตไฮดรอกไซด์บริเวณผิวเชื่อมต่อในซีเมนต์เฟส



รูปที่ 2.6 การจำลองผิวเชื่อมต่อระหว่างซีเมนต์เฟสในคอนกรีต



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงผลการทดสอบด้วยวิธี TGA