บทที่ 2
คอนกรีตสมรรถนะสูงและการทดสอบ

2.1. คอนกรีตสมรรถนะสูง

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้แพร่หลายในวงการก่อสร้างซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต โดยนำส่วนผสมต่างๆเหล่านี้มาผสมเข้ากัน โดยแต่ละส่วนในการผสมสามารถเรียกชื่อเฉพาะได้ ดังแสดงในแผนภูมิรูปที่ 2.1

คอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างในปัจจุบันมีการพัฒนาเพื่อให้เกิดประโยชน์และเหมาะสมกับการทำงาน ได้มีการพัฒนาโดยเริ่มจากคอนกรีตทั่วไป พัฒนาต่อมาเป็น คอนกรีตกำลังสูง และพัฒนามาเป็น "คอนกรีตสมรรถนะสูง" โดยที่คอนกรีตสมรรถนะสูง หมายถึงคอนกรีตที่มีการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาพเหลวและสภาพแข็งตัว กล่าวคือในสภาพเหลวความสามารถในการทำงานได้สูงโดยมีความข้นเหลวและการไหลตัวสูงตามกำหนด, ปราศจากการแยกตัวและการเยิ้มของส่วนผสม, ปริมาณช่องว่างในเนื้อคอนกรีตต่ำ ส่งผลต่อสภาพแข็งตัวในด้านกำลัง โดยมีการพัฒนากำลังอัดสูงในช่วงต้น, กำลังอัดและคุณสมบัติอื่นเช่น กำลังดึง, กำลังดัด, โมดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้น นอกจากนั้นยังมีผลในการรักษาเสถียรภาพเชิงมิติคงที่, การหดตัวต่ำ, การซึมผ่านต่ำ, เพิ่มความทนทานและปราศจากผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม

คุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ได้รับการพัฒนา เริ่มเข้ามามีบทบาทในวงการก่อสร้างในประเทศไทย เนื่องจากการก่อสร้างปัจจุบันมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนของโครงสร้างมากขึ้น ปัจจุบันเริ่มมีการใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในสภาพเหลว โดยเน้นให้มีค่าการยุบตัวที่สูงและปราศจากการแยกตัวของมวลรวม เพื่อเพิ่มความสามารถในการเทลงแบบให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยรู้จักกันในชื่อ คอนกรีตไหล (Flow Concrete) ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติส่วนหนึ่งของคอนกรีตสมรรถนะสูงในสภาพคอนกรีตเหลว

ในขบวนการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติโดยตรง วัตถุดิบที่สำคัญในขบวนการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงคือ

2.2. วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงมีความสำคัญต่อส่วนผสมและคุณสมบัติของคอนกรีตโดยตรง วัตถุดิบที่สำคัญ ได้แก่

2.2.1. ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตไม่ว่าจะในสภาพเหลว เช่น การยึดเกาะกับมวลรวม และในสภาพแข็งตัว เช่นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งกำลังของคอนกรีตส่วนใหญ่จะขึ้นกับคุณภาพของซีเมนต์เพสต์ที่จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่นปราศจากโพรงอากาศ โดยปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นตัวแปรโดยตรงกับกำลังตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ในงานวิจัยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I ตามมาตรฐานของ ASTM C 150 หรือมอก. 15 - 2523

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดจากขบวนการเผาวัตถุดิบที่สำคัญ 2 ประเภทคือ สารคัลเซียม จำพวก หินปูน, ปูนขาว, ดินสอพองและสารประกอบของซิลิกา, อลูมินั่ม จำพวก หินดินดาน ได้สารประกอบออกไซด์ที่สำคัญ แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ ออกไซด์หลักได้แก่ CaO, SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมประมาณ 90 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์และออกไซด์รองได้แก่ MgO, Na_2O, TiO_2, P_2O_5 โดยที่ออกไซด์หลักในปูนซีเมนต์จะรวมตัวในปฏิกิริยาการผลิตทำให้เกิดสารประกอบหลักที่สำคัญคือ

-ไตรคัลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) สูตร $3CaO.SiO_2$ ชื่อย่อ C_3S มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม มีคุณสมบัติเมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2 - 3 ชั่วโมงมีการพัฒนากำลังมากในช่วงต้นและเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดความร้อนปานกลางโดยมีปริมาณประมาณ 35 - 55 %

-ไดคัลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) สูตร $2CaO.SiO_2$ ชื่อย่อ C_2S มีลักษณะกลมมีหลายรูปแบบ มีคุณสมบัติยึดเกาะเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดความร้อนต่ำ การพัฒนากำลังไปเป็นอย่างช้า แต่ในระยะยาวกำลังใกล้เคียงกับ C_3S โดยมีปริมาณประมาณ 15 - 35 %

-ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) สูตร $3CaO.Al_2O_3$ ชื่อย่อ C_3A มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน ทำปฏิกิริยาทันทีกับน้ำทำให้เกิดการก่อตัวทันที (Flash Set) ส่งผล

ให้เกิดความร้อนสูง การป้องกันกระทำโดยการใส่ยิมซั่มลงในระหว่างการบดปูนซีเมนต์ มีปริมาณประมาณ 15 - 35 %

-เตตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite) ชื่อย่อ C_4AF สูตร $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ทำปฏิกิริยารวดเร็วแต่ค่ากำลังอัดค่อนข้างต่ำ มีค่าประมาณ 5 - 10 %

อิทธิพลของออกไซด์หลักต่อคุณสมบัติของส่วนประกอบหลักของปูนซีเมนต์ทั้ง 4 ได้สรุปในตารางที่ 2.1

นอกจากนั้นสารประกอบรองที่สำคัญได้แก่ ยิมซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) ทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ โดยปริมาณที่ใช้ต้องเหมาะสม เพื่อให้ซีเมนต์เพล์สเกิดกำลังอัดสูงและเกิดการหดตัวน้อยที่สุดโดยมีปัจจัยขึ้นอยู่กับ อัลคาไลท์ออกไซด์ (Na_2O และ K_2O), ปริมาณ C_3A และความละเอียดของปูนซีเมนต์, แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น MgO จะเข้าทำปฏิกิริยาทำให้เกิดปริมาตรเพิ่มขึ้นซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว, อัลคาไลท์ออกไซด์ ทำให้เกิดผลในกรณีที่ใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์เกิดการขยายตัวทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหาย ยากต่อการแก้ไข

ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ 70 - 80 % เป็นสารประกอบของไตรคัลเซียมซิลิเกตและไดคัลเวียมซิลิเกต โดยมีสารประกอบทางเคมีของออกไซด์หลักสำคัญของคัลเซียม (CaO) ประมาณ 60 % และซิลิกา (Si_2O) ประมาณ 20 % ซึ่งจะมีผลต่อกำลังในปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์ โดยขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาทำให้ได้ส่วนประกอบ 2 ส่วนที่สำคัญ แสดงในสมการทางเคมี

$$2(3CaO\ SiO_2) + 6H_2O \Rightarrow 3CaO\ SiO_2H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2.1.)$$

$$2(2CaO\ SiO_2) + 4H_2O \Rightarrow 3CaO\ SiO_23H_2O + Ca(OH)_2$$

1.คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) สูตร $3CaO\ SiO_23H_2O$ ซึ่งเป็นสารประกอบที่เป็นสารประสาน

2.คัลเซียมไฮดรอกไซด์ สูตร $Ca(OH)_2$ หรือ Free Lime ซึ่งเป็นสารประกอบอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อกับสารประกอบอื่นที่เหมาะสมในส่วนผสมของสารปอซโซลาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในการผลิตต้องมีคุณภาพสม่ำเสมอ เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดคุณสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์คุณสมบัติหลักที่ต้องพิจารณาประกอบด้วย

-ความละเอียด (Fineness) เป็นคุณสมบัติทางกายภาพมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ

-การก่อตัวและการแข็งตัว (Setting and Hardening Process) เป็นการพิจารณาคุณสมบัติของการเปลี่ยนสถานะ

-ความอยู่ตัว (Soundness) แสดงความอยู่ตัวโดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของปูนซีเมนต์

-กำลัง (Strength) เป็นตัวชี้ลักษณะกำลังรับแรงของคอนกรีต แต่ไม่สามารถคาดหมายถึงกำลังของคอนกรีตได้ทั้งหมดเนื่องจากคอนกรีตมีส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อคุณสมบัตินี้

-การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Igition) ตรวจสอบคุณภาพปูนซีเมนต์ที่เก็บไว้ยังสามารถนำมาใช้ได้หรือไม่

-ความถ่วงจำเพาะ (Speccific Gravity) เป็นคุณสมบัติที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM. แสดงในตารางที่ 2.2

2.2.2. มวลรวม

หินย่อยหรือหินโม่,กรวด และทราย รวมเรียกว่า มวลรวม เป็นสารประเภทวัสดุเฉื่อยที่ไม่เกิดผลต่อปฏิกิริยาในคอนกรีต โดยมวลรวมที่ใช้สามารถหาได้จากธรรมชาติได้แก่ หินอัคนี,หินชั้นและหินแปร หรือเกิดจากการผลิตขึ้นโดยมนุษย์ เนื้อของคอนกรีตทั่วไปมวลรวมจะเป็นวัสดุหลักโดยมีปริมาตรประมาณ 75 - 80 % ของน้ำหนักคอนกรีต การเลือกใช้มวลรวมมีความสำคัญที่จะช่วยทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้นรวมทั้งส่วนผสมของคอนกรีต โดยคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานทั้งในด้านสะอาด, ความแข็งแกร่ง, ความทนทาน โดยไม่ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพต่อคอนกรีต โดยมวลรวมที่ใช้ในการผลิตสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) หมายถึง วัสดุ(ทราย)ที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือสามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ # 4 แต่ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มม. ได้แก่ ทราย

- มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) หมายถึง วัสดุที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. หรือไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ # 4 ได้แก่ กรวดและหินย่อยหรือหินโม่ เป็นต้น.

มวลรวมที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติก่อนผลิต ได้แก่

-ความแข็งแกร่ง (Strength) มวลรวมจะต้องมีความสามารถรับน้ำหนักกดไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการของคอนกรีต หินที่ใช้มีค่าความแข็งแกร่งประมาณ 700 - 3500 กก./ตร.ซม.,

-รูปร่างและลักษณะผิว (Partical Shape and Surface Texture) มีความสำคัญต่อการควบคุมความสามารถทำงานได้ (รูปที่ 2.2)

-ความทนทานต่อการสึกกร่อน (Abrasion Resisitance) เป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาความคงทนต่อการกระแทกและการเสียดสี โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีลอสแองเจลิส Los Angeles Abrasion Test (รูปที่ 2.3) โดยมาตรฐานกำหนดให้มวลรวมหยาบที่ผ่านการทดสอบต้องมีเปอร์เซนต์การสึกกร่อนไม่เกิน 40 %

-ความสะอาด (Cleanliness) มวลรวมต้องสะอาดมีสารที่จะทำให้เกิดการเสื่อมต่อคุณภาพของคอนกรีต ซึ่งปริมาณของสิ่งเจือปน (รูปที่ 2.4) ที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีตจะต้องไม่มากกว่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.3.

-ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability) มวลรวมที่ดีต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์

-ขนาดคละ (Gradation) คือความลดหลั่นของขนาดตามเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งจะช่วยให้การเรียงตัวได้ดีและเกิดปริมาณช่องว่างน้อยที่สุด ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต้องใช้ลดน้อยลงคือเพียงพอที่จะเคลือบผิววัสดุผสมทั้งหมด การทดสอบคุณสมบัติทำโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve Analysis, รูปที่ 2.5) และพิจารณาขนาดใหญ่สุดของมวลรวมซึ่งมีผลโดยตรงต่อปริมาณซีเมนต์เพสต์ โดยทำการกำหนดขนาดใหญ่สุดของมวลรวมจากขนาดตะแกรงมาตรฐานที่ใหญ่กว่า1 ชั้นตะแกรงที่มีผลของเปอร์เซนต์น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานใหญ่สุดมากกว่า 15 % ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM ในตารางที่ 2.2.

2.2.3. น้ำ

น้ำที่ใช้ต้องสะอาดปราศจากปริมาณสารที่มีผลต่อคอนกรีตและมีความขุ่นไม่เกิน 200 ppm. โดยปกติน้ำประปาและน้ำจืดธรรมชาติถือว่ามีคุณภาพดีพอสำหรับงานคอนกรีต โดยหน้าที่ของน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตจะเคลือบมวลรวมให้เปียกเพื่อให้ปูนซีเมนต์เข้ายึดเกาะ, หล่อลื่นให้กับส่วนประกอบของคอนกรีต ทำให้เกิดความสามารถในการเทและการเข้าแบบหล่อและเข้าผสมกับปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้เกิดเป็นซีเมนต์เพสต์เพื่อเป็นตัวประสานกับผิวมวลรวม

สารที่เจือปนในน้ำจะมีผลต่อคุณภาพของคอนกรีต เช่น ฝุ่น, น้ำมัน, กรด, ด่าง เป็นต้น ซึ่งมาตรฐานได้กำหนดให้สารที่เจือปนอยู่ในน้ำไม่เกินกว่าปริมาณที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.4. โดยปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตขึ้นอยู่กับส่วนผสมและคุณสมบัติของมวลรวมและปูนซีเมนต์ถ้าปริมาณน้ำมากเกินไปคุณภาพของคอนกรีตจะลดต่ำลงเนื่องจากน้ำส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาจะระเหยออกไปในสภาพคอนกรีตแข็งตัว ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นมีผลต่อคุณสมบัติในด้านต่างๆลดน้อยลงและมีผลต่อการเยิ้มของคอนกรีต การทดสอบคุณสมบัติของน้ำเป็นตามมาตรฐาน ASTM ดังแสดงในตารางที่ 2.2

2.2.4. สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่ม คือสารประเภทอื่นนอกเหนือจากปูนซีเมนต์ มวลรวมและน้ำ ที่สามารถนำมาผสมเพิ่มลงในส่วนผสมคอนกรีต ไม่ว่าจะก่อนหรือในขณะกำลังผสม เพื่อช่วยปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณสมบัติใหม่ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมทั้งขณะที่ยังเป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัว

สารผสมเพิ่มเมื่อใช้ร่วมกับคอนกรีตจะให้ผลที่แตกต่างกันโดยขึ้นกับคุณสมบัติและปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้, ขนาด, รูปร่างและขนาดคละของมวลรวม, น้ำ, สัดส่วนผสมของคอนกรีต, ระยะเวลาการผสม และ อุณหภูมิ เป็นต้น ดังนั้นการใช้สารผสมเพิ่มจึงต้องมีการศึกษาส่วนผสมและคุณสมบัติของสารผสมเพิ่ม ทำการทดสอบและควบคุมปริมาณที่ใช้ให้ถูกต้อง โดยสารผสมเพิ่มสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.2.4.1. น้ำยาเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixture)

น้ำยาเคมีผสมเพิ่มเป็นของเหลวที่ผสมเพิ่มในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น น้ำยาเคมีผสมเพิ่มที่นิยมใช้กันแพร่หลายสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์

-เร่งการก่อตัว ทำให้คอนกรีตก่อตัวและแข็งตัวเร็วกว่าปกติและทำให้กำลังอัดในช่วงต้น (Early Strength) สูงกว่าคอนกรีตทั่วไป เหมาะกับงานที่ต้องการให้ถอดแบบได้เร็วกว่าปกติ เช่น งานเสาเข็มอัดแรง เป็นต้น ข้อควรระวังคือจะเพิ่มการหดตัวในคอนกรีตขณะแข็งตัวทำให้เกิดรอยแตกร้าวได้ในคอนกรีต

-หน่วงการก่อตัว ทำให้คอนกรีตเกิดการก่อตัวช้ากว่าปกติเพื่อช่วยในการเพิ่มระยะเวลาในการจัดส่งหรือกรณีที่มีการเทคอนกรีตในปริมาณมากๆและต้องการความต่อเนื่อง โดยทั่วไปการใช้สารประเภทนี้จะทำให้กำลังอัดในช่วงต้นต่ำกว่าปกติ แต่คุณสมบัติของสารหน่วงการก่อตัวสามารถช่วยลดปริมาณน้ำได้ประมาณ 5 - 15 % ซึ่งมีผลต่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดสูงกว่าหรือเท่ากับคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

-กระจายกักฟองอากาศ ทำให้เกิดปริมาณฟองอากาศเล็กๆแพร่กระจายอยู่ในเนื้อของคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความข้นเหลวสูงและการเทง่ายขึ้นเมื่อใส่น้ำปริมาณน้อย นอกจากนั้นยังช่วยลดการแยกตัว, การสูญเสียน้ำ ทำให้คอนกรีตมีเนื้อที่สม่ำเสมอ รวมทั้งเพิ่มประสิทธิ์ภาพในการต้านทานต่อซัลเฟต แต่มีผลต่อคุณสมบัติในการรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดต่ำลง

-ลดปริมาณน้ำ ช่วยลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความสามารถทำงานได้เท่าเดิม ส่งผลในการเพิ่มกำลังรับแรง นอกจากนั้นยังช่วยลดการแยกตัวและการสูญเสียน้ำ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าสารลดปริมาณจะช่วยเพิ่มความข้นเหลวเมื่อปริมาณการใช้น้ำเท่ากัน

-ทีบน้ำและขับน้ำ ช่วยทำให้คอนกรีตทึบแน่น, ลดการซึมผ่านของน้ำ, เพิ่มกำลังอัด, กำลังดัด, ลดปริมาณการเยิ้ม และการหดตัว โดยใช้กับโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับน้ำ เช่น โครงสร้างอุโมงค์ , สระน้ำ เป็นต้น

ตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C - 494 แบ่งประเภทของของน้ำยาเคมีผสมเพิ่มตามลักษณะการใช้งาน แสดงใน 2.5.

ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำยาเคมีผสมเพิ่มประเภทลดปริมาณน้ำอย่างมาก (High Range Water Reducing Admixture , HRWR) หรือสารเพิ่มการไหลลื่นสูงหรือสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ตามมาตรฐาน ASTM C - 494 ประเภท G เป็นสารเคมีที่ใช้เพื่อทำการลดปริมาณน้ำในส่วนผสม

ได้มากกว่าสารลดน้ำธรรมดา โดยไม่มีผลกระทบกับการยับยั้งการก่อตัวของซีเมนต์เพส์ตและช่วยลดปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต

สารลดน้ำพิเศษเริ่มมีการพัฒนาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 และในประเทศอังกฤษเริ่มใช้ประมาณปี ค.ศ.1972 เป็นต้นมา โดยสารลดน้ำพิเศษสามารถแบ่งตามประเภทของสารประกอบทางเคมีได้ 2 ประเภทคือ[21]

1.ซัลโฟเนทเมลามีน ฟอร์มาลดีไฮด์ คอนเดนเซทส์ (Sulphonate Melamine Formaldehyde Condensate) เป็นสารเคมีที่นำสารเมลามีน (Melamine , $C_3H_6N_6$) เข้าทำปฏิกิริยากับ ฟอร์มาเลดีไฮด์ได้สารประกอบของ ไตรเมทิรอลเมลามีน (Trimethylol Melamine) แล้วเข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมไบซัลไฟต์ (Sidium Bisulphite , $NaHSO_3$) ได้สารประกอบแล้วทำการแปรสภาพโดยวิธีโพลิเมอร์ (Polymerization) ได้สารประกอบของเกลือซัลโฟเนทเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ คอนเดนเซทส์

2.ซัลโฟเนทแนพทาลีน ฟอร์มมาลดีไอด์ คอนเดนเซทส์ (Sulphonated Naphthalene Formaldehyde Condensates เป็นสารเคมีที่นำสารแนบทาลีน (Naphthalene ,$C_{10}H_8$) ผ่านขบวนการซัลโฟเนท (Sulphonation) ด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ได้สารประกอบของแนบทาลีนกับกรดซัลโฟนิก (SO_3H) แล้วนำเข้าทำปฏิกิริยากับ ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde , CH_2O) ได้สารประกอบแล้วทำการแปรสภาพโดยวิธีโพลิเมอร์ ได้สารประกอบที่มีสภาพเป็นกรดทำการลดสภาพกรด (Neutralization) ด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ได้สารประกอบเกลือ เรียกว่า Sulphonated Naphthalene Formaldehyde Condensates

การลดปริมาณน้ำโดยใช้สารลดน้ำพิเศษมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยที่น้ำเป็นวัตถุดิบในส่วนผสมของคอนกรีต โดยปกติปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ประมาณ 28 ± 1 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์[22] และคอนกรีตโดยทั่วไปจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ประมาณ 0.30 - 0.35 โดยน้ำส่วนที่เหลือจะเข้าทำหน้าที่ในส่วนอื่น เรียกว่าน้ำส่วนเกิน (Excess Water) ถ้าปริมาณน้ำส่วนเกินมากจะก่อให้เกิด

- การเยิ้มของน้ำที่ผิวหน้า (Bleeding)
- การแยกตัวของส่วนผสม (Saggregation)
- ลดกำลัง (Reducing Strength)
- การระเหยก่อให้เกิดการหดตัว (Shrinkage)
- เกิดช่องว่าง (Void) มีผลต่อความทนทาน

พฤติกรรมของสารลดน้ำพิเศษจะเข้าทำการกระตุ้นที่ผิวให้มีการกระจายอนุภาคปูนซีเมนต์ให้แยกออกจากกันโดยให้มีความกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอจึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของปูนซีเมนต์ที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำได้มากขึ้น โดยปกติอนุภาคปูนซีเมนต์ในสภาพแห้งจะจับรวมตัวเป็นก้อน เมื่อทำการผสมรวมกับน้ำทำให้เกิดการแตกสลายออกและทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ โดยเกิดขึ้นบริเวณผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ เมื่อทำการเติมสารลดน้ำพิเศษ จะทำให้คอนกรีตเกิดการกระจายตัวเนื่องจากปกติอนุภาคปูนซีเมนต์ในคอนกรีตจะมีประจุไฟฟ้าบริเวณผิวเมื่อเกิดปฏิกิริยากับประจุของน้ำซึ่งมีประจุต่างกัน ทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนและมีน้ำเกิดขังอยู่ภายใน โมเลกุลของสารลดน้ำพิเศษจะช่วยทำให้ประจุเป็นกลางหรือทำให้เกิดประจุประเภทเดียวกันทำให้เกิดการแยกตัวน้ำส่วนที่ถูกขังเอาไว้จะสามารถนำมาใช้ในการลดความหนืดของซีเมนต์เพส์ตได้และช่วยลดปริมาณน้ำที่จำเป็นต้องใช้ในกรณีที่ให้ความสามารถทำงานได้เท่ากัน แสดงในรูปที่ 2.7.

ถ้าพิจารณาในลักษณะของแรงเฉือนพบว่าสารลดน้ำพิเศษจะช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างซีเมนต์เพส์ตกับมวลรวมทำให้ต้องการพลังงานน้อยในการเทและยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของซีเมนต์ที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำได้มากขึ้น ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพส์ตกับมวลรวมมากขึ้น เป็นผลให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการเติมสารลดน้ำพิเศษลงในคอนกรีตจะทำให้ฟองอากาศกระจายตัวออกจากอนุภาคซีเมนต์ เนื่องจากการกระตุ้นที่ผิวทำให้ฟองอากาศเกิดประจุลบเช่นกัน มีผลทำให้อนุภาคซีเมนต์กับฟองอากาศไม่จับตัวกัน จึงช่วยในการพัฒนากำลังอัดและความทนทานเพิ่มขึ้น

2.2.4.2. สารเติม (Additive)

สารเติมคือสารผสมเพิ่มที่นอกเหนือจากน้ำยาเคมีผสมเพิ่ม ทำการผสมร่วมกับส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงและเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตให้เหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้นโดยทั่วไปสารเติมที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตมีทั้งสถานะของแข็งเป็นผงละเอียดและสถานะของเหลวเป็นสารผสม สารเติมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตสมรรถนะสูงในการวิจัยนี้เป็นประเภทปอซโซลาน เป็นวัสดุที่คุณสมบัติในตัวเข้าร่วมทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระให้เกิดเป็นสารประสาน CSH ได้

1.ไมโครซิลิกา (Microsilica)

ไมโครซิลิกาเรียกอีกชื่อว่า ซิลิกาฟูม (Silica Fume, SF) เป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตโลหะกล่าวคือซิลิกอนของโลหะ หรือเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอย (Ferrosilicon Alloy) ที่อยู่ในวัตถุดิบเช่น หินควอร์ต, ถ่านหินและแร่เหล็กเข้าหลอมรวมกันด้วยความร้อนจนเกิดไอของซิลิกอนโมโนออกไซด์ลอยขึ้น และไอถูกดักจับตัวและทำให้เย็นลงได้เป็นอนุภาคของผลึกซิลิกา (Amorphous Silica) มีขนาดเล็กมากเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 100 เท่า ขบวนการผลิตไมโครซิลิกาค่อนข้างจะบริสุทธิ์ทำให้คุณสมบัติทางเคมีค่อนข้างคงที่จึงมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้อยมาก

ไมโครซิลิกามีส่วนประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่ประมาณ 76 - 97 %[19] โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือเป็นส่วนประกอบของโลหะ, อัลคาไลท์และคาร์บอน โดยคุณสมบัติต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.6.

โดยทั่วไปปูนซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับน้ำจะเกิดสารประกอบ 2 ตัวคือ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ดังสมการที่ (2.1.)

ในองค์ประกอบของไมโครซิลิกามีปริมาณ SiO_2 อยู่สูงกว่า 90 % จะเข้าทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท เพิ่มขึ้นดังสมการที่ 2.2. โดยทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้สัดส่วนผสมของคอนกรีตจับตัวกันดีขึ้น

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \Longrightarrow 3CaO\ SiO_2 3H_2O \qquad (2.2.)$$

ไมโครซิลิกาจะเข้าแทรกตัวในช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์แสดงรูปที่ 2.8. ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงขึ้น ด้วยความละเอียดสูงมากทำให้ต้องการปริมาณน้ำสูงหรือใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษมากเพื่อเพิ่มค่าการยุบตัว นอกจากนั้นไมโครซิลิกามีผลต่อการเร่งการเกิดปฏิกิริยาของคอนกรีต ส่งผลให้กำลังสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปในช่วงต้นและข้อเสียของไมโครซิลิกาคือการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าปกติทำให้ลดความสามารถทำงานได้และการหดตัวในสภาวะเหลวเพิ่มขึ้น

2. ขี้เถ้าลอย (Fly Ash)

ขี้เถ้าลอย[24] เป็นของเหลือจากกระบวนการเผาถ่านหิน มีลักษณะเป็นผงเม็ดกลมละเอียด โดยลอยตัวขึ้นอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ในขบวนการเผาถ่านหิน เป็นส่วนที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควันและถูกจับไว้ที่ Electrostatic Precipitator โดยคุณสมบัติต่างๆของขี้เถ้าลอยจะแตกต่างกันขึ้นกับแหล่งกำเนิดของถ่านหินและประสิทธิภาพในการเผาถ่านหิน การวิจัยได้ทำการศึกษาโดยใช้ขี้เถ้าลอยจากการเผาถ่านหินลิกไนต์จากแหล่งแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

การแยกประเภทของขี้เถ้าลอยทำตามมาตรฐาน ASTM C - 618[25] ได้แบ่งประเภทของขี้เถ้าลอยตามปริมาณสารประกอบทางเคมีของ SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 ไว้ดังนี้

1. ขี้เถ้าลอย Class C จะมีส่วนประกอบของ SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 ในปริมาณไม่ต่ำกว่า 50%
2. ขี้เถ้าลอย Class F & N จะมีส่วนประกอบของ SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 ในปริมาณไม่ต่ำกว่า 70%

ความแตกต่างของทั้ง 2 Class คือ ขี้เถ้าลอยใน Class F เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ หรือบิทูมินัส เป็นถ่านหินคุณภาพสูงให้พลังงานความร้อนสูงเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูง ส่วนขี้เถ้าลอยใน Class C เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินประเภท ลิกไนต์ หรือซับบิทูบินัส เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำมีปริมาณคาร์บอนต่ำ

ขี้เถ้าลอยลิกไนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบสามารถจัดขี้เถ้าลอยอยู่ใน Class C แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 2.7. ตามมาตรฐาน ASTM C - 618 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักคือ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO จะมีสภาพเป็นผงมีขนาดใหญ่กว่าไมโครซิลิกา เมื่อผสมเข้ากับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นคล้ายกับไมโครซิลิกา โดยทำให้เกิดการยึดเกาะขององค์ประกอบของ คอนกรีตสูงกว่าปกติ

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างขี้เถ้าลอยกับขบวนการของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยขี้เถ้าลอยเป็นสารปอซโซลานอย่างหนึ่งตามมาตรฐาน ASTM C - 595 ซึ่งเป็นวัสดุที่ตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่สามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์และก่อตัวเป็นสารเชื่อมประสาน โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้ากว่าปกติ สามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

$$CaO + H_2O \Rightarrow CaO(OH)_2$$

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \Rightarrow 2CaO.2SiO_2.3H_2O \quad (2.3)$$

หรือ $$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \Rightarrow 2CaO.2Al_2O_3.3H_2O$$

การผสมขี้เถ้าลอยในคอนกรีต มีการใช้รวม 3 วิธี[26] คือ

1.การแทนที่ (Replacement Method) โดยการใช้ขี้เถ้าลอยผสมแทนที่ส่วนผสมปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก

2.การผสมเพิ่ม (Addition Method) โดยการผสมขี้เถ้าลอยเพิ่มในปูนซีเมนต์ ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถทำงานได้, ลดการเยิ้มและเพิ่มกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป

3.การแทนที่และการผสมเพิ่มรวมกัน (Replacement - Addition Method) เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของทั้งสองวิธีข้างต้นมาใช้รวมกัน

โดยขี้เถ้าลอยมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต[25] ในด้านปรับปรุงความข้นเหลวของคอนกรีตในสภาพเหลว โดยความสามารถทำงานได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณขี้เถ้าลอยในส่วนผสม,ลดปริมาณน้ำ พบว่าการเติมขี้เถ้าลอยทุกๆ 10 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ จะสามารถช่วยลด อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลงได้ 0.03, ลดปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตเหลว การเติมขี้เถ้าลอยประมาณ 15 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์จะช่วยลดปริมาณฟองอากาศประมาณ 0.1 % โดยปริมาตรและเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายให้ช้าลง

2.3. <u>ส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง</u>

เป็นการหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมของวัตถุดิบในคอนกรีตเพื่อให้เกิดคุณสมบัติตามที่ต้องการทั้งในสภาพเหลวและสภาพแข็งตัว

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตมาตรฐานที่ใช้มีทั้งของอเมริกา, อังกฤษ, ญี่ปุ่น เป็นต้น. ในงานวิจัยนี้ยึดหลักการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานของ ACI 211[27], ACI 304.3R[28] และ ACI 211.4R[29] นำมาปรับปรุงโดยการยึดหลักของขนาดคละของมวลรวมเป็นตัวสำคัญในการออกแบบส่วนผสม โดยคำนึงถึงองค์ประกอบของขนาดของมวลรวม, กำลัง, ความสามารถทำงานได้, ปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

2.4. คุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง

คุณสมบัติของคอนกรีตใช้ตรวจสอบส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อการพิจารณาในการเลือกใช้คอนกรีตตามวัตถุประสงค์และความเหมาะสมกับการใช้งานจริง โดยกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงออกได้ใน 2 สภาพคือ

2.4.1.สภาพเหลว (Fresh State)

คุณสมบัติในสภาพเหลวเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของคอนกรีต โดยพิจารณาหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงตามส่วนผสมของคอนกรีต โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ

ความสามารถในการทำงาน (Workability): คือผลรวมของพลังงานที่จะเอาชนะแรงต้านทานระหว่างอนุภาค ที่ก่อให้เกิดการอัดแน่นของเนื้อคอนกรีตโดยสมบูรณ์ การตรวจสอบวัดค่าความสามารถการทำงานได้ในทางปฏิบัติเป็นเรื่องยากจึงมีการประยุกต์วิธีการขึ้นเพื่อใช้ในการพิจารณาโดยยึดหลักการผลิตคอนกรีตเหลวที่มีความสามารถทำงานได้เพียงพอตามคุณสมบัติ โดยองค์ประกอบที่มีผลต่อความสามารถทำงานได้

-ปริมาณน้ำในส่วนผสมปริมาณน้ำยิ่งมากทำให้เกิดการหล่อลื่นระหว่างอนุภาคของวัสดุมากขึ้น

-คุณสมบัติของมวลรวม มวลรวมที่มีขนาดคละที่ดีจะทำให้ความสามารถทำงานได้ดีขึ้น

-ส่วนผสมของคอนกรีต เช่นใช้อัตราส่วน S/A ต่ำ อาจทำให้เกิดการแยกตัวทำ ให้ความสามารถทำงานได้ลดต่ำลง

-ชนิดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากจะต้องการน้ำมาก

-สารผสมเพิ่ม ขึ้นกับประเภทในการใช้เช่น น้ำยาเคมีผสมเพิ่มประเภทลดน้ำและหน่วงเวลาการก่อตัว จะเป็นตัวช่วยเพิ่มการลื่นไหล

-เวลา และ อุณหภูมิ การทิ้งคอนกรีตที่เพิ่งผสมเสร็จใหม่ ๆ ไว้นานเกิน 15 นาทีจะมีผลทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ลดต่ำลง

ความสามารถในการทำงานสามารถทำแสดงในรูปของความข้นเหลวของคอนกรีต โดยทำการทดสอบ

1.การยุบตัว (Slump) เป็นวิธีที่สะดวกที่สุดในการทดสอบในสนาม ทดสอบหาความสามารถไหลหรือความสามารถในการเทคอนกรีตเหลวลงในแบบหล่อ (รูปที่ 2.9.) โดยกำหนดค่าการยุบตัว (Slump Test) ของคอนกรีตสมรรถนะสูงมีค่าตั้งแต่ 20 ซม. ขึ้นไป

นอกจากนั้น การก่อตัวของคอนกรีตสามารถหาค่าได้ในรูปของการสูญเสียค่าการยุบตัวกับเวลา เรียกว่า การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) โดยค่าการสูญเสียแปรผันกับปัจจัยกับปริมาณและชนิดของปูนซีเมนต์, อุณหภูมิของคอนกรีต, ค่าการยุบตัวระยะเริ่มต้นและส่วนผสมของคอนกรีต

2.การไหลตัว (Flowability) เหมาะกับการทดสอบกับคอนกรีตที่มีความข้นเหลวมาก เนื่องจากการทดสอบการยุบตัวจะได้ผลการทดสอบที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง การทดสอบโดยการไหลตัว ทำโดยการพิจารณาการไหลแผ่ของคอนกรีต โดยทำการทดสอบใช้โต๊ะเขย่า (Flow Table) นำตัวอย่างคอนกรีตเหลวใส่ในโคนกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน13 ซม.ด้านล่าง 20 ซม. สูง 20 ซม. บนโต๊ะเขย่าจำนวน 2 ชั้นทำการกระทุ้งชั้นละ 10 ครั้ง ยกโคนขึ้นและยกโต๊ะเขย่าจำนวน 15 ครั้งภายในเวลา 15 วินาทีวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ด้านนำมาเป็นค่าเฉลี่ย คอนกรีตสมรรถนะสูงควรมีค่าของการไหลตัวมากกว่า 50 ซ.ม. (รูปที่ 2.10) นอกจากนั้นยังสามารถตรวจสอบลักษณะเนื้อของคอนกรีต

การเยิ้ม (Bleeding): เป็นการคายน้ำจากส่วนผสมคอนกรีตเหลวโดยน้ำบางส่วนจะลอยตัวขึ้นมาอยู่ที่ผิวหน้าของคอนกรีตเหลวหลังจากการจี้เขย่าคอนกรีตแล้ว (รูปที่ 2.11.) เนื่องจากส่วนผสมของแข็งจะจมตัวและดันน้ำส่วนเกินซึ่งเกิดจากน้ำส่วนที่เหลือจากการเข้าทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์มีมากเกินความจำเป็นในการทำหน้าที่หล่อลื่นและการยึดเกาะของมวลรวมกับซีเมนต์เพส์ตขึ้นมาบนผิวหน้าของคอนกรีต การทดสอบการเยิ้มพิจารณาจากอัตราส่วนค่ายุบตัวลงต่อหน่วยความสูงของคอนกรีต โดยปัจจัยที่มีต่อการเยิ้มคือปริมาณน้ำในส่วนผสม ด้วยการลดน้ำจะช่วยลดการเยิ้ม, คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะช่วยในการลดการเยิ้มและอุณหภูมิ ถ้าใช้ปูนซีเมนต์มากจะช่วยลดการเยิ้ม ซึ่งคอนกรีตที่เกิดการเยิ้มจะทำให้บริเวณผิวหน้าจะมีค่า w/c สูงทำให้กำลังอัดต่ำมีผลในการรับน้ำหนักและน้ำบางส่วนจะถูกกักไว้ใต้มวลรวมหยาบทำให้เกิดช่องว่าง มีผลต่อการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตเพิ่มขึ้น

การแยกตัว (Segregation): การแยกตัวของวัสดุในส่วนผสมคอนกรีต เนื่องจากส่วนผสมของคอนกรีตไม่เหมาะสมทำให้เกิดผลกับการยึดเกาะ (Cohesion) ของซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม ทำให้เนื้อคอนกรีตมีความไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 2.12) โดยพิจารณาจากการที่มวลรวมหยาบแยกตัวออกจากส่วนผสมเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคอนกรีตตามทางลาดชันหรือมวลรวมหยาบจมลงสู่ด้านล่างมากกว่ามวลรวมละเอียดและน้ำปูนแยกออกจากส่วนผสมเนื่องจากส่วนผสมเหลวมากเกินความจำเป็น

การก่อตัวและแข็งตัว (Setting Time): เป็นคุณสมบัติของคอนกรีตเหลว โดยคอนกรีตจะค่อยๆเริ่มก่อตัวและมีความกระด้างเพิ่มขึ้น การก่อตัวที่เหมาะสมควรมีระยะเวลาเพียงพอในการลำเลียงและเทลงแบบหล่อแข็งตัวในเวลาที่เหมาะสม (รูปที่ 2.13) โดยระยะการก่อตัวสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระยะ คือ

ระยะ 1 เริ่มการก่อตัว (Stiffening Time) คือเวลาที่คอนกรีตเหลวสามารถรับแรงเสียดทานได้ 5 กก./ตร.ซม. ที่เวลานี้ คอนกรีตเริ่มมีความกระด้าง

ระยะ 2 การก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) คือเวลาที่คอนกรีตเหลวสามารถรับแรงเสียดทานได้ 35 กก./ตร.ซม. ที่เวลานี้ คอนกรีตจะแข็งตัวแล้ว

ระยะ 3 การก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) คือเวลาที่คอนกรีตเหลวสามารถรับแรงเสียดทานได้ 276 กก./ตร.ซม. การก่อตัวเริ่มจะแข็งตัวสมบูรณ์

โดยปัจจัยที่มีผลต่อการก่อตัวได้แก่ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามองค์ประกอบทางเคมี ที่สำคัญคือ C_3A , C_3S และยิ่มซั่มในส่วนผสม, ความชื้นสัมพันธ์, อุณหภูมิของอากาศและรูปร่างขนาดของโครงสร้าง

โดยคอนกรีตสมรรถนะสูงให้ค่าระยะเวลาคงสภาพเหลว (Plastic Stage) เพื่อที่จะสามารถทำงานได้มีค่าไม่ต่ำกว่า $1\frac{1}{2}$ ชั่วโมง

ปริมาณอากาศ (Air Content): ปริมาณของอากาศที่แทรกตัวอยู่ภายในเนื้อของคอนกรีตจะมีผลโดยตรงต่อกำลังอัดและความคงทน ถ้าปริมาณอากาศน้อยเกินไปจะทำให้ขาดความสามารถทำงานได้และถ้าปริมาณอากาศมากเกินไปจะมีผลทำให้กำลังอัดและความคงทนลดต่ำลง การทดสอบทำโดยการใช้วิธีความดัน (Pressure Method, รูปที่ 2.14) โดยปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงควรมีค่าอยู่ประมาณ 1 - 3 % ของปริมาตรคอนกรีตทั้งหมด

การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงในสภาพเหลว ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM แสดงในตารางที่ 2.8.

2.4.2 สภาพแข็งตัว (Hardened State)

คุณสมบัติในสภาพแข็งตัวของคอนกรีตสมรรถนะสูงมีความสำคัญตลอดระยะการใช้งานของโครงสร้าง ทำการทดสอบโดยการพิจารณาหลังจากคอนกรีตเปลี่ยนสภาพจากคอนกรีตเหลวเป็นคอนกรีตแข็งตัว พิจารณาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตโดยคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตสมรรถนะสูงในสภาพแข็งตัวในงานวิจัยนี้ที่สำคัญ ดังนี้

กำลัง (Strength): เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของคอนกรีตสมรรถนะสูงในสภาพแข็งตัว โดยทำการศึกษาความแข็งแกร่งในการรับน้ำหนักในด้านต่างๆ ของคอนกรีตสมรรถนะสูง สามารถทำการทดสอบ ดังนี้

1.กำลังอัด (Compressive Strength) เป็นคุณสมบัติที่บอกให้ทราบถึงคุณสมบัติในด้านอื่นๆได้เป็นอย่างดี การทดสอบกระทำโดยใช้ตัวอย่างแท่งทรงกระบอกขนาด ϕ15 x 30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C - 39 ทดสอบด้วยเครื่อง Digital Compressive Tester ขนาด 200 ตัน ทำการหุ้มหัวแท่งตัวอย่างให้เรียบเพื่อการกระจายแรงต่อหน้าตัดสม่ำเสมอวางแท่งตัวอย่างตามยาวในแนวดิ่ง (รูปที่ 2.15) ทำการกดแท่งตัวอย่างด้วยอัตราสม่ำเสมอในอัตราประมาณ 3.5 กก./ตร.ซม./วินาที จนกระทั่งแท่งตัวอย่างวิบัติ การศึกษาค่ากำลังอัดสามารถคำนวณจากความต้านทานการรับแรงของคอนกรีตต่อพื้นที่หน้าตัด ดังสมการที่ (2.4.)

$$f'_c = P/A \qquad (2.4.)$$

เมื่อ f'_c = กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)

P = น้ำหนักสูงสุด (กก.)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตร.ซม.)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คอนกรีตสมรรถนะสูงควรมีค่ากำลังอัดที่ 28 วันมากกว่า 600 กก./ตร.ซม. โดยกำลังอัดในคอนกรีตสมรรถนะสูง มีปัจจัยที่สำคัญต่อกำลังอัด คือ กำลังของมอร์ต้า, กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม, แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้ากับผิวของมวลรวม

2.กำลังดึง (Tensile Strength): โดยปกติงานก่อสร้างจะถือว่าคอนกรีตรับเฉพาะกำลังอัดเนื่องจากคอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้น้อยมากประมาณ 10% ของกำลังอัดประลัย การหาค่ากำลังดึงของคอนกรีตสามารถหาได้ 2 วิธีคือ กำลังดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength) เป็นการหาค่าโดยให้คอนกรีตดึงโดยตรงแต่การทดสอบมีความยุ่งยากจึงไม่นิยมทดสอบด้วยวิธีดังกล่าว เนื่องจากเกิดปัญหาในการเยื้องศูนย์ของแท่งตัวอย่าง, เกิดหน่วยแรงแทรกบริเวณส่วนหัวที่จับเป็นหน่วยแรงเฉพาะที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน, การแตกร้าวมีการแพร่กระจายอย่างรวดเร็วทำให้ค่าที่ได้เป็นค่าบริเวณที่กำลังต่ำสุด และวิธีการทดสอบกำลังดึงแตกแยก (Spiltting Tensile Strength) ทำการทดสอบโดยวางแท่งตัวอย่างทรงกระบอก ขนาด ϕ 15 x 30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C - 496 วางในแนวนอนบนเครื่องทดสอบทำการทดสอบแท่งตัวอย่างจะแตกตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง

การศึกษาคุณสมบัติกำลังดึงทำการทดสอบโดยวิธีกำลังดึงแตกแยก (รูปที่ 2.16) ในคอนกรีตสมรรถนะสูงจะสามารถเพิ่มคุณสมบัติในด้านกำลังดึงให้สูงกว่าคอนกรีตทั่วไป ซึ่งคุณสมบัตินี้จะช่วยในการควบคุมการแตกร้าวจากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิ (Thermal) , การหดตัว (Shrinkage) เป็นต้น โดยสามารถคำนวณกำลังดึงแตกแยก (Splitting Tensile Strength) ได้จากสมการ

$$f_s = 2P/\pi dL \qquad (2.5.)$$

เมื่อ f_s = กำลังดึงแตกแยก (กก./ตร.ซม.)

P = น้ำหนักสูงสุด (กก.)

L = ความยาวของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก (ซม.)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง (ซม.)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.กำลังเฉือน (Shear Strength): เป็นการทดสอบคุณสมบัติรับแรงเฉือนของคอนกรีต ทำได้โดยให้แรงกระทำสองแรงมีขนาดเท่ากันและขนานกันในทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนจะเกิดพร้อมกับแรงดึงและแรงดัด

การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงเฉือนทดสอบโดยการบิดแท่งตัวอย่างทรงกระบอก พบว่ามีค่าประมาณ 15 - 25 % ของกำลังอัดของคอนกรีตทั่วไป แต่การทดสอบมีความยุ่งยากมาก การวิจัยนี้หาค่ากำลังเฉือนโดยหาจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังดึงโดยวิธีเขียนรูปวงกลมการแตกร้าวของมอร์ (Mohr's Rupture Diagram) แสดงในรูปที่ 2.17.

4.กำลังดัด (Flexural Strength): เป็นการทดสอบความต้านทานต่อแรงดัดงอจากค้านตัวอย่างมาตรฐาน ขนาด 15 x15 x 50 ซม. กำหนดในรูปของโมดูลัสของการแตกร้าว (Modulus of Rupture) เป็นค่าหน่วยแรงดัดที่สูงสุด ณ.จุดแตกร้าว ค่าโมดูลัสของการแตกร้าวของคอนกรีตสมรรถนะสูงจะได้ค่าที่สูงกว่าคอนกรีตทั่วไป (11 - 23 % ของกำลังอัด)

การทดสอบทำแบบจุดเดียวตรงกึ่งกลางของคาน (รูปที่ 2.18) โดยค่าที่ได้เป็นสัดส่วนกับกำลังอัด โดยคำนวณจากสมการ

$$f_b = 3PL / 2BD^2 \qquad (2.6.)$$

เมื่อ f_b = โมดูลัสการแตกร้าว (กก./ตร.ซม.)

P = น้ำหนักสูงสุด (กก.)

L = ความยาวของช่วงคาน (ซม.)

B,D = ความกว้าง, ความลึกของคาน (ซม.) ตามลำดับ

5.โมดูลัสยืดหยุ่น (Mmodulus of Elasticity, E_c) และอัตราส่วนพัวซอง (Poisson's Ratio, ν): เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญในการพิจารณาการเปลี่ยนรูปของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุก ปกติคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่นภายใต้น้ำหนักบรรทุกจะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้โดยไม่มีการเปลี่ยนรูปภายใต้ความเครียด (Strain) และหน่วยแรงอัด (Stress) ที่มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรง เมื่อพ้นจากช่วงดังกล่าวน้ำหนักบรรทุกจะทำให้คอนกรีตเกิดการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเกิดการวิบัติในคอนกรีต อัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อหน่วยความเครียดจะ

เรียกว่า โมดูลัสยืดหยุ่น[30] ทดสอบแท่งตัวอย่างทรงกระบอกขนาด ϕ 15 x 30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C - 469 โดยเครื่องมือ Compressometer - Extensometer การทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูง (รูปที่ 2.19) ให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสามารถคำนวณจาก

$$E_c = (S_2 - S_1) / (\varepsilon_2 - 0.000050) \qquad (2.7.)$$

เมื่อ E_c = โมดูลัสความยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)

S_2 = หน่วยแรงอัดที่ 40 % ของกำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)

S_1 = หน่วยแรงอัดที่ค่าความเครียด, 0.000050 (กก./ตร.ซม.)

ε_2 = ความเครียดที่หน่วยแรงอัด 40 % ของกำลังอัดคอนกรีต (ซม./ซม.)

อัตราส่วนพัวซอง เป็นสัดส่วนของหน่วยการหดตัวด้านข้างต่อหน่วยของการหดตัวในแนวแกน ทำการทดสอบโดยเครื่องมือ Compressometer - Extensometer โดยอัตราส่วนพัวซองของคอนกรีตทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 0.15 - 0.23 สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\nu = (\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}) / (\varepsilon_2 - 0.000050) \qquad (2.8.)$$

เมื่อ ν = อัตราส่วนพัวซอง

ε_{t2} = ความเครียดด้านข้างที่หน่วยแรงอัด S_2 (ซม./ซม.)

ε_{t1} = ความเครียดด้านข้างที่หน่วยแรงอัด S_1 (ซม./ซม.)

ความทนทาน (Durability): เป็นคุณสมบัติในระยะยาวของคอนกรีตหมายถึงความสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงจากสภาพแวดล้อม, การกัดกร่อนจากสารเคมี, แรงกระทำต่างๆ โดยสาเหตุที่สำคัญในการทำให้เกิดการขาดคุณสมบัติความทนทานเกิดจากสาเหตุหลัก 3 ประการคือ ด้านกายภาพ (Physical), ด้านเคมี (Chemical), ด้านเชิงกล (Mechanical) โดยพิจารณาทนทานจากคุณสมบัติดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.การซึมผ่านของน้ำ (Permeability): ศึกษาถึงอนุภาคของคอนกรีตในการจัดเรียงตัวเพื่อแสดงถึงความแน่นของอนุภาค โดยพิจารณาจากความสะดวกหรือความยากง่ายในการซึมผ่านของก๊าซหรือของเหลว ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำจะถูกควบคุมโดยความต่อเนื่องของช่องว่างของซีเมนต์เพส์ตมากน้อยขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยจะได้ความสามารถซึมผ่านของน้ำต่ำเนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์จะทำให้ทางไหลของน้ำจะถูกทำให้ไม่ต่อเนื่องกัน การทดสอบทำโดยการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำที่กระทำต่อคอนกรีตตามมาตรฐานที่เวลาต่างกันและพิจารณาการซึมผ่านของน้ำ (รูปที่ 2.20.) ศึกษาในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (k) ควรมีค่าต่ำกว่า $< 10^{-06}$ เมตร/วินาที โดยผลจากการทดสอบสามารถหาค่า ส.ป.ส.การซึมน้ำดังสมการที่ (2.9.)

$$d = \sqrt{2kht} \qquad (2.9.)$$

เมื่อ

k	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (เมตร/วินาที)
h	=	ความสูงของน้ำ (เมตร)
t	=	เวลาในการทดสอบ (วินาที)
d	=	ความลึกของน้ำที่ซึมผ่าน (เมตร)

2.การดูดซึมน้ำ (Water Absorption): เป็นคุณสมบัติของคอนกรีตที่สามารถดูดซึมน้ำเข้าไปในเนื้อคอนกรีตให้เต็มช่องว่าง สามารถเปรียบเทียบน้ำหนักน้ำกับน้ำหนักของคอนกรีต ค่าความดูดซึมน้ำในคอนกรีตสมรรถนะสูงควรมีค่าประมาณ 1 - 3 % โดยน้ำหนัก แสดงการทดสอบในรูปที่ 2.21.

3. การคืบ (Creep): เป็นการเปลี่ยนรูปของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักที่บรรทุกคงตัวเป็นระยะเวลานาน โดยเกิดจากการหดตัวของช่องว่างภายในของคอนกรีต มีอิทธิพลจาก

1.น้ำหนักบรรทุก การคืบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักบรรทุก

2.กำลังของคอนกรีต การคืบเป็นสัดส่วนผกผันกับกำลังของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีกำลังสูงจะมีการคืบของคอนกรีตต่ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.ประเภทของปูนซีเมนต์ การคืบจะเพิ่มเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ที่การพัฒนากำลังช้า

4.ส่วนผสม ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการคืบ

5.ชนิดและปริมาณของมวลรวม มวลรวมที่มีความแข็งแรงมากและใช้ในปริมาณสูงจะเกิดการคืบต่ำ

6.อายุของคอนกรีต อัตราเกิดการคืบจะลดลงเมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้น

7.การบ่ม คอนกรีตที่มีการบ่มตลอดเวลาจะเกิดการคืบต่ำ

8.อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการคืบสูงกว่าอุณหภูมิต่ำ

4.การหดตัว (Shrinkage): เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตเมื่อเกิดการสูญเสียน้ำ โดยการหดตัวในคอนกรีตที่สำคัญคือ

การหดตัวในสภาพพลาสติก (Plastic Shrinkage) เป็นการเปลี่ยนปริมาตรก่อนที่ซีเมนต์เพสส์แข็งตัวจับเกาะกับมวลรวม โดยการจมตัวของส่วนที่เป็นของแข็งในส่วนผสมและการสูญเสียน้ำก่อนการแข็งตัว

การหดตัวในสภาพแห้ง (Drying Shrinkage) เป็นการเปลี่ยนปริมาตรในสภาพคอนกรีตแข็งตัว โดยการสูญเสียน้ำทั้งในส่วนของช่องว่างและการต่อเนื่องของน้ำในคอนกรีต

การหดตัวโดยสารคาร์บอน (Carbonation Shrinkage) เกิดจากปฏิกิริยาของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Free Lime) กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ (CO_2) ทำให้เกิดการลดลงของปริมาตรของซีเมนต์เพส์ตเป็นเหตุให้เกิดการหดตัว

การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงในสภาพแข็งตัว ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM แสดงในตารางที่ 2.9.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1. อิทธิพลต่อคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์[22]

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว	ช้า	ทันทีทันใด	เร็วมาก
2. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
3. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว	ช้า	เร็วมาก	เร็วมาก
4. ความร้อนจากปฏิกิริยา	ปานกลาง 500 จูล/กรัม	น้อย 250 จูล/กรัม	สูงมาก 850 จูล/กรัม	ปานกลาง 420 จูล/กรัม
5.ปริมาณโดยน้ำหนัก (%)	35 - 55	15 - 35	15 - 35	5 - 10
6. อื่นๆ	เหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ตารางที่ 2.2. วิธีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่ใช้ในงานคอนกรีตสมรรถนะสูง

การทดสอบปูนซีเมนต์	*วิธีการทดสอบ*
1.คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)	ASTM C -150,595
2.คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)	ASTM C - 150,595
การทดสอบน้ำ	*วิธีการทดสอบ*
1.กำลังอัดของคอนกรีตใช้น้ำที่ผลิตเทียบกับน้ำดี (Strength)	ASTM C - 109
2.การก่อตัวของคอนกรีตใช้น้ำที่ผลิตเทียบกับน้ำดี (Setting Time)	ASTM C - 191
3.สิ่งเจือปนในน้ำ (Total Solids Content)	ASTM C - 1888
4.ปริมาณคลอไรด์ในน้ำ (Total Chlorides Content)	ASTM C - 512
การทดสอบน้ำยา	*วิธีการทดสอบ*
1.น้ำยาลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer Admixture)	ASTM C - 494

ตารางที่ 2.2. (ต่อ) วิธีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่ใช้ในงานคอนกรีตสมรรถนะสูง

การทดสอบมวลรวม	*วิธีการทดสอบ*
1.ขนาดคละ (Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate)	ASTM C - 136
2.สารอินทรีย์เจือปนในทราย (Organic Impurities in for Fine Aggregate)	ASTM C - 40
3.ปริมาณฝุ่นด้วยวิธีการล้าง (Materials Finer than 75 µm.(No. 200) Sieve in Mineral Aggragate)	ASTM C - 117
4.ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลละเอียด (Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate)	ASTM C - 128
5.ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลหยาบ (Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate)	ASTM C - 127
6.ความคงทน (Soundness of Aggregate)	ASTM C - 88
7.หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างในมวลรวม (Unit Weight and Voids in Aggregate)	ASTM C - 29
8.ความต้านทานต่อการขัดสีของมวลรวมหยาบโดยเครื่องมือลอสแองเจลิส (Resistance of Degradation of Small - Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine)	ASTM C - 131
9.ดัชนีขนาดยาวของมวลรวมหยาบ (Elongation Index)	BS812, Section 105.2
10.ดัชนีความแบนของมวลรวมหยาบ (Flakiness Index)	BS812, Section 105.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3. ขอบเขตปริมาณสิ่งเจือปนในมวลรวมที่ยอมให้

สิ่งสกปรกที่เจือปน	เปอร์เซนต์ที่ยอมให้สูงสุด	
	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ
ดินเหนียว	1.00	0.25
ฝุ่นหรือผงละเอียด ที่ผ่านตะแกรง #200		
-คอนกรีตที่รับแรงเสียดทาน	5.00	1.00
-คอนกรีตทั่วไป	5.00	1.00
ถ่านหินหรือลิกไนท์		
-งานที่โชว์ผิวหน้า	0.50	0.50
-คอนกรีตทั่วไป	1.00	1.00
วัสดุอ่อน (เช่น รากไม้ เศษไม้)	-	5.00

ตารางที่ 2.4. ปริมาณของสารเจือปนในน้ำที่ยอมให้

สารที่เจือปน	ปริมาณที่ยอมให้สูงสุด (ppm.)
เกลือ	
โซเดียมคาร์บอเนต และ ไบคาร์บอเนต	1,000
แคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต	400
แมกนีเซียมซัลเฟตและแมกนีเซียมคลอไรด์	40,000
โซเดียมคลอไรด์	20,000
โซเดียมซัลเฟต	10,000
ตะกอน	2,000
เกลือของแร่เหล็ก	40,000
เกลือของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีสและดีบุก	500
กรดอนินทรีย์	10,000
โซเดียมไฮดรอกไซด์	500
น้ำตาล	500
เห็ดรา	500 - 1,000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5. ประเภทน้ำยาเคมีผสมเพิ่มตามมาตรฐาน ASTM C - 494

ประเภท	รายละเอียด
A	สารลดปริมาณน้ำ (Water - Reducing)
B	สารยืดเวลาการก่อตัว (Retarding)
C	สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว (Accelerating)
D	สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว (Water - Reducing and Retarding)
E	สารลดปริมาณน้ำและเร่งเวลาการก่อตัว(Water - Reducing and Accelerating)
F	สารลดปริมาณน้ำพิเศษ (Water - Reducing and High Range)
G	สารลดปริมาณน้ำพิเศษและยืดเวลาการก่อตัว (Water - Reducing , High Range)

ตารางที่ 2.6. คุณสมบัติของไมโครซิลิกา (Condensed Silica Fume)

คุณสมบัติทางเคมี	
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	88% (Min.)
คัลเซียมออกไซด์ (CaO)	2.5 % (Max.)
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	2.2 % (Max.)
อลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3)	2.2 % (Max.)
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	1.8 % (Max.)
โปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O)	2.5 % (Max.)
มักเนเซียมออกไซด์ (MgO)	3.5 % (Max.)
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	1.5 % (Max.)
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition)	3.5% (Max.)
คุณสมบัติทางฟิสิกส์	
พื้นที่ผิวเฉพาะ (Specific Surface)	15 - 20 ตร.ซม./ กรัม
ขนาดอนุภาค (Platicle Size)	0.13 - 0.16 μm.
ลักษณะผิว (Surface Texture)	เรียบ (Smooth)
ความหนาแน่น (Density)	0.4 - 0.7 กก./ลบ.ม.

ตารางที่ 2.7. คุณสมบัติทางเคมีของขี้เถ้าลอย (Fly Ash) ตามมาตรฐาน ASTM C - 618

ตัวอย่าง	ส่วนประกอบทางเคมี %									
	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	KO	CaO	Fe_2O_3	SrO	ZrO
1	< 1.50	1.05	10.67	41.31	4.89	1.89	22.72	16.71	0.16	0.02
2	< 1.50	0.89	10.91	41.48	4.51	1.89	23.34	16.82	0.16	0.02
เฉลี่ย	*< 1.50*	*0.97*	*10.79*	*41.39*	*4.70*	*1.89*	*23.03*	*16.76*	*0.16*	*0.02*

หมายเหตุ: ทดสอบโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8. การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพเหลว

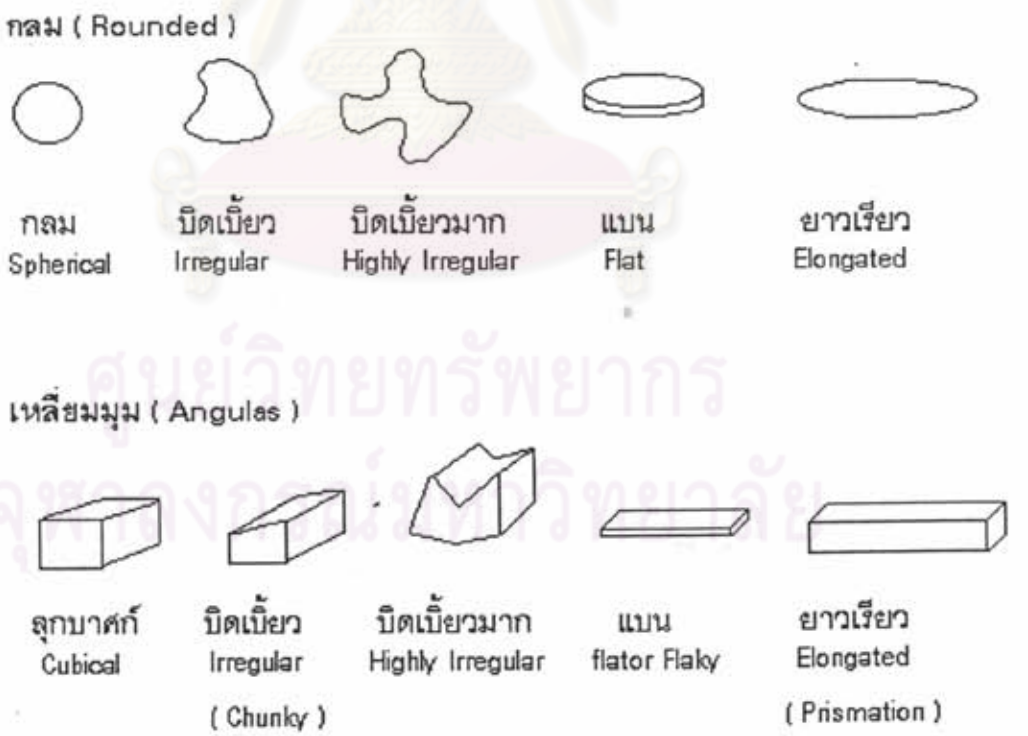
การทดสอบคอนกรีตเหลว (Fresh Concrete)	*วิธีการทดสอบ*
1.การยุบตัว (Slump)	ASTM C - 1473
2.การไหลตัว (Determination of Flow)	DIN 1078, PART 1 หรือ AASHTO T - 120, 126
3.หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight)	ASTM C - 138 หรือ BS.1881, part 2
4.ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)	ASTM C - 403
5.ปริมาณอากาศ (Air Content)	ASTM C - 231
6.การทำแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ (Making Test Cube)	BS 1881, part 3
7.การทำแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Making Test Cylinder)	ASTM C - 39
8.การทดสอบคอนกรีตเหลวในห้องปฏิบัติการ (Fresh Concrete Test Specimens in the Laboratory)	ASTM C - 192

ตารางที่ 2.9. การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็งตัว

การทดสอบคอนกรีตแข็งตัว (Hardened Concrete)	*วิธีการทดสอบ*
1.กำลังอัดคอนกรีตตัวอย่าง (Compressive Strength)	ASTM C - 131
2.กำลังดัด (Flexural Strength)	ASTM C - 78 , C - 293
3.โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนพัวซอง (Modulus of Elasticity & Poisson's Ratio)	ASTM C - 469
4.กำลังดึงแตกแยก (Splitting Tensile Strength)	ASTM C - 496
5.การซึมผ่านของน้ำ (Permeability of Water)	Din 1048, part 1
6.การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)	ASTM C - 462 หรือ BS 1881, part 120

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.1. องค์ประกอบต่างๆของคอนกรีต

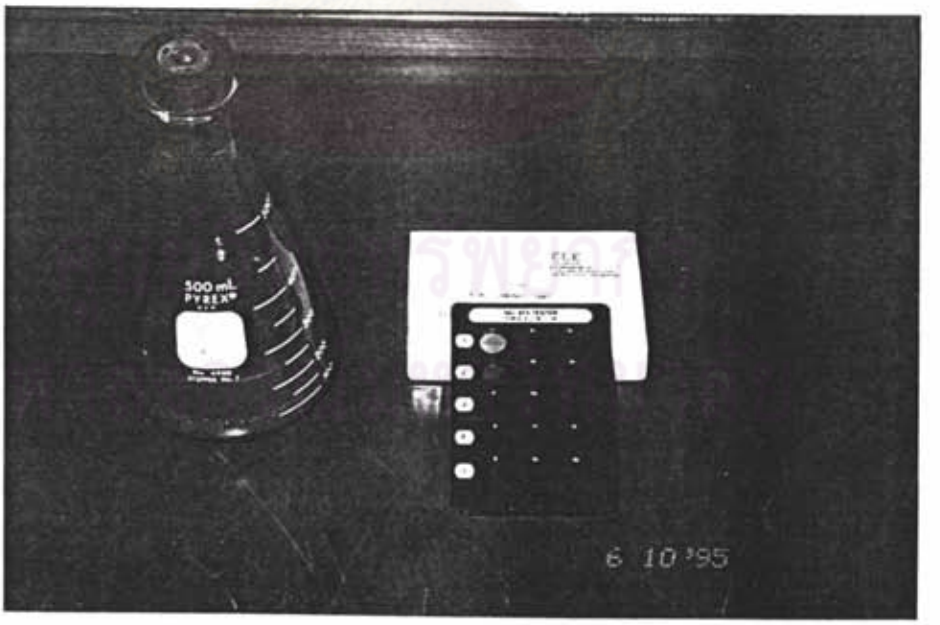


รูปที่ 2.2. การแบ่งชนิดตามรูปร่างของมวลรวม (Particle Shape)

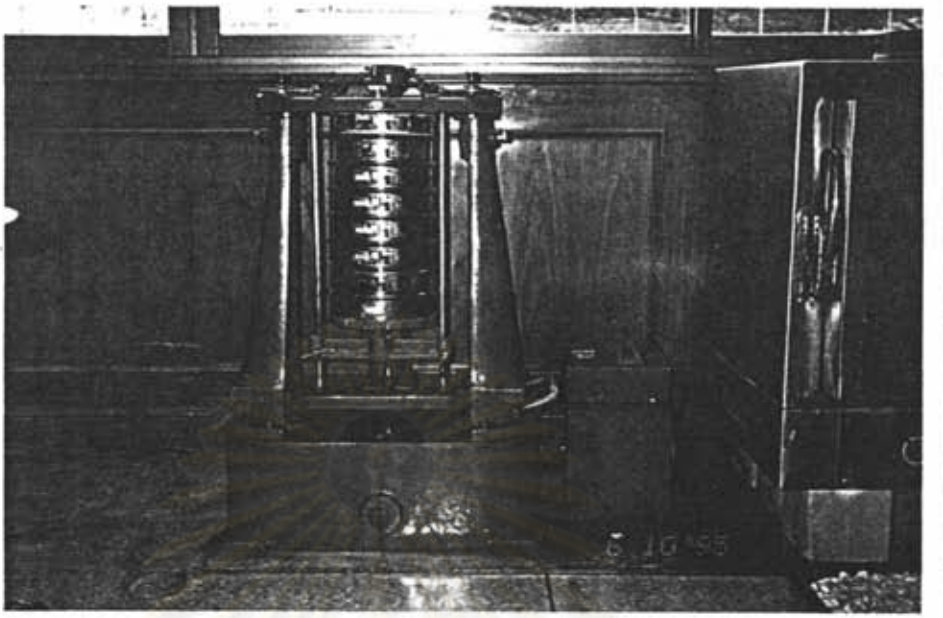
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16796418

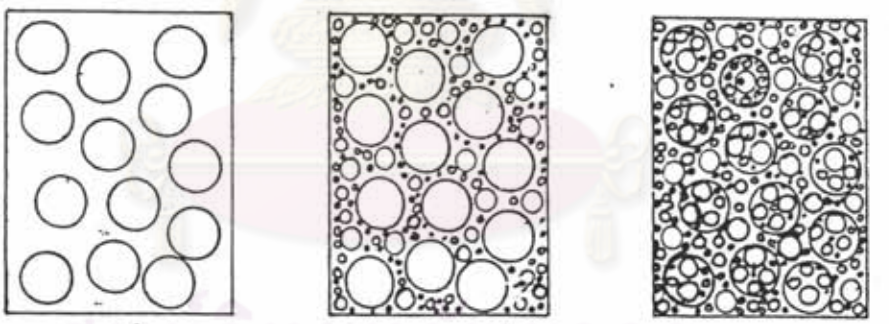
รูปที่ 2.3. การทดสอบความทนทานต่อการสึกกร่อนโดยวิธี Los Angeles Abrasion

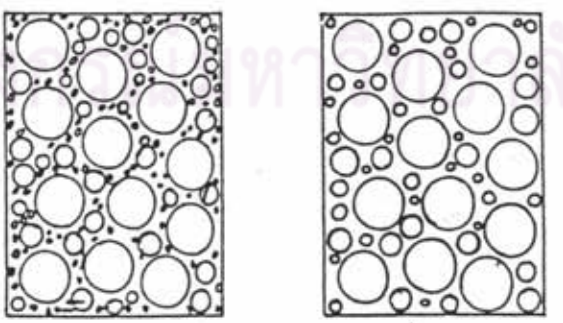


รูปที่ 2.4. การทดสอบหาปริมาณสารอินทรีย์เจือปนในมวลรวมละเอียด



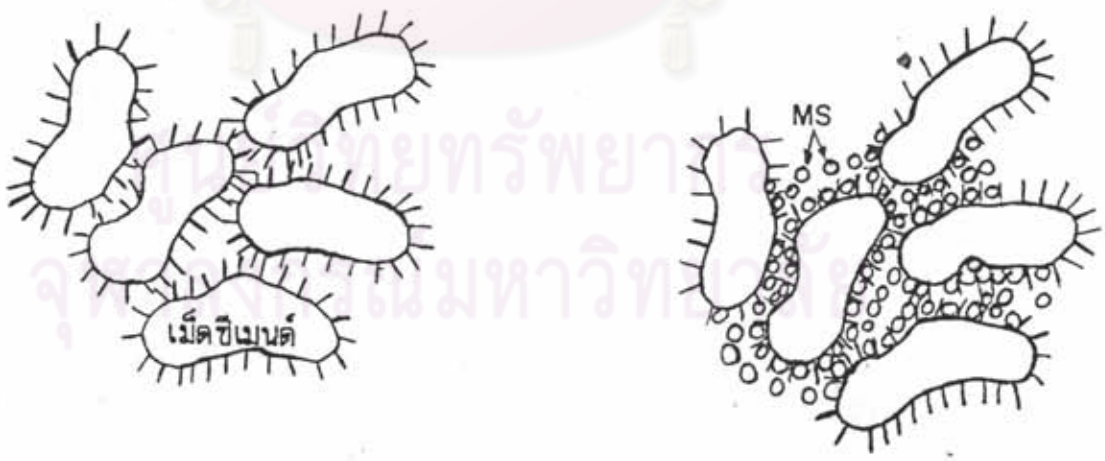
รูปที่ 2.5. การทดสอบขนาดคละของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน





รูปที่ 2.6. การเรียงตัวของขนาดคละมวลรวม (Gradation)

รูปที่ 2.7. ลักษณะการทำงานของสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer Admixture)

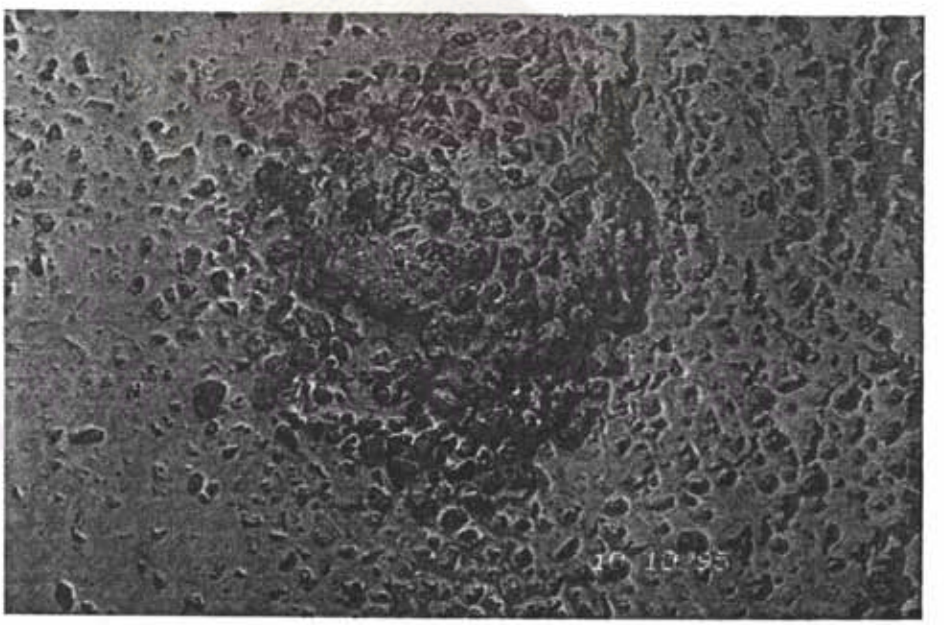


รูปที่ 2.8. การวางตัวอนุภาคของไมโครซิลิการะหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์

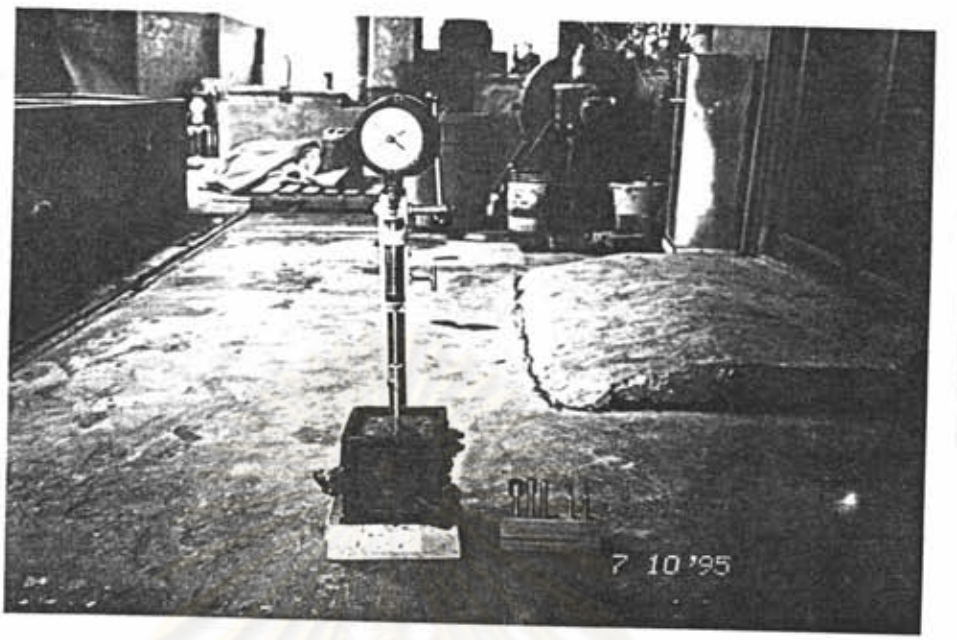
รูปที่ 2.9. การทดสอบการยุบตัว (Slump Test)

รูปที่ 2.10. การทดสอบการไหลตัว (Flow Testing)

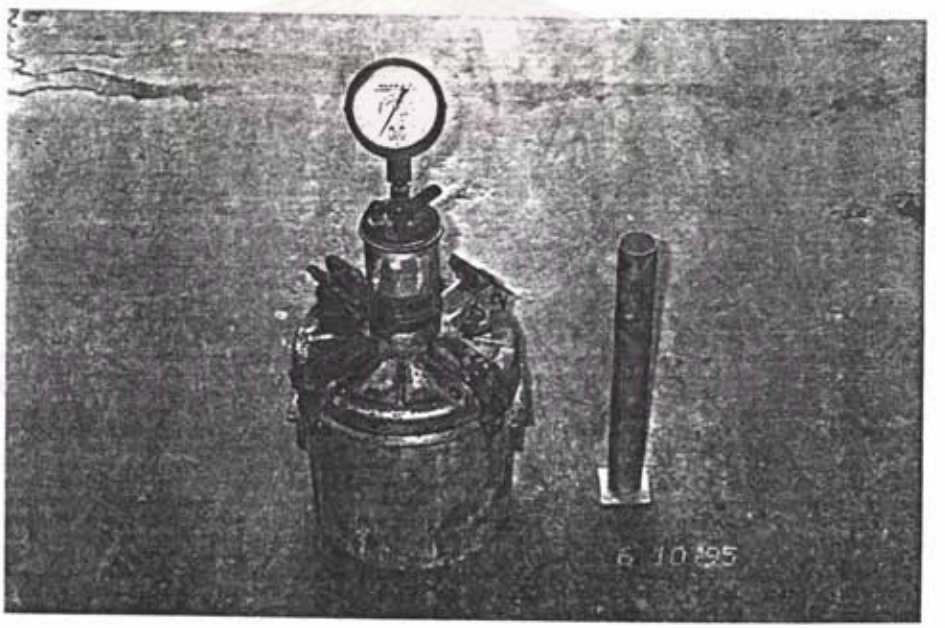
รูปที่ 2.11. การเยิ้มของคอนกรีต (Bleeding)



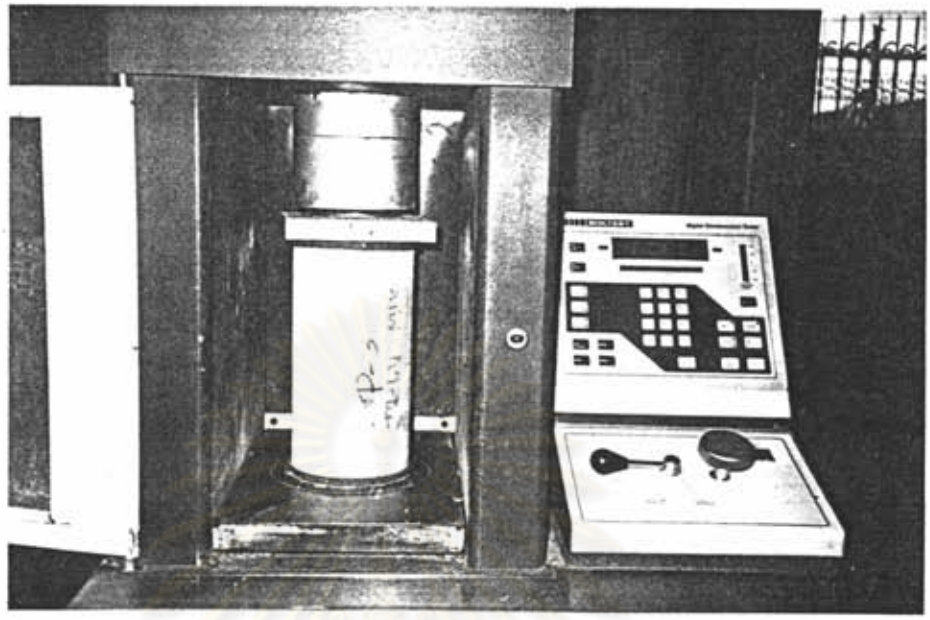
รูปที่ 2.12. การแยกตัวของคอนกรีต (Seggregation)



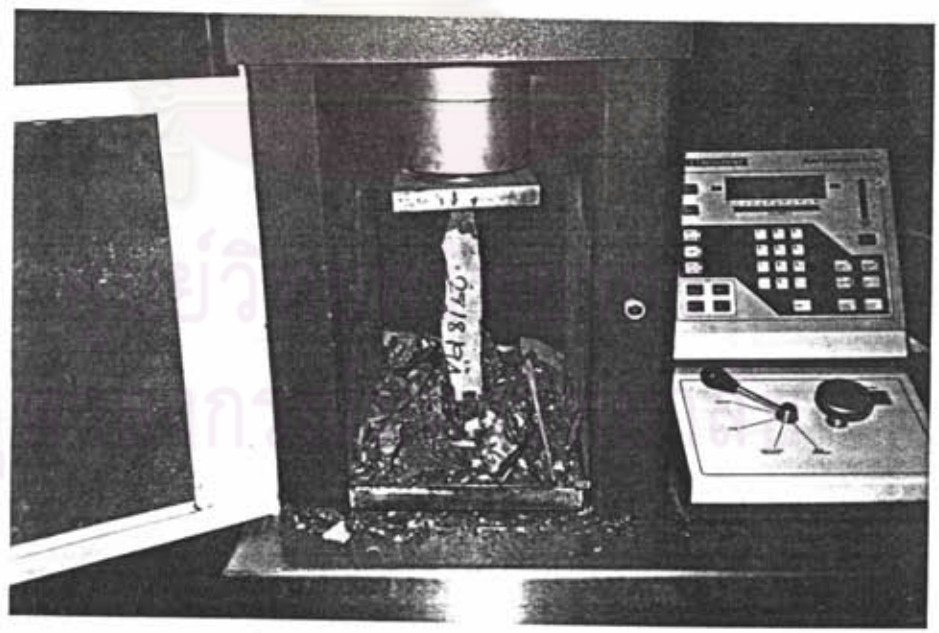
รูปที่ 2.13. การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)



รูปที่ 2.14. การทดสอบปริมาณอากาศโดยวิธีใช้ความดัน (Air Content)



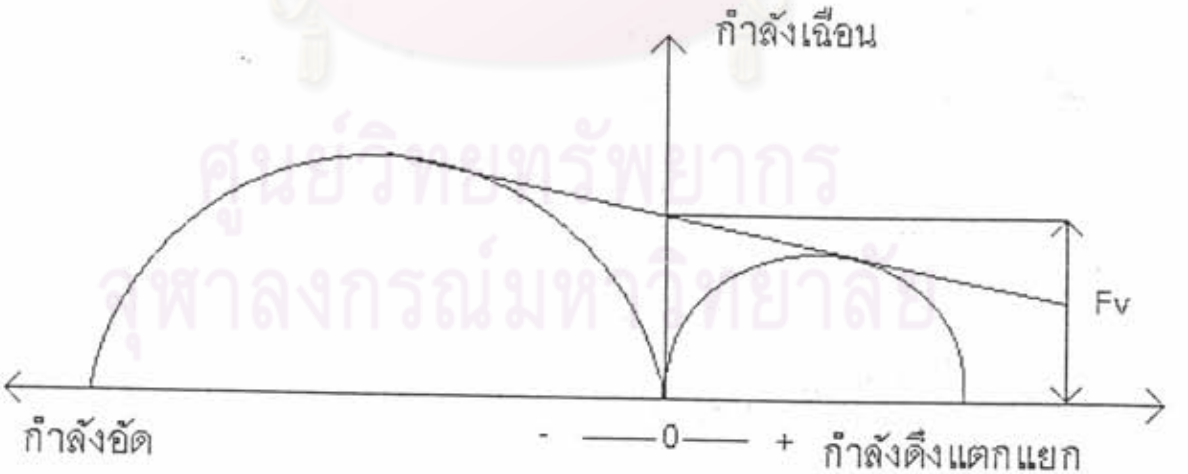
รูปที่ 2.15 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)



รูปที่ 2.16. การวิบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงจากการทดสอบกำลังอัด

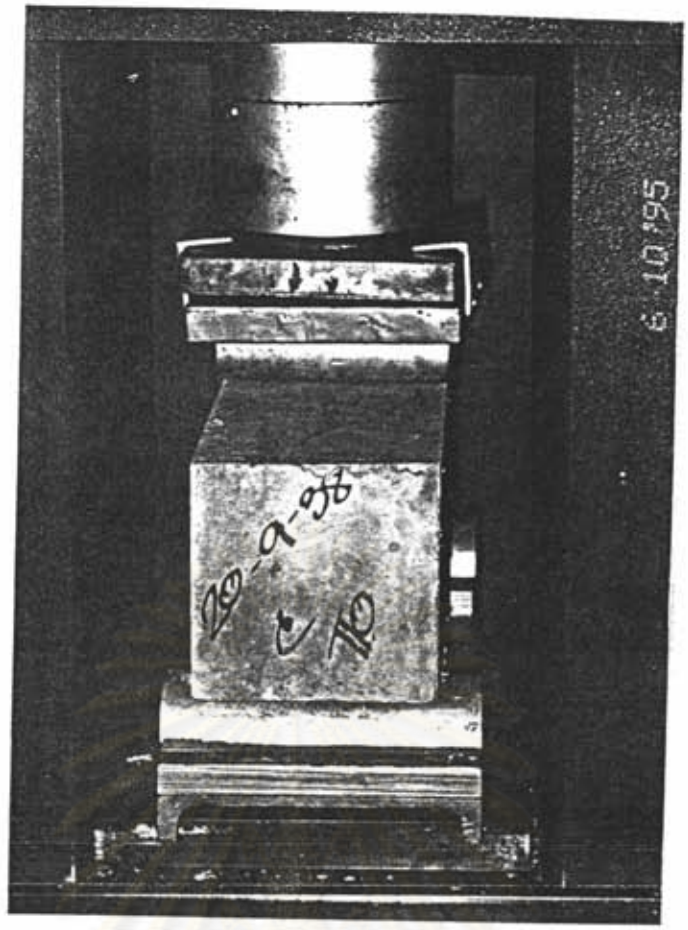
(Failure of High Performance Concrete)

รูปที่ 2.17. การทดสอบกำลังดึงแตกแยกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength)

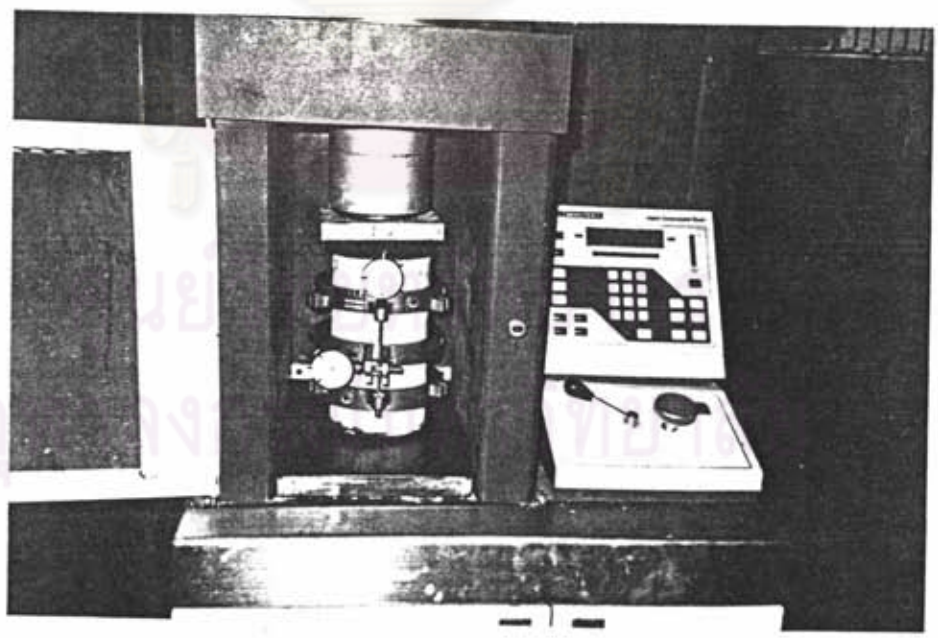


รูปที่ 2.18. ค่ากำลังเฉือนโดยวิธีการของมอร์ (Morh's Rupture Diagrame)

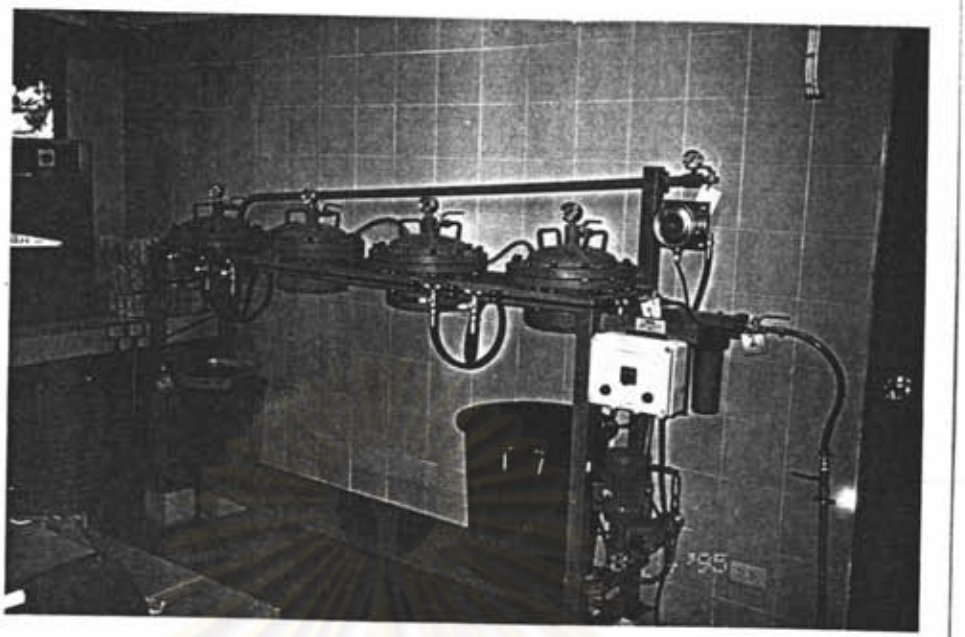
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.19. การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีต (Flexural Strength)



รูปที่ 2.20. การทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นและอัตราส่วนพัวซอง
โดยเครื่องมือ Compressometer - Extensometer



รูปที่ 2.21. การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต (Permeability)

รูปที่ 2.22. การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption of Concrete)