

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในงานก่อสร้างโดยทั่วไป วิธีที่จะควบคุมคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้มีคุณภาพที่ดีวิธีหนึ่งคือการบ่มคอนกรีต ซึ่งการบ่มคอนกรีตจะช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีตและจะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ เป็นผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้การบ่มจึงมีอิทธิพลมากต่องานก่อสร้างทั่วไปในปัจจุบัน

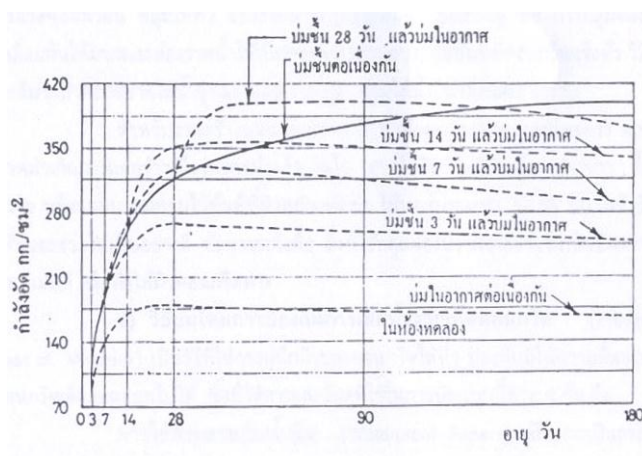
ในระหว่างที่คอนกรีตกำลังแข็งตัวอยู่นั้น คอนกรีตต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาทางเคมีอย่างเพียงพอ หากน้ำมีไม่เพียงพอในระยะใดระยะหนึ่ง การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีก็จะหยุดในระยะนั้น และถ้าอยู่ในระยะที่ความแข็งแรงไม่พอที่ต้านทานการหดตัว อันเนื่องจากการระเหยของน้ำหรือเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงแล้ว อาจทำให้เกิดการเสียหายแตกร้าวขึ้นในเนื้อคอนกรีตหรือตามผิวที่แห้งก่อนนั้นได้ทุกเมื่อ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการเก็บน้ำให้ชุ่มตลอดเวลา เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินอย่างต่อเนื่องให้มากที่สุด หรือจนกระทั่งปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากผู้รับเหมาก่อสร้างส่วนใหญ่ ไม่ค่อยให้ความสำคัญในงานบ่มผิวคอนกรีตเท่าที่ควรซึ่งมักจะเลยการบ่มทำให้น้ำระเหยออกจากผิวคอนกรีต เป็นผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์และทำให้ความสามารถรับกำลังอัดในคอนกรีตที่ได้ต่ำลง รวมทั้งยังทำให้เกิดปัญหาการแตกร้าวที่เนื้อคอนกรีตหรือตามผิวที่แห้งก่อนตามมามากด้วย

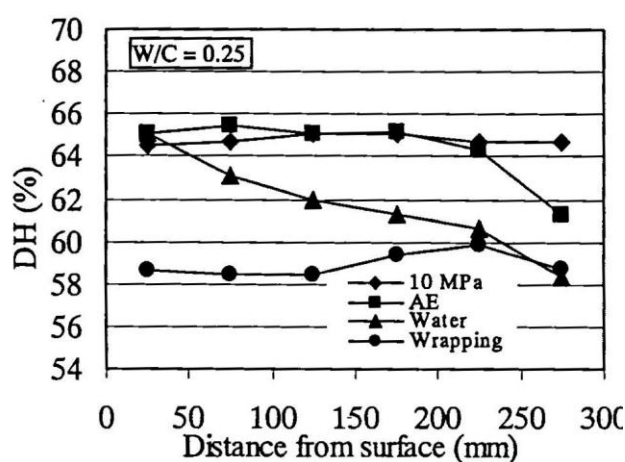
คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับซีเมนต์ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยน้ำที่ใช้บ่มผิวคอนกรีตได้ซึมผ่านเข้าไปภายใน ซึ่งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มปริมาณน้ำในช่องว่างภายในของคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และน้ำที่ใช้บ่มนี้ยังช่วยป้องกันไม่ให้น้ำภายในคอนกรีตระเหยออกไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอกอีกด้วย สำหรับงานก่อสร้างทั่วไปนั้นมักพบเสมอว่าไม่ได้ดำเนินการบ่มคอนกรีตที่ต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงวันแรกๆ และเมื่อมีการบ่มคอนกรีตในช่วงหลังพบว่าน้ำที่ซึมผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตของน้ำที่ใช้บ่มเป็นไปได้อย่างขึ้นเนื่องจากคอนกรีตมีโครงสร้างผลึกที่แน่นขึ้น ดังนั้นจึงต้องพยายามหาวิธีการให้น้ำที่ใช้บ่มสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ ดร.คมสัน มาลีสี (2545) พบว่าน้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในแท่งคอนกรีตตัวอย่างได้ดีกว่าการ

บ่มด้วยน้ำธรรมดาทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าสูงขึ้น ซึ่งน้ำที่มีค่าแรงดึงผิวดำนนี้น่าจะมีส่วนช่วยในการบ่มคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้นแล้ว ได้ดีกว่าการบ่มด้วยน้ำธรรมดา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองบ่มคอนกรีตด้วยเงื่อนไขของการบ่มแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อที่จะวัดความสามารถในการแพร่ของน้ำที่ใช้บ่มคอนกรีตทั้งน้ำธรรมดาและน้ำที่มีแรงดึงผิวดำโดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต



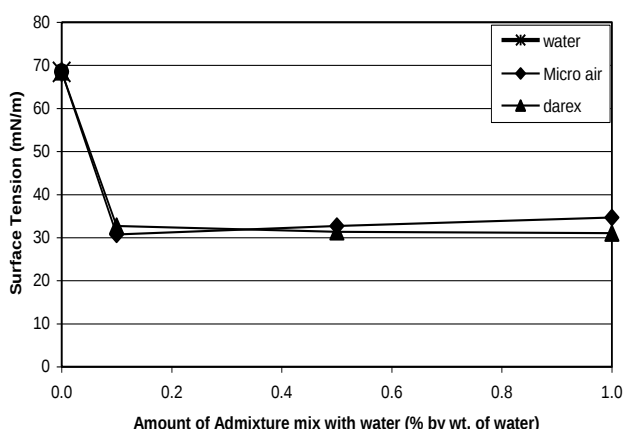
รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับระยะเวลาการบ่ม (วินิต ช่อวิเชียร, 2539)

จาก ดร.คมสัน มาลีสี (2545) ได้ศึกษาพบว่าสารกักกระจายฟองอากาศ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงดึงผิว (AE-Water) เมื่อนำมาบ่มกับคอนกรีตจะมีความสามารถในการซึมผ่านเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ได้ดีมากกว่าน้ำปกติ ที่ 28 วัน ดังรูปที่ 1.1. จึงเป็นข้อมูลที่น่าสนใจเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงดึงผิวในการบ่มคอนกรีต จึงได้นำมาพิจารณา



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความลึกของตัวอย่าง W/C 0.25

จากการศึกษาอิทธิพลของการบ่มโดยใช้สารลดแรงตึงผิว Influence of Low Surface Tention Curing on Properties of Cementitious Material ของ นายไชยเดช ไช้ไพโรจน์ และ นายอานนท์ ปทุมานนท์ พบว่าน้ำผสมสาร Micro air ที่ปริมาณ 1 % มีการซึมผ่านช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสม่ำเสมอในชั้นความลึกต่างๆ ได้ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น ดังนั้นจึงนำข้อมูลนี้มาศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการบ่มเพิ่มเติมโดยการศึกษาวิธีการบ่มเพื่อเปรียบเทียบการบ่มด้วยน้ำผสม Micro air ที่ปริมาณ 1 % การบ่มด้วยน้ำ การบ่มด้วยอากาศ การบ่มแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้ที่น้ำผสม Micro air ที่ปริมาณ 1 % บ่มด้วยน้ำ และ การบ่มแบบ Wrapping



รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของสารกักกระจายฟองอากาศต่างๆ

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 ศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของน้ำที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตที่ระยะเวลาต่างๆ

1.3.2 วิเคราะห์ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากการซึมผ่านของน้ำที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตเข้าไปยังแท่งคอนกรีตตัวอย่าง

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวและเงื่อนไขการบ่มต่างๆ ต่อค่าความสามารถในการซึมผ่าน ปฏิกิริยาไฮเดรชัน การหดตัวทางเคมี การหดตัวภายนอก และความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต

1.3.4 เพื่อนำผลที่ได้จากการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการบ่มคอนกรีตก่อสร้าง ในการเลือกใช้วิธีการบ่มและการใช้สารผสมเพิ่ม ณ สถานที่ก่อสร้างจริง เพื่อให้งานก่อสร้างมีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศเข้มข้น 1 % ซึ่งมีค่า

Surface Tension ประมาณ 32 mN/m เปรียบเทียบกับการบ่มแบบต่อเนื่องด้วย น้ำ อากาศ Wrapping และการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง คือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 1, 3, 7 และ 14 วัน แล้วจึงทำการทดสอบ โดยทำการวัดค่าความชื้นผ่าน ปฏิริยาไฮเดรชัน และการหดตัว (Autogenous Shrinkage) ของซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type 1

1.4.2 ศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยน้ำและน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศเข้มข้น 1 % เพื่อทดสอบหาการดำเนินไปของปฏิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากค่าการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage)

1.4.3 ศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศเข้มข้น 1 % เปรียบเทียบกับการบ่มด้วย น้ำ อากาศ Wrapping และการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง โดยทำการวัดค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่ 250 และ 450 ksc. ที่อายุของคอนกรีต 1, 3, 7 และ 28 วัน โดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type 1

1.4.4 ศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศเข้มข้น 1 % เปรียบเทียบกับการบ่มด้วย น้ำ อากาศ Wrapping และการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง โดยทำการตรวจด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope : SEM

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวนำความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการวิจัย พื้นฐานนิยามและความหมายของค่าต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยสารผสมเพิ่ม การบ่มคอนกรีต (Curing) ปฏิริยาไฮเดรชัน การหดตัวทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ พลังงานของแรงตึงผิวของน้ำ (Surface Tension Energy of Water) การออกแบบปฏิกิริยาส่วนผสม และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการศึกษา วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดสอบ

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการวิจัย พื้นฐานนิยามและความหมายของคำต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยสารผสมเพิ่ม การบ่มคอนกรีต (Curing) การออกแบบปฏิภาคส่วนผสม ปฏิกิริยาไฮเดรชัน การหดตัวทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ พลังงานของแรงตึงผิวของน้ำ (Surface Tension Energy of Water) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษา

2.1. นิยามและความหมายของคำต่างๆ

ในการวิจัย มีคำต่างๆ ที่จะต้องเกี่ยวข้องกับการศึกษาดังนี้

2.1.1 สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่ม (Admixtures) หมายถึงสารอื่นๆ นอกเหนือจากปูนซีเมนต์ วัสดุผสมและน้ำ ที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของคอนกรีต ไม่ว่าจะก่อนหรือในขณะกำลังผสม เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยให้ได้ผลตามวัตถุประสงค์ข้อหนึ่งหรือหลายข้อตามต้องการ ดังต่อไปนี้

ทำให้คอนกรีตผสมใหม่ ๆ มีความสามารถเทพได้ดีขึ้นเพื่อลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ผสมคอนกรีตให้น้อยลงเกิดการกักกระจายฟองอากาศทำให้มีความทนทานเพิ่มขึ้น เร่งการก่อตัวและการแข็งตัว ทำให้คอนกรีตรับแรงได้เร็วกว่าปกติหน่วงการก่อตัวให้ช้าลงเกิดการกระจายซีเมนต์ทำให้ซีเมนต์เปียกทั่วเมื่อผสมกับน้ำช่วยจับน้ำและกันน้ำซึมทำให้มีความทึบน้ำหรือต้านทานมิให้น้ำซึมผ่านได้ดีขึ้นช่วยเร่งปฏิกิริยาของสารปอซโซลาน ลดการเอี่ยมหรือการคายน้ำทำให้คอนกรีตไม่หดตัวและแตกร้าว เมื่อก่อตัวและแข็งตัวแล้วทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดีขึ้นทำให้เกิดสีและ ฯลฯ

สารผสมเพิ่มที่ใช้ร่วมกับคอนกรีต จะให้ผลแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ขนาดรูปร่างและส่วนขนาดของวัสดุผสม น้ำ สัดส่วนการผสม ระยะเวลาการผสม และอุณหภูมิ ดังนั้นในการใช้สารผสมเพิ่มจึงควรศึกษาถึงส่วนผสมและข้อแนะนำของผู้ผลิตโดยละเอียด จะต้องทดสอบและควบคุมปริมาณที่ใช้ให้ถูกต้อง เพราะสารเหล่านี้จะให้ผลดีต่อเมื่อใช้ในอัตราที่พอเหมาะ ปริมาณที่ผิดไปจะก่อให้เกิดผลเสีย หรือเกิดผลในทางตรงกันข้าม ก่อนการตัดสินใจเลือกใช้สารผสมเพิ่มควรพิจารณาว่า

1. จะมีวิธีการอย่างใดบ้างหรือไม่ ที่จะเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการผสมหรือวิธีการผสม เพื่อให้คอนกรีต มีคุณสมบัติตามความต้องการ แทนที่จะเสี่ยงใช้สารผสมเพิ่มซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้
2. เปรียบเทียบค่าใช้จ่าย เมื่อใช้สารผสมเพิ่มกับการที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มแต่ใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการผสมหรืออย่างอื่นที่จะทำให้คอนกรีตอย่างเดียวกัน
3. ผลที่จะเกิดจากการใช้สารผสมเพิ่ม นอกเหนือไปจากวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

2.1.2 สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Admixtures)

สารชนิดนี้ จะช่วยให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ (มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า) แฝบอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีต แต่ฟองอากาศนี้ไม่ทะลุถึงกันและกัน ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร อาจมีฟองอากาศเล็กๆนี้ประมาณ 3 - 6 % ของเนื้อคอนกรีตทั้งหมด ฟองอากาศที่เกิดขึ้นทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้และหล่อง่ายขึ้น ทำให้ลดปริมาณน้ำผสมคอนกรีตลงได้ (ประมาณ 3 % ต่อฟองอากาศที่เพิ่มขึ้น 1 %) ช่วยต้านทานมิให้น้ำในคอนกรีตแข็งเป็นน้ำแข็งก่อนที่คอนกรีตจะก่อตัวด้วย ซึ่งเป็นประโยชน์ในการหล่อคอนกรีตในฤดูหนาว นอกจากนี้แล้วสารกระจายกักฟองอากาศยังช่วยลดการเย็นและการแยกตัว และการสูญเสียน้ำของคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีเนื้อสม่ำเสมอ แลดูสวย แน่น ไม่ร่วนซึม รวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อซัลเฟตด้วย ข้อเสียของการใช้สารนี้คือทำให้คอนกรีตมีกำลังลดลงประมาณ 3 - 4 % ต่อปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้น 1 % และนอกจากนี้ต้องระวังเรื่องการใช้เครื่องเขย่าให้มาก เพราะถ้าเขย่ามากจะทำให้จำนวนฟองอากาศลดน้อยลงไปเกือบ 50 %

สารกระจายกักฟองอากาศเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำมีอยู่หลายชนิด ซึ่งอาจจะทำมาจากยางไม้ ไขมันหรือน้ำมันสัตว์และพืช หรือจากกรดซึ่งได้มาจากยางไม้หรือไขมันของสัตว์และพืชเป็นต้น มีทั้งชนิดผงและชนิดเหลวอัตราการใช้ประมาณ 0.005 - 0.05 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

2.1.3 การบ่มคอนกรีต (Curing)

การบ่มหรือบำรุงคอนกรีต (Curing) เป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำที่เหลืจากการทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ ระบายออกมาจากคอนกรีตที่เทลงแบบหล่อและแข็งตัวแล้วเร็วเกินไปเพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงและความทนทานตามต้องการ

หลังจากเทคอนกรีตและทิ้งไว้จนผิวหน้าคอนกรีตหมาดแข็งปราศจากรอยแล้วจะต้องทำการบ่มทันทีด้วยวิธีที่ถูกต้องโดยปกคลุมผิวมิให้ถูกแดดหรือลมร้อน และมีให้ถูกรบกววนหรือสะท้อนโดยเฉพาะภายในระยะ 24 ชั่วโมงแรก ทั้งนี้เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีและมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ อีกทั้งการป้องกันการสูญเสียน้ำจากคอนกรีตที่เทใหม่ๆ มิฉะนั้นคอนกรีตจะเกิดการหดตัวเร็ว ทำให้เกิดแรงที่ผิวที่กำลังจะแห้งเป็นผลให้เกิดรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต ช่วง

ระยะเวลาที่ป้องกันและรักษาความชื้นนี้ไว้ภายหลังจากเทคอนกรีตลงแบบหล่อแล้ว เรียกว่า ระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต (Curing Period)

กำลังของคอนกรีตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ トラบเท่าที่ยังมีความชื้นให้ซีเมนต์ปฏิกิริยากับ น้ำได้ต่อไปอีก กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มสูงขึ้นรวดเร็วในระยะแรกและค่อยๆ ช้าลงในเวลาต่อมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชื้นและอุณหภูมิที่พอเหมาะ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 จากเส้นสัมพันธ์จะเห็นว่า หลังจากบ่มในอากาศแห้งแล้วบ่มขึ้นตลอดเวลา ซึ่งสภาพของงานก่อสร้างจริงไม่อาจจะบ่มขึ้น ตลอดเวลานานๆ ได้ เพราะมีข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาก่อสร้างและค่าใช้จ่าย ฉะนั้นจึงควรทำการ บ่มชื้นให้ต่อเนื่องกันตั้งแต่ต้นประมาณ 7 - 14 วัน เพื่อให้คอนกรีตมีกำลังประมาณ 70 % ของกำลังอัดที่ต้องการ

2.2 ปฏิกริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เกิดจากปฏิกริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของ ปูนซีเมนต์ โดยปฏิกริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คืออาศัยสารละลาย ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลาย และ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

การเกิดปฏิกริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่ จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

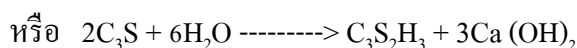
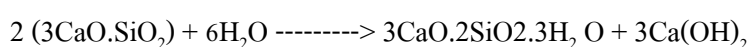
ปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสาร ละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกริยาระหว่างของแข็ง

ปูนซีเมนต์จะประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิดเมื่อเกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ ได้ อาจเกิดปฏิกริยาต่อไป ทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณา ปฏิกริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์

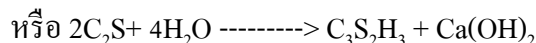
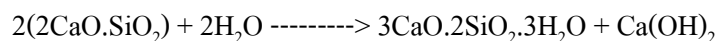
2.2.1 ปฏิกริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

คัลเซียมซิลิเกตทำปฏิกริยากับน้ำก่อให้เกิด “คัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)” ประมาณ 15 - 25% และสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ $C_3S_2H_3$ หรือ CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรง ดังสมการ ต่อไปนี้

สมการของ C_3S



สมการของ C_2S



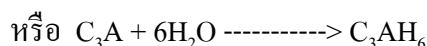
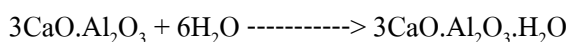
จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างมาก คือ มี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

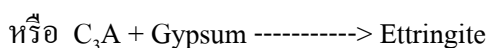
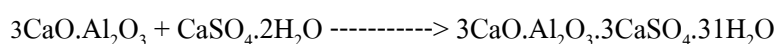
2.2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดขึ้นที่ทันทีทันใดและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C_3A



ในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ จะมีการใส่ยิปซัมเข้าไป เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A ไม่ให้เกิดเร็วเกินไป โดยยิปซัมที่ใส่จะทำปฏิกิริยากับ C_3A ทำให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการต่อไปนี้



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้เกิดการก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_3A เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กล่าวคือเมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

2.2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้ จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite

2.3 การหดตัวทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ (Chemical Shrinkage of Cement Paste)

การหดตัวทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ (Chemical Shrinkage) คือ ปรากฏการณ์ซึ่ง ปริมาตรสุทธิในกระบวนการไฮเดรชันน้อยกว่าปริมาตรรวมของซีเมนต์และน้ำก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน Chemical Shrinkage จะอธิบายโดยสมการดังนี้

$$S_{sh} = \frac{(V_c + V_w) - V_{hy}}{V_{ci} + V_{wi}} \times 100 \quad (\%) \quad (2.1)$$

โดยที่ S_{hy} = Chemical shrinkage ratio (%)

V_{ci} = Volume of cement before mixing

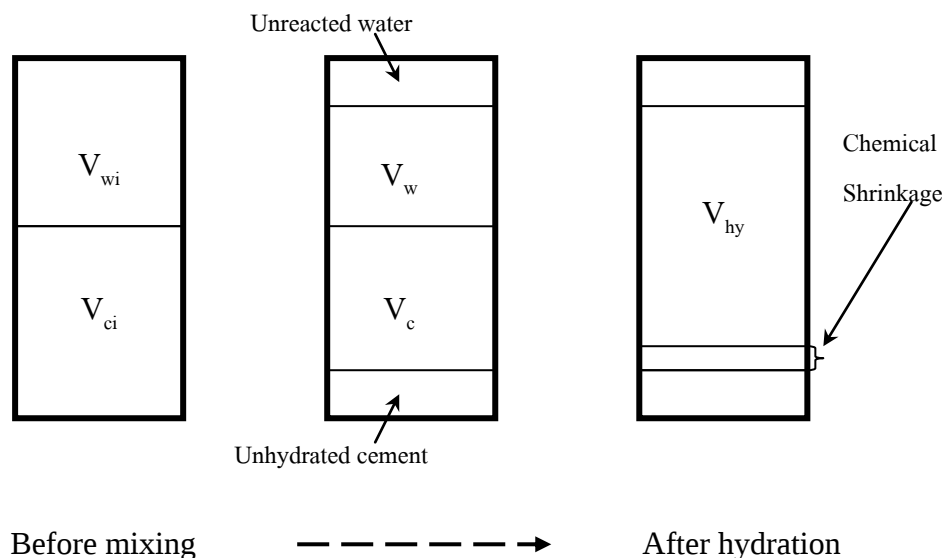
V_c = Volume of hydrate cement

V_{wi} = Volume of water before mixing

V_w = Volume of reacted water

V_{hy} = Volume of hydration products

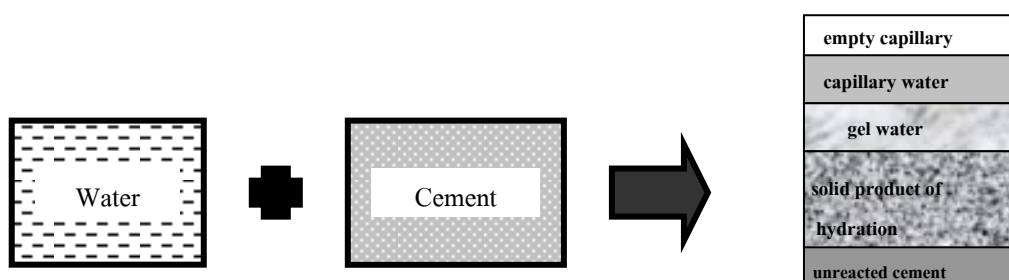
เมื่อซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วถูกพิจารณาเป็นส่วนประกอบของ สภาวะของแข็ง (ซีเมนต์ที่ปราศจากน้ำและผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน) ส่วนของของเหลว (น้ำที่ยังไม่ได้ผสม) และ สภาวะของก๊าซ (ฟองอากาศที่ยังคงอยู่หลังจากผสมและรูอากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน) ปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) จะถูกพิจารณาเป็นการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์โดยสมบูรณ์ นั่นคือ สภาวะของแข็งบวกสภาวะของเหลว ในทางตรงกันข้าม Autogenous Shrinkage จะถูกพิจารณาเป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรภายนอก ตั้งแต่โครงสร้างของมวลเริ่มก่อตัวขึ้น (ดังรูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.3.1 ส่วนประกอบในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว (The Component in Hardened Cement Paste)

ช่องว่างที่เห็นได้ชัดสำหรับผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันประกอบด้วย ปริมาตรสุทธิของซีเมนต์ที่แห้งตัวรวมกับปริมาตรของน้ำที่ถูกผสมเข้ากัน น้ำที่สูญเสียไปเล็กน้อยเนื่องจากการ Bleeding และ โครงสร้างของเพสต์ในขณะที่ยังคงเป็นสถานะพลาสติกอยู่ จะไม่นำมาพิจารณาในสถานะนี้ น้ำจะสร้างพันธะทางเคมี โดย C_3S และ C_2S จะถูกแสดงอย่างประมาณคือ 24 % และ 22 % ของน้ำหนักของซิลิกาสองชนิดตามลำดับ โดยลักษณะที่สอดคล้องกันสำหรับ C_3A และ C_4AF คือ 40 และ 37 % ตามลำดับ



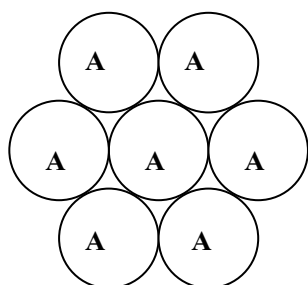
รูปที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วประกอบด้วย ซีเมนต์ที่ปราศจากน้ำ, ผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นของแข็งของปฏิกิริยาไฮเดรชัน Gel Water, Capillary Water และอากาศดังแสดง

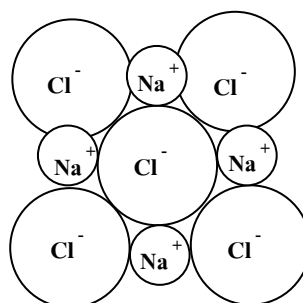
ในรูปด้านบนปริมาณของแต่ละส่วนประกอบมีการเปลี่ยนแปลง ระหว่างกระบวนการของปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลที่ตามมาจะทำให้ Pore จะเพิ่มขึ้นด้วย การกลายเป็นไอของน้ำประกอบไปด้วย Capillary water และ Gel Water ซึ่งการกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 105°C น้ำที่ไม่มีการระเหย คือ น้ำจากพันธะเคมีในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปราศจากน้ำที่อุณหภูมิ 950°C จำนวนของ Non-Evaporable Water จะเพิ่มขึ้น เมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินไปแต่ในเพชรที่ชุ่มด้วยน้ำ Non-Evaporable Water จะไม่สามารถมีมากกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำทั้งหมด ในซีเมนต์ที่ประกอบไปด้วยน้ำที่ดี ซีเมนต์ Non-Evaporable Water จะประมาณ 18 % โดยน้ำหนักของวัสดุซึ่งไม่มีน้ำ สัดส่วนนี้จะเพิ่มถึงประมาณ 23 % ในซีเมนต์ที่ผสมน้ำอย่างสมบูรณ์ (ดังรูปที่ 2.2)

2.4 พลังงานของแรงตึงผิวของน้ำ (Surface Tension Energy of Water)

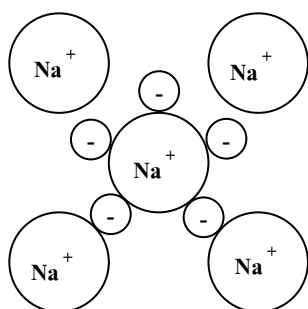
บทนำทางเคมีที่ได้อธิบายถึงโครงสร้างอะตอมและวิธีของพันธะทางเคมีที่ทำให้แน่ใจว่าการรวมตัวของอะตอมเป็นรูปร่างต่างๆ โดยการเพิ่ม ลด หรือแชร์อิเล็กตรอน ลักษณะของชนิดต่างๆ ของพันธะจะบอกว่าเป็นวัสดุชนิดใด สิ่งนี้สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือพันธะที่แข็งแรงระหว่างอะตอม (ไอออนิก โคเวเลนต์ และพันธะโลหะ) และพันธะอย่างอ่อนคือพันธะวานเดอร์วาลส์ ระหว่างโมเลกุล ลักษณะต่างๆ ไปของการประกอบเป็น คลัสเตอร์ จะถูกแสดงในรูปที่ 2.3 (a)



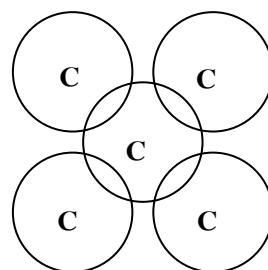
(a) Vander Waals Bonding (Solid Argon)



(b) Ionic Bonding (Sodium Chloride)



(c) Metallic Bonding (Sodium Metal)



(d) Covalent Bonding (Diamond)

รูปที่ 2.3 แรงยึดเหนี่ยวของอะตอม

ในรูป (a) โดยธรรมชาติของอะตอมจะสร้างพันธะอย่างหลวมๆ ด้วยแรง วานเดอร์ วาลส์ (Vander Walls) ซึ่งอะตอมจะเรียงต่อกันด้วยความไม่แน่นอนในการกระจายตัวของประจุ ในรูป (b) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากอะตอมค่า (Alkali) ไปยังอะตอมฮาโลเจน (Halogen) ผลที่ได้คือไอออนจะยึดติดกันแรงไฟฟ้าระหว่างไอออนบวกและไอออนลบ ในรูป (c) วาเลนซ์อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแต่ละอะตอมค่า (Alkali Atom) ไปยังบริเวณแหล่งรวมของอิเล็กตรอนซึ่งในบริเวณนั้นประจุบวกจะสลายตัวไปหมด ในรูป (d) อะตอมจะสร้างพันธะกันโดยส่วนที่ซ้อนทับกันของอิเล็กตรอนที่กระจายตัวอยู่ ในกรณีพิเศษทั้งในพันธะ วานเดอร์วาลส์ เคลื่อนจากบริเวณที่มีแรงไฟฟ้ามากโดยเป็นแรงระหว่าง ไฮโดรเจนอะตอมและอะตอมของ O, F หรือ N ในโมเลกุลจะประกอบด้วยพันธะที่มีขั้ว C-O, H-F หรือ H-N เราจะพิจารณาในกรณีของน้ำเพราะว่าพันธะ O-H เป็นพันธะที่มีขั้วสูง อะตอม H มีประจุบวกจำนวนมากในขณะที่อะตอม O เป็นลบ อะตอมขนาดเล็กของ H จะเข้าหาอะตอมของ O ที่อยู่ใกล้มากที่สุด ดังนั้นจึงเกิดแรงไฟฟ้าที่แข็งแรงระหว่างอะตอมทั้งสอง

แรงภายในของอะตอมจะถูกพิจารณาโดยอะตอมทั้งหมดที่แสดงตัวเป็น อะตอมข้างเดียวที่อยู่ใกล้สุด อะตอมที่อยู่ในช่วงกลาง (ของแข็งหรือของเหลว) ถือว่ามันอยู่ในช่วงของเหลว จะมีพลังงานของปฏิกิริยาเท่ากันในทุกทิศทาง แต่เมื่ออะตอมที่บริเวณผิวหน้าหรืออยู่ใกล้กับผิวหน้าแรงบริเวณนั้นจะไม่เหมาะสมในการสร้างพันธะเพราะว่าไม่มีอะตอมข้างเคียง จากผลดังกล่าว อะตอมจะมีพลังงานภายในสูง ตำแหน่งของมันบน Cordon-Morse Diagram จะเพิ่มขึ้น 1-3 ลำดับ จะพบว่าสมมูลของอะตอมบริเวณผิวหน้าจะดีกว่าบริเวณที่เป็นช่วงกว้าง (Bulk Phase) ถ้าวัตถุดิสามารถหาสมมูลที่ผิวหน้าก็จะเกิดการแยกตัวของอะตอม ผมที่ได้นี้เกิดจากการเกิดรูปร่างผิวขาคกลม ซึ่งให้ค่าพื้นที่ผิวเล็กที่สุด (และบอกพลังงานที่ผิว) ใช้สำหรับบอกปริมาณของวัสดุ หยดเล็กๆ ของของเหลวหรือฟองของก๊าซจะเป็นวงกลมเนื่องจากอะตอมมีการเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่สมมูลบริเวณพื้นผิว (Surfactants) เป็นสารประกอบซึ่งดูดซับได้ดีที่บริเวณส่วนเชื่อมต่อดังนั้นความตึงผิวจึงน้อย โมเลกุลที่ผิวจะเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว แต่ละโมเลกุลจะมี Hydrophilic End (ของน้ำ) และ Hydrophobic (กลับขั้ว) ดังนั้นโมเลกุลจะเรียงตัวที่ขอบระหว่าง 2 ส่วนไม่สามารถรวมกันได้ โดยที่ Hydrophilic ในน้ำและ Hydrophobic End ในของเหลวไม่มีขั้ว การเรียงตัวนี้จะต่ำกว่า Interfacial Energy มันเป็นไปได้ที่จะกระจายของเหลวภายในมวลของหยดน้ำเล็กๆ สารกักกระจายฟองอากาศมีลักษณะเป็นโมเลกุลโซ่ยาวๆ (Long-Chain Molecule) กับกลุ่มขั้วที่ปลาย ดังนั้นจะมาเป็นความเข้มข้นที่ผิวหน้าอากาศและของเหลวกับกลุ่มของขั้วในของเหลวและส่วนที่ไม่มีขั้ว ฟองอากาศจะถูกสร้างขึ้นจากอากาศที่ค้างอยู่ แต่เมื่อมีสารลดแรงตึงผิวแล้ว ฟองอากาศก็จะถูกทำลายเนื่องจากแรงตึงผิวของของเหลว สารลดแรงตึงผิวมีความตึงผิวน้อยกว่าและทำให้เกิดเสถียรภาพมากกว่า สารลดแรงตึงผิว (AE) มีส่วนประกอบโดยง่ายอย่างเช่น เกลือโซเดียมของไขมันหรือกรด Alkyl Aryl Sulfuric แต่บางตัวนอกเหนือจากนี้อาจมีความซับซ้อน

2.5 การออกแบบปฏิภาคนส่วนผสม

การออกแบบปฏิภาคนส่วนผสมคอนกรีตมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการและประหยัด คุณสมบัติของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ที่ใช้เป็นส่วนประกอบ การควบคุมคุณภาพของวัสดุจึงมีความสำคัญอย่างมาก นอกจากนี้ การควบคุมการทำงานและการทดสอบที่เป็นมาตรฐานเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต และต้องให้ความสำคัญต่อความสามารถเท่าได้ กำลังและความคงทนของคอนกรีต ความสามารถทำงานได้ง่ายเมื่อคอนกรีตยังหลวมอยู่ สามารถรับแรงกระทำเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วและเพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตสามารถทนทานต่อการใช้งานในสภาพต่างๆ ภายหลังการออกแบบส่วนผสมแล้ว จะต้องมีการทดลองผสมเพื่อตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีตทั้งในห้องปฏิบัติและในภาคสนาม ซึ่งหากส่วนผสมไม่เป็นไปตามที่ต้องการจำเป็นต้องมีการปรับส่วนผสมใหม่ ทั้งนี้การใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้จริงในการผสมและทำคอนกรีต ย่อมทำให้เกิดความมั่นใจว่าจะได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติและคุณภาพที่ต้องการ

2.6 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope : SEM

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. Optical Microscope
2. Electron Microscope
 - Scanning Electron Microscope (SEM) สำหรับดูพื้นผิวของตัวอย่าง
 - Transmission Electron Microscope (TEM) สำหรับดูโครงสร้างภายในของตัวอย่าง

2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า กล้องชนิดนี้ใช้อิเล็กตรอนแทนแสง โดยใช้อำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าบังคับกระแสนอิเล็กตรอนให้พุ่งไปรวมกันที่จุดใด จุดหนึ่ง บนตัวอย่างในทำนองเดียวกับการใช้เลนส์รวมแสงไปที่จุดโฟกัสในกล้องจุลทรรศน์ แบบธรรมดาซึ่งจะได้ภาพจะเกิดขึ้นบนจอมอนิเตอร์โดยสามารถที่จะเลือกบริเวณ ที่จะดูได้อย่างสะดวก โดยระบบของ เครื่องจะอยู่ในสภาพสุญญากาศ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์อีกหลายสาขา เพราะใช้ส่องให้มองเห็นรูปร่าง ลักษณะของแบคทีเรีย ไวรัส และผลึกที่ประกอบขึ้นเป็นโลหะซึ่งไม่อาจมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาได้

2.6.2 หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

ด้านบนจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (Primary Electron) โดยจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงๆ (High Voltage) โดยใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) โฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบบนชิ้นงาน และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบบนชิ้นงานจะได้สัญญาณแบบต่างๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (Secondary Electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (Backscattered Electron) หรือ X-Ray สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกตรวจวัดโดย Detector แต่ละชนิด และแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลเป็นภาพและกราฟในที่สุด จากภาพแสดงถึงระบบกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบสแกน โดยเริ่มตั้งแต่แหล่งกำเนิดพลังงานอิเล็กตรอน (Electron Gun) ระบบเลนส์ (Electro Magnetic Lens) สัญญาณภาพต่างๆ (Signal Images) ตลอดจนหัวตรวจจับสัญญาณต่างๆ (Signal Detectors) ที่ให้ข้อมูลและผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน

2.6.3 ลักษณะของสัญญาณชนิดต่างๆ

Secondary Electrons ให้ข้อมูลในลักษณะเป็นภาพพื้นผิวจริงของวัตถุมีลักษณะสูงต่ำและร่องรอยที่เกิดขึ้นจริงบนวัตถุ

Back Scattered Electrons ให้ข้อมูลในลักษณะเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของวัตถุในลักษณะแบ่งเป็นเฟสสว่างและเฟสมืด ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของธาตุ (Z) ที่ผสมอยู่ในวัตถุนั้น ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าจะมีเฟสที่สว่าง กว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า

X - Ray ให้ข้อมูลลักษณะบอกเป็นธาตุที่ประกอบอยู่ในวัตถุนั้น โดยแสดงออกมาเป็นกราฟหรือพื้นที่ภาพที่แทนด้วยสีเพื่อบอกตำแหน่งที่อยู่ของธาตุนั้นๆ

2.6.4 ระบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) สามารถแบ่งระบบการทำงานออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. High Vacuum Mode ระบบภายใน Column, Specimen Chamber จะมีความเป็นสุญญากาศสูงประมาณ 10^{-5} - 10^{-6}
2. Variable Pressure Mode ระบบภายใน Column จะเป็นสุญญากาศสูง แต่ภายใน Specimen Chamber จะสามารถปรับแรงดันสุญญากาศได้ตั้งแต่ 1 - 400 Pa.

2.6.4.1 ลักษณะตัวอย่างที่จะสามารถดูในโหมด High Vacuum Mode

1. ต้องมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า ถ้าตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าต้องทำการเตรียมตัวอย่างให้นำไฟฟ้าเสียก่อน

2. ต้องมีลักษณะแห้งไม่มีการระเหยของสารใดๆ

3. ต้องมีขนาดเล็กที่จะสามารถวางบนที่ติดตัวอย่างได้ โดยปกติอยู่ที่ กว้าง ยาว สูง ไม่เกินประมาณ 1 เซนติเมตรหรือมีลักษณะเป็นผ

ประโยชน์ของ High Vacuum Mode เป็นโหมดที่ใช้ความสามารถของเครื่อง SEM ได้เต็มที่ ที่สุดในการดูพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งจะให้ภาพที่คมชัด และใช้กำลังขยายที่สูงกว่า VP Mode ซึ่ง ความคมชัดของภาพขึ้นกับความนำไฟฟ้าของตัวอย่างด้วย

2.6.4.2 ระบบแบบปรับแรงดันสุญญากาศ (Variable Pressure Mode)

จุดประสงค์และประโยชน์ของระบบ Variable Pressure (VP SEM)

1. สามารถดูตัวอย่างได้โดยตรง โดยลดขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างและไม่ต้อง เคลือบผิวด้วยวัตถุนำไฟฟ้า ทำให้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้โดยไม่ทำลายพื้นผิว (Non Destructive Analysis)

2. สามารถดูตัวอย่างได้ทุกชนิดที่มีความชื้น เช่น วัสดุศาสตร์ และชีววิทยา

3. ลดการ Charge up ที่เกิดขึ้นซึ่งทำให้พื้นผิวตัวอย่างถูกทำลาย

4. ทำให้วิเคราะห์ตัวอย่างได้รวดเร็วขึ้น โดยลดแรงดันสุญญากาศลง

หลักการทำงานของระบบ VP โครงสร้างของ VP SEM สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็น (High Vacuum) ประกอบด้วย

- Electron Gun
- Column (CL, OL)
- Differential Pumping Aperture (DPA)
- Pumping System (TMP, RP)
- Chamber Isolation Valve
- Penning Gauge

2. ส่วนที่สามารถปรับแรงดันสุญญากาศ (Variable Pressure) ประกอบด้วย

- Specimen Chamber
- Leak Valve
- Pirani Gauge
- 3 Way Valve

การทำงานของ VP SEM

1. ในส่วนของคอลัมน์ที่เป็น High Vacuum จะทำงานภายใต้สุญญากาศตั้งแต่ 8.50×10^{-5} mBar จนถึง 1.65×10^{-6} mBar
2. ในห้องใส่ตัวอย่าง (Specimen Chamber) สามารถปรับแรงดันสุญญากาศได้ระหว่าง 1 - 400 Pa. โดยมี Chamber Isolation Valve ปิดกั้นระหว่าง Pumping System กับ Specimen Chamber และด้านบนจะมี Differential Pumping Aperture ซึ่งเป็นแผ่นโลหะกลมเจาะรูเล็กๆ ตรงกลาง ปิดกั้นแรงดันสุญญากาศ ระหว่าง Specimen Chamber กับ Electron Column
3. Leak Valve จะทำหน้าที่ปล่อยให้อากาศภายนอกเข้าไปภายในห้องใส่ตัวอย่างตามจำนวนที่กำหนด เพื่อให้มี Gas Molecules เป็นตัวกลางลดประจุอิเล็กตรอนที่สะสมอยู่บนพื้นผิวตัวอย่าง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการ Charge up ในกรณีที่ตัวอย่างไม่นำกระแสไฟฟ้า และ 3 Way Valve จะเปิดดูดอากาศออกจากภายในห้องใส่ตัวอย่างเพื่อให้ได้สุญญากาศตามที่ต้องการ
4. เมื่อ Incident Electron Beam กระแทกกับพื้นผิวตัวอย่างทำให้เกิดพลังงานสัญญาณต่างๆ เช่น Secondary Electron, Backscattered Electron and X-Ray etc.
5. โดยทั่วไปกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน ที่ปรับแรงดันสุญญากาศได้ จะรับเพียงสัญญาณของ Backscattered Electron ซึ่งมีความเข้มของพลังงานที่สามารถผ่านโมเลกุลแก๊สไปได้ ดังนั้นในระบบ VP Mode ทั่วไปจึงต้องใช้ Backscattered Electron Detector (BSD) ไปดักจับสัญญาณ ทำให้ได้ภาพที่มีรายละเอียดแสดงส่วนประกอบโครงสร้างของตัวอย่าง (Compositional Image) เท่านั้น
6. LEO ได้ผลิต Detector ที่สามารถดักจับสัญญาณจากพื้นผิวของตัวอย่างภายใต้ระบบ VP Mode ซึ่งเรียก Detector นี้ว่า VPSE Detector เนื่องจาก Secondary Electron ส่งออกมา กระแทกเข้ากับโมเลกุลของแก๊สที่อยู่ภายในห้องใส่ตัวอย่างทำให้เกิดสัญญาณของ Photons Emission ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีรายละเอียดพื้นผิวของตัวอย่าง เหมือนกับดูจาก Secondary Electron โดยตรง

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มอก. 15-2532

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทั่วไปของซีเมนต์ประเภทที่ 1

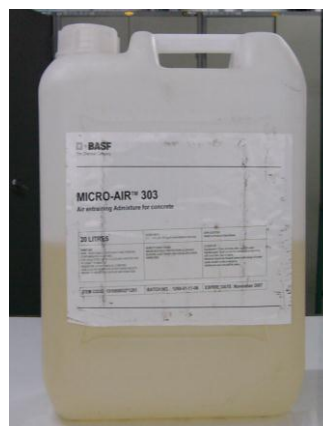
Cement	Fineness (cm^2/g)	Density (g/cm^3)	Mineral Composition (Mass %)					Ig. Loss (Mass %)
			C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	CaSO_4	
Type I	3300	3.15	62.4	13.5	8.3	8.5	2.4	2.00

3.1.2 สารเคมี (Admixtures)

- สารกักกระจายฟองอากาศชนิด Darex AEA ดังรูปที่ 3.1(a)
- สารกักกระจายฟองอากาศชนิด Micro air ดังรูปที่ 3.1(b)



(a) สารกักกระจายฟองอากาศ Darex AEA



(b) สารกักกระจายฟองอากาศ Micro air

รูปที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.3 น้ำ (Water) มีคุณสมบัติดังนี้

1. ต้องไม่มีวัตถุหรือสิ่งของที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งทำให้สี กลิ่น และรสของน้ำเปลี่ยนไปจากธรรมชาติ
2. ความเป็นกรด-เบสของน้ำ (pH) ต้องมีค่าระหว่าง 5.0-9.0
3. ออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen; DO) ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีหรือบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ในน้ำ ต้องมีค่าไม่เกิน 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 4 °C
6. แรงตึงผิวของน้ำเท่ากับ 72 dynes/cm ที่อุณหภูมิ 25 °C

3.1.4 เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ (Hobart Type)

สำหรับผสมซีเมนต์และน้ำ ให้คลุกเคล้ากันดี ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ (Hobart Type)

3.1.5 ชุดอุปกรณ์การหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว อ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 1585-04 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

1. แบบหล่อขึ้นตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3
- 2 . ถาดดั่งกะสี (Pan)



รูปที่ 3.3 แบบหล่อขึ้นตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร

3.1.6. ชุดอุปกรณ์ทดสอบปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

1. แบบหล่อขึ้นตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.4
2. ดินน้ำมัน
3. ตู้อบอุณหภูมิ 105 °C ดังรูปที่ 3.5
4. ตู้อบอุณหภูมิ 950 °C ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.4 แบบหล่อขึ้นตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร



รูปที่ 3.5 เตาอบที่อุณหภูมิ 105 °C



รูปที่ 3.6 เตาอบที่อุณหภูมิ 950 °C

3.1.7 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

1. ขวดแก้วปากกว้าง 2.5 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.7
2. จุกยาง ดังรูปที่ 3.8
3. หลอดปิเปต ดังรูปที่ 3.9
4. แผ่นฟิล์ม (Micro film)



รูปที่ 3.7 ขวดแก้วปากกว้าง 2.5 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร



รูปที่ 3.8 จุกยาง



รูปที่ 3.9 หลอดปิเปต

3.1.8 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ (Autogenous Shrinkage) ตามมาตรฐาน JIS A 1129 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

1. แบบหล่อขึ้นตัวอย่างขนาด กว้าง 4 สูง 4 ยาว 16 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.10
2. เครื่องวัดค่าการยัดหดตัว ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 แบบหล่อขึ้นตัวอย่าง ขนาด กว้าง 4 สูง 4 ยาว 16 เซนติเมตร



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดการหดตัว

3.1.9 ชุดอุปกรณ์ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

1. แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15 เซนติเมตร
2. เหล็กกระทุ้ง หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว

3. น้ำยาและแปรงทาแบบ
4. ช้อนตัก
5. เกรียงเหล็ก
6. แผ่นพลาสติก
7. เครื่องทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

3.1.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 g



รูปที่ 3.14 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 กรัม

3.2 วิธีการทดสอบ

การดำเนินการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 5 การทดสอบ คือ

1. การทดสอบสำหรับการหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 1585-04
2. การทดสอบสำหรับการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ (Hydration) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312
3. การทดลองสำหรับการหาการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312
4. การทดลองสำหรับการทดลองการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน JIS A 1129
5. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108

3.2.1. การทดสอบสำหรับการหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 1585-04

ใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 และสูง 5 เซนติเมตร ด้านหนึ่งเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 นำมาเทลงในแบบ ไล่ฟองอากาศปาดผิวหน้าทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เตรียมตัวอย่างโดยทดสอบก่อนทำการบ่ม (หลังจากถอดแบบ) และทดสอบหลังจากบ่มมาแล้ว โดยทำการบ่มแบบ Wrapping บ่มด้วยน้ำ และปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ ทำการบ่มแบบต่อเนื่อง

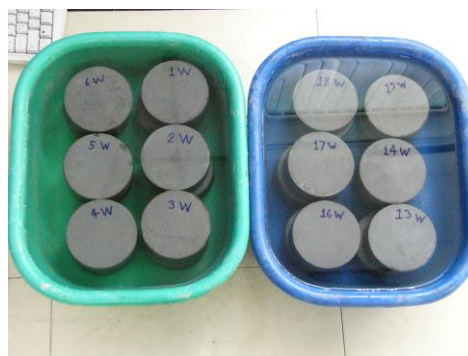
ตลอดเวลาจนอายุของซีเมนต์เพสต์ครบ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบ นำเข้าเตาอบ $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างและวัดขนาด ทำการทดสอบโดยวางในถาดพื้นเรียบที่มีน้ำและถาดที่มี AE ความเข้มข้น 1% ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นระยะจนครบ 7 วัน โดยคำนวณหาความสามารถการซึมผ่าน ได้สมการดังนี้

$$\text{Weight of Penetration water} = \frac{(W_n - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ Weight of Penetration water = เปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ซึมผ่าน

W_0 = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

W_n = น้ำหนักตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ (กรัม)



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างในการทดสอบหาความสามารถการซึมผ่าน

3.3.2 การทดสอบสำหรับการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ (Hydration) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312

ใช้แบบพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 และสูง 40 เซนติเมตร ด้านหนึ่งของหลอดพลาสติกเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 โดยเทชั้นๆ ละ 5 เซนติเมตร และทำการกระทุ้ง จนถึงความสูง 30 เซนติเมตร จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยทำการบ่มด้วยวิธีการบ่มด้วยน้ำบริสุทธิ์ ด้วยน้ำผสม AE ความเข้มข้น 1% โดยทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาจนอายุครบ 28 วัน และทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องคือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิ ที่ 25°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 3, 7 และ 14 วัน แล้วจึงเทน้ำบ่มที่ผิวบนของตัวอย่าง ในปริมาณที่เพียงพอตลอดระยะเวลาการบ่ม เมื่อครบกำหนด 28 วัน จึงนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ออกมาตัดเป็น 6 ส่วน ขนาดเท่าๆ กัน สูงประมาณ 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.12 นำตัวอย่างทั้ง 6 ส่วน ไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก ($M_{105^{\circ}\text{C}}$)

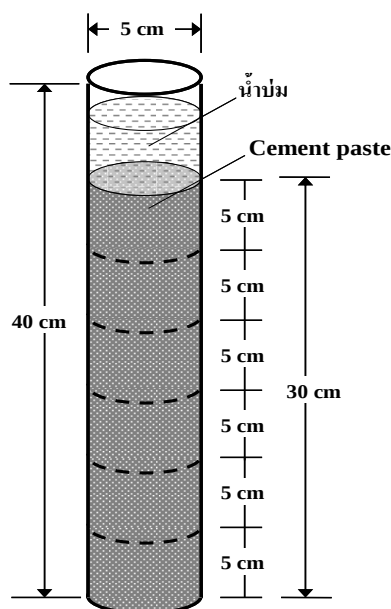
และนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก ($M_{950^{\circ}\text{C}}$) คำนวณหาค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้สมการดังนี้

$$\text{Degree of Hydration} = \frac{M_{105^{\circ}\text{C}} - M_{950^{\circ}\text{C}}}{M_{950^{\circ}\text{C}}} \times \frac{100}{23} \quad (3.2)$$

โดยที่ Degree of Hydration = ค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชัน หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

$M_{105^{\circ}\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 105 °C หน่วยเป็นกรัม (g)

$M_{950^{\circ}\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 950 °C หน่วยเป็นกรัม (g)



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างในการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ (Penetration)

3.3.3 การทดลองสำหรับการหาการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากการหด

ตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312

ใช้ขวดแก้วปากกว้าง 2.5 และสูง 7 เซนติเมตร นำไปชั่งน้ำหนัก (M_1) ผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30, และ 0.44 เมื่อผสมคลุกเคล้ากันดีแล้ว นำมาใส่ในขวดแก้ว โดยให้ซีเมนต์เพสต์สูงจากก้นขวดแก้วประมาณ 2 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนัก (M_2) ทำการเทน้ำและน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศ ความเข้มข้น 1% ลงขวดแก้วอย่างช้าๆ จนเต็มนำจุกยางมาปิดให้สนิท ซึ่งจุกยางนี้จะเจาะรูตรงกลางจุกยางเพื่อใส่หลอดปิเปตเข้าไปในจุกยาง หลังจากปิดจุกยาง

เรียบร้อย น้ำจะดันขึ้นมาในหลอดปิเปต อุดรูอากาศรอบๆ จุกยางด้วยกาว เพื่อให้เป็นระบบปิด ปิดปากหลอดปิเปตด้วยแผ่นฟิล์ม (Micro film) เพื่อไม่ให้น้ำในหลอดปิเปตระเหยออกไป และจดค่าระดับน้ำในหลอดปิเปตที่ลดลง เป็นระยะๆ ทุกๆ วันจนครบ 28 วัน จากนั้น หาค่าการหดตัวทางเคมี ได้สมการดังนี้

$$V_p = \frac{(M_2 - M_1) \times (w/c) / D_w + 1 / D_c}{(w/c) + 1} \quad (3.3)$$

โดยที่ V_p = ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ในขวดแก้ว หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mL)

M_1 = น้ำหนักของขวดแก้ว หน่วยเป็นกรัม (g)

M_2 = น้ำหนักซีเมนต์เพสต์และขวดแก้ว หน่วยเป็นกรัม (g)

w/c = อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

D_w = ความหนาแน่นของน้ำ หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร (g/mm^3)

D_c = ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

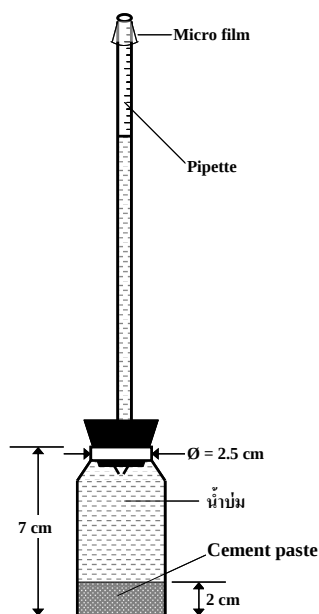
$$\text{Shy} = \frac{H_n - H_o}{V_p} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่ Shy = ค่าการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) ที่ระยะเวลาต่างๆ

H_n = ระดับน้ำที่จุดเริ่มจับเวลา หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mL)

H_o = ระดับน้ำที่ระยะเวลาต่างๆ หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mL)

ทำการพล็อตกราฟระหว่างค่า Shy ในแนวแกน y และระยะเวลาในแนวแกน x หาสมการเส้นแนวโน้มของกราฟนี้ แทนค่าในสมการโดยสมมติให้ค่าในแกน x เป็นระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ เพื่อหาค่าในแกน y เป็นการเกิดปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) ได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งก็คือค่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่ 100% เช่นกัน การเปรียบเทียบค่า Shy ที่ระยะเวลาต่างๆ เป็นการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration)



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างในการทดสอบการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage)

3.3.4 การทดลองสำหรับการทดลองการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน JIS A 1129

เตรียมแบบหล่อตัวอย่างขนาดกว้าง 4 สูง 4 ยาว 16 เซนติเมตร ติดตั้งเกจปลักและวัดระยะบนที่กล้า (L_0) ผสมซีเมนต์เพสต์ในอัตราน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 โดยแบ่งการเทซีเมนต์เพสต์เข้าแบบเป็น 3 ชั้นเท่า ๆ กัน แล้วทำการปาดหน้าซีเมนต์เพสต์ให้เรียบ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วถอดแบบหลังจากถอดแบบวัดระยะของตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบบนที่กล้า (X_0) จากนั้นนำตัวอย่างมาทำการบ่มโดยทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลา และทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องคือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 1, 3, 7 และ 14 วันแล้วจึงทำการบ่มตัวอย่าง โดยวัดระยะของตัวอย่างทุกๆ วันจนอายุครบกำหนดบนที่กล้า (X_n) คำนวณหาค่าการยี้ดหดตัว ได้สมการดังนี้

$$\text{Autogenous Shrinkage} = \frac{(X_0 - X_n)}{L_0} \quad (3.5)$$

โดยที่ Autogenous Shrinkage = ค่าการหดตัว

X_0 = ระยะเริ่มต้นที่อายุ 1 วันหลังถอดแบบ (มิลลิเมตร)

X_n = ระยะที่อายุ 2 วันถึงอายุ 28 วัน (มิลลิเมตร)

L_0 = ระยะห่างของหัวเกจปลัก (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างในการทดสอบหาความหดตัว

3.3.4. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108

ใช้แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108 ทำความสะอาดแบบหล่อคอนกรีต แล้วทาน้ำมันที่ผิวในทุกด้าน ตักคอนกรีตใส่แบบโดยแบ่งเป็น 3 ชั้นชั้นละเท่าๆ กัน โดยประมาณ ในแต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็ก 25 ครั้ง ตัวอย่างคอนกรีตที่กระทุ้งเสร็จปาดผิวหน้าให้เรียบ คลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ถอดแบบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปบ่มแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่องแล้วนำมาทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ทดสอบโดยการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ อัตราที่ใช้คือ 1.4 - 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที กดก่อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้มาคำนวณกำลังอัดประลัย

$$\text{การคำนวณกำลังอัดประลัย} = \frac{\text{น้ำหนักกำลังประลัย}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง}} \quad (3.6)$$

หน่วยที่ใช้ คือ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc.)



รูปที่ 3.19 การวัดขนาดตัวอย่างทดสอบกำลังอัด