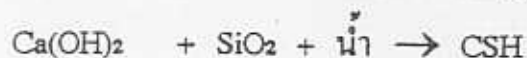


2.1 คำนำ

เมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน(Hydration) ผลผลิตที่สำคัญได้แก่ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(Calcium Silicate Hydrate ; CSH) ประมาณ 50-70% คัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต(Calcium Aluminate Hydrate ; CAH) ประมาณ 10% และคัลเซียมไฮดรอกไซด์(Calcium Hydroxide ; CH) ประมาณ 20-25% ผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะขยายภายในช่องว่างที่มีอยู่ การเกิดช่องว่างที่มีเนื้อที่จำกัดทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์มีรูปร่างต่างๆตามช่องว่าง คัลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นผลึกที่ไม่แข็งแรงเป็นตัวถูกทำลายได้ง่าย (ปริญา 2533) การเพิ่มสารปอซโซลานสามารถเพิ่มการทำปฏิกิริยากัน และลดปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้คุณสมบัติหลายด้านของคอนกรีตดีขึ้น

ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก มีส่วนประกอบหลักคือ คัลเซียมออกไซด์(CaO) ซึ่งมีประมาณ 40% จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันใกล้เคียงกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทั่วไปแต่เกิดช้ากว่า หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วก็จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) ที่มีอยู่ในตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก ประมาณ 37% กับ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อีกครั้งหนึ่งดังสมการ



เนื่องจากมีความต้องการคอนกรีตกำลังสูง กำลังรับแรงอัดสูงที่อายุเริ่มแรกก็ เป็นสิ่งที่ต้องการในการนำคอนกรีตมาใช้งาน ฉะนั้นในการวิจัยจึงใช้สารเร่งการก่อตัว คือสารคัลเซียมคลอไรด์ ซึ่งจากการวิจัยของ(Mirdess & Young, 1981) พบว่าการผสมสารคัลเซียมคลอไรด์ประมาณ 2% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จะทำให้กำลังรับ

แรงระยะดันเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า

2.2 คอนกรีตกำลังสูงมาก

โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด 400-600 กก./ตร.ซม. จัดว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูง ถ้าคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดเกินกว่า 600 กก./ตร.ซม. จัดว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูงมาก คอนกรีตกำลังสูงมากจะให้ค่าการคืบและการหดตัวน้อยและมีความทนทานสูงเป็นพิเศษ

คอนกรีตโดยทั่วไปเมื่อรับน้ำหนักถึงจุดประลัยส่วนที่เป็นมอร์ตาร์จะแตก แต่ถ้าเป็นคอนกรีตกำลังสูงมาก กำลังของมอร์ตาร์จะสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมีค่ามากกว่าหรือใกล้เคียงกับหิน นั่นคือเมื่อคอนกรีตกำลังสูงมากรับน้ำหนักถึงจุดประลัยลักษณะการแตกของคอนกรีตจะแตกผ่านหิน เพราะฉะนั้นในการออกแบบคอนกรีตกำลังสูงมากจะแยกพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นหินและส่วนที่เป็นมอร์ตาร์

ก.) หินที่ใช้ในการผสมคอนกรีตกำลังสูงมาก ตามปกติหินที่มีขนาดใหญ่จะต้องการน้ำในการผสมน้อยลง แต่ถ้าเป็นหินที่ได้จากโรงม่หินขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดไมโครแครก(Microcrack)มาก ซึ่งจะทำให้กำลังของคอนกรีตตกไป ควรเลือกใช้หินขนาดเล็กเช่น 1/2 นิ้ว หรือ 3/8 นิ้ว

ข.) มอร์ตาร์ของคอนกรีตกำลังสูงมากมีหลายประเภทด้วยกันเช่น

1) ประเภทที่ให้สารที่มีกำลังสูงซึมเข้าไปแทรกในช่องว่างอากาศในเนื้อคอนกรีตเช่น Polymer Impregnated Concrete , Sulphur Impregnated Concrete

2) ประเภทที่มีตัวเชื่อมที่มีกำลังสูงเช่น Epoxy Modified Concrete , Latex Concrete , Polymer Concrete

3) ประเภทที่ผลิตโดยลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้น้อยลงโดยการใช้สารผสมเพิ่มลดน้ำพิเศษและการใช้วัสดุปอซโซลานเช่น ไมโครซิลิกา , ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก , ขี้เถ้าลอย , ขี้เถ้าแกลบ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แล้วเกิดเป็นคลอไรด์ซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดประสานและทำให้กำลังสูงขึ้น

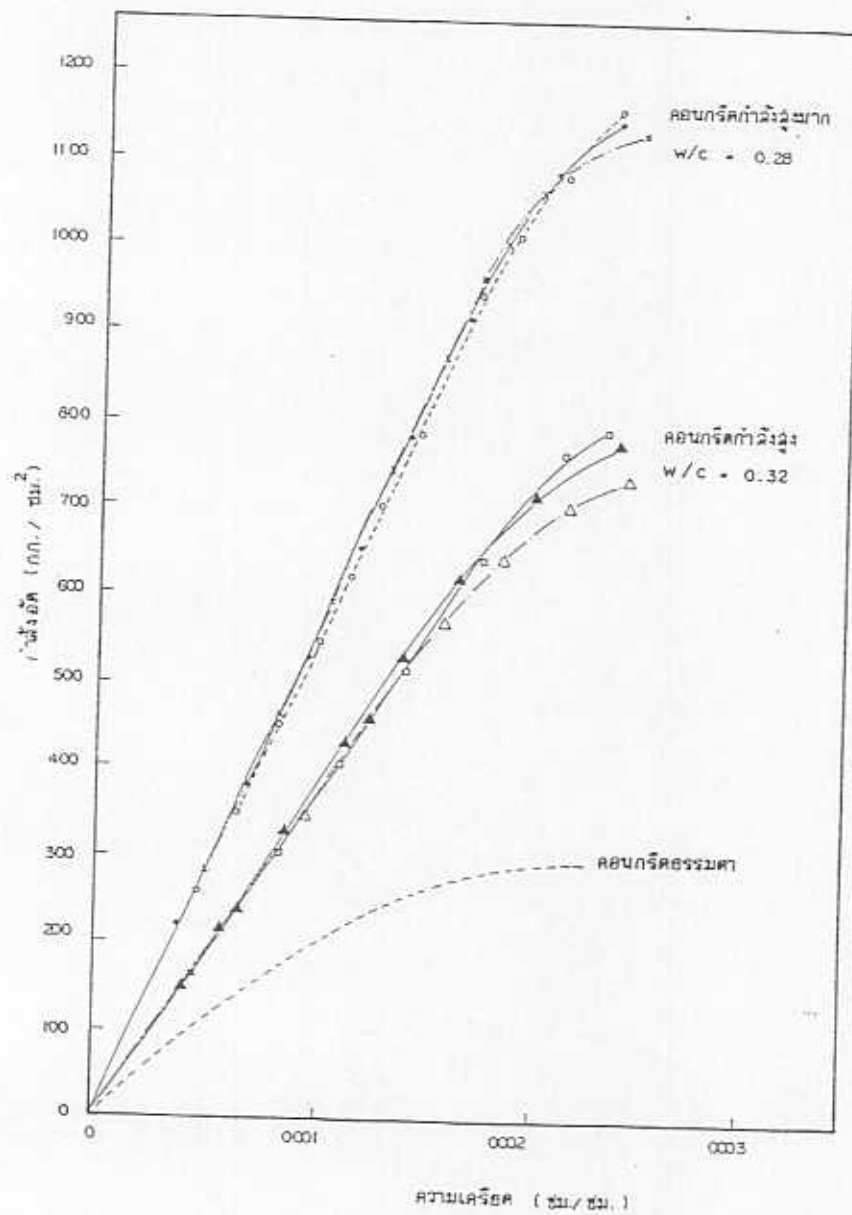
2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงมาก

เอกสิทธิ์ (2532) ได้รายงานผลการทดลองของ สุพรรณ ซึ่งได้ทำการทดสอบ

ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด และความเครียดของคอนกรีตกำลังสูงมากพิเศษ และคอนกรีตกำลังสูงมากธรรมดา จากรูปที่ 2.1 แสดงถึงกราฟระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด พบว่าลักษณะกราฟทั้งสองคล้ายกัน คือในช่วงแรกของกราฟจะเป็นเส้นตรงไปถึง 85-90% ของความสูงแล้วจึงเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรงเพียงเล็กน้อยแล้วจะแตกกระจายที่มีความเครียดประมาณ 0.0025 ความชันของกราฟจะแตกต่างกันตามกำลังสูงสุดของคอนกรีต จากลักษณะคุณสมบัติอันนี้พอจะสรุปได้ว่าคอนกรีตกำลังสูงมากเป็นวัสดุอิลาสติก และหน่วยแรงอัดแปรตรงกับ ความเครียดโดยเฉพาะในช่วงแรก จึงเป็นการง่ายต่อการหาโมดูลัสยืดหยุ่นโดยโมดูลัสของคอนกรีตกำลังสูงพิเศษให้ค่าเฉลี่ยประมาณ 570,000 กก./ตร.ซม. และ 390,000 กก./ตร.ซม. สำหรับคอนกรีตกำลังสูง ในด้านของกำลังรับแรงอัดซึ่งใช้สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน กลุ่มที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.28 ให้กำลังรับแรงอัดสูงถึง 1,170 กก./ตร.ซม. ในขณะที่กลุ่มที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.32 ให้กำลังรับแรงอัดเพียง 790 กก./ตร.ซม. และจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงด้วยวิธีดึงแตกกระจาย (Splitting Tensile Strength) พบว่ากำลังดึงมีค่าประมาณ 10% ของกำลังรับแรงอัด

2.3 โมดูลัสความยืดหยุ่น

โมดูลัสความยืดหยุ่นคืออัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดที่เกิดจากความเค้นภายในขีดจำกัดยืดหยุ่น โมดูลัสความยืดหยุ่นเป็นการวัดความแข็งกระด้าง (Stiffness) ของวัสดุอย่างหนึ่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรหรือปอนด์/ตารางนิ้ว โมดูลัสยืดหยุ่นมีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภทคือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่นของแรงอัดและ โมดูลัสความยืดหยุ่นของแรงเฉือน สำหรับโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่มีโคเอเกรมความเค้นความเครียดเป็นเส้นโค้งและมีค่าของขีดจำกัดยืดหยุ่นค่อนข้างต่ำ เช่นคอนกรีตเป็นต้นให้หาโดยวิธีกำหนดให้ซึ่งมีอยู่ 3 วิธีคือ วิธีแทนเจนต์เริ่มต้น (Initial Tangent), วิธีแทนเจนต์ (Tangent) และวิธีเซแคนท์ (Secant) ซึ่งแต่ละวิธีดังกล่าวจะคล้ายกันคือใช้หลักการลากเส้นสัมผัสส่วนโค้งของโคเอเกรมความเค้นความเครียด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นก็คือค่าของแทนเจนต์ของมุมระหว่างเส้นสัมผัสที่ทำกับแนวราบนั่นเอง



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตกำลังสูง

2.4 คุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก

2.4.1 ความต้องการน้ำและความสามารถทำงานได้

ความสามารถทำงานได้หมายถึงพลังงานที่ใส่ในเนื้อคอนกรีตเพื่อให้เกิดการอัดแน่น คือพลังงานที่ใส่เข้าไปเอาชนะความเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคต่างๆในส่วนผสมรวมทั้งพลังงานอื่นๆด้วยเช่นด้วยเช่นพลังงานเอาชนะความเสียดทานของคอนกรีตและแบบหล่อ (ปริญญา, 2529)

Wood (1981) พบว่าคอนกรีตที่ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็กจะมีขีดความสามารถในการทำงานและการเทเข้าแบบได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากลักษณะพื้นผิวของตะกรันจากเตาถลุงเหล็กจะทำให้pest์ดื่นขึ้น ซึ่งจากความเรียบและความหนาแน่นของพื้นผิวทำให้ตะกรันดูดน้ำเพียงเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้นของการผสม Wu & Roy (1982) พบว่าpest์และมอร์ตาร์ที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก จะมีการกระจายอนุภาคและการไหลได้ดีกว่า pest์และมอร์ตาร์ที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ซึ่งเกิดขึ้นทั้งกรณีใส่สารลดน้ำและไม่ใส่สารลดน้ำ Meusel & Rose (1983) รายงานว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก จะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

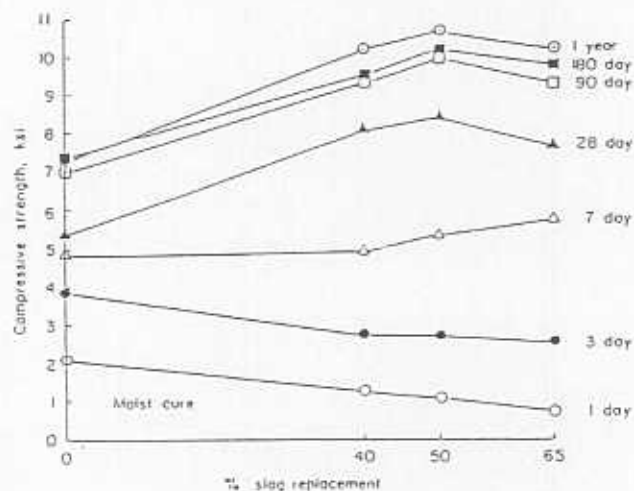
2.4.2 ระยะเวลาก่อตัว

Fulton (1974) รายงานว่าซีเมนต์pest์ที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็กจะมีระยะเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งระยะเวลาก่อตัวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเริ่มแรก ส่วนที่ใช้ในการผสม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุซีเมนต์ และลักษณะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Hogan & Meusel (1981) พบว่าซีเมนต์pest์ที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็กจะมีเวลาก่อตัวระยะต้นเพิ่มขึ้น 1/2 - 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และเวลาก่อตัวระยะต้นจะเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิสูงกว่า 29 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงเวลาก่อตัวจะเพิ่มขึ้น การผสมสารเร่งการก่อตัวเช่นกลีเซอรีนคลอไรด์จะสามารถลดเวลาก่อตัวลงได้

2.4.3 กำลังรับแรงอัด

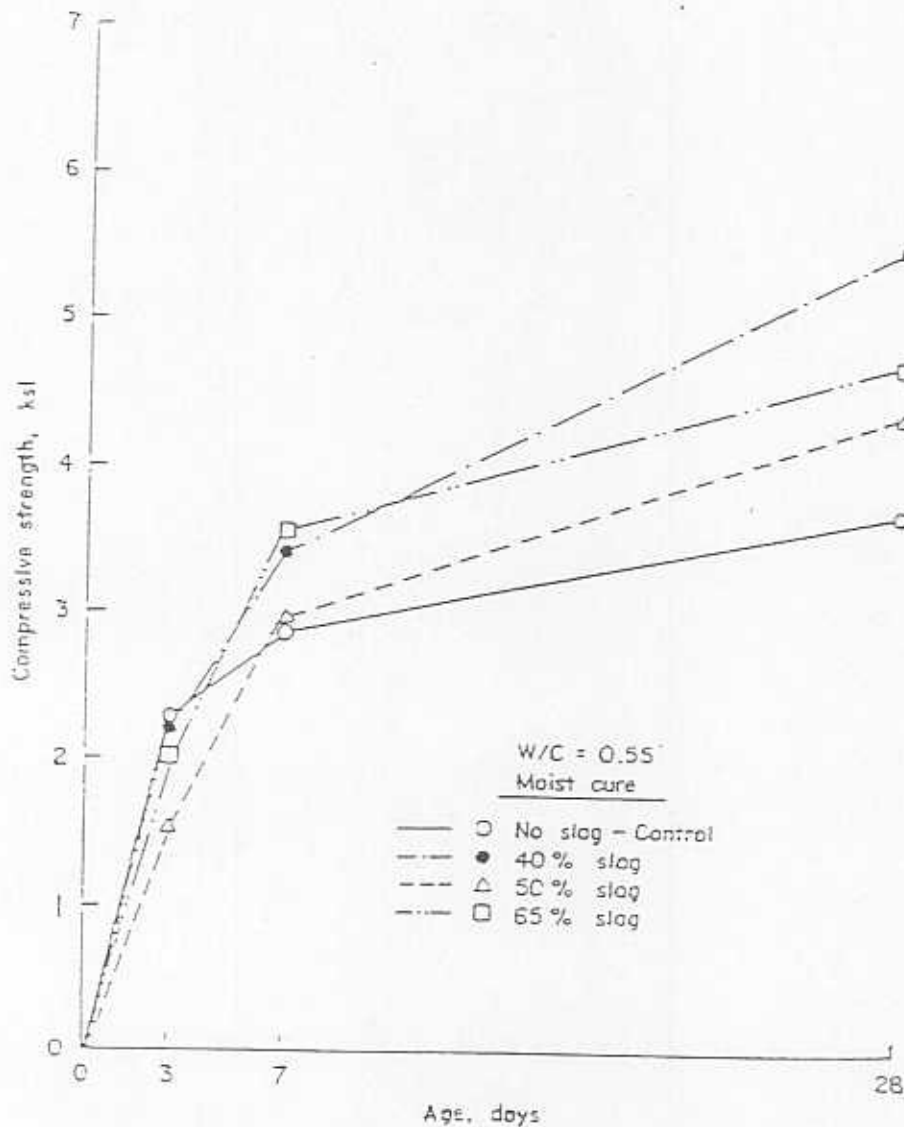
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ตาร์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะมีบทบาทสูงต่อกำลังรับแรงอัด (ชัชวาลย์, 2536)

Hogan & Meusel (1981) พบว่าคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วจากเตาถลุงเหล็ก จะมีกำลังรับแรงอัดในช่วงต้นจะลดลง (ที่อายุ 1-3 วัน) และกำลังในช่วงหลังจะเพิ่มขึ้น (ที่อายุเกิน 7 วันขึ้นไป) เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา จากภาพที่ 2.2 แสดงถึงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกั่วจากเตาถลุงเหล็กในอัตราส่วนต่างๆ และภาพที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกั่วจากเตาถลุงเหล็กและคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกั่วจากเตาถลุงเหล็ก



ภาพที่ 2.2 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมตะกั่วจากเตาถลุงเหล็ก

(Hogan & Meusel, 1981)



ภาพที่ 2.3 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก และคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมตะกรัน (Hogan & meusel, 1981)

2.4.4 ความสามารถซึมผ่าน

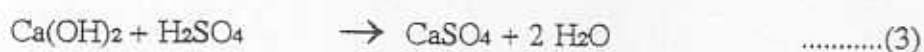
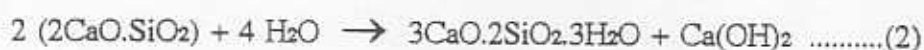
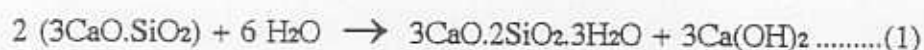
ความสามารถซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความพรุนของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งความพรุนของซีเมนต์เพสต์จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

Bakke: (1980) พบว่าความสามารถซึมผ่านของคอนกรีตที่ได้จากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็กจะมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสม ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก เนื่องจากโพรงที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์เกิดการเปลี่ยนแปลง อันมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาของตะกรันจากเตาถลุงเหล็กกับคลัสเซียมไฮดรอกไซด์ และการลดลงของอัลคาไลระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Roy & Idom (1981) พบว่าคอนกรีตที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสม ตะกรันจากเตาถลุงเหล็กขนาดของรูพรุนจะลดลงก่อน 28 วัน หลังการผสม

2.4.5 ความทนต่อการกัดกร่อน

จากองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ และผลจากการทำปฏิกิริยากันจะก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นสารที่ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ได้ง่าย ดังแสดงในสมการที่ 1, 2 และ 3 (Naville, 1973)



ซึ่งจากปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นผลให้มอร์ตาร์ถูกกัดกร่อนได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด ดังนั้นถ้าสามารถลดสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาลงได้ จะทำให้มอร์ตาร์มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีขึ้น Chojnoki (1981) พบว่าเมื่อใช้ตะกรันจากเตาถลุงเหล็กแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณ 50% โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ จะทำให้มอร์ตาร์ที่ได้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตเท่ากับมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 Hogan & Meusel (1981) พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก จะทำให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดีขึ้น การต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตจะดีที่สุดเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 และผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็กไม่น้อยกว่า 50% โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์

สราวุธ (2539) ได้รายงานผลการทดสอบการต้านทานสารเคมีของ มอร์ตาร์ที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก โดยใช้วิธี ทดสอบดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C 276-82 Standard Test Method for Chemical Resistance Mortars ซึ่งจากผลการทดสอบการกัดกร่อนโดยใช้กรด ซัลฟูริกเข้มข้น 5% พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็กจะมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ได้ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก ซึ่งการสูญเสียน้ำหนักจะลดลงมากขึ้นเมื่อผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็กใน อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และภาพที่ 2.4 และจากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็กซึ่งแช่อยู่ในกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 5 ซึ่งปรากฏผลว่า มอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันจากเตาถลุงเหล็กจะสูญเสียกำลังรับแรงอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา และอัตราส่วนผสมที่สูญเสียกำลังรับแรงอัดน้อยที่สุดคือใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ตะกรันจากเตาถลุงเหล็กในอัตรา 70 : 30 ซึ่งผลสอดคล้องกับการศึกษาของ Hogan & Meusel (1981) รายละเอียดผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อตะกรันเตาสูง	น้ำ/สารซีเมนต์	การสูญเสียน้ำหนัก, %					
		3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
100:0	0.704	4.20	13.46	23.41	32.93	48.06	59.20
90:10	0.666	3.77	12.99	21.33	28.34	44.27	53.91
80:20	0.648	2.66	5.51	15.23	23.30	41.27	49.65
70:30	0.642	2.22	5.02	8.16	14.62	31.56	43.66
60:40	0.638	1.89	3.98	7.81	11.37	23.67	34.72
50:50	0.636	1.60	3.49	7.33	12.06	19.47	26.69
40:60	0.634	1.29	3.68	7.94	10.62	16.48	23.58
30:70	0.632	0.97	2.09	6.71	8.26	14.24	22.79

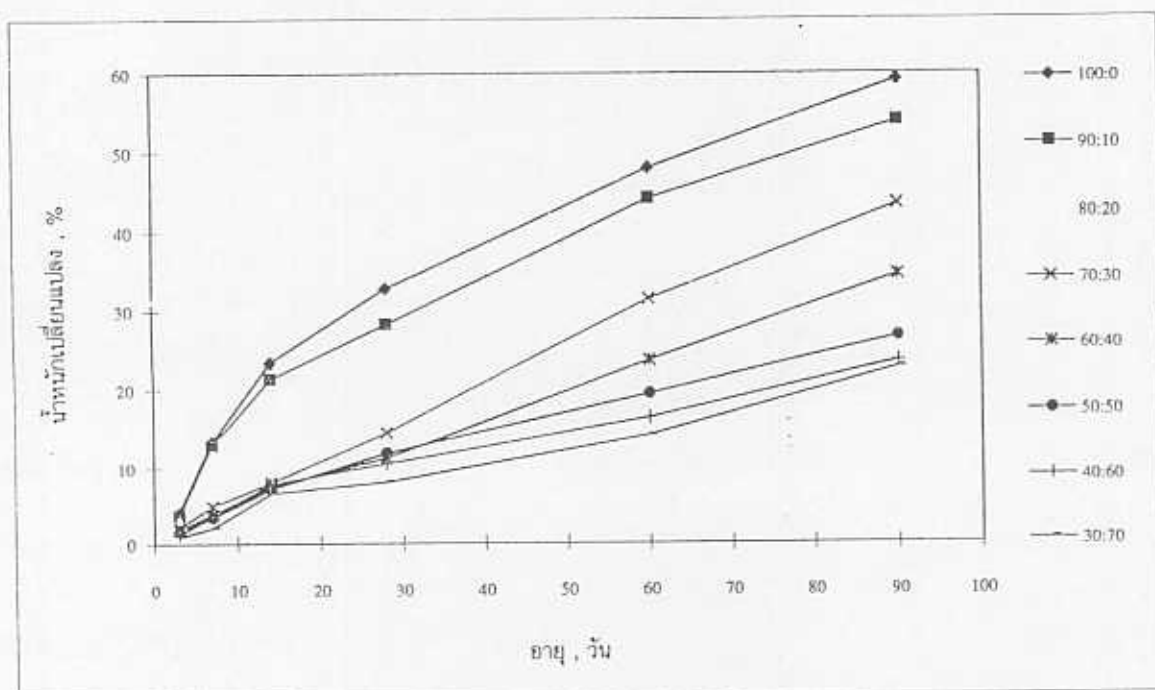
- หมายเหตุ 1. ทราบดีอร์ซีเมนต์ เท่ากับ 3.00
2. ค่าการไหลแผ่ เท่ากับ 110 ± 5

ตารางที่ 2.1 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาสูง
เหล็ก ภายหลังแช่กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 5 (สราวุธ, 2539)

อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อตะกรันเตาสูง	น้ำ/สารซีเมนต์	กำลังรับแรงอัด, กก./ตร.ซม.		กำลังรับแรงอัดลดลง (%)
		90 วัน	แช่ในกรด 90 วัน	
100:0	0.704	292.23	156.25	46.36
90:10	0.666	257.70	148.79	42.22
80:20	0.648	192.49	133.17	30.39
70:30	0.642	194.39	135.10	30.29
60:40	0.638	157.54	105.24	32.44
50:50	0.636	126.58	80.71	36.20
40:60	0.634	82.57	55.21	33.06
30:70	0.632	65.94	43.26	34.37

- หมายเหตุ 1. ทราบดีอร์ซีเมนต์ เท่ากับ 3.00
2. ค่าการไหลแผ่ เท่ากับ 110 ± 5

ตารางที่ 2.2 การสูญเสียกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสม
ตะกรันเตาสูงเหล็ก ภายหลังแช่กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 5 ที่
อายุ 90 วัน (สราวุธ, 2539)



ภาพที่ 2.4 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก ภายหลังแช่กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 5
(สราวุธ, 2539)

2.5 สารผสมเพิ่ม

มาตรฐาน ASTM C125 ได้ให้คำนิยามของสารผสมเพิ่มว่า เป็นสารใดๆ นอกเหนือจากน้ำ ปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ ไม่ว่าจะก่อนหรือขณะกำลังผสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ได้คุณสมบัติตามต้องการไม่ว่าจะเป็นขณะที่ยังเหลวอยู่หรือแข็งตัวอยู่แล้ว

สารผสมเพิ่มมีหลายชนิดที่ใช้ แต่ที่นิยมใช้กันคือสารเคมีผสมเพิ่ม Prior & Adams(1959) รายงานว่าสารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Tucker, Winkler และ Scripture ต่อมา มีการวิจัยและทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารผสมเพิ่ม ที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างกว้างขวางเป็นผลให้การใช้สารเคมีผสมเพิ่มเป็นที่แพร่หลาย

สารผสมเพิ่มนั้นแบ่งได้ตามชนิดของสารที่เป็นองค์ประกอบของสารเคมี หรือแบ่งตามลักษณะประโยชน์ของการใช้งาน มาตรฐาน ASTM ได้แบ่งประเภทของสารผสมเพิ่มออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

2.5.1 สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures) เป็นสารประกอบเคมีที่ละลายน้ำได้ ใช้สำหรับลดความต้องการน้ำ และปรับเวลาก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต มาตรฐาน ASTM C 494-86 ได้จำแนกสารเคมีผสมเพิ่มออกเป็น 7 ประเภทดังนี้

- ก. ประเภท A สารลดน้ำ (Water Reducing Admixtures)
- ข. ประเภท B สารหน่วงการก่อตัว (Retarding Admixtures)
- ค. ประเภท C สารเร่งการก่อตัว (Accelerating Admixtures)
- ง. ประเภท D สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (Water-Reducing and Retarding Admixtures)
- จ. ประเภท E สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว (Water-Reducing and Accelerating Admixtures)
- ฉ. ประเภท F สารลดน้ำพิเศษ (Water-Reducing, High Range Admixtures)

ข. ประเภท G สารลดน้ำพิเศษและหน่วงการก่อตัว (Water-Reducing, High Range, and Retarding Admixtures)

2.5.2 สารประเภทแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixtures) มีลักษณะเป็นผงละเอียด ใช้สำหรับทำให้ความสามารถทำงานได้และความคงทนดีขึ้น แบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

ก. วัสดุที่เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา (Materials of Low Reactivity)

ข. วัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious Materials)

ค. วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan Materials)

2.5.3 สารกระจายกักฟองอากาศ (Air-Entraining agents) ใช้ในการเพิ่มความคงทนของคอนกรีตต่อสภาพอากาศที่เย็นจัด

2.5.4 สารผสมเพิ่มชนิดอื่นๆ (Miscellaneous Admixtures) เป็นสารผสมเพิ่มอื่นๆที่ไม่อยู่ในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งที่กล่าวมาแล้ว เป็นสารผสมเพิ่มที่ใช้เพื่อจุดประสงค์โดยเฉพาะ เช่น สารผสมเพิ่มการยัดเกาะ สารผสมเพิ่มกันซึม และสารผสมเพิ่มอุดรูโพรงคอนกรีต

2.6 สารเร่งการก่อตัว

สารเร่งการก่อตัวเป็นสารที่ทำให้อัตราการแข็งตัวของสารผสมของซีเมนต์และคอนกรีตเร็วขึ้น สารเร่งการก่อตัวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. เกลืออนินทรีย์ ส่วนมากมีคุณสมบัติเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ เกลือคาร์บอเนต (Carbonate) คลอไรด์ (Chloride) และซัลเฟต (Sulphate) เป็นต้น

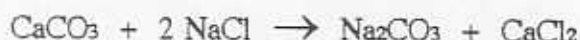
ข. เกลืออินทรีย์ จำพวกไตรเอทานอลามีน (Triethanolamine) คัลเซียมฟอร์มเมต (Calcium Formate) และคัลเซียมอะซิเตต (Calcium Acetate) ซึ่งส่วนมากใช้ผสมร่วมกับสารหน่วงการก่อตัวเพื่อต้านการหน่วงปฏิกิริยา

สารเร่งการก่อตัว สารหลักที่ใช้คือ คัลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride) ซึ่งถูกใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ.1885 (Rixom, 1978) ซึ่งพบว่าเป็นประโยชน์มากสำหรับงานคอนกรีตในสภาพอากาศที่หนาวเย็น ซึ่งกำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้นจะใกล้เคียงกับคอนกรีตที่บ่มในอุณหภูมิปกติ แต่สารคัลเซียมคลอไรด์ที่ใช้จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดการกัดกร่อนและเป็นสนิมกับคอนกรีตที่มีรูพรุนมาก สารคัลเซียมคลอไรด์สามารถนำ

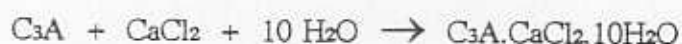
มาใช้ร่วมกับสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (Superplasticizer) และตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก

ถึงอย่างไรก็ตามคลัตเซียมคลอไรด์ก็ยังเป็นสารเร่งการก่อตัวที่ใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก Rixom (1978) รายงานว่าในปี ค.ศ. 1975 มีการใช้คลัตเซียมคลอไรด์เป็นสารเร่งการก่อตัวมากกว่า 60% ของสารที่ใช้กันทั้งหมดและคาดว่าในอนาคตก็ยังคงจะใช้ต่อไป

คลัตเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เป็นผลพลอยได้จากการทำโซดาจากน้ำทะเล (Solvey Process) ดังสมการ



คลัตเซียมคลอไรด์จะไม่ทำปฏิกิริยากับ C_3S และ C_2S แต่จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคลัตเซียมคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับ C_3A ดังสมการ (Rixom, 1978)



อัตราความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ผสมสารเร่งการก่อตัวคลัตเซียมคลอไรด์ จะสูงกว่าปฏิกิริยาที่เกิดจากปูนซีเมนต์ธรรมดา

2.6.1 คุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมสารเร่งการก่อตัว

2.6.1.1 ระยะเวลาก่อตัว

Diamond (1980) ได้รายงานผลการทดลองของ Rosenberg ซึ่งทำการผสมคลัตเซียมคลอไรด์ 2% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ว่าเวลาก่อตัวระยะต้นลดลงจาก $3\frac{1}{4}$ ชั่วโมง เป็น $1\frac{1}{4}$ ชั่วโมง และระยะก่อตัวปลายลดลงจาก 5 ชั่วโมง เป็น 2 ชั่วโมง และจากการศึกษาของ Rixom (1979) การเติมสารแคลเซียมคลอไรด์จะมีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาก่อตัวปลายลดลง

2.6.1.2 กำลังรับแรงอัด

Rixom (1978) ได้รายงานผลการทดลองของ Blenkinsop ว่า

การผสมกัลเซลล์เชื่อมคลอไรด์ 2% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุมากๆ Mindess และ Yong (1981) รายงานว่า กัลเซลล์เชื่อมคลอไรด์ จะทำให้กำลังรับแรงอัดเริ่มแรกสูงขึ้นและกำลังรับแรงอัดระยะปลาย มีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ธรรมดาที่อายุเท่ากัน จากการศึกษาของ พงษ์พันธุ์ (2535) พบว่าที่ อุณหภูมิ 15, 25 และ 35°C กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีปริมาณกัลเซลล์เชื่อมคลอไรด์ ผสม 1, 2 และ 3% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1-90 วัน สูงกว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ธรรมดา

2.6.1.3 กำลังรับแรงดึง

Rixom (1978) รายงานว่าเซลล์เชื่อมคลอไรด์ไม่มีผลหรือมีผล ทำให้ลดลงเล็กน้อยต่อกำลังที่รับแรงดึงที่อายุ 28 วัน แต่จะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น ในแง่ของความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เดิม เซลล์เชื่อมคลอไรด์ อัตราส่วนกำลังรับแรงดึงต่อกำลังรับแรงอัดจะลดลง

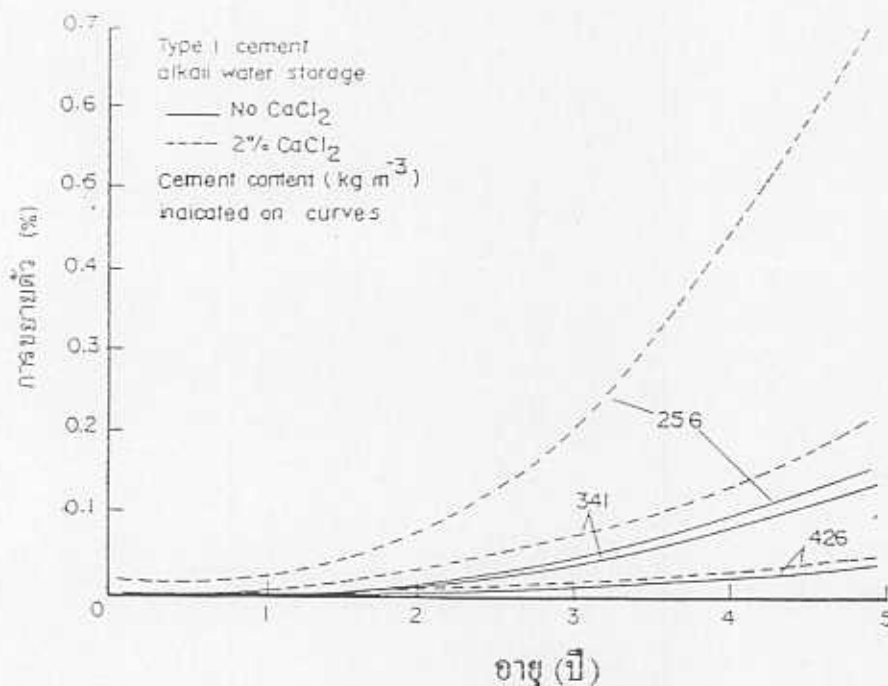
2.6.1.4 ความทนทาน

ก. ความซึมน้ำ (Permeability)

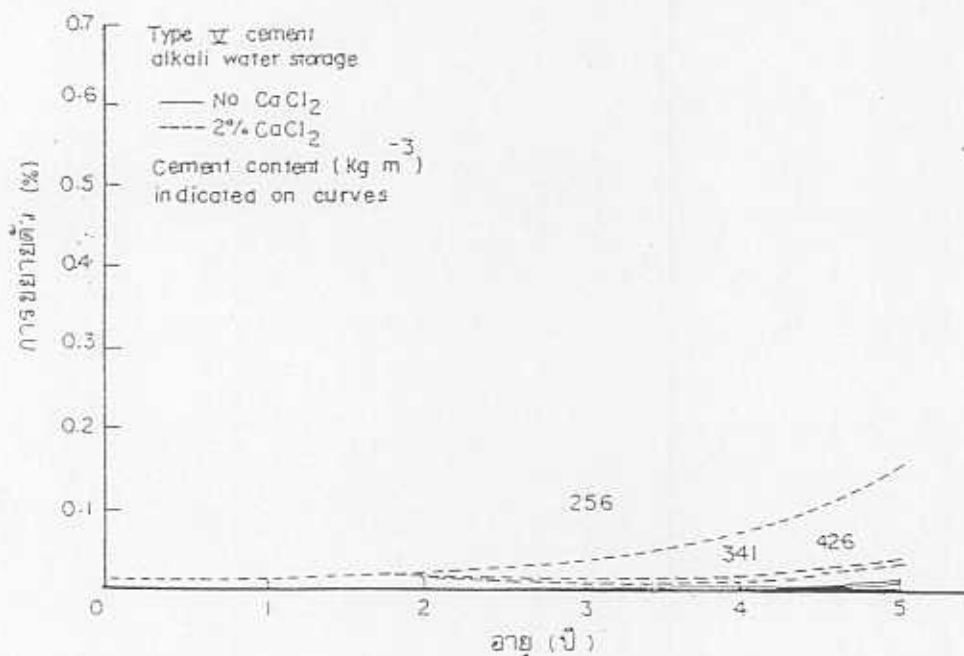
การผสมสารกัลเซลล์เชื่อมคลอไรด์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาใน ระยะเริ่มต้นเพิ่มขึ้นและจะทำให้ความซึมได้ของคอนกรีตในชั้นต้นลดลง เมื่ออายุมากขึ้นกัลเซลล์เชื่อมคลอไรด์จะมีผลต่อการกระจายของโพรงคาปิลลารี (Capillary) ซึ่งทำให้ คอนกรีตมีรูพรุนมากขึ้น (Rixom, 1978) และทำให้น้ำซึมผ่านได้ง่ายขึ้น

ข. การต้านทานต่อสิ่งแวดล้อมที่รุนแรง (Resistance to Aggressive Environment)

คอนกรีตที่ผสมกัลเซลล์เชื่อมคลอไรด์จะทำให้ความต้านทาน สารละลายซัลเฟตลดลง (Shideler, 1975) พบว่าเมื่อใส่กัลเซลล์เชื่อมคลอไรด์ 2% จะทำให้ ความต้านทานต่อซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.5 และภาพที่ 2.6 และปูนปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 จะให้ความต้านทานต่อซัลเฟตน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพราะ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี C₃A มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



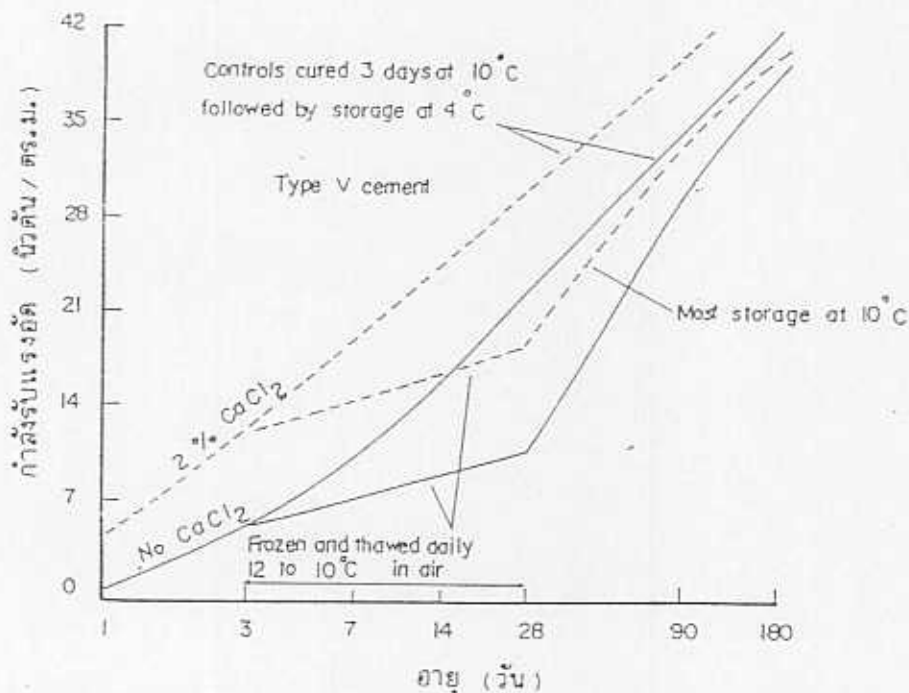
ภาพที่ 2.5 แสดงความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากซัลเฟต ของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ภาพที่ 2.6 แสดงความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากซัลเฟต ของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ก. ความต้านทานต่อการแข็งของน้ำและการละลาย (Resistance to Freeze-Thaw Conditions)

Shideler (1975) รายงานว่า คอนกรีตที่ผสมสารละลายคลอไรด์เชื่อมคลอไรด์ในระยะเริ่มแรกจะมีความต้านทานต่อการแข็งของน้ำและการละลายสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมคลอไรด์เชื่อมคลอไรด์ โดยดูจากคอนกรีตที่ใส่สารละลายคลอไรด์เชื่อมคลอไรด์จะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่า ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ซึ่งจากในรูปจะเห็นว่าในระยะต่อมาถ้าบ่มที่ความชื้นและอุณหภูมิ 10°C จะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใส่และไม่ใส่สารคลอไรด์ลดลงทั้งคู่



ภาพที่ 2.7 คลอไรด์เชื่อมคลอไรด์ ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการกระทำของน้ำแข็งสูง

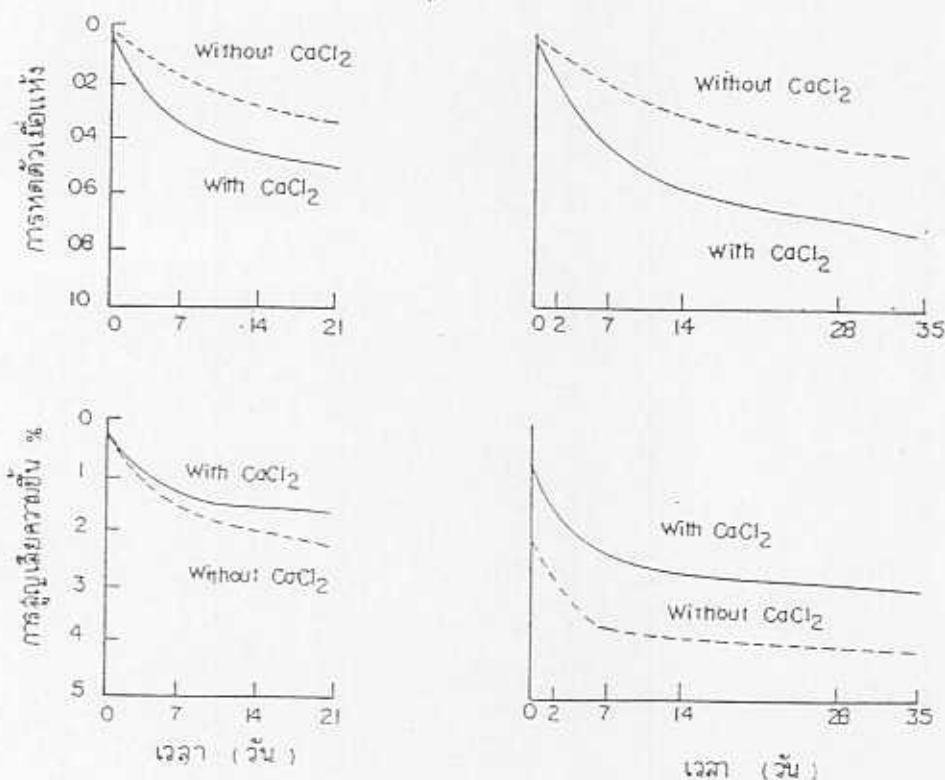
ง. การป้องกันเหล็กเสริมในคอนกรีต (Protection of Steel Reinforcement)

Rixom (1978) พบว่าถ้ามีส่วนผสมของแคลเซียมคลอไรด์มากกว่า 1.5% จะทำให้เกิดการทำลายชั้นป้องกัน (Breakdown of Passive Layer) ของ Fe_2O_3 บริเวณผิวหน้าของเหล็กซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนง่ายขึ้น ปัญหาที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเป็นเพราะการขยายตัวของเหล็กที่ถูกกัดกร่อนเกิดเป็นสนิม

และยังทำให้กำลังรับแรงดึงของเหล็กลดน้อยลงและแรงยึดเหนี่ยวกันน้อยลงด้วย อันเป็นผลนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้าง

2.6.1.5 การหดตัว

Shildeler (อ้างถึงใน Rixom, 1978) รายงานว่าการหดตัวเมื่อตากแห้งของคอนกรีตที่ผสมคลัสเซอร์ไรต์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป แม้ว่าจะสูญเสียความชื้นไปน้อยกว่า ดังแสดงในรูป 2.5 การสูญเสียความชื้นที่น้อยลงอาจเกิดจากการพัฒนาของการไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตผสมคลัสเซอร์ไรต์ และการเพิ่มขึ้นของการหดตัวเมื่อตากแห้งเกิดจากคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไฮเดรชันที่เปลี่ยนไป และในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำปริมาณการขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมคลัสเซอร์ไรต์จะลดลง

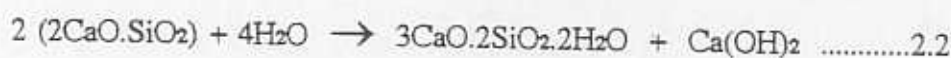


ภาพที่ 2.8 คลัสเซอร์ไรต์จะเพิ่มการหดตัวเมื่อตากแห้งของคอนกรีต (Shideler)

2.7 วัสดุปอชโซลาน

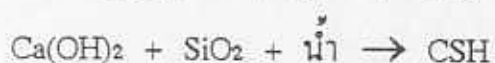
วัสดุปอชโซลาน ได้แก่ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมี คือ ซิลิกา (SiO_2) หรือ ซิลิกาและอลูมินา ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) เป็นสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม ซึ่งโดยตัวของมันเองมีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย อยู่ในสภาพที่เป็นเม็ดละเอียด และสามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่อุณหภูมิปกติได้ แล้วเกิดเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ตัวอย่างได้แก่ไมโครซิลิกา ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้าลอย วัสดุปอชโซลานเมื่อใช้คอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปฏิกิริยาปอชโซลานคล้ายปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นสามารถใช้วัสดุปอชโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาและเพิ่มกำลังคอนกรีตที่อายุมากได้ (ปริญญา, 2529)

ปฏิกิริยาทางเคมีของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถเขียนง่ายๆ ได้ดังนี้ (Neville, 1973)



ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก (GGBS) จัดว่าเป็นวัสดุปอชโซลานเช่นเดียวกับไมโครซิลิกา ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้าลอย เป็นของเหลือ By-Product ของขบวนการผลิตเหล็กโดยใช้เตาหลอม ตะกรันที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการหลอมตัวของคัลเซียมออกไซด์จากหินปูนกับซิลิกอนและอลูมินาจากแท่งเหล็กและถ่านโค้ก ตะกรันที่หลอมลอยอยู่ด้านบนของเตาหลอม จะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการเทลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดทันที ผลก็คือตะกรันส่วนใหญ่จะกลายเป็นเม็ดแก้วกลมที่มีองค์ประกอบทางเคมีค่อนข้างแน่นอน หลังจากนั้นจะผ่านขบวนการระเหยน้ำออก และทำการบดเช่นเดียวกับการบดปูนซีเมนต์ โดยไม่มีการเติมวัสดุอื่นเข้าไปสุดท้ายจะทำการตรวจสอบคุณภาพเพื่อดูความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของตะกรันจากเตาถลุงเหล็กคือ ซิลิกาไดออกไซด์ และ คัลเซียมออกไซด์ โดยคัลเซียมออกไซด์ที่มีอยู่ใน

ตะกรันประมาณ 40% จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันใกล้เคียงกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทั่วไป แต่เกิดช้ากว่า หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วก็จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาไดออกไซด์ที่มีอยู่ในตะกรันประมาณ 37% กับ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อีกครั้งหนึ่งดังสมการ



ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก

ส่วนประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี (%) โดยน้ำหนัก	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก
SiO ₂	20	37
Al ₂ O ₃	5	11
Fe ₂ O ₃	3	0.3
CaO	65	40
MgO	1.1	7
SO ₃	2.4	0.3
Na ₂ O	0.2	0.4
K ₂ O	0.9	0.7
ออกไซด์อื่นๆ	1.4	2.3
Loss in Ignition	1	-
ความละเอียด (คร.ชม./กรัม)	3,400	3,500