

บทที่ 2

วรรณคดีวิจารณ์

2.1 คำนำ

วัสดุซีเมนต์ (Cementitious Materials) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นปูนซีเมนต์ในตัวเองและสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อทำปฏิกิริยา จะได้สารประกอบซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) และซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CAH) เหมือนกับปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) กับไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่า ดังนั้นกำลังรับแรงในช่วงแรกจะต่ำ (ปริญญญา, 2529)

2.2 ส่วนประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ผสมตะกั่วแดง

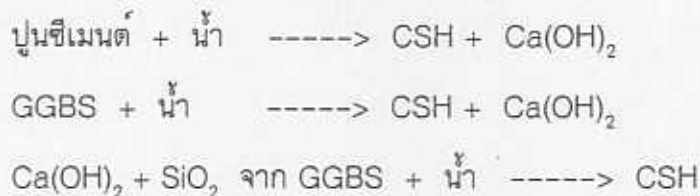
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้จากการนำวัตถุดิบที่มีสารประกอบออกไซด์ของแคลเซียมซิลิกอน, อลูมิเนียม และเหล็กมาบดให้ละเอียด แล้วผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วบดเข้าเตาเผาซึ่งอุณหภูมิในเตาเผาจะสูง 1500 C วัตถุดิบจะหลอมละลายและทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ด ปูนเม็ดจะถูกกลดอุณหภูมิลงและนำไปบดร่วมกับยิปซัม (ปริญญญา, 2529) สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากการคำนวณโดยวิธีของโบก (Boque) ประกอบด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ประมาณร้อยละ 55 ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) ประมาณร้อยละ 17 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) ประมาณร้อยละ 11 และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite) ประมาณร้อยละ 9 (Neville, 1981)

ตะกั่วแดง (Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS)) เป็นของเหลือของกระบวนการผลิตเหล็กโดยใช้เตาหลอม ตะกั่วแดง (Slag) ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการหลอมตัวของแคลเซียมออกไซด์จากหินปูน กับซิลิกอนและอลูมินาจากแท่งเหล็กและถ่านโค้กคุณภาพของเหล็กที่ได้จะสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเหล็กและองค์ประกอบทางเคมีของตะกั่วแดง ดังนั้นในการควบคุมคุณภาพของเหล็กที่หลอม ผู้ผลิตจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของตะกั่วแดงอยู่ตลอดเวลาเพื่อทำการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของวัตถุดิบและสภาพการทำงานของเตาเผา ตะกั่วแดงที่หลอมลอยอยู่ด้านบนของเบ้าหลอมจะถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว โดยการเทลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดทันที จากนั้นผ่านกระบวนการระเหย น้ำออก และทำการบดเช่นเดียวกับการบด

ปูนซีเมนต์โดยไม่มีการเติมวัสดุอื่นเข้าไป สุดท้ายจะทำการตรวจสอบคุณภาพ เพื่อดูความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมี (ชัชวาลย์, 2536)

เมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะทำปฏิกิริยากับน้ำ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้สารประกอบ 2 ชนิด คือ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, Ca(OH)_2)

ปฏิกิริยาทางเคมีของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และตะกั่วเตาถลุง สามารถเขียนง่าย ๆ ได้ดังนี้ (ชัชวาลย์, 2536)



เนื่องจากตะกั่วเตาถลุงมีองค์ประกอบทางเคมีของ CaO อยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นปฏิกิริยาไฮเดรชันของตะกั่วเตาถลุงจะใกล้เคียงกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทั่วไป แต่เกิดช้ากว่า หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วจะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง SiO_2 ในตะกั่วเตาถลุงกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อีกครั้งหนึ่ง

คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานส่วนผสมของคอนกรีตให้จับตัวกัน ส่วนคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดขึ้นมีประมาณ 25 % โดยปริมาตร ซึ่งไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ใด ๆ บางครั้งยังก่อให้เกิดผลเสียกับคอนกรีตด้วย เช่น ทำให้เกิดฝ้าบางบนผิวหน้าคอนกรีต (Efflorescence) หรือเกิดฟิล์มบนผิวมวลรวมทำให้เกิดการจับยึดระหว่างมวลรวมและมอร์ตาร์ไม่ดีนัก

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของตะกั่วเตาถลุง อาจเร่งให้เกิดขึ้นได้โดยการบดตะกั่วเตาถลุงให้ละเอียดมากขึ้น (ชัชวาลย์, 2536)

2.3 สิ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของตะกั่วเตาถลุง

ตะกั่วเตาถลุง เป็นของเหลือของขบวนการผลิตเหล็กโดยใช้เตาหลอม ตะกั่วที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการหลอมตัวของคัลเซียมออกไซด์จากหินปูน กับซิลิกอนและอลูมินาจากสินแร่เหล็ก และถ่านโค้ก (Coke)

2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตเหล็กเตาหลอม

1. สินแร่เหล็ก (Iron Ore)

สินแร่เหล็กเป็นวัตถุดิบหลักที่ให้เนื้อเหล็กออกมาหลังจาก ทำการถลุง สินแร่เหล็ก ถูกขุดขึ้นมาจากพื้นโลกโดยกรรมวิธีการทำเหมืองแร่ โดยจะได้สินแร่เหล็กที่อยู่ในรูปของ เหล็กออกไซด์สินแร่เหล็กที่นำมาใช้ในการถลุงเหล็กดิบ มีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมใช้ มีดังนี้

1. แมกนีไตท์ (Magnetite) เป็นสินแร่เหล็กที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กสูง มีสีน้ำตาลปริมาณเหล็กที่ผสมอยู่ภายในสินแร่ประมาณ 65 % มีราคาแพงและขุดพบน้อยกว่า ชนิดอื่น ๆ แมกนีไตท์มีสูตรทางเคมีว่า Fe_2O_4

2. เฮมาไตท์ (Hematite) สินแร่เหล็กชนิดนี้มีสีแดง ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กมีปริมาณเหล็กผสมอยู่ประมาณ 50% เฮมาไตท์มีสูตรทางเคมีว่า Fe_2O_3

3. ทาโคไนท์ (Taconite) สินแร่เหล็กชนิดนี้ปกติมีสีเขียว มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กสูงมีปริมาณเหล็กผสมอยู่น้อยกว่า แมกนีไตท์ และเฮมาไตท์ โดยมีเหล็กผสมอยู่ประมาณ 30 % และมีซิลิกาผสมอยู่เป็นจำนวนมาก เป็นสินแร่เหล็กที่มีราคาถูก

นอกจากนี้แล้ว ยังมีสินแร่เหล็กอีกหลายชนิดที่ใช้ในการถลุงเหล็กดิบ เช่น โลโมไนท์ (Limonite) มีสูตรทางเคมีว่า Fe_2O และไซด์เคอไรท์ (Siderite) มีสูตรทางเคมีว่า FeCO_3 เป็นต้น

2. ถ่านโค้ก (Coke)

ถ่านโค้กเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการถลุงเหล็กดิบโดยเป็นตัวให้ความร้อนในกระบวนการถลุงเพื่อเป็นการขจัดออกซิเจนออกจากสินแร่เหล็ก และทำให้สินแร่เหล็กหลอมละลาย ถ่านโค้กเป็นผลผลิตที่ได้จากถ่านหิน โดยการนำเอาถ่านหินไปผ่านกระบวนการกลั่น การกลั่นทำ โดยการให้ความร้อนแก่ถ่านหินซึ่งอยู่ในเตาอบ จนกระทั่งถ่านหินอยู่ในสภาวะกึ่งหลอมละลาย จากนั้นทำการพ่นละอองน้ำเข้าไปยังถ่านหิน จะเกิดการหดตัวขึ้น ทำให้ถ่านหินแตกตัวออกเป็น ถ่านโค้ก ลักษณะของถ่านโค้กเป็นก้อนแข็ง ไม่เป็นฝุ่นผงไม่ติดไฟง่าย มีรูพรุนทั่วทั้งก้อน

3. หินปูน (Limestone)

หินปูนเป็นวัตถุดิบอีกชนิดหนึ่งที่ป้อนเข้าเตาสูงเพื่อทำการถลุงเหล็กดิบ หินปูนมีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) หินปูนจะเป็นตัวทำให้สิ่งเจือปนในสินแร่เหล็ก มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าปกติ และทำหน้าที่เป็นตัวประสานบรรดาสสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่หลอมละลายแล้วให้รวมตัวกันเป็นตะก้น แยกตัวออกจากน้ำเหล็กดิบ โดยตะก้นจะลอยตัวอยู่

บนน้ำเหล็กดิบ เนื่องจากตะกรันมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าเหล็กทำให้สะดวกในการทำการกำจัดออกจากน้ำเหล็กดิบ

4. อากาศ (Air)

อากาศที่จะป้อนเข้าเตาสูง จะถูกอุ่นให้มีความร้อนที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 ถึง 700 C (1,100-1,300 F) อากาศจะถูกเป่าเข้าไปภายในเตาสูง โดยผ่านทางช่องลม (Tuyers) ซึ่งอยู่บริเวณใกล้กับฐานเตาโดยรอบ อากาศจะเป็นตัวช่วยทำให้ถ่านโค้กเกิดการเผาไหม้ขึ้น

2.3.2 เตาถลุงเหล็กดิบ

เตาที่ใช้ในการถลุงเหล็กดิบ เรียกว่า เตาสูง หรือ Blast Furnace มีลักษณะเป็น ปล่องทรงสูงเรียวยาวขนาดใหญ่ เปลือกกรอบนอกของเตาทำจากแผ่นเหล็ก ผึงภายในเตาก่อด้วย อิฐทนไฟหนาประมาณ 3-4 ฟุต ความสูงของเตามีขนาดตั้งแต่ 30 ถึง 40 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา จะแตกต่างกันไปในแต่ละส่วนของเตา แต่ส่วนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดอยู่ที่บริเวณ ส่วนหลอมละลาย (Bosh) ซึ่งปกติจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 เมตร การทำงานของเตาสูงเป็นไปในลักษณะต่อเนื่องตลอดเวลา

เตาสูงมีส่วนประกอบหลักอยู่ 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนยอดเตา, ส่วนปล่องเตา, ส่วนหลอมละลาย และส่วนก้นเตา ดังแสดงในภาพที่ 2.1

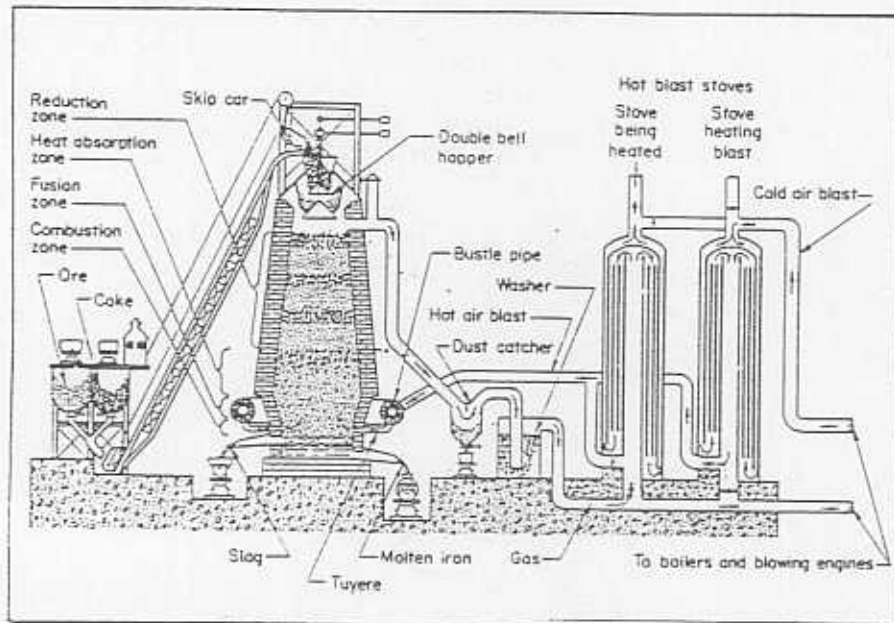
1. ส่วนยอดเตา (Top) บริเวณส่วนยอดเตาจะมีการรวบรวบวัตถุดิบที่จะป้อนเข้าเตาสูง 2 กรวย ติดตั้งซ้อนกันเพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซที่เกิดขึ้น ภายในเตาสูงฟุ้งกระจายออกขณะทำการเติมวัตถุดิบ สำหรับก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ จะถูกนำออกจากเตาสูงโดยผ่านทางท่อก๊าซ 4 ท่อ ที่ติดตั้งอยู่บริเวณบนส่วนยอดเตา

2. ส่วนปล่องเตา (Stack) เป็นส่วนที่อยู่ถัดลงมาจากส่วนยอดเตาบริเวณส่วนปล่องเตา ประกอบด้วย เซตรับความร้อน และเซตขจัดออกซิเจนของสินแร่เหล็กอุณหภูมิภายในส่วนปล่องเตามีค่าแตกต่างกันไป โดยที่บริเวณช่วงบนของเซตขจัดออกซิเจนจะมีอุณหภูมิประมาณ 400 F และที่บริเวณช่วงล่างของเซตรับความร้อน มีอุณหภูมิประมาณ 2,200 F

3. ส่วนหลอมละลาย (Bosh) ส่วนหลอมละลายประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนเผาไหม้ และส่วนหลอมละลาย บริเวณส่วนหลอมละลาย วัตถุดิบที่อยู่ในส่วนนี้จะเกิดการหลอมละลาย อุณหภูมิภายในส่วนหลอมละลายประมาณ 3,000 F ซึ่งได้มาจากอากาศร้อนที่เป่าเข้ามาตามท่อ โดยผ่านทางช่องลม

4. ส่วนก้นเตา (Heart) เป็นส่วนที่อยู่ตอนล่างของเตา เป็นบริเวณที่ทำหน้าที่รองรับ น้ำเหล็กดิบและตะกรัน ซึ่งไหลลงมาจากส่วนหลอมละลาย โดยตะกรันจะลอยตัวอยู่ส่วนบนของ น้ำเหล็กดิบ เมื่อถึงเวลาจะทำการเปิดช่องประตูเพื่อให้ตะกรัน ไหลออกจากเตาสูง หลังจากนี้

เอาตะกรันออกแล้วจะทำการเปิดช่องน้ำเหล็กเพื่อให้เหล็กดิบไหลออกจากเตาสูง โดยมีเบ้าขนาดใหญ่รองรับ เพื่อนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 2.1 ส่วนต่าง ๆ ของเตาสูง

ตารางที่ 2.1 สารที่เป็นส่วนประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Neville, 1981)
และตะกั่วเตาถลุง (United States และ Canada, 1978)

สารประกอบ	ปูนซีเมนต์	ตะกั่วเตาถลุง
CaO	60-67	29 - 42
SiO ₂	17 - 25	32 - 40
Al ₂ O ₃	3 - 8	7 - 17
Fe ₂ O ₃	0.5 - 6.0	0.1 - 1.5
MgO	0.1 - 4.0	8 - 9
SO ₃	1-3	-
Na ₂ O	0.2 - 1.3	-
K ₂ O	-	-
การสูญเสียน้ำหนักเนื่อง จากการเผา	0.5 - 3.0	-

2.4 คุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง

2.4.1 ความต้องการน้ำและความสามารถทำงานได้

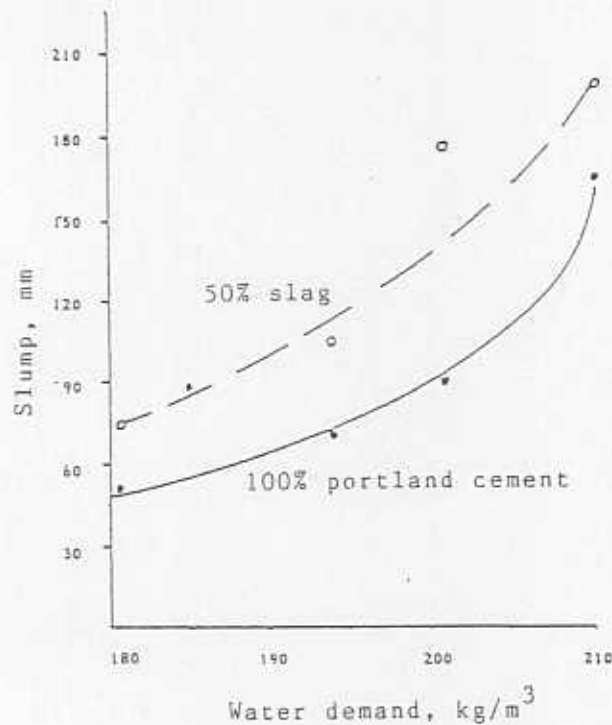
ความสามารถทำงานได้ (Workability) หมายถึงพลังงานที่ใส่ในเนื้อคอนกรีตเพื่อให้เกิดการอัดแน่น พลังงานที่ใส่เข้าไปเอาชนะความเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคต่าง ๆ ในส่วนผสม แต่ในการวัดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตโดยทั่วไปจะรวมเอาพลังงานอื่น ๆ ด้วยเช่นพลังงานเอาชนะความเสียดทานระหว่างคอนกรีตและแบบหล่อ (ปริญญา, 2529)

Fulton (1974) ได้ค้นพบว่าวัสดุซีเมนต์ (Cementitious Material) ที่ผสมตะกรันเตาถลุง ความสามารถในการทำงานได้จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเพสต์

Wood (1981) รายงานว่า ความสามารถทำงานได้และความสามารถเทเข้าแบบได้ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงจะดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุง เนื่องจากลักษณะพื้นผิวของตะกรันเตาถลุง ทำให้เพสต์ลื่นขึ้น Wood คิดว่า เนื่องมาจากความเรียบและความหนาแน่นของพื้นผิวของ ตะกรันเตาถลุง จะดูดน้ำเพียงเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้นของการผสม

Wu และ Roy (1982) พบว่าเพสต์ และมอร์ตาร์ที่ผสมตะกรันเตาถลุง การกระจายอนุภาคและการไหลดีกว่าเพสต์ และมอร์ตาร์ ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียว ทั้งกรณีผสมสารลดน้ำ (Water Reducing Admixtures) และไม่ผสมสารลดน้ำ

Meusel และ Rose (1983) พบว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุง จะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุง ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ผลกระทบของปริมาณน้ำต่อค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุง และไม่ผสมตะกรันเตาถลุง (Meusel และ Rose, 1983)

2.4.2 เวลาการก่อตัว

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยรวมของสารประกอบหลักทั้ง 4 นั้น จะเกิด คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) gel และ เอ็ททริงไนด์ เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์ จะเป็นการหน่วง การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งอธิบายการเกิด " ระยะดอร์แมนท์ " อันเป็นช่วงเวลาที่ค่อนข้างจะ ไม่มีอะไรเกิดขึ้นเป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง ในขณะที่ซีเมนต์เฟสตัวยังคงเหลวและมีความสามารถเทได้

เมื่อสิ้นสุดช่วง " ระยะดอร์แมนท์ " ก็จะเข้าสู่จุดก่อตัวเริ่มต้น (Initial Set) ซึ่งเป็นช่วงที่ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์แตกตัวออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ต่อไปปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของซีเมนต์ ก่อนปฏิกิริยาผลก็คือ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเข้าอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ และเกิดผิวสัมผัสก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เฟสตั เวลาผ่านไป ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากพอให้เกิดความเข้มข้นของจุดสัมผัสจำกัดการเคลื่อนที่ของเม็ด ซีเมนต์ส่งผลให้ซีเมนต์เฟสตักลายเป็นของแข็ง นั่นก็คือการเข้าสู่จุดก่อตัวสุดท้าย (Final Set) (ชีวาลย์, 2536)

Fulton (1974) พบว่า โดยทั่วไปเมื่อใส่ตะกรันเตาถลุงแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน จะทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเริ่มแรก สัดส่วนที่ใช้ในการผสม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุซีเมนต์ และลักษณะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Hogan และ Meusel (1981) พบว่า เมื่อใส่ตะกรันเตาถลุงแทนที่ปูนซีเมนต์ จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นเพิ่มขึ้น $1/2 - 1$ ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 73 F (23 C)

และการเปลี่ยนแปลงการก่อตัวระยะต้นจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิสูงกว่า 85 F (29 C) อย่างไรก็ตาม การหน่วงการก่อตัวจะมากเมื่ออุณหภูมิต่ำ การผสมสารเร่งการก่อตัว เช่นคล์เซียมคลอไรด์หรือสารผสมเพิ่มเร่งการก่อตัวอื่น ๆ จะสามารถลดเวลาการก่อตัวได้

2.4.3 วิธีการบ่ม

การบ่ม (Curing) คือวิธีการช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำได้โดยการให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว (ชัชวาลย์, 2536)

จากการศึกษาของ Mather (1957) ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์ Type II กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุง (Portland Blast - Furnace Slag Cement) พบว่าซีเมนต์ทั้งสองจะมีอัตราการสูญเสียกำลังระดับเดียวกันเมื่อมีการบ่มเพียง 3 วัน

ในทางตรงกันข้าม Fulton (1974) พบว่าคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุง มากกว่า 30 % จะสูญเสียกำลังได้ง่ายกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุง ถ้าวิธีการบ่มไม่ดี

2.4.4 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด

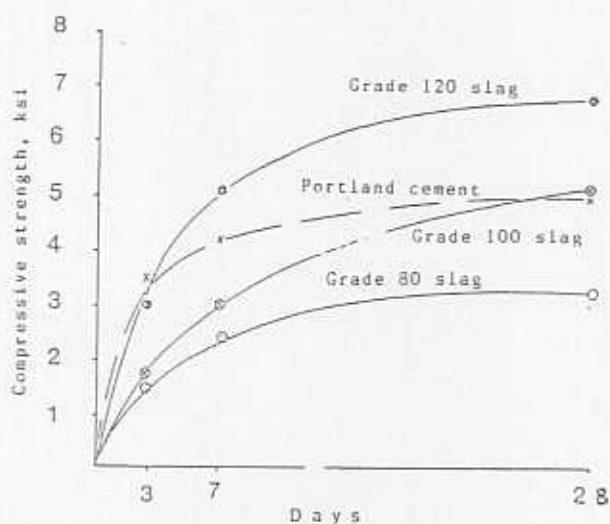
กำลังของมอร์ตาร์มีบทบาทอย่างมาก ต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยกำลังของมอร์ตาร์นี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ตาร์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความพรุนจะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากำลังของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ การเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของมวลรวม เช่นการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึก,ลักษณะพื้นผิว และขนาดใหญ่สุดของมวลรวมจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังดัดน้อยกว่ากำลังรับแรงอัด โดยอัตราส่วนของกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น (ชัชวาลย์, 2536)

Hogan และ Meusel (1981) พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) และกำลังรับแรงดัด (Flexural strength) ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง เมื่อเปรียบเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตกับการใช้ Slag Grade 120 (ASTM C 989) พบว่ากำลังในช่วงต้นจะลดลง (1-3 วัน) และกำลังในช่วงหลังจะเพิ่มขึ้น (เกิน 7 วันขึ้นไป) สำหรับเกรดอื่น ๆ กำลังมีแนวโน้มลดลงทุกช่วงอายุ

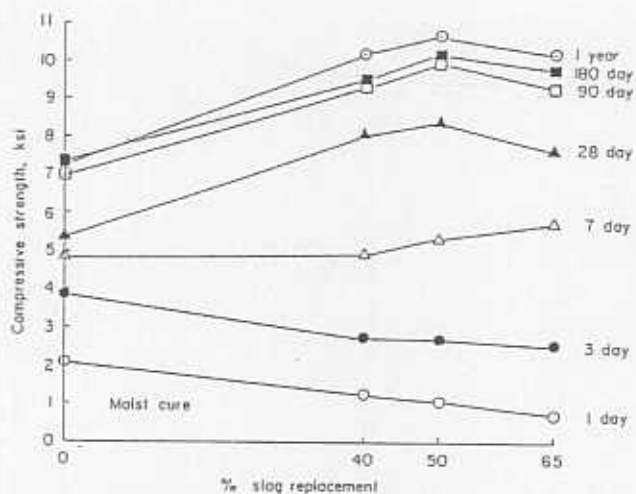
ผลกระทบของตะกรันเตาถลุง ขึ้นอยู่กับ Slag Activity Index ของตะกรันเตาถลุง แต่ละเกรดและอัตราส่วนที่ใช้ผสม จากภาพที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่า กำลังของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับเกรดของตะกรันเตาถลุง ที่กำหนดใน ASTM C 989

ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อตะกรันเตาถลุงในคอนกรีต คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุซีเมนต์ (Cementitious Material) ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และสภาพการบ่ม

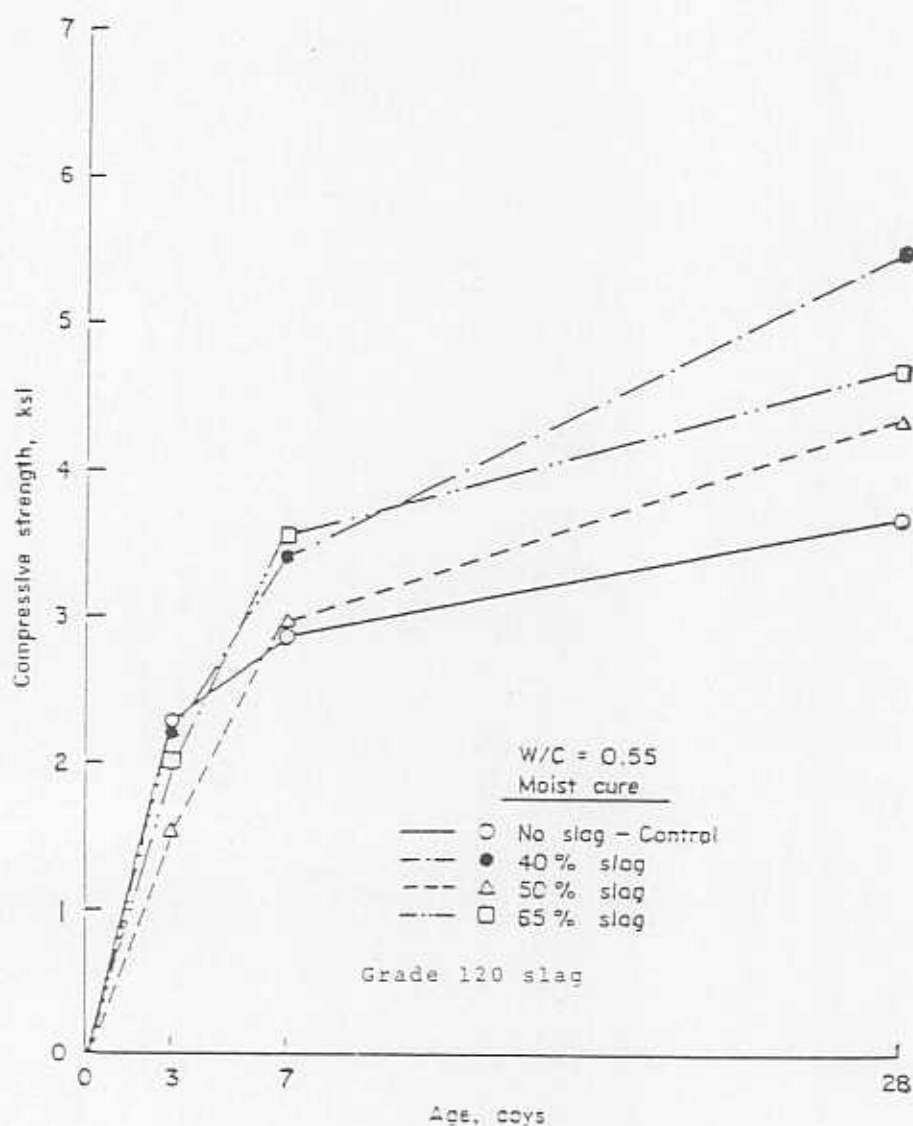
Luiz Fernandez และ V.Mohan Malhotra (1990) พบว่า กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้น ๆ ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงจะต่ำเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุง จะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุง ใน ASTM C 989 เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ข้อมูลจากรายงานของ Task Group E-38.06.02)



ภาพที่ 2.4 อิทธิพลของการแทนที่ตะกรันเตาถลุงต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (Hogan และ Meusel, 1981)

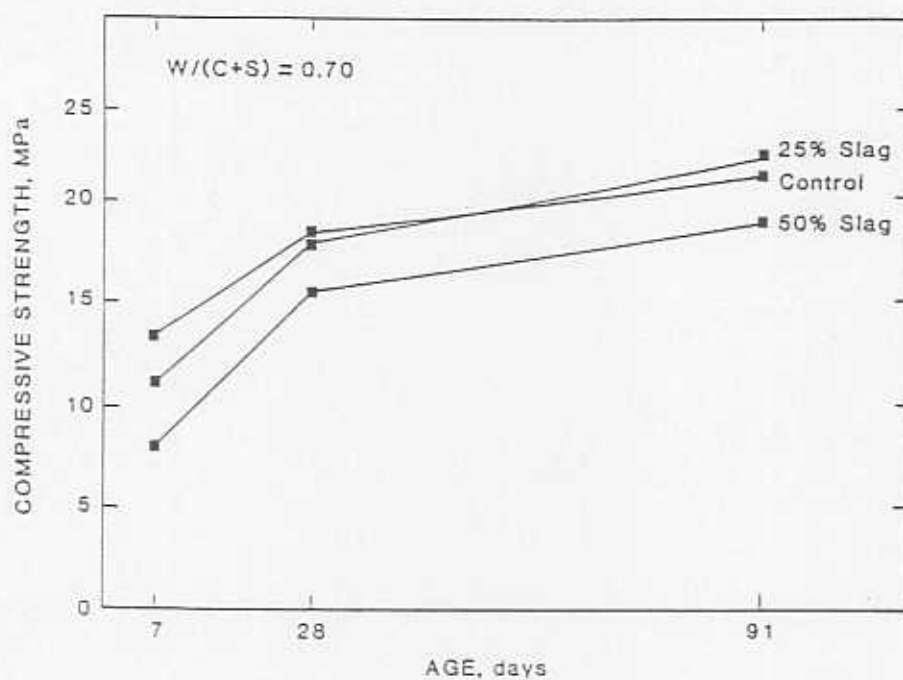


ภาพที่ 2.5 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงและคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุง (Hogan และ Meusel, 1981)

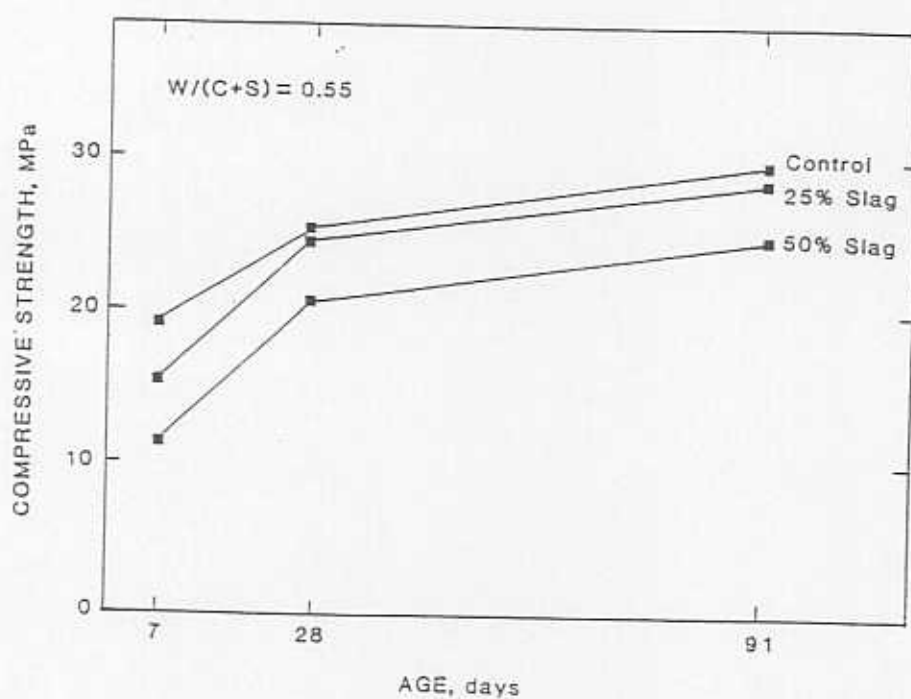
Roy และ Idorn (1982) อุดหนุนมิที่ใช่มั้มคอนกรีตมีผลกระทบบมากตอ้กำลังของคอนกรีตในช่วงอายุต้นๆ คอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีผลมากตอ้กำลังของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง

Hogan และ Meusel (1981) แสดงผลการทดสอบทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงและคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุง เมื่อใช้ตะกรันเตาถลุงแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 2.5

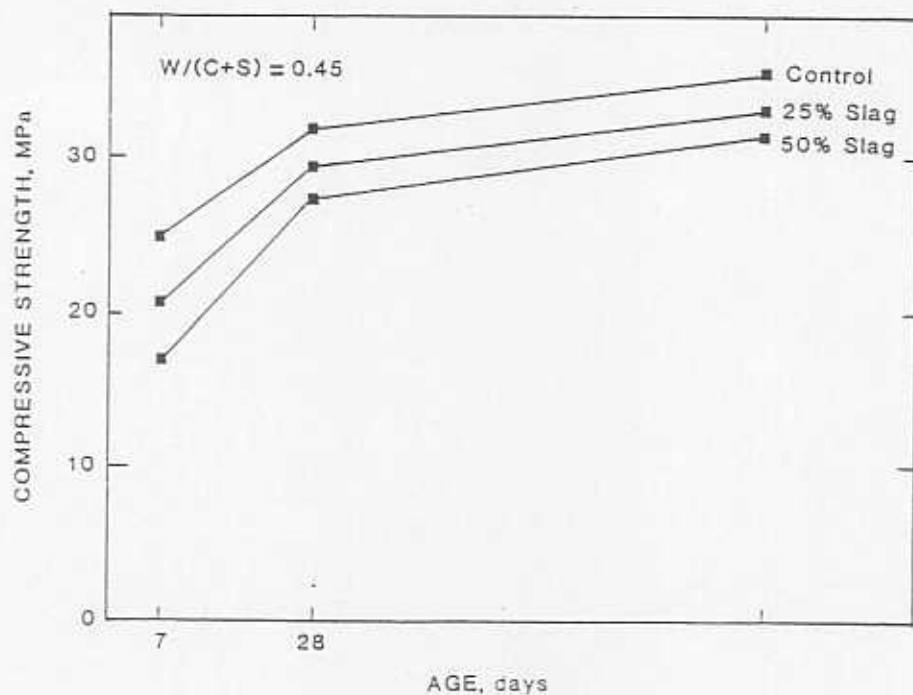
Fernandez,Luiz และ Malhotar,V.Mohar (1990) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง จาก Northern Ontario ที่อัตราส่วนน้ำตอ้วัสดุซีเมนต์ เท่ากับ 0.70,0.55 และ 0.45 และแทนที่ตะกรันเตาถลุง เท่ากับ 25 และ 50 % โดยน้ำหนักได้ผลดังแสดงในภาพที่ 2.6, 2.7 และ 2.8



ภาพที่ 2.6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง $W/(C+S) = 0.70$
(Fernandez,Luiz และ Malhotar,V.Mohar, 1990)



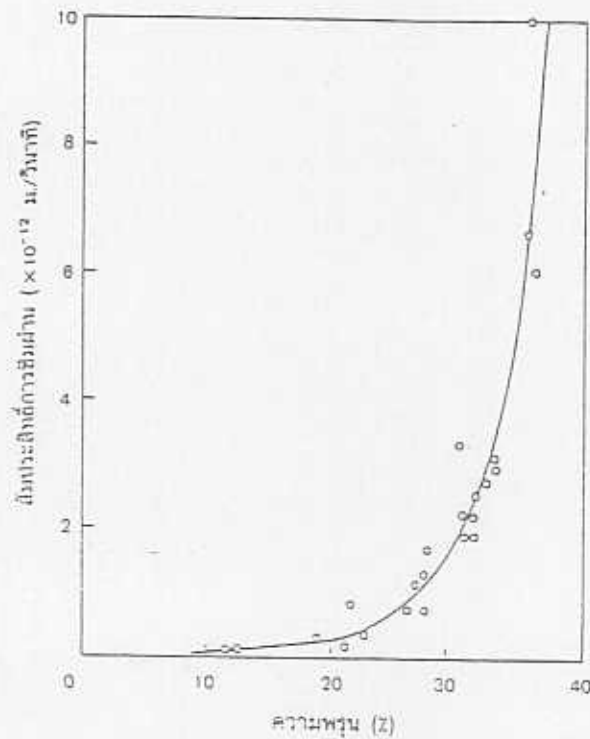
ภาพที่ 2.7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง $W/(C+S) = 0.55$
(Fernandez,Luiz และ Malhotar,V.Mohar, 1990)



ภาพที่ 2.8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง $W/(C+S) = 0.45$
(Fernandez,Luiz และ Malhotar,V.Mohar, 1990)

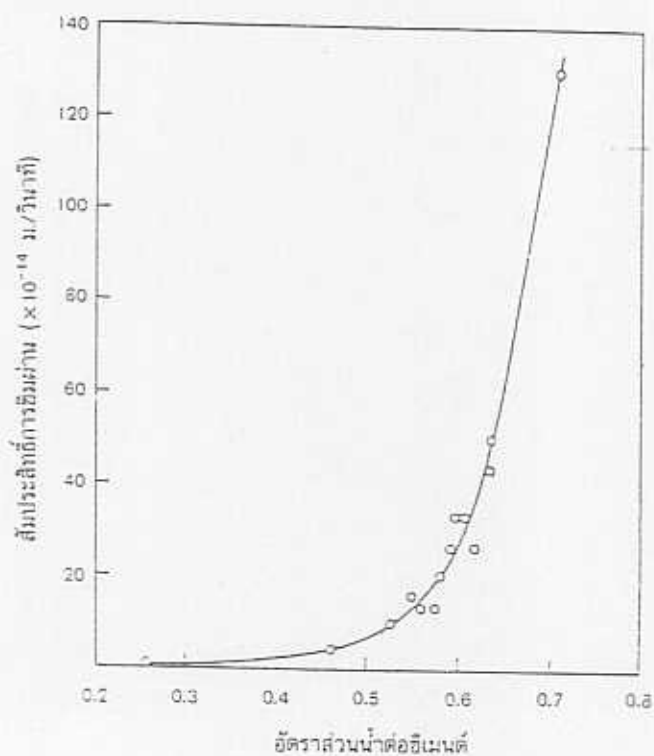
2.4.5 ความสามารถซึมผ่านได้

ซึซวาลย์ (2536) ได้อธิบายว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไปความสามารถซึมผ่านของน้ำจะถูกควบคุมโดยความพรุนของซีเมนต์เพสต์ ดังแสดงในภาพที่ 2.9 โดยที่ความพรุน (Capillary Porosity) จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อน้ำซีเมนต์และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Degree of hydration)

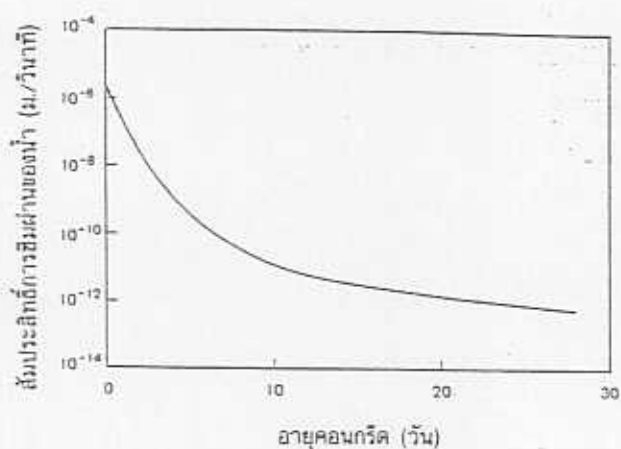


ภาพที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและความพรุนภายในเนื้อคอนกรีต (ชัชวาลย์, 2536)

ภาพที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่า ณ ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่กำหนดความสามารถซึมผ่านได้จะต่ำ สำหรับเพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งช่องทางไหลของน้ำ (Capillary) จะถูกแบ่งแยกออกไม่ต่อเนื่องกัน ในส่วนผสมที่กำหนด W/C ให้ความซึมผ่านจะลดลง ถ้าสารซีเมนต์มีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนของน้ำต่อสารซีเมนต์ (ชัชวาลย์, 2536)



ภาพที่ 2.11 ความสามารถซึมผ่านของน้ำลดลงเมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันสมบูรณ์ขึ้น (ชัชวาลย์, 2536)

Bakker (1980); Roy และ Idorn (1982) พบว่า ความสามารถซึมผ่านในการซึมผ่านของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุง จะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุง ถ้าปริมาณของตะกรันเตาถลุงเพิ่มขึ้น ความสามารถซึมผ่านจะลดลง เนื่องจากรูโครงสร้างของเนื้อวัสดุซีเมนต์จะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุง กับคล์เซียมไฮดรอกไซด์ และการลดลงของอัลคาไล ระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

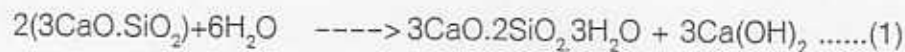
Bakker (1980); Mehta (1980); Roy และ Idorn (1981) พบว่าโดยทั่ว ๆ ไปรูพรุนในคอนกรีตจะประกอบไปด้วยคล์เซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ในบางส่วนยังเต็มไปด้วยคล์เซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrates)

จาก Mehta (1980) กล่าวว่า"ความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีตขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดรูพรุน "

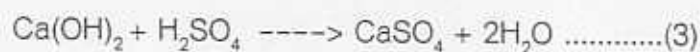
Bakker (1980); Mehta (1980); Roy และ Idorn (1981) พบว่าเมื่อใช้คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง ขนาดของรูพรุนจะลดลงก่อน 28 วัน หลังจากการผสม

2.4.6 การต้านทานสารเคมี

เนื่องจากสารประกอบทางเคมีของส่วนผสมมอร์ตาร์มาตรฐานที่สำคัญคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งเมื่อผสมกับน้ำตามส่วนผสมแล้ว สามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับสารประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2 (Neville, 1973)



ยังผลให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ((3CaO.2SiO₂.3H₂O) หรือ CSH) ซึ่งให้ความเหนียวและเกาะแน่นกับวัสดุผสมการทำปฏิกิริยานี้จะหยุดเมื่อน้ำหนีออกจากเฟสทั้งหมดแล้ว แต่จากสมการที่ 1 และ 2 พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) เกิดขึ้นด้วย ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ได้ง่าย ดังสมการที่ 3



เป็นผลให้มอร์ตาร์ถูกกัดกร่อนโดยง่าย ดังนั้นถ้าสามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้น้อยลงก็จะลดการสูญเสียจากการกัดกร่อนได้

Hogan และ Meusel (1981) พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยตะกั่วเตาถลุง จะทำให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตดีขึ้น การต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตจะสูงเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type II และแทนที่ตะกั่วเตาถลุงในส่วนผสมมากกว่า 50 % ของปริมาณวัสดุเชื่อมประสานทั้งหมด

Chojnoki (1981) พบว่าการทดสอบตะกั่วเตาถลุงในแคนาดา เมื่อผสมตะกั่วเตาถลุงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I 50 % ซึ่งมีส่วนผสมของ C₃A 12% และตะกั่วเตาถลุงมีส่วนผสมของ Al₂O₃ 7% มีความต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type V

Utida,Keinosuke;Wasa,Yujiro;Abe,Hiroji และ Inoue,Hiroaki (1994-1995) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตโดยใช้ตะกั่วเตาถลุง ในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนต่อคอนกรีตสำหรับ Sheild tunnel ใน Trans-tokyo bay Highway

เพื่อหาคุณสมบัติด้านความคงทนต่อน้ำทะเลการแพร่กระจายของ NaCl ความสามารถซึมผ่านได้ (Permeability) ของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง จะช่วยปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตให้ดีขึ้น

2.4.7 การคืบและการหดตัวของคอนกรีต

การหดตัว คือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตเมื่อเกิดการสูญเสียน้ำหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีของส่วนผสม การหดตัวของคอนกรีตมี 4 ประเภท

1. Plastic Shrinkage เกิดจากการจมตัวของส่วนที่เป็นของแข็งในส่วนผสมและการสูญเสียน้ำจากคอนกรีตสด จะเกิดก่อนซีเมนต์เพสต์แข็งตัว

2. Autogenous Shrinkage เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดการลดลงของปริมาตร นั่นคือ ปริมาตรของสิ่งที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าปริมาตรของน้ำกับซีเมนต์ที่ผสมกันจะเกิดในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

3. Carbonation Shrinkage เกิดจาก Free lime หรือ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ดังสมการ



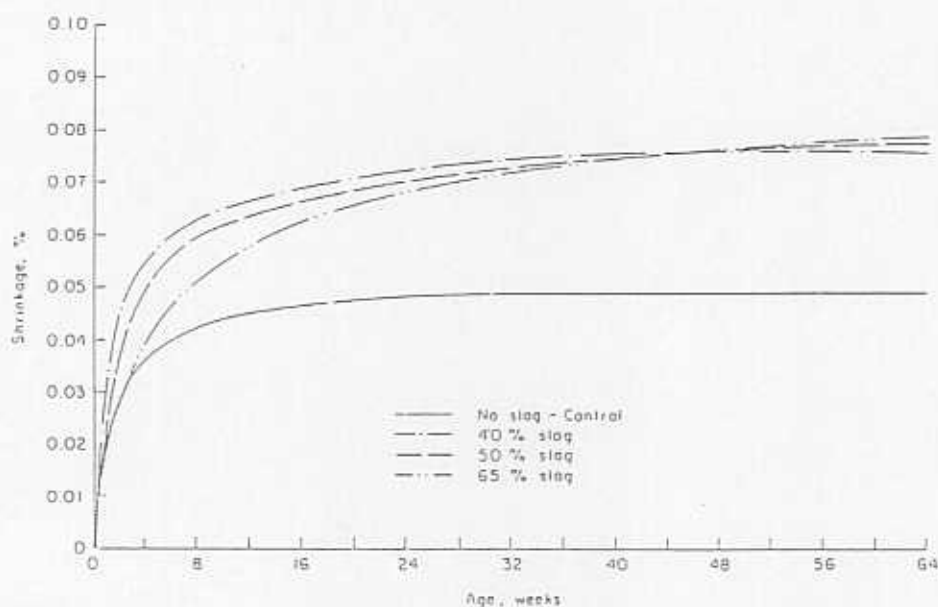
จากปฏิกิริยานี้จะก่อให้เกิดการลดลงของปริมาตรของเพสต์ การหดตัวจะเกิดในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

4. Drying Shrinkage เกิดจากการสูญเสียน้ำทั้งจาก Capillary และจาก Gel Pore จะเกิดในคอนกรีตที่แข็งตัว แล้วอัตราการหดตัวช่วงแรกจะสูง และส่วนใหญ่ไม่สามารถคืนกลับได้ (Irreversible) แต่อัตราการหดตัวในช่วงหลังจะเกิดน้อยและเป็นประเภทที่กลับคืนได้ (Reversible) (ชีชาวลย์, 2536)

Klieger และ Isberner (1962) พบว่าความแตกต่างของการคืบ และ การหดตัวเมื่อแห้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุง น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในทางตรงกันข้าม Fulton (1974) พบว่า โดยทั่วไปการคืบและการหดตัวจะมากขึ้นอยู่กับส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงที่ใช้ Fulton เชื่อว่า การเพิ่มขึ้นของการหดตัวเนื่องมาจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของเพสต์ เมื่อใช้ตะกรันเตาถลุง แทนที่เท่ากับน้ำหนักของซีเมนต์

Hogan และ Meusel (1981) แสดงผลของตะกรันเตาถลุง ต่อการหดตัวของคอนกรีต ในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 การหดตัวเมื่อตากแห้ง (Drying Shrinkage) ของคอนกรีตไม่ผสมสารกระจายกักฟองอากาศสำหรับการแทนที่ด้วย Slag ต่าง ๆ กัน ($W/C = 0.55$) (Hogan และ Meusel, 1981)

Hogan และ Meusel (1981) พบว่าเมื่อผสมตะกรันเตาถลุง การหดตัวจะมากแต่ถ้าเพิ่มยิปซัมเข้าไปในตะกรันเตาถลุง จะช่วยลดการหดตัวลงเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.4.8 ความเสียหายเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างต่างกับหิน

ปฏิกิริยาระหว่างต่างที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับแร่ธาตุต่าง ๆ ในเนื้อหินสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทดังนี้

1. Alkali Carbonate Reaction ปฏิกิริยานี้จะเกิดกับหินพวก Dolomitic Limestone ที่มีดินเหนียวแทรกตัวอยู่ในเนื้อหินโดยหินประเภทนี้จะทำปฏิกิริยามีชื่อว่า "Dedolomitization" สลายตัวเป็นผลึกของ Dolomite กับดินเหนียวซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวหลังจากนี้ดินเหนียวจะทำปฏิกิริยากับความชื้นเกิดการขยายตัวอีกเช่นกัน

2. Alkali Silicate ชั้นของซิลิเกตในเนื้อหินทำปฏิกิริยากับต่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและน้ำก่อให้เกิดการขยายตัว

3. Alkali Silica Reaction หินที่ประกอบด้วย Siliceous ที่ไวต่อปฏิกิริยาจะทำกับน้ำและ Alkali ก่อให้เกิดการขยายตัว (ชัชวาลย์ , 2536)

Bakker (1980); Hogan และ Meusel (1981) พบว่าการใช้ตะกรันเตาถลุงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงบางส่วนจะช่วยลดการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจาก Alkali Silica Reaction

จาก ASTM C 989 รายงานว่าการใช้ตะกรันเตาถลุงแทนที่มากกว่า 40 % ของปริมาณวัสดุซีเมนต์ ทั้งหมดจะลดการขยายตัวเนื่องจาก Alkali Silica Reaction ซึ่งพบในปูนซีเมนต์ที่มี Alkali สูงถึง 1 %

2.4.9 ความเสียหายเนื่องจากการแข็งตัวและการละลาย

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าเมื่อน้ำแข็งตัวเป็นน้ำแข็งนั้น ปริมาณจะเพิ่มขึ้นประมาณ 9% ถ้าหน่วยแรง (Stress) ที่เกิดจากการขยายตัวน้อยกว่าแรงดึงของคอนกรีต การขยายตัว (Elastic Volume) ของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเมื่อไรหน่วยแรงที่เกิดจากการขยายตัวมากกว่าแรงดึงของคอนกรีตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรถาวรและเกิดการแตกร้าว (ชัชวาลย์ , 2536)

Fulton (1974); Klieger และ Isberner (1976); Mathar (1997) รายงานว่าจากผลการศึกษาโดยทั่วไปแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการทดสอบ freezing และ Thawing ในน้ำของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I และ Type II จะได้ผลเหมือนกัน



2.4.10 การกัดกร่อนของเหล็กเสริม

ปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ทำให้เกิด Ca(OH)_2 ซึ่งมีความเป็นด่างสูง คือมีค่า PH ประมาณ 12.5-13 ความเป็นด่างที่สูงมากของ Ca(OH)_2 นี้จะก่อให้เกิดฟิล์มบาง ๆ ของเหล็กออกไซด์บนพื้นเหล็กเสริม ขบวนการป้องกันนี้มีเรียกว่า "Passivation" (ชัชวาลย์, 2536)

Fulton (1974); Lea (1971); Hogan และ Meusel (1981) รายงานว่าในช่วงต้น ๆ ของการใช้คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกั่วเตาถลุง จะต้องคำนึงถึงผลของของซัลเฟอร์ (sulfur) ในตะกั่วเตาถลุงตั้งแต่นั้นมามีงานวิจัยจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าจะไม่มีผลกระทบในทางลบ (Negative effect) ต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งถูกพบว่าจะลดค่า PH ของสารละลาย (Solution) ในรูปุนเล็กน้อย แต่ไม่มีผลกระทบทางลบต่อ Passivation ของเหล็กเสริม และการใช้ตะกั่วเตาถลุงจะช่วยลดการซึมผ่านได้ของน้ำ ดังนั้นจึงสามารถลดการซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตของคลอไรด์ ซึ่งคลอไรด์นี้จะทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

pw
TA
๙355