

การตรวจเอกสาร

การเสื่อมสภาพและความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีต

ในปัจจุบันจะพบปัญหาการเสื่อมสภาพ (Deterioration) ของโครงสร้างคอนกรีตมีอยู่เป็นจำนวนมาก โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโครงสร้างพบตั้งแต่ขั้นตอนของการออกแบบ การเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพไม่ได้มาตรฐาน ขณะก่อสร้างขาดการควบคุมงานที่ดีทำให้คอนกรีตไม่ได้คุณภาพตามต้องการ และจากลักษณะการใช้งานที่แตกต่างไปจากการออกแบบ เช่น การรับน้ำหนักเกินกว่าข้อกำหนดก็เป็นปัจจัยที่ทำให้โครงสร้างเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควร และปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งคือ สภาพแวดล้อมที่โครงสร้างต้องสัมผัส เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟต หรือกรด หรือสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลล้วนเป็นสาเหตุทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสื่อมสภาพ

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็น 5 ชนิด ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพ คือ การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (Physical Deterioration) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ (Biological Deterioration) และการเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม (Mixed Deterioration) (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543) โดยการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเหล่านี้จะนำไปสู่ความเสียหายของโครงสร้าง อันอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ดังนั้นเมื่อโครงสร้างเกิดความเสียหายงานซ่อมจึงถือว่ามีความสำคัญและมีความจำเป็น เพื่อหยุดความเสียหายที่เกิดขึ้นและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างออกไป โดยงานซ่อมจะประกอบด้วยวิธีการซ่อมและวัสดุซ่อม ซึ่งต้องพิจารณาเลือกวิธีการและวัสดุให้เหมาะสมกับลักษณะของความเสียหาย

ลักษณะความเสียหายของพื้นคอนกรีตที่พบเห็นโดยส่วนใหญ่ อาจปรากฏในลักษณะการหลุดร่อนที่ผิวหน้าคอนกรีต (Scaling) การแตกกระเทาะ (Spalling) การเกิด Pop-Outs การแตกร้าวตามมุม (Corner Crack) การแตกร้าวในแนวทแยงมุม (Diagonal Crack) การแตกร้าวในแนวขวาง (Transverse Crack) หรือการแตกร้าวในแนวยาว (Longitudinal Crack) ดังในภาพผนวกที่ ข11 ซึ่งวิธีการซ่อมแซมความเสียหายดังกล่าวจะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะและระดับความรุนแรงของความเสียหาย หากระดับความเสียหายของโครงสร้างไม่รุนแรงมากนักเช่นการแตกร้าวในบริเวณแคบ ๆ และมีความลึกของความเสียหายไม่เกิน 1/3 ของความหนาพื้นคอนกรีต วิธีการซ่อมสามารถ

เลือกใช้วิธีการซ่อมแบบฉาบปะ (Patching Repair) หรือแบบเทบาง (Partial-Depth Repair) ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากใช้เวลาในการซ่อมน้อยทำให้สามารถใช้งานโครงสร้างได้เร็ว (FHWA-RD-99-152, 1999) โดยวิธีการซ่อมประกอบด้วยกระบวนการ ตรวจสอบหาสาเหตุของความเสียหาย กำหนดขอบเขตบริเวณซ่อม สกัดคอนกรีตส่วนที่เสียหายออกและทำความสะอาด ทาววัสดุที่ใช้สำหรับเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ระหว่างผิวคอนกรีตเดิมและวัสดุซ่อม เสร็จแล้วเทวัสดุซ่อมลงในบริเวณที่จะซ่อม หลังจากนั้นทำการตกแต่งผิวและบ่มคอนกรีตเพื่อให้ได้กำลังตามต้องการ

วัสดุซ่อมคอนกรีต

วัสดุในงานซ่อมคอนกรีตโดยทั่วไปประกอบด้วยวัสดุซ่อมแบบดั้งเดิมและวัสดุซ่อมชนิดพิเศษ ซึ่งวัสดุซ่อมที่เลือกใช้ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมและสอดคล้องกับความต้องการของงานซ่อมแต่ละประเภทเพื่อให้งานซ่อมมีประสิทธิภาพสูงสุด คุณสมบัติสำคัญของวัสดุซ่อมโดยทั่วไปคือ กำลังอัดและกำลังยึดหน่วง และนอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติที่จำเป็นอื่นที่ต้องพิจารณาสำหรับวัสดุซ่อม เช่น คุณสมบัติด้านสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of Thermal Expansion) คุณสมบัติด้านการหดตัว (Shrinkage) คุณสมบัติด้านการซึมผ่าน (Permeability) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) คุณสมบัติด้านเคมี (Chemical Properties) คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties) และคุณสมบัติด้านสี (Color Properties) (ACI 546R-96, 2001)

ในปัจจุบันวัสดุซ่อมโครงสร้างคอนกรีตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์มีอยู่มากมาย และมีคุณสมบัติแตกต่างกันตามความเหมาะสมกับงานในแต่ละประเภท โดยส่วนใหญ่วัสดุซ่อมเหล่านี้จะนำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง จึงทำให้ต้นทุนในงานซ่อมเพิ่มสูงขึ้น การพิจารณานำวัสดุที่มีภายในประเทศมาปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ และเป็น การลดต้นทุนในงานซ่อม นอกเหนือไปจากนั้นยังเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุด

วัสดุปอชโซลาน

ASTM C168, ACI 116R-00, Troxell *et al.* (1968) ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอชโซลานไว้ว่า วัสดุปอชโซลาน คือ วัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอชโซลานจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่ถ้าวัสดุปอชโซลานอยู่ในรูปผงที่มีความละเอียดสูงเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิปกติทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติการเชื่อมประสาน

มาตรฐาน ASTM C168 แบ่งสารปอชโซลานออกเป็น 3 ประเภท คือ ปอชโซลาน Class N, Class F และ Class C โดยปอชโซลาน Class N เป็นวัสดุปอชโซลานธรรมชาติที่ต้องปรับปรุงหรือไม่ต้องปรับปรุงคุณภาพก็ได้ เช่น หินพัมมิไซด์ (Pumicite) หินโอปอลไลด์ (Opaline) หินเชิร์ต (Cherts) และหินเชลล์ (Shale) และถ่านหินไฟ สารปอชโซลานธรรมชาติบางชนิดเมื่อได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 500-1,100 องศาเซลเซียส จะทำให้ความไวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปอชโซลาน Class F เป็นวัสดุปอชโซลานที่ได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 5 มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุเชื่อมประสานอยู่น้อยแต่มีคุณสมบัติของวัสดุปอชโซลาน และปอชโซลาน Class C เป็นวัสดุปอชโซลานที่เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าร้อยละ 10 มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุเชื่อมประสานและคุณสมบัติปอชโซลานในตัวเอง

สารปอชโซลานมีองค์ประกอบของซิลิกาหรืออลูมินาที่ไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์และทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นสารปอชโซลานที่มีอนุภาคขนาดเล็กยังหน้าที่อุดแทรกช่องว่าง (Filling Effect) ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น มีความทนทานเพิ่มขึ้นรวมทั้งกำลังอัดประลัยเพิ่มขึ้นอีกด้วย

ดินขาว

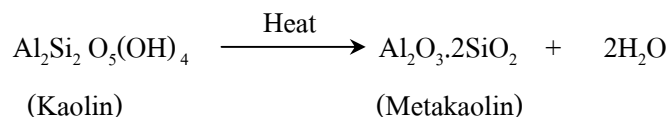
ดินขาว ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) จัดเป็นวัสดุปอซโซลานซึ่งได้จากการนำดินขาวดิบจากธรรมชาติ ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) มาปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน โดยวิธีการเผาในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งโดยทั่วไปผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นอันรูป (Amorphous) ไม่มีรูปร่างที่แน่นอน มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุเหล็ก ของดินขาวประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และ อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือ เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น โดยองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีปริมาณที่ต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดของดิน อนุภาคของดินขาวมีขนาดโดยมีเฉลี่ยประมาณ 1.5 ไมครอน (Balaguru, 2001) ตามมาตรฐาน ASTM C168 จัดดินขาวเป็นสารปอซโซลาน Class N (Raw or Calcined Pozzolan) เมื่อผสมในคอนกรีต ดินขาวจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นเพิ่มขึ้น (Wild, 1996) นอกเหนือไปจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง ดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านกายภาพให้กับคอนกรีตอีกด้วย โดยอนุภาคของดินขาวที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปแทรกช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุน (Porosity) และทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้ดินขาวผสมในคอนกรีตจึงมักให้ผลดีในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในด้านกำลัง (Strength) และความทนทาน (Durability) มีงานวิจัยหลายชิ้นรายงานว่าปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดให้กับคอนกรีต คือ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (Wild, 1996; จิรวัดน์, 2546)

การปรับปรุงคุณภาพดินขาว

การปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบด้วยความร้อนเพื่อให้ได้ดินขาวที่มีคุณภาพและคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต ทำได้โดยใช้กระบวนการเผาที่ควบคุมอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสม ทำให้ดินขาวดิบสูญเสียน้ำและเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีกลายเป็นดินขาวที่มีสถานะผลึกเป็นอันรูป โดยคุณภาพของดินขาวที่ได้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแร่ตามแหล่งกำเนิด ความบริสุทธิ์ ขนาดของเม็ดดินและสถานะทางผลึก (Murat, 1983)

ปฏิกิริยาจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินขาวด้วยความร้อนแสดงได้ดังนี้

(Pera and Ambroise, 1998)



อุณหภูมิการเผามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะและลักษณะทางผลึกของดินขาว ซึ่งมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก มีรายงานวิจัยของ Chatterji *et al.* (1960) และ Measson *et al.* (1978) ที่แสดงว่าการเผาดินขาวที่เผาด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ดินขาวดิบบางส่วนยังคงสภาพเดิม แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยยังต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ดินขาวดิบจะกลายสภาพเป็นดินขาวทั้งหมด แต่มีสถานะทางผลึกเป็นอันธรูปน้อยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดำและที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมที่สุดเพราะทำให้ได้ดินขาวมีสถานะทางผลึกมีลักษณะเป็นอันธรูปมากขึ้นส่งผลมีให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง หากใช้อุณหภูมิสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส ดินขาวจะกลายสภาพเป็นสารประกอบชนิดอื่น เช่น มูไลต์ (Mulite; $2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2)$) สปิเนล (Spinel; $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$) และซิลิกาออกไซด์ ซึ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

เพื่อให้ได้วัสดุปอซโซลานคุณภาพดี กระบวนการผลิตและปรับปรุงคุณภาพเป็นสิ่งสำคัญ Nevill (1996) รายงานว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวจะอยู่ในช่วง 650-850 องศาเซลเซียส และบดจนอนุภาคมีความละเอียดโดยมีพื้นที่ผิวประมาณ 700-900 ตร.ม./กก. จะได้ดินขาวที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้สูง (High Pozzolanicity)

วิธีการเผามีอิทธิพลต่อสถานะทางผลึกของดินขาวเช่นกัน Murat and Comel (1983) ได้ศึกษาผลกระทบจากวิธีการและอุณหภูมิ โดยเผาดินขาวด้วยวิธีใช้ถังนิ่ง (Fixed-Bed) เป็นเวลา 3-6 ชั่วโมง และวิธีใช้ถังกวน (Stirred-Bed) เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง โดยใช้ช่วงอุณหภูมิการเผาเดียวกันคือ 700-850 องศาเซลเซียส พบว่าดินขาวที่ได้จากการเผาโดยใช้ถังนิ่งเป็นเวลา 6 ชั่วโมงเมื่อนำมาผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ จะให้กำลังอัดสูงกว่าการเผาโดยใช้ถังกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และพบว่าวิธีการเผาโดยใช้ถังนิ่งได้ดินขาวที่มีสถานะทางผลึกมีลักษณะเป็นอันธรูปมากกว่าวิธีการเผาโดยใช้ถังกวนจึงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่สูงกว่าทำให้มีกำลังอัดสูงกว่าด้วย

ในประเทศไทยมีรายงานการศึกษาถึงอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบจากแหล่งใหญ่ต่างๆ เพื่อใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน เช่น แหล่งดินจังหวัดปราจีนบุรี, จังหวัดระนอง และจังหวัดลำปาง

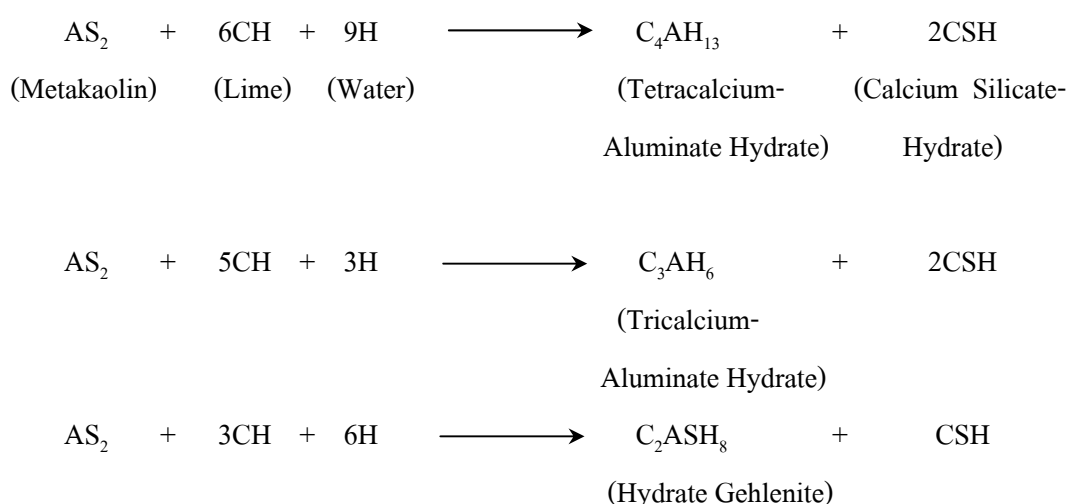
รายงานของ Hengsadeekul (1995) ศึกษาการเผาดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง (Washed Kaolin) และดินขาวดิบที่ผ่านการบด (Crushed Kaolin) โดยใช้แหล่งดินจากจังหวัดลำปางเพื่อใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน และใช้เตาเผาแบบถังนิ่ง แปรผันอุณหภูมิการเผาที่ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบคือ 800 องศาเซลเซียส การเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ดินขาวดิบที่ผ่านการล้างให้ดินขาวที่ทำให้กำลังอัดของมอร์ต้ามีค่าสูงกว่าดินขาวดิบที่ผ่านการบด ที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์เดียวกัน

Sayamipuk (1999) ได้รายงานการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบจากแหล่งดิน 2 แหล่ง คือ จังหวัดระนองและลำปาง โดยเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส และแปรผันระยะเวลาการเผาที่ 3, 6, 12 และ 18 ชั่วโมง พบว่าดินขาวดิบจากแหล่งดินจังหวัดระนองเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อย่างเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ดินขาวที่ให้ค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) สูงที่สุด และสอดคล้องกับรายงานอื่น (อนุพงษ์, 2543) ที่ศึกษาอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบจากแหล่งดิน 3 แหล่ง คือ จังหวัดปราจีน, จังหวัดระนอง และจังหวัดลำปาง โดยเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส และแปรผันระยะเวลาการเผาที่ 4, 6 และ 8 ชั่วโมง โดยพบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ต่อเนื่อง 6 ชั่วโมง เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับดินขาวทั้ง 3 แหล่ง เมื่อพิจารณาจากค่ากำลังอัดและค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้า ซึ่งมีค่า 131, 115 และ 100 ตามลำดับ

ปฏิกิริยาปอชโซลานิกของดินขาว (Pozzolan Reaction of Metakaolin)

ปฏิกิริยาปอชโซลานิกเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในดินขาว ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต

Murat (1983) ได้เสนอสมการของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาว ที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนด้วยการเผาโดยใช้ถ่านกัมมันต์อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ และบ่มตัวอย่างในห้องบ่มควบคุมอุณหภูมิที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-90 วัน ผลการตรวจสอบตัวอย่างด้วย X-Ray Diffraction (XRD) และ Differential Thermal Analysis (DTA) แสดงให้เห็นว่ามีสารประกอบ C_4AH_{13} , C_3AH_6 , C_2ASH_8 และ CSH เกิดขึ้น โดยชนิดของสารประกอบจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตั้งต้น โดยสมการแสดงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีดังนี้



ปฏิกิริยาปอซโซลานิกลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในคอนกรีตลงและเพิ่มสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น คุณสมบัติด้านกำลัง การซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทานต่อสารเคมี เป็นต้น

Wild and Khatib (1997) ตรวจสอบปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธี Thermogravimetric Analysis (TG) ในซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวที่ระดับร้อยละ 0-15 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 0.55 เปรียบเทียบกำลังอัดกับซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุการบ่ม 3-365 วัน พบว่าภายในช่วงการบ่ม 7 วัน ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่ผสมดินขาวจะมีแนวโน้มลดลง และมีปริมาณต่ำสุดที่อายุการบ่ม 14 วัน โดยมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 7 วันแรก และสูงสุดที่อายุการบ่ม 14 วัน และค่อย ๆ ลดลงซึ่งอธิบายได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกดึงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากระบบจะเกิดขึ้นสูงสุดที่อายุการบ่ม 14 วัน ทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิ

เกิดไฮเดรตและแคลเซียมอลูมินไฮเดรตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าดีขึ้นและมีข้อแนะนำว่าปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวสูงกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนักสามารถใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยาจนหมดซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kostuch (1993) และ Oriol and Pera (1995) ที่พบว่าปริมาณดินขาวที่ใช้ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดอยู่ในช่วงระดับการแทนที่ร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก โดยปริมาณที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของดินขาว พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 0.50 ดินขาวสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดภายในระยะเวลา 28 วัน (Oriol and Pera, 1995)

ความละเอียดของดินขาวมีผลต่อกำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเช่นเดียวกันกับสารปอซโซลานประเภทอื่น โดยเฉพาะกำลังอัดในช่วงเริ่มต้น แต่ในระยะยาวไม่เห็นผลแตกต่างที่ชัดเจน เมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวเพิ่มขึ้นจาก 12,000 ตร.ซม./ก. เป็น 15,000 ตร.ซม./ก. จะมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเร็วขึ้นและค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวในช่วงเริ่มต้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่กำลังอัดในระยะยาว 90 วัน ไม่แสดงผลชัดเจน Wild *et al.* (1997) และคณะของ Curico *et al.* (1998) ศึกษาผลกระทบขององค์ประกอบทางเคมีและความละเอียดของดินขาว 4 ชนิด ต่อค่ากำลังอัดของมอร์ต้าโดยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าผสมซิลิกาฟูมในปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากัน พบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวที่มีความละเอียดสูงมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุ 7-28 วันแรก เร็วกว่ามอร์ต้าผสมดินขาวที่มีความละเอียดต่ำและมอร์ต้าผสมซิลิกาฟูม แต่ในระยะยาว 90-180 วัน ค่ากำลังอัดจะมีความแตกต่างกันน้อย ซึ่งสอดคล้องกับรายงานอื่น (Zhang and Malhotra, 1995) และ (Wild *et al.*, 1995-1996) และจากการวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธี Differential Thermal Analysis เทียบกับระยะเวลาการบ่มเพื่อตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก พบว่าดินขาวที่มีความละเอียดสูงมีความไวในการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกับซิลิกาฟูม นอกจากนี้ยังพบว่าดินขาวที่มีความละเอียดสูงยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เร็วขึ้นด้วย

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารปอซโซลานเหล่านั้น เช่น ซิลิกาฟูมจัดเป็นสารปอซโซลานที่มีความไวในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสูง (High Pozzolanic Activity) ทำให้มีความร้อนจากปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่ถ้าวางเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกช้าในช่วงต้น (Low Initial Pozzolanic Activity) จึงให้ผลในทางตรงกันข้าม การเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วอาจมีผลเสียต่อความคงทนของมอร์ต้า

และคอนกรีต เพราะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เช่น การหดตัว การเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro crack) มีรายงานผลการศึกษาเปรียบเทียบการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของมอร์ต้าที่ผสมดินขาว ผสมเถ้าลอย และผสมซิลิกาฟูม (Frias *et al.*, 2000) ที่แสดงว่ามอร์ต้าผสมดินขาวให้ความร้อนใกล้เคียงกับมอร์ต้าผสมซิลิกาฟูม และสูงกว่ามอร์ต้าควบคุม แต่มอร์ต้าผสมซิลิกาฟูมจะเกิดความร้อนสูงสุดเร็วกว่า มอร์ต้าผสมเถ้าลอยให้ความร้อนลดลง และอาจสรุปได้ว่าซิลิกาฟูมและดินขาวจะมีพฤติกรรมการให้ความร้อนใกล้เคียงกัน คือเพิ่มความร้อนให้กับปฏิกิริยา ขณะที่เถ้าลอยมีผลต่อการลดความร้อน และโดยทั่วไปดินขาวมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่ำกว่าซิลิกาฟูม แต่จะสูงกว่าเถ้าลอย

Frias and Cabrera (2002) ศึกษาผลของอุณหภูมิการบ่ม 20 และ 60 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาวผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส ในห้องบ่มและบ่มในน้ำซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส โดยห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันน้ำเข้า ใช้สมการทางคณิตศาสตร์คำนวณ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิการบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะสูงกว่าที่อุณหภูมิการบ่ม 20 องศาเซลเซียส ถึง 68 เท่า โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดของทั้งสองอุณหภูมิจะเกิดในช่วงเวลาการบ่ม 120 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะใกล้เคียงกัน และจากการตรวจสอบปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส นอกจากนี้จากการตรวจสอบชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นพบว่าที่อุณหภูมิการบ่ม 20 องศาเซลเซียส จะมีสารประกอบที่เกิดขึ้นคือ CSH, C_2ASH_8 และ C_4AH_{13} แต่ที่อุณหภูมิการบ่ม 60 องศาเซลเซียส จะมีสารประกอบ C_3ASH_6 เกิดเพิ่มขึ้น

ผลกระทบของดินขาวต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าและคอนกรีต

Wild *et al.* (1996) ศึกษาการใช้ดินขาวเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และบ่มตัวอย่างในน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-90 วัน พบว่าดินขาวช่วยเพิ่มกำลังอัดให้กับคอนกรีตทุกระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์และทุกช่วงอายุทดสอบ โดยดินขาวจะทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการคือ ทำหน้าที่เป็นตัวอุดแทรกช่องว่างขนาดเล็ก ซึ่งมีผลทันทีหลังการผสม, เป็นตัวเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันภายใน 24 ชั่วโมงแรก และเป็นสาระสำคัญสำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีอัตราการเกิดสูงสุดในช่วง 7-14 วันแรก และ

พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้กำลังอัดในระยะยาวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

Poon *et al.* (2001) ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเพสต์ผสมดินขาวโดยศึกษาจากการพัฒนากำลังอัด ความพรุน ระดับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Degree of Pozzolanic Reaction) และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมและเพสต์ผสมเถ้าลอย พบว่าที่ระดับการแทนที่เดียวกัน เพสต์ผสมดินขาวมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าเพสต์ผสมซิลิกาฟูมหรือเพสต์ผสมเถ้าลอย จึงทำให้เพสต์ผสมดินขาวมีการพัฒนากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้น 3-7 วัน แต่ในระยะยาว 90 วัน มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน และพบว่าความพรุนของเพสต์ผสมดินขาวมีค่าต่ำกว่าและช่องว่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าทั้งในเพสต์ควบคุมและเพสต์ผสมซิลิกาฟูมที่ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เท่ากันทุกอายุทดสอบ ซึ่งแสดงว่าดินขาวมีประสิทธิภาพสูงกว่าซิลิกาฟูมและเถ้าลอยในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค

Sayamipuk and Nimityongskul (2000) รายงานผลการนำดินขาวดิบจากแหล่งจังหวัดระนองมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยศึกษาการพัฒนากำลังอัดและความคงทนในด้านต่างๆของมอร์ต้า พบว่ามอร์ต้าที่ผสมดินขาวทุกอายุทดสอบให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมทุกระดับการแทนที่ซีเมนต์ และที่ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด และที่อายุการบ่ม 7 วัน มอร์ต้าผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 ที่มีระดับการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ต้าควบคุมที่อายุการบ่ม 90 วัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Wild *et al.*, 1996) ซึ่งอธิบายการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วว่า เป็นผลกระทบของดินขาวในการช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ในช่วงอายุต้นๆ นอกจากนี้ยังพบว่า มอร์ต้าผสมดินขาวมีค่าการซึมผ่านน้ำต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุม โดยมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง และพบว่าดินขาวช่วยให้มอร์ต้ามีความต้านทานการกัดกร่อนของกรดเพิ่มขึ้น และลดการหดตัวของมอร์ต้าอีกด้วย

Sabir (1998) ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานและอุณหภูมิการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว พบว่าการบ่มโดยใช้อุณหภูมิสูงทำให้กำลังอัดในช่วงต้นเพิ่มขึ้นแต่ในช่วงปลายกำลังอัดจะลดลง และยังพบว่า การเติมดินขาวในส่วนผสมคอนกรีตทำให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลงตามปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้น

ปริมาณการแทนที่ด้วยดินขาว และระยะเวลาการบ่มมีผลกระทบต่อความพรุนและการกระจายของช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ Wild and Khatib (1996) พบว่าความพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์ลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของดินขาวและระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น โดยปริมาณของช่องว่างขนาดใหญ่ (รัศมีมากกว่า 20 นาโนเมตร) ลดลง และปริมาณของช่องว่างขนาดเล็ก (รัศมีน้อยกว่า 20 นาโนเมตร) มีจำนวนเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวจะเพิ่มในช่วง 14–28 วัน แต่หลังจากนั้นจะลดลงตามอายุการบ่ม

Frias and Cabrera (2000) ศึกษาผลของดินขาวที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์โดยใช้ดินขาวแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0-25 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 บ่มในน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 1-360 วัน พบว่าความพรุนทั้งหมด (Total Porosity) ลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 1-56 วัน หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มคงที่ โดยในเพสต์ควบคุมจะมีค่าความพรุนทั้งหมดน้อยกว่าเพสต์ผสมดินขาว ในขณะที่ Capillary Pore ในเพสต์ผสมดินขาวมีค่าน้อยกว่าเพสต์ควบคุม ส่วนปริมาณ Gel Pore ในเพสต์ผสมดินขาวจะเพิ่มขึ้นในช่วง 7-90 วัน ในขณะที่ปริมาณในเพสต์ควบคุมจะคงที่ และนักวิจัยได้เสนอว่าปริมาณดินขาวที่เหมาะสมในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของเพสต์ให้มีความพรุนลดลง และลดขนาดโดยเฉลี่ยของรูพรุน (Pore) คือร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก การปรับปรุงขนาดช่องว่างและลดความพรุนของมอร์ต้าและคอนกรีตส่งผลถึงความซึมผ่านได้ของคอนกรีต ดังรายงานของ Saad *et al.* (1997) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และตรวจวัดการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของเพสต์ที่ผสมดินขาว โดยมีปริมาณการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนที่แตกต่างกัน พบว่าดินขาวมีส่วนช่วยลดความพรุน และปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้กับเพสต์เนื่องจากปริมาณสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรตเพิ่มขึ้นจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของเพสต์ลดลง และจากการศึกษานี้ยังพบว่าดินขาวมีผลต่อการยืดเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) ของเพสต์ด้วย

Balaguru (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมดินขาวที่อยู่ในสภาพสดและสภาพที่แข็งตัวแล้ว โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 5 และ 9 โดยน้ำหนัก และบ่มตัวอย่างคอนกรีตใน 2 ลักษณะคือบ่มขึ้น และบ่มในน้ำร้อน พบว่าปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ดังกล่าวไม่มีผลที่ชัดเจนต่อการลดค่ายุบตัวของคอนกรีตที่และปริมาณอากาศในคอนกรีต (Air Content) สำหรับคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว พบว่าดินขาวช่วยพัฒนากำลังอัดให้กับคอนกรีตเร็วมาก ทั้งคอนกรีตปกติและ

คอนกรีตกำลังสูง ซึ่งคอนกรีตคอนกำลังสูงมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และ 15 ส่วนคอนกรีตปกติ เพิ่มขึ้นร้อยละ 20 และ 30 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 ตามลำดับ การบ่มตัวอย่างในน้ำร้อนช่วยให้คอนกรีตที่ผสมดินขาวมีการพัฒนากำลังอัดที่อายุทดสอบ 1 วัน เพิ่มขึ้นเร็วมาก นอกจากนี้ดินขาวยังมีผลทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงเป็นอย่างมาก แต่ช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ให้กับคอนกรีตเพียงเล็กน้อย และไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสการแตกหัก (Modulus of Rupture) ที่ชัดเจน

การดูดซึม การซึมผ่านและการแพร่ผ่าน เป็นช่องทางหลักที่สารซึ่งมีผลต่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเช่น คลอไรด์ ซัลเฟตและกรดชนิดต่างๆเข้าไปทำลายเนื้อคอนกรีตส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ดังรายงานของ Cabrera and Nwauabani (1998) ที่ศึกษาผลของการใช้ดินขาวและเถ้าลอยผสมในซีเมนต์เพสต์โดยวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ไอออน และตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานให้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมอลูมิโนไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ ซึ่งช่วยลดจำนวนปริมาตรรูพรุนทั้งหมดและผลิตรูพรุนที่ขนาดเล็ก ทำให้การแพร่ผ่านของคลอไรด์ไอออนเป็นไปได้ยากขึ้น

เจริญวุฒิ (2546) ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของระยะเวลาการบด ความละเอียดและกำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาว โดยนำดินขาวดิบจากแหล่งดินจังหวัดระนองมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วบดโดยแปรผันระยะเวลาบด 1, 1.5, 2 และ 2.5 ชั่วโมง และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Blaine Specific Surface) อยู่ในช่วง 8,500-11,500 ตร.ซม./ก. และพิจารณาร่วมกับค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวที่มีระดับการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อใช้เวลาในการบดเพิ่มขึ้น ดินขาวจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น ค่ากำลังอัดและกำลังอัดสัมพัทธ์ก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับรายงานอื่น (Wild *et al.*, 1997; Sayamipuk, 2000)

เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะมีผลทำให้ความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาวสูงขึ้น รวมถึงอิทธิพลของการอุดแทรกช่องว่างของอนุภาคดินขาว และเมื่อผันแปรปริมาณการแทนที่ มอร์ต้าผสมดินขาวจะมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุมในช่วงต้น 1-3 วัน แต่ในระยะ 7-28 วัน มอร์ต้าผสมดินขาวมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุม ทุกระดับการแทนที่ และให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งตรงกันกับรายงานของ (Sayamipuk, 2000) อย่างไรก็ตามดินขาวไม่มีผลชัดเจนต่อการเพิ่มการรับแรงดึงและแรงคด แต่เมื่อระดับการแทนที่สูงเกิน

ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้คุณสมบัติดังกล่าวลดลง ส่วนคุณสมบัติในด้านการปรับปรุงการยึดเกาะกับพื้นผิวเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าควบคุมไม่เห็นผลต่างที่ชัดเจน แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงความยาวนานน้อยกว่ามอร์ต้าควบคุมเมื่อบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศปกติ นอกจากนั้นมอร์ต้าผสมดินขาวยังมีระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำมากถึงไม่มีการซึมผ่านเลย เมื่อเทียบกับมอร์ต้าควบคุมซึ่งมีค่าการซึมผ่านอยู่ในระดับสูง

ในการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมดินขาวจากแหล่งดินขาวเดียวกัน (จิรวัดน์, 2546) พบว่า คอนกรีตมีค่าความยุบตัวลดลงและมีอัตราสูญเสียค่ายุบตัวสูงกว่าคอนกรีตควบคุมโดยเฉพาะเมื่อระดับการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากลักษณะอนุภาคของดินขาวที่เป็นแผ่นและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้คอนกรีตผสมดินขาวมีความต้องการน้ำสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ค่ายุบตัวเดียวกัน แต่ดินขาวมีผลดีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพที่แห้งตัว ในด้านการพัฒนากำลังอัด กำลังคด และการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ คอนกรีตที่ผสมดินขาวมีกำลังอัดและกำลังคดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกช่วงอายุทดสอบและที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในช่วงอายุทดสอบที่ 3-56 วัน และพบว่าค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงเมื่อระดับการแทนที่ด้วยดินขาวเพิ่มขึ้นโดยจัดอยู่ในระดับต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับคำแนะนำตามมาตรฐาน ASTM C1202

Batis *et al.* (2004) ศึกษาผลของดินขาวต่อคุณสมบัติด้านความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในมอร์ต้าซึ่งใช้ดินขาวแทนที่ซีเมนต์หรือแทนที่ทรายที่ระดับต่างๆ และแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นเวลา 8 เดือน โดยตรวจสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธีทดสอบศักย์ไฟฟ้า (Half Cell Potential Test) ทุกๆเดือน และวัดน้ำหนักเหล็กที่หายไปจากการกัดกร่อนที่อายุทดสอบ 5 และ 8 เดือน จากการศึกษาพบว่า การใช้ดินขาวแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หรือใช้แทนที่ทรายร้อยละ 20 โดยน้ำหนักจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในมอร์ต้าได้ดีที่สุด แต่เมื่อระดับการแทนที่ซีเมนต์หรือทรายสูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานการเกิดสนิมลดลง

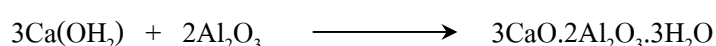
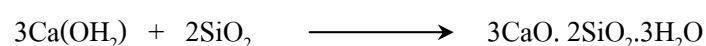
เถ้าลอย

เถ้าลอย มีลักษณะเป็นผงสีเทา เทาดำ หรือน้ำตาล ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานโรงไฟฟ้าถ่านหิน และถูกดักจับเก็บไว้ด้วยอุปกรณ์ดักจับตามขนาดอนุภาคแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานสังเคราะห์ประเภทหนึ่ง มีส่วนประกอบหลักเป็นอันธรูปของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานระหว่างอนุภาค แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและสัมผัสกับความชื้นที่เพียงพอภายใต้อุณหภูมิปกติจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน โดยคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเผาดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยส่วนหนึ่งจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C168 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดยเถ้าลอย Class F มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก โดยทั่วไปได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซด์หรือบิทูมินัส ขณะที่เถ้าลอย Class C มีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก มักได้จากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์หรือซับบิทูมินัส

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาว คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำปฏิกิริยากับสารประกอบหลักคือ ซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ ซึ่งมีในสารปอซโซลานทั้งสองชนิด แต่เนื่องจากเถ้าลอยเป็นสารปอซโซลานที่มีความไวต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกในช่วงต้นต่ำ และมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยจึงช้ากว่าดินขาว และคอนกรีตหรือมอร์ต้าที่ผสมเถ้าลอยจึงมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นต่ำ โดยปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับเถ้าลอย



ผลกระทบของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าและคอนกรีต

การนำเถ้าลอยมาใช้ในการงานคอนกรีตในลักษณะแทนที่ปูนซีเมนต์ (Replacement Method) หรือ ใช้ในลักษณะการผสมเพิ่ม (Addition Method) ส่งผลให้คุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีตเปลี่ยนไปทั้งคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสดและสภาพที่แข็งตัวแล้วซึ่งจะกล่าวเฉพาะคุณสมบัติสำคัญ ๆ ดังนี้

1. ความสามารถในการทำงานได้ (Workability)

เถ้าลอยมักมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในน้ำหนักรที่เท่ากันหรือมากกว่าจะทำให้ปริมาตรโดยรวมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ทำให้สภาพความเป็นพลาสติกและคุณสมบัติการยืดยืดดีขึ้น และจากลักษณะของอนุภาคที่เล็กและกลม เถ้าลอยจึงทำหน้าที่เสมือน Bearing Ball ทำให้การใช้น้ำในคอนกรีตลดลงโดยยังคงค่าความยุบตัวเท่าเดิม ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มความสามารถในการเทได้ให้กับคอนกรีต แต่เถ้าลอยชนิดหยาบที่มีปริมาณคาร์บอนสูงและมีรูพรุนมากหรือบางชนิดที่มีรูปร่างอนุภาคเป็นเหลี่ยมมักต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพื่อให้มีความสามารถในการเทเท่ากัน

2. การเยิ้ม (Bleeding)

การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตช่วยลดการเยิ้ม น้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาตรส่วนละเอียดที่เพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำที่ลดลง นอกจากนี้ส่วนละเอียดที่มีอยู่ในเถ้าลอยยังสามารถช่วยทดแทนปริมาณมวลรวมละเอียดที่อาจมีไม่เพียงพอ และยังช่วยปิดกั้นช่องทางน้ำที่เยิ้มอีกด้วย

3. ความสามารถในการปั๊ม (Pumpability)

เถ้าลอยจะทดแทนมวลรวมละเอียดส่วนที่ขาดไป ทำให้คอนกรีตหรือมอร์ต้ามีการยืดยืดมากขึ้น ลดโอกาสที่จะเกิดการแยกตัว และจากลักษณะที่กลมตันหรือกลวงของอนุภาคเถ้าลอยยังช่วยลดความฝืดระหว่างอนุภาคของมวลรวม และลดความฝืดระหว่างคอนกรีตกับผิวภายในท่อปั๊มจึงทำให้การปั๊มทำได้ง่ายขึ้น

4. ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)

โดยทั่วไปเถ้าลอยจะยืดเวลาการก่อตัวของคอนกรีตออกไปเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนโดยเฉพาะเถ้าลอย Class F ขณะที่ Class C อาจมีหรือไม่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวมากนัก (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2544) ซึ่งมีรายงานการวิจัยว่าเถ้าลอย Class F และ Class C

จะหน่วงปฏิกิริยาไฮดรชันของ C_3S และหากเถ้าลอยมีปริมาณคาร์บอนสูงจะทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะเวลาการก่อตัวจึงเพิ่มขึ้นด้วย

5. กำลังอัดและการพัฒนากำลัง (Compressive Strength)

คอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีกำลังอัดเท่ากับหรือต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุต้นๆ และยังต่ำมากหากใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง ๆ (วรเดช, 2546) เนื่องจากกำลังอัดในช่วงต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยได้มาจากผลของปฏิกิริยาไฮดรชัน เมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสูงขึ้นก็จะทำให้การปฏิกิริยาไฮดรชันลดลง แต่ในระยะยาวคอนกรีตผสมเถ้าลอยอาจมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเท่ากับหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิก

6. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม (Bond Strength Between Concrete and Reinforcement)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวเหล็กที่สัมผัสคอนกรีต ตำแหน่งของเหล็กเสริมและความหนาแน่นของคอนกรีต การใช้เถ้าลอยมีผลในการเพิ่มปริมาณเพสต์และลดการเยิ้ม ดังนั้นในบริเวณผิวด้านล่างของเหล็กซึ่งเป็นบริเวณที่มักมีการสะสมของน้ำเยิ้มจะมีผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดการเยิ้มน้ำลงจึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น

7. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ (Bond Strength of Old-to-New Concrete Concrete)

มีรายงานว่าในระยะยาว (1-3 ปี) เถ้าลอยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ให้ดีขึ้น แต่ไม่เป็นผลดีในระยะสั้น (28 วัน) ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต (Gengying, 2003)

8. ความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion Resistance)

ปัจจัยสำคัญที่ควบคุมความทนทานต่อแรงขัดสีของคอนกรีตได้แก่ กำลังอัด การบ่ม คุณสมบัติของมวลรวม การตกแต่งผิว และวิธีการทดสอบ (Tarun *et al.*, 2002) รายงานว่าคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูงจะมีค่าความทนทานการขัดสีสูง และแนะนำว่าความทนทานต่อแรงขัดสีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์สูงกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C944

9. การซึมผ่านน้ำ (Water Permeability)

เกลือยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ทำให้กำลังแก่คอนกรีต และจากการอุดแทรกช่องว่างของอนุภาคเกลือยทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเกลือยจึงมีการซึมผ่านน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

10. การซึมผ่านของคลอไรด์ (Chloride Permeability)

คลอไรด์ไอออนในคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายของฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ที่เคลือบผิวเหล็กเสริมซึ่งมีผลต่อการป้องกันการเกิดสนิม (Nevill, 1996) การผสมเกลือยในคอนกรีตมีผลทำคอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้นช่องว่าง Capillary มีขนาดเล็กลงมีผลทำให้การซึมผ่านหรือแพร่ผ่านของคลอไรด์ไอออนลดลง

การศึกษาการประยุกต์ใช้เกลือยจากแหล่งในประเทศในงานก่อสร้างเริ่มต้นมาตั้งแต่ พ.ศ. 2523 โดยประจิต (2523) ได้ศึกษาค่าความชื้นเหลว เวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และการขยายตัวในสภาวะที่อบไอน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเกลือยจากโรงไฟฟ้าบางกรวย โดยใช้เกลือยผสมในปริมาณร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความชื้นเหลว เวลาการก่อตัว และการขยายตัวในสภาวะที่อบไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงที่อายุเริ่มต้นจะลดลงเมื่อจำนวนเกลือยที่ใช้ผสมเพิ่มขึ้น แต่ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเกลือยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเกลือย

สำหรับคอนกรีตที่ผสมเกลือย ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นช้า ดังนั้นการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นการผสมเกลือยในคอนกรีตจึงช่วยลดความต้องการปริมาณน้ำทำให้สามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเพื่อชดเชยการพัฒนากำลังในช่วงต้นของคอนกรีต (ประจิต, 2523; สมชัย, 2542) เช่นเดียวกันกับรายงานการวิจัยของ ปริญญาและอิทธิชัย (2528) ที่รายงานว่ากำลังอัดระยะแรกของปูนซีเมนต์ผสมเกลือยลิกไนต์มีค่าลดลงตามปริมาณของเกลือยที่เพิ่มขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิกยังไม่เกิดขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเกลือยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และมีข้อเสนอแนะให้ใช้ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเกลือยที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเกลือยแทนที่ได้

กำลังรับแรงอัดคอนกรีตจะสัมพันธ์กับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าลอย และระยะเวลาการบ่ม ดังรายงานการวิจัยของ ศุภกิจและสิทธิพร (2536) ที่ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะ พบว่าปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่ทำให้กำลังสูงสุดคือร้อยละ 10-30 และร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก สำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มียุ่กำลังรับแรงอัดที่ 210 กก./ตร.ซม. และ 250 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่มีอายุการบ่มมากกว่า 28 วัน จะให้กำลังมากกว่าที่กำหนดทุกตัวอย่างทดสอบ

กรกฎ (2530) ศึกษาการใช้เถ้าลอยแม่เมาะเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด พบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากลักษณะอนุภาคที่กลมของเถ้าที่ทำหน้าที่เสมือน Bearing Ball ที่เพิ่มความสามารถในการเทได้ และเติมประสานช่องว่างคอนกรีต ป้องกันการซึม นากจากนี้อนุภาคเถ้าลอยขนาดเล็กยังสามารถอุดซบบนผิวอนุภาคซีเมนต์ ช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคซีเมนต์ ทำให้ปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกัก (Entrapped Water) โดยซีเมนต์ลดลง ทำให้มีปริมาณน้ำในการหล่อลื่นมากขึ้น ความต้องการน้ำจึงลดลง แต่เมื่อเถ้าลอยมีปริมาณที่มากเกินไป (มากกว่าร้อยละ 20) ความสามารถในการลดน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก (Helmuth, 1987)

นอกจากนี้การออกแบบส่วนผสมโดยการนำเถ้าลอยซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าซีเมนต์ และทรายมาใช้ในลักษณะแทนที่โดยน้ำหนัก ยังส่งผลทำให้ปริมาตรของเพสต์เพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถในการเทและความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความสามารถในการเทได้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ มีรายงานว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงกว่าร้อยละ 10 และมีขนาดอนุภาคใหญ่เป็นเหลี่ยมมุม จะลดความสามารถเทได้ (CUR, 1991; ACI 226 , 1987) นอกจากนี้อนุภาคคาร์บอนบนผิวเถ้าลอยยังอุดซบสารกักกระจายฟองอากาศ (Gao *et al.*, 1997) ทำให้ปริมาณฟองอากาศลดลงด้วย

มีรายงานการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 1 ปี เพิ่มขึ้นจากกำลังอัดที่อายุ 28 วันถึง ร้อยละ 50 ขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 30 เท่านั้น และนักวิจัยแนะนำว่าควรใช้เถ้าลอยที่คัดขนาดและมีความละเอียดสูง แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงสุด (ธีรราช และ ชัย, 2542)

มนตรี (2542) รายงานผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและขนาดอนุภาคของเถ้าลอยภายในประเทศต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตในด้านการซึมผ่านของคลอไรด์ โดยใช้เถ้าลอยคละขนาด และคัดขนาดจากโรงงาน และบ่มที่อุณหภูมิห้อง 40 และ 60 องศาเซลเซียส แปรผันระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 3 ระดับ คือร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และที่ระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก คอนกรีตจะมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดสำหรับเถ้าลอยทุกชนิดและทุกอายุการบ่ม

Wongjeeraphat (2002) ศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากแม่เมาะ โดยแช่ตัวอย่างทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นระยะเวลา 1, 3 และ 9 เดือน ทำการพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (Silvernitrate) 0.1N เพื่อวัดระยะซึมลึกของคลอไรด์และเจาะเก็บผงมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ พบว่าเถ้าลอยสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ และการเพิ่มปริมาณการแทนที่ช่วยลดระดับความลึกของการซึมผ่านได้ โดยแนะนำปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก และยังพบว่าผลกระทบจากปริมาณการแทนที่ซีเมนต์มีความสำคัญต่อการลดการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าผลกระทบจากการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

สุวิมล และ ประเสริฐ (2545) ศึกษาผลกระทบของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีต่อความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ทำการศึกษากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนัก และแช่ก้อนตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% และในน้ำทะเลเล็งเคราะห์ที่จำลองสภาวะน้ำขึ้นและน้ำลง จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้เพิ่มขึ้น และยังพบว่าคอนกรีตผสมของเถ้าลอยที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีการแทรกซึมเร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เล็กน้อย

วรเดช (2546) ศึกษาการซึมผ่านได้ของคลอไรด์และความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง โดยแทนที่ตั้งแต่ระดับร้อยละ 0-65 โดยน้ำหนัก พบว่าการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงเมื่อระดับปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีการซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ในระดับต่ำมาก ส่วนคอนกรีตควบคุมมีการซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ระดับปานกลางถึงสูงมาก ในด้านความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริม พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยใน

ปริมาณสูงให้ความน่าจะเป็นของการเกิดการกัดกร่อนต่ำสุด ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 50 และ 65 โดยน้ำหนัก ให้ผลแตกต่างกันไม่ชัดเจน และระดับการแทนที่ร้อยละ 35 เปอร์เซนต์ ให้ความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนอยู่ในช่วงกลางถึงต่ำ ส่วนคอนกรีตควบคุมจะเกิดสนิมในเหล็กเสริมอย่างรุนแรง

คุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในงานซ่อมโดยเฉพาะในกรณีของการซ่อมแซมผิวจราจร คือ คุณสมบัติในด้านความต้านทานการขัดสี ซึ่งปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อค่าความต้านทานการขัดสีของคอนกรีต ได้แก่ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวคอนกรีต คุณสมบัติของมวลรวม วิธีการตกแต่งผิว และวิธีการทดสอบ (Witte and Backstrom, 1951; Cabrera, 1985; Hadchti and Carrasquillo, 1988; Sadegzadeh *et al.*, 1987; Gjorv *et al.*, 1990 ; ACI 1992; Mehta and Monteiro, 1993; Naik *et al.*, 1994)

มีรายงานการวิจัยจำนวนมากที่แสดงว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีการพัฒนาคุณสมบัติด้านนี้ได้ดีขึ้นในบางกรณีดังต่อไปนี้

Tarun *et al.* (1944) ศึกษาความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C944 โดยใช้เถ้าลอย Class C แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนัก พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้งสองระดับมีค่าความต้านทานการขัดสีต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ต่อมาในปี ค.ศ. 2002 นักวิจัยกลุ่มเดิมได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณและแหล่งผลิตเถ้าลอยต่อค่าความต้านทานการขัดสี โดยใช้เถ้าลอย Class C จากแหล่งที่ต่างกัน 3 แหล่ง แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก และทดสอบที่อายุ 28, 91 และ 365 วัน พบว่าค่าความต้านทานการขัดสีเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานการขัดสีมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก คอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีค่าความต้านทานการขัดสีใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม (Tarun *et al.*, 2002) อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยหลายชิ้นที่ให้ผลแตกต่างจากงานวิจัยข้างต้นเมื่อพิจารณาจากปัจจัยอื่น ๆ ประกอบ

Cengiz Duran Atis (2002) ศึกษาความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตตามมาตรฐาน BSI 1993 ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูง โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนัก พบว่าความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง (> 40 Mpa) แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความต้านทานการขัดสีสูงกว่าที่ระดับร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

Rafat Siddique (2003) ศึกษาความต้านทานการกัดสีของคอนกรีตผสมเถ้าลอย มาตรฐาน IS 1237 โดยใช้เถ้าลอย Class F แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก และบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 0-365 วัน พบว่ากำลังอัดและความต้านทานการกัดสีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าลอยและอายุการบ่มเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีระดับการแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานการกัดสีสูงกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 40

การใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอย

จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้ดินขาว หรือเถ้าลอยเป็นสารปอชโซลานในงานคอนกรีตมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน ดังนั้นการใช้ดินขาวและเถ้าลอยร่วมกันจึงมีแนวโน้มที่จะช่วยปรับปรุงจุดเด่นและจุดด้อยของวัสดุแต่ละชนิด เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในด้านต่างๆ ดียิ่งขึ้นซึ่งเป็นแนวทางในงานวิจัยนี้โดยใช้ดินขาวและเถ้าลอยที่ผ่านการบดแยกและบดรวมกัน แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการบดในแต่ละลักษณะ ทั้งนี้มีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการบดวัสดุปอชโซลานร่วมกับปูนซีเมนต์ ที่แสดงว่าการบดรวมกันช่วยเพิ่มมวลละเอียดและพื้นที่ผิวจำเพาะให้วัสดุดีกว่า ซึ่งส่งผลต่อการเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอชโซลานิก ช่วยให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นและช่วงปลายดีขึ้น ช่วยอุดช่องว่างขนาดเล็กลดขนาดของรูพรุนและปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค ทำให้คอนกรีตมีความซึมผ่านต่ำและกำลังอัดดีขึ้น (Paya *et al.*, 1995; Jaturapitakkul, 1996; Justnes *et al.*, 2004)

เนื่องจากงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยในงานคอนกรีตยังมีจำกัดดังนั้นจึงนำรายงานการวิจัยที่ใช้วัสดุปอชโซลานชนิดอื่นๆรวมอยู่ด้วย เพื่อใช้อ้างอิงและเป็นแนวทางในการศึกษาดังต่อไปนี้

Bai *et al.* (1999) ศึกษาถึงผลกระทบของดินขาวผสมเถ้าลอยต่อความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต โดยทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test), สัดส่วนการอัดแน่น (Compacting Factor) และทดสอบวีบี (Vebe Test) โดยใช้คอนกรีตที่มีระดับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวผสมเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และแปรผันปริมาณดินขาวร้อยละ 0-15 ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 0-40 ในส่วนผสมดินขาวกับเถ้าลอย พบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะอนุภาคของดินขาวที่มีลักษณะเป็นแผ่นมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจึงทำให้ต้องการปริมาณน้ำมาก แต่อาจแก้ไขปัญหการสูญเสียความ

สามารถในการทำงานได้โดยเติมเถ้าลอยลงในส่วนผสม โดยมีปัจจัยที่สำคัญได้แก่ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ของดินขาวผสมเถ้าลอย อัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอย และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และนักวิจัยกลุ่มเดิม (Bai *et al.*, 2000) รายงานผลกระทบจากการผันแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 3 ดัชนีคือ 0.40, 0.50 และ 0.60 ว่าคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่ำ และมีอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยสูงจะมีกำลังอัดในช่วงต้นสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์สูง และมีอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยต่ำจะให้กำลังอัดในช่วงปลายสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และสรุปว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของดินขาวจะพัฒนากำลังรับแรงอัดได้เร็วในช่วงแรกถึงช่วงกลาง (7-28 วัน) ส่วนคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงปลาย (90 วัน) และการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตจะช่วยให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่องตลอดทุกช่วงอายุทดสอบ และพบว่าที่ระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวและเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณของดินขาวและเถ้าลอยร้อยละ 7.5 และ 2.5 ตามลำดับ จะให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงสุดในทุกช่วงอายุทดสอบ

ในปี 2003 นักวิจัยกลุ่มเดิม (Bai *et al.*, 2003) ศึกษาการสูญเสียกำลังอัดและตรวจสอบค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยและดินขาว เมื่อแช่ตัวอย่างในน้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าดินขาวและเถ้าลอยช่วยลดระดับความลึกของการซึมผ่านคลอไรด์เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนโดยระดับความลึกจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น และจากการผันแปรอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้น ระดับความลึกของการซึมผ่านคลอไรด์และค่าความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงในช่วงต้นของอายุทดสอบ 2 และ 6 เดือน และเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ระดับความลึกของการซึมผ่านคลอไรด์และค่าความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงเช่นกัน เมื่อทดสอบตัวอย่างในช่วงอายุ 18 เดือน เมื่อพิจารณาการสูญเสียกำลังอัดพบว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม หรือคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว

มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อนที่เพิ่มขึ้นในมอร์ต้าหรือคอนกรีตที่ผสมดินขาวมากกว่าส่วนผสมปกติ ซึ่งอาจนำปัญหาการแตกร้าวในงานคอนกรีตได้ จากรายงานของ Bai and Wild (2002) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความร้อนในมอร์ต้าที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย พบว่าเถ้าลอยช่วยลดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในมอร์ต้าผสมดินขาว จากการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในมอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณดินขาวและ

เถาวัลย์ระยะ 10 และ 10 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับมอร์ต้าควม และพบว่าดินขาวผสมเถาวัลย์ทำให้การเกิดอุณหภูมิสูงสุดของมอร์ต้าคายออกไปด้วย

Bai *et al.* (2002) ศึกษาการพัฒนากำลังอัด การเกิดคาร์บอนเนชั่น (Carbonation) และการเปลี่ยนแปลงการดูดซึมน้ำ (Sorptivity) ของคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถาวัลย์ ที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศ พบว่าดินขาวมีผลเชิงบวกในการพัฒนากำลังอัดในช่วง 28 วันแรก ส่วนเถาวัลย์จะหน่วงการพัฒนากำลังอัดในช่วงดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลจากการบ่มพบว่า การบ่มคอนกรีตในอากาศให้กำลังอัดต่ำกว่าการบ่มในน้ำ และความแตกต่างจะยิ่งมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะคอนกรีตที่ผสมเถาวัลย์ การบ่มในอากาศจะให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าการบ่มน้ำเป็นอย่างมาก สำหรับคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถาวัลย์พบว่าความแตกต่างระหว่างกำลังอัดที่บ่มในอากาศ และในน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณดินขาวในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมดินขาวและเถาวัลย์มีค่าต่ำกว่าการดูดซึมของคอนกรีตควบคุม เมื่อบ่มในน้ำคอนกรีตที่ผสมเถาวัลย์อย่างเดียวมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และการบ่มในอากาศทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น การตรวจสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นพบว่าคอนกรีตผสมเถาวัลย์มีระดับความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถาวัลย์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น แต่ในคอนกรีตผสมดินขาวและเถาวัลย์ร่วมกันพบว่าระดับความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่นจะลดลงเมื่อปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้น

Vu and Stroven (2002) ได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดและกำลังคดของมอร์ต้าและคอนกรีตผสมดินขาวร่วมกับเถาวัลย์ โดยมีอัตราส่วนของดินขาวต่อเถาวัลย์ 70/30, 50/50 และ 30/70 และใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมมอร์ต้าจะควบคุมค่าการไหลแผ่ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 โดยวิธีแปรผันปริมาณน้ำ และส่วนผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน 0.61 และใช้สารลดน้ำจำนวนมากเพื่อควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 30-50 มม. จากการศึกษาพบว่าดินขาวและเถาวัลย์ช่วยปรับปรุงกำลังอัดและกำลังคดของมอร์ต้า โดยเฉพาะที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถาวัลย์ต่ำๆ และได้แนะนำว่าที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถาวัลย์ 50/50 จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงด้านกำลังอัด โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก จะช่วยปรับปรุงกำลังอัดและกำลังคดของมอร์ต้าให้ดีขึ้นทุกอัตราส่วนดินขาวต่อเถาวัลย์ของทุกอายุทดสอบ และที่อายุทดสอบ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวร่วมกับเถาวัลย์จะสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเฉพาะดินขาวและยังแนะนำว่าใช้ดินขาวร่วมกับเถาวัลย์ให้ประสิทธิภาพสูงมากในการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตในระยะยาว 180 วัน

การใช้อุณหภูมิสูงเร่งการบ่มสำหรับงานคอนกรีตแข็งตัวเร็ว ส่งผลให้คอนกรีตมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง ซึ่ง Hooton and Titherington (2004) ได้ศึกษาผลกระทบของการใช้ซิลิกาฟุ่มร่วมกับกากจากการถลุงเหล็ก (Ground Granulate Blast-furnace Slag) ต่อค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตแข็งตัวเร็วเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยบ่มที่อุณหภูมิ 23 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงเมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และซิลิกาฟุ่มมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตควบคุมแม้จะบ่มที่อุณหภูมิสูง และการใช้ซิลิกาฟุ่มร่วมกับกากจากการถลุงเหล็กทำให้คอนกรีตมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงสุด นอกจากนี้การใช้กากจากการถลุงเหล็กในส่วนผสมยังช่วยให้การเทเข้าแบบและตกแต่งผิวทำได้สะดวกกว่าคอนกรีตที่ผสมเฉพาะซิลิกาฟุ่มเพียงอย่างเดียว

Thomas *et al.* (1999) ได้รวบรวมและรายงานการวิจัยเกี่ยวกับผลของการใช้ซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ พบว่าคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยในส่วนผสมจะมีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในช่วงต้น จนถึงช่วงปลายของอายุทดสอบและเมื่อเปรียบเทียบกับ คอนกรีตที่ผสมเฉพาะซิลิกาฟุ่มมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยล้วนในช่วงต้นของอายุทดสอบแต่ในระยะยาวไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน ส่วนในคอนกรีตที่ผสมทั้งซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยค่าการซึมผ่านคลอไรด์จะลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดอายุทดสอบและมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเฉพาะซิลิกาฟุ่มหรือเถ้าลอย

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงว่าการใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอยมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆทั้งในด้านกำลังและความทนทานของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ดินขาวช่วยให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นให้ดีขึ้น ส่วนเถ้าลอยช่วยพัฒนากำลังอัดในช่วงกลางและปลาย ในด้านความทนทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ พบว่าระดับความลึกของการซึมขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยและระยะเวลาการบ่ม โดยระดับความลึกของการซึมในช่วงต้นของอายุทดสอบ (2-6 เดือน) จะลดลงเมื่อปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้น ส่วนในระยะยาว (18 เดือน) ระดับความลึกของการซึมจะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการใช้ดินขาวเพียงอย่างเดียวมีผลต่ออุณหภูมิและความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งหากมีค่าสูงเกินไปอาจนำไปสู่ปัญหาการแตกร้าวในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ได้ ดังนั้นการใช้เถ้าลอยในส่วนผสมจะช่วยลดอุณหภูมิและความร้อนลงได้ แต่การใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอยงานคอนกรีตยังต้องพัฒนาและวิจัยในด้านอื่นๆต่อไป เพื่อให้การใช้ทรัพยากรธรรมชาติเกิดประโยชน์และคุ้มค่ามากที่สุด