บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงวัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาปอซโซลาน และงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและเถ้าถ่านหิน

2.1 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ตามมาตรฐานASTM C618 (American Society for Testing and Materials, 2001) หมายถึงวัสดุที่ประกอบไปด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือของซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่เมื่อมีความละเอียดและความชื้นเพียงพอวัสดุปอซโซลานจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ จึงมักนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่า เราเรียกปฏิกิริยาที่เกิดนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ วัสดุปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) เช่น เถ้าภูเขาไฟ หินภูเขาไฟ และวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolan) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟูม เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เป็นต้น

2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานเป็นสารผสมเพิ่มชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตในรูปของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์เพื่อให้คอนกรีตมีสมบัติบางประการที่ดีขึ้น เช่น ปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตสดให้ทำงานง่ายขึ้น เพิ่มความทนทานต่อสภาพการกัดกร่อนจากสิ่งแวดล้อม ลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตให้มีราคาถูกลง วัสดุปอซโซลานเมื่อนำไปผสมในคอนกรีต ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) โดยอัตราการเกิดของปฏิกิริยาจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จึงถูกนำมาใช้กับงานคอนกรีตขนาดใหญ่เพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอันจะส่งผลเสียหายต่อโครงสร้างคอนกรีตได้

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ผลที่ได้คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$ หรือ CSH) ซึ่งเป็นสารที่แข็งแรงและเป็นองค์ประกอบหลักที่ช่วยเพิ่มกำลังให้กับคอนกรีตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่าง ดังแสดงในสมการที่ (2.1) และ (2.2)

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

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2.2)$$

ปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาในสมการที่ (2.1) และ (2.2) เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน ผลที่ได้คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลัง ดังแสดงในสมการที่ (2.3) และ (2.4)

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \longrightarrow xCaO.ySiO_2.zH_2O \quad (2.3)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow xCaO.yAl_2O_3.zH_2O \quad (2.4)$$

ค่า x, y และ z ในสมการที่ (2.3) และ (2.4) เป็นค่าที่แปรผันไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน สารประกอบ CSH และ CAH นอกจากจะช่วยเพิ่มกำลังให้กับคอนกรีตแล้วยังช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นด้วย (Fraay และคณะ, 1989)

2.3 เถ้าถ่านหิน

เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C618 (2008) แบ่งเถ้าถ่านหินตามองค์ประกอบทางเคมีออกเป็น 2 ประเภทคือ Class F และ Class C โดยที่ผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีค่ามากกว่าร้อยละ 70 จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F และมักมีค่าแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำกว่าร้อยละ 5 ส่วนใหญ่ได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซด์ และหากผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class C และมักมีค่าแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่าร้อยละ 10 ส่วนใหญ่ได้จากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์ ปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าถ่านหินเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตอย่างต่อเนื่องทั้งในประเทศและต่างประเทศ

เศกสรรค์ ชูทับทิม และคณะ (2542) ศึกษาเปรียบเทียบศักยภาพของเถ้าถ่านหินจาก 5 แหล่งผลิตในประเทศไทย พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างกลมตันเป็นส่วนผสม ช่วยให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตมีปริมาณลดลง และเพิ่มความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต ขณะที่การใช้เถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างไม่แน่นอนและมีรูพรุน ทำให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำสูงขึ้น การบดเพิ่มความ

ละเอียดให้แก่เถ้าถ่านหินช่วยให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความละเอียดมีผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตมากกว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินสอดคล้องกับ Angsuwattana และคณะ (1998) ใช้เถ้าถ่านหินจาก อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง เพื่อทำคอนกรีตกำลังสูง พบว่าการแยกขนาดจนมีความละเอียดสูง (ขนาดอนุภาค 2.8 ไมครอน) สามารถนำมาทำคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยมีกำลังอัดใกล้เคียงหรือสูงกว่าและมีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องแม้คอนกรีตจะมีอายุที่มากขึ้น

Kiattikomol และคณะ (2001) ศึกษาผลกระทบจากการใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดที่มีความละเอียดต่างกันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ในมอร์ต้าร์ พบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากขึ้นเป็นส่วนผสม ส่วนการศึกษาของ Paya และคณะ (1995) ที่ได้เปรียบเทียบการพัฒนากำลังอัดระยะกลางและระยะปลายของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่บดและเถ้าถ่านหินบดละเอียด พบว่าอัตราส่วนประสิทธิผลของปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดเป็นส่วนผสมมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินไม่บดเป็นส่วนผสม แสดงว่าความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน

Songpiriyakij และ Jaturapitakkul (2001) ศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด พบว่าเถ้าถ่านที่มีความละเอียดสูงสุดให้กำลังอัดเร็วกว่าเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ โดยให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์เทียบเท่ากับมอร์ต้าร์มาตรฐานที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินที่อายุ 28 วัน และยังสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 25 ส่วน Sata และคณะ (2004) พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินจาก อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตกำลังสูงร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน คอนกรีตมีกำลังอัดอยู่ในช่วง 679 ถึง 915 กก/ซม^2

Kou และคณะ (2007) ได้ศึกษาผลกระทบของการนำเถ้าถ่านหินบดแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต งานวิจัยนี้พยายามแก้ไขจุดบกพร่องของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50 และ 0.55 มวลรวมจากเศษคอนกรีตร้อยละ 0, 20, 50, และ 100 โดยน้ำหนักหินปูน และเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 25, และ 35 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัด ความต้านทานแรงดึง และโมดูลัสความยืดหยุ่นในทุกช่วงอายุของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีปริมาณมากขึ้น การเพิ่มปริมาณมวลรวมจากเศษคอนกรีตทำให้การแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ การหดตัวแบบแห้งและความคืบมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าถ่านหินบดแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ให้สามารถต้านทานได้มากขึ้น ลดการหดตัวแบบแห้งและความคืบของคอนกรีต

แสดงให้เห็นว่าสามารถนำเศษคอนกรีตเก่ากลับมาใช้กับงานโครงสร้างคอนกรีตได้โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยและใช้เถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมร้อยละ 25 ถึง 35

2.4 การใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในงานคอนกรีต

เศษคอนกรีต หมายถึงคอนกรีตที่เหลือทิ้งใช้การไม่ได้หรือไม่ต้องการใช้จากการก่อสร้างหรือจากการรื้อถอนอาคารเก่าก่อให้เกิดขยะจากเศษคอนกรีต ปัจจุบันได้มีการนำเอาเศษคอนกรีตมาย่อยเพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมในงานคอนกรีต เช่น พิชัย นิมิตยงสกุล และ สรรค์ สยามิภักดิ์ (2538) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตมาแทนที่มวลรวมหยาบ พบว่าคุณสมบัติทางด้านกำลังอัดมีค่าลดลง คอนกรีตเกิดการหดตัวสูงขึ้นและการใช้เศษคอนกรีตมาแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีความเป็นเหลี่ยมมุมสูง การกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอรอบผิวของมวลรวมมีซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์จากเศษคอนกรีตเดิมยึดเกาะอยู่ มีช่องว่างระหว่างมวลรวมสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติส่งผลให้มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีปริมาณการดูดซึมน้ำที่สูงมากขึ้น ขณะที่หน่วยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ และความต้านทานการสึกกร่อนมีค่าต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ

Hansen และ Narud (1983) ศึกษาผลกระทบจากการใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากเศษคอนกรีตที่มีกำลังแตกต่างกัน 3 ระดับแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ พบว่าคอนกรีตสดมีความสามารถในการเทลดลงและสูญเสียค่าการยุบตัวอย่างรวดเร็ว ขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังอัดของเศษคอนกรีตที่นำมาใช้แทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ โดยกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tavakoli และ Soroushian (1996) ที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตที่รื้อมาจากสถานที่จริงมาย่อยใช้แทนมวลรวมจากธรรมชาติ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตดังกล่าวขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น กำลังอัด อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าการต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตเดิมที่นำมาใช้

Hansen และ Boegh (1985) ศึกษาผลกระทบจากการใช้มวลรวมที่ได้จากเศษคอนกรีตที่มีต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นทั้งแบบพลศาสตร์และแบบสถิตของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติร้อยละ 15 ถึง 30 และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้น ต่อมา Hansen (1990) ได้ทำคอนกรีตจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทั้งหมดโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ วัสดุประสานที่ใช้คือ

เถ้าถ่านหินผสมรวมกับมวลรวมจากเศษคอนกรีต อาศัยหลักการทำปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากซีเมนต์เพสต์จากเศษคอนกรีตเดิม พบว่ากำลังอัดมีการพัฒนาที่ช้าและมีค่าต่ำ

Ajdukiewicz และ Kliszczewicz (2002) ศึกษาโดยนำคอนกรีตที่รื้อถอนจากสถานที่จริงแตกต่างกัน 6 แห่ง และมีกำลังอัดอยู่ในช่วง 35 ถึง 70 เมกะปาสคาล มาย่อยเพื่อใช้เป็นมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบสำหรับทำคอนกรีตกำลังสูง พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตดังกล่าวมีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 80 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน ซึ่งสูงกว่ากำลังอัดของเศษคอนกรีตเดิมที่นำมาย่อยเป็นมวลรวม

รักษ์ บูรณสิงห์ (2547) ได้ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตเมื่อใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำและหินปูนย่อย พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าถ่านหินไม่เกินร้อยละ 35 รวมกับทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 60 วัน ทางด้าน Hansen (1992) พบว่าการแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติด้วยมวลรวมจากเศษคอนกรีตถึงร้อยละ 30 ไม่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยยะสำคัญ

Malesev และคณะ (2010) ศึกษาโดยใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติในการผลิตโครงสร้างคอนกรีตในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติโครงสร้างคอนกรีตจากผลการทดสอบคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยมวลรวมจากเศษคอนกรีตได้มาจากก้อนคอนกรีตทดสอบในห้องปฏิบัติการและเสาคอนกรีตอัดแรง แบ่งส่วนผสมเป็นคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและหินปูนย่อยเป็นคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยร้อยละ 50 และ 100 เพื่อหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่าปริมาณของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตไม่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีต อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้ได้นำมวลรวมจากเศษคอนกรีตมาจากโครงสร้างคอนกรีตที่ไม่ทราบค่ากำลังอัดที่แน่ชัดแสดงว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตไม่ได้ขึ้นกับปริมาณของมวลรวมจากเศษคอนกรีตแต่ขึ้นอยู่กับคุณภาพของมวลรวมจากเศษคอนกรีตมากกว่าซึ่งขัดแย้งกับ Poon และคณะ (2004) ที่พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของมวลรวมจากเศษคอนกรีตมากขึ้นและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสี พบว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีมากที่สุดมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและ

มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนร้อยละ 50 และยังพบว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีน้อยสุด แสดงว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีขึ้นอยู่กับปริมาณของมวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยมีค่าน้อยลงเมื่อมีปริมาณมวลรวมจากเศษคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของซีเมนต์เพสต์ที่เกาะรอบผิวมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตสามารถถูกขัดสีออกได้ง่ายกว่าอนุภาคของหินปูนย่อย ส่วนผลทดสอบการหดตัวแบบแห้งของแท่งคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนร้อยละ 50 มีการหดตัวแบบแห้งเท่ากับ 300×10^{-6} มม./มม. มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 ของคอนกรีตควบคุม ขณะที่คอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีการหดตัวแบบแห้งเท่ากับ 400×10^{-6} มม./มม. ซึ่งเท่ากับร้อยละ 20 ของคอนกรีตควบคุม

Chisholm (2011) เขียนคู่มือเกี่ยวกับการนำมวลรวมจากเศษคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่พบว่าที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตโดยทั่วไปจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากทรายแม่น้ำและหินปูนย่อยร้อยละ 15 ถึง 40 การต้านทานการขัดสีพบว่า กำลังอัด อัตราส่วนผสม การตกแต่งผิว และการบ่มคอนกรีตมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีต และมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อทำการแทนที่หินปูนย่อยด้วยมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตปริมาณร้อยละ 30 ส่วนการหดตัวแบบแห้ง พบว่าเมื่อนำมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดจะมีการหดตัวแบบแห้งสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยร้อยละ 20 ถึง 50 และมีค่าการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นร้อยละ 70 ถึง 100 เมื่อใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต และยังพบว่าค่าการหดตัวแบบแห้งจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้มวลรวมที่ได้จากมอร์ต้าร์ เนื่องจากมอร์ต้าร์ไม่ช่วยยับยั้งการหดตัวของคอนกรีต อีกทั้งการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีความต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการหดตัวแบบแห้งเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากทรายแม่น้ำและหินปูนย่อย

2.5 ความทนทานของคอนกรีต

2.5.1 การต้านทานการขัดสี

Atis (2002) ศึกษาการต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินในปริมาณมากโดยทดลองผสมเถ้าถ่านหินลงในคอนกรีตในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน มีการใส่สารผสมเพิ่มเพื่อรักษาความสามารถในการเทคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นจะมีการต้านทานการขัดสีที่สูงขึ้นด้วย โดยถูกตั้งข้อสังเกตว่าคอนกรีตที่มีความต้านทานการขัดสีสูงจะมีส่วนผสมของเถ้าถ่านหิน

ในปริมาณที่มาก (แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 70 โดยมวล) และจะมีค่าการต้านทานการขัดสีสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ส่วนสารผสมเพิ่มในคอนกรีตไม่มีอิทธิพลอย่างเป็นนัยยะสำคัญต่อแนวโน้มการต้านทานการขัดสีของคอนกรีต

Tarun และคณะ (2002) ศึกษาผลกระทบต่อการต้านทานการขัดสีของคอนกรีตจากแหล่งที่มาและจำนวนเถ้าถ่านหินที่แตกต่างกันโดยใช้เถ้าถ่านหิน Class C จาก 3 แหล่งที่มาอัตราส่วนผสมของเถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ใช้กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 41 เมกะปาสคาลที่อายุ 28 วัน พบว่าค่าการต้านทานการขัดสีของคอนกรีตกำลังสูงทุกส่วนผสมทั้งที่ใส่และไม่ใส่เถ้าถ่านหินมีความสามารถต้านทานการขัดสีสูง การผสมเถ้าถ่านหิน Class C ในคอนกรีตถึงร้อยละ 40 ของวัสดุประสานไม่ได้มีอิทธิพลต่อการต้านทานการขัดสีของคอนกรีตและการต้านทานการขัดสีของคอนกรีตจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากโดยเฉพาะเมื่อมีการผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 50

Turk และ Karatas (2011) ศึกษาการต้านทานการขัดสีของคอนกรีตและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายโดยใช้ส่วนผสมของเถ้าถ่านหิน Class F และซิลิกาฟูมที่แตกต่างกัน 9 ส่วนผสม ประกอบด้วยคอนกรีตที่ต้องอาศัยเครื่องมือสั่นสะเทือนและคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย 8 ส่วนผสมโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินและซิลิกาฟูมอย่างละ 4 ส่วนผสมเพื่อประเมินผลกระทบของคุณสมบัติทางกลและการต้านทานการขัดสีของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคและการต้านทานการขัดสีของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายสูงกว่าคอนกรีตที่ต้องอาศัยเครื่องมือสั่นสะเทือนทุกช่วงอายุการทดสอบ

2.5.2 การแทรกซึมของคลอไรด์

การแทรกซึมของคลอไรด์เกิดจากสารเคมีที่อยู่ในรูปของสารละลายที่เป็นของเหลวและมีความเข้มข้นสูงเพียงพอ เช่น คลอไรด์ โดยทั่วไปมีที่มาจาก 2 แหล่งคือวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตและจากสภาพแวดล้อม ความดันของสารเคมีที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจะซึมแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าหรือไม่มีความเข้มข้นทำให้เกิดอันตรายต่อเนื้อคอนกรีต ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีต

ปริญญา จินดาประเสริฐ และปิโยรส ทะเสนฮด (2548) ได้ศึกษาเพื่อดัดแปลงการวัดการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 (2001) มาใช้กับมอร์ต้าร์โดยการ

ทดสอบคอนกรีตและมอร์ต้าร์ที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 60 โวลต์ ระยะเวลาทดสอบ 6 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 45, 30 และ 15 โวลต์ ระยะเวลาทดสอบ 8 ถึง 12 ชั่วโมง พบว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 60 โวลต์ ไม่เหมาะกับการทดสอบมอร์ต้าร์เพราะเกิดความร้อนสูงเกินไป ส่วนการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 45, 30 และ 15 โวลต์ ระยะเวลาทดสอบ 8 ถึง 12 ชั่วโมง มีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านก้อนคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 (2001)

Chindaprasirt และคณะ (2005) ศึกษาการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ในคอนกรีตซึ่งมีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินในขนาดความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่แตกต่างกัน 3 ขนาดโดยได้ทำการทดสอบและวัดค่าคูลอมบ์ตามมาตรฐาน ASTM C1202 (2001) และทำการคำนวณการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์หลังจากที่ทำการแช่ก้อนทดสอบกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยก้อนทดสอบจมลงในสารละลายทั้งก้อน พบว่าการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ผ่านก้อนคอนกรีตขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าถ่านหินและการทดสอบความสามารถในการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์แสดงให้เห็นว่าประจุไฟฟ้าคูลอมบ์ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ลดลงอย่างมีนัยสำคัญกับความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น

ธวัชชัย สาสกุล (2550) ศึกษากำลังอัดและการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยใช้เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็ก พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นแต่ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตได้ดี

2.5.3 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งเกิดจากการที่น้ำในคอนกรีตระเหยออกมาทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวเกิดรอยแตกร้าว บิดตัวและการยึดรั้งของโครงสร้างหากการออกแบบและก่อสร้างไม่ได้เผื่อค่าการหดตัวแบบแห้งไว้อย่างเพียงพอ โดยมีกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งคือ ซีเมนต์เพสต์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ปัจจุบันมีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการหดตัวแบบแห้งดังนี้

Almusallam (1995) ศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตโดยแบ่งคอนกรีตออกเป็น 2 กลุ่ม ตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.48 และ 0.50 และใช้เถ้าถ่านหิน

แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยศึกษากำลังอัด โมดูลัสความยืดหยุ่น และการหดตัวแบบแห้ง พบว่าที่อายุ 90 วัน คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.48 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ร้อยละ 14 ถึง 22 ทุกส่วนผสม

ส่วนการหดตัวแบบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 พบว่าช่วงอายุก่อน 7 วัน คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 มีค่าการหดตัวแบบแห้งใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมและช่วงอายุ 7 ถึง 98 วัน คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินมีค่าการหดตัวแบบแห้งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมมีค่ามากขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้นซึ่งค่ากำลังอัดจะส่งผลต่อความทึบน้ำของคอนกรีต และในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 10 คอนกรีตขยายตัวเป็นเหตุให้โพรงคาปิลารีมีขนาดเล็กลงจึงเป็นการเพิ่มความดันในโพรงคาปิลารีทำให้น้ำซึมออกจากก้อนคอนกรีตได้เร็วส่งผลให้คอนกรีตควบคุมมีค่าการหดตัวแบบแห้งสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหิน สาเหตุนี้แสดงให้เห็นว่าการผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตช่วยลดค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตได้ ซึ่งผลที่ได้จะแตกต่างกับผลการทดสอบในสภาวะเงื่อนไขอุณหภูมิ 50°C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ที่พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินมีค่าการหดตัวแบบแห้งสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเนื่องจากน้ำในคอนกรีตต้องการระยะเวลาที่นานกว่าในการซึมออกจากก้อนคอนกรีตทำให้ค่าการหดตัวแบบแห้งในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม