

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นจะกล่าวถึงความเป็นไปได้ในการนำผงหินปูนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอย คุณสมบัติของเถ้าลอย คุณสมบัติของผงหินปูน และตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน รวมทั้งการใช้เถ้าลอยและผงหินปูนในการต้านทานซัลเฟต

Paul (1976) ได้ศึกษาการผสมปูนขาว (lime) กับวัสดุปอซโซลาน (เถ้าแกลบ) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเถ้าแกลบมาใช้ในงานก่อสร้าง โดยทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ปูนขาวผสมกับเถ้าแกลบ เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมกับปูนขาว และเถ้าแกลบ ซึ่งมีการใช้สารผสมเพิ่มคือโซเดียมอลูมิเนต เพื่อช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนเถ้าแกลบต่อปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาดีที่สุดในการพัฒนากำลังรับน้ำหนักมีอัตราส่วนเท่ากับ 1 ต่อ 2 นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถนำเถ้าแกลบไปใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์และปูนขาวในการผลิตอิฐบล็อกได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนลดลงถึงร้อยละ 13 ถึง 34 เมื่อเทียบกับอิฐบล็อกปูนซีเมนต์ผสมทรายที่ปริมาตรเท่ากัน

Wojciech G. (1990) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลและผลกระทบของผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็มหรือวัสดุหล่อลื่น (filler) ต่อความต้านทานเกลือซัลเฟต เมื่อพิจารณาผลทางด้านกายภาพ พบว่าเมื่อผสมผงหินปูนลงในคอนกรีตจะส่งผลให้คอนกรีตมีช่องว่างลดลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมากขึ้น ทำให้เกลือซัลเฟตเข้าไปทำลายยากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ปริมาณน้ำอิสระน้อยลงถึงร้อยละ 20 ถึง 25 โดยน้ำหนักของน้ำอิสระที่อยู่ในคอนกรีต

วิศิษฐ์ เดชพันธ์ (2542) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงหินปูนเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบคอนกรีตผสมผงหินปูน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์เป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายจะเร็วขึ้น เนื่องจากผลของความเร่งทางกายภาพ (physical acceleration) เกิดขึ้นในกรณีที่ผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้อนุภาคปูนซีเมนต์กระจายตัวได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากความเร่งทางเคมี (chemical acceleration) เพราะผงหินปูนทำให้ค่าความเป็นด่างของน้ำสูงขึ้นทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น จากผลการทดลองยังพบอีกว่าค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากอนุภาคของผงหินปูนเป็นเหลี่ยมมาก อีกทั้งการแทนที่ด้วยผงหินปูนยังทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตผสมผงหินปูนจึงควรผสมสารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer)

ปิติ เสรมะธากุล (2545) ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ และแนวทางการนำผงหินปูนเพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ และการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ มุ่งหมายเพื่อนำผงหินปูนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ และ/หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน ผลจากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผงที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์มีบทบาทสำคัญต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหรือเป็นผลมาจากปฏิกิริยาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจสรุปได้เป็น 3 ปัจจัยด้วยกัน ปัจจัยแรกคือ ปริมาณร้อยละหรือความเข้มข้นของสารประกอบ ปัจจัยที่สองคือ ความสามารถในการทำปฏิกิริยา และ/หรือความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของสารประกอบ ปัจจัยสุดท้ายคือ ปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี สารประกอบดังที่ได้กล่าวมาได้แก่ ปริมาณร้อยละหรือความเข้มข้นของ ซิลิกอนออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ ที่ว่องไวและอยู่ในสภาพที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ ซึ่งอาจมีแคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาด้วย ซึ่งจากการทดสอบพบว่าปริมาณสารประกอบแมกนีเซียมออกไซด์ในสัดส่วนผสมระหว่างร้อยละ 0.5 ถึง 3.0 มีผลให้การพัฒนากำลังในช่วง 7 วันแรกดีขึ้น นอกจากนี้ยังสรุปแนวทางการประยุกต์ใช้ผงหินปูน และ/หรือผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอซโซลานในงานประเภทต่างๆ ดังนี้

1. อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ประยุกต์ใช้โดย ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบ ใช้ขัดหรือผสมรวมภายหลังเพื่อผลิตมอร์ตาร์สำเร็จรูป และ/หรือเพื่อการผลิตปูนซีเมนต์ราคาถูกที่เหมาะสมแก่งานก่อสร้างขนาดเล็ก (dry mortar and/or economic – mixed cement)

2. อุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ประยุกต์ใช้โดย ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อยไม่เกินร้อยละ 35 เพื่อให้ทำหน้าที่วัสดุเติมเต็ม และ/หรือให้คุณสมบัติในการเชื่อมประสานในภายหลัง (filler and/or cementitious replacement material) หรืออาจใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก กล่าวคือปริมาณเกินกว่าร้อยละ 35 เพื่อให้ได้คุณสมบัติบางประการ เช่น คุณสมบัติคอนกรีตความร้อนต่ำ เป็นต้น

3. ประยุกต์ใช้งานในฐานะวัสดุปรับปรุงเสถียรภาพชั้นดินอ่อนและงานดินถมบดอัด

สุรัชย์ อำนวยพรเลิศ (2547) ได้ทำศึกษาผลของผงหินปูน และเถ้าลอยที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยกำหนดปริมาณการแทนที่ผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 18 ถึง 36 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.24, 0.27 และ 0.30 อัตราส่วนปริมาณเพสต์ต่อปริมาณช่องว่างต่ำสุดของมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.10, 1.20 และ 1.30 และค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตเท่ากับ 6.0 ± 2.0 ซม. จากผลการทดลองพบว่า หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่อสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดที่อายุเริ่มต้นจนถึง 28 วัน มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันขึ้นไปจะให้กำลังเทียบเท่ากับคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมที่มีการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตผสมผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอย มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา และมาตรฐาน ACI 318

Cengiz Duran Atis, Alaettin Kilic and Umur Korkut Sevim (2002) ได้ศึกษากำลักรับแรงอัด และการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์สูง โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.40 จากผลการศึกษาพบว่า การผสมเถ้าลอยทำให้การหดตัวแห้งลดลงประมาณร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสม เถ้าลอยร้อยละ 10 และ 20 ให้ค่าเทียบเท่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน

P. Chindaprasirt, P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak and H.T. Cao (2005) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมปอซโซลาน (เถ้าลอยชนิด F และเถ้าแกลบ) ใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ตัวอย่างที่ใช้วัดการขยายตัวจะถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 และทำการตรวจสอบค่า pH ของสารละลาย จากการศึกษาพบว่า เถ้าลอยและเถ้าแกลบช่วยลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ และค่า pH นอกจากนี้นักวิจัยพบว่า เถ้าแกลบมีประสิทธิภาพมากกว่าเถ้าลอย จากผลการทดสอบ SEM ที่ผิวตัวอย่างที่แตกร้าวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตชี้ให้เห็นว่าการทำลายโดยซัลเฟตของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสม เถ้าลอย หรือเถ้าแกลบถูกยับยั้งโดยการลดแคลเซียมออกไซด์ และอัตราส่วน C/S ของ CSH เจล เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนพบว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบมีแคลเซียมซัลเฟตน้อยกว่า และเกิดแอทริงไจท์น้อยกว่าอย่างชัดเจน เช่นเดียวกันกับในกรณีมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยก็จะน้อยกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีมากกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปอซโซลานทั้งสองชนิดนี้ในอัตราส่วนการแทนที่ถึง ร้อยละ 40 เพื่อสร้างซีเมนต์ผสมที่มีความต้านทานซัลเฟตดี

E.F. Irassar (2005) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตเมื่อผงหินปูนถูกใช้เป็นส่วนประกอบในปูนซีเมนต์ หรือถูกใช้แทนที่ทรายในคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย (SCC) โดยศึกษาตัวอย่างเพสต์, มอร์ตาร์ และคอนกรีต ซึ่งถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NaSO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ที่มีความเข้มข้นต่างกัน และที่อุณหภูมิต่างกัน โดยใช้ปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบต่างๆกัน นอกจากนี้ส่วนผสมและอัตราส่วนการแทนที่ผงหินปูนยังถูกออกแบบให้แตกต่างกันอีกด้วย จากผลการศึกษาพบว่า การเสื่อมสภาพเนื่องจากซัลเฟตส่วนใหญ่ส่งผลมาจากอัตราส่วน W/C และปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ การแตกร้าวของผิวถูกควบคุมโดยการใช้อัตราส่วน W/C ต่ำ และมีปริมาณ C_3A ต่ำ ในส่วนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตพบว่าอุณหภูมิต่ำส่งผลให้เพิ่มระดับความเสื่อมสภาพมากขึ้น

Kamile Tosun, Burak F., B. Baradan and I. Akin Altun (2009) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผงหินปูน ตัวอย่างถูกเตรียมด้วยปูนซีเมนต์ 2 ชนิดซึ่งอัตราส่วน $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ แตกต่างกัน ใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5, 10, 20 และ 40 ตัวอย่างจะถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต 3 สถานะคือ โซเดียมซัลเฟต (NaSO_4) ที่อุณหภูมิ 20°C และ 5°C

แมกนีเซียมออกไซด์ (MgSO_4) ที่อุณหภูมิ 5°C ผลจากการทดสอบชี้ให้เห็นว่า อัตราส่วนการแทนที่ผงหินปูนและอุณหภูมิที่ต่ำส่งผลเสียต่อความต้านทานซัลเฟต นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ สูงมีแนวโน้มถูกซัลเฟตทำลายง่ายโดยจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่อมีปริมาณผงหินปูนเพิ่มขึ้น ในตัวอย่างที่มีอัตราส่วนการแทนที่ผงหินปูนสูงการทดสอบ XRD และ SEM/EDS แสดงให้เห็นว่าแอททริงไจท์เป็นผลผลิตที่ส่งผลเสียต่อตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ส่วนยิปซัม และ เทอร์มาไซต์ (thaumasite) เป็นผลผลิตที่ส่งผลเสียต่อตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (2548) ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียด รูปร่างของเถ้าลอยและวัสดุเฉื่อย ต่อกำลัง ขนาดโพรง การกระจายขนาดโพรง และการซึมผ่านอากาศในเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยนำเถ้าลอยทั้งที่ไม่ได้แยกขนาด และแยกขนาดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุผงเท่ากับ 0.35 จากการศึกษาพบว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยคัดขนาดให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยที่ไม่คัดขนาด การแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยไม่ได้คัดขนาดในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เพสต์มีปริมาณโพรงทั้งหมดเพิ่มขึ้นแต่ขนาดโพรงโดยเฉลี่ยจะลดลง ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยขนาดเล็กจะส่งผลให้ทั้งปริมาณโพรงทั้งหมด และขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง เมื่อตรวจสอบปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าการแทนที่เถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ลดลงมากกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่หยาบกว่า นอกจากนี้ยังศึกษาเพสต์ที่ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35 และเพสต์ที่ควบคุมให้มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติ ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และโรงไฟฟ้า COCO มาคัดแยก 3 ตัวอย่างคือ เถ้าลอยที่ไม่ คัดแยกขนาด เถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0-45 และ 0-10 ไมครอน ใช้ทรายแม่น้ำที่บดให้มีขนาดใกล้เคียงกับเถ้าลอย โดยนำเถ้าลอยหรือทรายแม่น้ำแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าปริมาณโพรงของเพสต์เถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนที่เถ้าลอยเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้เถ้าลอยขนาดเล็กจะส่งผลให้ปริมาณโพรงลดลง การซึมผ่านอากาศในเพสต์จะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและใช้เถ้าลอยมีความละเอียดขึ้น นอกจากนี้พบว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า COCO มีปริมาณโพรงและการซึมผ่านอากาศสูงกว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เนื่องจากเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า COCO มีรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีความพรุน และความเป็นผลึกมากกว่า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยกว่า นอกจากนี้แล้วยังพบว่าเพสต์ผสมวัสดุเฉื่อยที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้ปริมาณโพรงลดลงมากกว่าการผสมด้วยวัสดุเฉื่อยที่หยาบกว่า และเมื่อเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยวัสดุเฉื่อยและเถ้าลอยแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน และที่อัตราส่วนที่เดียวกัน พบว่าปริมาณโพรงและการซึมผ่านอากาศของเพสต์ผสมวัสดุเฉื่อยสูงกว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยแม่เมาะเป็นวัสดุปอซโซลานจึงสามารถลดขนาดโพรงจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกและผลจากการอัดตัวของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ขณะที่วัสดุเฉื่อยสามารถลดปริมาณโพรงได้เนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคที่มีขนาดเล็กเท่านั้น

ปิติศานต์ กร้ามาตร และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล (2549) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แตกต่างกันสองระดับคือร้อยละ 8.28 และร้อยละ 17.28 จากการศึกษาพบว่า การขยายตัวเมื่อแช่ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต รวมทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่า ในทางกลับกัน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่งกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสองชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การลดลงจะไม่มีผลกระทบเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยังพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการสูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

ศักดิ์ประยุทธ สินธุภิญโญ และสุรัชย์ วัชรตันชัย (2552) ได้ตรวจสอบคุณสมบัติของผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่ผสมผงหินปูน เพื่อศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนไประหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากการศึกษาพบว่าผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และกลไกการเกิดปฏิกิริยามีข้อแตกต่างกัน โดยปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนทำให้เกิดเฟส Monocarboaluminate ซึ่งไม่พบในปูนซีเมนต์ปกติ เกิด Nucleation Effect ในระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดการเติมเต็มช่องว่างและการอัดตัวแน่น (filling/packing effect) ของผงหินปูนระหว่างเนื้อปูนซีเมนต์ ซึ่งจากผลทั้งสามส่วนดังกล่าวเป็นสาเหตุให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ในระยะต้นสูงกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามประโยชน์ที่ได้จากการหินปูนบดละเอียดนี้จะอยู่ในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่านั้น และข้อควรระวังในการใช้ผงหินปูนในปริมาณมากอาจทำให้เกิด false set ในปูนซีเมนต์ได้

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผงที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานทางด้านคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต และคุณสมบัติในการต้านทานซัลเฟต โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

2.2.1 ปฏิกริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

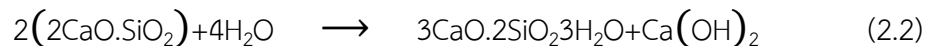
ก. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.1



ข. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2

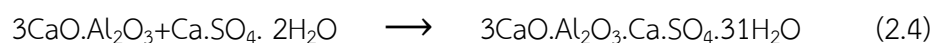


ค. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมินेट

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมินेटจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3

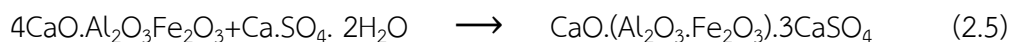


เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการผลิตปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมินेट ก่อให้เกิดชั้นบางๆของเอตริงไท์ (Ettringite : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{SO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมินेट ดังสมการที่ 2.4



ง. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ 2.5



เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดขึ้นเคลือบของแอมอร์ฟัสไฮดรอกไซด์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของไอออนแคลเซียม และไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเฟสที่มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มขึ้นตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอมอร์ฟัสไฮดรอกไซด์เปลี่ยนเป็น แคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และซัลโฟเฟอร์ไรต์ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.2.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่า ปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.2.2.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

ก. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) หินภูมิไซต์ (Pumisite) หินโอเพิลเลื่อง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งาน จะต้องนำมาบดก่อน

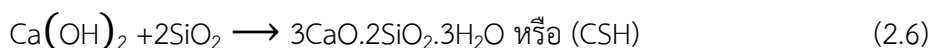
ข. ปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

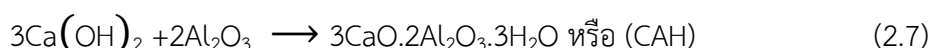
2.2.2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลานเกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ 2.6 ถึง 2.7

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



2.2.3 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์จำพวกสารปอซโซลานสังเคราะห์หรือปอซโซลานดัดแปลงประเภทหนึ่ง เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงกันเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (Electrostatic precipitation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า

2.2.3.1 ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

ก. เถ้าลอย ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica : SiO_2) และอลูมินา (Alumina : Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide : Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.3 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide : CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

ข. เถ้าลอย ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.1 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำ ทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [3]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O , ร้อยละ	1.5	1.5

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าถ่านออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวมา ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในการคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ได้แนะนำว่า ควรใช้เถ้าถ่านหิน Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class C เนื่องจากพบว่า เถ้าถ่านหิน Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์ มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าถ่านหิน Class F

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 [4]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO ₂) อย่างต่ำ, ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) , ร้อยละ	-	น้อยกว่า	น้อยกว่า	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) อย่างมาก, ร้อยละ	5.0	10.0	10.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก, ร้อยละ	3.0	5.0	5.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมาก, ร้อยละ	6.0	3.0	2.0	6.0
		6.0	6.0	

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา และลักษณะการเผาถ่านหิน อย่างไรก็ตามก็มีความเสี่ยงที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมีโดย ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [5]

ตัวอย่างเถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

2.2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไป องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) ไออนออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และมี แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na₂O, K₂O) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H₂O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition : LOI) SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมี

ปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเก้าอี้หิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

2.2.3.3 ปฏิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

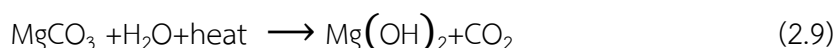
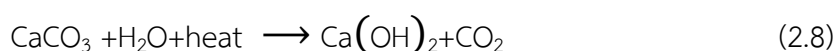
ปฏิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิริยาไฮเดรชัน (hydration) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.10 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะทำปฏิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ 2.6 และ/หรือสมการที่ 2.7 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิริยาปอซโซลาน (Pozzolan reaction) ผลผลิตของปฏิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิริยาไฮเดรชัน

2.2.4 ผงหินปูน

ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิริยาเคมี (inert material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิริยาทางเคมี (reactive material) มีรายละเอียดดังนี้

2.2.4.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สมารถที่จะทำปฏิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และ/หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9



2.2.4.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ร่วงไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.10



โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2

การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสานซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.2.5 กลไกการทำลายของซัลเฟตต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Mechanisms of sulfate attack on portland cement)

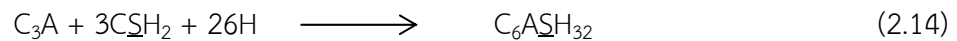
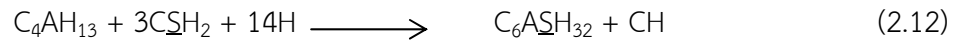
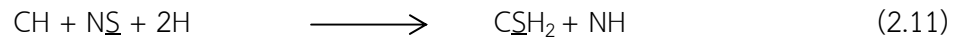
เกลือซัลเฟต (SO₄²⁻) ที่อยู่ในรูปของสารละลาย สามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟต ที่พบมากในธรรมชาติและอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) เป็นต้น เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเลหรือในดินทั่วไป ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติ เป็นต้น

ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟตสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ หรือคอนกรีต ไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตหรือแคลเซียมซัลเฟตแต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้

2.2.5.1 กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟต (Mechanisms of sodium sulfate attacks) [6]

กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟตแสดงดังสมการที่ 2.11 ถึง 2.14 เริ่มต้นเมื่อโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาจากไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการที่ 2.11 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) มีความเป็นด่างสูงมาก (pH=13.5) จึงเป็นการรักษาสภาพทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ Ettringite (C₆ASH₃₂) ไม่ทำให้ปฏิกิริยากลายเป็นผลอื่น โดยที่สารยิปซัม (CSH₂) ที่ได้จากสมการที่ 2.11 จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C₄AH₁₃) โมโนซัลเฟต (C₄ASH₁₂) และไตร

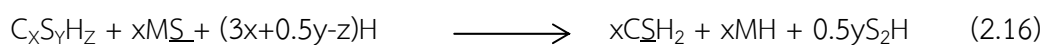
แคลเซียมอลูมินेट (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ได้ Secondary ettringite ดังแสดงในสมการที่ 2.12 ถึง 2.14 โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันชนิดอื่นมากจึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำละลายโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต



โดยที่ $C = CaO$, $N = Na_2O$, $M = MgO$, $S = SiO_2$, $\bar{S} = SO_3$ และ $H = H_2O$

2.2.5.2 กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต (Mechanisms of magnesium sulfate attacks) [6]

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.15 ถึง 2.17 จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างที่สูง ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง $C-S-H$ และ Ettringite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ $C\bar{S}H$ จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.16 จากสมการที่ 2.15 และ 2.16 ทั้ง $C\bar{S}H_2$ และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย $C\bar{S}H_2$ จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล (S_2H) ดังแสดงในสมการที่ 2.17 ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย ดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน $C\bar{S}H$ เป็น MSH การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม $C\bar{S}H_2$ โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต



2.2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต

- 1) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต
- 2) ความทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยาก ลดการทำลายขึ้นรุนแรง
- 3) ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง และปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_2A และ C_3S ต่ำก็มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น

4) ปริมาณ Ca(OH)_2 ในคอนกรีต ถ้าลดปริมาณของ Ca(OH)_2 ในคอนกรีตก็ช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย วิธีการลด Ca(OH)_2 ในคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้สารวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

2.2.5.4 วิธีการป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

1) ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และอัตราส่วน C_2A และ C_3S ต่ำ นั่นคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

2) การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งช่วยลดปริมาณบางส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) รวมทั้งลด C_3A และยังช่วยเพิ่มความทนน้ำให้กับคอนกรีตได้ด้วย

3) ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำสูงขึ้น

4) ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เฟสที่ไม่มากเกินไป