

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีตพรุน

คอนกรีตพรุน (Porous concrete) คือคอนกรีตที่ไม่มีมวลละเอียดในส่วนผสมเพื่อต้องการให้มีโพรงที่ต่อเนื่องอยู่ภายในซึ่งน้ำหรือของเหลว และอากาศซึมผ่านได้ โดยสามารถที่จะออกแบบคุณสมบัติได้อย่างหลากหลายแตกต่างกันขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ทั้งในด้านความแข็งแรง ความสามารถในการระบายน้ำ ความสามารถในการอุ้มน้ำ และความสามารถด้านอื่นๆ

คอนกรีตพรุนได้ถูกคิดค้นและพัฒนาในประเทศอังกฤษและอเมริกาเป็นเวลามากกว่า 30 ปี เพื่อใช้ในงานคอนกรีตที่รักษาสภาพแวดล้อม และนำมาใช้ในรูปแบบที่หลากหลาย คอนกรีตพรุนได้รับความสนใจเป็นอย่างมากโดยเฉพาะในอเมริกาและประเทศญี่ปุ่น กล่าวคือ ได้นำคอนกรีตพรุนมาใช้สำหรับงานปูผิวถนน ใช้ในการลาดคลองและพื้นที่ที่สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตดำรงอยู่ได้อาทิพืชและสัตว์ขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานวิศวกรรมอื่นๆ เช่น ใช้เป็นฉนวนความร้อน ด้านการเก็บเสียงและด้านการระบายน้ำรวมทั้งสามารถทำพื้นผิวทางสำหรับเดินเท้าและสำหรับรถยนต์ทางเท้า นอกจากนี้ยังรวมไปถึงงานปรับแต่งภูมิสถาปัตยกรรมอื่นๆ อาทิ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับพื้นผิวที่ต้องสัมผัสกับน้ำอยู่เสมอ เช่น ห้องน้ำสาธารณะ บันได เฉลียงนอกบ้าน และทางเดินในสวนหย่อม เพื่อป้องกันการลื่นล้มได้เป็นอย่างดีเนื่องจากคอนกรีตประเภทนี้มีการระบายน้ำได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการใช้คอนกรีตพรุนจะมีความสำคัญและเป็นที่แพร่หลายในอนาคต

2.1.1 โครงสร้างของคอนกรีตพรุน

โครงสร้างของคอนกรีตพรุนนั้น ประกอบไปด้วยเฟสของซีเมนต์เพสต์ มวลรวม และ ช่องว่างที่ต่อเนื่องกันภายใน โดยเฟสของซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เป็นเหมือนกาวเชื่อมประสานให้มวลรวมยึดติดเข้าด้วยกันและเป็นตัวที่รับกำลังเป็นหลัก โดยมวลรวมที่ยึดติดกันนั้นเป็นมวลรวมที่มีขนาดละเอียดช่วง ทำให้โครงสร้างของคอนกรีตพรุนมีปริมาณช่องว่างอากาศภายในที่ต่อเนื่องกันมากกว่าคอนกรีตปกติทั่วไป จึงส่งผลให้คอนกรีตพรุนมีความสามารถยอมให้น้ำซึมผ่านได้มากกว่าคอนกรีตปกติ

2.1.2 คุณสมบัติของคอนกรีตพรุน

1. รับน้ำหนักแรงกดได้มาก เพราะ วัสดุหลักที่นำมาใช้ผลิตคอนกรีตพรุนคือ ซีเมนต์ และหิน เหมือนคอนกรีตผสมเสร็จทั่วไปแต่ไม่ใช้ทรายในส่วนผสม เพื่อให้เกิดรูพรุนของวัสดุแต่มีจุดอ่อนตรงที่ดิ่งไม่ได้ ดัดไม่ได้ และใส่เหล็กไม่ได้

2. การซึมผ่านของน้ำ น้ำสามารถซึมผ่านเข้าสู่โครงสร้างคอนกรีต โดยผ่านช่องว่างที่ถูกออกแบบให้ต่อเนื่องกัน (Interconnected Void) จากการซึมผ่านของแรงดันน้ำ (Hydraulic Permeability) และการซึมผ่านของแรงดึงผิวน้ำ (Water Absorbed by Capillary Action) ดังนั้น การเพิ่มการซึมผ่านของน้ำในโครงสร้างคอนกรีตสามารถทำได้โดยเพิ่มช่องว่างที่เชื่อมต่อกันให้มากที่สุดนั่นเอง ซึ่งการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตให้มีการระบายน้ำที่ดีโดยทำให้คอนกรีตมีช่องว่างที่เชื่อมต่อกันให้มากที่สุดนั้นสามารถทำได้โดย

1. การออกแบบส่วนผสมที่ดีทั้งด้านความต่อเนื่องของช่องว่าง และกำลังอัด
2. มีวิธีการทำงานที่ถูกต้องและการอัดแน่นคอนกรีตอย่างถูกวิธี โดยไม่ไปอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต

3. การลดอุณหภูมิความร้อนในเวลากลางวัน โดยจะทำให้อาคาร บ้านเรือน เป็นการลดการสะสมความร้อน ทำให้ไอน้ำในใต้พื้นดินระเหยขึ้นมา จนเกิดเป็นความชุ่มชื้นกับผู้อยู่อาศัย และรู้สึกเย็นสบายมากกว่าเดิม เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้มีความพรุนมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายเป็นส่วนผสม ซึ่งจุดเด่นดังกล่าวช่วยให้การระบายอากาศดีกว่า และอากาศสามารถถ่ายเทได้สะดวก

4. ไม่ทำให้เกิดน้ำขัง เพราะน้ำจะซึมผ่านลงไปชั้นใต้ดิน ทำให้ไม่สะสมเป็นตะไคร่น้ำที่ทำให้ลื่นในช่วงหน้าฝน และยังช่วยลดปัญหาน้ำท่วมได้อีกด้วย

2.2 จีโอพอลิเมอร์

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากในการก่อสร้างโดยเฉพาะในประเทศไทย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคอนกรีตเพราะทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานส่วนผสมอื่น กระบวนการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ใช้พลังงานสูงมาก การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความพยายามในการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยการพัฒนาคอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานปริมาณสูง และปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เลยอย่างกว้างขวาง สารซีเมนต์ดังกล่าวสาที่เรียกว่า “สารจีโอพอลิเมอร์” (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551)

สารจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมิเนียมเป็นหลัก เมื่อผสมกับต่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สารปอซโซลานที่นิยมใช้กันได้แก่ เถ้าลอย และดินขาวเผา ซึ่งสารจีโอพอลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ โดยการทำปฏิกิริยา

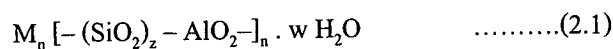
ลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้

จีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ซึ่งพบครั้งแรกโดย Glukhovsky ประเทศสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 ซึ่งสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์อินทรีย์ นิยามของจีโอพอลิเมอร์ กำหนดขึ้นครั้งแรกโดย Davitodovits ประเทศฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1970 คือ ส่วนผสมของแร่ธาตุ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุนี้จะเหมือนกับซีโอไลต์ แต่โครงสร้างจะอยู่รูปอสัณฐาน จีโอพอลิเมอร์ได้จากวัสดุที่มีสารประกอบซิลิกาและอะลูมิเนียมมากขึ้นด้วยต่าง กระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวกับการเกิดจีโอพอลิเมอร์แตกต่างกับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมาก สืบเนื่องจากประเทศไทยมีวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เถ้าลอยซึ่งได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าแกลบได้จากโรงสีข้าวหรือโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแกลบ เถ้าชีวะมวลจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แร่ดินเบาจากพื้นที่ภาคเหนือ และดินขาวจากพื้นที่บริเวณจังหวัดระนอง เป็นต้น

ส่วนผสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์จะใช้เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้พลังงานความร้อนซึ่งได้จากการเผาถ่านหินชนิดใดก็ได้ เถ้าถ่านหินมีสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม หรือ เทา น้ำตาล ถึง น้ำตาลแดง หรือน้ำตาลเหลือง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน วิธีการเผาและอุณหภูมิขณะเผาถ่านหิน เถ้าถ่านหินโดยปกติจะมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าถ่านหินประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์รัสไตรออกไซด์ (Fe_2O_3) ผลรวมของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 90 โดยน้ำหนัก

2.2.1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Davidovits, 1999)

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นสารที่เชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้ โดยใช้หลักของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ ดังสมการ



โดยที่ M คือ ธาตุอัลคาไล
 - คือ การยึดเกาะพันธะ
 z คือ จำนวนโมเลกุล

- n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่
w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง พบว่าสามารถใช้เฝ้าลอจจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในการทำจีโอพอลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารจีโอพอลิเมอร์ดังกล่าวได้มาจากการผสมเฝ้าลอจกับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60 ถึง 90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งใช้เป็นสารพวกอัลคาไลซิลิเกต (Alkali Silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali Hydroxide) เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

สารปอซโซลานโดยทั่วไปเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่ออบจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิปกติและเมื่อมีความชื้นแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการช่วยยึดประสาน วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีแหล่งที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต (Artificial Pozzolan)

2.2.2 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของจีโอพอลิเมอร์ (Davidovits, 1999)

สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) รวมตัวกัน และสารประกอบอื่นที่เจือต่อปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ การเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ปกติสารจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเหมือนกับปูนซีเมนต์จึงทำให้ลดการใช้พลังงานลงไปมาก และทำให้ลดต้นทุนในการผลิต

ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน แต่พบว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึกอีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ดังตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์

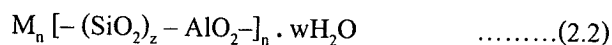
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอพอลิเมอร์

	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ + สารละลายอัลคาไลน์ + ซิลิเกต
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (nucleation) ใน สารละลาย	การชะของแข็งที่ Al-Si เป็น ส่วนประกอบออกมาสู่เฟส
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย	การแพร่และควบแน่นของสารเชิงซ้อน Al และ Si ที่ชะออกมาในเฟส
อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา	90 - 300 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิปกติ
ช่วงความเป็นกรด-เบส	6 - 11	14
ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่ Al-Si เป็นส่วนประกอบ
องค์ประกอบทางเคมี	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ แน่นอน	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ไม่ แน่นอน
โครงสร้าง	ผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว (unique crystal)	ของผสมของเฟลเจลแบบอสัณฐาน และกึ่งอสัณฐาน และวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
ความแข็งแรงเชิงกล	ต่ำ	สูง

2.2.3 คุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

2.2.3.1 ในด้านการศึกษา

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี วัสดุชนิดนี้มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสาร โพลีไซลอะเตต (Polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต [Si - O - Al - O] จากสูตร



ถ้า z มีค่าเป็น 1 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลต (PS)

ถ้า z มีค่าเป็น 2 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไซลอคโซ (PSS)

ถ้า z มีค่าเป็น 3 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไดไซลอคโซ (PSDS)

โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si:Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งานวัสดุนั้นๆ อาทิเช่น อัตราส่วน 1, 2, และ 3 ทำให้ได้สารที่มีโครงสร้างเป็น 3 มิติ หากอัตราส่วนสูงกว่า 3 จะเกิดการเชื่อมขวาง หรืออัตราส่วน 15 หรือมากกว่า จะทำให้ได้สารประกอบพอลิเมอร์มากขึ้น ตัวอย่างคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ เป็นดังนี้

อัตราส่วน 2:1	เหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต
อัตราส่วน 3:1	สารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททานเนียม ที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200- 1,000 องศาเซลเซียส
อัตราส่วนระหว่าง 20:1 – 35:1	ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ใน 2 มิติ มีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (High Performance Fiber Composites)

อุณหภูมิในการผสมและวิธีการบ่มจะมีผลต่อคุณสมบัติของไฟเบอร์ที่ได้ เช่น ไฟเบอร์กลาสประเภท E จะต้องมีการทำการผสมและบ่มที่อุณหภูมิห้อง สำหรับประเภทคาร์บอนจะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส สำหรับประเภทเหล็ก จะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 750 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส ส่วนประเภทซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) จะทำการผสมที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ถึง 1,800 องศาเซลเซียส

2.2.3.2 ในด้านอุตสาหกรรม

วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถผลิตได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิต่ำ โดยสามารถผลิตวัสดุประเภทนี้จากสารประกอบที่มีซิลิกาหรือทั้งซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่สามารถละลายในสารละลายอัลคาไล จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น เช่นเดียวกับการผลิตคอนกรีตจากปูนซีเมนต์

วัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ คือสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง และให้ค่ากำลังอัดที่เป็นที่ยอมรับได้ในเวลาอันสั้น ในบางกรณีพบว่า วัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ที่สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้าง งานขนส่งและงานโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ โดยให้

คุณสมบัติที่ดีเช่นประสิทธิภาพด้านเชิงกลที่สูง ผิวหน้าที่แข็ง มีความเสถียรทางความร้อน มีความทนทานเป็นเลิศ และมีความต้านทานต่อกรดสูง ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุอิโพลิเมอร์ สามารถแทนวัสดุทางการก่อสร้าง เช่น อิฐ พื้นเซรามิกส์และซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

วัสดุอิโพลิเมอร์ยังสามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และทนต่อเปลวไฟได้ถึง 50 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร โดยไม่มีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ไม่เกิดควันเมื่อได้รับพลังความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเหมือน พอลิเมอร์อินทรีย์ ดังนั้นวัสดุอิโพลิเมอร์จึงมีศักยภาพในการใช้งานทางอุตสาหกรรมยานยนต์ได้

2.2.3.3 ในด้านเศรษฐศาสตร์และสังคม

- การปรับสภาพของเสียที่มีพิษ

การตรึง (Immobilisation) ของเสียที่มีพิษด้วยการผสมของเสียในวัสดุอิโพลิเมอร์เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุอิโพลิเมอร์มีลักษณะที่คล้ายกับซีโอไลต์ (Zeolite) หรือ เฟลด์สปาทรอยด์ (Feldspathoids) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับของเสียทางเคมีที่ดี หรือทำของเสียเป็นก้อน (Solidify) ของเสียทางเคมีประเภทนี้ได้แก่ ไอออนของโลหะหนักและกากของสารนิวเคลียร์ วัสดุอิโพลิเมอร์จะมีโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถตรึงของเสียที่มีพิษไม่ให้ถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยของเสียที่มีพิษจะถูกกักอย่างหนาแน่นภายใน โครงสร้าง 3 มิติของวัสดุอิโพลิเมอร์

- ปรากฏการณ์โลกร้อนและการประหยัดพลังงาน

ในปัจจุบันการผลิตปูนซีเมนต์ทุกๆ 1 ตัน จะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่บรรยากาศ 1 ตัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน (Global Warming) แต่สำหรับวัสดุประสานอิโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาโลกร้อนได้ เนื่องจากการผลิตวัสดุอิโพลิเมอร์ ไม่ต้องการความร้อนที่สูงในการปรับสภาพหินปูนเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์และสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุอิโพลิเมอร์สามารถหาได้ทั่วไป โดยเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) เป็นองค์ประกอบ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และดินขาว เป็นต้น ซึ่งนำไปสู่การลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่บรรยากาศได้เป็นอย่างดี

- เศรษฐศาสตร์

การผลิตวัสดุอิโพลิเมอร์จะใช้ต้นทุนที่ต่ำ เนื่องจากจะใช้ของเสียที่ได้จากกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ให้คุณสมบัติทางด้านกำลังที่สูงในระยะเวลาอันสั้น แม้ว่าวัสดุอิโพลิเมอร์จะต้องการความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดสมบูรณ์ แต่อุณหภูมิที่ใช้จะไม่สูงมากนัก คือที่ประมาณ 45 ถึง 90 องศาเซลเซียส หากต้องการผลิตวัสดุอิโพลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ หรือชิ้นส่วนก่อสร้าง เช่น เสา กาน ผนัง และพื้นสำเร็จรูป สามารถใช้ผลิตเหมือนคอนกรีตสำเร็จ (Precast Concrete) ได้ ซึ่ง

เหมาะสมกับงานที่ต้องการกำลังอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น ในปัจจุบันจะเห็นว่าคอนกรีตหล่อสำเร็จเป็นที่ต้องการของตลาดมากเนื่องมาจากสะดวกและใช้เวลาอันรวดเร็วในการทำงาน ดังนั้นวัสดุซีโอพอลิเมอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับงานคอนกรีต ที่สามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้

2.3 เถ้าถ่านหิน (ปริญญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย หมายถึง ส่วนที่เหลือจากการเผาถ่านหินบดละเอียดเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าที่เกิดจากการเผาถ่านหินมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าถ่านหินนี้จะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบโรงไฟฟ้า เถ้าที่ได้นี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเมื่อผสมกับน้ำ จึงเป็นแนวคิดในการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานก่อสร้างแทนปูนซีเมนต์และเพื่อลดปัญหาด้านมลภาวะได้อีกด้วย และเถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา เรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 290 ไมครอน หรือใหญ่กว่าเถ้าถ่านหินประมาณ 16 เท่า

2.3.1 ถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิดได้แก่

1. แอนทราไซต์ (Anthracite)
2. บิทูมินัส (Bituminous)
3. ซับบิทูมินัส (Sub – Bituminous)
4. ลิกไนต์ (Lignite)

ถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนได้สูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดนี้แล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุดให้ความร้อนต่ำสุด และมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

2.3.2 การเผาถ่านหิน

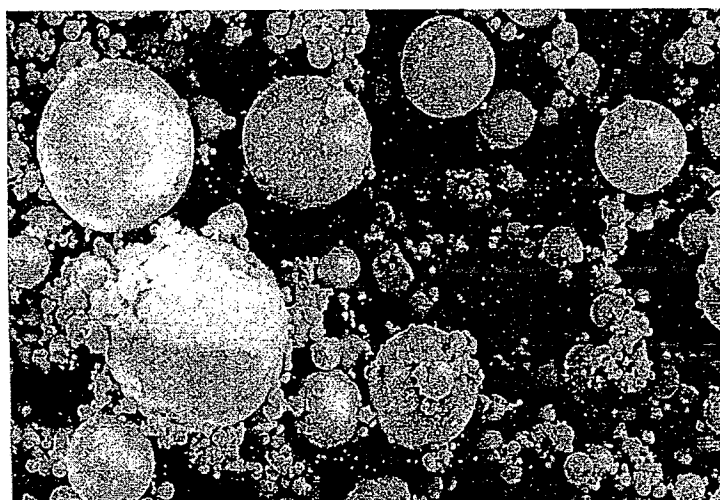
การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

1. การเผาความร้อนสูง

ในการเผาความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูงถึง 1,500 ถึง 1,700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลายและรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน เถ้าถ่านหินส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าก้นเตาและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นเถ้าลอยซึ่งในระบบการเผาไหม้จะมีปริมาณค่อนข้างน้อย เถ้าถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใส ๆ (Vitreous particle)

2. การเผาความร้อนปานกลาง

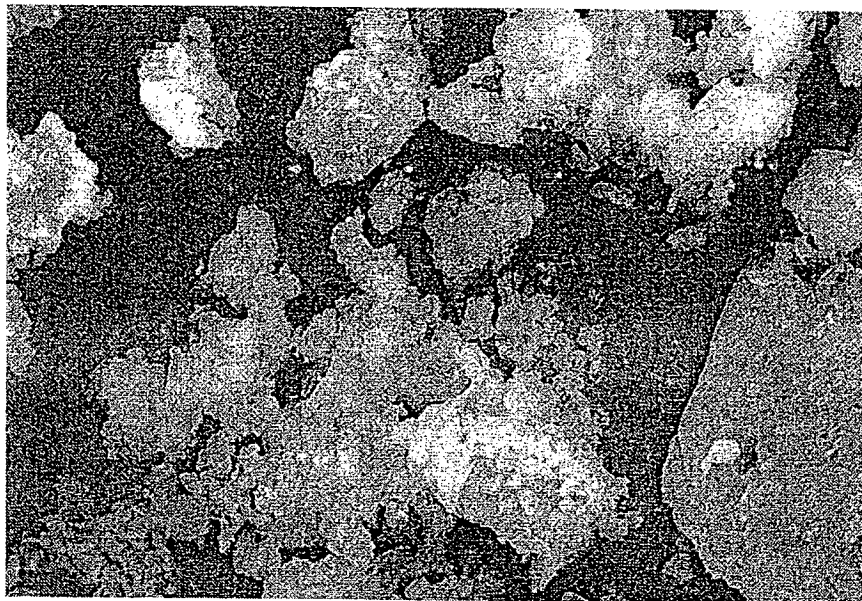
อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในเตาเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าลอยที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตาเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อนุภาคของเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากการเผาแบบ Pulverized Coal (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547)

3. การเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed Combustion) อุณหภูมิของการเผาถ่านหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส เถ้าถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) ดังรูปที่ 2.2 และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่ไม่ดีเท่าเถ้าลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง แต่วิธีนี้ก็เริ่มใช้กันมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่าง ๆ

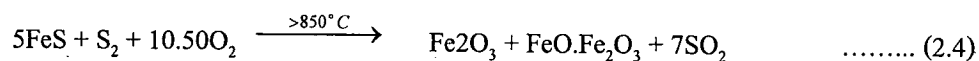
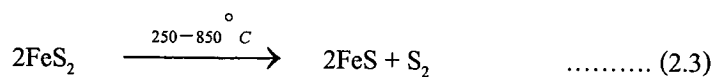


รูปที่ 2.2 อนุภาคของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาแบบ Fluidized-bed (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

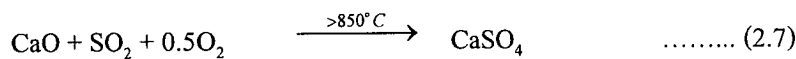
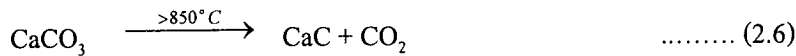
ในกระบวนการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิต่างๆดังที่กล่าวมาส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินภายใต้การเผาดังต่อไปนี้

ถ่านหินมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ควอตซ์ (Quartz) เกาลินไนต์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) ไพไรต์ (Pyrite) และ แคลไซต์ (Calcite) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งได้แก่ คลอไรต์ (Chlorite) มาเคไซต์ (Marcasite) และเฟลด์สปาร์ (Feldspar) เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แร่ธาตุในถ่านหินจะเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

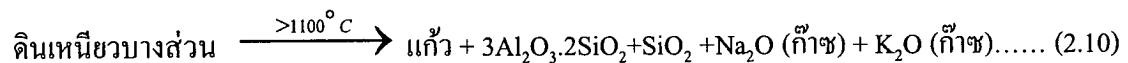
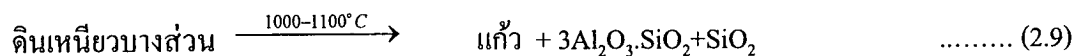
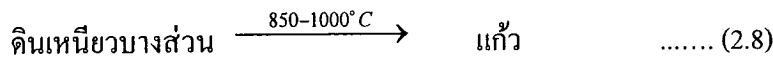
1. ไพไรต์และมาเคไซต์ เปลี่ยนเป็นเฮมาไตต์ (Fe_2O_3) และแมกเนไตต์ ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) ในรูปของผลึกและเป็นเหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้ว (Glassy Phase) ของเถ้าถ่านหินดังสมการ



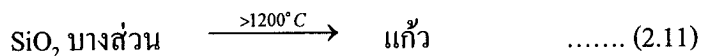
2. แคลไซต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแอนไฮไดรต์ (CaSO_4) ดังสมการ



3. ดินเหนียวจะสูญเสียน้ำและเปลี่ยนเป็น แก้ว มุลไลต์ (mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) และ ควอร์ตซ์ (SiO_2) ในรูปของผลึกของคริสโตบาไลต์ (cristobalite) ดังสมการ



4. ควอร์ตซ์ (SiO_2) จะเกิดการหลอมละลายบางส่วนและกลายเป็นแก้วดังสมการ



จะเห็นได้ว่าถ้าถ่านหินประกอบด้วยแก้วและผลึกซึ่งปริมาณจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ในการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ของระบบฟลูอิดไคซ์เบดอุณหภูมิจะไม่สูงพอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน สารประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึก ในการเผาแบบนี้ถ้าถ่านหินมีปริมาณซัลเฟอร์สูงจะนิยมใช้แคลไซต์ (Calcite) ผสมถ่านหินเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ แต่จะทำให้ถ่านหินมีปริมาณ CaO และ CaSO_4 สูงได้

ในระบบความร้อนปานกลางอุณหภูมิในการเผาประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูงพอที่จะทำให้ถ่านหินหลอมละลาย ดังนั้นถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลึกของเฮมาไตต์ แมกเนไตต์ มุลไลต์ และควอร์ตซ์ ประกอบอยู่เล็กน้อย นอกจากนั้นยังมีแร่ธาตุที่เผาไหม้ไม่หมดและแร่ธาตุอื่น เช่น แคลไซต์ ไพไรต์ แอนไฮไดรต์ และดินเหนียวหลงเหลืออยู่

การเผาในเตาเผาแบบความร้อนสูงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 1,500 องศาเซลเซียส ถ่านหินเกิดการเผาไหม้และหลอมละลาย ถ่านหินจะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่สูงและมีส่วนที่เป็นผลึกจะเหลืออยู่น้อย ขณะเดียวกันการเผาไหม้ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดก๊าซซึ่งบางส่วนถูกกักอยู่ในถ่านหิน ทำให้ถ่านหินจำนวนมากที่เผาที่อุณหภูมิสูงเป็นถ่านหินกลาง

2.3.3 ชนิดของเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน

มาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) มาจากรังดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าถ่านหินที่มี ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) สูง

2. ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 เถ้าถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มาจากรังดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำทำให้เถ้าถ่านหินชนิด C นอกจากมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ต่ำแล้วยังมีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำด้วย

เถ้าถ่านหินทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน นอกจากนี้เถ้าถ่านหินชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง เถ้าถ่านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงโดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงโดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10

2.3.4 รูปร่างและลักษณะของเถ้าถ่านหิน

เมื่อเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้าถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว (Glassy Phase) เถ้าถ่านหินส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกัน ของเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่อขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็กๆ ที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอน (Carbon) สูง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและจะมีทรงกลมและผิวเรียบ

เถ้าถ่านหินยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกกันว่าซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถ้าถ่านหิน และยังมีเถ้าถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคเถ้าถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายในเรียกว่าพลีโรสเฟีย (Plerosphere) เถ้าถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลาย

ร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของแก้วด้านหินกลวงคือแก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate Glass) เนื่องจากแก้วด้านหินกลวงเป็นแก้วด้านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบา จึงได้มีการศึกษาเพื่อนำแก้วด้านหินกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง (Acoustic)

แก้วด้านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไดซ์เบด มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่สูงพอ ด้านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนแก้วด้านหินก้อนเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคด้านหิน จึงมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน

2.3.5 ขนาดและความละเอียด

อนุภาคแก้วด้านหินมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอนโดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ถึง 30 ไมครอน แก้วด้านหินแม่จะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของแก้วด้านหินนิยมนำมาวัดโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยแก้วด้านหินส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500 ถึง 5,000 ซม.²/ก. เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer -Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซ ความละเอียดของแก้วด้านหินเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้อัตราที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกเข้าถึงได้ ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 89,000 ซม.²/ก. โดยค่าเฉลี่ยจะประมาณ 35,000 ซม.²/ก.

การวัดความละเอียดของแก้วด้านหินยังนิยมใช้การวัดแบบง่ายโดยการร่อนเปียก (Wet Sieve) ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C 618 แนะนำให้ใช้บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 45 ไมครอน) โดยระบุจำนวนแก้วด้านหินที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 แก้วด้านหินโดยทั่วไปมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8-30

2.3.6 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของแก้วด้านหินสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C 188 แก้วด้านหินมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9 - 2.9 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของแก้วด้านหินที่สูงส่วนใหญ่มาจากด้านหินที่มีธาตุเหล็กและแคลเซียมออกไซด์ผสมอยู่มาก ความถ่วงจำเพาะของแก้วด้านหินที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด แก้วด้านหินส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าแก้วด้านหินส่วนที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากแก้วด้านหินหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรงและยังมีแก้วด้านหินกลวงผสมอยู่มากกว่าแก้วด้านหินละเอียด

2.3.7 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้านหินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้านหินจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์

(SiO₂), อะลูมินัมออกไซด์ (Al₂O₃), เฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 4 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา ด้วยเหตุผลนี้ ASTM C618 จึงได้แยกประเภทของถ่านหินไว้ 2 ชนิด คือ Class C และ Class F โดย Class F มีปริมาณ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และ Class C จะมีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าว ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก และ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), โซเดียมออกไซด์ (Na₂O), โพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O), ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H₂O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงคุณสมบัติทางเคมีของถ่านหิน

คุณสมบัติ	ASTM C 618 (%)	
	Class F	Class C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	70	50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นมากที่สุด	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้	6.0	6.0
อัลคาไลในรูปของ Na ₂ O มากที่สุด	1.5	1.5

2.3.8 ปฏิกิริยาปอซโซลานของถ่านหิน (Pozzolanic Reaction)

ความสามารถของถ่านหิน ในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของถ่านหิน คือ ถ่านหินที่มีความละเอียดมากปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าถ่านหินที่มีความละเอียดน้อยกว่า และในทำนองเดียวกันถ่านหินที่มีปริมาณร้อยละของคาร์บอนต่ำก็จะมีการพัฒนากำลังได้ไวเช่นกัน ความไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถวัดได้โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

$$\text{Strength Activity Index with Portland Cement} = \left[\frac{A}{B} \right] \times 100 \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

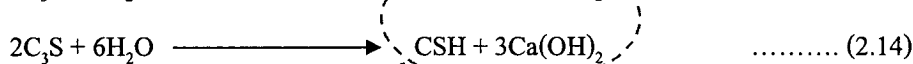
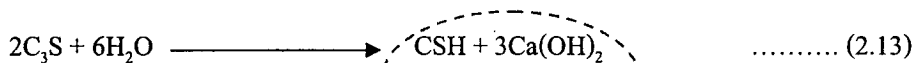
- โดย A = กำลังอัดของมอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านหินร้อยละ 20
- B = กำลังอัดของมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่มีถ่านหิน

ASTM C168 ได้กำหนดว่าดัชนีกำลังของเถ้าถ่านหินทั้ง Class F และ Class C ไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 28 วัน

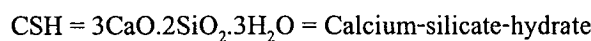
กระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นแล้วจะทำให้ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นของเหลวข้น (Cement Gel) และในขณะที่เดียวกันนี้จะเกิดสารประกอบขึ้นมา 2 ชนิด คือ C-S-H และ Ca(OH)_2 หลังจากนั้น Ca(OH)_2 ทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่ในเถ้าถ่านหินให้สารประกอบมีคุณสมบัติในการยึดประสานทำให้ซีเมนต์เพสต์ มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้นและความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตจะดีขึ้นตามไปด้วย

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

ปฏิกิริยา Silicate Hydration



ปฏิกิริยาปอซโซลานิก



2.3.9 การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีต

ความคงทนของคอนกรีตที่สำคัญได้แก่ การต้านทานการทำลายของสารซัลเฟต การทำลายโดยกรด การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม และการต้านทานคาร์บอนขึ้น ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม

2.3.9.1 การใช้เถ้าถ่านหินในการต้านทาน การทำลายของสารซัลเฟต

เถ้าถ่านหินสามารถเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตจากซัลเฟตได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเถ้าถ่านหิน Class F จะต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่า Class C การต้านทานการกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานได้เปลี่ยนรูปของ Ca(OH)_2 ให้เป็น CSH ซึ่งเป็นสารประกอบที่ทนต่อการกัดกร่อนได้สูงกว่า Ca(OH)_2 อย่างมาก

2.3.9.2 การใช้เถ้าถ่านหินในการต้านทาน การทำลายโดยกรด

การใช้ถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในปริมาณที่สูงกว่าร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะเพิ่มความต้านทานของการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 10 ได้สูงขึ้นไปกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีเถ้าถ่านหิน

2.3.9.3 การใช้เถ้าถ่านหินในการต้านทาน การซึมผ่านของคลอไรด์

คลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตจะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม การใช้เถ้าถ่านหินสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต และการใช้เถ้าถ่านหินที่ละเอียดสามารถต้านทานการซึมผ่านของสารคลอไรด์ได้ดีขึ้นกว่า คอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหิน

2.3.9.4 การใช้เถ้าถ่านหินในการต้านทาน การเกิดคาร์บอนเนชัน

คาร์บอนเนชัน (Carbonation) เป็นการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลงจาก pH 13 เหลือเพียง 8-9 และทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบผิวเหล็กเสริมถูกทำลายได้เช่นกัน

การใช้เถ้าถ่านหินแม้จะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันเร็วขึ้น แต่การใช้เถ้าถ่านหินทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การเกิดคาร์บอนเนชันลดลงเช่นกัน

2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) หรือ โซดาไฟเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ที่ละลายได้ในน้ำ ประกอบด้วยโลหะโซเดียม และเบสไฮดรอกไซด์ มีลักษณะเป็นของแข็ง (ในรูปแบบผง เกล็ด เป็นแท่งหรือเม็ดกลม) สีขาว ไม่มีกลิ่น จุดความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 318 องศาเซลเซียส ผลิตได้จากกระบวนการแยกสารทางไฟฟ้า (Electrolysis) ของน้ำเกลือ และเป็นสารเคมีที่ใช้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ และใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ สบู่และผลิตภัณฑ์ซักฟอก เคมีภัณฑ์ทำความสะอาด โรงกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมโลหะ อาหาร เส้นใยเรยอน สิ่งทอ ใช้ในการฟอกย้อม ล้างสีไหม และช่างเจียรไนพลอยก็ใช้ในขั้นตอนล้างเม็ดพลอยที่เจียรไนเสร็จแล้ว นอกจากนั้นยังใช้ปรับสภาพน้ำทิ้งที่มีฤทธิ์เป็นกรด ให้เป็นกลางก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอีกด้วย

2.5 โซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) หรือที่รู้จักกันในชื่อ "น้ำแก้ว หรือ น้ำกาว" เป็นสารประกอบไปด้วย โซเดียมออกไซด์, ซิลิกา และน้ำ ผสมกันอยู่ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน และสารเคมีตัวนี้เป็นน้ำยาบ่มคอนกรีตชนิด โซเดียม ซิลิเกต สามารถแทรกซึมบนพื้นผิวของคอนกรีตและปูนฉาบได้เป็นอย่างดี หน้าที่ถูก กำหนดให้มาทำปฏิกิริยากับหินปูน ส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮโดรชันอีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตแข็งขึ้น ลดรูพรุนที่เกิดจากน้ำในคอนกรีตที่ระเหยออกมาได้ โซเดียมซิลิเกตมีประโยชน์มากสำหรับอุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมก่อสร้าง และกำลังมีบทบาทในฐานะเป็นตัวเชื่อมและทำให้เกิดโครงสร้างของพวก จีโอโพลิเมอร์ที่

ไม่จำเป็นต้องเผาสูงเหมือนการผลิตเซรามิก สำหรับในอุตสาหกรรมเซรามิกถือว่าเป็นสัดส่วนที่น้อยมากๆเมื่อเทียบกับการใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆ

2.6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

การทดสอบกำลังอัดเป็นเรื่องสำคัญมาก เพราะเป็นการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้งานรูปทรงของคอนกรีตที่นิยมใช้ใน การทดสอบเพื่อกำลังอัดของคอนกรีตที่นิยมกันมี 2 แบบ คือ รูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก สำหรับในประเทศไทยพบว่านิยมใช้ทั้ง 2 ประเภท เนื่องมาจากอิทธิพลของบัณฑิตที่สำเร็จการศึกษาจากประเทศอังกฤษในระยะแรกที่ ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ และในระยะหลังที่บัณฑิตส่วนใหญ่จบการศึกษาจากสหรัฐอเมริกา แคนาดา และออสเตรเลีย ที่ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ก่อนอื่นต้องขอแนะนำ ถึงการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 2 ประเภท ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งขนาด วิธีการเตรียมการ ตลอดจนให้ผลของกำลังอัดที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปลูกบาศก์

แบบหล่อคอนกรีตรูปลูกบาศก์เป็นแบบเหล็กขนาด 15 ซม. ทำจากเหล็กหล่อหรือเหล็กเหนียว ผิวเรียบและสามารถป้องกันไม่ให้ น้ำปูนรั่วออกจากแบบในระหว่างที่เทหรือมีคอนกรีตอยู่ในแบบ ก่อนการหล่อคอนกรีตจะใช้น้ำมันทาบางๆ ที่ด้านในของแบบหล่อเพื่อให้สามารถถอดแบบได้ง่ายขึ้น การทาน้ำมันมากเกินไปจะทำให้คอนกรีตผสมกับน้ำมันส่วนเกินทำให้มีปัญหาเรื่อง การแข็งตัวและลดกำลังของคอนกรีต การหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ใช้ มาตรฐาน BS 1881 Part 108 โดยใส่คอนกรีตสดลงในแบบมาตรฐานขนาด 15x15x15 ซม³ จำนวน 3 ชั้น แต่ละชั้นให้เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบโต๊ะหรือกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งอย่างน้อย 35 ครั้ง เหล็กกระทุ้งมีน้ำหนัก 1.8 กก. ยาว 38 ซม. หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.5 ซม. กระทุ้งคอนกรีตอย่างเต็มที่เพื่อให้เป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อในอาคาร ต่างๆ ซึ่งได้รับการกระทุ้งหรือเขย่าให้แน่นอย่างเต็มที่เช่นเดียวกัน แต่การกระทุ้งจะต้องไม่มากจนทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว ภายหลังจากกระทุ้งเรียบร้อยแล้วจึงปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ ทั้งคอนกรีตไว้ 244 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 15 ถึง 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 จากนั้นถอดแบบออกและนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 18 ถึง 22 องศาเซลเซียส การทดสอบนิยมทำเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วันซึ่งมักเป็นอายุที่ใช้ในการออกแบบ แต่ทั้งนี้ยังสามารถทำการทดสอบที่อายุอื่นเช่นที่ 3, 7, 14 และ 90 วัน ก็ได้ หากทำการออกแบบกำลังของคอนกรีตที่ใช้งานตามอายุดังกล่าว

การทดสอบ กำลังอัดใช้คอนกรีตที่ผ่านการบ่มและอยู่ในสภาพเปียก โดยใช้พื้นที่เรียบของคอนกรีต 2 ด้านตรงกันข้ามเป็นด้านรับแรง ดังนั้นผิวหน้าด้านที่ปาดให้เรียบจะตั้งฉากกับแกนของแรงกด การให้น้ำหนักกระทำแก่คอนกรีตใช้อัตราคงที่ที่ทำให้เกิดความเค้นเท่ากับ 0.40 เมกะปาสกาลต่อวินาที จนกระทั่งคอนกรีต

วิบัติและไม่สามารถรับแรงที่สูงขึ้นได้ต่อไปอีก การให้อัตรากดต่อคอนกรีตที่เร็วมาก ๆ จะทำให้กำลังที่ทดสอบได้สูงกว่าความเป็นจริง และในทางกลับกัน การให้อัตรากดที่ช้ามากจะทำให้กำลังที่ทดสอบได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

2.6.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก

แบบหล่อมาตรฐานสำหรับเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 ซม. สูง 30 ซม. ทำจากเหล็กมีความแข็งแรงผิวด้านในเรียบ สามารถคงรูปทรงกระบอก และสามารถป้องกันน้ำปูนหรือคอนกรีตไม่ให้รั่วออกมาจากแบบหล่อได้

มาตรฐาน ASTM C192 ได้กำหนดให้หล่อคอนกรีตลงแบบมาตรฐานเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรคอนกรีตเท่าๆกัน แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้งด้วยเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 61 ซม. โดยชั้นที่ 2 และ 3 ต้องกระทุ้งให้ทะลุลงไปยังชั้นที่ต่ำกว่าประมาณ 2.5 ซม. เพื่อให้เกิดความต่อเนื่อง เมื่อครบทั้ง 3 ชั้นแล้วจึงทำการปาดผิวหน้าของคอนกรีตให้เรียบ และทิ้งคอนกรีตไว้ที่อุณหภูมิระหว่าง 16 ถึง 27 องศาเซลเซียส โดยไม่รบกวนจนคอนกรีตแข็งตัว การถอดแบบจะทำเมื่อคอนกรีตมีอายุ 248 ชั่วโมงและนำไปบ่มในน้ำปูนขาวอิมมัวที่อุณหภูมิ 232 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบกำลังตามอายุที่กำหนด

เนื่องจากการหล่อคอนกรีตแบบนี้ผิวด้านบนของคอนกรีตจะไม่เรียบพอ ASTM C617 ระบุให้ผิวหน้าของคอนกรีตที่นำมาทดสอบต้องเรียบและแตกต่างกันไม่เกิน 0.05 มม. ซึ่งอาจทำได้โดยการขัดผิวให้เรียบแต่เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองและใช้เวลามาก ดังนั้นจึงนิยมใช้การเคลือบหัว (capping) คอนกรีต ซึ่งมีอยู่ 3 แบบ ได้แก่ การใช้ซีเมนต์เพสต์ชั้นเททับบนหัวคอนกรีตตอนเทเสร็จใหม่ๆ การใช้กัมมะถัน และ ปูนปลาสเตอร์กำลังสูงเคลือบหัวคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การทดสอบคอนกรีตโดยไม่ทำให้ผิวหน้าเรียบจะทำให้กำลังที่ทดสอบมีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ผิวหน้าของคอนกรีตที่ไม่เรียบหรือเอียงเพียง 0.25 มม. อาจทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงได้ถึงร้อยละ 33 และจะลดลงมากกว่านี้เมื่อเป็นคอนกรีตกำลังสูง กำลังของวัสดุที่ใช้เคลือบหัวคอนกรีตควรเท่ากับหรือใกล้เคียงกับกำลังอัดของ คอนกรีตที่ทดสอบ ผิวเคลือบหัวคอนกรีตควรบางประมาณ 1.5 ถึง 3 มม. ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมรับแรงของคอนกรีตภายใต้การทดสอบกำลัง อัด นอกจากนี้ภายหลังการเคลือบหัวคอนกรีตแล้วต้องทิ้งให้วัสดุที่เคลือบคอนกรีต แข็งตัว เช่น ถ้าวัสดุเคลือบผิวเป็นกัมมะถันควรทิ้งให้แข็งตัวอย่างต่ำ 2 ชั่วโมง มิฉะนั้นเมื่อทดสอบการรับกำลังอัดคอนกรีตผิวเคลือบที่ยังไม่แข็งตัวเต็มที่ จะแตกเสียหายก่อนทำให้กำลังอัดที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

โดยทั่วไป นิยมใช้กัมมะถันเคลือบหัวคอนกรีตสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังไม่สูงมาก กรณีที่คอนกรีตมีกำลังสูงมากจะใช้การขัดผิวหน้าให้เรียบ กัมมะถันที่ใช้เคลือบผิวหน้าไม่ควรนำกลับมาใช้ใหม่หลายครั้ง เพราะจะมีเศษคอนกรีต ผุน และทรายปนกลับมาทำให้คุณภาพของกัมมะถันลดลง นอกจากนี้กัมมะถันที่นำกลับมาใช้อีกหรือที่เหลืออยู่ในหม้อต้มและผ่านการต้ม หลายครั้งจะมีกำลังต่ำลง ดังนั้นจึงควรตรวจสอบว่ากัมมะถันที่ใช้ไม่มีปัญหาดังกล่าว

รายละเอียดของ การเคลือบหัวคอนกรีตมีอยู่ในมาตรฐาน ASTM C617 ในการเคลือบด้วยกำมะถันจะใช้แบบเหล็กผิวเรียบและแทนสำหรับตั้งคอนกรีตให้ การเคลือบหัวทำโดยการเทกำมะถันเหลวซึ่งต้มที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส ลงบนแบบเหล็กที่ทาน้ำมันเครื่องบางๆเพื่อป้องกันกำมะถันติดผิวหน้าแบบเหล็ก จากนั้นจึงคว่ำหัวคอนกรีตที่ต้องการเคลือบลงบนกำมะถันเหลวและให้ตั้งฉากกับ ผิวหน้าของแบบเหล็ก หลังจากนั้นรอให้กำมะถันแข็งตัวซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ถึง 2 นาที สามารถดึงคอนกรีตที่มีกำมะถันเคลือบหัวอยู่ ออกจากแบบ ส่วนการเคลือบโดยใช้ปูนปลาสเตอร์กำล้งสูงจะใช้แผ่นแก้วทาด้วยน้ำมันบางๆค ปูนปลาสเตอร์ลงให้เรียบบนผิวหน้าคอนกรีตที่ต้องการเคลือบหัว และเมื่อปูนปลาสเตอร์แข็งตัวจะสามารถเอาแผ่นแก้วออกได้

ปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกในการทดสอบกำลังอัดมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กนิยมใช้มาตรฐานตามแบบอเมริกัน หรือของ ว.ส.ท. เป็นหลัก แม้ว่าคอนกรีตรูปทรงกระบอกจะเป็นที่นิยมและใช้เป็นมาตรฐานในการคำนวณและออกแบบก็ตาม แต่ในทางปฏิบัติพบว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์มีข้อดีหลายอย่าง เช่น คอนกรีตรูปลูกบาศก์ใช้คอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตรูปทรงกระบอกจึงมีน้ำหนักเบา กว่า (คอนกรีตรูปลูกบาศก์หนักประมาณลูกละ 8-8.5 กิโลกรัม ขณะที่คอนกรีตรูปทรงกระบอกหนักประมาณ 12.5-13 กิโลกรัม) สามารถเก็บและบ่มในน้ำ โดยใช้พื้นที่การบ่มที่น้อยกว่ากรณีของคอนกรีตรูปทรง กระบอก นอกจากนี้ในการทดสอบกำลังอัดยังสามารถใช้ผิวด้านที่เรียบทำการทดสอบได้ ทั้งนี้ แต่ถ้าเป็นคอนกรีตรูปทรงกระบอกต้องหล่อหัวเคลือบหน้าคอนกรีตให้เรียบก่อนทำ การทดสอบ ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีข้อดีกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์หลายประการ เช่นการหล่อและการทดสอบในแนวตั้งเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นลักษณะของการเทและรับแรงของ โครงสร้างคอนกรีตในงานจริง โดยทั่วไป ดังนั้นจึงถือว่ามี ความเหมือนจริงมากกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่ทิศทางการเท และการทดสอบคอนกรีตจะตั้งฉากกัน นอกจากนี้คอนกรีตรูปทรงกระบอกยังมีผลกระทบจากขนาดของหินน้อยกว่าและการกระจายของหน่วยแรงสม่ำเสมอกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์ เนื่องจากมีผลกระทบของการยึดที่ปลายด้านบนและด้านล่างของคอนกรีตในระหว่าง การทดสอบน้อยกว่า

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพูน โดยมุ่งประเด็นไปที่การผลิตคอนกรีตพูนให้มีกำลังอัดและการระบายน้ำที่ดี

มัลลิกา เสนาวงศ์ และคณะ (2553) ได้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตพูนจากหินปูน โดยหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตพูน จากการศึกษพบว่า ค่าการไหลของคอนกรีตพูนจะ

เพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยการไหลที่ดีและเหมาะสมสำหรับการทำคอนกรีตพูนจะเท่ากับ 190 มม. และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.29 นอกจากนั้นพบว่า สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความพูนที่เพิ่มขึ้น ส่วนกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนจะลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และกำลังอัดของคอนกรีตพูนมีค่าสูงสุดที่ความพูนเท่ากับร้อยละ 15

กัญญาภัก จอดนอก และคณะ (2554) ได้ศึกษาความต้านทานการขีดสีและสึกกร่อนของคอนกรีตพูนสองชั้นที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดที่ข้างตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ที่อัตราส่วนโพรงร้อยละ 25 ที่อายุการบ่มน้ำ 7 วัน และบ่มในอากาศ 7 วัน ปูทับด้วยกรวดแม่น้ำลำคัดขนาดเบอร์ 1 (2.36 มิลลิเมตร) และเบอร์ 2 (4.75 มิลลิเมตร) โดยใช้ปริมาณอัตราส่วนของเรซินต่อฮาร์ดเดินเนอร์ที่ 1:0.25, 1:0.50, 1:0.75 และ 1:1 จากผลการศึกษพบว่า ร้อยละการสูญเสียและร้อยละการแตกหักแปรผันตรงกับขนาดของกรวดแม่น้ำลำคัดขนาด โดยกรวดขนาดเล็กให้ค่าร้อยละการสูญเสียและค่าร้อยละการแตกหักน้อยกว่ากรวดขนาดใหญ่ ความแตกต่างระหว่างค่าร้อยละการสูญเสียและค่าร้อยละการแตกหักของคอนกรีตพูนทั้งแบบที่บ่มในอากาศและแบบบ่มในน้ำมีค่าน้อยมาก

นันทวุฒิ อัครสันตติ และคณะ (2550) ได้ศึกษาคุณสมบัติคุณสมบัติของคอนกรีตพูนเพื่อใช้ป้องกันการชะล้างหน้าดินร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก จากการศึกษาได้ทำการควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25 และในการผสมซีเมนต์เพสต์ได้ผสมด้วยเครื่องผสมที่รอบความเร็วสูง จากการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่อัตราส่วนโพรงร้อยละ 15, 20 และ 25 มีความสามารถในการไหลผ่านของน้ำ เพิ่มขึ้นตามปริมาตรของโพรงที่ต่อเนื่องกัน กำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีตพูนจะลดลงเมื่ออัตราส่วนโพรงในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น และพบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของมวลรวมมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีตพูน

ยุวดี หิรัญ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาร่วมผสมของคอนกรีตสำหรับผลิตบล็อกปูผิวทางที่ระบายน้ำได้ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนผสม และชนิดของหินที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตระบายน้ำได้ เพื่อใช้ในการทำบล็อกปูถนนเพื่อก่อสร้างลานจอดรถหรือทางเดินเท้าในเขตพื้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร เพื่อลดการก่อสร้างพื้นที่ที่บ้น้ำ ทำให้น้ำผิวดินสามารถไหลซึมผ่านผิวลงสู่ชั้นดินได้ ช่วยลดปัญหาเรื่องการระบายน้ำและปัญหาน้ำท่วมการไหลนองของน้ำฝนได้ โดยได้ทำการศึกษาคูณสมบัติด้านกำลังอัดและความชื้นน้ำของส่วนผสมคอนกรีตที่ทำจากหินเกล็ดและหินกรวดที่มีขนาดอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 4 และเบอร์ 8 ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ส่วนผสมคอนกรีตพูนที่ใช้หินกรวดที่มีขนาดละเอียดและมีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักหินมีค่าความชื้นน้ำของคอนกรีตเหมาะสมกับค่าความชื้นน้ำของดินในเขตพื้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร และมีกำลังอัดเฉลี่ย 242 กก/ซม².

ในส่วนของจีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุสารผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ซึ่งพบครั้งแรกโดย ดร. Glukhovsky ประเทศสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 ซึ่งสารผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์กอนินทรีย์ นิยามของจีโอพอลิเมอร์ กำหนดขึ้นครั้งแรกโดย Davitodovits ประเทศฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1970 คือ ส่วนผสมของแร่ธาตุ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีเคมี ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุนี้จะเหมือนกับซีโอไลต์ แต่โครงสร้างจะอยู่รูปอสัณฐาน จีโอพอลิเมอร์ได้จากวัสดุที่มีสารประกอบซิลิกาและอะลูมิเนียมมากระตุ้นด้วยด่าง กระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวกับการเกิดจีโอพอลิเมอร์ แตกต่างกับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมาก สืบเนื่องจากประเทศไทยมีวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกา (Si) และอะลูมิเนียม (Al) หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เถ้าถ่านหินซึ่งได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าแกลบได้จากโรงสีข้าวหรือโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแกลบ เถ้าชีวะมวลจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แร่ดินเบาจากพื้นที่ภาคเหนือ และดินขาวจากพื้นที่บริเวณจังหวัดระนอง เป็นต้น โดยในประเทศไทยวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ด้านวัสดุและนักวิจัยด้านคอนกรีตมากขึ้น ฉะนั้นแล้วมีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ทำการศึกษา และมุ่งประเด็นไปที่ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการก่อตัวและการรับแรงเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ (2548) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์หรือสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เตรียมจากเถ้าถ่านหิน โดยนำเถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยากับ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูง ในช่วงอัตราส่วนผสมโดยโมลดังนี้ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0.2 - 0.48$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.3 - 4.5$, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 10 - 25$ และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.8 - 1.2$ โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่อง Optical Microscope (OM) และ Scanning Electron Microscope (SEM) ที่เป็นอัตราส่วนผสมต่างกัน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวัสดุ โดยจะเห็นเม็ดเจลเกิดการก่อตัวรอบๆเถ้าถ่านหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ขึ้น ส่วนการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 56 MPa ที่ระยะเวลาบ่ม 48 ชั่วโมง

พร้อมพงศ์ ผุงเพิ่มตระกูล และคณะ (2551) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เมื่อใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน โดยการเจาะรูตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ ซม.³ ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร จนทะลุผ่าน จากนั้นใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ฝังลงไปนคอนกรีตเป็นระยะ 150 มิลลิเมตร โดยใช้จีโอพอลิเมอร์เพสต์เป็นตัวเชื่อมประสานบริเวณรูเจาะ จีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ใช้จะมีสัดส่วนผสมแตกต่างกัน เช่น อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ซิลิกาฟูมและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น แรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่าง

ทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ผลที่ได้พบว่าจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมได้ โดยแรงยึดเหนี่ยวสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 79 กก/ชม² ที่อายุ 28 วัน

สมิทร ส่งพิริยะกิจ, วรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิณ (2552) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต และอุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้สาร โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำเป็นส่วนผสม โดยหล่อเป็นตัวอย่างขนาด 10 x 10 x 10 ซม.³ ซึ่งกำหนดอัตราส่วนทางเคมีต่างกัน 7 ส่วนผสม แบ่งอุณหภูมิบ่มเป็น 2 ชุด บ่มอุณหภูมิห้อง และบ่มอุณหภูมิ 60°C ทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการรับกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งมีสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.463 และอัตราส่วนผสมของเถ้านหินต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ให้กำลังอัดสูงสุด กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 161 กก./ชม.² และจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 329 กก./ชม.² จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na₂O) จะได้กำลังอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อลดปริมาณน้ำต่อเถ้านหินลงก็จะได้ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

วิเชียร ชาลี และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2552) ได้ศึกษาคุณสมบัติความคงทนของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านเตา โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านเตาที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1, 1.5, 2, และ 3 ทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในอากาศ และทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 14, 30 และ 90 วัน ในการศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้ทำการทดสอบกำลังหลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% เป็นเวลา 90 วัน นอกจากนี้ที่อายุตัวอย่าง 48 ชั่วโมง ได้ทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกา Si-O (stretching) โดยเทคนิค Infrared spectroscopy (IR) ที่ช่วงความถี่ 1200-950 cm⁻¹ และโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3 ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 35 เมกะปาสคาล และนอกจากนั้นยังพบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน มีกำลังอัด ต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุทดสอบเดียวกัน ตลอดจนตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ค่อนข้างชัดเจน

Songpiriyakij et al., 2010 ได้ศึกษาเกี่ยวกับ กำลังอัด และระดับปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพบว่า เถ้านกลบเปลือกไม้ไม่สามารถให้ ซิลิกาที่ดีในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ Si/Al ที่มีค่าสูง โดยใช้

ร่วมกับเต้าถ่านหิน และค่า Si/Al ที่ให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงสุดคือ 8 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.9$) นอกจากนั้นพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงขึ้น เมื่อ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่าสูงขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สารจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีกำลังรับแรงได้ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตพูนได้ อย่างไรก็ตามวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ ยังไม่มีมาตรฐานที่รองรับการทดสอบเหมือนคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นในการศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพูน จำเป็นที่จะต้องอ้างอิงกับมาตรฐานของคอนกรีตพูนที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป