

■ ดร.อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

วัสดุจีโอโพลิเมอร์

1. บทนำ

ในปัจจุบันซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ถูกใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานอย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่นิยมใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการก่อสร้างอาคาร บ้านพักอาศัย และถนน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาจากการเผาสารที่ประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ในช่วง 1,400–1,600 องศาเซลเซียส กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงใช้พลังงานสูงมากในการระเบิดวัสดุ การย่อย การลำเลียง การเผา และการบดละเอียด

ผลกระทบที่เกิดจากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นนี้จึงควรที่จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง โดยการหาซีเมนต์อื่นมาทดแทน เช่น การใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม จากเกษตรกรรม และจากธรรมชาติ เพื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำปูนซีเมนต์ผสม (Blended Cement) ทั้งนี้จะเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สำหรับสารที่จะใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ ตัวอย่างเช่น วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) เป็นสารที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นปูนซีเมนต์ในตัวเอง แต่เมื่อผสมกับสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ดี ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งและลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังช่วย

ปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตได้อีกด้วย สารปอซโซลานที่ใช้กันมากที่สุด ได้แก่ เถ้าถ่านหิน (Fly Ash : FA) นอกจากนี้ยังมีเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash : RHA) ดินขาวเผา (Calcined Kaolin : CK) เถ้าชีวมวล (Biomass Ash) และเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash)

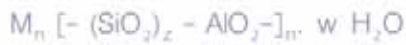
อย่างไรก็ตามสารปอซโซลานไม่สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด เนื่องจากซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) จากเถ้าดังกล่าวต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไป เพื่อให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรตที่มีคุณสมบัติยึดประสาน

นอกจากนี้ยังมีความพยายามที่จะพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า “จีโอโพลิเมอร์”^(1,2) จีโอโพลิเมอร์เป็นสารเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยให้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียม โดยการชะซิลิกอนและอะลูมิเนียมในสารละลายเบสความเข้มข้นสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้ซิลิกอนและอะลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชันเป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์

2. วัสดุจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นสารที่เชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้ โดยใช้หลักการการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al)

ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ ดังสมการ ^(1,2)



โดย M คือ ธาตุอัลคาไล
- คือ การยึดเกาะพันธะ
z คือ จำนวนโมเลกุล

n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่
w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ใช้สารละลายที่เป็นต่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง พบว่าสามารถใช้ได้ตลอดจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าหรือวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO₂) และ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์ ^(4, 5)

	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรซิน
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ + สารละลายอัลคาไล + ซิลิกา (ในรูปของแข็งหรือของเหลว)
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ในสารละลาย	การระเหยของแข็งที่ Al-Si เป็นส่วนประกอบออกมาสู่เฟส
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย	การแพร่และควบแน่นของสารเชิงซ้อน Al และ Si ที่ระเหยออกมาในเฟส
อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา	90-300 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิปกติ
ช่วงความเป็นกรด-เบส	6-11	14
ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่ Al-Si เป็นส่วนประกอบ
องค์ประกอบทางเคมี	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่แน่นอน	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ไม่แน่นอน
โครงสร้าง	ผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว (Unique Crystal)	ของผสมของเฟลเจลแบบอสัณฐานและกึ่งอสัณฐาน และวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
ความแข็งแรงเชิงกล	ต่ำ	สูง

ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรซิน



รูปที่ 1 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์⁽⁶⁾

อะลูมินา (Al_2O_3) ในการทำจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์⁽²⁾ สารจีโอโพลิเมอร์ดังกล่าวได้มาจากการผสมเข้ากับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60-90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งใช้เป็นสารพวกอัลคาไลซิลิเกต (Alkali Silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali Hydroxide) เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยแผนผังการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้แสดงในรูปที่ 1

สารปอซโซลานโดยทั่วไปเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) มีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่อุณหภูมิปกติ และเมื่อมีความชื้นแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการช่วยยึดประสาน วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีแหล่งที่มาจากสองแหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (Artificial Pozzolan)

3. โครงสร้างที่เป็นไปได้ของจีโอโพลิเมอร์

สารจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) รวมตัวกัน และสารประกอบอื่นที่เจือต่อปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ การเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$) ปกติสารจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังแสดงในรูปที่ 2⁽³⁾ สารประกอบที่ใช้ทำจีโอโพลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเหมือนกับปูนซีเมนต์จึงทำให้ลดการใช้พลังงานลงไม่มากและทำให้ลดต้นทุนในการผลิต

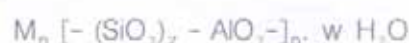
ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน แต่พบว่าสารสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึก อีกทั้งให้

คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ดังตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์

4. คุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์⁽⁴⁾

4.1 ในด้านการศึกษา

วัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี วัสดุชนิดนี้มิได้โครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลีไซอะเลต (Polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต [Si-O-Al-O] จากสูตร



ถ้า z มีค่าเป็น 1 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลต (PS)

ถ้า z มีค่าเป็น 2 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไฮดรอกไซด์ (PSS)

ถ้า z มีค่าเป็น 3 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไดไฮดรอกไซด์ (PSDS)

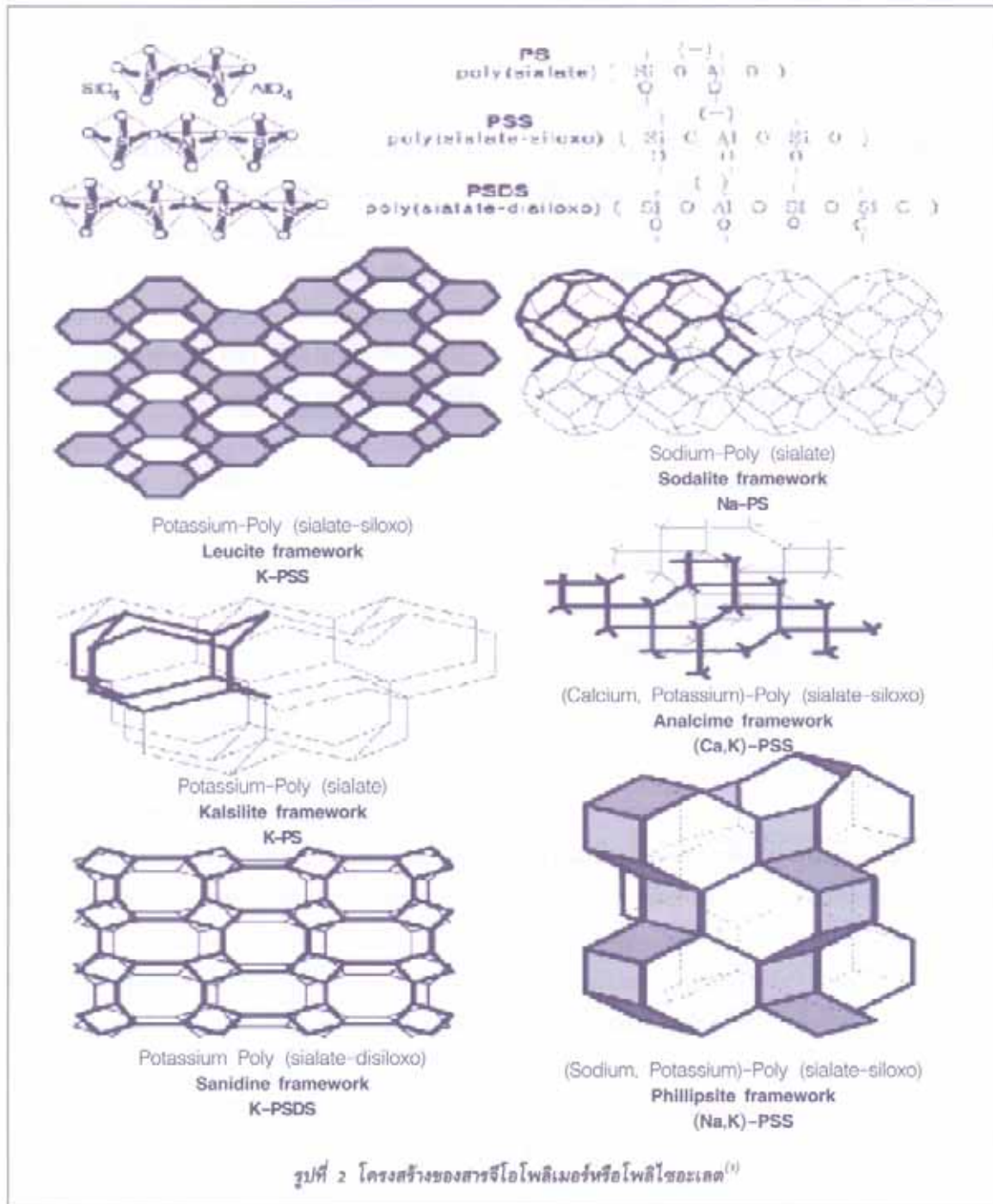
โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si : Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งานวัสดุนั้นๆ เช่น อัตราส่วน 1, 2 และ 3 ทำให้ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นสามมิติ หากอัตราส่วนสูงกว่าสาม จะเกิดการเชื่อมขวางขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 หรืออัตราส่วน 15 หรือมากกว่า จะทำให้ได้สารประกอบโพลิเมอร์มากขึ้น ตัวอย่างคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ เป็นดังนี้

อัตราส่วน 2 : 1 เหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต

อัตราส่วน 3 : 1 สารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตโททานีเยม ที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200-1,000 องศาเซลเซียส

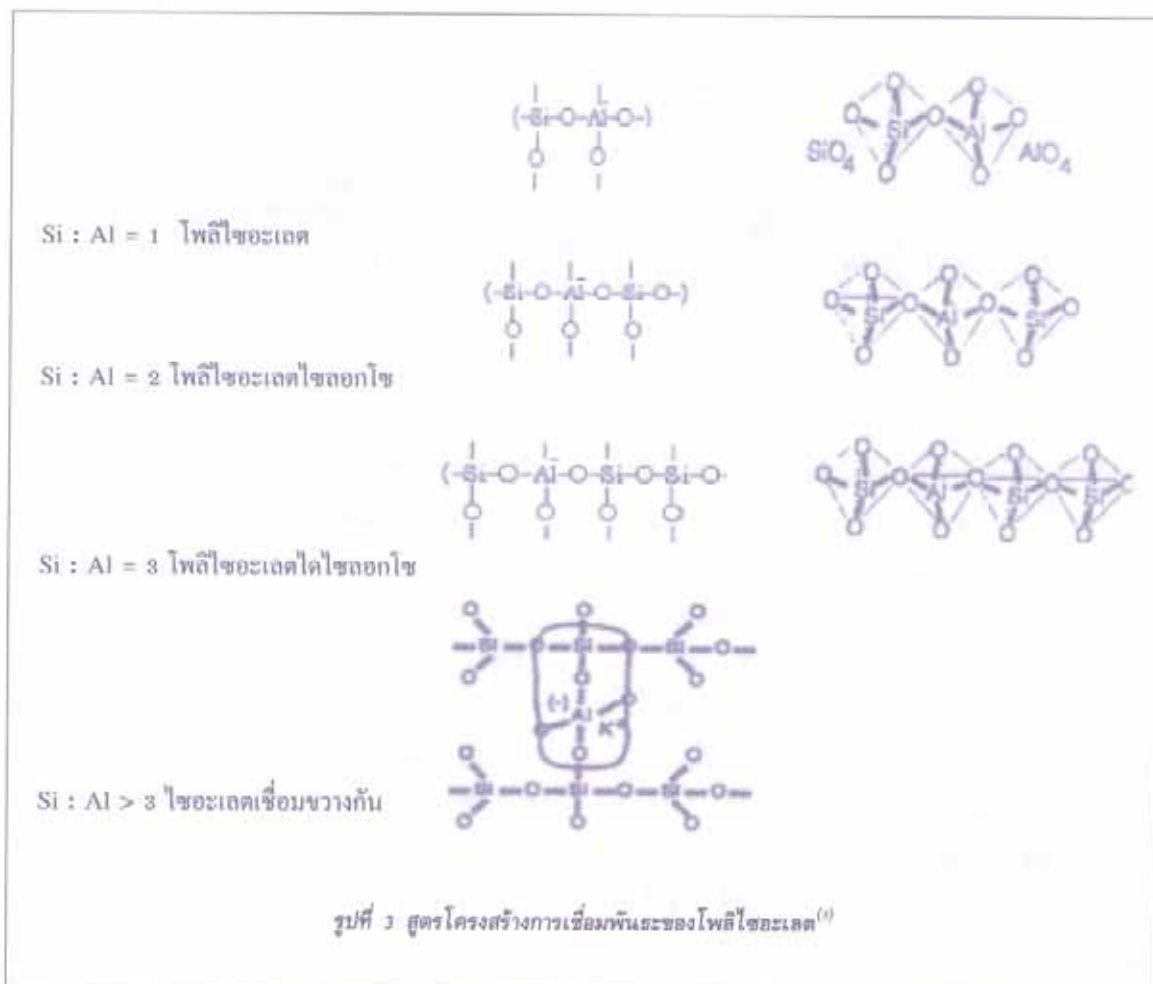
อัตราส่วนระหว่าง 20 : 1-35 : 1 ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ในสองมิติ มีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (High Performance Fiber Composites)

อุณหภูมิในการผสมและวิธีการบ่มจะมีผลต่อคุณสมบัติของไฟเบอร์ที่ได้ เช่น ไฟเบอร์กลาส ประเภท E จะต้องมีการทำการผสมและบ่มที่อุณหภูมิห้อง สำหรับ



ประเภทคาร์บอนจะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส และปรมที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส สำหรับประเภทเหล็ก จะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 750 องศาเซลเซียส และปรมที่อุณหภูมิ 80-180 องศาเซลเซียส ส่วนประเภทซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) จะทำการผสมที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส และปรมที่อุณหภูมิ 80-1,800 องศาเซลเซียส

4.2 ในด้านอุตสาหกรรม
 วัสดุซีโอไลต์สามารถผลิตได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิปรอทต่ำ โดยสามารถผลิตวัสดุประเภทนี้จากสารประกอบที่มีซิลิกาหรือทังซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) ที่สามารถละลายในสารละลายอัลคาไลน์ จากนั้นทำการปรมที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุซีโอไลต์ที่ผลิตได้จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น เช่นเดียวกับการผลิตคอนกรีตจากปูนซีเมนต์



วัสดุประสานซีโอโพลิเมอร์จะมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ คือ สามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง และให้ค่ากำลังอัดเป็นที่ยอมรับได้ในเวลาอันสั้น ในบางกรณีพบว่า วัสดุประสานซีโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้าง งานขนส่ง และงานโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ โดยให้คุณสมบัติที่ดี เช่น ประสิทธิภาพด้านเชิงกลที่สูง ผิวหน้าที่แข็ง มีความเสถียรทางความร้อน มีความทนทานเป็นเลิศ และมีความต้านทานต่อการดอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุซีโอโพลิเมอร์สามารถแทนวัสดุทางการก่อสร้าง เช่น อิฐ หินทราย และซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

วัสดุซีโอโพลิเมอร์ยังสามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และทนต่อเปลวไฟได้ถึง 50 กิโลวัตต์/ตารางเมตร โดยไม่มีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ไม่เกิดควันเมื่อได้รับพลังความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีอะตอมของคาร์บอน

เป็นองค์ประกอบเหมือนโพลีเมอร์อินทรีย์ ดังนั้นวัสดุซีโอโพลิเมอร์จึงมีศักยภาพในการใช้งานทางอุตสาหกรรมยานยนต์ได้

4.3 ในด้านเศรษฐศาสตร์และสังคม

1. การปรับปรุงสภาพของเสียที่มีพิษ

การตรึง (Immobilisation) ของเสียที่มีพิษด้วยการผสมของเสียดังกล่าวในวัสดุซีโอโพลิเมอร์เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุซีโอโพลิเมอร์มีลักษณะที่คล้ายกับซีโอไลต์ (Zeolite) หรือเฟลตสปาทอยด์ (Feldspatoids) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับของเสียทางเคมีได้ดี หรือทำของเสียเป็นก้อน (Solidify) ของเสียทางเคมีประเภทนี้ได้แก่ ไอออนของโลหะหนักและกากของสารนิวเคลียร์ วัสดุซีโอโพลิเมอร์จะมีโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถตรึงของเสียที่มีพิษไม่ให้ถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยของเสียที่มีพิษจะถูกกักอย่างหนาแน่นภายในโครงสร้าง

สามมิติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

2. ปรากฏการณ์โลกร้อนและการประหยัดพลังงาน

ในปัจจุบันการผลิตปูนซีเมนต์ทุกๆ หนึ่งตัน จะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่อากาศหนึ่งตันเช่นกัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน (Global Warming) โดยมีการผลิตปูนซีเมนต์เกือบทุกประเทศทั่วโลก แต่สำหรับวัสดุประสานจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาโลกร้อนได้ เนื่องจากการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการความร้อนที่สูงในการปรับสภาพหินปูนเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ และสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุดิบสามารถหาได้ทั่วไป โดยเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และดินขาว เป็นต้น ซึ่งนำไปสู่การลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่อากาศได้เป็นอย่างดี

3. เศรษฐศาสตร์

การผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะใช้ต้นทุนที่ต่ำ เนื่องจากจะใช้ของเสียที่ได้จากกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ให้คุณสมบัติทางด้านกำลังที่สูงในระยะเวลาอันสั้น แม้ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะต้องการความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดสมบูร์ณ แต่อุณหภูมิที่ใช้จะไม่สูงมากนัก คือ ที่ประมาณ 45-90 องศาเซลเซียส หากต้องการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ หรือชิ้นส่วนก่อสร้าง เช่น เสา คาน ผนัง และพื้นสำเร็จรูป สามารถใช้ผลิตเหมือนคอนกรีตสำเร็จ (Precast Concrete) ได้ ซึ่งเหมาะสมกับงานที่ต้องการค่ากำลังอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น ในปัจจุบันจะเห็นว่าคอนกรีตหล่อสำเร็จเป็นที่ต้องการของตลาดมาก เนื่องจากสะดวกและใช้เวลาอันรวดเร็วในการทำงาน ดังนั้นวัสดุจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับงานคอนกรีต ที่สามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้

เอกสารอ้างอิง

1. J. Davidovits, "Chemistry of geopolymeric systems, Terminology in Geopolymer '99' International Conference, France, 1999.
2. D. Harjito, SE. Wallah, MJ. Sumajouw and V. Rangan, "On the development of fly ash-based geopolymer concrete", ACI Materials Journal, 2005.
3. Geopolymer '99, International Conference and Publisher in the Proceeding of Geopolymer '99, <http://www.geopolymer.org>
4. J. Davidovits, "Chemistry of Geopolymeric Systems. Terminology" CD-ROM Proceedings of Second International Conference on Geopolymers, Universite de Picardie, Saint Quentin, France, 1999.
5. J. Davidovits, "Properties of Geopolymer Cements", Vol. 1 pp. 131-144 In Proc. First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 1994.

