

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการศึกษาและพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมาและเกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้

2.1 สารจีโอโพลิเมอร์

สารจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali Hydroxide) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate Solution) และเร่งปฏิกิริยาคด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้กำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพส สารปอซโซลานที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เถ้าถ่านหินและดินขาวเผา

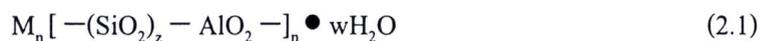
วัสดุจีโอโพลิเมอร์นี้ค้นพบเป็นครั้งแรกในยูเครน แต่เรียกว่าดิน-ซีเมนต์ (Soil-Cement) การวิจัยในเชิงลึกเริ่มในปี ค.ศ. 1976 โดย Davidovits [4] ได้มีการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของสารนี้ อย่างละเอียดและได้ตั้งชื่อสารนี้ว่าสารจีโอโพลิเมอร์และได้จัดทำเผยแพร่เอกสารและจดสิทธิบัตรไว้หลายชิ้น [1,4] และได้สาธิตให้เห็นถึงประโยชน์ในการนำมาใช้งาน สารจีโอโพลิเมอร์สามารถผลิตขึ้นมาได้จากสารที่มาจากเถ้าถ่านหินหรือจากดินขาวเผา (Metakaolinite, $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 700 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่โครงสร้างวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ประกอบไปด้วย ซิลิกอนเตตระวาเลนต์ (Si^{4+}) และอลูมิเนียมไตรวาเลนต์ (Al^{3+}) ที่เกิดโคออดิเนตแบบ 4 แขน (IV-Fold Coordination) กับออกซิเจน เกิดเป็นโครงสร้างรูปปริมาตรสามเหลี่ยมด้านเท่า 4 ด้าน (Tetrahedral) และได้มีพัฒนาการนำไปใช้อย่างหลากหลายขณะนี้มีการวิจัยกันอย่างแพร่หลายอยู่ทั่วโลก เช่น ออสเตรเลีย อเมริกา และนิวซีแลนด์ [5]

2.2 ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมจะมีปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หลังจากนั้นสารปอซโซลาน คือเถ้าถ่านหินซึ่งมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และได้สารโคแคลเซียมซิลิเกต

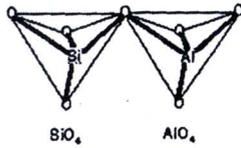
($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการปอซโซลานจะแตกต่างจากกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยองค์ประกอบทางเคมีจะคล้ายกับซีโอไลต์แต่อนุภาคจะมีลักษณะเป็นอสัณฐาน [5] อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมา ก็ไม่อาจสรุปถึงกระบวนการเกิดโพลิเมอร์ที่แท้จริงได้ มีนักวิจัยหลายกลุ่ม [2,3] ได้พยายามผลิตคอนกรีตโดยใช้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน โดยคอนกรีตที่ได้จะมีส่วนประกอบของทรายและหินประมาณร้อยละ 70-80 และมีเถ้านหินเป็นวัสดุประสานหลัก ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน

ปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ กับสารละลายซิลิเกต และสารละลายเบสความเข้มข้นสูง เรียกว่าปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ทำให้ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีคุณสมบัติคล้ายสารซีเมนต์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) [5] หรือมีสูตรทางเคมี คือ

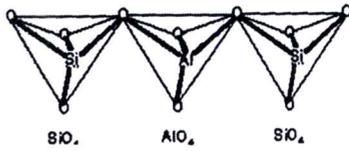
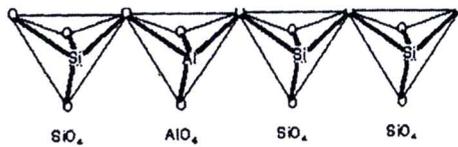


- เมื่อ M คือธาตุโลหะอัลคาไล — คือการยึดเกาะพันธะ
 z คือจำนวนโมเลกุลของ SiO_2 เป็นตัวเลข 1, 2 หรือ 3
 w คือจำนวนโมเลกุลของน้ำ
 n คือจำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่ หรือ Degree of Polycondensation

ผลผลิตของปฏิกิริยาเบื้องต้นเป็นหน่วยปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si^{4+} และ Al^{3+} ที่เกิดโคออดิเนต 4 แขนกับออกซิเจน หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกันในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (Meta-Stable) ซึ่งจะมีปริมาณอลูมิเนียมสูงเมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มีซิลิกอนมากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยปิรามิด สามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และ สี่หน่วยได้แก่ โพลีไซอะเลต (Polysialate, PS) โพลีไซอะเลตซิลอกโซ (Polysialatesiloxo, PSS) และ โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (Polysialatedisiloxo, PSDS) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ปริมาณ SiO_4 เพิ่มขึ้นจากหนึ่งเป็นสามหน่วย เมื่อปฏิกิริยา เกิดมากขึ้นการเชื่อมโยงของโพลิเมอร์ที่เชื่อมโยงในแนวราบจะเกิดมากขึ้นและหนาแน่นขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรง และสามารถรับแรงได้

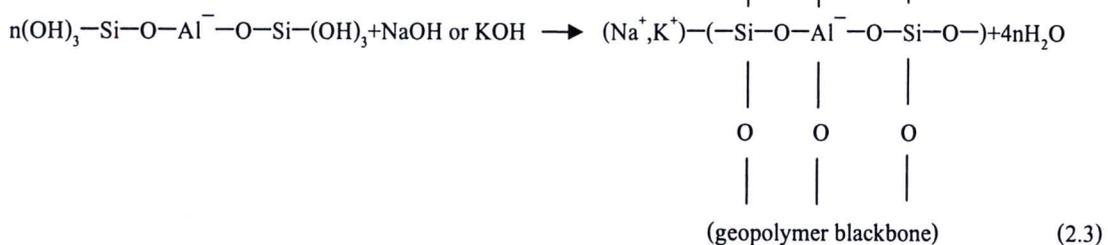
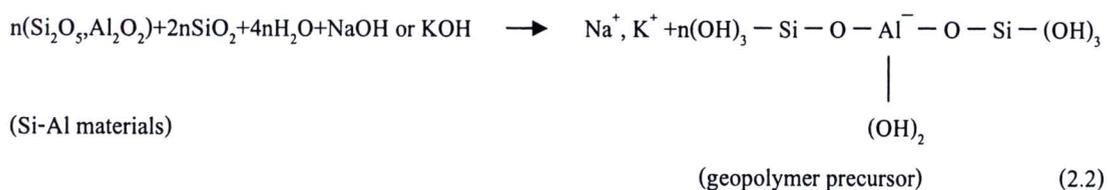


โพลีไซอะเลต(Polysialate, PS)

โพลีไซอะเลตไซลอกโซ
(Polysialate Siloxo, PSS)โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ
(Polysialate Disiloxo, PSDS)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของวัสดุจีโอโพลิเมอร์หรือโพลีไซอะเลต [9]

ปฏิกิริยาลูกโซ่ของจีโอโพลิเมอร์มีความซับซ้อนมากและยังไม่สามารถอธิบายได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามสามารถเขียนปฏิกิริยาหลัก [9] ได้ดังสมการโดยสารประกอบซิลิกาและอลูมินา เมื่อผสมกับสารละลายไฮดรอกไซด์ซิลิเกตและน้ำจะทำปฏิกิริยาได้เป็นหน่วยโพลีไซอะเลตที่มีประจุบวกของอัลคาไลทำให้เกิดความสมดุล ดังแสดงในสมการที่ 2.2 หน่วยโพลีไซอะเลตจะทำปฏิกิริยากับอัลคาไลไฮดรอกไซด์ต่อเกิดเป็นลูกโซ่โพลิเมอร์ที่เชื่อมโยงขวางกันดังแสดง ในสมการ 2.3



โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si : Al บอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งานวัสดุนั้น เช่น อัตราส่วน 1, 2 และ 3 ทำให้ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นสามมิติ หากอัตราส่วนสูงกว่าสาม จะเกิดการ

เชื่อมขวางขึ้น หรืออัตราส่วน 15 หรือมากกว่า ทำให้ได้สารประกอบโพลิเมอร์มากขึ้น ตัวอย่างคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ เป็นดังนี้ [10]

อัตราส่วน 2:1 เหมาะสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต

อัตราส่วน 3:1 สารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททานเนียมที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200 - 1,000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วน 20:1 ถึง 35:1 ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ในสองมิติมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (High Performance Fiber Composites)

2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่างแก่ที่สามารถละลายได้ในน้ำ ผลิตจากกระบวนการแยกสารทางไฟฟ้า (Electrolysis) ของสารละลายเกลือ เป็นสารที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือที่เรียกกันว่าโซดาไฟ ถูกใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเรา และยังใช้ประโยชน์ได้อีกมากมาย เช่น ในการผลิตเยื่อและกระดาษ สบู่และผลิตภัณฑ์ซักฟอก เคมีภัณฑ์ การทำความสะอาด โรงกลั่นน้ำมัน การใช้งานทางอุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมอาหาร เส้นใยเรยอน สิ่งทอ และอื่นๆ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟ อาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด [27] คือ

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว หมายถึง สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ ลักษณะทั่วไปเป็นของเหลวขุ่น ไม่มีสี
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นก้อน เป็นเม็ดหรือเป็นเกล็ด ลักษณะทั่วไป เป็นของแข็ง สีขาวสะอาดชนิดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ชนิดที่ 2 และถูกนำมาละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการ

2.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นด่าง ลักษณะทั่วไปไม่มีสี หรือมีสีเทาอ่อน โดยชนิดที่เลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ชนิดที่ 2 มีอัตราส่วนโดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 1 : 2.24 ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว [28]

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วนโดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$)	1:1.97 ถึง 1: 2.17	1:2.34 ถึง 1: 2.58	1:3.18 ถึง 1: 3.59
เหล็ก ร้อยละ ไม่เกิน	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ร้อยละ ไม่เกิน	0.21	0.21	0.21

2.5 แรงยึดเหนี่ยวในการฝังยึด

เมื่อคอนกรีตกับเหล็กยึดจับกันจะเกิดแรงต้านต่อแรงดึงออกหรืออัดเข้าแรง ด้านนี้จะช่วยจับยึดไม่ให้เหล็กนั้นรูดไถลไปตามแนวแรงนั้นเรียกแรงต้านนี้ว่า แรงยึดเหนี่ยว (Bond Stress) หรือ หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Bond Unit Stress) กรณีที่เป็นแรงดึงหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กนั้นจะค่อยๆลดต่ำลงจากปลายด้านที่ถูกดึงไปเป็นศูนย์ที่ปลายด้านที่ฝังอยู่ในคอนกรีต สำหรับกรณีเป็นแรงอัดนอกจากกำลังยึดเหนี่ยวแล้วยังมีกำลังรับแรงแบกทานกระทำที่ปลายเหล็กเส้นช่วยกันจับยึดและด้านไม่ให้เหล็กนั้นรูดไถลไปตามแรงอัดนั้น ในสองกรณีที่กล่าวมาเหล็กจะต้องมีระยะฝังยึด (Anchorage หรือ Development Length) ในคอนกรีตยาวมากพอที่จะทำให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ที่ผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสอง เพื่อให้สามารถรับแรงดึงตามที่ต้องการได้อย่างปลอดภัยและสามารถต้านการรูดไถลของเหล็กได้

2.6 ลักษณะองค์ประกอบของแรงยึดเหนี่ยว

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมสามารถแยกได้เป็นดังนี้

- 1) แรงยึดเหนี่ยวแบบสารเคมีของปูนซีเมนต์ (Chemical Adhesion) เป็นแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์เมื่อผสมน้ำ ซึ่งทำให้เม็ดปูนยึดเกาะกัน มีความแข็งแรง มีกำลังด้านแรงดึงได้
- 2) แรงเสียดทานระหว่างเหล็กกับคอนกรีต (Mechanical Friction) เป็นแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุ คือเหล็กกับคอนกรีต เนื่องจากผิวทั้งสองชนิดสามารถยึดติดกัน ทำให้เกิดแรงต้านเมื่อมีแรงมาดึงหรืออัด

2.7 ระยะฝังยึดเหล็กเสริม

เหล็กเสริมต้องมีการจับยึดกับคอนกรีตอย่างสมบูรณ์โดยเหล็กเสริมต้องไม่รูดหรือลื่นไถล (slip) หลุดจากคอนกรีตที่หุ้มห่อแต่อย่างใด หรือถ้ามีการลื่นไถลเกิดขึ้นบ้างก็จะสมมุติว่ามีค่าน้อยมากมีฉะนั้นเหล็กเสริมจะไม่สามารถรับแรงได้ตามต้องการอันเป็นเหตุให้ส่วนของโครงสร้างไม่สามารถรับ

นำหน้าบรรทุกได้ตามที่ต้องการ ความต้านทานต่อการลื่นไถลดังกล่าวได้จากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมและแรงเฉือนรอบผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมในขณะที่ยึดหน้าหน้าบรรทุก

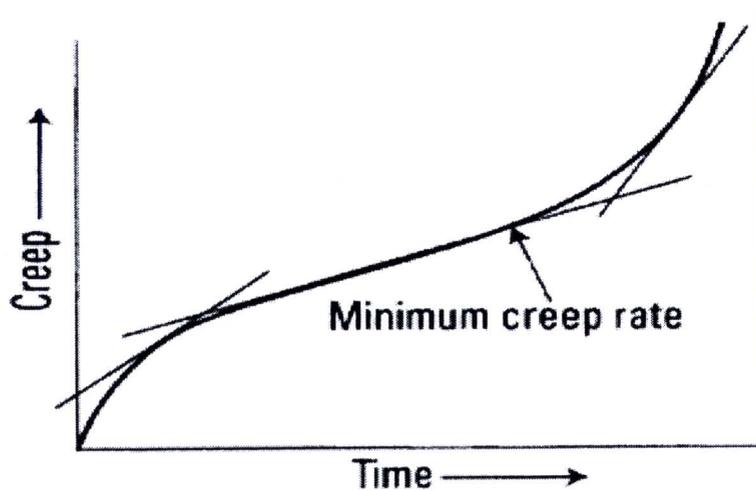
กำลังยึดเหนี่ยวสำหรับเหล็กกลมผิวเรียบกับคอนกรีตได้จากสองแบบแรกซึ่งขึ้นกับการทำคอนกรีต (การผสม การเท และการทำให้แน่น) แต่กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กกลมผิวเรียบมีค่าไม่มากนัก อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถเพิ่มกำลังยึดเหนี่ยวให้มากขึ้นได้อีกโดยการทำให้เกิดการยึดรั้งทางกล เช่น การงอข้อที่ปลายของเหล็กเสริมกลมเรียบและให้มีระยะฝังยึดในคอนกรีตอย่างพอเพียง หรือทำผิวของเหล็กเสริมให้มีข้อหรือปล้อง เช่น เหล็กข้ออ้อย เป็นต้น การวิบัติเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (Bond Failure) เป็นแบบการปริแยกของคอนกรีต (Splitting) ตามแนวยาวของเหล็กเสริม และมักเกิดขึ้นหลังจากที่ปรากฏรอยร้าวในแนวทแยงที่เป็นผลมาจากแรงดึงทแยง ซึ่งเมื่อรวมผลของการเฉือนในเหล็กเสริม (Dowel Action) ก็จะช่วยเร่งให้รอยปริแยกเคลื่อนที่เข้าหาจุดรองรับเร็วขึ้น หากปลายของส่วนโครงสร้างปราศจากการยึดรั้งที่เพียงพอก็จะเกิดการวิบัติทันที ผลจากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่สำคัญนอกเหนือจากกำลังของวัสดุและขนาดของเหล็กเสริมที่ใช้ กำลังยึดเหนี่ยวยังขึ้นกับระยะคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม และการเสริมเหล็กทางขวาง หากระยะของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมมีค่ามากพอ คอนกรีตจะสามารถต้านทานแรงดึงได้มากขึ้นและช่วยชะลอการแตกหรือแยกออกในแนวตั้งได้ นอกจากนี้ หากส่วนโครงสร้างนั้นมีเหล็กเสริมทางขวาง เช่น เหล็กผูกตั้ง กำลังต้านทานแรงดึงทแยงก็จะมากขึ้นซึ่งช่วยชะลอการเกิดรอยร้าวจากแรงดึงทแยง นั้นเสมือนว่าเหล็กเสริมทางขวางช่วยชะลอการแตกหรือปริแยกออกทั้งในแนวตั้งและในแนวนอน ทำให้ช่วยลดระยะที่จะต้องฝังเหล็กเสริมในคอนกรีตลงได้

2.8 ความคงทนของวัสดุเมื่อรับแรงกระทำคงค้างหรือพฤติกรรมการคืบ

(Creep)

การคืบเป็นสมบัติทางกลระยะยาวของวัสดุที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่ออายุการใช้งานของวัสดุ โดยเฉพาะต่อวัสดุที่มีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไประดับหนึ่ง หากวัสดุนั้นแสดงสมบัติยืดหยุ่น ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างฉับพลันและมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่เพิ่มมากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม หากวัสดุนั้นแสดงสมบัติหนืด การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุก็จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ในกรณีของพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่มีลักษณะแบบวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) ทำให้การตอบสนองต่อแรงกระทำที่คงที่เป็นระยะเวลานาน จึงจะประกอบไปด้วยการตอบสนองแบบฉับพลันของวัสดุแบบยืดหยุ่นและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพิ่มขึ้นเมื่อเวลา

เปลี่ยนไป ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ภายใต้แรงกระทำที่คงที่เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปนี้เอง คือ การคืบตัวของวัสดุ



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของการคืบตัวของวัสดุ [33]

โดยทั่วไปการทดสอบการคืบตัว จะเป็นการให้แรงกระทำหรือความเค้นที่คงที่แก่ชิ้นงานทดสอบ จากนั้นก็จะทำการวัดระดับของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือความเครียดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป หากนำค่าการเสียรูปหรือความเครียดที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาสร้างกราฟความสัมพันธ์ จะได้กราฟของการคืบตัว (Creep Curve) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระยะได้แก่ระยะที่ 1 (Primary Stage) ซึ่งจะแสดงให้เห็นโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นอย่างทันทีเมื่อได้รับภาระและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดที่ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้น ในบางครั้งจึงเรียกชื่อการคืบตัวเป็นระยะแรกนี้ว่า การคืบตัวอย่างฉับพลัน (Instantaneous Creep) ระยะที่ 2 (Secondary Stage) ซึ่งจะแสดงให้เห็นโดยเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดที่มีอัตราคงที่ ดังนั้น ในบางครั้งจึงเรียกชื่อการคืบตัวระยะที่ 2 นี้ว่า การคืบตัวที่อัตราคงที่ (Constant Rate creep) ระยะที่ 3 (Tertiary Stage) ซึ่งจะแสดงให้เห็นโดยเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและนำไปสู่การแตกหักหักของพลาสติกในที่สุด ดังนั้น ในบางครั้งจึงเรียกชื่อการคืบตัวระยะที่ 3 นี้ว่า การเสียหายจากการคืบตัว (Creep Rupture)

2.9 ความคงทนของวัสดุเมื่อรับแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาหรือพฤติกรรมการล้า

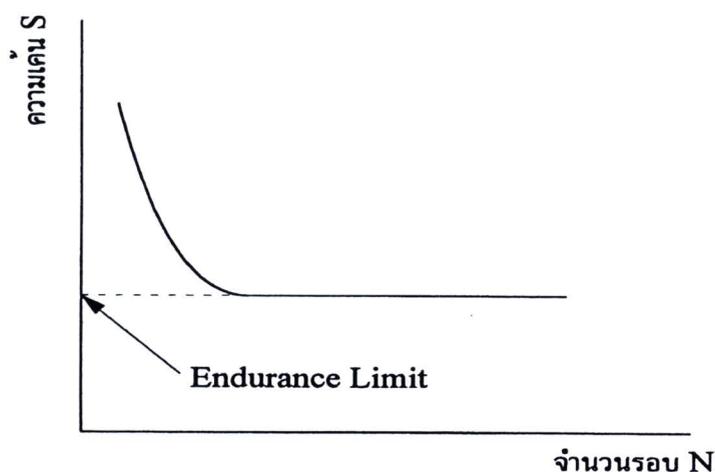
(Fatigue)

เมื่อวัสดุถูกแรงซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) มากระทำกลับไปกลับมาซ้ำกันก็อาจจะเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากเกิดความล้าหรือ Fatigue ขึ้น ความล้าที่เกิดในวัสดุนี้เป็นสาเหตุใหญ่ของการเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่าง ๆ เพราะตลอดอายุงานของเครื่องจักร เช่น เครื่องยนต์

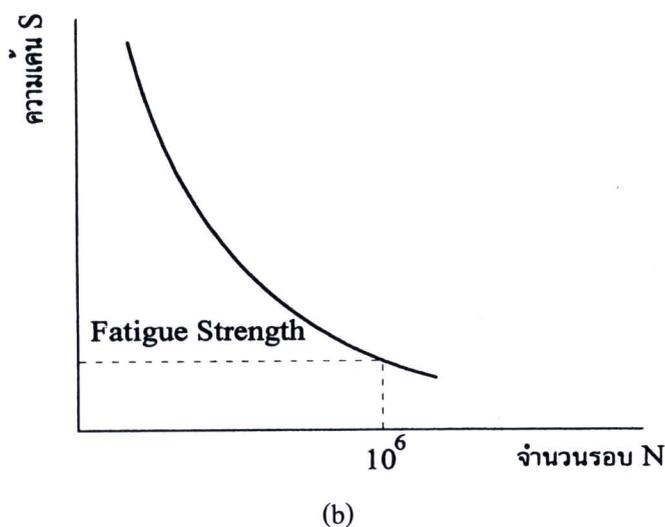
สวิตช์รีเลย์ ฯลฯ จะต้องเกิดความเค้นสลับไปสลับมาเป็นล้าน ๆ ครั้ง ทำให้เกิดการล้าขึ้นในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของมันได้ ขบวนการเกิดความล้าที่แท้จริงยังไม่เป็นที่เข้าใจดีนัก แต่จากการศึกษาพบว่าความล้าจะเกิดเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกจะเกิดรอยแตกขึ้น เมื่อมีความเค้นรวมศูนย์ (Stress Concentration) ในบริเวณนั้น และในระยะที่สอง เมื่อมีความเค้นเข้าไปซ้ำมารอยแตกนี้ก็จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลง จนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด วัสดุก็จะแตกหักจากกัน

ถ้าเรากำหนดจำนวนรอบของความเค้นที่ทำซ้ำไปซ้ำมาแล้ว (โดยปกติจะใช้ที่ค่า 10^6 รอบ) ค่าความเค้นที่จะทำให้วัสดุแตกหักได้ที่จำนวนรอบของความเค้นรอบนั้นๆ เราเรียกว่า Fatigue Strength สำหรับโลหะ โดยเฉพาะพวกเหล็กจะมีค่าความเค้นอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าใช้ความเค้นต่ำกว่านี้แล้วไม่ว่าจำนวนรอบของแรงกระทำจะเป็นเท่าใดวัสดุจะไม่แตกออก ค่าความเค้นนี้เรียกว่า Endurance Limit

การทดสอบความล้ามีอยู่หลายวิธีแต่โดยหลักการจะเหมือนกันคือ จะให้แรงกระทำเป็นรอบกับชิ้นทดสอบ โดยให้เกิดความเค้นค่าต่างๆ แล้วบันทึกจำนวนรอบ (Cycles) ที่วัสดุจะทนได้ไว้ จากนั้นนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.3 เรียกว่า S-N Curve สำหรับโลหะในกลุ่มเหล็กเกือบทั้งหมดและโลหะที่ไม่ใช่เหล็กบางชนิด จะมี Endurance Limit ดังรูป 2.3(a) ส่วนพวกโพลีเมอร์และโลหะที่ไม่ใช่เหล็กหลายชนิดจะไม่มี Endurance Limit ดังรูป 2.3(b) สำหรับโลหะที่มี Endurance Limit นั้น ค่า Endurance Limit จะมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงสูงสุด กล่าวคือพวกเหล็กกล้าที่ขึ้นรูปแล้ว จะมีค่า Endurance Limit ที่ครึ่งหนึ่งของค่าความแข็งแรงสูงสุด ส่วนโลหะผสมทองแดงจะอยู่ประมาณ 25-50% ของความแข็งแรงสูงสุด สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต้องรับแรงสลับ ก็คงต้องคำนึงถึงเรื่องของความล้าด้วย และพยายามออกแบบให้รับความเค้นต่ำกว่า Endurance Limit หรือ Fatigue Strength ตามแต่กรณี



(a)



รูปที่ 2.3 S-N Curve สองลักษณะคือ (a) ในวัสดุที่มี Endurance Limit และ (b) ในวัสดุที่ไม่มี Endurance Limit [33]

2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Davidovits [1] ได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ โดยพบว่ามีการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น เมื่อมีอัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลิเมอร์ระหว่างโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 0.20-0.28, ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่อลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 3.50-4.50, น้ำ (H_2O) ต่อโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 15-17.5 และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 0.80-1.20

นอกจากนี้ Hardjito และคณะ [2] ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมต่างๆ และอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ ระหว่าง 0.095 ถึง 0.120 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดมากนัก ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อโซเดียมออกไซด์ และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์ มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต และกำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ในขณะที่การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้การรับกำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินชนิดแคลเซียมต่ำมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์มากกว่าเนื่องจากจะทำให้ จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้น

ในเวลาต่อมา Hardjito และคณะ [3] ยังศึกษาพบว่า จีโอโพลิเมอร์หรือเรียกอลูมิโน-ซิลิเกตโพลิเมอร์ที่ผลิตจากวัสดุที่มีซิลิกอนและอลูมินัม ในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถ้าถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลต์ โครงสร้างของ

จีโอโพลิเมอร์ในระดับ โมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว จากผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์ เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลิเมอร์มี คุณสมบัติที่เหมาะสม และมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย แต่ยังมีเรื่องต้องศึกษาเพิ่มเติม เพื่อสร้าง มาตรฐานในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์อีกมาก

ในเวลาต่อมา Davidovits [11] ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์ เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerisation) เกิดเป็นโครงสร้างแบบซีโอไลติก (Zeolitic) นอกจากนั้นคุณสมบัติของ จีโอโพลิเมอร์ยังสามารถเติมสารต่างๆเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับ จีโอโพลิเมอร์ สามารถพบเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ในโครงสร้างยานยนต์และอากาศยาน อุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆ จีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 MPa มี คุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลท์ นอกจากมีความแข็งแรง หดตัวน้อย ทนความเย็นและต้านทานการสึก กร่อน ทำให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบที่จะใช้กับ โครงสร้างระยะยาวที่ ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อน ในด้านการคำนวณต้นทุนโดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมพบว่าการใช้วัสดุจีโอ โพลิเมอร์ดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในด้านการผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการ เผาด้วยอุณหภูมิสูงที่ต้องใช้เชื้อเพลิงมากในการเตรียม ส่วนประกอบและไม่เกิดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ CO₂ มากเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Hu และคณะ [12] ศึกษาถึงการนำเอาจีโอโพลิเมอร์เพสต์ไปใช้ในงานซ่อมแซม โดยเลือกใช้วัสดุที่จะ นำไปใช้ในงานซ่อมแซมสามแบบด้วยกันคือ ซีเมนต์เพสต์, จีโอโพลิเมอร์เพสต์ และจีโอโพลิเมอร์ เพสต์ที่ผสมผงเหล็ก จากการศึกษาพบว่าการใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ในงานซ่อมแซม จะดีกว่าการใช้ ซีเมนต์เพสต์ และเมื่อทำการเพิ่มผงเหล็กเข้าไปมีผลดีที่สุดเพราะการที่ใส่ผงเหล็กเข้าไปจะช่วยในการ ด้านการสึกกร่อนได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ มี ความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานซ่อมแซม มากกว่าการใช้ซีเมนต์เพสต์ทั่วไป

Saccani และ Magnaghi [13] ได้ศึกษาถึงการนำเอา Epoxy Resin มาเป็นวัสดุพื้นฐานในการใช้เป็น วัสดุซ่อมแซมกรณีเกิดความเสียหายในงานปูนซีเมนต์โดย Epoxy เป็นที่นิยมและรู้จักกันมาก่อนใน การใช้ในงานซ่อมแซมหรือนำมาประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมซึ่งผลสรุปได้ว่าอิพ็อกซีสามารถเป็น วัสดุประสานได้อย่างดีเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีและมีกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวที่สูงเนื่องจาก โครงสร้างที่มีลักษณะเดียวกัน



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 7 ก.ย. 2555
เลขทะเบียน 249374
เลขเรียกหนังสือ