

## วัสดุจีโอโพลิเมอร์: ทางเลือกใหม่สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง

สกลวรรณ ท่านจิตสุวรรณ<sup>1</sup> ธนากร ภูเงินคำ<sup>2</sup> และ ปริญญา จินดาประเสริฐ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, hanjitsuwan@gmail.com

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา, tanakorn.ph@rmuti.ac.th

<sup>3</sup>ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น, prinya@kku.ac.th

### 1. จีโอโพลิเมอร์คืออะไร

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุสังเคราะห์ชนิดอนินทรีย์โพลิเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในรูปอสัณฐานมาทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์เพื่อให้เกิดการชะละลายของซิลิกอนไอออน ( $Si^{4+}$ ) และอะลูมิเนียมไอออน ( $Al^{3+}$ ) จากวัสดุตั้งต้นเมื่อระบบมีไอออนดังกล่าวเพียงพอจะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนและเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างใหม่และมีการเติมสารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกตเพื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนไอออนที่พร้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาให้ระบบของจีโอโพลิเมอร์และทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้เกิดการเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง โดยในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาจะได้โครงสร้างกึ่งเสถียร (Meta-stable) ที่มีองค์ประกอบของอะลูมินามาก เมื่อเวลาการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโครงสร้างดังกล่าวจะมีองค์ประกอบของซิลิกาเพิ่มขึ้น เนื่องจากอะลูมินามีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเมื่อเทียบกับซิลิกาทำให้ช่วงต้นของปฏิกิริยามีองค์ประกอบของอะลูมินามาก โดยที่อะลูมินามีมากกว่าซิลิกาในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากพันธะของ Al-O มีความแข็งแรงน้อยกว่า Si-O ทำให้พันธะถูกทำลายด้วยสารละลายต่างได้ง่ายกว่า (Fernandez-Jimenez, Palomo, 2005) ซึ่งแต่ละโมเลกุลจะทำปฏิกิริยาต่อกันให้ได้โมเลกุลมีการเชื่อมขวางกันมากขึ้น โครงสร้างโมเลกุลที่ได้หลังจากปฏิกิริยาจึงมีความหนาแน่นขึ้นและสามารถรับแรงได้ ซึ่งวัสดุจีโอโพลิเมอร์สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้องหรือใช้ความร้อนไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยา (Khale, Chaudhary, 2007)

ลักษณะโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยโมเลกุลซิลิกาโพลิเมอร์ของโครงสร้างซิลิเกตเททระฮีดรอน ( $Si(OH)_4$ ) และอะลูมิเนียมเตทระฮีดรอน ( $(Al(OH)_4)^-$ ) เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวและก่อตัวรวมกันเป็นโครงข่ายสามมิติโดยมีหน่วยหลักของโครงสร้างที่เรียกว่าโซอะเลต ( $Sialate, -Si-O-Al-O-$ ) และมีโลหะอัลคาไลน์ เช่น  $Li^+, Na^+, K^+$  หรือโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท เช่น  $Ca^{2+}, Mg^{2+}$  ทำหน้าที่ปรับสมดุล ณ ตำแหน่งของอะลูมิเนียมในโครงสร้างอะลูมิเนียมเตทระฮีดรอน และลักษณะโครงสร้างหลักสามมิติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยพีระมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน (หรือเททระฮีดรอน) จำนวนสอง สาม และสี่หน่วย

### 2. วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์

1) วัสดุตั้งต้น (Starting materials) วัสดุตั้งต้นควรมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีหรือว่องไวต่อการถูกละลาย โดยสารตั้งต้นอาจจะผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน (Heat treatment or calcination)

ทางกล (Mechanical) หรือทางเคมี (Chemical) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสามอย่างมาก่อนเพื่อให้เกิดการละลายได้ง่าย และมีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในส่วนของสัณฐาน ได้แก่ วัสดุปฐมภูมิ (Primary source) และวัสดุทุติยภูมิ (Secondary source) ซึ่งวัสดุปฐมภูมิจะต้องผ่านเผาเพื่อปรับเปลี่ยนลักษณะทางโครงสร้างให้กับวัสดุตั้งต้นก่อนจึงจะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ เช่น ดินขาวเกาหลี (Kaolin,  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) มีโครงสร้างที่เสถียรเมื่อนำไปเผาแคลไซน์จะได้ดินขาวเผาหรือเมตาเกาหลี (Metakaolin,  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) ซึ่งโมเลกุลของน้ำ 2 โมเลกุลในโครงสร้างอะลูมิเนียมออกไซด์รอน ( $(Al(OH)_6)^{3+}$ ) หลุดออกไปและเปลี่ยนเป็นโครงสร้างอะลูมิเนียมเทตระไฮดรอน ( $(Al(OH)_4)^-$ ) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีมากขึ้น กล่าวคือ อะลูมิเนียมไอออน ( $Al^{3+}$ ) ในโครงสร้างเทตระไฮดรอนมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอะลูมิเนียมไอออนในโครงสร้างออกไซด์รอน ขณะที่วัสดุทุติยภูมิ (Secondary source) หรือวัสดุพลอยได้ (By-product) เช่น เถ้าลอย เถ้าหนัก ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก (Blast furnace slag) และเถ้าแกลบ (Rice husk ash) วัสดุดังกล่าวได้ผ่านการให้ความร้อนจากกระบวนการผลิตมาแล้วจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นได้

2) สารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) สารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะหมู่ 1 และ 2 มีความเป็นต่างแก่ที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ทั้งหมดในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ สารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ชะละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมไอออนจากส่วนสัณฐานของวัสดุตั้งต้น เนื่องจากอะตอมที่ต้องการละลายออกมามีอยู่ในรูปไอออนบวกที่มีความเป็นกรดสูง (Acidic cation) คือ ซิลิกอนและอะลูมิเนียมไอออนจึงจำเป็นต้องใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูง (Basic cation) คือ โซเดียมและโพแทสเซียมไอออนในการชะละลาย ซึ่งความสามารถในการละลายของไอออนจากวัสดุตั้งต้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากขนาดอะตอมของโซเดียมไอออนมีขนาดเล็กกว่าจึงง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยากับซิลิเกตมอนอเมอร์และซิลิเกตไดเมอร์ของวัสดุตั้งต้น (Xu, Van Deventer, 2000)

3) สารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkali silicate) สารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกตที่นิยมใช้ คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate,  $Na_2O \cdot n(SiO_2)$ ) ประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์และซิลิกาโดยมีสัดส่วนแตกต่างกันแล้วแต่ชนิดและการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น สารละลายโซเดียมซิลิเกต หรือน้ำแก้ว เป็นสารละลายใส สามารถละลายได้ในน้ำ และมีฤทธิ์เป็นด่าง เกิดจากการหลอมส่วนผสมระหว่างโซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ) หรือโซดาแอชกับทรายแก้ว เมื่อหลอมเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีแล้วจะได้โซเดียมซิลิเกตและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกตอีกชนิดที่นิยมใช้ คือ สารละลายโพแทสเซียมซิลิเกต ( $K_2SiO_3$ ) โดยในระบบจีโอโพลิเมอร์สารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกตมีหน้าที่เพิ่มปริมาณซิลิกอนไอออนที่พร้อมต่อปฏิกิริยาให้ระบบและช่วยในการก่อตัวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

### 3. ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์

1) วัสดุตั้งต้น การเลือกวัสดุตั้งต้นควรคำนึงถึงองค์ประกอบทางเคมี คือ มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก องค์ประกอบทางแร่จากผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ควรมีส่วนสัณฐานโดยซิลิเกตมอนอเมอร์ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และอะลูมิเนียมมอนอเมอร์ทำหน้าที่

เป็นตัวเริ่ม (Precursor) ในการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันโดยช่วยให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างซิลิกาเกตมอนอเมอร์เป็นโครงสร้างสามมิติของจีโอโพลีเมอร์ (Xu, Van Deventer, 2000)

2) ความเข้มข้นสารละลายอัลคาไลน์ เป็นปัจจัยสำคัญต่อความสามารถในการชะละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมไอออนจากวัสดุตั้งต้น ที่ความเข้มข้นสารละลายสูงทำให้ความสามารถในการละลายของไอออนจากวัสดุตั้งต้นเพิ่มขึ้น (Vargas et al., 2011) ทำให้ไอออนดังกล่าวมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาเพื่อเป็นวัสดุจีโอโพลีเมอร์มากขึ้น และที่ความเข้มข้นสารละลายสูงทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น (Rattanasak, Chindaprasirt, 2009)

3) อุณหภูมิบ่ม เร่งการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน ทำให้วัสดุจีโอโพลีเมอร์สามารถรับกำลังอัดได้รวดเร็วในเวลาบ่มสั้น เช่น ถ้าบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงด้วยเวลาบ่มสั้น ทำให้สามารถรับกำลังอัดได้ใกล้เคียงกับการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานาน อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มตัวอย่าง 40-90 องศาเซลเซียส (Swanepoel, Strydom, 2002)

4) อัตราส่วนโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) อัตราส่วนโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาของวัสดุตั้งต้นสามารถใช้คาดคะเนผลผลิตที่จะเกิดขึ้นหลังการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน และการนำวัสดุนี้ไปใช้ประโยชน์ อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสามารถใช้บ่งบอกความสามารถในการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดได้เบื้องต้น โดยในระบบจีโอโพลีเมอร์จากดินขาวเผาหรือเถ้าลอยแคลเซียมต่ำเมื่อระบบมีอัตราซิลิกาต่ออะลูมินามากหรือมีซิลิกามากส่งผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น และกรณีที่ระบบมีอะลูมินามากทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสั้นลง (De Silva et al., 2007) วัสดุจีโอโพลีเมอร์ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 3.0-3.8 จะมีความแข็งแรงและมีสมบัติทางกายภาพที่ดี (Duxson et al., 2005) นอกจากนี้ Davidovit (1982) ได้จดสิทธิบัตรเพื่อแนะนำอัตราส่วนโมลแต่ละออกไซด์เพื่อให้ได้วัสดุจีโอโพลีเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสม คือ  $(\text{M}_2\text{O})/\text{SiO}_2=0.25-0.28$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=4.0$ ,  $\text{H}_2\text{O}/(\text{M}_2\text{O})=16-17.5$ ,  $(\text{M}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3=1.0-1.14$  และ Khale, Chaudhary (2007) มีการปรับช่วงของอัตราส่วนโมลแต่ละออกไซด์เพื่อความเหมาะสม คือ  $(\text{M}_2\text{O})/\text{SiO}_2=0.20-0.48$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=3.3-4.5$ ,  $\text{H}_2\text{O}/(\text{M}_2\text{O})=10-25$ ,  $(\text{M}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3=0.8-1.6$  เมื่อ  $\text{M}_2\text{O}$  คือ  $\text{Na}_2\text{O}$  หรือ  $\text{K}_2\text{O}$

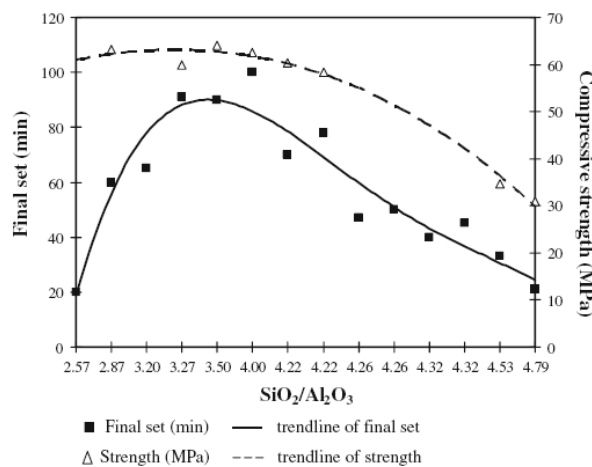
5) อัตราส่วนโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกา ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ) หรือโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด กล่าวคือ การเพิ่มปริมาณโซเดียมไอออนจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำให้การระเหยของน้ำและการเกิดโครงสร้างของวัสดุจีโอโพลีเมอร์ถูกขัดขวาง และถ้าระบบมีอัตราส่วนโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 1 หรือน้อยกว่า (Zhang et al., 2011) ทำให้ได้วัสดุจีโอโพลีเมอร์ที่ค่อนข้างเสถียรและสมบูรณ์

6) อัตราส่วนสารละลายต่อของแข็ง ถ้าอัตราส่วนสารละลายต่อของแข็งมีมากปริมาณน้ำส่วนเกินจากการทำปฏิกิริยาอาจมีผลทำให้เกิดผลึกของสารประกอบขึ้นภายในระบบ  $\text{M}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{M}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งอาจเป็นซีโอไลต์หรือสารประกอบที่ทำหน้าที่เชื่อมประสาน เช่น แคลเซียม-อะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H)

## 4. กลไกการเกิดปฏิกิริยาของระบบที่มีแคลเซียมออกไซด์และไม่มีแคลเซียมออกไซด์

1) ระบบที่ไม่มีแคลเซียมออกไซด์ (Non-calcium based geopolymer) หรือระบบธรรมดา (Conventional geopolymer) ลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบ  $\text{Na(K)O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  ซึ่งอัตราส่วนของ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นปัจจัยหลักในการกำหนดระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัด โดยที่การก่อตัวและการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เกิดเนื่องจากการเกิดสารประกอบโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรตเจล (N-A-S-H) โดยการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วนเท่ากับ 3.8 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดและระยะเวลาการก่อตัวที่ยาวนานที่สุด และที่อัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  น้อยกว่า 3.0 ลักษณะโครงสร้างผลึกของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะเป็นผลึก ทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำ (De Silva P, Sagoe-Crentsil K, 2008)

2) ระบบที่มีแคลเซียมออกไซด์ (Calcium based geopolymer) ลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบ  $\text{Na,K(Ca)O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  ใช้เวลาในการก่อตัวสั้นเนื่องจากการมีสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (C-A-S-H) ในระบบคล้ายกับการก่อตัวในระบบปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ประมาณ 4.0 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดและใช้ระยะเวลาการก่อตัวนานที่สุด สารประกอบที่ส่งผลต่อการพัฒนา กำลังรับแรงอัดคือสารประกอบโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรตเจล (N-A-S-H) กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาการก่อตัวของระบบจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง ดังแสดงในรูปที่ 1

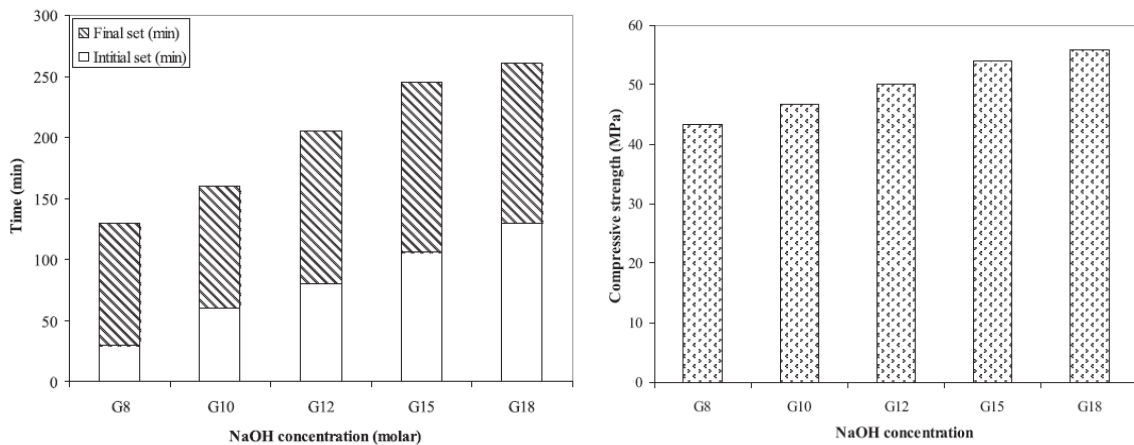


รูปที่ 1 กำลังรับแรงอัดและระยะเวลาการก่อตัวของระบบจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง (Chindapasirt, et al., 2012)

ในระบบเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน พบว่าที่ความเข้มข้นสารละลายอัลคาไลน์ต่ำ (ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนน้อย) ความสามารถในการชะละลายของซิลิกอนและอะลูมิเนียมไอออนมีน้อย (Rattanasak et al., 2009) แคลเซียมไอออนถูกชะละลายออกได้มาก (Phair et al., 2000) ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตหรือสารประกอบแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรตได้ ส่งผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสั้น (Alonso, Palomo, 2001; Chindapasirt et al., 2012) ซึ่งผลของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (C-A-S-H) ที่มีต่อการก่อตัวให้

ผลเหมือนกับปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบปูนซีเมนต์ ดังนั้นการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบสูงจึงสัมพันธ์กับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในระบบด้วย (Rattanasak et al., 2011; Chindaprasirt et al., 2012) และเมื่อใช้ความเข้มข้นสารละลายอัลคาไลน์ที่สูง พบว่าระบบมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนมากทำให้ความสามารถในการชะละลายของซิลิกาและอะลูมิเนียมไอออนเพิ่มขึ้น แต่การละลายของแคลเซียมไอออนลดลง (Phair et al., 2000) ดังนั้นการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์จึงขึ้นกับกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้เวลาในการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น (De Silva et al., 2007)

สำหรับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสารละลายไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น (Hanjitsuwan et al., 2014) เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นสารละลายเป็นการเพิ่มความสามารถในการละลายของไอออนจากวัสดุตั้งต้น ส่งผลให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์มากขึ้น ดังนั้นค่ากำลังรับแรงอัดจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (Rattanasak, Chindaprasirt, 2009) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดของระบบเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2



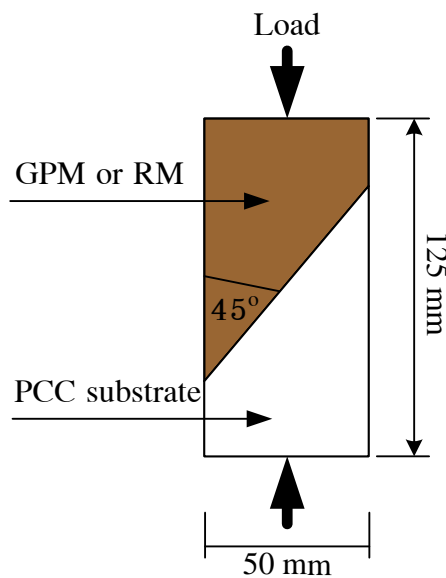
รูปที่ 2 ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดของระบบเถ้าลอยแคลเซียมสูง (Hanjitsuwan, et al., 2014)

### 5. แนวโน้มการประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์ในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้าง

การประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างในปัจจุบันยังไม่นิยมแพร่หลาย เนื่องจากยังเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่และกำลังพัฒนาเพื่อนำมาใช้งาน ปัจจุบันนักวิจัยเริ่มให้ความสำคัญกับเทคโนโลยีนี้มากขึ้น โดยคาดกันว่าจีโอโพลิเมอร์จะเข้ามาแทนที่วัสดุก่อสร้างอย่างซีเมนต์และคอนกรีตในอนาคต

ในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง เช่น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนเพื่อใช้ในงานถนนหรืองานทางเท้า เนื่องด้วยคอนกรีตพูนเป็นคอนกรีตที่มีโพรงช่องว่างต่อเนื่องที่ยอมให้น้ำไหลซึมผ่านได้ดี สามารถช่วยลดปัญหาการไหลนองของน้ำฝนและลดขนาดของระบบระบายน้ำได้ ขณะที่พื้นที่ด้านล่างได้ผิวทางสามารถใช้เป็นพื้นที่กักเก็บและชะลอปริมาณน้ำฝนได้ นอกจากนี้จะสามารถลดขนาดระบบระบายน้ำได้แล้วยังสามารถลดปัญหาการกัดเซาะตลิ่ง ลดการปนเปื้อนของน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยน้ำสามารถซึมลงสู่ชั้นดินด้านล่างทำให้คุณภาพของน้ำที่ไหลลงสู่ระบบแม่น้ำดีขึ้น อีกทั้งสามารถใช้เป็นพื้นที่บริเวณเขตเมืองร่วมกับการปลูกต้นไม้เพื่อเป็นพื้นที่สีเขียว

นอกจากนั้นงานวิจัยด้านการประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเป็นอีกหนึ่งงานที่จีโอโพลิเมอร์สามารถพัฒนาสำหรับใช้งานดังกล่าวได้ เนื่องด้วยจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการยึดเกาะ (Bond) ได้ดีมาก ซึ่งงานวิจัยในด้านนี้ เช่น การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวด้วยวิธีทดสอบแบบเฉียง (Slant shear test) เปรียบเทียบระหว่างจีโอโพลิเมอร์กับวัสดุซ่อมแซมตามท้องตลาด ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจีโอโพลิเมอร์มีการยึดเหนี่ยวใกล้เคียงกับวัสดุซ่อมแซมตามท้องตลาด (Phoo-ngernkham, et al. 2015) อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบทางด้านราคาแล้วพบว่าจีโอโพลิเมอร์มีราคาต้นทุนที่ถูกกว่าวัสดุซ่อมแซมตามท้องตลาดมาก (Pacheco-Torgal et al. 2008) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยศึกษาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่มีการใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเปรียบเทียบกับอีพ็อกซี แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุประสานระหว่างคอนกรีตกับเหล็กมีแรงยึดเหนี่ยวดีกว่าอีพ็อกซีตามท้องตลาดที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน (Songpiriyakij et al. 2011) จากเหตุผลดังกล่าวการใช้จีโอโพลิเมอร์จึงน่าจะเป็นหนึ่งในทางเลือกที่มีความเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุประสาน



รูปที่ 3 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวด้วยวิธีทดสอบแบบเฉียงอัตราระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์  
เปรียบเทียบกับอีพ็อกซี (Phoo-ngernkham, et al. 2015)

ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์แล้วพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นหนึ่งในวัสดุใหม่ที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์ยังคงต้องมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งในด้านทฤษฎีและภาคปฏิบัติเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ประกอบการในการเลือกใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- Alonso S. and Palomo A. (2001). Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide-metakaolin solid mixtures. **Cement and Concrete Research**, 31(1), 25-30.
- Chindaprasirt P., Silva, P.D., Sagoe-Crentsil K. and Hanjitsuwan S. (2012). Effect of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. **Journal of Materials Science**, 47(12), 4876-4883.
- Davidovits J. (1982). **Mineral Polymers and Methods of Making Them**. US Patent No. 4349386. Daniel L.Y.K. and Jay G.S. (2008). Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**, 30(10), 986-991.
- De Silva P., and Sagoe-Crenstil K. (2008). Medium-term phase stability of Na<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O geopolymer systems. **Cement and Concrete Research**, 38(6), 870-876.
- De Silva P., Sagoe-Crenstil K. and Sirivivatnanon V. (2007). Kinetics of geopolymerization: Role of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub>. **Cement and Concrete Research**, 37(4), 512-218.
- Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., Mallicoat S.W., Kriven, W.M. and Van Deventer, J.S.J. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces**, 269(1-3), 47-58.
- Fernandez-Jimenez A. and Palomo A. (2005). Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure. **Microporous and Mesoporous Materials**, 86(1-3), 207-214.
- Hanjitsuwan S., Hunpratub S., Thongbai P., Maensiri S., Sata V., Chindaprasirt P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. **Cement and Concrete Composites**, 45, 9-14.
- Pacheco-Torgal F., Castro-Gomes J. P. and Jalali S. (2008). Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment. **Construction and Building Materials**, 22(3), 154-161.
- Phair J.W., Van Deventer J.S.J. and Smith J.D. (2000). Mechanism of polysialation in the incorporation of zirconia into fly ash-based geopolymers. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 39(8), 2925-2934.
- Phoo-ngernkham T., Sata V., Hanjitsuwan S. Ridtirud C., Hatanaka S. and Chindaprasirt P. (2015). High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair materials. **Construction and Building Materials**, 98, 482-488.
- Rattanasak U. and Chindaprasirt P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. **Minerals Engineering**, 22(12), 1073-1078.
- Rattanasak U., Pankhet K. and Chindaprasirt P. (2011). Effect of chemical admixtures on properties of high-calicum fly ash geopolymer. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, 18(3), 364-369.

Songpiriyakij S., Kubprasit T., Jaturapitakkul C. and Chindaprasirt P. (2010). Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, **24**(3), 236-240.

Swanepoel J.C. and Strydom C.A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. **Applied Geochemistry**, **17**(8), 1143-1148.

Vargas A.S.D., Dal Molin D.C.C., Vilela A.C.F., De Silva F.J., Pavao B. and Veit, H. (2011). The effects of  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. **Cement and Concrete Composite**, **33**(6), 653-660.

Xu H. and Van Deventer J.S.J. (2000). The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. **International Journal of Mineral Processing**, **59**(3), 247-266.

Zhang L., Ahmari S. and Zhang J. (2011). Synthesis and characterization of fly ash modified mine tailings-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, **25**(9), 3373-3781.