

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เถ้าลอย

เถ้าลอย (fly ash) เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อใช้เป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน ถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงมายังก้นเตา เรียกว่า เถ้าก้นเตา (bottom ash) ส่วนถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึง 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน เรียกว่า เถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้ ทำให้เหมาะสำหรับใช้ในการก่อสร้างถนนและโครงสร้างการสร้างเขื่อน ฯลฯ (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2548; Ahmaruzzaman, 2010) สำหรับถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสามารถแบ่งได้ตามนี้

1. แอนทราไซต์ (anthracite)
2. บิทูมินัส (bituminous)
3. ซับบิทูมินัส (sub-bituminous)
4. ลิกไนต์ (lignite)
5. พีท (peat)

ถ่านหินที่คุณภาพดีที่สุดคือแอนทราไซต์ ให้ค่าอุณหภูมิความร้อนในการเผาไหม้สูงสุด ปริมาณความชื้นต่ำสุด ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัส ลิกไนต์และพีทตามลำดับ พีทเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำที่สุด ให้ค่าความร้อนต่ำสุดและมีความชื้นสูงที่สุด จึงไม่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2548)

2.2 การเผาถ่านหิน

การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาด้วยความร้อนสูง การเผาด้วยความร้อนปานกลาง และการเผาด้วยความร้อนต่ำ (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2548)

1. ระบบการเผาด้วยความร้อนสูง

ระบบนี้จะใช้อุณหภูมิในการเผาสูงถึง $1500-1700^{\circ}\text{C}$ เป็นระบบที่ใช้แรงลมหมุนวน ถ้ำลอยที่ได้จะหลอมละลายและปะทะรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน ได้เป็นถ้ำก้อนเตาตกลงในอ่างน้ำด้านล่าง ถ้ำลอยขนาดเล็กจากระบบการเผาจะมีปริมาณค่อนข้างน้อย และมักมีลักษณะเป็นเม็ดแก้วใส (vitreous particle)

2. ระบบการเผาด้วยความร้อนปานกลาง

ระบบนี้ใช้อุณหภูมิในการเผาในช่วงระหว่าง $1100-1400^{\circ}\text{C}$ เป็นระบบการเผาที่ใช้ถ่านหินบด (pulverized coal combustion, PCC) ถ้ำถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่เป็นถ้ำลอย ที่เหลือเป็นถ้ำหนักหรือถ้ำก้อนเตา ถ้ำลอยที่ได้จากกระบวนการเผาแบบนี้ประมาณร้อยละ 70-90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน และเป็นถ้ำลอยที่เหมาะสมในการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต หรือผลิตจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งโรงงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้าแม่เมาะใช้ระบบการเผาในลักษณะนี้

3. ระบบการเผาด้วยความร้อนต่ำ

ระบบนี้เป็นการเผาในเตาฟลูอิดไคซ์เบด (fluidizedbed combustion) อุณหภูมิที่ใช้ค่อนข้างต่ำ คือไม่เกิน 900°C ถ้ำที่ได้จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากถ้ำลอยที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้ แต่ก็ไม่ดีเท่าถ้ำลอยที่เผาด้วยความร้อนปานกลาง วิธีการเผาแบบนี้เริ่มมีมากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กตามโรงงานต่าง ๆ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548)

2.3 ชนิดของถ้ำลอย

มาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งถ้ำลอยออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ชนิด N (class N) คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ต้องปรับปรุงหรือไม่ต้องปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน เช่น หินพัมมิไซด์ (Pumicite) หินโอปอลไลน์ (Opaline) หินเชิร์ต (Cherts) และหินเชลล์ (Shales) และถ้ำภูเขาไฟ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ $500-1100^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสม เช่น ดินบางชนิด

2. ชนิด F (class F) คือ ถ้ำลอยที่เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ (anthracite) และบิทูมินัส (bituminous) มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (silica, SiO_2) อลูมินา (alumina, Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 (1991) โดยทั่วไปถ้ำลอยชนิดนี้จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) น้อยกว่าร้อยละ 5 มีคุณสมบัติซีเมนต์อยู่น้อย แต่มีคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน

3. ชนิด C (class C) คือ เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์ (lignite) และ ซับบิทูมินัส (subbituminous) มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 มีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM 618 (1991) ปริมาณ CaO มากกว่าร้อยละ 10 มีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์และคุณสมบัติวัสดุปอซโซลาน

องค์ประกอบซิลิกาที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Silica) ของสารปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในซีเมนต์เพสต์และให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$: C-S-H) ซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น อีกทั้งสารปอซโซลานยังช่วยลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อซัลเฟตรวมทั้งเพิ่มกำลังอัดด้วย (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2548; Jaturapitakkul et al., 2004; Sharma & Rastogi, 2013)

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด		
	N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	70.0	50.0
SO_3 อย่างสูง, ร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI), สูงสุดร้อยละ	10.0	6.0	6.0

*1. สารปอซโซลานชนิด N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan)

2. สามารถใช้เถ้าลอยชนิด F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งานหรือผลของการทดสอบที่เชื่อได้

2.4 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

รูปทรง ความละเอียด การกระจายของขนาดความหนาแน่น และส่วนประกอบของอนุภาคเถ้าลอยล้วนมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดคอนกรีตที่ก่้างแข็งตัว และการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เถ้าลอยอาจมีสีแตกต่างกันได้เนื่องจากแหล่งที่มาของถ่านหินที่มาจากที่ต่าง ๆ โดยทั่วไปสีของเถ้าลอยไม่มีผลต่อสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีต แต่อาจใช้เป็นตัวบ่งชี้ว่าเถ้าลอยมาจากแหล่งที่ต่างกัน หรือมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือผ่านสภาพการเผาไหม้ของถ่านหินที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (อนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2547; Kim et al., 2005)

2.5 รูปร่างของอนุภาคของเถ้าลอย

ขนาดอนุภาคและรูปร่างของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับแหล่งของถ่านหิน ความสม่ำเสมอและความละเอียดของถ่านหินขึ้นอยู่กับสภาพการเผา (ระดับอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจน) ความสม่ำเสมอของการเผาและวิธีการดักจับเถ้าลอย เช่น วิธีการแยกโดยเชิงกล (mechanical separator) โดยใช้ถุงเก็บ (bag filters) หรือโดยเครื่องดักจับแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitators) อนุภาคของเถ้าลอยส่วนใหญ่จะไม่ใช่ผลึก มีรูปร่างกลมซึ่งอาจตันหรือกลวง ลักษณะทรงกลมที่ภายในกลวง เรียกว่า เถ้าลอยกลวง (cenospheres) บางส่วนจะเป็นทรงกลมกลวงบรรจุด้วยอนุภาคเล็ก ๆ อยู่ภายในที่รู้จักในนาม plerospheres อนุภาคที่เหลือมีลักษณะตั้งแต่โปร่งแสงจนถึงทึบแสง มีรูพรุนเล็กน้อยถึงมาก มีรูปร่างที่กลมจนรูปร่างยาวแบน เถ้าลอยที่มีรูพรุนมาก ๆ มักเกิดจากการเผาถ่านหินด้วยอุณหภูมิที่ไม่สูงพอที่จะทำให้เถ้าลอยหลอมเหลวได้ และเถ้าลอยที่ได้มักจะมีรูปร่างต่าง ๆ กัน (อนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2547)

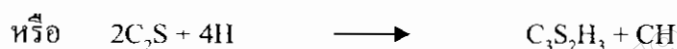
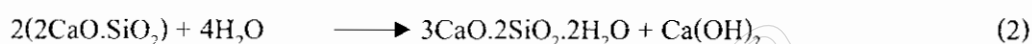
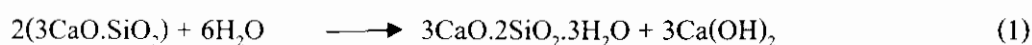
2.6 ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาในการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เถ้าลอยที่มีความละเอียดจะมีแนวโน้มการก่อตัวที่เร็วขึ้น แต่ในทางกลับกันถ้าเถ้าลอยที่หยาบจะมีแนวโน้มในการก่อตัวที่ช้าลง เถ้าลอยที่มี SO_3 สูง จะใช้เวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้นได้ โดยเวลาการก่อตัวต้นเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่เวลาการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก นอกจากนี้ยังมีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต เช่น อุณหภูมิภายนอกและภายในของคอนกรีต ชนิดของเถ้าลอยหรือปูนซีเมนต์ ปริมาณสารผสมเพิ่ม รวมถึงความละเอียดและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัว (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548; อนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2547)

2.7 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้เกิดความร้อน (heat of hydration) เป็นปริมาณความร้อนที่ปูนซีเมนต์คายออกมาในการทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ โดยสารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกันและกัน นอกจากนี้ยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ประกอบด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 : \text{C}_3\text{A}$) และไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 : \text{C}_2\text{S}$) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}_3\text{A}$) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

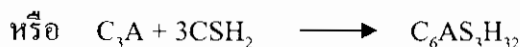
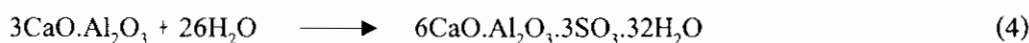
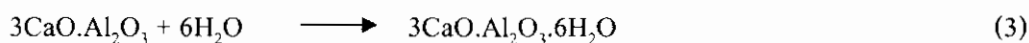
C_3S และ C_2S เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate : $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide : $Ca(OH)_2$) ดังสมการต่อไปนี้



ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา โดยขั้นตอนที่ทำให้ปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นที่ 1 C_3S ผสมกับน้ำเกิดความร้อนอย่างรวดเร็วซึ่งอัตราการความร้อนที่เกิดขึ้นจะลดลงและหยุดในเวลา 15 นาทีแรก ขั้นที่ 2 ไม่ค่อยมีปฏิกิริยาเรียกว่าระยะดอร์แมนต์ (dormant period) หรือระยะสงบ ระยะนี้เป็นระยะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อยู่ในสภาพพลาสติกเป็นเวลาหลายชั่วโมง ทำให้สามารถเทหรือหล่อคอนกรีตเข้าแบบได้ในเวลานี้ก่อนที่คอนกรีตจะเริ่มแข็งตัว หลังจากนั้น C_3S จะเริ่มทำปฏิกิริยาอีกครั้งหนึ่งและเข้าสู่ขั้นที่ 3 เป็นการทำปฏิกิริยาช่วงที่ 2 เริ่มประมาณ 2-3 ชั่วโมง หลังจาก C_3S ผสมกับน้ำซึ่งตรงกับเวลาการก่อตัวระยะต้น มีการคายความร้อนอย่างต่อเนื่อง และอัตราการเกิดความร้อนจะสูงสุดเมื่ออายุได้ 4-8 ชั่วโมงเกิดการก่อตัวสุดท้ายขึ้น หลังจากนั้นซีเมนต์จะเริ่มเกิดการแข็งตัวและสามารถรับกำลังเพิ่มขึ้นตามอายุที่มากขึ้น โดยปฏิกิริยาจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นน้อยลงแต่ยังคงมีต่อไป ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของ C_3S ทำให้เกิด CSH ล้อมรอบเม็ดปูนหนาแน่นขึ้นและปฏิกิริยาเป็นไปได้อย่างขึ้น แต่ยังคงมีต่อไป (ปริญญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553)

C_2S ทำปฏิกิริยากับน้ำในทำนองเดียวกันกับ C_3S แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นช้ากว่าเพราะ C_2S ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเท่ากับ C_3S ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่าง C_2S กับน้ำจึงน้อยกว่ากรณีของ C_3S กับน้ำ (ปริญญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553)

ปฏิกิริยาต่อมาเป็นการทำปฏิกิริยาของ C_3A กับน้ำอย่างรวดเร็วและได้แคลเซียมอลูมินไฮเดรต (calcium aluminate hydrate, CAH) ดังสมการที่ 3 ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วจึงจำเป็นต้องผสมยิปซัมเพื่อหน่วงปฏิกิริยาเพราะ C_3A จะทำปฏิกิริยากับไอออนของซัลเฟตได้แคลเซียมซัลโฟอลูมินไฮเดรต (calcium sulfoaluminate hydrate, $6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 32H_2O$, $C_6AS_3H_{32}$) หรือ เรียกกันทั่วไปว่าเอททริงไต์ (ettringite) ดังสมการที่ 4

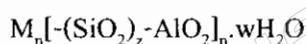


ปฏิกิริยาของแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำ เมื่อมียิปซัม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้น เช่นกัน ในชั้นที่ 1 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดเอททริงไคต์มีลักษณะยาวคล้ายเข็มจะเกิดขึ้นเมื่อมีอออนของซัลเฟตเพียงพอ โดยการเกิดเอททริงไคต์เพิ่มมากขึ้นรอบ C_3A ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยากขึ้นและปฏิกิริยาดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว ชั้นที่ 2 ปฏิกิริยาจะเกิดค่อนข้างน้อยและใช้เวลาหลายชั่วโมง เมื่ออออนของซัลเฟตทำปฏิกิริยาหมดแล้ว C_3A จะทำปฏิกิริยากับเอททริงไคต์และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรตที่มีซัลเฟตน้อยลง มีชื่อว่า แคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต (calcium monosulfoaluminate, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) จะตรงกับกาเกิดปฏิกิริยาในชั้นที่ 3 ปฏิกิริยาจะเกิดเมื่ออายุประมาณ 12-36 ชั่วโมง แคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตจะสามารถแปลงกลับเป็นเอททริงไคต์เมื่อได้อออนซัลเฟตอีก ซึ่งเป็นเหตุผลหลักในการเกิดการกัดกร่อนของสารซัลเฟต เพราะเอททริงไคต์มีปริมาณมากกว่าแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตมาก ถ้ายิปซัมผสมอยู่น้อย C_3A จะยังคงมีอยู่หลังจากที่เอททริงไคต์เปลี่ยนมาเป็นโมโนซัลเฟตแล้ว กรณีเช่นนี้จะเกิดสารละลายแข็ง (solid solution) ของ $\text{C}_4\text{ASH}_{12}$ และ C_4AH_{13} (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553; Mindess et al., 2002)

ปฏิกิริยาของ C_4AF คล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่จะเกิดช้ากว่าและมีความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่าสารประกอบเหล็กออกไซด์ (F) จะทำปฏิกิริยาคลายกับอลูมิเนียมออกไซด์ (A) และสามารถแทนที่กันได้ โดยยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของ C_4AF มากกว่าหน่วงปฏิกิริยาของ C_3A ซึ่งปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF และยิปซัมทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ ($\text{C}_6(\text{A},\text{F})\text{S}_3\text{H}_{32}$) โดยผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเหมือนเข็มคล้ายกับเอททริงไคต์ และทำนองเดียวกับเอททริงไคต์ ($\text{C}_6(\text{A},\text{F})\text{S}_3\text{H}_{32}$) สามารถทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ที่มีซัลเฟตต่ำ ซึ่งปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_4AF มากและ C_3A ต่ำสามารถทนทานต่อการทำลายซัลเฟตได้ดี แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงกลับเป็นเอททริงไคต์จากแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตที่เกิดจาก C_4AF ไม่เกิดขึ้น (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553; Mindess et al., 2002)

2.8 วัสดุจีโอโพลิเมอร์

วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จะมีโครงสร้างของโมเลกุลลูกโซ่ที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักของสารตั้งต้น นำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายเบสที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเดเซชัน ได้สารประกอบออลิโมโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ มีชื่อเรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) มีสูตรทางเคมีคือ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2553; Jumrat et al., 2010; Somaratan et al., 2010)



เมื่อ M คือ โลหะอัลคาไลน์

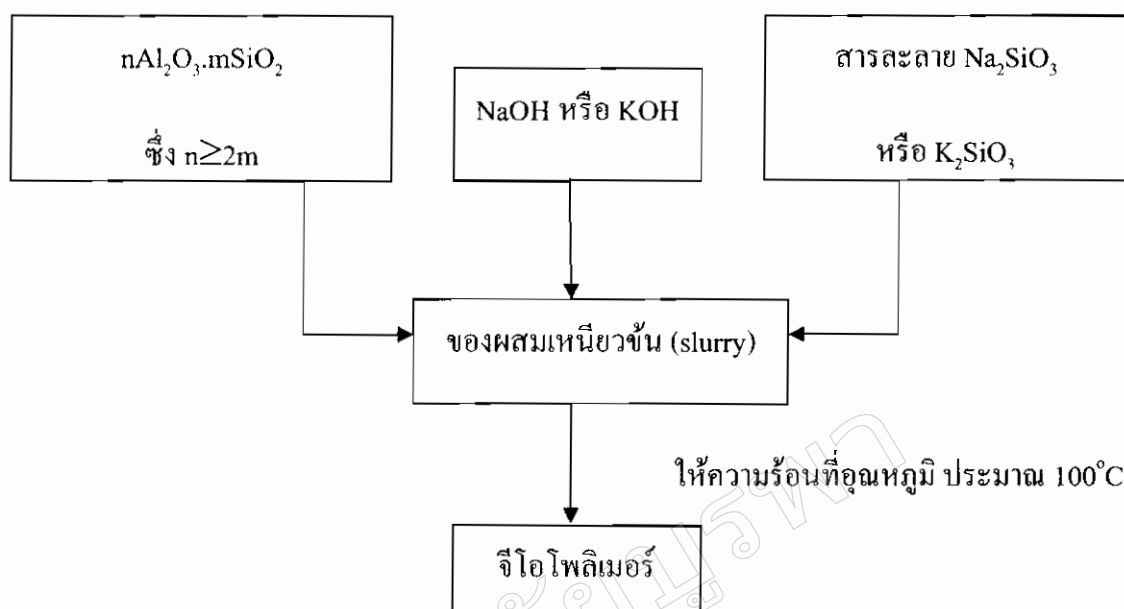
- คือ การยึดเกาะพันธะ

n คือ หน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่หรือ Degree of polycondensation

Z คือ ตัวเลข 1, 2, 3

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

สารจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินารวมตัวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และเมื่อรวมสารประกอบอื่นที่เชื่อมต่อกับปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้มีคุณสมบัติแข็งตัวสามารถรับกำลังอัดได้เหมือนกับคอนกรีต แต่ต้องมีการให้ความร้อนเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการแข็งตัวที่อุณหภูมิ 65°C 24 ชั่วโมง ได้กำลังอัดทัดเทียมกับมอร์ตาร์ที่บ่มแบบปกติที่อายุ 28 วัน สารประกอบที่ใช้ทำจีโอโพลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากดังกรณีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จึงทำให้ประหยัดกว่า (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547; อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2553; Sohn & Johnson, 1999)



ภาพที่ 2.1 แผนภูมิการเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2553)

ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์และซีโอไลต์ พบว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะมีการใช้อุณหภูมิที่สูงกว่ามาก และมีโครงสร้างที่เป็นผลึก อีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลมีต่ำ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญ์ จินดาประเสริฐ, 2552)

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์

	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมโรไลเซชัน
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ + สารละลายอัลคาไลน์ + ซิลิกาเกต (ในรูปของแข็งหรือของเหลว)
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (nucleation) ในสารละลาย	การชะของแข็งที่มี Al-Si เป็น ส่วนประกอบออกมาสู่เฟส
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตของผลึกในสารละลาย	การแพร่และความแน่นของสาร เชิงซ้อน Al และ Si ที่ชะออกมา ในเฟส
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	90-300 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิปกติ (ambient)
ช่วง pH	6-11	14
ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่มี Al- Si เป็นส่วนประกอบ
องค์ประกอบเคมี	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ แน่นอน	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ไม่ แน่นอน
โครงสร้าง	ผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว (unique crystal)	ของผสมของเฟสเจลแบบอ สัณฐานและกึ่งอสัณฐาน และ วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
ความแข็งแรงเชิงกล	ต่ำ	สูง

2.9 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552)

จีโอโพลิเมอร์เป็นสารพวกอลูมิโนซิลิกาเกต (aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา (morphology)แน่นอน เป็นส่วนประกอบของอสัณฐาน (amorphous phase) และสารกึ่งผลึก (semicrystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมโรไลเซชัน (geopolymerization) จึงเป็นสารซิลิกาและอลูมินาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลเบสจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูงได้ และก่อตัวและให้กำลังรับแรงได้ดี ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยปฏิกิริยาจีโอโพลิเมโรไลเซชันแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การชะละลาย (dissolution)

ถ้าหรือสารตั้งต้นเมื่อผสมสารละลายที่มีความเป็นเบสสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการชะละลายของซิลิกาและอลูมินาออกมาจากผิว ซิลิกอนและอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสเกิดการก่อตัวเป็นเจลเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคของแก้ว ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการชะของแก้ว ความเข้มข้นที่มีมากขึ้นทำให้เกิดการชะของอ็อกซิเจนและอลูมิเนียมออกมาจากผิวของแก้วมาก

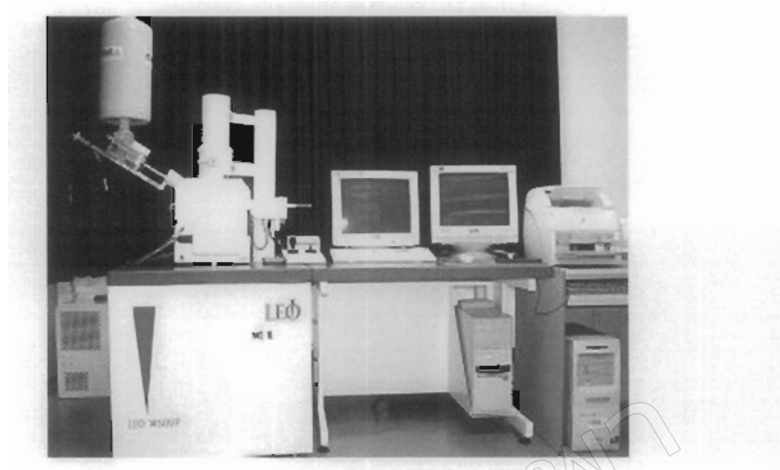
2. การทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (polymerization)

อ็อกซิเจนซิลิกอนและอลูมิเนียมที่จะถูกชะออกมาเกิดการรวมตัวกับอ็อกซิเจนออกซิเจนอยู่ในรูปทรงสี่เหลี่ยมสี่หน้า เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของ Si และ Al ได้สารประกอบอลูมิโนซิลิเกต $[Si - O - Al - O]$

2.10 เทคนิคที่ใช้ในการทดสอบ

2.10.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษารายละเอียดพื้นผิวของตัวอย่างในระดับจุลภาค เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง การสร้างภาพทำโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพแบบ 3 มิติ ฉะนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การศึกษาลักษณะผิวของเซลล์และเนื้อเยื่อ หรือศึกษาหน้าตัดของโลหะและวัสดุทุกชนิดที่ต้องการ เป็นต้น

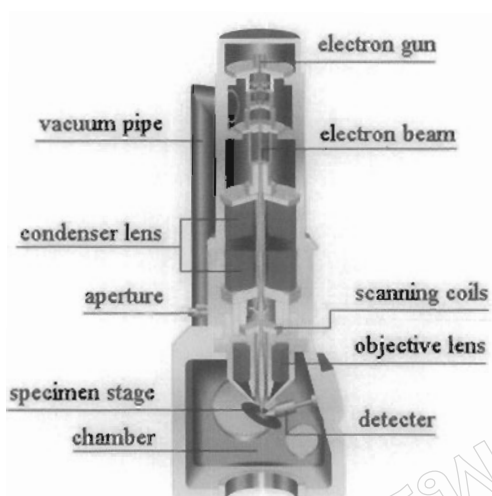


ภาพที่ 2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ศูนย์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา)

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงประมาณ 1-30 kV ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการกระจายตัวออกมาเป็นอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนที่สามารถปรับขนาดของลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ ถ้าต้องการภาพที่มีความคมชัดให้ปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงบนผิวตัวอย่างที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนผิวตัวอย่างก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล, 2004)



ภาพที่ 2.3 การแสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM

(ที่มา <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>)

2.10.2 x-ray diffraction (XRD)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะอาศัยคุณสมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และใช้ศึกษารายละเอียดของโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของสารตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของหน่วยเซลล์ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ทำให้ทราบสารประกอบในตัวอย่าง

ผลจากการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาองค์ประกอบของตัวอย่างได้ แล้วยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่าง และยังสามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบางได้ (แม่น อมรสิทธิ์ และคณะ, 2552; ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์, น.ป.ป.)



ภาพที่ 2.4 เครื่อง x-ray diffractometer

(ที่มา http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm

http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/Picture_XRD1.htm

<http://nuc2010.wordpress.com/iga/xrd>)

2.10.3 infrared spectroscopy (IR)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IR เป็นการตรวจสอบและเป็นการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของสาร โดยวัดการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการสั่นของพันธะภายในโมเลกุล การนำแสงอินฟราเรดผ่านพลังงานอินฟราเรดมาใช้กับเทคนิค IR spectroscopy ร่วมกับการใช้กล้องจุลทรรศน์ (microscope) หรือที่เรียกว่า IR microspectroscopy and imaging เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิค IR spectroscopy ในการตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก หรือสารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่ำมาก ๆ เนื่องจากสมบัติของแสงอินฟราเรดที่ให้ความเข้มข้นและความสว่างจ้าของแสงสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสงทั่วไป (conventional IR source) นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวน (signal/noise ratio) ที่ดีโดยไม่สูญเสียรายละเอียดเชิงพื้นที่ (spatial resolution) และยังช่วยลดระยะเวลาในการตรวจวิเคราะห์ (แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, 2552)

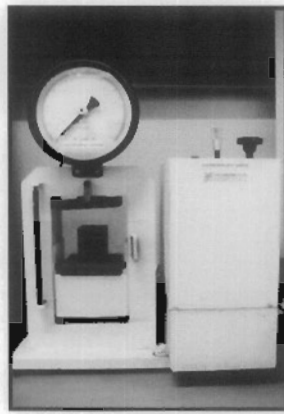


ภาพที่ 2.5 เครื่อง infrared spectroscope (IR)

(ที่มา <http://www.mthec.or.th/laboratory/spectro/index.php/tools-and-services>)

2.10.4 การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2548)

การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นเพื่อให้สมบัติของตัวอย่างที่นำมาทดสอบความสามารถใช้งานได้ ทั้งนี้ยังมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบตามอายุที่กำหนด เนื่องจากความต้องการสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกันที่อายุ โดยรูปทรงที่นิยมใช้ในการทดสอบเพื่อหาลำดับอัดมี 2 แบบ คือรูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก การใช้รูปลูกบาศก์ในการหาลำดับอัดเป็นที่นิยมในอังกฤษ เยอรมัน และประเทศยุโรปเป็นส่วนใหญ่ ส่วนรูปทรงกระบอกนิยมใช้ใน สหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส แคนาดา แบบหล่อเถ้าลอยรูปลูกบาศก์เป็นแบบพลาสติกขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร 3 ช่อง โดยเทจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมเรียบร้อยแล้วไปจนเต็มทำการปิดให้เรียบเสมอกับแบบหล่อทั้ง 3 ช่องแล้วนำเอาพลาสติกมาหุ้มแล้วนำไปเข้าตู้อบที่ $65 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิที่ $25 \pm 3^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 7 วัน และ 1 เดือน ตามแต่มาตรฐานที่ใช้ เมื่อครบเวลาตามที่กำหนดก็ทำการแกะออกจากแบบหล่อแล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัด วัดกำลังอัดจากเครื่องกดที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการแตก การให้อัตรากดต่อตัวอย่างที่เร็วมากๆ จะทำให้กำลังที่ทดสอบได้สูงกว่าความเป็นจริง และในทางกลับกัน การให้อัตรากดที่ช้ามาก จะทำให้กำลังที่ทดสอบได้ต่ำกว่าเป็นจริง



ภาพที่ 2.6 เครื่องทดสอบกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์

2.10.5 การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค thermogravimetric analysis

(TGA)

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ โดยเฉพาะพอลิเมอร์ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊ส หรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry)

ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, ม.ป.ป.)



ภาพที่ 2.7 เครื่อง thermogravimetric analysis

(ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนกร ภูเงินขำ และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (2554) ได้ทำการศึกษาความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดออกไซด์ โดยการศึกษาใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5, 10, 15 และ 20 โมลาร์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 60, 75 และ 90°C พบว่า สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.5 – 2.5 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ ใช้อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 75°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ที่มีค่าระหว่าง 223 – 939 กก/ชม²

จักรพันธ์ วงษ์พา (2553) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มาแทนที่เถ้าถ่านหินบางส่วนในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต จากการศึกษาพบว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 14 M และ 18 M มีผลกระทบต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ไม่มาก แต่อัตราส่วนของของเหลวต่อปริมาณเถ้าส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อย่างมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ อัตราส่วนของของเหลวต่อปริมาณเถ้าจึงเป็นตัวแปรหลัก ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่จะมีค่าเท่ากับ 14 M ในการศึกษาหลักพบว่าอัตราส่วนของของเหลวต่อปริมาณเถ้ามีผลกระทบต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอย่างมาก ขณะที่อัตราส่วนเพสต์ต่อมวลรวมส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพียงเล็กน้อย แต่มีผลสูงมากต่อการแยกตัวของส่วนผสม อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินามีผลต่อการลดลงของกำลังอัดเนื่องจากเกิดรอยร้าวในโครงสร้างของซิลิกาเจลเมื่อสัมผัสกับความชื้น

Poon et al. (2000) ได้ทำการศึกษาบนพื้นคอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูง ที่เตรียมด้วยเถ้าลอย แคลเซียมต่ำ จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมที่ได้บ่มก่อน 1000 มม. ที่บ่มเป็นเวลา 3, 7, 28, และ 90 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) 0.24 ปริมาณมากที่การผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 กำลังอัดลดลงเล็กน้อยที่อายุ 3 และ 7 วัน แต่กำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นที่อายุ 28 และ 90 วัน และ ที่การผสมเถ้าลอยร้อยละ 45 จะเห็นได้ว่าที่ 28 วัน มีค่ากำลังอัดอัด 89.4 เมกะปาสคาล

Alvarez-Ayuso et al. (2008) ได้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของ จีโอโพลิเมอร์ วิธีการสังเคราะห์การเผาไหม้เถ้าลอยจากถ่านหิน จากการทดลองนี้ ใช้ระยะเวลาบ่มที่แตกต่างกัน 6, 24 และ 48 ชม. ที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 °C แสดงให้เห็น ว่าระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นจะเพิ่มความแข็งแรงในการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ โดยเฉพาะบ่มที่อุณหภูมิ 80 °C มีค่ารับแรงอัดสูงสุด แต่จีโอโพลิเมอร์ที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 40, 60 °C มีการรับค่าแรงอัดที่ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิ 80 °C จะส่งผลให้เร่งกระบวนการทางเคมีในการสลายตัว ดังนั้น กำลังสามารถเสริมได้ด้วยการรักษาอุณหภูมิหรือการรวมตัวกันในกระบวนการ geopolymerisation

Temuujin et al. (2009) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเถ้าลอยกับคุณสมบัติของ จีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิบ่มระหว่าง 40 และ 100 °C เป็นเวลา 4-48 ชม. โดยใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 14 M และโซเดียมซิลิเกต D-grade กับเถ้าลอยและเถ้าลอยที่ทำการบดแล้ว พบว่า เถ้าลอยที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดแล้วจะให้ค่ากำลังอัดแก่คอนกรีตเพิ่มเป็นร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่ไม่ได้ผ่านการบด ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายอย่าง

Somna et al. (2011) ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของ NaOH ในจีโอโพลิเมอร์ของเถ้าลอยที่บดแล้ว จากการทดลองที่ 60 วันพบว่าความเข้มข้น NaOH มีผลต่อค่ากำลังอัดโดย เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ NaOH จาก 9.5 เป็น 14.0 โมลาร์ ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 7 เมกะปาสคาล เป็น 25.5 เมกะปาสคาล แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น NaOH เป็น 16.5 โมลาร์ พบว่า กลับมีค่าแรงกดกำลังอัดลดลง เนื่องจากค่าของ OH⁻ มีความเข้มข้นสูงส่งผลให้อัลคาไลตกตะกอน ทำให้มีค่ากำลังอัดลดลง

2.11 สรุป

เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดสามารถผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ แต่คุณภาพจะไม่ดีเท่ากับเถ้าลอยที่ได้จากเผาด้วยความร้อนสูง แต่จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าสามารถพัฒนาคุณภาพของเถ้าลอยให้มีคุณภาพดีขึ้นได้โดยการบดขนาดเถ้าลอยให้มีขนาดเล็กลง ทำให้การทำปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันในการผลิตจีโอโพลิเมอร์สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งความแข็งแรงของ

จีโอโพลิเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างได้แก่ อัตราส่วนของสารละลายที่ใช้ในการผลิต, ความเข้มข้นของ NaOH, อุณหภูมิ, ระยะเวลา เป็นต้น

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University