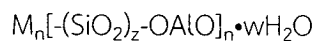


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยองค์ประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate solution) และเร่งปฏิกิริยาดด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวทำให้รับแรงได้



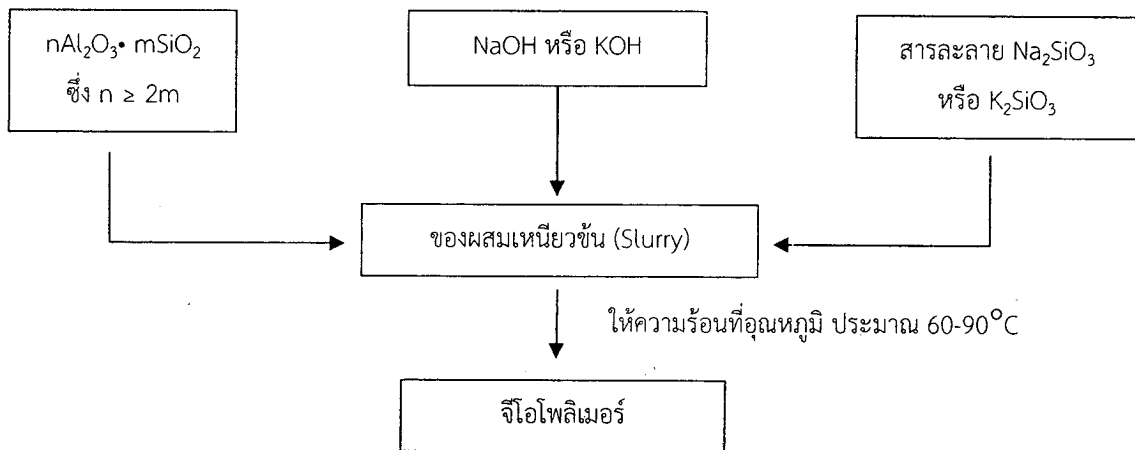
เมื่อ M คือโลหะอัลคาไลน์

n คือจำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อการเป็นสายโซ่หรือ Degree of polycondensation

z คือตัวเลข 1, 2 หรือ 3

w คือจำนวนโมเลกุลของน้ำ

การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง พบว่าสามารถใช้แก้ลรอยจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในการทำจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดี เช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารจีโอโพลิเมอร์ดังกล่าวได้มาจากการผสมแก้ลรอยกับสารประกอบอัลคาไลน์ และใช้ความร้อนในช่วง $60 - 90^\circ\text{C}$ ในการเร่งปฏิกิริยา สารประกอบอัลคาไลน์ ได้แก่ สารอัลคาไลน์ซิลิเกต เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (ปริญา 2548; อุบลลักษณ์ 2549)



รูปที่ 2.1 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ 2549; อุบลลักษณ์และปริญญา 2552)

2.2 ระบบการเผาถ่านหิน

การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีใช้อยู่ทั่วไป 3 ระบบ ได้แก่ ระบบที่เผาด้วยความร้อนสูง ระบบที่เผาด้วยความร้อนปานกลาง และระบบที่เผาด้วยความร้อนต่ำ (ปริญญา 2548)

1. ระบบที่เผาด้วยความร้อนสูง ระบบนี้จะใช้อุณหภูมิในการเผาสูงถึง 1500-1700 °C เป็นระบบที่ใช้แรงลมหมุนวน ที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินที่ได้จะหลอมละลายและปะทะรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน ได้เป็นถ่านหินเตาตกลงในอ่างน้ำด้านล่าง ถ่านหินขนาดเล็กจากระบบการเผาแบบนี้จะมีปริมาณค่อนข้างน้อย และมักมีลักษณะเป็นเม็ดแก้วใส (Vitreous particle)

2. ระบบที่เผาด้วยความร้อนปานกลาง ระบบนี้ใช้อุณหภูมิในการเผาในช่วงระหว่าง 1100-1400 °C เป็นระบบการเผาที่ใช้ถ่านหินบด (Pulverized coal combustion, PCC) ถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่เป็นถ่านหินที่เหลือเป็นถ่านหินหรือถ่านหินเตา ถ่านหินที่ได้จากระบบการเผาแบบนี้ประมาณร้อยละ 70-90 มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน และเป็นถ่านหินที่เหมาะสมในการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต หรือผลิตจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งโรงงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้าแม่เมาะใช้ระบบการเผาประเภทนี้

3. ระบบที่เผาด้วยความร้อนต่ำ ระบบนี้เป็นการเผาในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidizedbed combustion, FBC) อุณหภูมิที่ใช้ค่อนข้างต่ำ คือไม่เกิน 900 °C ถ่านหินที่บดจนมีขนาดเล็กมากผสมกับหินปูนจะถูกพ่นเข้าไปในเตาเผาพร้อมกับอากาศร้อน ถ่านหินและหินปูนที่พ่นเข้าไปจะแขวนลอยอยู่ในคลื่นอากาศร้อน โดยมีลักษณะคล้ายของเหลวเดือด ขณะที่ถ่านหินเผาไหม้หินปูนจะทำหน้าที่คล้ายฟองน้ำดักจับก๊าซกำมะถัน หรือซัลเฟอร์ออกไซด์ (SOx) ที่เกิดขึ้น ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่าน

หินจะนำมอดมน้ำทำให้เกิดไอน้ำไปหมนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระบวนการนี้สามารถลดปริมาณก๊าซกำมะถันที่จะถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ได้ถึงร้อยละ 90 นอกจากนี้อุณหภูมิของหม้อไอน้ำที่ใช้กระบวนการนี้ยังต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในวิธีการเดิม อีกประโยชน์ของการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ คือลดปริมาณมลพิษที่เกิดจากก๊าซไนโตรเจนหรือไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ในถ่านหินได้อีกด้วย

การเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด ทำให้ได้ถ่านหินรูปร่างที่ไม่แน่นอน และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกสูง เนื่องจากเผาที่อุณหภูมิสูงไม่เพียงพอ ถ่านล่อยที่ได้นี้แม้สามารถนำมาใช้เป็นสารปอซโซลานได้ แต่ไม่ดีเท่ากับถ่านล่อยที่ได้จากกระบวนการเผาด้วยความร้อนปานกลาง อย่างไรก็ตามระบบการเผาแบบนี้เริ่มมีใช้มากในโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก หรือโรงงานต่างๆ (Chindaprasirt and Rattanasak, 2010)

ด้วยเหตุผลดังกล่าว การผลิตจีโอโพลิเมอร์จึงนิยมใช้ถ่านล่อยจากการเผาถ่านหินแบบใช้หินบด หรือ PCC เป็นวัตถุดิบ เนื่องจากถ่านล่อยชนิดนี้มีปริมาณร้อยละ 70-90 มีสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากถ่านล่อยที่เผาแบบ PCC ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าและคงทนกว่าวัสดุที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ในอายุเท่ากัน และให้สมบัติทางกายภาพที่ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น ดินขาวเผา

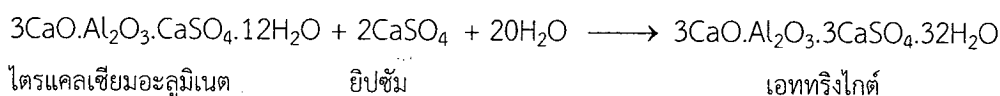
การผสมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลงในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับสารประกอบซิลเฟตในถ่านล่อย FBC เป็นเอททริงไคต์ ถ่านล่อย FBC มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมซิลเฟต (CaSO₄) ในปริมาณที่สูงเช่นกัน ซึ่งเกิดจากการพ่นปูนขาวเข้าไปจับก๊าซ SO_x ในระบบการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด CaSO₄ ในถ่านล่อย FBC สามารถทำปฏิกิริยากับอะลูมินา (ซึ่งพบในถ่านล่อย FBC เช่นเดียวกัน แต่มีปริมาณน้อย) เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลโฟอะลูมินเนตไฮเดรต (หรือเอททริงไคต์) และแคลเซียมโมโนซิลโฟอะลูมินเนต แคลเซียมโมโนซิลโฟอะลูมินเนตสามารถเปลี่ยนเป็นเอททริงไคต์ได้หากมีปริมาณซิลเฟตเหลืออยู่ในส่วนผสม การเกิดเอททริงไคต์ขณะที่จีโอโพลิเมอร์ยังไม่แข็งตัวจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาใดๆ แต่ถ้าหากเกิดเอททริงไคต์ในจีโอโพลิเมอร์ที่แข็งตัวแล้วจะทำให้จีโอโพลิเมอร์เกิดการแตกร้าวได้ นอกจากนี้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบ Ca ได้สารประกอบ CAH ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลังอัดแก่วัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ (ปริญาและชัย, 2552)

งานวิจัยนี้จึงเติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ลงในระบบจีโอโพลิเมอร์เพื่อให้เกิดสารประกอบ Al-Si และ CAH โดยควบคุมการเกิดเอททริงไคต์ และความเป็นเบสที่สูง pH ประมาณ 13 สามารถจำกัดการเกิดเอททริงไคต์ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้ ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับจีโอโพลิเมอร์เนื่องจากมีระบบที่เป็นเบสสูง

2.3 แคลเซียมซิลโฟอะลูมิเนตไฮดรตหรือเอทริงไต์ (Ettringite)

ปฏิกิริยาซัลเฟตนั้นประกอบไปด้วย 2 ส่วน ปฏิกิริยาแรกเริ่มต้นทันทีที่ปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ ยิปซัมที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์จะละลายน้ำปล่อยซัลเฟตไอออนและทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตเกิดเป็นแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium sulfoaluminate hydrate, $C_6AS_3H_{32}$) หรือที่รู้จักในชื่อเอททริงไกต์ ซึ่งเอททริงไกต์นี้เป็นสารประกอบที่มีปริมาณมาก แต่จะคงสภาพหรือเสถียรในสภาวะที่มีซัลเฟตไอออน ปริมาณมากในซีเมนต์เท่านั้น (ปริญาและชัย, 2552)

ขั้นที่ 2 ยิบซัมที่ได้จากสมการข้างต้นจะย้อนกลับมาทำปฏิกิริยากับโมโนซัลเฟตเพื่อเกิดเป็น แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรตหรือเอททริงไคต์

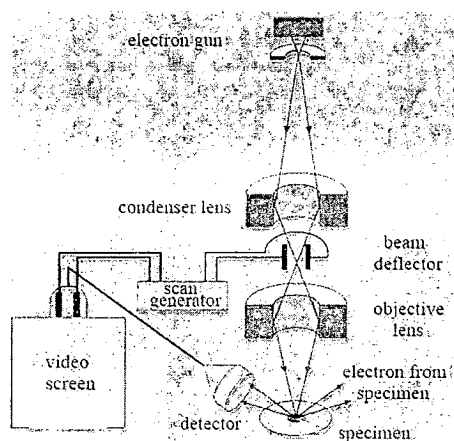


ซึ่งในกรณีนี้ เนื่องจากคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ลุ่มไปด้วยซัลเฟตในปริมาณสูง การเกิดขึ้นของเอททริงไคต์ จะค่อนข้างเสถียรและไม่เสื่อมสลายไป ด้วยขนาดของปริมาตรที่มากกว่าถึงร้อยละ 55 ของเอททริงไคต์ทำให้เกิดแรงดันภายในเนื้อคอนกรีตและเกิดการแตกกะเทาะออกจากกัน (ปิติ, 2549) 2.4 เทคนิคที่ใช้ในการทดสอบ

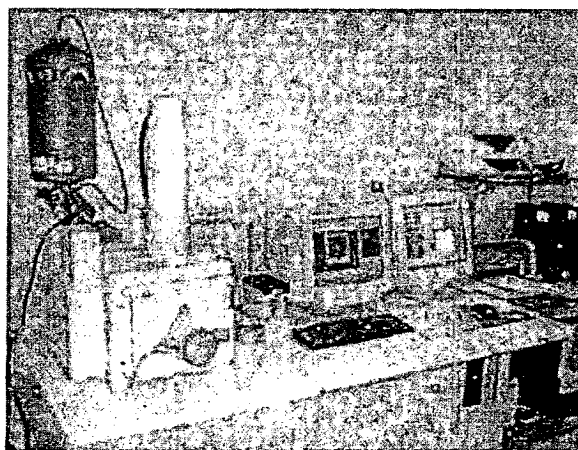
2.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการศึกษารายละเอียดของผิวหน้าของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ ภาพที่ได้เป็นภาพสามมิติมีส่วนลึก มีประโยชน์ในการศึกษาลักษณะภายนอกของตัวอย่าง SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็น ได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจบันทึกภาพที่บนแผ่นฟิล์มได้ (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549)

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของเครื่อง SEM



รูปที่ 2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

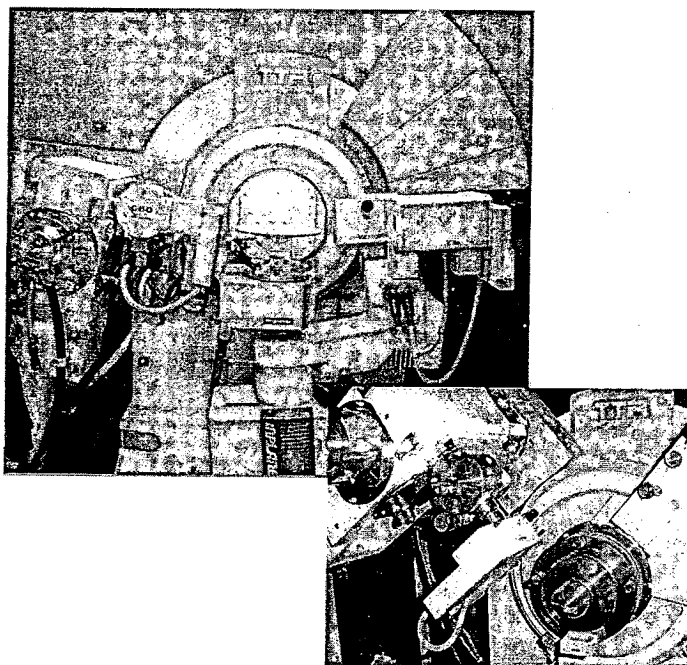
การเคลือบผิวตัวอย่าง

ผิวตัวอย่างที่จะใช้ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดต้องสามารถให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดีหรือสามารถนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้กับตัวอย่างที่นำไฟฟ้าได้เล็กน้อย ซึ่งสามารถทำได้โดยการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยสารตัวนำ เช่น คาร์บอน (C), ทอง (Au) และโลหะผสมทอง - พัลลาเดียม (Au - Pd) และการฉาบผิวตัวอย่างต้องกระทำที่สภาวะสุญญากาศ และให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้โลหะเปลี่ยนจากสภาพแท่งโลหะมาเป็นโมเลกุลและตกลงบนผิวของแท่งตัวอย่างในอัตราเดียวกันซึ่งจะทำให้ผิวเคลือบตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกัน

2.4.2 X-ray diffraction (XRD)

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน หรือ เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ในสารทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และปริมาณ (Quantitative) และใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) หรือโมเลกุลของสารด้วยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) (สรินทร์, 2543)

เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ ที่ทราบความยาวคลื่น ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างกันโดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสี X จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย



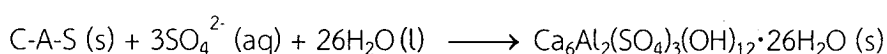
รูปที่ 2.4 เครื่อง X-ray diffractometer

2.5 แนวคิดในการนำเถ้าลอย FBC มาศึกษาวิจัย

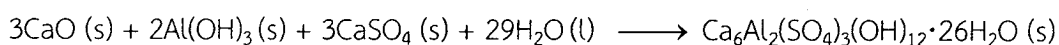
จากปัญหาและคุณสมบัติของเถ้าลอย FBC งานวิจัยนี้เสนอแนวทางการแก้ปัญหาในการนำเถ้าลอย FBC มาใช้ประโยชน์ โดยเน้นที่การผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยการผสมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลงในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อเปลี่ยนแคลเซียมในเถ้าลอย FBC ให้เป็นสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่เป็นสารที่ให้ง่ายแก่การอัดตัววัสดุจีโอโพลิเมอร์ และควบคุมการเกิดสารประกอบเอทริงไคต์ที่เกิดจากสารประกอบซัลเฟตในเถ้าลอย FBC

นอกจากนี้ เถ้าลอย FBC มีปริมาณแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ในปริมาณที่สูงเช่นกัน ซึ่งเกิดจากการพ่นหินปูนไปจับกับก๊าซ SO_x ในระบบการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด CaSO_4 ในเถ้าลอย FBC สามารถทำปฏิกิริยากับอะลูมินา (ซึ่งพบในเถ้าลอย FBC เช่นกัน แต่มีปริมาณน้อย) เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต (หรือเอทริงไคต์) และแคลเซียมโมโนซัลโฟอะลูมิเนต (ปริญาและชัย, 2552; Sheet and Kwan, 2003) แคลเซียมโมโนซัลโฟอะลูมิเนตสามารถเปลี่ยนเป็นเอทริงไคต์ได้หากมีปริมาณซัลเฟตเหลืออยู่ในส่วนผสม การเกิดเอทริงไคต์ขณะที่จีโอโพลิเมอร์ยังไม่แข็งตัวจะไม่เกิดปัญหาใดๆ แต่ถ้าเกิดเอทริงไคต์ในจีโอโพลิเมอร์ที่แข็งตัวแล้วจะทำให้จีโอโพลิเมอร์เกิดการแตกร้าวได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ลงในระบบจีโอโพลิเมอร์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับ CaSO_4 เป็นเอทริงไคต์ให้หมดและไม่มีซัลเฟตเหลือที่เอทริงไคต์จะทำปฏิกิริยาเปลี่ยนกลับไปเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอะลูมิเนตอีกครั้ง อย่างไรก็ตามมีการรายงานวาระบบที่มีความเป็นเบสสูง pH ประมาณ 13 สามารถจำกัดการเกิดเอทริงไคต์ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้ (Sheet and Kwan, 2003) ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากระบบมีความเป็นเบสสูง

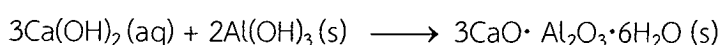
ปฏิกิริยาการเกิดเอทริงไคต์ในปูนซีเมนต์เป็นดังนี้



ปฏิกิริยาการเกิดเอทริงไคต์ในจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ที่เติม $\text{Al}(\text{OH})_3$ เพิ่มเข้าไปในระบบเป็นดังนี้



นอกจากนี้การเติมสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลงในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ ยังทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่เป็นสารที่ให้ง่ายแก่การอัดตัววัสดุจีโอโพลิเมอร์อีกด้วย



2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yan และคณะ (2001) ได้ทำการหาปริมาณและดูโครงสร้างของเอททริงไคต์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM-EDS เตรียมเพสต์ที่เติมสารเติมแต่งร้อยละ 10 บ่มที่อุณหภูมิ 70 °C เพื่อป้องกันการเกิดเอททริงไคต์ หรือโน้มน้าวให้เอททริงไคต์ถูกทำลาย ความชื้นสัมพัทธ์ในกระบวนการ TMC และภายหลังการบ่มระยะเวลากับอุณหภูมิห้องเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดปริมาณ, โครงสร้างและเป็นผลให้เกิดขยายตัวของเอททริงไคต์ นอกจากนี้ปริมาณและโครงสร้างของเอททริงไคต์ ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อผลขยายตัวของเอททริงไคต์

Lee และ van Deventer (2004) ศึกษาอิทธิพลของสารอนินทรีย์ที่มีต่อความแข็งแรงและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินเหนียว ที่อายุการบ่ม 7, 21, 90, 180 และ 270 วัน ที่อุณหภูมิปกติ และจีโอโพลิเมอร์ 2 ระบบที่มีความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกตต่างกัน ผสมเกลือคลอไรด์ ได้แก่ KCl, CaCl₂ และ MgCl₂ เกลือคาร์บอเนต ได้แก่ K₂CO₃, CaCO₃ และ MgCO₃ โดยศึกษาความแข็งแรงและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์ พบว่าเกลือคลอไรด์ทำให้ความทนทานของจีโอโพลิเมอร์ลดลง โดยทำให้เกิดการตกตะกอนและเกิดผลึกขึ้นในเจลอะลูมิเนียมซิลิเกต ส่วนเกลือคาร์บอเนตจะป้องกันการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เจล สำหรับระบบที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูงกว่าจะช่วยเร่งการละลายของของแข็ง แต่ก็ทำให้เกิดการตกตะกอนของเจลอะลูมิเนียมซิลิเกต ทำให้มีค่ากำลังอัดที่ต่ำ

Barbarulo และคณะ (2007) ได้ทำการสังเคราะห์ C-S-H และเอททริงไคต์ด้วยระบบ Suspension แล้วทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 20 และ 85 °C ใช้เทคนิค X-ray diffraction อธิบายความสมดุลของ C-S-H กับเอททริงไคต์

Yao และคณะ (2009) ศึกษาลักษณะของกระบวนการจีโอโพลิเมไรเซชันของดินขาวเผา โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์และสารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกตเป็นตัวเร่ง ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย มอดูลัสของสารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกต และอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมไรเซชัน โดยใช้เทคนิค ไอโซเทอร์มอล แคลอริเมตรี, เอกเซอร์เย ดิฟแฟรคชัน และ 27Al / 29Si MAS NMR พบว่ากระบวนการจีโอโพลิเมไรเซชันของดินขาวเผาภายใต้สภาวะที่มีสารละลายอัลคาไลน์เป็นตัวเร่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การชะละลาย 2) การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมไรเซชัน และ 3) ความเสถียร โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมไรเซชันของสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ จะสูงกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 15 โมลาร์ จะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมไรเซชันสูงที่สุดในระหว่างขั้นตอนที่ 2 และการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมไรเซชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของอัลคาไลน์เพิ่มขึ้น โดยปริมาณของซิลิเกตแอนไอออนในสารตัวเร่งไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมไรเซชัน