บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 องค์ประกอบของเถ้าลอย

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed combustion, FBC) โดยเทคนิค X-ray fluorescence และค่า Loss on ignition ของเถ้าลอยได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอย FBC
SiO_2	21.0
Al_2O_3	8.0
Fe_2O_3	6.9
CaO	42.2
Na_2O	2.9
TiO_2	2.2
MgO	0.8
SO_3	15.0
LOI	1.0
ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	28

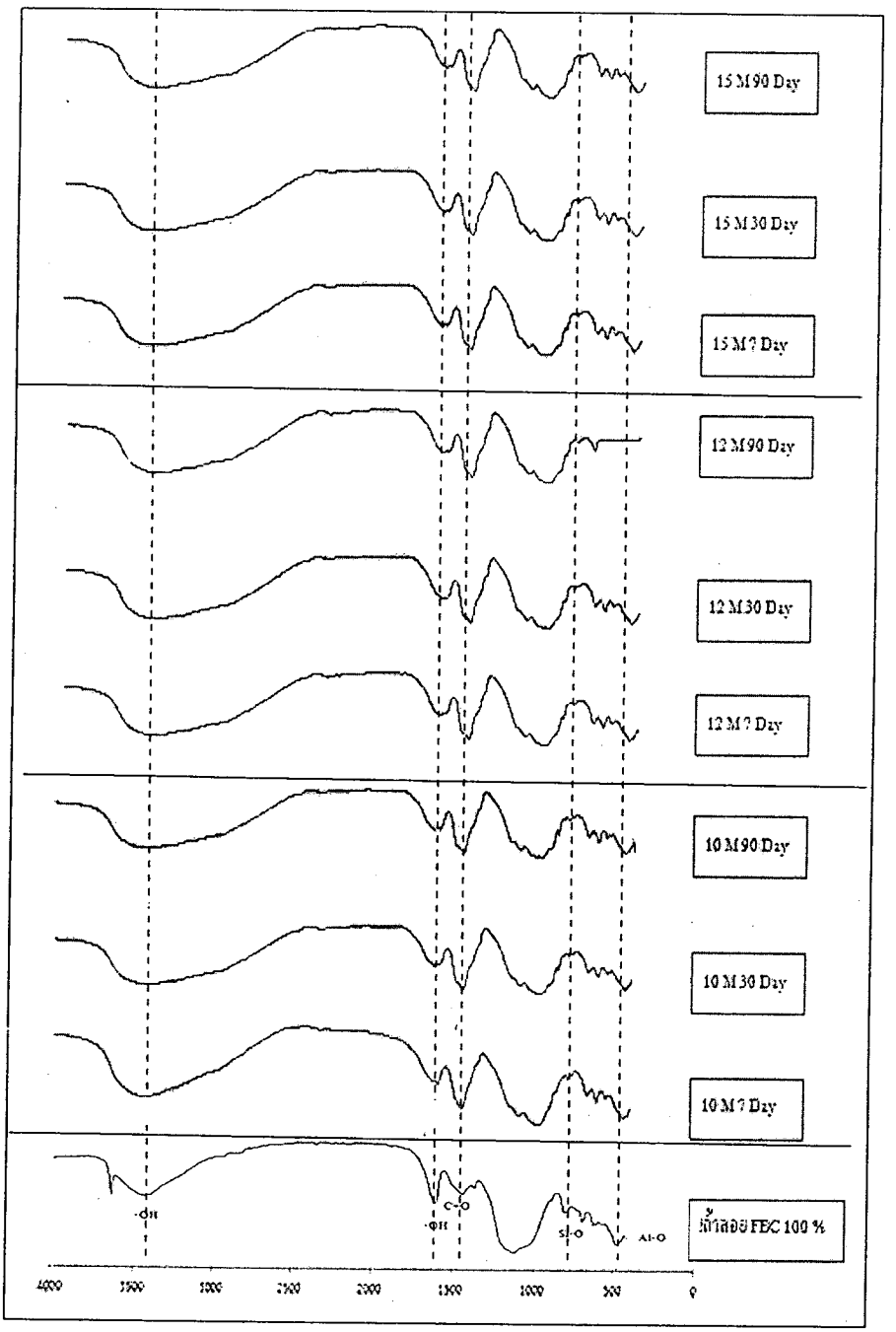
จากตารางที่ 4.1 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย FBC ประกอบด้วย SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO เป็นองค์ประกอบหลักและ MgO, Na_2O, TiO_2, SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง โดยเถ้าลอย FBC นั้นมีปริมาณ CaO สูง เนื่องจากในกระบวนการเผาถ่านหินชนิดนี้เป็นการเผาแบบใช้ความร้อนต่ำประมาณ 900 ^{o}C จะใช้ปูนขาวในการจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดเป็น $CaSO_4$ จากกระบวนการเผาจึงส่งผลทำให้มีปริมาณ $CaSO_4$ และ CaO ที่ได้จากปูนขาวเหลืออยู่ในเถ้าปริมาณมาก

จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเถ้าลอย FBC ด้วยเครื่อง Malvern Mastersizer particle size analyzer พบว่าเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 28 ไมครอน

4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ล้วน

4.2.1 หมู่ฟังก์ชั่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยเทคนิค FT-IR

การทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยเทคนิค Fourier Infrared Spectrometer (FT-IR) เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากหลายความเข้มข้นของ NaOH คือ 10, 12, และ 15 M ให้ผลต่างๆ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สเปคตรัม FT-IR ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์

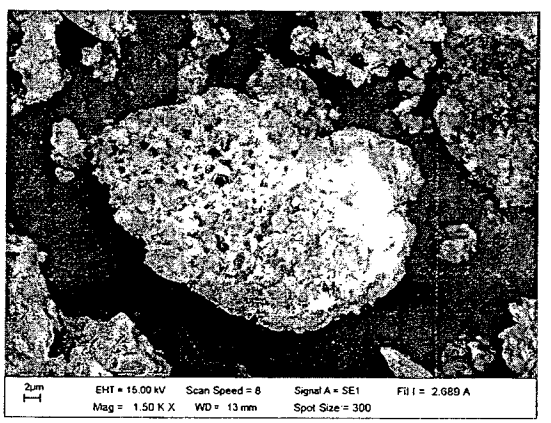
จากรูปที่ 4.1 เมื่อศึกษากราฟ IR เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่เข้มข้นต่างๆ พบว่าที่ประมาณ 3459 cm^{-1} เป็นพีคของ –OH เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเถ้าลอย FBC กับสารจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่เข้มข้นต่างๆ จะเห็นได้ว่าพีคของ –OH ของจีโอโพลิเมอร์นั้นมีความกว้างและชัดเจนมากกว่าพีกของเถ้าลอย FBC เนื่องจากในการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์นั้นมีการใช้สารละลาย NaOH ทำให้ปรากฏพีกของ -OH ที่ได้จาก NaOH และ H_2O ซึ่งพีก –OH ยังสามารถพบได้ที่เลขคลื่นประมาณ 1599 cm^{-1} เช่นกัน

ที่เลขคลื่นประมาณ 1414 cm^{-1} เป็นพีกของ $-CO_3^{-2}$ และพบเด่นชัดในจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชันขึ้นระหว่างก๊าซ CO_2 กับสารละลาย NaOH ที่มากเกินพอในส่วนผสม และ CaO ที่พบในเถ้าลอยที่ทำปฏิกิริยากับ NaOH และ CO_2 ได้เป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)

ที่เลขคลื่นประมาณ 426 และ 1014 cm^{-1} เป็นพีกของ Al-O และ Si-O ตามลำดับซึ่งเกิดจากเถ้าลอยมีซิลิกาและอะลูมิน่าเป็นส่วนประกอบ พีกดังกล่าวจะชัดเจนขึ้นและเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งพีกเมื่อผสมเป็นจีโอโพลิเมอร์และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในจีโอโพลิเมอร์หลังจากเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน

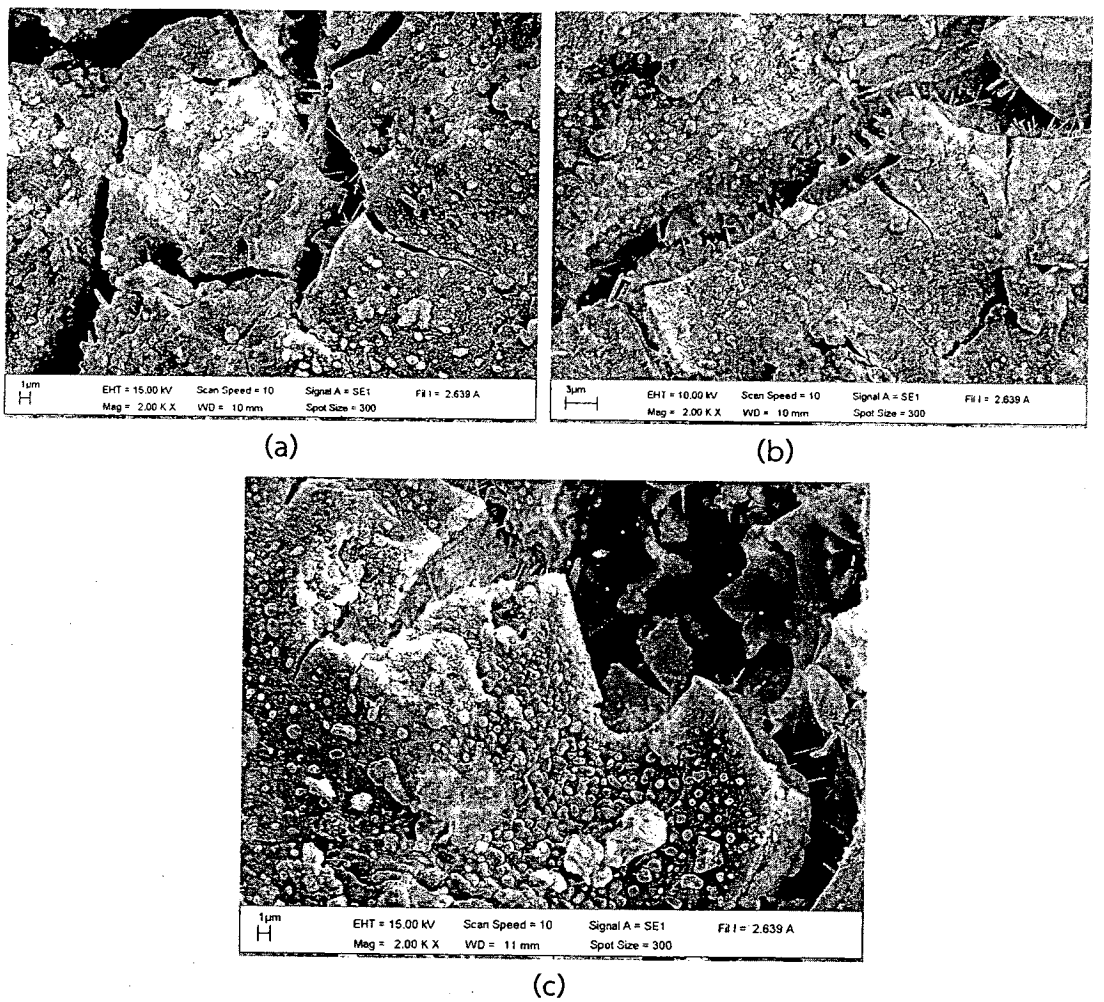
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยเทคนิค Scanning electron microscopy

การทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยเทคนิค SEM เป็นการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย FBC และตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่จากหลายความเข้มข้นของ NaOH คือ 10, 12 และ15 M ให้ผล ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าลอย FBC

จากรูปที่ 4.2 พบว่าโครงสร้างเถ้าลอย FBC ก่อนทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันกับเบสมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและมีผิวขรุขระ เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิต่ำถ่านหินจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน



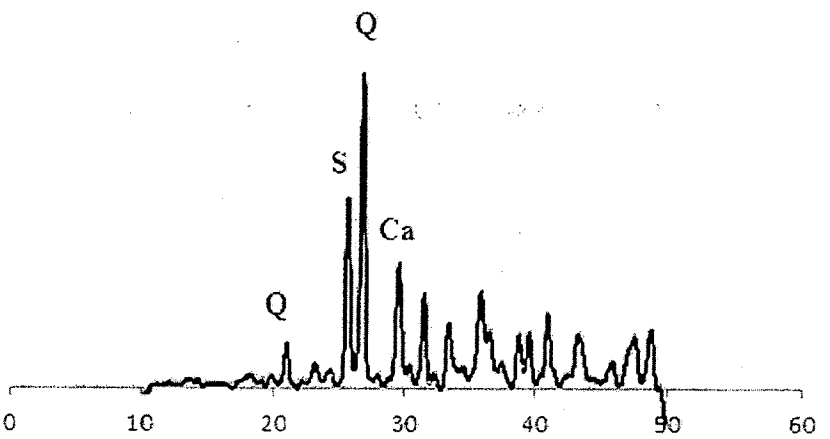
รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ (a) 10 M NaOH, (b) 12 M NaOH, (c) 15 M NaOH

จากรูปที่ 4.3 เป็นโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่เตรียมจากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 10, 12 และ 15 M พบว่ายังคงเห็นลักษณะส่วนประกอบของเถ้าลอย FBC ที่มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและมีผิวขรุขระ ซึ่งเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ของเถ้าลอย FBC จากรูปยังพบว่าเกิดการแตกร้าวของจีโอโพลิเมอร์ เมื่อสังเกตุภายในช่องว่างของรอยแตกร้าวจะพบวัตถุที่มีรูปร่างลักษณะคล้ายเข็มอยู่ระหว่างช่องว่างของการแตกร้าวซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดเอททริงไกต์ ส่งผลทำให้จีโอโพลิเมอร์เกิดการขยายตัวและแตกร้าว จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของเอททริงไกต์ พบว่าที่

ความเข้มข้นของ NaOH มาก จะมีแนวโน้มในการเกิดเอททริงไกต์ลดลง (Sheet and Kwan, 2003) ซึ่งปฏิกิริยามักเกิดที่ผิวของจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากมีการสัมผัสกับ NaOH ได้มากกว่าด้านใน

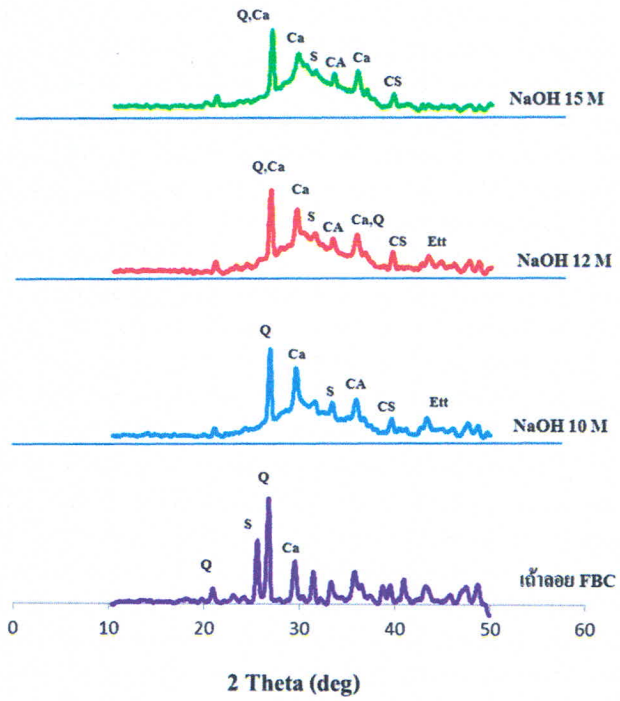
4.2.3 การทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเถ้าลอย FBC และตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากหลายความเข้มข้นของ NaOH ที่ 10, 12, และ 15 M ให้ผลต่างๆ ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 XRD จากการวิเคราะห์เถ้าลอย FBC

จากรูปที่ 4.4 Q คือ SiO_2, Ca คือ CaO และ S คือ $CaSO_4$ เมื่อทำการวิเคราะห์เถ้าลอย FBC ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามี CaO, $CaSO_4$ และ SiO_2 เป็นองค์ประกอบ ซึ่ง CaO มาจากปูนขาวที่นิยมใช้ในการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดเพื่อลดปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ และพบ $CaSO_4$ ที่เกิดจากการรวมตัวระหว่างปูนขาวกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์



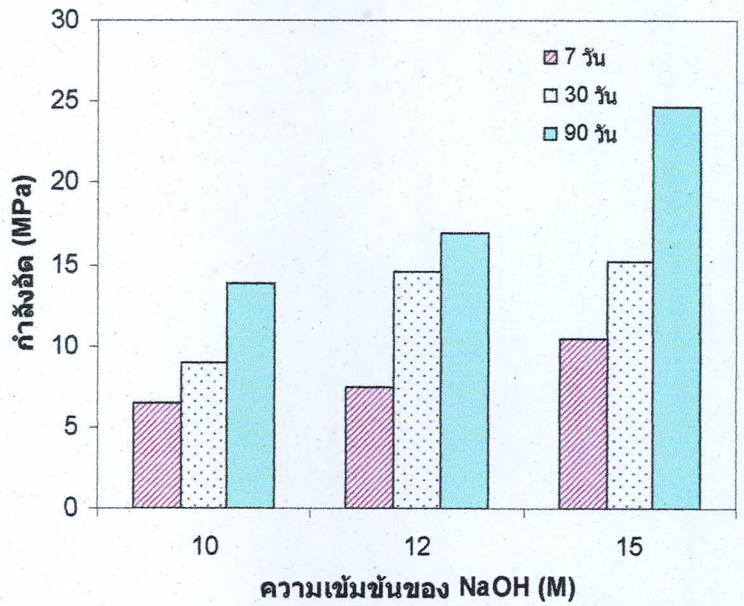
รูปที่ 4.5 XRD จากการวิเคราะห์เถ้าลอย FBC และตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH ต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 Q คือ SiO_2, Ca คือ CaO, CS คือ สารประกอบแคลเซียมซิลิเกต, CA คือ สารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนต, Ett คือ สารประกอบเอททริงไกต์และ S คือ $CaSO_4$ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่เตรียมจากสารละลาย NaOH ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเทคนิค XRD นำมาเปรียบเทียบกับเถ้าลอย FBC พบว่าที่บริเวณฐานพีกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ นั้นมีความกว้างมากกว่าฐานพีกของเถ้าลอย FBC เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความเป็นอสัณฐานมากกว่าเถ้าลอย FBC แสดงให้เห็นว่าการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์โดยการใช้เบสทำปฏิกิริยากับเถ้าลอย FBC ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารประกอบใหม่ที่มีสมบัติเปลี่ยนไป และที่บริเวณฐานพีกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ พบว่าจะมีฐานกว้างที่ชัดเจนที่ 27-30 องศา แสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับจีโอโพลิเมอร์ โดยสารที่พบในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ประกอบด้วยสารประกอบ $CaCO_3$ (แคลเซียมคาร์บอเนต), แคลเซียมซิลิเกต, แคลเซียมอะลูมิเนต และเอททริงไกต์ พบในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ไม่พบในเถ้าลอย FBC แสดงถึงการเกิดสารใหม่เนื่องจากที่ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชั่น และยังคงพบพีกของ SiO_2 และ CaO ซึ่งเหลือจากการเกิดปฏิกิริยา (Chindaprasirt and Rattanasak, 2010)

จากการทดลองพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากสารละลาย 10 M NaOH และ12 M NaOH นั้นพบสารประกอบเอททริงไกต์ (แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซัลเฟตไอออนทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตเกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า เอททริงไกต์ ซึ่งสารดังกล่าวไม่พบในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่เตรียมจาก 15 M NaOH

4.2.4 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ที่เตรียมจากสาระลาย NaOH ความเข้มข้นต่างๆ

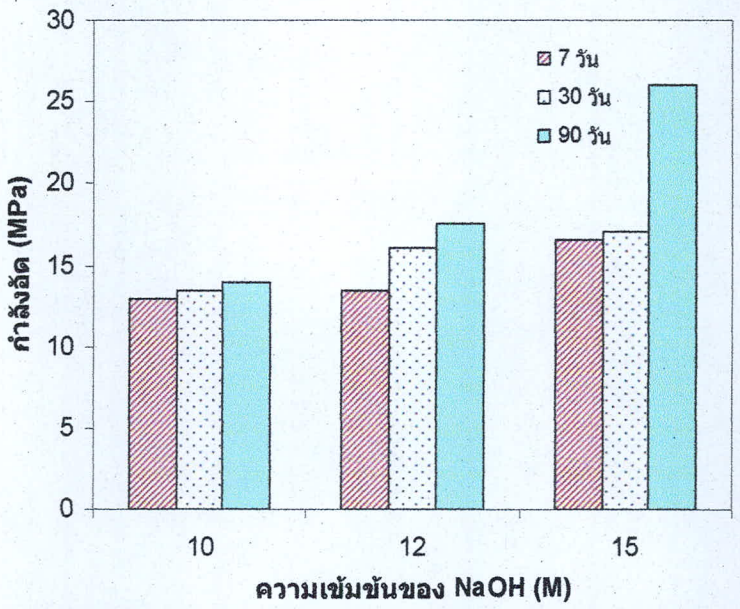
การศึกษาผลของกำลังอัดเป็นการศึกษาค่าแรงอัดที่สูงสุดที่ทำให้ก้อนลูกบาศก์ขนาด 5×5×5 ซม^3. จำนวน 3 ตัวอย่างเสียรูป กำลังอัดเป็นค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบคุณภาพของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักในการทำวิจัยเรื่องจีโอโพลิเมอร์ เพื่อประยุกต์ใช้งานก่อสร้างต่อไป และจากการทำวิจัยนี้เป็นเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เตรียมจากสารละลาย 10 M, 12 M, และ 15 M NaOH ทำการทดสอบค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 30 และ 90 วัน ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM C109 มีค่าการทดสอบกำลังอัดได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 พบว่ากำลังอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วันที่เตรียมจาก 15 M NaOH นั้นให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงที่สุดที่ 24.7 เมกกะปาสคาล ส่วนจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจาก 12 และ10 M NaOH ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 17.0 และ 13.8 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่ากำลังอัดที่อายุ 7 และ 30 วัน จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะพบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จะสูงขึ้นแปรผันตามกับความเข้มข้นของ NaOH เนื่องมาจากความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และเกิดการชะของไอออน Si^{4+} และ Al^{3+} มากขึ้น เกิดเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิเกตและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งให้กำลังที่สูง และจากลักษณะการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC มักจะเกิดอย่างช้าๆ ในช่วงต้นแต่จะให้กำลังสูงในระยะยาวทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (การเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต) ซึ่งเด่นกว่าการเกิดสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต และเนื่องจากเถ้าลอย FBC มีปริมาณแคลเซียมปริมาณมากจึงทำ

ให้เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตได้ (ปริญญาและชัย, 2552; Chindaprasirt and Rattanasak, 2010) โดยสารนี้จะเกิดมากขึ้นตามระยะเวลาการบ่มทำให้ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 90 วัน นั้นให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด



รูปที่ 4.7 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าลอยฟลูอิดไดซ์เบดผสมสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 (5Al) ของเถ้าลอยที่ 7 วัน, 30 วัน และ 90 วัน

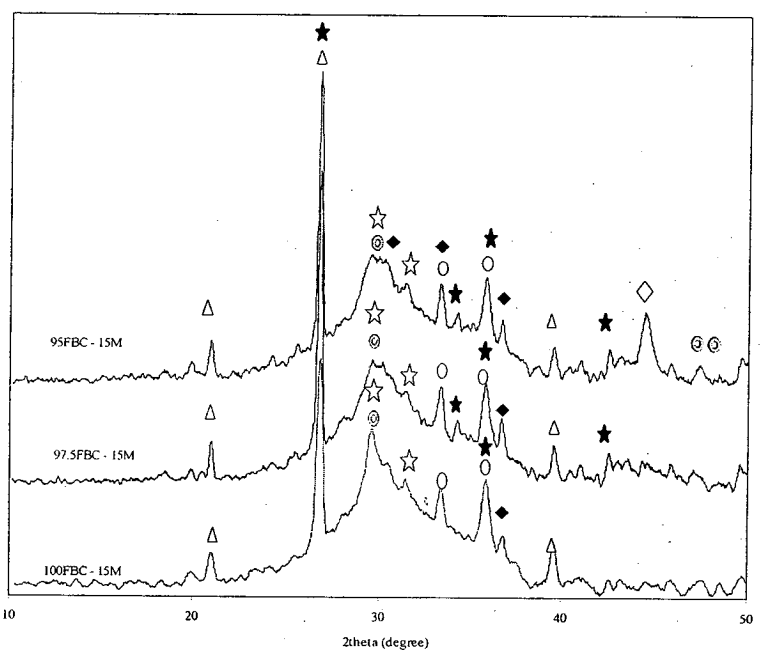
เมื่อทำการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสม สารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ของปริมาณเถ้าลอย โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10, 12 และ 15 M บ่มจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มจีโอโพลิเมอร์ที่ 25 °C จนครบอายุ 7 วัน, 30 วัน และ 90 วัน จีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าลอย FBC ที่ผสม 15 M NaOH เมื่อบ่มเป็นเวลา 90 วันจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากความสามารถในการชะซิลิกอนและอะลูมิเนียมไอออนที่มาก (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009) นอกจากนี้กำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องมาจากจีโอโพลิเมอร์ต้องการระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาให้สมบูรณ์ เมื่อบ่มจีโอโพลิเมอร์ให้นานขึ้นทำให้จีโอโพลิเมอร์มีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้น และสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์สูงขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและซิลิเกตได้สารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลังแก่วัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้

4.3 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

จากผล XRD และค่ากำลังอัด จึงเลือก 15 M NaOH มาผสมกับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) เพื่อผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์โดยผสมเถ้าลอย FBC กับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยแทนที่เถ้าลอย FBC ด้วย $Al(OH)_3$ ที่ปริมาณร้อยละ 2.5 และ 5 โดยน้ำหนัก การผสม $Al(OH)_3$ ในปริมาณมากกว่านี้จะทำให้จีโอโพลิเมอร์เกิดการบวมตัวระหว่างบ่มร้อน และรับกำลังได้ต่ำ (Rattanasak และคณะ, 2010)

4.3.1 การทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยเทคนิค XRD

จากรูปที่ 4.8 แสดงสัณฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย FBC ผสม $Al(OH)_3$ ร้อยละ 2.5 (ตัวอย่าง 97.5FBC) และร้อยละ 5 (ตัวอย่าง 9.5FBC) ที่เตรียมด้วยสารละลาย 15 M NaOH ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน



รูปที่ 4.8 XRD ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสม $Al(OH)_3$ ที่เตรียมจาก 15M NaOH

△ = SiO_2, ○ = $CaSO_4$, ● = CaO, ◎ =$CaCO_3$,

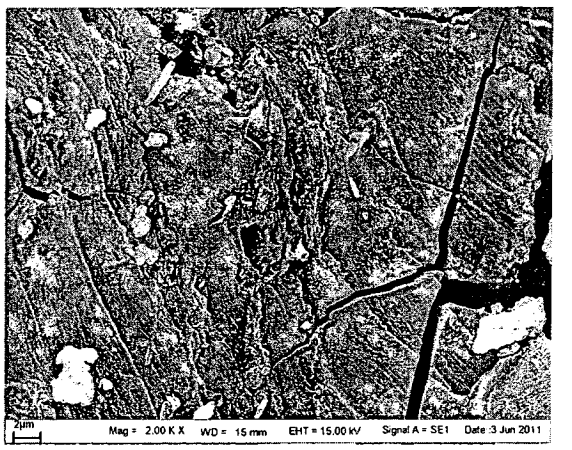
■ = Ettringite, ☆ = Calcium silicate, ★ = Alumino silicate, ◆ = Calcium aluminate , ◇ = Sodium aluminate

จากพีกในรูปที่ 4.8 ไม่พบการเกิดเอททริงไกต์ในจีโอโพลิเมอร์ที่ผสม $Al(OH)_3$ แต่พบสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมอะลูมิเนต ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลังแก่จีโอโพลิเมอร์ตามอายุการบ่ม อย่างไรก็ตาม การผสม $Al(OH)_3$ ร้อยละ 5 ทำให้เกิดสารประกอบโซเดียมอะลูมิเนต ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง 15 M NaOH และ $Al(OH)_3$ ที่มากเกินพอ ซึ่งสารประกอบดังกล่าวเป็นสารซีโอไลต์ (Inada และคณะ, 2005) ทำให้จีโอโพลิเมอร์รับแรงได้น้อยลงได้

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

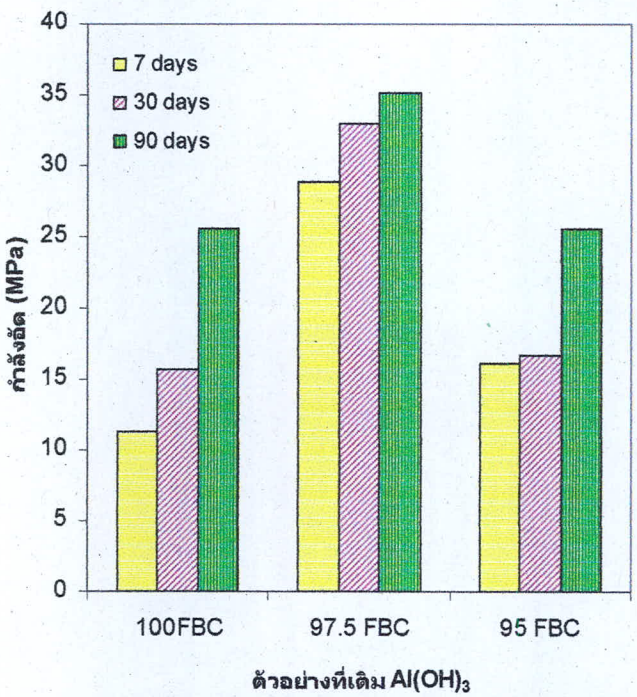
รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์และพบอนุภาคของเถ้าลอย FBC ที่ไม่เกิดปฏิกิริยา เนื้อจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer matrix) และรอยแตก โดยพบเอททริงไกต์รูปเข็มตามรอยแตกหรือช่องว่างของพื้นผิวของจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจาก 10M และ 12M NaOH ดังแสดงก่อนหน้านี้ในรูปที่ 4.3 a และ b ซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRD ที่พบพีคของเอททริงไกต์

แต่จีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจาก 15 M NaOH (รูปที่ 4.9 a และ b) ไม่พบเอททริงไกต์ตามรอยแตก เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นมากขึ้นจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซัลเฟตทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยาต่อกับซิลิกา และอะลูมินาจากเถ้าลอยเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน จีโอโพลิเมอร์ที่ผสม $Al(OH)_3$ ร้อยละ 2.5 และ 5 ที่เตรียมจาก 15 M NaOH ไม่พบเอททริงไกต์ตามรอยแตกหรือช่องว่างของโครงสร้างเช่นกัน



รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสม $Al(OH)_3$ ร้อยละ 2.5
(a) 100FBC-15 M NaOH, (b) 97.5FBC – 15 M NaOH

4.3.3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์



รูปที่ 4.10 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสม $Al(OH)_3$

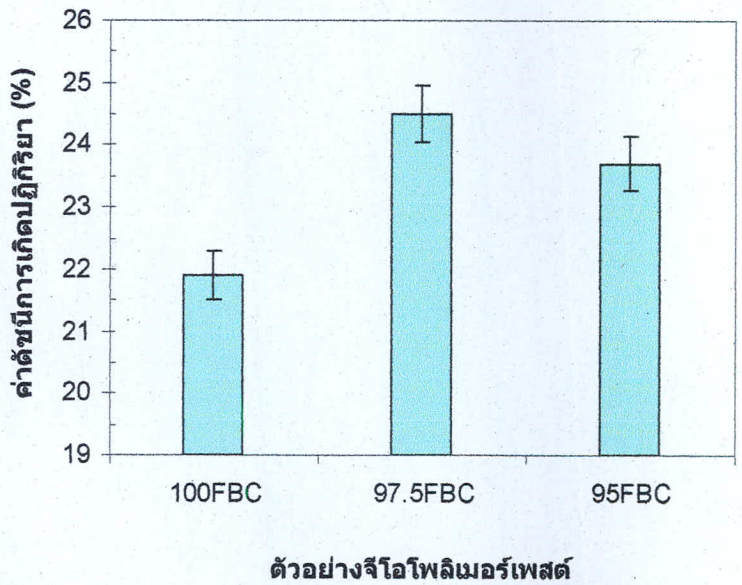
เมื่อผสม $Al(OH)_3$ ในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ที่ความเข้มข้น 15 M NaOH ส่งผลด้านกำลังอัด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า $Al(OH)_3$ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านกำลังแก่จีโอโพลิเมอร์ ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์สูงขึ้นกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ได้เติม $Al(OH)_3$ โดยค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม เนื่องจากเถ้าลอย FBC มีปริมาณแคลเซียมสูง จึงทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งสารดังกล่าวช่วยพัฒนาสมบัติด้านกำลังอัดของตัวอย่าง โดยการพัฒนากำลังจะขึ้นกับระยะเวลาการบ่มด้วย (ปริญญาและชัย, 2552; Chindaprasirt and Rattanasak, 2010)

จีโอโพลิเมอร์ที่ผสม $Al(OH)_3$ ร้อยละ 2.5 ที่อายุ 90 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด 35 เมกกะปาสคาล ซึ่งอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับซิลิกาภายใต้สภาวะเบส ได้เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต และทำปฏิกิริยากับแคลเซียมได้สารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนต ซึ่งสารทั้งสองสามารถเสริมแรงให้แก่จีโอโพลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม จีโอโพลิเมอร์ที่ผสม $Al(OH)_3$ ร้อยละ 5 จะได้ค่ากำลังอัดที่ลดลง เนื่องจากเกิดสารประกอบซิโอไลต์ พวกโซเดียมอะลูมิเนต ดังแสดงโดยผล XRD (รูปที่ 4.8)

4.3.4 ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

หลักการเกิดค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยาคือ 2 M HCl ใช้ในการละลายสารประกอบของแคลเซียมและแคลเซียมไอออน จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเหลือตะกอนที่ประกอบด้วย SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และเถ้าที่ไม่เกิดปฏิกิริยา (Unreacted ash) ส่วนสารละลาย 5% w/v Na_2CO_3 เติมลงไปเพื่อละลาย SiO_2, Al_2O_3, และ Fe_2O_3 เหลือเป็นตะกอนของเถ้าที่เกิดปฏิกิริยา (Termkhajornkit และคณะ, 2005)

จากการทดลองหาร้อยละดัชนีการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย FBC ผสม $Al(OH)_3$ ที่ร้อยละ 2.5 และ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยสารละลาย 15 M NaOH ที่อายุการบ่ม 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย FBC ล้วนมีค่าร้อยละ 21.9 เมื่อเติม $Al(OH)_3$ ลงในส่วนผสมพบว่าค่าค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 24.3 และ 23.7 สำหรับตัวอย่าง 97.5FBC และ 95FBC ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอย FBC และ $Al(OH)_3$ ในสารละลายเบสได้เป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งได้แก่สารประกอบแคลเซียมซิลิเกต อะลูมิโนซิลิเกตและแคลเซียมอะ,มิเนตมากขึ้น ดังแสดงในผล XRD (รูปที่ 4.8)



รูปที่ 4.11 ค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสม $Al(OH)_3$

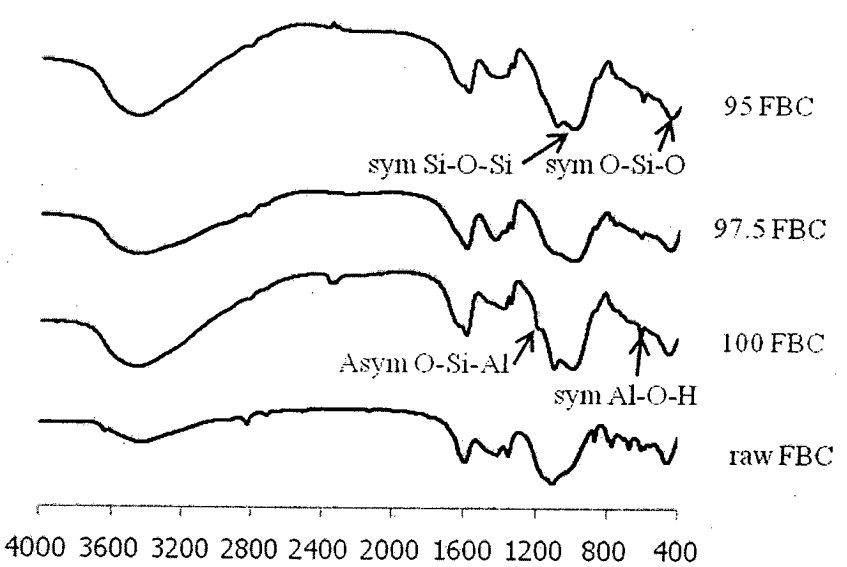
4.3.5 การศึกษาหมู่ฟังก์ชั่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยเทคนิค FT-IR

สเปคตรัม FT-IR ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ผสม $Al(OH)_3$ แสดงในรูปที่ 4.12 โดยทั่วไปสเปคตรัม FT-IR ของตัวอย่างจะสัมพันธ์กับการสั่นของพันธะเคมีที่เป็นค่าจำเพาะของหมู่ฟังก์ชั่นในสารตัวอย่าง โดยตารางที่ 4.2 แสดงเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชั่นที่พบในวัสดุจีโอโพลิเมอร์

ตารางที่ 4.2 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชั่นที่พบในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Lee and van Deventer, 2002)

เลขคลื่น (cm^{-1})	การสั่นของหมู่ฟังชั่น
3700-3600 (s)	Stretching vibration (-OH)
3600-2200 (s)	Stretching vibration (-OH, H-OH)
1700-1600	Bending vibration (H-O-H)
1200-950 (s)	Asymmetric stretching (Si-O-Si and Al-O-Si)
1100 (sh)	Asymmetric stretching (Si-O-Si)
850 (sh)	Si-O stretching, OH bending (Si-OH)
795 (sh)	Symmetric stretching (Si-O-Si)
688 (sh)	Symmetric stretching (Si-O-Si and Al-O-Si)
424 (s)	Bending (Si-O-Si and O-Si-O)
1340-1300	$-SO_3$
1426	CO_3^{2-}

m = medium, s = strong, and sh = shoulder



รูปที่ 4.12 สเปคตรัม FT-IR ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย FBC ผสม $Al(OH)_3$

พีกที่สนใจในวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะเป็นพีกที่เกิดจากการสั่นของสารประกอบออกไซด์ของ Si และ Al ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้น หมู่ฟังก์ชันของเถ้าลอย FBC พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ 3446 cm^{-1} ปรากฏพีกของ –OH ที่เลขคลื่นประมาณ 1438 cm^{-1} ปรากฏพีกของ C=O ใน $-CO_3^{2-}$ ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (Carbonation) (ปริญญา, 2548) และที่เลขคลื่นประมาณ 1118 cm^{-1} ปรากฏพีกของ Si-O จากสารประกอบซิลิกาในเถ้าลอย (Chindaprasirt and Rattanasak, 2009)

เมื่อเปรียบเทียบสเปคตรัมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผสม $Al(OH)_3$ กับเถ้าลอย FBC พบว่าพีกของ –OH ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ส่วนผสมต่างๆนั้นจะมีความกว้างและชัดเจนกว่าพีกของเถ้าลอย FBC เนื่องจากในการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์นั้นมีการใช้สารละลาย NaOH ทำให้ปรากฏพีกของ –OH ที่ได้จาก NaOH และ H_2O และยังพบว่าพีกของ C=O ใน $-CO_3^{-2}$ จะเด่นชัดในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นขึ้นระหว่างก๊าซ CO_2 กับสารละลาย NaOH ที่มากเกินพอในส่วนผสม และ CaO ที่พบในเถ้าลอยที่ทำปฏิกิริยากับ NaOH และ CO_2 ได้เป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) (ปริญญา, 2548) นอกจากนี้ยังพบการเคลื่อนตำแหน่งของพีก Si-O จาก 1117.21 cm^{-1} ในเถ้าลอยไปยังประมาณ 1008 cm^{-1} ซึ่งเป็นการเลื่อนตำแหน่งของพีก Si-O ไปยังตำแหน่งที่ต่ำลง แสดงถึงค่าพลังงานที่ลดลงและเกิดการก่อพันธะ Si-O ใหม่จากเดิมที่พบใน Si-O ของ SiO_2 ในเถ้าลอย FBC เกิดเป็น Si-O ในสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและอะลูมิโนซิลิเกต (Rattanasak และคณะ, 2011)

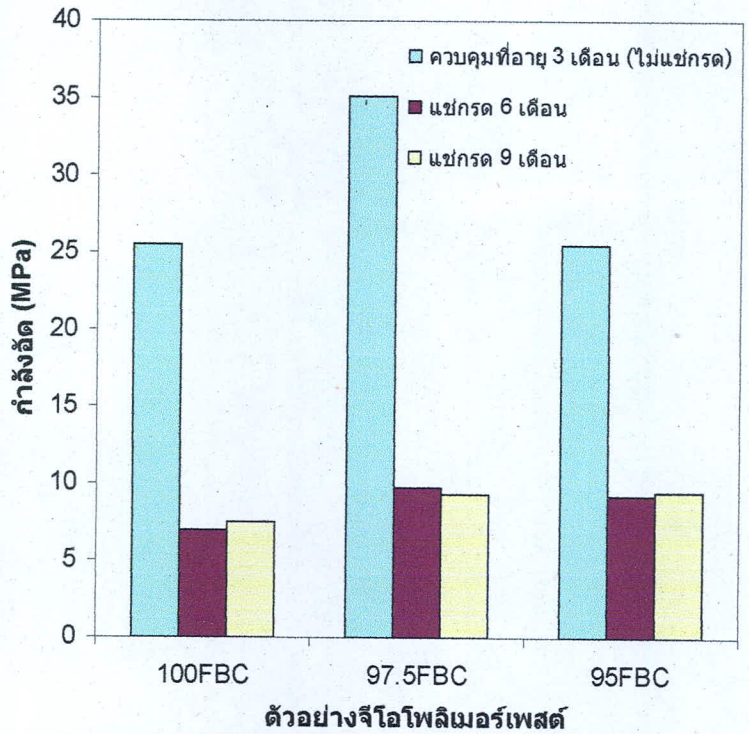
4.3.6 การศึกษาความทนทานของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

วัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ถูกทดสอบความคงทนโดยการนำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 5 โดยปริมาตร เป็นเวลา 6 และ 9 เดือน แล้วทดสอบสมบัติความคงทนในรูปของค่ากำลังอัด

ความคงทนของจีโอโพลิเมอร์ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นกรดแก่ที่สามารถกัดกร่อนหรือชะสารประกอบแคลเซียม และแคลเซียมอิสระออกมาจากคอนกรีตได้ การเติม $Al(OH)_3$ ลงในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์ช่วยให้ได้วัสดุที่มีเนื้อแน่น ทำให้กรดชะสารประกอบแคลเซียมออกมาได้ยากขึ้น ทำให้การสูญเสียค่ากำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ผสม $Al(OH)_3$ น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ควบคุม (ตัวอย่าง 100FBC) เนื่องจากเจีโอโพลิเมอร์ควบคุมมีปริมาณแคลเซียมอิสระอยู่ปริมาณมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.13 อย่างไรก็ตาม จีโอโพลิเมอร์จะมีการกัดกร่อนตามวันเวลาที่เพิ่มขึ้น และลดลงอย่างมากเมื่ออายุการบ่ม 6 เดือน

เนื่องจากเถ้าลอยที่ใช้มีปริมาณแคลเซียมสูง เมื่อแช่ตัวอย่างเป็นเวลานานขึ้นคือ 9 เดือน ค่ากำลังอัดจะคงที่ หรือลดลงไม่มากนัก ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากไม่เหลือแคลเซียมอิสระในจีโอโพลิเมอร์แล้ว



รูปที่ 4.13 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสม $Al(OH)_3$ ในสภาวะกรด

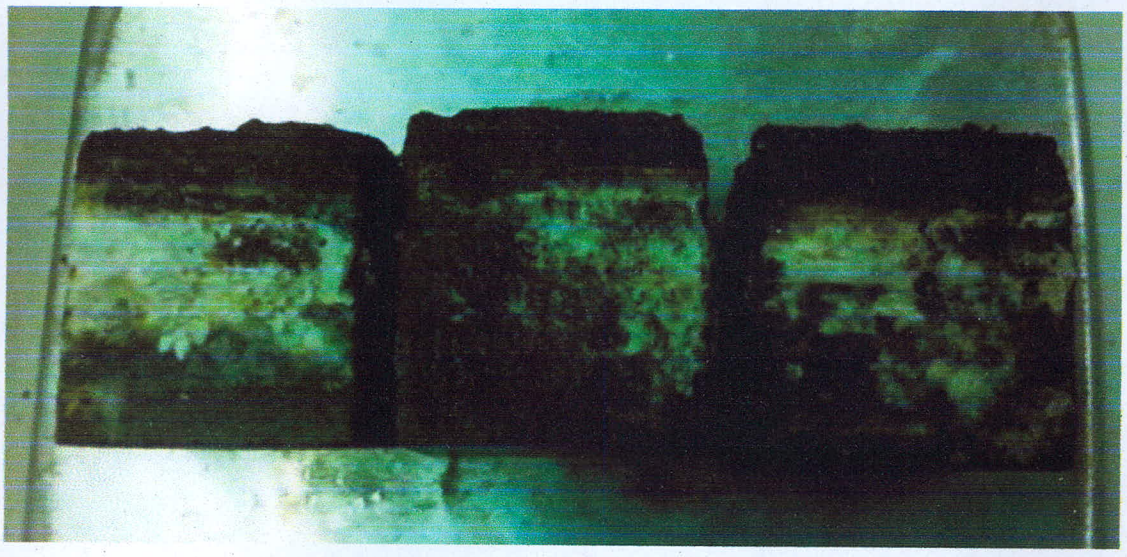
ปฏิกิริยาการชะสารประกอบแคลเซียมในสารละลายกรด สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้ (Mindess และคณะ, 2002)

$$Ca(OH)_2 + 2H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + 2H_2O$$

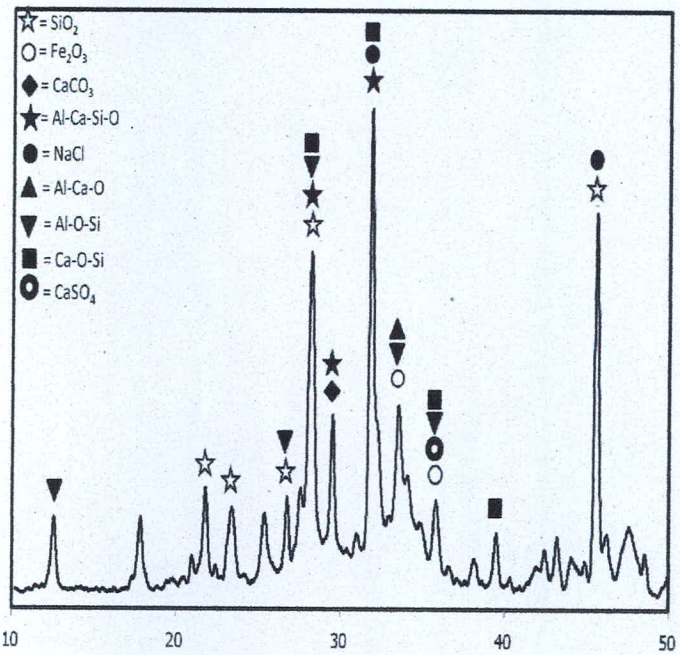
หากกรดมีความเข้มข้นสูง สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตอาจถูกชะออกมาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ได้เป็นซิลิกาเจลได้ ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความพรุนส่งผลต่อค่ากำลังอัดลดลง ดังสมการต่อไปนี้ (Skalny และคณะ, 2002)

$$3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 6H^+ \xrightarrow{H_2O} 3Ca^{2+} + 2(SiO_2{\cdot}nH_2O) + 6H_2O$$

รูปที่ 4.14 แสดงผิวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์และสารประกอบที่เคลือบผิวที่แช่ในสารละลายกรดและสารประกอบที่เคลือบผิว โดยพบการบวมตัวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ เมื่อนำสารประกอบที่เคลือบผิวจีโอโพลิเมอร์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบสารประกอบของซิลิกาและสารประกอบแคลเซียมดังแสดงในรูปที่ 4.15



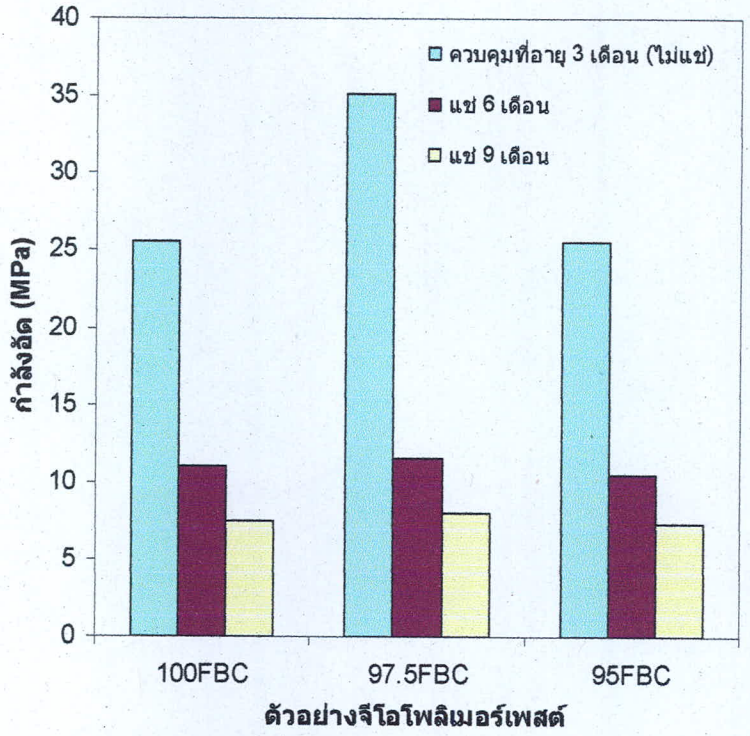
รูปที่ 4.14 ผิวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เมื่อแช่กรด 5% HCl เป็นเวลา 6 เดือน



รูปที่ 4.15 XRD ของสารประกอบที่เคลือบผิวจีโอโพลิเมอร์ที่แช่กรด 5% HCl เป็นเวลา 6 เดือน

ความคงทนของจีโอโพลิเมอร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

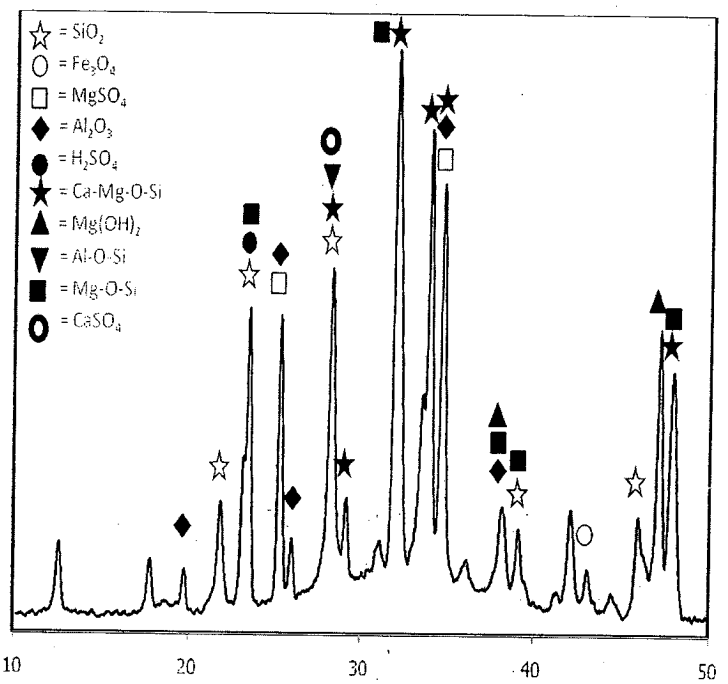
จากค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ทุกตัวอย่างลดลงอย่างมากเมื่อแช่ในสารละลาย $MgSO_4$ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 เนื่องจากการใช้สารเคมีกลุ่มซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะแทรกตัวไปยังรูพรุนของจีโอโพลิเมอร์และช่วยเร่งปฏิกิริยาระหว่างอะลูมินากับซิลิกาทำให้เกิดเอททริงไกต์แทรกตามช่องว่างทำให้ขนาดของโพรงและความพรุนลดลงเป็นผลทำให้กำลังอัดของเถ้าลอยผสมเพิ่มขึ้นได้ (ปริญญา, 2548 และ Chindaprasirt และคณะ, 2013) นอกจากนี้ยังพบสารประกอบที่เคลือบผิวจีโอโพลิเมอร์เช่นเดียวกับที่แช่ในกรด



รูปที่ 4.16 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสม $Al(OH)_3$ ในสารละลาย $MgSO_4$

สารประกอบที่ก่อตัวที่ผิวตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เมื่อแช่ ในสารละลาย $MgSO_4$ ได้แก่ สารประกอบ $Mg(OH)_2$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง Mg^{2+} (จากสารละลาย $MgSO_4$) กับ OH^- (จาก NaOH ที่ใช้ในการผสม) ดังสมการต่อไปนี้ (ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วย XRD ในรูปที่ 4.17)

$$Mg^{2+} + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2$$



รูปที่ 4.17 XRD ของสารประกอบที่เคลือบผิวจีโอโพลิเมอร์ที่แช่กรด 5% $MgSO_4$ เป็นเวลา 6 เดือน

นอกจากนี้ อาจพบปฏิกิริยาที่ผิวระหว่างไอออน Mg^{2+}, SO_4^{2-} และ OH^- ที่ชะออกมาจากก้อนจีโอโพลิเมอร์ เกิดเป็นสารประกอบ $Mg(OH)_2$ และ $CaSO_4$ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ (Skalny และคณะ, 2002)

$$Mg^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq) + Ca(OH)_2(s) + H_2O(l) \rightarrow Mg(OH)_2(s) + CaSO_4 2H_2O$$

แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่บริเวณผิวของจีโอโพลิเมอร์ นอกจากนั้นอาจเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($MgO{\cdot}SiO_2{\cdot}8H_2O$) ซึ่งเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมไอออนกับซิลิกา (Skalny และคณะ, 2002) โดยการเกิดสารประกอบทั้งสองทำให้ตัวอย่างเกิดการสูญเสียน้ำหนักซึ่งเกิดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของรูพรุนและช่องว่างในตัวอย่าง (Skalny et al., 2002) เป็นผลให้ค่ากำลังอัดลดลง อีกทั้งการสูญเสียน้ำหนักเกิดจาก SiO_2 ที่ถูกชะออกมาจากมอร์ต้าร์ เกิดเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกตปนออกมากับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่พบที่ส่วนที่ก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์