

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิจัยนี้ได้มีการนำเถ้าลอยที่เป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม มาทำวิจัยเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ในปัจจุบันให้มีปริมาณที่ลดน้อยลง แต่มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดี ซึ่งเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้ในงานคอนกรีต ที่ประกอบไปด้วย ซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบในการผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเอาเถ้าลอยประเภทซับบิทูมินัส (sub-bituminous) ที่เกิดจากกระบวนการเผาแบบ FBC ที่เผาที่อุณหภูมิในช่วง 700 – 800°C ได้เถ้าลอยที่มีรูปร่างไม่แน่นอน มาทำการบดลดขนาดเพื่อเพิ่มความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและใช้เป็นสารตั้งต้นในการเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ) เท่ากับ 1, 1.5, 2 และ 2.5 ที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าลอย FBC บด

โดยจะทำการศึกษาร้อยละประกอบทางเคมีของเถ้าลอยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF แสดงในตารางที่ 1 พบว่า องค์ประกอบหลักของเถ้าลอย คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), แมกนีไทด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นต้น และมีสมบัติทางสัณฐานวิทยาที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction) ศึกษา กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อศึกษาความแข็งแรง ศึกษาโครงสร้างจุลภาคจีโอโพลิเมอร์เฟส การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (energy dispersive x-ray spectrometer) ศึกษาค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยา (degree of reaction) การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โดยเทคนิค infrared spectroscopy และศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA-DTG

#### 4.1 การทดสอบเถ้าลอยโดยเทคนิค x-ray fluorescence

จากการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ในตัวอย่างเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินแบบฟลูอิด ไบรด์ (เถ้าลอย FBC) ด้วยเทคนิค x-ray fluorescence ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีที่พบในตัวอย่าง แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ทดสอบโดย ห้องปฏิบัติการเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ หน่วยวิจัยลักษณะเฉพาะทางของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

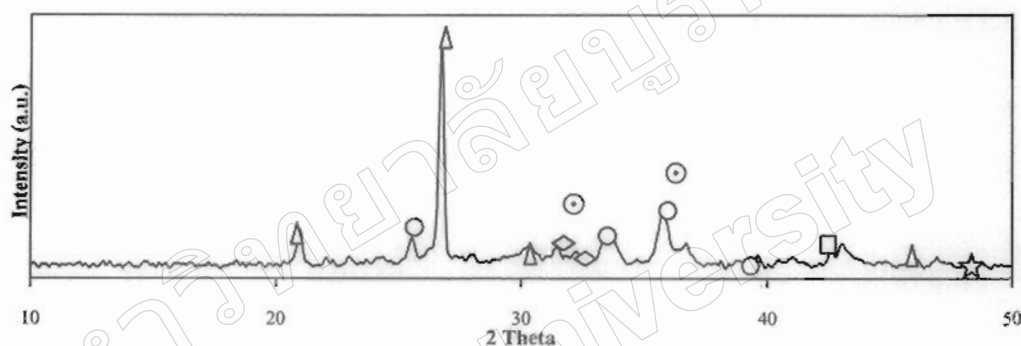
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเถ้าลอย FBC

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SiO <sub>2</sub>	31.58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.37
CaO	12.63
SO <sub>3</sub>	6.33
MgO	3.52
K <sub>2</sub> O	1.13
Na <sub>2</sub> O	1.05
TiO <sub>2</sub>	0.78
MnO	0.25
SrO	0.17
BaO	0.15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02
NiO	0.02
ZrO <sub>2</sub>	0.02
Cl	0.01
Rb <sub>2</sub> O	0.01
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01
LOI at 1025 °C	6.61
รวม	100.00

จากตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณและองค์ประกอบต่างๆ ของเถ้าลอย FBC ซึ่งเถ้าลอยดังกล่าวได้จากกระบวนการเผาที่ใช้ถ่านหินชนิดซับบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง เผาด้วยระบบฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิ 700-800 °C เมื่อวิเคราะห์ด้วย XRF พบว่า เถ้าลอยมีองค์ประกอบหลักคือ

SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ CaO มีอยู่ร้อยละ 31.58, 21.18, 14.37 และ 12.63 ตามลำดับ จัดเป็นเถ้าลอยชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซัลฟิวไรต์เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณของ SiO<sub>2</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มากกว่าร้อยละ 50 และปริมาณ CaO สูง เนื่องจากในขั้นตอนการเผาถ่านหินด้วยระบบฟลูอิดไคส์เบคจะมีการพ่นปูนขาวเข้าไปในระบบ เพื่อให้ปูนขาวไปดักจับก๊าซ SO<sub>x</sub> เพื่อไม่ให้ออกไปสู่สิ่งแวดล้อม เถ้าชนิดนี้สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง ซึ่งเถ้าลอยชนิด C จะมี SiO<sub>2</sub> ต่ำและยังมี Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่ำด้วย (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548)

การวิเคราะห์เถ้าลอย FBC ด้วยเทคนิค x-ray diffraction เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเถ้าลอย FBC แสดงดังภาพที่ 4.1



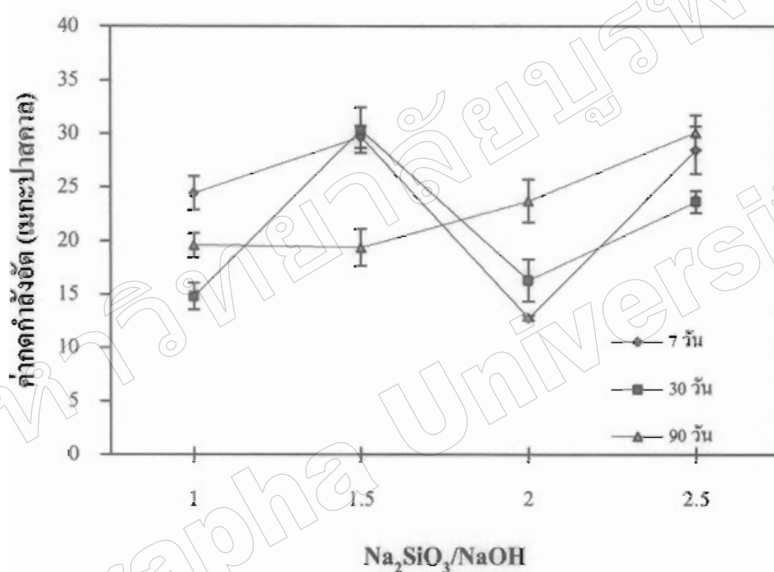
ภาพที่ 4.1 XRD ของเถ้าลอย FBC



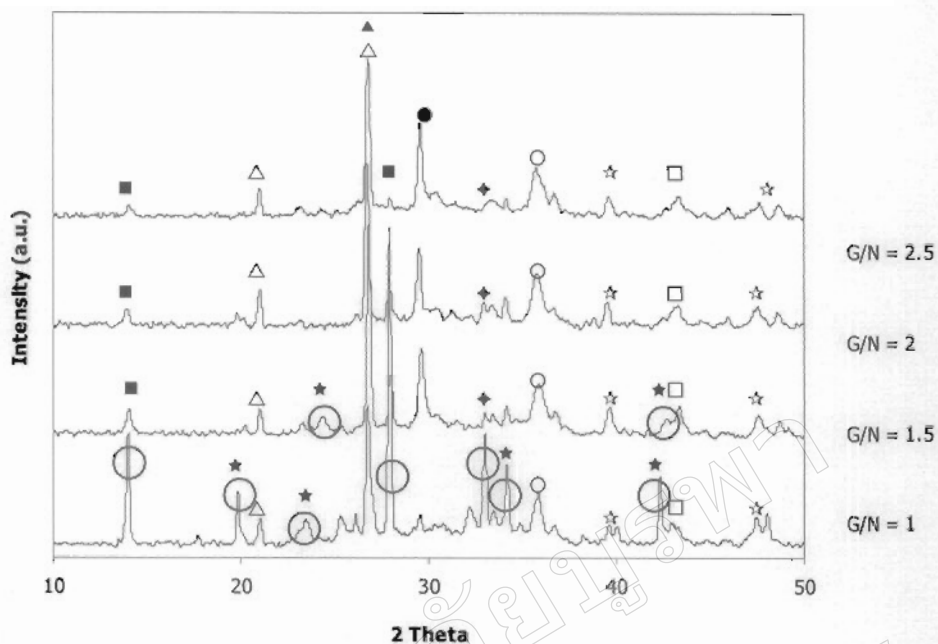
จากภาพที่ 4.1 เมื่อทำการวิเคราะห์เถ้าลอย FBC ด้วยเทคนิค XRD พบว่า เถ้าลอยชนิดนี้สามารถเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากมี SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นองค์ประกอบ แต่ยังไม่เหมาะสมเท่าที่ควร เนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานต่ำ จึงต้องบดลดขนาดและเพิ่มความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารละลายที่ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 15 โมลาร์ (15 M NaOH) ทำหน้าที่ชะซิลิกอนและอลูมิเนียมออกไซด์ออกจากเถ้าลอย และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ที่ประกอบด้วย Na<sub>2</sub>O ร้อยละ 9, SiO<sub>2</sub> ร้อยละ 31, H<sub>2</sub>O ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณซิลิกาที่ละลายได้ (dissolved silica) และช่วยในการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ (Rattanasak & Chindaprasirt, 2009) ในการทดลองนี้ได้ทำการบดเถ้าลอย FBC 2 ชั่วโมง ได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.03 ไมครอน โดยเถ้าลอยดังกล่าวมีขนาดอนุภาคก่อนบด 28.16 ไมครอน

## 4.2 การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

การศึกษาค่าแรงอัดเป็นการศึกษาค่าแรงอัดที่สูงที่สุดที่ทำให้ก้อนลูกบาศก์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ซม.<sup>3</sup>. ตัวอย่างจำนวน 3 ก้อนเสียรูป กำลังอัดเป็นค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบคุณภาพของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักในการทำวิจัยเรื่องจีโอโพลิเมอร์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างต่อไป โดยเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ครบระยะกำหนดเวลาที่ทำการบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ  $25 \pm 3$  °C นาน 7, 30 และ 90 วัน ทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด ผลที่ได้เป็นดังนี้



ภาพที่ 4.2 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอย FBC ที่อายุ 7, 30 และ 90 วัน



ภาพที่ 4.3 XRD ของจีโอโพลิเมอร์พาสต์จากเถ้าลอย FBC ที่อายุ 90 วัน

$\triangle$  =  $\text{SiO}_2$ ,  $\circ$  =  $\text{CaSO}_4$ ,  $\diamond$  =  $\text{CaO}$ ,  $\square$  =  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\star$  =  $\text{CaCO}_3$ ,  
 $\blacktriangle$  = calcium silicate,  $\bullet$  = aluminosilicate,  $\blacksquare$  = alibite zeolite,  
 $\star$  = sodium silicate,  $\blacklozenge$  = natrolite zeolite

ค่ากำลังอัดและผล XRD ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 จากค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่าผลิตภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์ได้แก่สารประกอบแคลเซียมซิลิเกต อลูมิเนียมซิลิเกต โซเดียมซิลิเกต และซีโอไลต์พวกอัลไบต์ และเนโทรไลต์ โดยอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  มีผลต่อกำลังของวัสดุ โดยที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 1 ให้ค่ากำลังอัดที่ 25 เมกะปาสคาลที่อายุ 7 วัน และลดลงมาที่ 15 และ 20 เมกะปาสคาล ที่อายุ 30 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยปริมาณ  $\text{NaOH}$  ที่มากจะมีผลต่อค่ากำลังอัดอย่างเห็นได้ชัดและพบในซีโอไลต์พวกอัลไบต์ และเนโทรไลต์ และโซเดียมซิลิเกตในตัวอย่าง โดยซีโอไลต์เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ใน 15  $\text{NaOH}$  ในปริมาณที่มาก ส่วนโซเดียมซิลิเกตเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{NaOH}$

เมื่อเพิ่มอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เป็น 1.5 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่ากำลังอัดสูงประมาณ 30 เมกะปาสคาลที่อายุ 7 และ 30 วัน แต่กำลังอัดจะลดอย่างมากมีค่าประมาณ 20 เมกะปาสคาลที่อายุ 90 วัน แสดงว่าอาจมีการก่อตัวของซีโอไลต์พวกอัลไบต์ และเนโทรไลต์ และโซเดียมซิลิเกต ซึ่งสารดังกล่าวก่อให้เกิดผลเสียต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

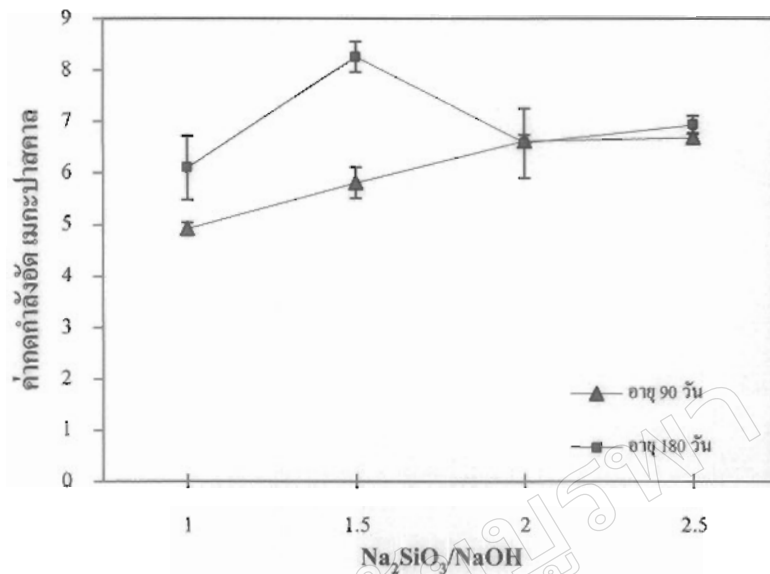
ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 2 ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มเหมือนกับคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ เนื่องจากแก้วลอย FBC มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง ดังนั้นจึงสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกอนออกไซด์ในสภาวะเบสได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ทำให้กำลังอัดแก่ตัวอย่าง และมีการพัฒนากำลังอัดตามอายุของการบ่ม นอกเหนือจากสารประกอบอลูมิโนซิลิเกตที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักคือโพลิเมอร์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552) ส่วนอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 2.5 ให้ค่ากำลังอัดที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอายุของการบ่มเช่นเดียวกับที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 2 โดยให้ค่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 30 เมกะปาสกาล

#### 4.2.1 การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ร้อยละ 3

เตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิ  $65^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาบ่มในสารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 3 จนครบอายุที่ 90 วัน และ 180 วัน นำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ครบกำหนดอายุแล้ว มาทำการทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องกดกำลังตามมาตรฐาน ASTM C109 ทำการทดสอบอายุละ 3 ตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ย ได้ดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ กับที่บ่มในสารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$

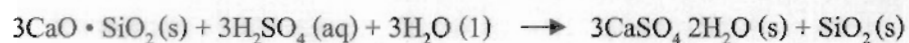
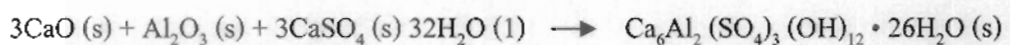
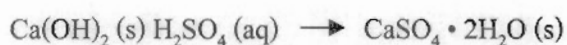
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 90 วัน (เมกะปาสกาล)	
	บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ $25\pm 3^\circ\text{C}$	บ่มในสารละลาย $\text{H}_2\text{SO}_4$
1	17.146	4.796
1.5	19.38	6.131
2	21.432	6.964
2.5	30.126	7.298



ภาพที่ 4.4 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในสารละลายกรดซัลฟิวริก ที่อายุ 90 และ 180 วัน

จากภาพที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในสารละลายกรดซัลฟิวริก ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 1 กับ 1.5 ให้ค่ากำลังอัดอยู่ที่ประมาณ 5 และ 5.8 เมกะปาสกาลที่อายุ 90 วัน และเพิ่มขึ้นมาเป็น 6 และ 8.2 เมกะปาสกาล ที่อายุ 180 วัน ส่วนที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 2 ให้ค่ากำลังอัดประมาณ 6.6 เมกะปาสกาล ที่อายุ 90 วัน และที่อายุ 180 วัน ให้ค่ากำลังอัดประมาณ 7 เมกะปาสกาล ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 2.5 ให้ค่ากำลังอัดที่ประมาณ 6.6 เมกะปาสกาล ที่อายุ 90 วัน และที่อายุ 180 วัน ให้ค่ากำลังอัดประมาณ 6.9 เมกะปาสกาล

โดยค่ากำลังอัดลดลงอย่างมากเมื่อบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในกรด เนื่องจากกรดจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและสารประกอบอื่น ๆ ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามสมการดังต่อไปนี้ (Chindapasirt et al., 2013)



ที่อายุการบ่มจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์มากขึ้น ค่ากำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์อาจเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารประกอบพวกแคลเซียมซัลเฟต และเอททริงไคต์ที่เกิดขึ้นเข้าไปแทรกอยู่ในรูพรุนของจีโอ โพลีเมอร์ ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น (Chindaprasirt et al., 2013)

#### 4.2.2 การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์ที่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ )

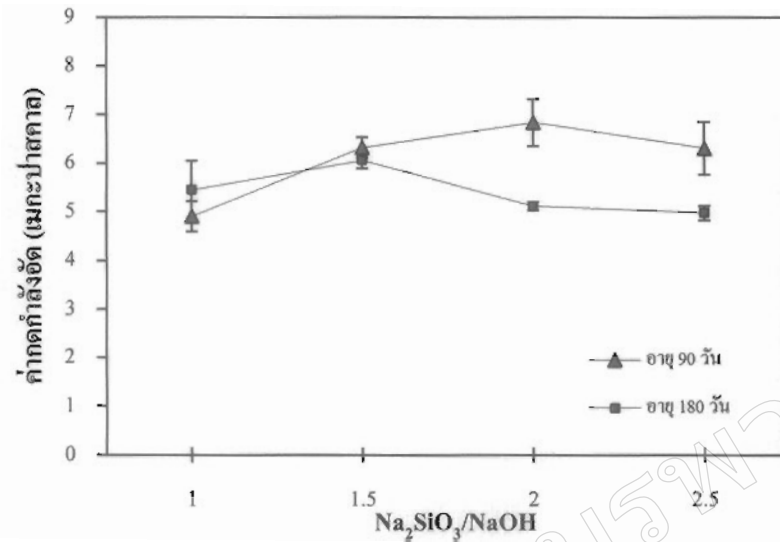
##### ร้อยละ 5

เตรียมจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์ที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิ  $65^{\circ}C$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 5 จนครบอายุที่ 90 วัน และ 180 วัน นำตัวอย่างจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์ที่ครบกำหนดอายุแล้วมาทำการทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องกดกำลังตามมาตรฐาน ASTM C109 ทำการทดสอบอายุละ 3 ตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ย ได้ผลดังภาพที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ดาร์ที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ กับที่บ่มในสารละลาย  $MgSO_4$

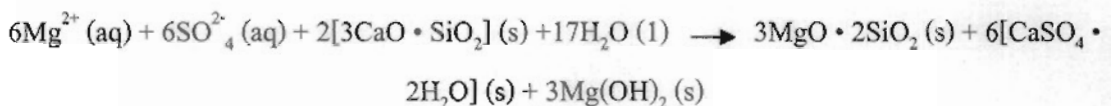
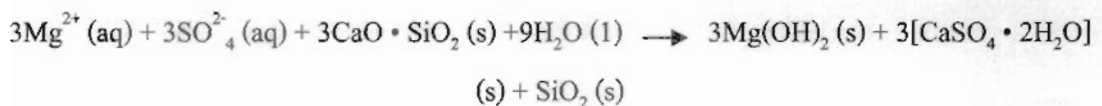
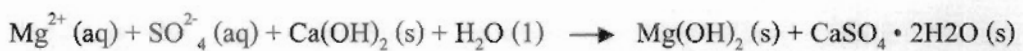
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH	ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 90 วัน (เมกะปาสกาล)	
	บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ $25\pm 3^{\circ}C$	บ่มในสารละลาย $MgSO_4$
1.0	17.146	4.904
1.5	19.38	6.325
2.0	21.432	6.839
2.5	30.126	6.311





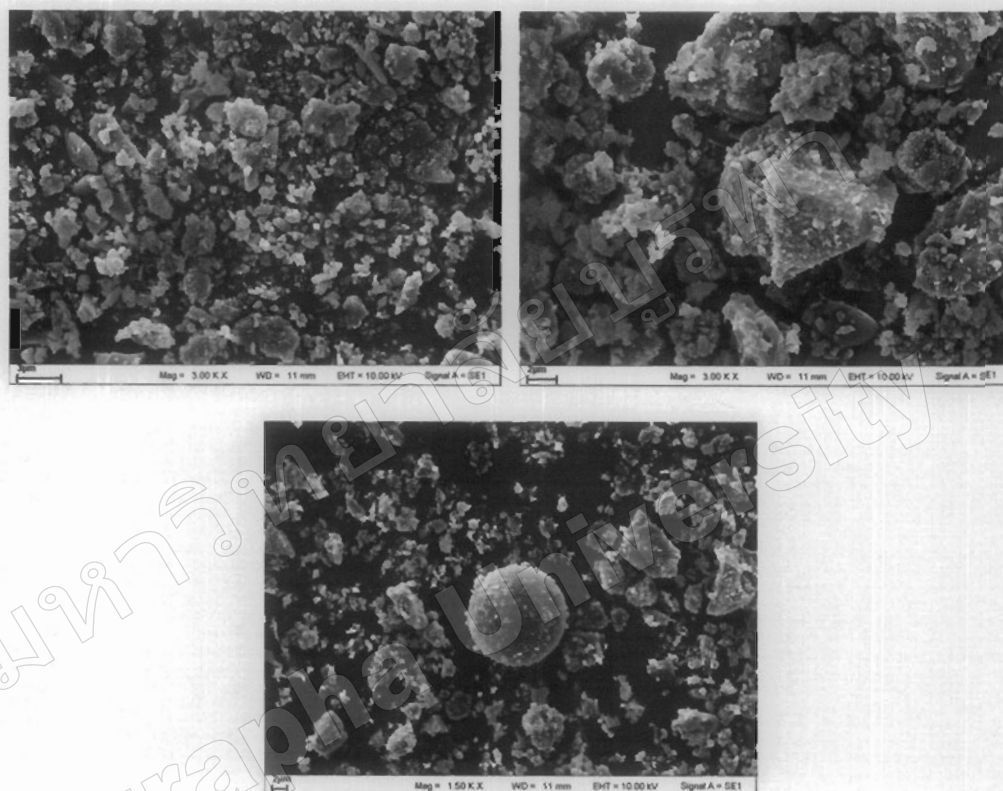
ภาพที่ 4.5 ค่าก้างอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 90 และ 180 วัน

จากภาพที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยค่าก้างอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 90 และ 180 วัน พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 1 ให้ค่าก้างอัดอยู่ที่ ประมาณ 4.9 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน และเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 5.4 เมกะปาสกาล ที่อายุ 180 วัน ส่วนที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 1.5, 2 และ 2.5 ที่อายุ 90 วัน ให้ค่าก้างอัดที่ ประมาณ 6.3, 6.8 และ 6.3 เมกะปาสกาล แต่เมื่ออายุ 180 วัน มีค่าก้างอัดเริ่มลดลงอย่างเห็นได้ชัดคือ 6, 5.1 และ 4.9 เมกะปาสกาล เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์เกิดการสูญเสียไฮดรอกไซด์ไอออนในสารซัลเฟต ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนเป็นตัวทำให้เกิดความสมดุลด้านประจุไฟฟ้าของในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ ซึ่งการสูญเสียดังกล่าวจะทำให้เกิดความเค้นและรอยแตกส่งผลต่อค่าก้างอัดทำให้ค่าที่ได้ลดลง (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2548) โดยปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังต่อไปนี้ (Chindapasirt et al., 2013)



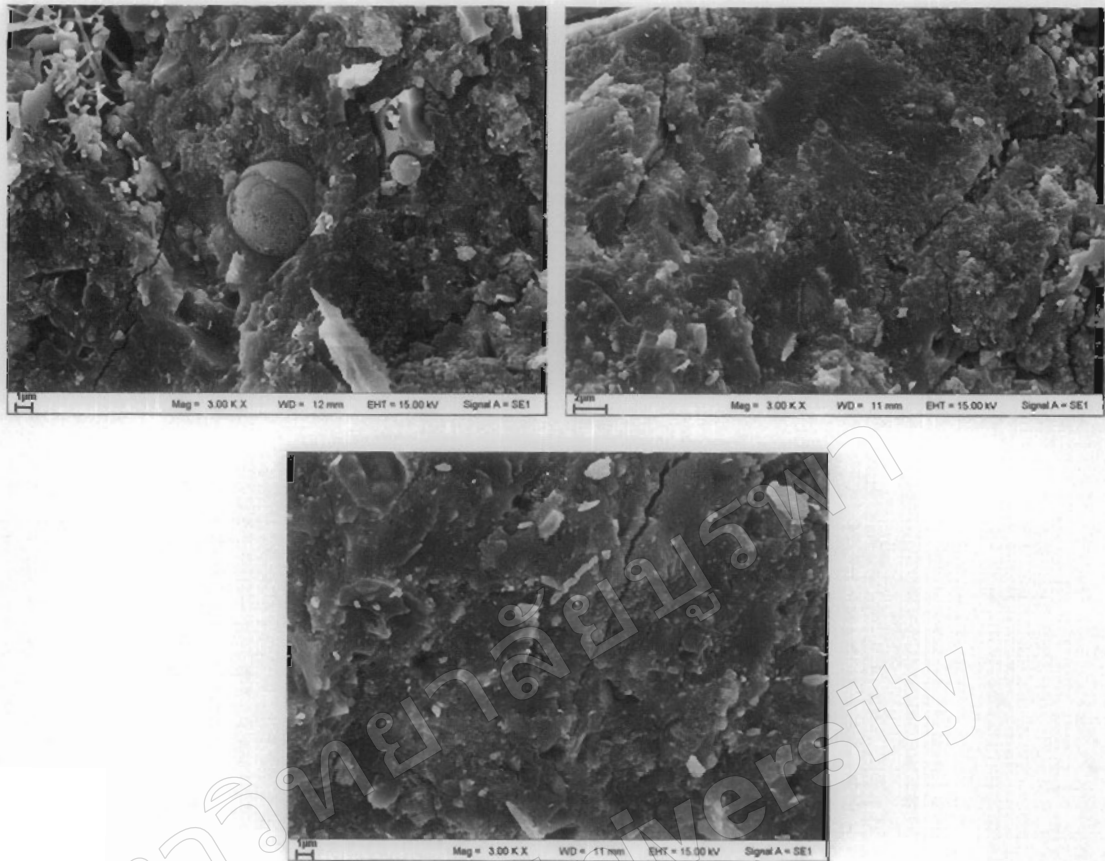
### 4.3 โครงสร้างจุลภาคจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยเทคนิค scanning electron microscope เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของถ้ำลอย FBC และจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอย FBC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 3 เดือน



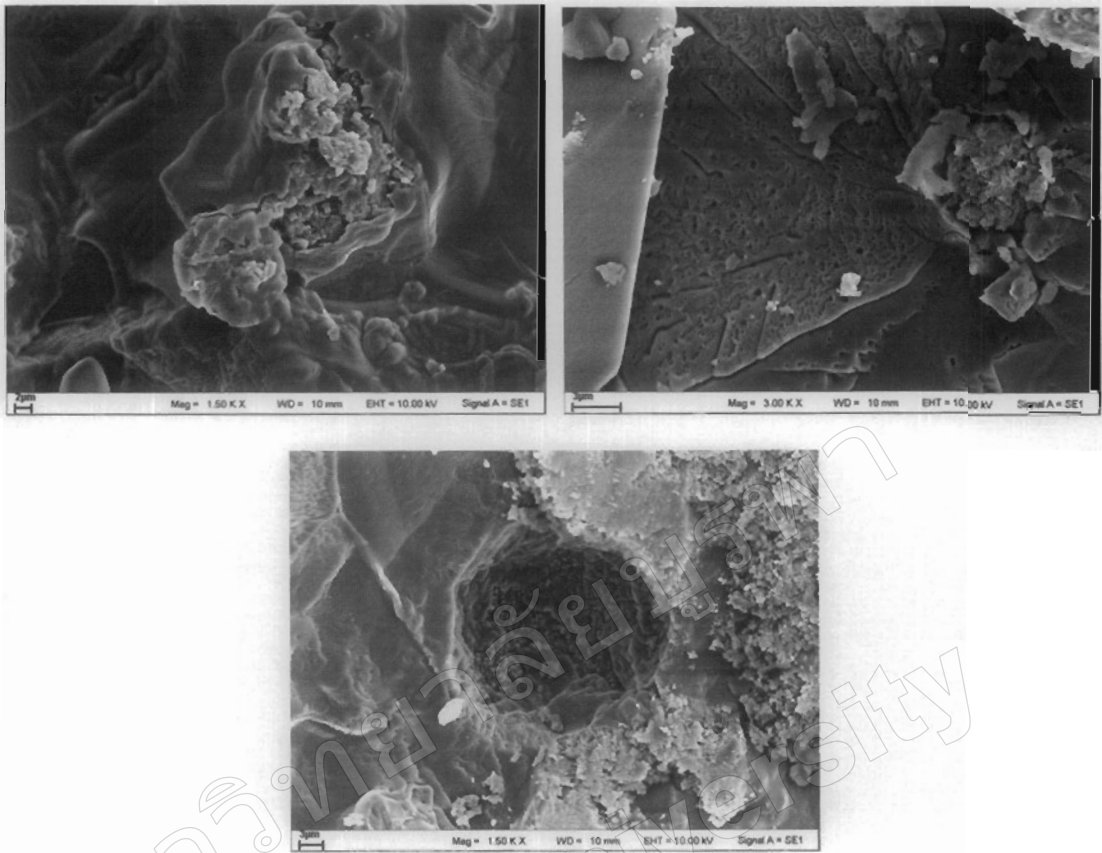
ภาพที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของถ้ำลอย FBC

จากภาพที่ 4.6 พบว่าโครงสร้างของถ้ำลอย FBC มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนผิวขรุขระ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอุณหภูมิต่ำในการเผา ถ่านหินจึงเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน และบางส่วนมีลักษณะเป็นทรงกลมผิวค่อนข้างเรียบ เนื่องจากเกิดการหลอมของถ้ำลอยทำให้มีรูปร่างเป็นทรงกลม (ปริญาญา จินดาประเสริฐ, 2548)



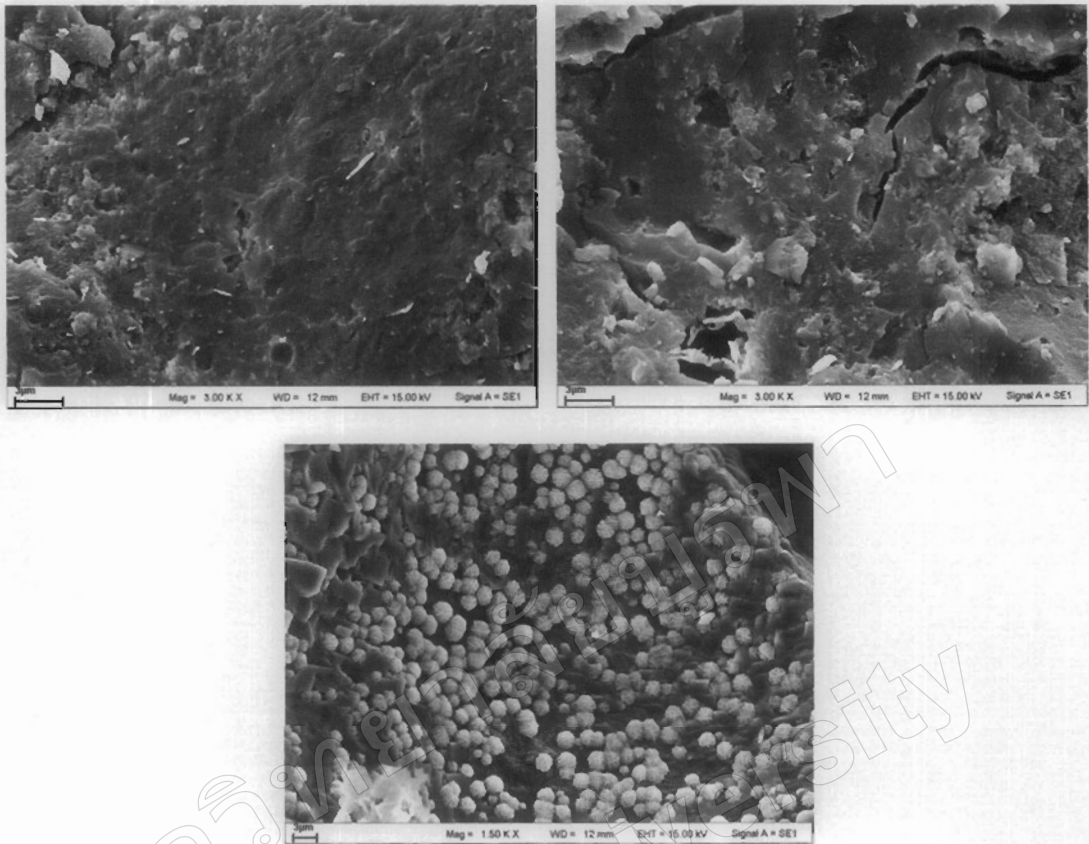
ภาพที่ 4.7 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย FBC ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1$  อายุการบ่ม 90 วัน

จากภาพที่ 4.7 พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีเถ้าลอย FBC ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1$  มีพื้นผิวที่ไม่เรียบ มีรูพรุน และรอยแตกร้าวในจีโอโพลิเมอร์ดังที่แสดงในภาพ



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์เฟสตัดจากเด้าลอย FBC ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$  อายุการบ่ม 90 วัน

จากภาพที่ 4.8 พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์เฟสตัดที่มีเด้าลอย FBC ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$  จะเห็นได้ว่าที่พื้นผิวมีลักษณะค่อนข้างเรียบแต่ไม่สม่ำเสมอที่พื้นผิวด้านนอกมีรูพรุนจำนวนมากและรอยแตก



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย FBC ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2$  อายุการบ่ม 90 วัน

จากภาพที่ 4.9 พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีเถ้าลอย FBC ที่อัตราส่วน  $S/T = 0.6$   $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2$  ที่พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ มีรูพรุน มีรอยแตกร้าวอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้พบการก่อตัวของซีโอไซด์ที่ผิวของจีโอโพลิเมอร์



ภาพที่ 4.10 โครงสร้างของอีโพลีเมอร์พสต์จากเถ้าลอย FBC ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$  อายุการบ่ม 90 วัน

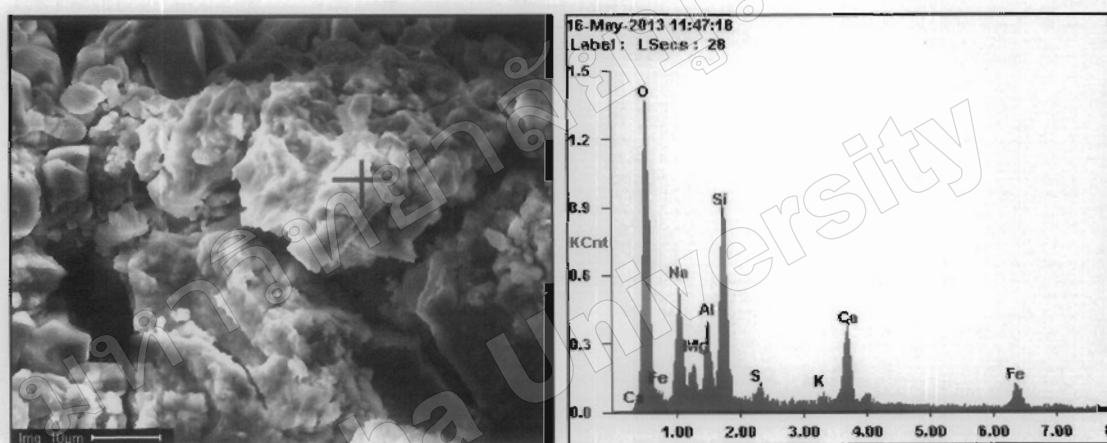
จากภาพที่ 4.10 พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของอีโพลีเมอร์พสต์ที่มีเถ้าลอย FBC ที่อัตราส่วน S/T = 0.6,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$  พื้นผิวค่อนข้างขรุขระ รอยแตกและลึกที่ชัดเจน

จากภาพจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของอีโพลีเมอร์พสต์จากเถ้าลอย FBC ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1$  กับ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$  จะไม่แตกต่างกันมาก คือ มีเนื้ออีโพลีเมอร์ที่มีผิวขรุขระ พบรอยแตกร้าวและเกิดเม็ดเจลขึ้น เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารอีโพลีเมอร์โดยซิลิกา (Si) และอลูมิเนียม (Al) ในเถ้าถูกชะออกมาโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตเกิดเป็นเจลขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นยังไม่สมบูรณ์เพราะยังพบพื้นที่ผิวบางส่วนยังพบเถ้าลอยเหลืออยู่ จึงส่งผลให้ค่ากำลังอัดของอีโพลีเมอร์ต่ำ ส่วนภาพอีโพลีเมอร์พสต์จากเถ้าลอย FBC ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2$  กับ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$  ก็จะไม่แตกต่างกันมากเช่นกัน เนื้อของอีโพลีเมอร์แน่นและมีผิวที่เรียบกว่า แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการก่อตัวของอีโพลีเมอร์จากเถ้าลอย FBC ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี เนื้ออีโพลีเมอร์สามารถเชื่อมประสานกันกับเถ้าลอย FBC ได้ ส่งผลให้ค่ากำลังอัดอีโพลีเมอร์ได้สูงกว่า



#### 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค energy dispersive x-ray spectrometer, EDX

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX แสดงในภาพที่ 4.11 พบว่าในส่วนของเจลในจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยธาตุซิลิกอน (Si), โซเดียม (Na), อลูมิเนียม (Al), แคลเซียม (Ca), แมกนีเซียม (Mg) และเหล็ก (Fe) ซึ่งเจดดังกล่าวเกิดจากการชะของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์บริเวณที่ผิวถ้ำลอย โดยส่วนที่เป็นอัญฐานจะพบบริเวณผิวถ้ำลอย ส่วนความเป็นผลึกจะพบที่บริเวณแกนกลางของถ้ำลอย (Davidovits, 1991; Jaarsveld, 1999; Rattanasak & Chindaprasirt, 2009; Chindaprasirt et al., 2013; Inada et al., 2005)



ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของตัวจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 2 ที่อายุการบ่ม 90 วัน

#### 4.5 ค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยา (degree of reaction)

การหาค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยา แสดงร้อยละการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าผสม โดยมีหลักการคือการใช้สารเคมีชะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเหลือเป็นกากหรือตะกอนที่ไม่เกิดปฏิกิริยา แล้วทำการคำนวณหาร้อยละกากที่เหลือ สารเคมีที่ใช้คือสารละลาย 2 M HCl และ 5% w/v  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  โดยทำการบดจีโอโพลิเมอร์เพสต์แล้วละลายในสารละลาย 2 M HCl ก่อนแล้วจึงละลายกากตะกอนที่เหลือด้วยสารละลาย 5% w/v  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยร้อยละการเกิดปฏิกิริยา (Chindaprasirt et al., 2013; Termkhajornkit et al., 2005)

ตารางที่ 4.4 ร้อยละดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของแก้วลอย FBC (ค่าเบสคง)

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละดัชนีการเกิดปฏิกิริยา			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย (SD)
FBC	48.0852	51.0699	48.6611	49.2721 (1.5834)

ตารางที่ 4.5 ร้อยละดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 7 วัน

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละดัชนีการเกิดปฏิกิริยา (หลังจากลบค่าเบสคง)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย ( $\pm$ SD)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1$	17.9311	18.9957	19.4284	18.7851 (0.7705)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$	13.4231	0.1429	8.7372	11.0801 (3.3134)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2$	16.5866	15.1862	16.5887	16.1205 (0.8091)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$	5.0848	2.6932	4.4587	4.1050 (1.2530)

\* highlight = ไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.6 ร้อยละดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 30 วัน

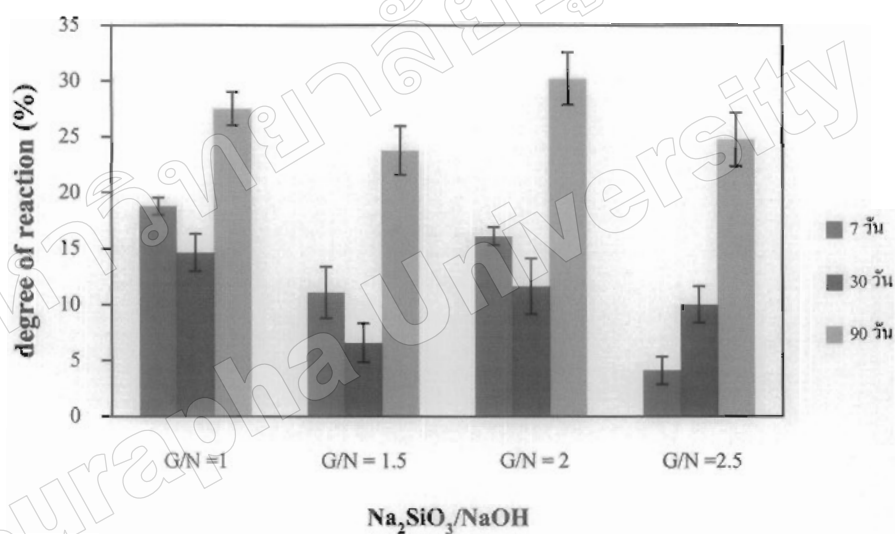
ตัวอย่าง	ค่าร้อยละดัชนีการเกิดปฏิกิริยา (หลังจากลบค่าเบสคง)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย ( $\pm$ SD)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1$	15.0455	19.4256	13.4941	14.6754 (3.0761)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$	11.1066	8.6575	3.8934	6.5880 (1.7318)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2$	14.2921	7.8348	20.6483	11.2584 (4.4945)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$	7.2229	8.7269	14.1301	10.0266 (3.6324)

\* highlight = ไม่นำมาคิดค่าเฉลี่ย



ตารางที่ 4.7 ร้อยละดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 90 วัน

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละดัชนีการเกิดปฏิกิริยา (หลังจากลบค่าเบสลง)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย ( $\pm$ SD)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1$	26.0323	29.0256	27.4392	27.4990 (1.4975)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$	22.6087	22.4164	26.2728	23.7660 (2.1731)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2$	32.3032	30.6571	27.6827	30.2143 (2.3418)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$	25.1305	22.2096	26.9463	24.7621 (2.3897)



ภาพที่ 4.12 ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มที่ 90 วัน

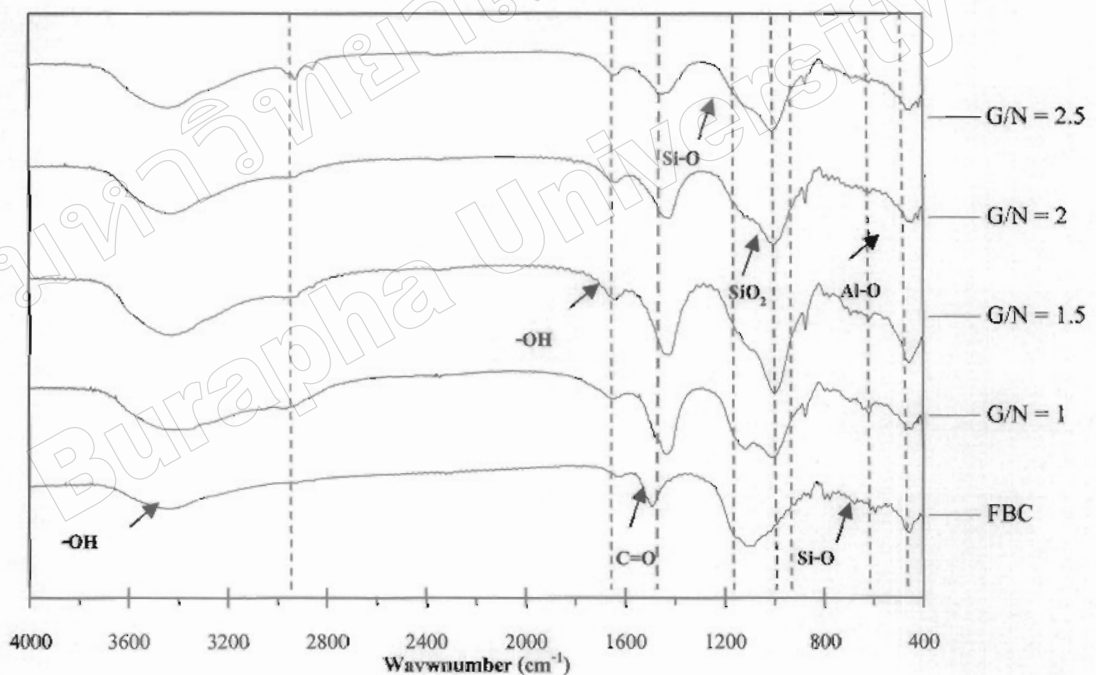
จากหลักการในการเกิดปฏิกิริยาหาค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยา คือ 2 M HCl ใช้ในการละลายสารประกอบของแคลเซียมและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชันเหลือกากตะกอนที่ประกอบไปด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และเถ้าลอยที่ไม่เกิดปฏิกิริยา ส่วนสารละลาย 5% w/v  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  เติมนลงไปเพื่อละลาย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เหลือเป็นตะกอนของเถ้าลอยที่ไม่เกิดปฏิกิริยา (Termkhajomkit et al., 2005)

จากการทดลองหาค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย FBC ดังแสดงในภาพที่ 4.12 พบว่าที่อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  มีผลต่อค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยา การเพิ่มอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ทำให้ค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจากใน

ส่วนผสมมีปริมาณ โซเดียม ไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมซิลิเกตที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยากับแก้วลอย FBC เกิดปฏิกิริยาเชื่อมประสานกันและจากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณ โซเดียมซิลิเกตที่มากขึ้นมีผลกับการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ ทั้งนี้เนื่องจากโซเดียมซิลิเกตที่ละลายได้ (dissolved silica) ในสารผสมทำให้ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มีซิลิกาที่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาสายโซ่กับอะลูมินา และการเกิดแคลเซียมซิลิเกตในผลิตภัณฑ์ได้

#### 4.6 ผลจากการทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยเทคนิค infrared spectroscopy

การทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยเทคนิค IR เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างแก้วลอย FBC กับจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอย FBC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4.13



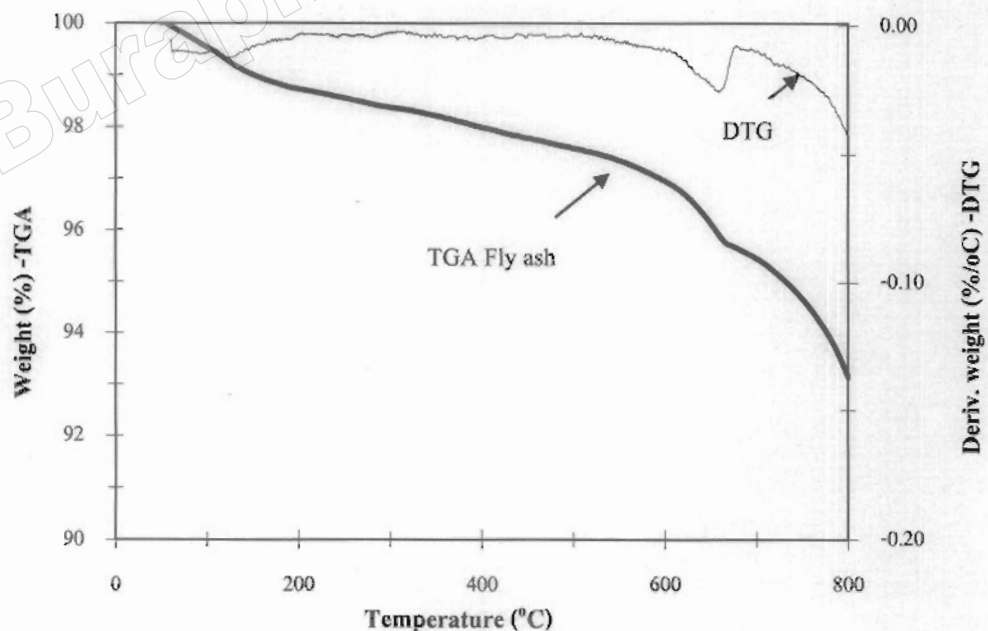
ภาพที่ 4.13 กราฟ IR เปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันระหว่างตัวอย่างแก้วลอย FBC กับจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอย FBC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุการบ่ม 90 วัน

จากภาพที่ 4.13 เมื่อศึกษากราฟ IR หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างเถ้าลอย FBC พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ  $3440\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกของ -OH stretching และ -OH bending ยังสามารถพบได้ที่เลขคลื่นประมาณ  $1600\text{ cm}^{-1}$  เช่นกัน ที่เลขคลื่นประมาณ  $1480\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีก C=O ใน  $-\text{CO}_3^{2-}$  และนอกจากนี้ที่เลขคลื่นประมาณ  $457.10\text{ cm}^{-1}$  และ  $850\text{ cm}^{-1}$  ยังพบพีกของ Al-O และ Si-O ตามลำดับที่ปรากฏอยู่ในเถ้าลอย (Chindaprasirt et al., 2009; Gunzler & Gremlich, 2002)

เมื่อเปรียบเทียบ IR Spectra ของเถ้าลอย FBC กับจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ แต่ในจีโอโพลิเมอร์จะพบพีกที่สูงและชัดเจนกว่าเถ้าลอย FBC นอกจากนี้ยังพบว่า การเลื่อนของตำแหน่งของ Si-O จากประมาณ  $1200\text{ cm}^{-1}$  ไปเป็นประมาณ  $990\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเลื่อนไปทางขวามือหรือทางช่วงเลขคลื่นต่ำลง แสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานที่ลดลงและเกิดพันธะ Si-O ใหม่จากเดิมที่พบใน Si-O ของ  $\text{SiO}_2$  ในเถ้าลอย FBC เกิดเป็น Si-O ในสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและอะลูมิเนียมซิลิเกต (Rattanasak et al., 2010)

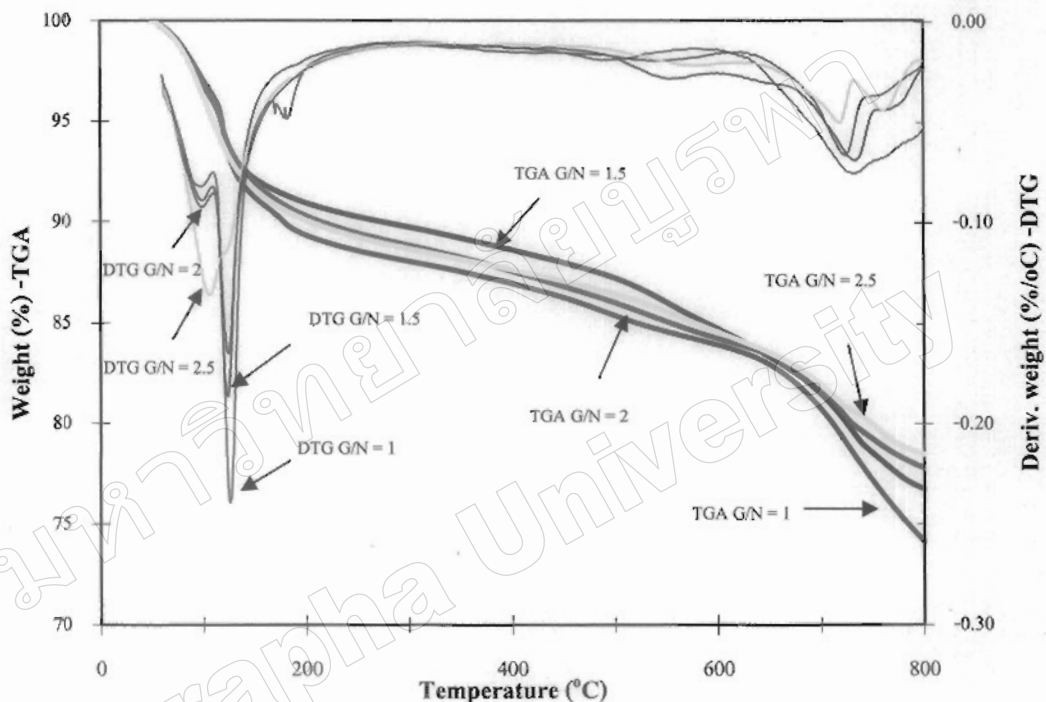
#### 4.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์

การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA-DTG เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์น้ำหนักของตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อน กับตัวอย่างเถ้าลอย FBC และจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ จากเถ้าลอย FBC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4.14 โดยทดสอบที่ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร



ภาพที่ 4.14 เทอร์โมแกรม TGA-DTG ของเถ้าลอย FBC

จากภาพที่ 4.14 เทอร์โมแกรม TGA-DTG ของถ่านลอย FBC จะพบว่าการสูญเสียน้ำหนักหลังจากได้รับความร้อนอยู่ที่ช่วงประมาณ 100 และ 650°C โดยถ่านลอยมีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 7.80 เนื่องจากมีการระเหยของน้ำซึ่งสอดคล้องกับ DTG ที่มีพีคตรงกับช่วงอุณหภูมิที่มีการสูญเสียน้ำ และที่ 650°C เป็นการสลายของ  $\text{Ca(OH)}_2$  (Chindaprasirt & Rattanasak, 2010)



ภาพที่ 4.15 เทอร์โมแกรม TGA-DTG ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ่านลอยที่อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1, 1.5, 2$  และ  $2.5$  ที่อายุ 90 วัน

ภาพที่ 4.15 แสดงเทอร์โมแกรม TGA-DTG ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ่านลอย FBC ที่อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1, 1.5, 2$  และ  $2.5$  มีค่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 24.5, 22.0, 20.5 และ 20.0 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ จะมีการทนความร้อนได้ดีกว่า และการสูญเสียน้ำหนักที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับถ่านลอย FBC เนื่องจากอาจมีสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตและแคลเซียมซิลิเกต จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ่านลอย FBC ที่อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1$  มีการสูญเสียน้ำหนักหลังจากได้รับความร้อนอยู่ที่ช่วงประมาณ 120, 180 และ 680°C ที่อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$  มีการสูญเสียน้ำหนักหลังจากได้รับความร้อนอยู่ที่

ช่วงประมาณ 120, 540 และ 720°C ที่อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2$  มีการสูญเสียน้ำหนักหลังจากได้รับความร้อนอยู่ที่ช่วงประมาณ 120 และ 720°C ที่อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$  มีการสูญเสียน้ำหนักหลังจากได้รับความร้อนอยู่ที่ช่วงประมาณ 120, 700 และ 760°C โดยที่ช่วง 100 -180°C คือ การระเหยของน้ำ (Chindapasirt et al., 2014) ที่ 540°C คือการสลายของ  $\text{Ca(OH)}_2$  (Chindapasirt et al., 2013) ที่ช่วง 680-760°C คือ การสลายของ  $\text{CaCO}_3$  (Chindapasirt et al., 2014)

มหาวิทยาลัยบูรพา  
Burapha University