



## รายงานการวิจัย

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินด่านเกวียน  
(Synthesis of Geopolymer from Dan Kwian Clay)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

### การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินด่านเกวียน (Synthesis of Geopolymer from Dan Kwian Clay)

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุรัตน์ ภูวนาคำ

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2563

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ด้วยการสนับสนุนในครั้งนี้ ผู้วิจัยสามารถนำแนวคิดที่มีออกมาสู่การทำวิจัยจริงจนประสบผลสำเร็จ ทำให้ได้เทคโนโลยีที่สำคัญอันจะเป็นพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ในด้านเกี่ยวอันเป็นวัตถุดิบในท้องถิ่นของจังหวัดนครราชสีมาพัฒนาเป็นวัสดุที่มีมูลค่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ขอขอบคุณบริษัทโคราชแสงสุวรรณที่กรุณาให้การสนับสนุนวัตถุดิบและอุปกรณ์ที่จำเป็นในการทดลอง ขอขอบคุณ ท่านอาจารย์ ดร.วีระยุทธ ลอประยูร และ รองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี ลอประยูร ผู้ให้คำปรึกษาที่ทรงคุณค่าแก่ผู้วิจัย และ ขอขอบคุณ นางสาวจิระพา ฐานะ ภรรยาที่คอยดูแลเรื่องส่วนตัวและความเป็นอยู่ของผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพ



อนูรัตน์ ภูวานคำ  
ผู้วิจัย  
กันยายน 2563

## บทคัดย่อ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกใช้ในงานก่อสร้างอย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากในกระบวนการผลิตต้องใช้พลังงานสูง และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในปริมาณมากซึ่งเป็นสาเหตุหลักของสภาวะโลกร้อน จีโอพอลิเมอร์เป็นหัวข้อที่ถูกศึกษาอย่างมากในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพราะจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานต่ำและปราศจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุที่หลากหลายเช่นแก้วลอย ตะกรันเหล็ก และดินเหนียว อย่างไรก็ตามปริมาณสำรองของแก้วลอยและตะกรันเหล็กไม่คงที่เนื่องจากเป็นวัสดุขุดที่มีความต้องการใช้งานมากในอุตสาหกรรมซีเมนต์ จึงมีความจำเป็นที่ต้องหาวัสดุชนิดอื่นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ ดินตะกอน หรือดินดานเหนียวในจังหวัดนครราชสีมาแร่กาเลินเป็นส่วนประกอบและมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุติบราคาถูกสำหรับสังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์

งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ดินดานเหนียวเป็นวัสดุตั้งต้น ดินดานเหนียวจะถูกนำไปเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียสจากนั้นจะนำไปผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ที่เป็นของผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซต์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ อุณหภูมิการบ่ม ต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ถูกทำการศึกษา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้อุณหภูมิการเผาแคลไซต์ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.5 และอุณหภูมิการบ่ม 60 องศาเซลเซียส สามารถสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินดานเหนียวที่มีความแข็งแรงมากกว่าความแข็งแรงขั้นต่ำของปูนซีเมนต์ได้

## Abstract

Ordinary Portland cement (OPC) is widely used for construction works. However, OPC has negative environment impacts because the production of OPC requires high energy consumption and emits high quantities of carbon dioxide gas, which is the main cause of the global warming. Geopolymer has been the subject of intense study as the OPC replacement material. Because geopolymer is a low environmental impact material. The geopolymer production is a low-energy-consuming process, and does not emit pollutants, especially carbon dioxide. Geopolymer is synthesized from variety kinds of raw materials/precursor such as fly ash, slag, and kaolinite clay. However, supplies of slag and fly ash are limited due to the large demand of cement. These are the driving forces for the need to seek for alternative precursor. Abundant Sedimentary Clay, i.e., Dan Kwian clay, in Nakhon Ratchasima province contains kaolinite mineral and is possibly used to develop a cost-effective and sustainable calcined precursor, which is the focus of this research. The precursor was prepared by calcining Dan Kwian clay at 500 °C and 600 °C. The precursor was mixed with the alkali activator solution, which is the mixture of sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) solution and sodium hydroxide (NaOH) solution to develop a geopolymer material. The effects of calcination time, concentration of NaOH, the ratios of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  to NaOH, and the curing temperature on the properties of geopolymer were studied. The results show that 2 hour-calcined Dan Kwian clay at 600 °C, NaOH concentration of 8 M,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  to NaOH ratio of 0.5, and curing temperature of 60 °C provides the highest strength of the geopolymer. Its compressive strength is higher than that of the OPC.

# สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ไทย).....	ข
บทคัดย่อ (อังกฤษ).....	ค
สารบัญ.....	ฅ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
<b>2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>3</b>
2.1 จีโอพอลิเมอร์.....	3
2.1.1 การค้นพบจีโอพอลิเมอร์.....	3
2.1.2 สมบัติทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์.....	4
2.1.3 การใช้งานจีโอพอลิเมอร์ในงานวิศวกรรม.....	4
2.1.4 ความแตกต่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.1.5 ปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไฮดรอกซีชันและการให้กำลังรับแรงอัดของ จีโอพอลิเมอร์.....	8
2.1.6 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์.....	9
2.1.7 ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์.....	12
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>3</b> วัสดุและวิธีการทดลอง .....	21
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	21
3.2 วัสดุและสารเคมี .....	21
3.3 วิธีการทดลอง .....	22
3.3.1 การเตรียมผงจีโอพอลิเมอร์จากดินดานเกวียน.....	23
3.3.2 การเตรียมสารละลายอัลคาไลน์ .....	23
3.3.3 การขึ้นรูปและการบ่มจีโอพอลิเมอร์ .....	23
3.3.4 การทดสอบสมบัติ.....	24
<b>4</b> ผลการทดลองและอภิปรายผล .....	28
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินดานเกวียน .....	28
4.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของดินดานเกวียน .....	29
4.3 ผลของสภาวะการเผาแคลไซน์ดินดานเกวียนต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ .....	30
4.4 ผลของสภาวะการบ่มต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ .....	33
4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์ .....	34
4.6 ผลของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์ .....	35
<b>5</b> สรุปผลการวิจัย .....	38
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	38
5.1.1 สภาวะการเผาแคลไซน์ดินดานเกวียน.....	38
5.1.2 สภาวะการบ่ม.....	38
5.1.3 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ .....	39
5.1.4 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ .....	39
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
รายการอ้างอิง .....	40
ประวัติผู้เขียน.....	54

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ชุมชนตำบลบ้านด่านเกวียนเป็นหมู่บ้านที่มีชื่อเสียงและมีประวัติศาสตร์อันยาวนานในการผลิตเครื่องปั้นดินเผาบ้านด่านเกวียน จนปัจจุบันกลายเป็นหนึ่งในสัญลักษณ์ที่สำคัญของจังหวัดนครราชสีมา แต่ด้วยสภาพการแข่งขันทางการค้าที่มีความรุนแรงมากขึ้น ประกอบกับตลาดกระจายสินค้าของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผามีอยู่อย่างจำกัด ส่งผลให้ผู้ประกอบการเครื่องปั้นดินเผาบ้านด่านเกวียนประสบปัญหาการราคาสินค้าตกต่ำ มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งพยายามพัฒนาและปรับปรุงเครื่องปั้นดินเผาบ้านด่านเกวียนให้มีรูปแบบแตกต่างไปจากเดิม แต่งานวิจัยที่ผ่านมาเป็นเพียงการปรับปรุงลักษณะของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านด่านเกวียนให้ดีขึ้นเท่านั้น เช่น การพัฒนาเนื้อดินปั้นและเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์บ้านด่านเกวียน (เด่น รักซ้อน, 2553, สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2550) การพัฒนาเคลือบจากขี้เถ้าไม้ยูคาลิปตัสเพื่อใช้สำหรับเคลือบบนเครื่องปั้นดินเผาบ้านด่านเกวียน (สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2543) การพัฒนาเนื้อดินบ้านด่านเกวียนสำหรับการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ (S. Rattanachan, 2007) และ การพัฒนาเคลือบซิลิกาเพื่อนำมาใช้เคลือบบนผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านด่านเกวียน (S. Srilomsak, 2006) เป็นต้น ปัจจุบันยังไม่พบงานวิจัยชิ้นใดที่สามารถนำดินบ้านด่านเกวียนไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นนอกเหนือไปจากผลิตภัณฑ์ในกลุ่มของเครื่องปั้นดินเผา เหตุผลดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การพัฒนาผลิตภัณฑ์ของชุมชนตำบลบ้านด่านเกวียนที่ผ่านมาไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร แนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การพัฒนาดินบ้านด่านเกวียนให้สามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นที่มีมูลค่าและมีความหลากหลายมากขึ้น หนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าและได้รับความสนใจมากในปัจจุบันคือ วัสดุจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์แต่ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่า จุดเด่นที่สำคัญอีกประการหนึ่งของจีโอพอลิเมอร์คือ ในกระบวนการผลิตไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน แตกต่างจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์จึงถูกคาดหวังว่าจะสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ในอนาคต

งานวิจัยชิ้นนี้มีจุดประสงค์เพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้ดินบ้านด่านเกวียนเป็นวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าชนิดใหม่จากดินบ้านด่านเกวียน เพื่อการใช้วัตถุดิบดินบ้านด่านเกวียนให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเพื่อปูพื้นฐานในการสร้างองค์ความรู้ใหม่ด้านเทคโนโลยีสะอาด และ เทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมให้กับประเทศ นอกจากนี้งานวิจัยชิ้นนี้ยังเป็นงานวิจัยต้นแบบ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชุมชนอื่นที่มีวัตถุดิบและปัญหาคาคล้ายคลึงกับชุมชนตำบลบ้านด่านเกวียน



## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้ดินด้านเกวียนเป็นสารตั้งต้น
2. เพื่อหาสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินด้านเกวียน ได้แก่ อุณหภูมิการสังเคราะห์ ปริมาณและความเข้มข้นของสารละลาย
3. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินด้านเกวียน

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ตรวจสอบลักษณะจำเพาะของดินด้านเกวียน เช่น ขนาดอนุภาค องค์ประกอบทางเคมี และ องค์ประกอบทางเฟส เป็นต้น
2. ตรวจสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้ดินด้านเกวียนเป็นสารตั้งต้น ได้แก่ อุณหภูมิการสังเคราะห์ ความเข้มข้นและปริมาณของสารละลาย
3. ตรวจสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ดินด้านเกวียน ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการบ่ม

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 จีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) คือ วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ชนิดหนึ่ง สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างวัสดุที่มีสารอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) เป็นองค์ประกอบ และสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline activator solution) ซึ่งโดยทั่วไปคือสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับโซเดียมซิลิเกต หลังการเกิดปฏิกิริยาจะได้วัสดุที่มีสมบัติคล้ายกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland cement, OPC) จีโอพอลิเมอร์ถูกจัดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพ สมบัติของจีโอพอลิเมอร์เหมาะสมกับการใช้งาน สามารถใช้ทดแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้ (J. L. Provis, and J. S. J. van Deventer, 2009)

##### 2.1.1 การค้นพบจีโอพอลิเมอร์

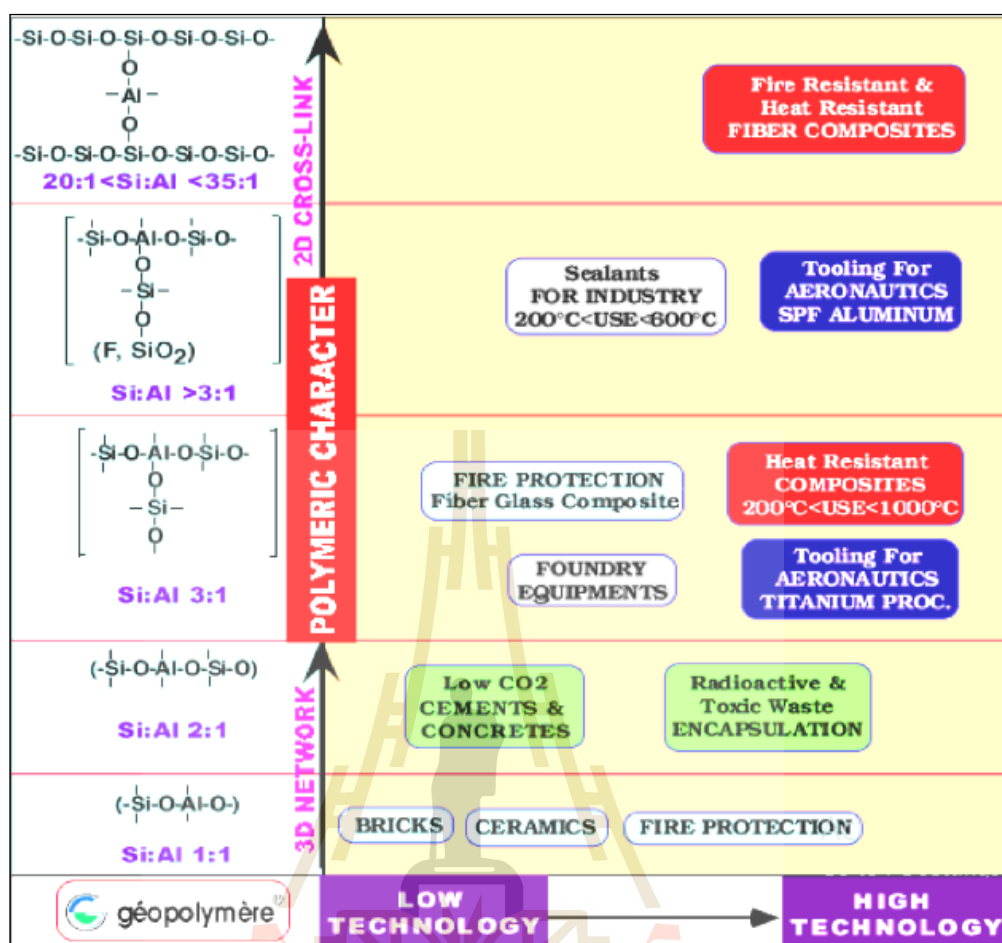
จีโอพอลิเมอร์ถูกนักวิทยาศาสตร์จัดให้เป็นซีเมนต์ยุคที่สาม ต่อจากปูนขาว (Lime) และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (B. Singh, I. G. M. Gupta, and S.K. Bhattacharyya, 2015) ในปี 1950 V. Glukhovsky (1989) ได้อธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาของหินภูเขาไฟกลายเป็นซีโอไลต์ (Zeolite) เกิดจากการก่อตัวของหินตะกอนที่อุณหภูมิและความดันต่ำ ลักษณะดังกล่าวเป็นต้นแบบของซีเมนต์ โดยเรียกอะลูมิเนียม-ซิลิเกตที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ (Alkaline) ว่าซอซิลซิลิเกต (Soil silicates) ต่อมาในปี 1972 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส J. Davidovits (1988d) ได้ตั้งชื่ออะลูมิเนียม-ซิลิเกต ที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิต่ำและใช้เวลาสั้นว่า จีโอพอลิเมอร์ และใช้คำว่า โพลีไซอะเลต (Poly-sialate) เป็นชื่อทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์ (J. Davidovits, 1988b, J. Davidovits, 1988c, J. Davidovits, and M. Davidovics, 1991) คำว่า ซิลิเกต (Silicate) ย่อมาจากซิลิคอน-ออกซิเจน-อะลูมิเนียม (Silicon-oxo-aluminate) (S.E. Wallah, and B.V. Rangan, 2006) ในปัจจุบันมีหลายชื่อที่ใช้เรียกและบ่งบอกลักษณะของวัสดุนี้ ได้แก่ อัลคาไล-บอนด์-เซรามิก (Alkali-bonded-ceramics) ไฮโดรเซรามิก (Hydroceramics) อัลคาไล-แอกทิเวต-ซีเมนต์ (Alkali-activated -cements) และอินอแกนิกพอลิเมอร์ (Inorganic polymer) (P. Duxson และคณะ, 2007)

### 2.1.2 สมบัติทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ที่สามารถใช้วัตถุดิบที่หลากหลายมาใช้สังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ นอกจากการใช้แร่ธาตุอะลูมิเนียมซิลิเกตจากธรรมชาติในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ยังสามารถใช้วัตถุดิบที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรม และการเกษตร เช่น เถ้าลอย (Fly ash) ตะกรันจากการถลุงเหล็ก (Blast furnace slag) เศษแก้ว (Glass waste) และ ขี้เถ้า (Ash) เป็นต้น จีโอพอลิเมอร์มีสมบัติทางวิศวกรรมที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงในช่วงต้นที่สูง (High early strength) การหดตัวต่ำ (Low shrinkage) ทนทานต่อการเยือกแข็ง-ละลายของน้ำ (Freeze-thaw resistance) ทนทานต่อซัลเฟต (Sulfate resistance) ทนทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ทนทานต่อกรด (Acid resistance) ทนทานต่อไฟ (Fire resistance) และไม่เกิดอันตรายจากปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม (Alkali-aggregate reaction) (S.E. Wallah, and B.V. Rangan, 2006) เป็นต้น นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์ยังมีสมบัติในการแทรกซึมต่ำ กล่าวคือ ไอออนของโลหะหนักถูกยับยั้งการเคลื่อนที่เมื่ออยู่ภายในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ (J.S.G. van Jaarsveld, J.S.J. van Deventer, and L. Lorenzer, 1995, CANMET Canada, 1988) สมบัติดังกล่าวถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการยับยั้งโลหะเป็นพิษในอุตสาหกรรม (J.G.S. van Jaarsveld, and J.S.J. van Deventer, 1996, J. Davidovits, 1994)

### 2.1.3 การใช้งานจีโอพอลิเมอร์ในงานวิศวกรรม

ปัจจุบันการนำวัสดุจีโอพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมยังไม่แพร่หลายมากนัก ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการใช้งานในทางวิศวกรรม โดย J. Davidovits (1999) ได้จำแนกการใช้งานจีโอพอลิเมอร์ตามโครงสร้างพื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ อิฐ คอนกรีต วัสดุกักสารพิษและกัมมันตภาพรังสี วัสดุคอมโพสิตชนิดต่าง ๆ วัสดุสำหรับการสร้างเครื่องบิน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 แสดงการใช้งานจีโอพอลิเมอร์ตามชนิดอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (J. Davidovits, 1999)

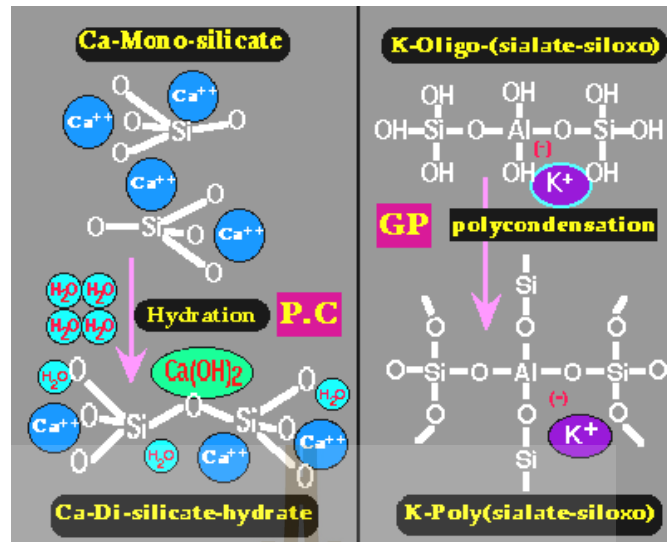
การใช้งานจีโอพอลิเมอร์ที่น่าสนใจได้แก่ งานวิจัยของ S. Horpibulsuk และคณะ (2015) ได้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาผสมเถ้าลอยดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์ และ ดินเหนียวปนตะกอน (Silty clay) ผสมซีเมนต์ เพื่อการใช้งานในส่วนของโครงสร้างใต้คอสพาน (Bearing units) จากการทดสอบใช้งานพบว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาผสมเถ้าลอยมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าชนิดดินเหนียวปนตะกอนผสมซีเมนต์ ซึ่งทำให้ดินตะกอนประปาเกิดความสำคัญในการใช้งานที่ดีกว่าการนำไปฝังกลบ

C. Siripattanapong และคณะ (2015) ได้ผลิตอิฐจีโอพอลิเมอร์มวลเบาจากดินตะกอนประปาและเถ้าลอย ในการใช้งานดังกล่าวพบว่า ดินตะกอนประปาเป็นวัสดุทางเลือกที่พร้อมในการใช้งานและสร้างมูลค่าให้ดินตะกอนประปาได้

K.H. Mo, U.J. Alengaram และ M.Z. Jumaat (2016) ศึกษาพฤติกรรมของ จีโอพอลิเมอร์โดยใช้ชิ้นงานสำเร็จรูปเพื่อการก่อสร้าง เช่น ผนังสำเร็จรูป พื้นสะพานสำเร็จรูป ทางลาดขึ้นลงเรือสำเร็จรูป และ คานคอนกรีตสำเร็จรูปจากจีโอพอลิเมอร์ เป็นต้น พบว่าไม่มีสิ่งที่เป็นอันตรายจากการใช้คอนกรีตจีโอพอลิเมอร์เพื่อการรองรับน้ำหนักในงานก่อสร้าง และสามารถใช้งานคอนกรีตจีโอพอลิเมอร์ได้อย่างปลอดภัยตามหลักมาตรฐานสากล

#### 2.1.4 ความแตกต่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ วัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งเมื่อผสมกับน้ำแล้วเกิดการแข็งตัวได้จากการเผาส่วนผสมของหินปูนและหินดินดานหรือดินเหนียวที่อุณหภูมิ 1,400-1,600 องศาเซลเซียส ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 4 เฟสอันได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate,  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate,  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium aluminate,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetrecalcium aluminoferrite,  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ความแตกต่างระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอพอลิเมอร์ที่องค์ประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาเคมี โดยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและมีความแข็งแรงโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์เกิดจากการที่สารอะลูมิโนซิลิเกต ทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ ซึ่งอัลคาไลไฮดรอกไซด์จะสลายพันธะและปล่อยไอออนจากวัสดุอะลูมิโนซิลิเกต และมีการประสานพันธะใหม่เป็นโมเลกุลลูกโซ่ โดยอัลคาไลไอออนปรับสมดุลประจุในโครงสร้างโพลีไฮดรอกไซด์และเกิดการคายน้ำในระหว่างเกิดปฏิกิริยาเคมี (S.E. Wallah, and B.V. Rangan, 2006) รูปที่ 2.2 ฝั่งซ้ายมือแสดงการแข็งตัวของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียม-ซิลิเกตกลายเป็นแคลเซียม-ไดซิลิเกต-ไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ฝั่งขวามือแสดงการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์โดยโมเลกุลโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กลายเป็นโครงข่ายโมเลกุลลูกโซ่ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ (J. Davidovits, 1999)



รูปที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาเคมีชนิดซีเมนต์ไฮเดรชันเปรียบเทียบกับชนิดจีโอพอลิเมอร์เซชัน

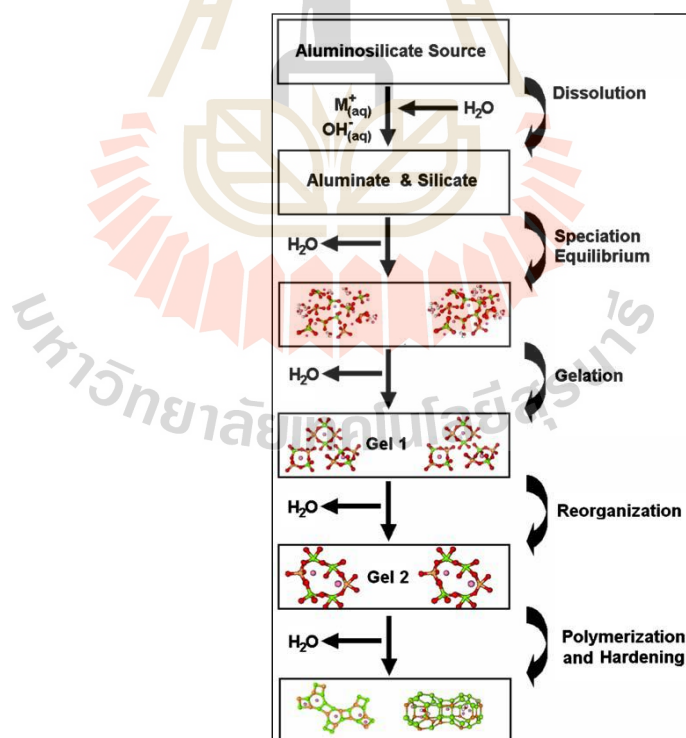
(J. Davidovits, 1999)

นอกจากนี้ในงานวิจัยหลายงานได้แสดงการเปรียบเทียบจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ถูกกระตุ้นโดยอัลคาไลน์ (J. Davidovits, 1994) ต่างจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่จีโอพอลิเมอร์ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าและสามารถผลิตได้โดยใช้วัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และน้ำ (J. Davidovits, 1988c, J.W. Smith, and D.C. Comrie, 1988) เนื้อวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ใช้เวลาในการก่อตัวที่เร็วกว่า มีความทนทานต่อกรดที่ดีกว่า (J. Davidovits, 1987, D.C. Comrie, and J. Davidovits, 1988, J. Davidovits, et al., 1990) จีโอพอลิเมอร์ยังมีกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) สูงและมีการหดตัว (Shrinkage) จากการแข็งตัวที่น้อยกว่า (P.G. Malone, T. Kirkpatrick, and C.A. Randall, 1986, J. Davidovits, 1988b) มีความทนทานต่อความร้อนและไฟที่ดีกว่า ซึ่งจีโอพอลิเมอร์จะคงกำลังรับแรงอัดที่ความร้อนสูงถึง 600 องศาเซลเซียส ขณะที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเสื่อมสภาพลงที่ 300 องศาเซลเซียส (J. Davidovits, 1994, J. Davidovits, 1988b) จากการทดลองของ J. Davidovits (1988b) ได้รายงานว่าจีโอพอลิเมอร์สามารถก่อตัวได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องและได้กำลังรับแรงอัดในช่วง 20 เมกะปาสคาล หลังจาก 4 ชั่วโมงแรกและ 70-100 เมกะปาสคาล หลังจาก 28 วัน และความแข็งแรงส่วนใหญ่ของชิ้นงานอายุ 28 วัน เกิดขึ้นระหว่าง 2 วันแรกของการบ่ม (D.C. Comrie, J.H. Paterson, and D.J. Ritchey, 1988) ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการใช้งานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (J.L. Provis, 2014)

### 2.1.5 ปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันและการให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

ปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) คือ ปฏิกริยาเคมีที่วัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตทำปฏิกริยากับสารละลายอัลคาไล-โพลีซิลิเกต (Alkali-polysilicate) ทำให้เกิดพันธะโพลีเมอริก (Polymeric) Si-O-Al ในโครงสร้างโดยทั่วไปโพลีซิลิเกต (Polysilicate) คือโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) หรือ โพแทสเซียมซิลิเกต (Potassium silicate,  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) ที่ได้จากอุตสาหกรรมเคมีหรือ ผลิตผลพลอยได้จากการผลิตโลหะเฟอร์โรซิลิคอน

กลไกการเกิดปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันแสดงในรูปที่ 2.3 (P. Duxson, et al., 2007) ผงจีโอพอลิเมอร์ถูกผสมด้วยสารละลายที่ก่อให้เกิดปฏิกริยาโดยอัลคาไลไอออนและไฮดรอกซิลไอออนจะเข้าสู่สายพันธะของอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ อะลูมินเนตและซิลิเกตที่ถูกสลายจะเกิดสมดุลขึ้นใหม่ และก่อตัวเป็นเจลของโครงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกตจัดเรียงและขึ้นรูปเป็นโครงสร้างแบบสายโซ่และแข็งตัว โดยลำดับขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาดังนี้ (1) อัลคาไลเข้าสู่สายโครงสร้างอนุภาคเดิมของแหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกต (2) เริ่มเกิดการสร้างสมดุลและจัดโครงสร้างขึ้นใหม่ (3) เริ่มเกิดการควบแน่นและจัดเรียงโครงสร้าง (4) เกิดการจัดเรียงโครงสร้างขนาดใหญ่ และ (5) เกิดการควบแน่นแบบโพลีคอนเดนเซชันและมีความแข็งตัว



รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองกระบวนการเกิดปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

(P. Duxson, et al., 2007)

ความแข็งแรงทางกายภาพส่วนใหญ่ของเนื้อวัสดุจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างส่วนผลึก (Crystalline) กับส่วนอสัณฐาน (Amorphous) (P.G. Malone, T. Kirkpatrick C.A. Randall, 1988b) กระบวนการจีโอพอลิเมอไรเซชันจะทำให้เกิดพหุผลึก (Polycrystalline) ที่จับตัวกันอย่างหนาแน่นและมีสมบัติทางกลดีกว่าที่พบในซีโอไลต์ (H. Xu, J.S.J. Van Deventer, 2000) ซึ่งในกระบวนการจีโอพอลิเมอไรเซชันนั้นอะลูมิเนียมไอออน  $Al^{3+}$  ทำให้เกิดออกซิเจนแอนไอออน  $O^-$  ที่ยังขาดสมดุล ส่งผลให้ประจุบวกอย่างโพแทสเซียมไอออน  $K^+$  และโซเดียมไอออน  $Na^+$  มีความจำเป็นในการช่วยปรับสมดุลประจุ (J.G.S. van Jaarsveld, and J.S.J. van Deventer, 1996)

นอกจากนั้น J.G.S. van Jaarsveld และ J.S.J. van Deventer (1996) ได้รายงานไว้ว่าสิ่งที่แตกต่างระหว่างการเกิดจีโอพอลิเมอร์และซีโอไลต์ คือความเข้มข้นของสารตั้งต้น และซีโอไลต์มักจะเกิดในระบบไฮโดรเทอร์มอลแบบปิด (Closed hydrothermal systems) ซึ่งต่างจากการเกิดจีโอพอลิเมอร์ ที่เมื่อผงอะลูมิเนียมซิลิเกตถูกผสมด้วยสารละลายอัลคาไลน์ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่สภาวะปกติและจะก่อตัวกลายเป็นจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงในเวลาไม่นาน (K. Komnitsas and D. Zaharaki, 2007) กำลังรับแรงอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ถูกพัฒนาสูงขึ้นถึงร้อยละ 70 ในระยะเวลา 4 ชั่วโมงแรกของการแข็งตัว (J. Davidovits, 1994, A. Palomo, A. Marcias, M.T. Blanco, and F. Puertas, 1992) กระบวนการจีโอพอลิเมอไรเซชันจะเกิดขึ้นเมื่อมีอัตราส่วน  $SiO_2$  ต่อ  $M_2O$  อยู่ในช่วง 4.0 ถึง 6.6 ต่อ 1 เมื่อ M คือธาตุอัลคาไลในสารละลายซิลิเกตที่ละลายน้ำได้ ขณะที่อะลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ จะต้องมีอะลูมิเนียมที่พร้อมละลายได้ และอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม อยู่ระหว่าง 5.5 ถึง 6.5 ต่อ 1 (J. Davidovits, 1988c, J. Davidovits, M. Davidovics, and N. Davidovits, 1994)

### 2.1.6 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์

โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วย ซิลิคอน-ออกซิเจน-อะลูมิเนียม (S.E. Wallah, and B.V. Rangan, 2006) ที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายสามมิติ ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวไม่ต่างจากที่พบในโครงสร้างของซีโอไลต์ โดยหน้าทั้งสี่ (Tetrahedra) ของซิลิคอนและอะลูมิเนียมได้เชื่อมต่อกัน และแบ่งปันอะตอมออกซิเจน (J. Davidovits, 1994) สูตรเคมีของจีโอพอลิเมอร์ แสดงในสมการที่ (2.4)



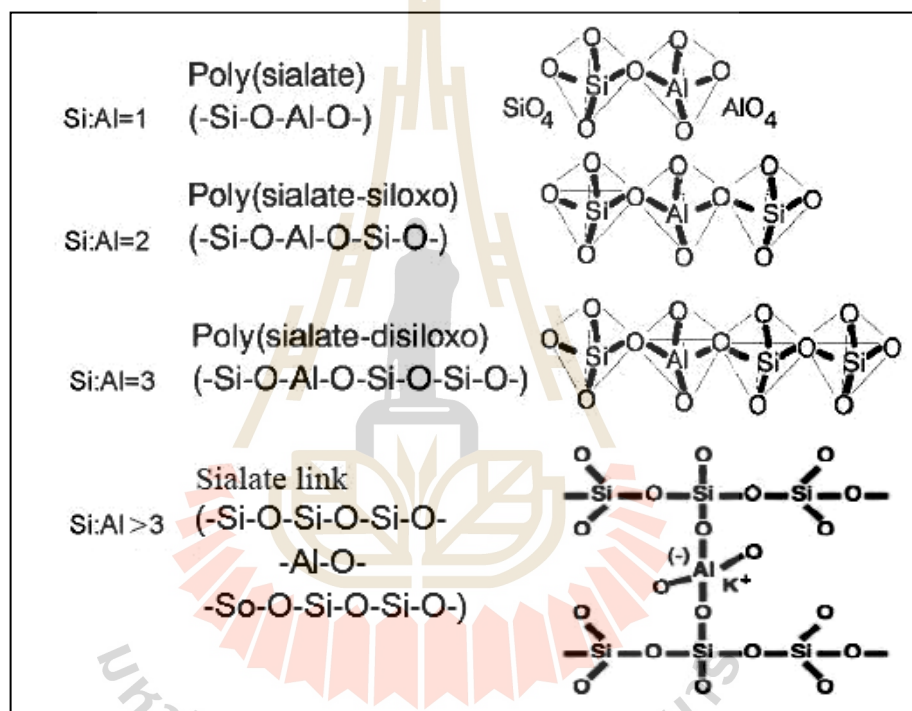
โดย z คือ จำนวนโมเลกุลของ  $SiO_2$  เช่น 1 หรือ 2 หรือ 3

M คือ ไอออนบวกที่มีวาเลนซ์ 1 เช่น  $K^+$  หรือ  $Na^+$  เป็นต้น



และ  $n$  คือ จำนวนหน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่ (Degree of polycondensation) (J. Davidovits, 1999, K. Komnitsas, and D. Zaharaki, 2007)

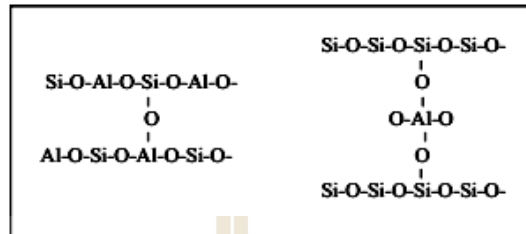
J. Davidovits (1994) ได้จำแนกโครงสร้างพื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์ โดยแบ่งตาม สัดส่วนระหว่าง Si ต่อ Al ได้แก่ (1) Si:Al = 1 เรียก โพลีไซอะเลท Poly(sialate) (2) Si:Al = 2 เรียก โพลีไซอะเลทไซลอกโซ (Polysialate-siloxo) (3) Si:Al=3 เรียกโพลีไซอะเลทไดไซลอกโซ (Polysialate-disiloxo) และ (4) Si:Al > 3 เรียก ไซอะเลทลิงค์ (Sialate link) ดังแบบจำลองในรูปที่ 2.4 (J. Davidovits, 1999, S.E. Wallah and B.V. Rangan, 2006)



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างเคมีของไซอะเลท (J. Davidovits, 1999, S.E. Wallah and B.V. Rangan, 2006)

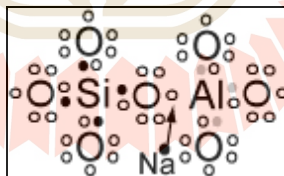
โดย Si:Al = 2 ที่มีองค์ประกอบเหมือนกับโพลีไซอะเลทไซลอกโซ คือ -Si-O-Si-O-Al-O- เรียก โมโนไซลอกโซไซอะเลท (Mono-siloxo-sialate) และ Si:Al = 3 ที่มีองค์ประกอบเหมือนโพลีไซอะเลทไดไซลอกโซ มี 4 แบบคือ แบบเส้น 1 แบบ แบบมีกิ่ง 2 แบบ และแบบวงกลม 1 แบบ (J. Davidovits, 1999)

สำหรับ Si:Al ที่มากกว่า 3 เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ของโพลีไซอะเลตหรือโพลีซิลิเกต โดยไซอะเลตลิงค์ Si-O-Al ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ของโพลีไซอะเลตหรือโพลีซิลิเกต ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนี้ (J. Davidovits, 1999)



รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างโครงสร้างที่ถูกเชื่อมต่อโดยไซอะเลตลิงค์ (J. Davidovits, 1999)

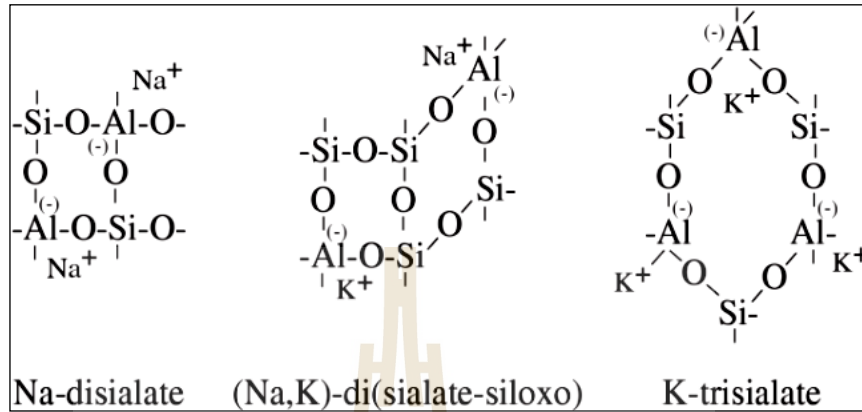
โครงสร้างไซอะเลตประกอบด้วยทรงสี่หน้าของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่เชื่อมต่อกันโดยแบ่งปันออกซิเจนร่วมกัน ไอออนบวกที่สามารถเข้าไปอยู่ที่ช่องว่างในโครงสร้างเพื่อทำหน้าที่ปรับสมดุลประจุให้กับอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (www.geopolymer.org) ได้แก่ โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) โพแทสเซียมไอออน ( $\text{K}^+$ ) แคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{++}$ ) แมกนีเซียมไอออน ( $\text{Mg}^{++}$ ) แบเรียมไอออน ( $\text{Ba}^{++}$ ) แอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) ไฮโดรเนียมไอออน ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) เป็นต้น (J. Davidovits, 1999)



รูปที่ 2.6 แสดงการเข้าปรับสมดุลประจุ  $\text{AlO}_4^-$  ด้วย  $\text{Na}^+$  ในโครงสร้างไซอะเลต (www.geopolymer.org)

สายโซ่ของอะลูมิโนซิลิเกตโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นจากโครงสร้างไซอะเลตที่มีลักษณะเป็นวงแบบของวงขึ้นอยู่กับขนาดของแคตไอออนในกรณีที่แคตไอออนเป็น  $\text{Na}^+$  หรือ  $\text{Ca}^+$  จะเกิดโครงสร้างแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก ได้แก่ (1) ชนิดโซดาไลต์ (Sodalite type) เรียก ไซโคล-ไดไซอะเลต (Cyclodisialate) และ (2) ชนิดฟิลิปไซต์ (Phillipsite type) เรียก ไซโคล-ไดไซอะเลต-ไซลอกโซ (Cyclo-di(sialate-siloxo)) แคตไอออน  $\text{K}^+$  จะเป็นโครงสร้างหกเหลี่ยมได้แก่ชนิดแกลซีไลต์

(Kalsilite type) เรียก ไฮโคลไตรโซอะเลต (Cyclotrisialate) (J. Davidovits, 1999) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ดังนี้



รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างแบบวงของไฮอะเลต (J. Davidovits, 1999)

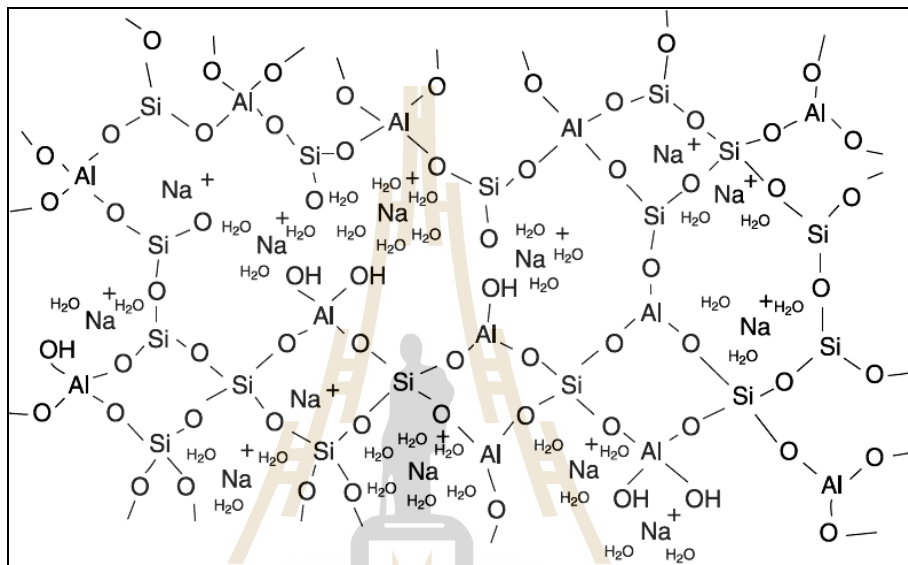
### 2.1.7 ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

การศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ พบว่าสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณโซเดียมซิลิเกต การเติมผงจีโอพอลิเมอร์ อุณหภูมิและเวลาในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ (T.W. Cheng, and J.P. Chiu, 2003) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้จำแนกปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ได้ตามหัวข้อต่างๆดังนี้ (1) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) (2) อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (3) อัตราส่วนระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์ต่อสารละลาย (4) อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และ (5) อุณหภูมิในการบ่มชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

#### 2.1.7.1 ความเข้มข้นของ NaOH

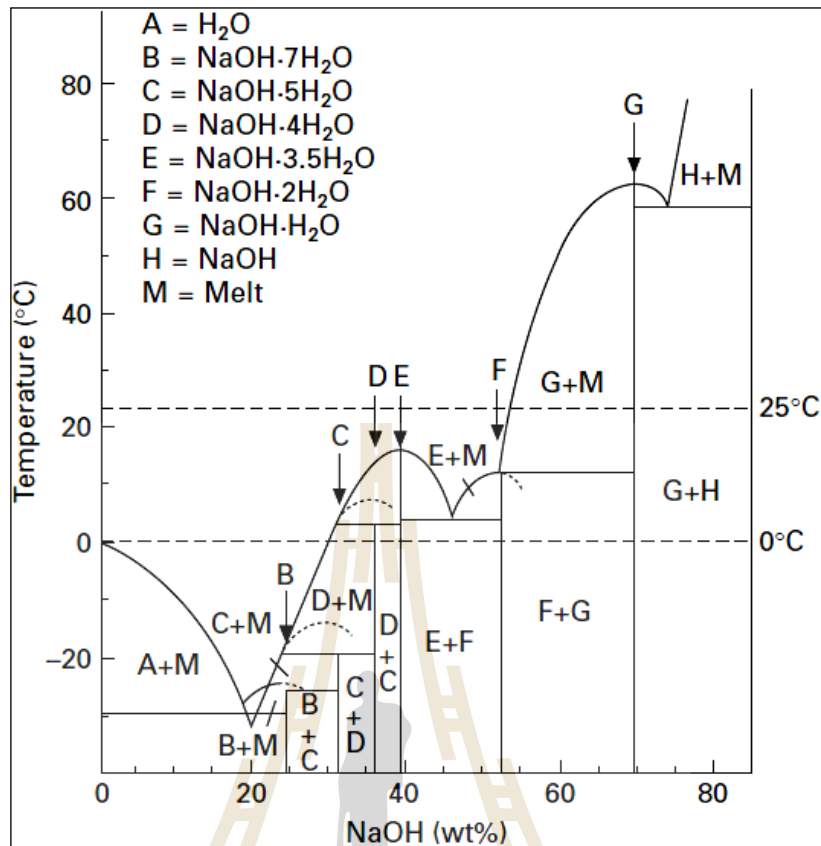
บทบาทของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันคือ ทำหน้าที่สลายพันธะโมเลกุลของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตแล้วแตกตัวเป็นไอออนออกมาทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (ปริญา จินดาประเสริฐ และคณะ 2005) โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นเบสแก่ เมื่ออยู่ในสถานะสารละลายจะสามารถแตกตัวให้โซเดียมไอออน Na<sup>+</sup> และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) ได้ดีซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเข้าจับกับไฮดรอกซิลของแหล่งซิลิเกต และอะลูมิเนียมเกิดเป็นโมเลกุลน้ำและสลายโครงสร้างปลดปล่อยอะลูมิเนียมและซิลิเกตให้เป็นอิสระหน้าที่ของ Na<sup>+</sup> จะช่วยในการปรับสมดุลประจุของ AlO<sub>4</sub><sup>-</sup> โดยเข้าไปอยู่กับโครงสร้าง

ทรงสี่หน้าของอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (K.J.D. Mackenzie, and M. Welter, 2014) โซเดียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถที่จะสลายโครงสร้างปล่อยซิลิเกตและอะลูมิเนียมให้เป็นอิสระได้ดีกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (P. Duxson, et al., 2007) หากโซเดียมไฮดรอกไซด์นี้มีความเข้มข้นสูงจะส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น เป็นผลให้เวลาในการก่อตัวเร็วขึ้น และค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.8 แสดงโครงข่ายของโพลีโซอะเลตขณะเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (K.J.D. Mackenzie, and M. Welter, 2014)

นอกจากนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ยังเป็นที่นิยมในการใช้สังเคราะห์และพัฒนาจีโอพอลิเมอร์มากที่สุดในกลุ่มของอัลคาไลไฮดรอกไซด์เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์มีราคาถูกที่สุด หาใช้ได้ง่าย และมีความหนืดต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้งานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นจะต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงถึงร้อยละ 53.3 จะลดลงเหลือร้อยละ 30 ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะพบว่ามีความแตกต่างกันมากดังแผนภูมิเฟสในรูปที่ 2.9 (J. L. Provis, and J. S. J. van Deventer, 2009) ซึ่งความเข้มข้นที่ต่างกันนี้อาจส่งผลต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ในอากาศหนาวเย็น



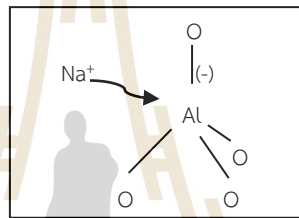
รูปที่ 2.9 แสดงแผนภูมิเฟสของส่วนผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ (J. L. Provis, and J. S. J. van Deventer, 2009)

ณัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005) ได้ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย พบว่าเมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นสูงขึ้นจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น T.W. Cheng และ J.P. Chiu (2003) พบว่าความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ สัมพันธ์กับระยะเวลาในการก่อตัว สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกรันเหล็ก ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2005) ได้ศึกษาการแช่เถ้าลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการละลายของ Si และ Al ในเถ้าลอยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเวลาที่แช่อยู่ในสารละลาย ซึ่งระยะเวลาในการแช่สารละลายมีผลต่อการละลายของ Al มากกว่าการละลายของ Si ชรินทร์ เสนาวงษ์และวิเชียร ชาลี (2011) ศึกษาการนำจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะไปใช้งานในสภาวะที่ต้องแช่อยู่ในน้ำทะเล พบว่าการแทรกซึมของคลอไรด์ และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น D. Hardjito

and B.V. Rangan (2005) พบว่าความเข้มข้นของโซเดียม ไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

#### 2.1.7.2 อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) เป็นสารละลายที่มีซิลิคอนละลายได้เป็นองค์ประกอบมีโครงสร้างแบบกึ่งเสถียรซึ่งจะมีการตกตะกอนช้ามาก (P.W. Brown, 1990) บทบาทของโซเดียมซิลิเกตในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันคือ ทำหน้าที่เป็นตัวประสานซิลิคอนไอออนและอะลูมิเนียมไอออนในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างโพลีโซอะเลตที่มีความเสถียร โซเดียมไอออนและซิลิคอนละลายได้ที่พบในสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่โดยโซเดียมไอออนจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะช่วยปรับสมดุลประจุให้กับ  $\text{AlO}_4^-$  ดังรูปที่ 2.10

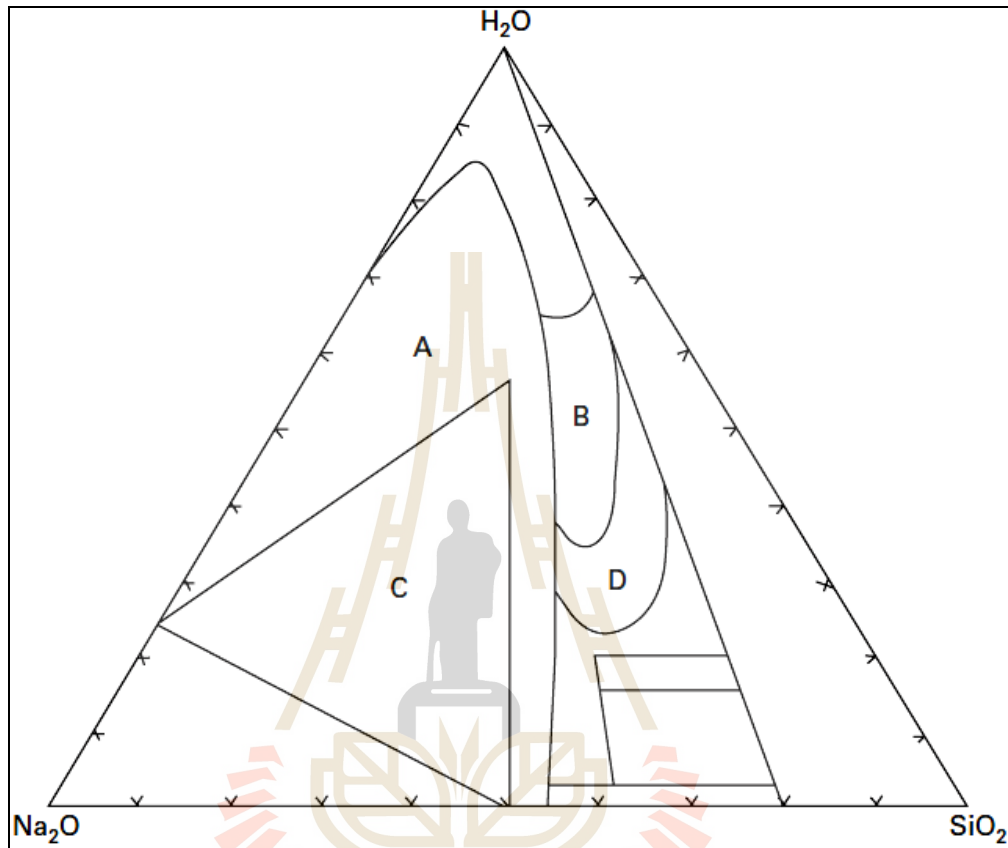


รูปที่ 2.10 แสดงการปรับสมดุลประจุโครงสร้างทรงสี่หน้าของอะลูมิเนตโดยโซเดียมไอออน

ซิลิคอนละลายได้เมื่ออยู่ในรูปของซิลิเกตจะทำหน้าที่ประสานโครงสร้างโดยเพิ่มการแบ่งปันออกซิเจนร่วมกับอะลูมิเนตและซิลิเกตที่อยู่ข้างเคียง เป็นการจัดเรียงโครงสร้างเกิดเป็นเจลของอะลูมิโนซิลิเกตและควบแน่นเป็นสายโซ่ ปริมาณที่มากขึ้นของซิลิคอนละลายได้ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะทำหน้าที่จัดเรียงโครงสร้างก่อให้เกิดเจลของอะลูมิโนซิลิเกตได้เร็วขึ้น การจัดเรียงโครงสร้างที่รวดเร็วส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์เกิดโครงสร้างแบบอสัณฐาน ซึ่งโครงสร้างจะไม่เปลี่ยนไปเป็นแบบผลึกแม้จะผ่านระยะเวลานานาน (P. Duxson, et al., 2007) หน้าที่ดังกล่าวสัมพันธ์กับอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทั่วไปแล้วถ้าหากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงถึงค่าที่เหมาะสม จะส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นทำให้ใช้เวลาในการก่อตัวที่เร็วขึ้น เกิดโครงสร้างแบบอสัณฐานได้มากขึ้นเป็นผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นด้วย

แผนภูมิเทอร์นารีของระบบ  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิห้องในรูปที่ 2.11 (J.G. Vail, 1952) แสดงบริเวณเขตที่มีความสำคัญที่สุดสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ เขต A โซเดียมซิลิเกตมีผลึกเป็นส่วนผสมมีปริมาณซิลิกาในสารละลายต่ำ มีองค์ประกอบแบบกึ่งเสถียรและเขต B เป็นกรดสารละลายโซเดียมซิลิเกตแบบที่พบมากในเชิงพาณิชย์ส่วนสารละลาย

โซเดียมซิลิเกตที่เตรียมจากองค์ประกอบในเขต C จะมีแนวโน้มสูงที่จะเกิดผลึกในสารละลาย และโซเดียมซิลิเกตเขต D มีแนวโน้มที่สารละลายจะมีความหนืดสูง



รูปที่ 2.11 แสดงแผนภูมิเทอร์นารีของระบบ  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิห้อง (J.G. Vail, 1952)

นอกจากนี้นักวิจัยบางกลุ่มยังได้รายงานผลของโซเดียมซิลิเกตต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ไว้ T.W. Cheng และ J.P. Chiu (2003) พบว่าเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนเหล็กสัมพันธ์กับการเติมโซเดียมซิลิเกต A.L.G. Gastaldini และคณะ (2007) พบว่าคอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำปฏิกิริยาและบ่มนาน 28 วัน ให้ผลการแทรกซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับโซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกต D. Hardjito and B.V. Rangan (2005) พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

### 2.1.7.3 อัตราส่วนระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์และสารละลาย

บทบาทของผงจีโอพอลิเมอร์ในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมโรเซชันคือเป็นแหล่งของอะลูมิเนียมและซิลิกอนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยทั่วไปหากอัตราส่วนระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์และสารละลายมีค่าสูงเกินไป สารละลายจะไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมโรเซชันกับผงจีโอพอลิเมอร์อย่างทั่วถึง เป็นผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากอัตราส่วนระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์และสารละลายมีค่าต่ำ ปริมาณของเหลวสารละลายที่มีมากในส่วนผสมจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ใช้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น กำลังรับแรงอัดและความสามารถในการใช้งานของจีโอพอลิเมอร์จึงถูกกำหนดโดยอัตราส่วนและสมบัติของวัสดุที่ใช้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005) ได้ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย พบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคลดลง จะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

### 2.1.7.4 อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม

บทบาทของซิลิกอนและอะลูมิเนียมในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมโรเซชันคือทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสัมพันธ์กับชนิดของโพลีโซลเจล โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมมีค่าสูงขึ้นไปจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์จะมีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น

E. Nimwinya และคณะ (2016) พบว่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่สูงขึ้นจะทำให้จีโอพอลิเมอร์ใช้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น เนื่องจากอัตราการควบแน่นของโครงสร้างชนิดซิลิกา-อะลูมินา เกิดขึ้นเร็วกว่าชนิดซิลิกา-ซิลิกา และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาและเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มที่เหมาะสมจะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น P. Chindapasirt และคณะ (2012) ศึกษาผลของปริมาณ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ  $\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลงซึ่งแตกต่างจากลักษณะของจีโอพอลิเมอร์โดยทั่วไปที่เมื่อปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นจะมีผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นแต่การเพิ่ม  $\text{SiO}_2$  จะมีผลในการหน่วงเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

### 2.1.7.5 อุณหภูมิในการบ่ม

บทบาทของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในการบ่มในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมโรเซชันคือเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมโรเซชัน โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นจะทำให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ก่อตัวได้เร็วขึ้น โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์จะเป็นแบบอสัณฐานส่งผลให้ได้ความแข็งแรงในระยะเริ่มต้นสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องซึ่งจะเกิดโครงสร้างแบบพหุผลึกบางส่วน และจะเห็นผลได้ชัดเจนเมื่อจีโอพอลิเมอร์นั้นมีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูง



T.W. Cheng และ J.P. Chiu (2003) พบว่าเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของ จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกรันเหล็ก สัมพันธ์กับอุณหภูมิในการบ่ม S. Songpiriyakij (2005) พบว่าอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะเริ่มต้น และเวลาในการบ่มที่นานขึ้น มีผลในการเพิ่มค่ากำลังอัดให้กับจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย และอุณหภูมิการบ่มที่ไม่มีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ E. Nimwinya และคณะ (2016) พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ช่วยเร่งอัตราการควบแน่นของโครงสร้างชนิดซิลิกา-อะลูมินา และชนิดซิลิกา-ซิลิกา ได้เร็วกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และพบว่าเมื่อบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จีโอพอลิเมอร์จะให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา 4.5 และ 5.9 ตามลำดับ

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเข้มข้นอัลคาไลต์ไฮดรอกไซด์ และ/หรือ อัลคาไลต์ซิลิเกตกับวัตถุดิบที่มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ดินเถ้าเป็นวัตถุดิบหนึ่งที่สามารถนำมาสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ มีงานวิจัยหลายชิ้นศึกษาการนำดินเถ้ามาสังเคราะห์เป็น จีโอพอลิเมอร์ A. Elimbi และคณะ (2011) ศึกษาผลของอุณหภูมิการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ด้วยดินเถ้าในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 800 องศาเซลเซียส พบว่าการสังเคราะห์ตัวอย่างที่อุณหภูมิตั้งแต่ 700 องศาเซลเซียสขึ้นไปมีผลให้เวลาการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิระหว่าง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียสกำลังรับแรงอัดของ จีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นในช่วง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส แต่กำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการสังเคราะห์เกิน 700 องศาเซลเซียส สาเหตุเกิดจากเมื่อดินเถ้าสูญเสียน้ำในโครงสร้างจะอยู่ในสถานะไม่เป็นระเบียบ (Disorder) สถานะดังกล่าวส่งผลให้ได้จีโอพอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่ดี ความไม่เป็นระเบียบของดินเถ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิการสังเคราะห์ และเกิดความไม่เป็นระเบียบสูงสุด ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส P. Rovnanik (2010) ศึกษาการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินเถ้า พบว่าการบ่มจีโอพอลิเมอร์มีผลอย่างมากต่อการแข็งตัวและความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ การบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง หรือ อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง จะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์แข็งตัวภายใน 4 ชั่วโมง แต่หากทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส จีโอพอลิเมอร์จะแข็งตัวช้ากว่าปกติ 4 วัน การบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความแข็งแรงในช่วงแรกเกิดได้เร็ว แต่หลังจาก 28 วันความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์จะต่ำกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ C. Y. Heah และคณะ (2011) ศึกษาการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินเถ้า พบว่าจีโอพอลิเมอร์ไม่เหมาะสมที่จะบ่ม ณ อุณหภูมิห้อง

เนื่องจากการแข็งตัวในช่วงต้นเกิดได้ช้ามากการเพิ่มอุณหภูมิการบ่มช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาและช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอพอลิเมอร์การใช้เวลาในการบ่มที่นานขึ้นจะส่งเสริมกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ แต่การใช้อุณหภูมิการบ่มสูงกับระยะเวลาการบ่มที่นานจะส่งผลเสียต่อการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากน้ำบางส่วนจะถูกทำให้ระเหยระหว่างการบ่ม O. Bruciaga-Diaz และคณะ (2012) ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินเหนียวความบริสุทธิ์ต่ำ (วัตถุดิบประกอบด้วยกาแลนไนท์ร้อยละ 70 และควอตซ์ร้อยละ 30) และมีขนาดอนุภาคหยาบ (วัตถุดิบร้อยละ 50, 70 และ 90 สามารถผ่านตะแกรงที่มีรูเปิดขนาด 14.5, 98 และ 212 ไมโครเมตร ตามลำดับ) พบว่า ดินดังกล่าวสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ด้วยต้นทุนการผลิตต่ำ เนื่องจากในการผลิตไม่จำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบดวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กและควอตซ์ที่ปนอยู่ในดินสามารถลดปริมาณสารละลายที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดลองดังกล่าวใกล้เคียงกับผลการทดลองของ F. Zibouche และคณะ (2009) ซึ่งเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากดินเหนียวที่มีแร่อื่น (อิลไลต์และควอตซ์) เจือปนอยู่ร้อยละ 30 พบว่า ถึงแม้ดินเหนียวที่ใช้ในการทดลองจะมีความบริสุทธิ์ต่ำแต่ยังสามารถนำมาใช้สังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ Z. Yunsheng และคณะ (2010) ศึกษาผลของส่วนผสมต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์พบว่า สัดส่วนระหว่าง  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{M}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$  (เมื่อ M คือ Na หรือ K) มีผลอย่างมากต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ จากการทดลองพบว่า สัดส่วนที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=5.5$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3=1.1$  และ  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=7.0$  โดยกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากสัดส่วนดังกล่าวมีค่า 34.9 MPa Z. Zhang และคณะ (2012) ศึกษาผลของฮอลลอยไซท์ที่ปนอยู่ในดินเหนียวต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ พบว่าการที่มีฮอลลอยไซท์ปนอยู่ในดินเหนียวส่งผลดีต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ การแตกตัวในสารละลายของดินเหนียวที่มีฮอลลอยไซท์ปนอยู่ร้อยละ 31 โดยน้ำหนักเกิดได้ดีกว่าดินเหนียวบริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังพบว่าดินที่มีฮอลลอยไซท์ปนอยู่มีอัตราการเกิดจีโอพอลิเมอร์เร็วกว่าดินเหนียวบริสุทธิ์ ส่งผลให้เวลาในการแข็งตัวของดินเหนียวที่มีฮอลลอยไซท์ปนอยู่เร็วกว่าดินเหนียวบริสุทธิ์ M. R. Wang และคณะ (2010) ศึกษาผลของอุณหภูมิการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินเหนียวต่อความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ โดยการนำดินเหนียวไปเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากการนำดินเหนียวไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสให้ความแข็งแรงมากกว่าการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส A. Autef และคณะ (2012) ศึกษาผลของซิลิกาที่อยู่ในรูปอสัณฐาน และรูปผลึกต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินเหนียว โดยการเติมซิลิกาทั้งสองชนิดลงในส่วนผสมพบว่า ซิลิกาที่อยู่ในรูปผลึกเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เร็วขึ้นได้ยาก ในขณะที่ซิลิกาที่อยู่ในรูปอสัณฐานจะถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาแล้วกลายเป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ทั้งหมด อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005) เตรียมจีโอพอลิเมอร์จากดินเหนียวผสมกับเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะพบว่า อุณหภูมิสำหรับการเตรียมดินเหนียวเพื่อใช้ผสม

กับถ้ำลอยในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ 600 องศาเซลเซียส และ ปริมาณของดิน  
เกาลินที่สามารถใช้ผสมกับถ้ำลอยได้มากที่สุดคือ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หากใช้ดินเกาลินมากกว่า  
ปริมาณดังกล่าวจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง J. Xie และคณะ (2009) ศึกษา  
การเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากส่วนผสมระหว่างถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าของประเทศจีน ดินเกาลิน และ  
ตะกรันเหล็กพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากส่วนผสมระหว่างดินเกาลิน ถ้ำลอย และตะกรันเหล็กใน  
สัดส่วน 1:3:3 ให้ความแข็งแรงสูงถึง 31.6 MPa และจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ยังสามารถเก็บกักโลหะ  
หนักเช่น Pb, Cu, Cr and Ni ไว้ในตัวได้

แม้ปัจจุบัน จะมีงานวิจัยหลายชิ้นศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากดิน  
เกาลิน แต่ยังไม่พบงานวิจัยชิ้นใดทำการศึกษานำดินดานเกวียนหรือดินท้องถิ่นซึ่งมีราคาถูกกว่า  
ดินเกาลินมาใช้สังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ งานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นงานวิจัยใหม่และเป็นงานวิจัยที่  
ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด



### บทที่ 3

#### วัสดุและวิธีการทดลอง

#### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง การวิเคราะห์ และการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
X-ray fluorescence (XRF)	Horiba	XGT-5200
X-ray diffractometer (XRD)	Bruker	D2
Differential thermal analyzer (DTA)	Perkin Elmer	DTA7
Drying oven	Binder	ED240
Laboratory test sieve	Retsch	# 325 MESH
Furnace	Nabertherm	LH 30/13
Gilmore needle ASTM C266	Humboldt	H-3150

#### 3.2 วัสดุและสารเคมี

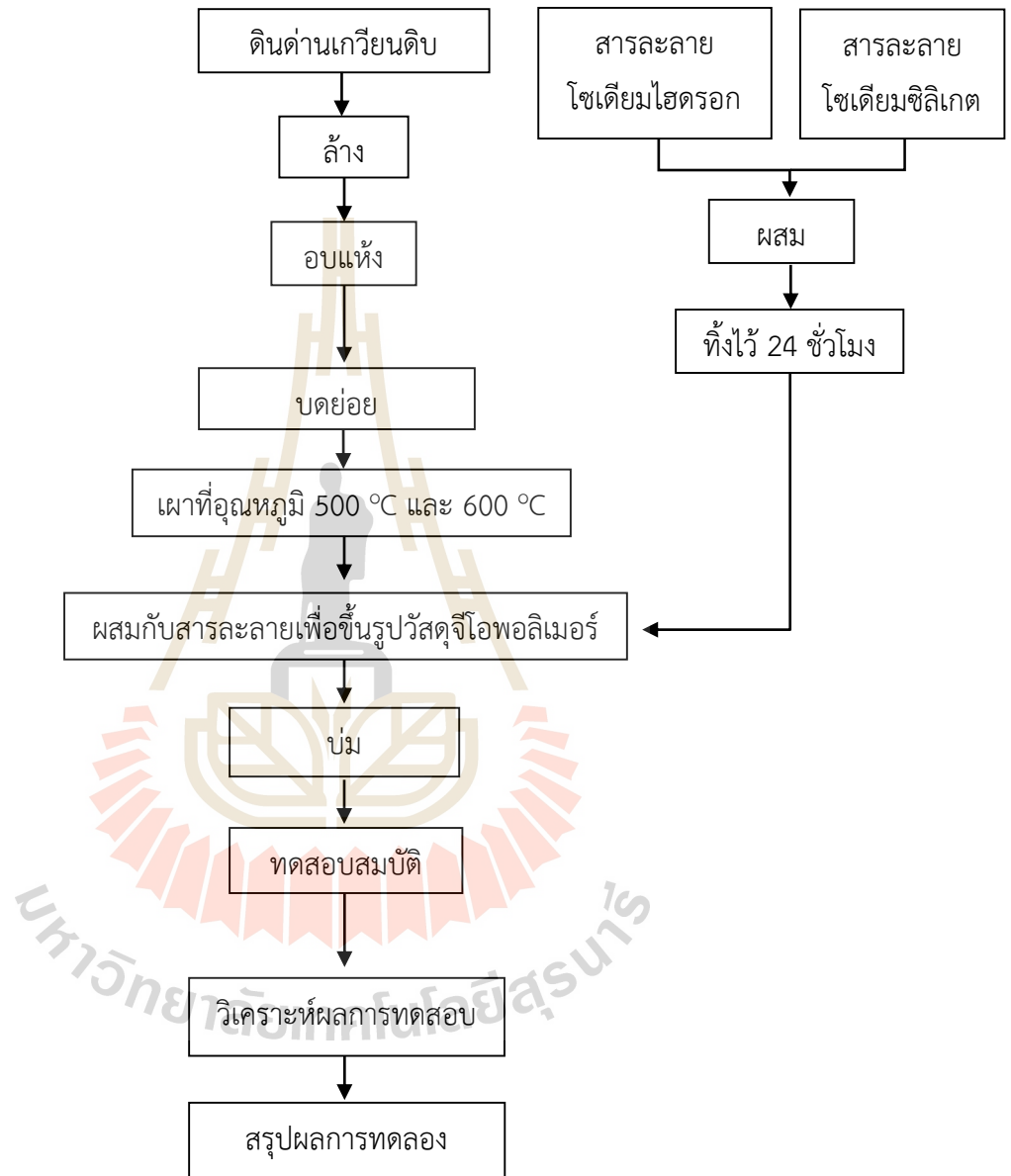
วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุและสารเคมี	ผู้ผลิต	ชนิด / เกรด
Sodium hydroxide	Merck	ACS, Reag. Ph Eur
Sodium silicate solution	Merck	Extra pure

### 3.3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองแสดงในภาพที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.3.1 การเตรียมผงจีโอพอลิเมอร์จากดินต่านเกวียน

1. ดินต่านเกวียนจากแหล่งวัตถุดิบจะถูกล้างและแยกสิ่งสกปรกออกก่อนโดยการนำไปผสมกับน้ำ ด้วยอัตราส่วนดินต่อน้ำ 0.8-1.2 จากนั้นนำไปกรองผ่านตะแกรงเบอร์ #325 Mesh เพื่อแยกกรวดทรายและอินทรีย์วัตถุออก
2. นำดินที่ได้จากข้อที่ 1 ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงจนแห้งสนิท จากนั้นนำดินที่ได้ไปบดด้วยโกร่งและนำไปผ่านตะแกรงเบอร์ #325 Mesh
3. นำดินที่ได้จากข้อ 2 ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส

### 3.3.2 การเตรียมสารละลายอัลคาไลน์

สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ คือสารละลายที่เตรียมได้จากการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. นำ NaOH ชนิดเม็ดไปกวนผสมกับน้ำกลั่นทิ้งไว้ 15-30 นาที เตรียมให้มีความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 8 และ 12 โมลาร์
2. นำสารละลาย NaOH ไปกวนผสมกับสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  นาน 30 นาที ในอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH เป็น 0.5 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร
3. บ่มสารละลายทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้งาน

### 3.3.3 การขึ้นรูปและการบ่มจีโอพอลิเมอร์

1. ผสมผงดินต่านเกวียนที่ผ่านการเผาแคลไซน์แล้วกับสารละลายที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.3.2 ด้วยโกร่งกวนจนของผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้สัดส่วนผงจีโอพอลิเมอร์ต่อสารละลายอัลคาไลน์ เป็น 2.0 โดยน้ำหนัก
2. ขึ้นรูปชิ้นงานโดยการเติมส่วนผสมลงในแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M (2012) ดังรูปที่ 3.2
3. จีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปแล้วจะถูกนำไปทดสอบเวลาการก่อตัว และนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง, 60 องศาเซลเซียส แล 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด



รูปที่ 3.2 แสดงแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 50x50x50

### 3.3.4 การทดสอบสมบัติ

ดินด้านเหนียวและวัสดุจีโอพอลิเมอร์ จะถูกทดสอบลักษณะและคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

#### 3.3.4.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน

การวิเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของผงดินด้านเหนียว โดยอาศัยหลักการ การเปลี่ยนแปลงทางเฟสของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน ค่าที่วัดได้คือค่าการดูดและคายพลังงานเพื่อเปลี่ยนแปลงทางเฟสของตัวอย่าง

เครื่องมือ : Differential thermal analyzer (DTA) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

ผู้ผลิต : Perkin Elmer

รุ่น : DTA7



รูปที่ 3.3 แสดงเครื่อง Differential thermal analyzer (DTA)

วิธีการทดสอบ

1. เตรียมผงตัวอย่างโดยสุ่มปริมาณ 1 กรัม
2. เติมผงตัวอย่างลงไปในห้องใส่ผงตัวอย่างภายในเครื่อง
3. ควบคุมการทดสอบโดยกำหนดอุณหภูมิในการทดสอบในช่วง 25 ถึง 1,190 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
4. บันทึกผลการทดลองแล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

### 3.3.4.3 การทดสอบเวลาในการก่อตัว

การทดสอบเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ โดยกิลล์มอร์นิตเดิลส์ ตามมาตรฐาน ASTM C266 (2013) เข้มสำหรับวัดเวลาในการเริ่มก่อตัวมีน้ำหนัก 113.4 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 2.12 มิลลิเมตร และเข็มวัดเวลาสิ้นสุดการก่อตัวมีน้ำหนัก 453.6 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.06 มิลลิเมตร โดยเวลาในการก่อตัวจะถูกบันทึกเมื่อปลายเข็มทั้งสองไม่สามารถกดขึ้นงานให้เป็นรอยเต็มวงกลมได้

#### วิธีการทดสอบ

1. วัดค่าเวลาในการเริ่มก่อตัว ยกเข็มฝั่งเริ่มก่อตัวขึ้น
2. นำชิ้นงานวางลงที่แท่นวาง
3. วางเข็มลงบนผิวชิ้นงานเบาและปล่อยมือ
4. บันทึกเวลาเมื่อเข็มไม่สามารถกดผิวชิ้นงานให้เป็นรอยเต็มวงกลมได้
5. วัดค่าเวลาในการสิ้นสุดก่อตัว ยกเข็มฝั่งสิ้นสุดก่อตัวขึ้น ทำซ้ำข้อที่ 2-4
6. บันทึกผลการทดลอง แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

### 3.3.4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี อาศัยหลักการที่รังสีเอ็กซ์ไปกระทบ ทำให้ตัวอย่างเกิดการปล่อยโฟตอน ที่ความยาวคลื่นเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด

เครื่องมือ : X-ray fluorescence (XRF) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ผู้ผลิต : HORIBA

รุ่น : XGT-5200



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่อง X-ray fluorescence (XRF)



### วิธีการทดสอบ

1. เติมผงตัวอย่างลงในอุปกรณ์ใส่ผงตัวอย่าง (Sample holder) ให้เต็มช่อง
2. นำอุปกรณ์ใส่ผงตัวอย่างใส่เข้าที่วางในเครื่อง XRF
3. ควบคุมการทดสอบโดยคอมพิวเตอร์
4. บันทึกผลการทดลอง แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

### 3.3.4.5 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเฟส

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเฟส อาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) โดยรังสีเอ็กซ์เกิดการเลี้ยวเบนเมื่อกระทบกับผลึก การเลี้ยวเบนในช่วงมุมตกกระทบ จะเป็นรูปแบบเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด

เครื่องมือ : X-ray diffractometer (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 3.5

ผู้ผลิต : BRUKER

รุ่น : D2



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

### วิธีการทดสอบ

1. เติมผงตัวอย่างลงในช่องว่างของอุปกรณ์ใส่ผงตัวอย่างให้เต็มช่อง
2. ใช้แผ่นกระจกคดคลึงผงตัวอย่างในอุปกรณ์ใส่ตัวอย่างให้แน่นและเรียบ
3. นำอุปกรณ์ใส่ตัวอย่างประกอบเข้าชุดแล้วนำเข้าเครื่องตรวจวิเคราะห์
4. ทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเฟส โดยมีรายละเอียดสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ ดังนี้ Generator tension= 30 KV, Generator current= 10 mA, Start angle = 5 degree, End angle = 80 degree, Time per step = 0.2 s, Step size = 0.01 degree

### 3.3.4.6 การวัดกำลังรับแรงอัดของชิ้นงาน

การทดสอบความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M (2012)

#### วิธีการทดสอบ

1. เตรียมเครื่อง Uniaxial press โดยตั้งระดับแผ่นเพดานและแผ่นพื้นล่างให้มีระยะห่างกันประมาณ 10 เซนติเมตร
2. นำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบกำลังรับแรงอัดวางบริเวณกลางแผ่นพื้นล่าง ปิดฝาเครื่อง
3. อัดชิ้นงานอย่างช้า ๆ อ่านค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นบนเกจ
4. เมื่อชิ้นงานแตก ให้บันทึกค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อัดได้
5. คำนวณค่ากำลังรับแรงอัดด้วยสมการ

$$\text{กำลังรับแรงอัด} = \frac{P}{A}$$

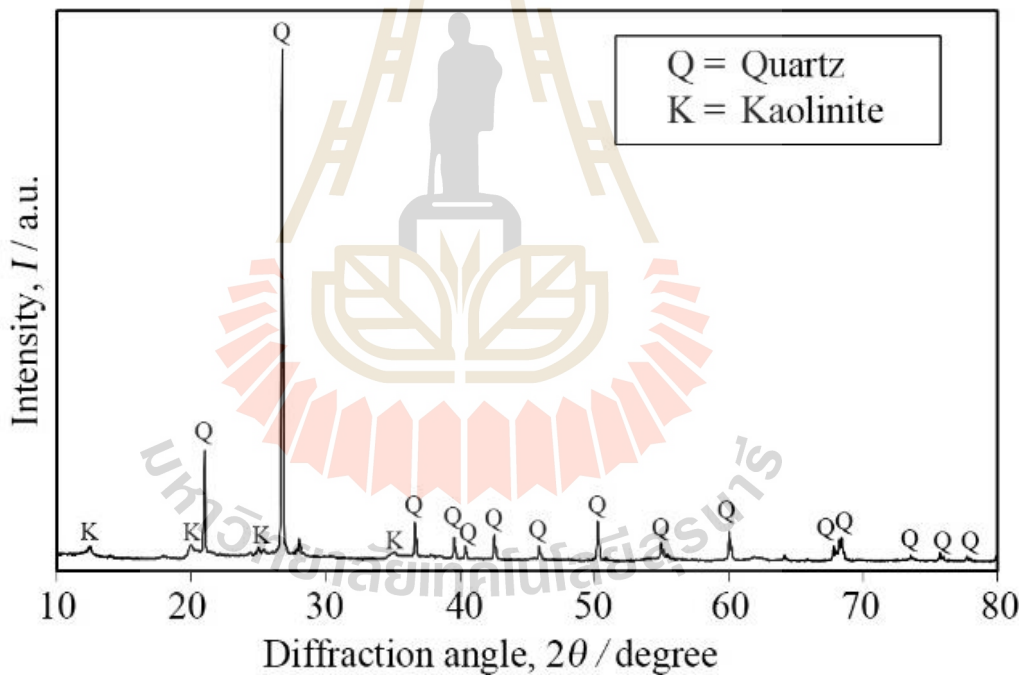
เมื่อ  $P$  และ  $A$  คือ ค่ากำลังรับแรงอัด ค่าแรงอัดสูงสุด และ พื้นที่รับแรงของชิ้นงานในหน่วย ตามลำดับ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสและทางเคมีของดินด่านเกวียน

XRD แพทเทิร์นของดินด่านเกวียนแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าพีค (peak) หลักเป็นพีคของทราย และมีพีคขนาดเล็กของแร่เคลโอไลท์ปรากฏอยู่ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินด่านเกวียนด้วยเครื่อง XRF แสดงในตารางที่ 4.1 สารประกอบหลักในดินด่านเกวียนประกอบด้วยซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ เหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในปริมาณร้อยละ 72.95, 18.76 และ 4.72 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ XRF แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่ของดินด่านเกวียนประกอบไปด้วยทรายเป็นหลัก และมีแร่เคลโอไลท์ปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย



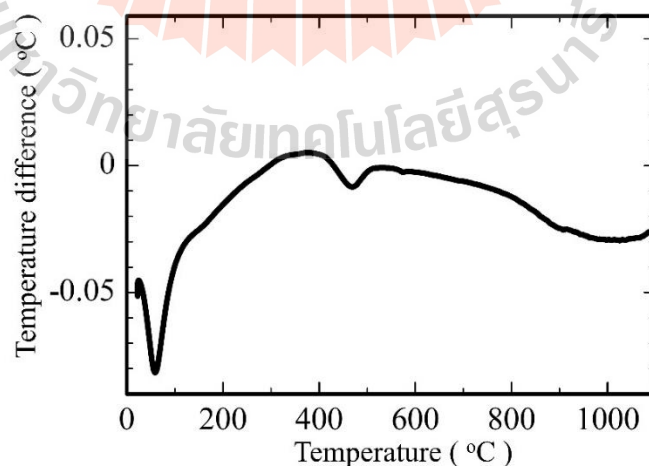
รูปที่ 4.1 แสดง XRD แพทเทิร์นของดินด่านเกวียน มีพีคของทรายเป็นพีคหลัก และมีพีคขนาดเล็กของเคลโอไลท์ปนอยู่

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินด่านเกวียนด้วยเครื่อง XRF

สารประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SiO <sub>2</sub>	72.95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.76
K <sub>2</sub> O	1.02
CaO	0.38
MgO	1.19
TiO <sub>2</sub>	0.84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.72
อื่นๆ (ได้แก่ MnO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> และ CuO)	0.14

#### 4.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของดินด่านเกวียน

การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential thermal analysis, DTA) ของดินด่านเกวียนแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินด่านเกวียน ณ ช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยช่วงอุณหภูมิที่มีความสำคัญคือช่วงที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) เมื่อดินเกิดการสูญเสียน้ำในโครงสร้าง (Chemical combined water) จะทำให้โครงสร้างดินเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเคโอลินไนต์ไปเป็นเมตะเคโอลิน (Metakaolin) ส่งผลให้ความเสถียรของโครงสร้างดินลดลงเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ช่วงอุณหภูมิที่ส่งผลให้ดินด่านเกวียนเกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวคือช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส



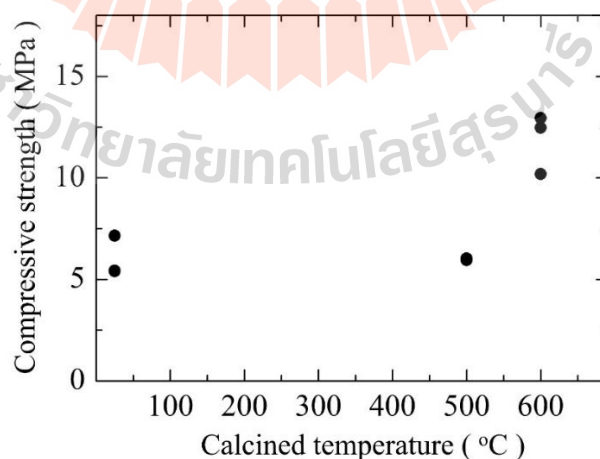
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนของดินด่านเกวียนด้วยเครื่องวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์

### 4.3 ผลของสภาวะการเผาแคลไซน์ดินต้านเกวียนต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

การศึกษาผลของสภาวะการเผาแคลไซน์ดินต้านเกวียนต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ได้ควบคุมตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ให้คงที่ โดยควบคุมความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 8 โมลาร์ ควบคุมอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 ควบคุมอัตราส่วนผงดินต้านเกวียนต่อสารละลายที่ 2.0 และทุกตัวอย่างถูกบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

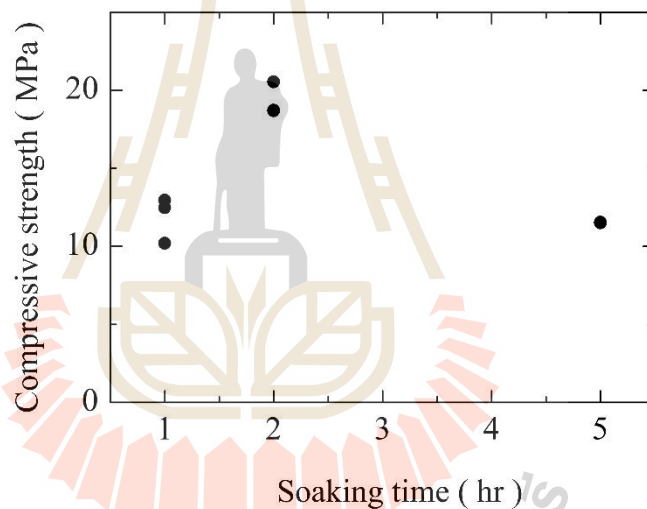
#### 4.3.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซน์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซน์ดินต้านเกวียนต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าการใช้ดินต้านเกวียนที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีค่าไม่แตกต่างจากการใช้ดินต้านเกวียนที่ไม่ผ่านการเผาแคลไซน์ ในขณะที่ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เป็น 600 องศาเซลเซียส ผลการทดลองดังกล่าวบ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้ดินต้านเกวียนสังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์นั้นจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่เพียงพอ เพื่อเปลี่ยนสภาพดินต้านเกวียนให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าแม้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เพียงพอต่อการเปลี่ยนสภาพดินต้านเกวียนให้พร้อมต่อการเกิดปฏิกิริยา (ดังอภิปรายในหัวข้อ 4.2) แต่ด้วยเวลาการเผาแช่ที่ไม่เพียงพอจึงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าไม่แตกต่างจากการใช้ดินต้านเกวียนที่ยังไม่ผ่านการเผา



รูปที่ 4.3 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเผาแคลไซน์ดินต้านเกวียนที่อุณหภูมิต่างกัน ทุกตัวอย่างใช้เวลาในการเผาแช่ 1 ชั่วโมง

เพื่อศึกษาผลของเวลาการเผาแช่ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ดินด่านเกวียนจะถูกนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสโดยใช้เวลาในการเผาแช่ต่างกัน รูปที่ 4.4 แสดงผลของเวลาการเผาแช่ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะ เมื่อเพิ่มเวลาการเผาแช่จาก 1 ชั่วโมงเป็น 2 ชั่วโมง เนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมและเวลาในการเผาแคลไซน์ที่เพียงพอ จะส่งผลให้ดินด่านเกวียนเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้สมบูรณ์และมีสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเวลาการเผาแช่จาก 2 ชั่วโมงเป็น 5 ชั่วโมงกลับส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง เนื่องจากหากใช้เวลาในการเผาแช่นานเกินไปจะส่งผลให้ดินด่านเกวียนเปลี่ยนสภาพจากเฟสอสัญฐาน (ไม่เสถียรเกิดปฏิกิริยาได้ดี) กลับไปอยู่ในรูปผลึก (เสถียรไม่เกิดปฏิกิริยา) เป็นผลให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันของดินด่านเกวียนลดลง

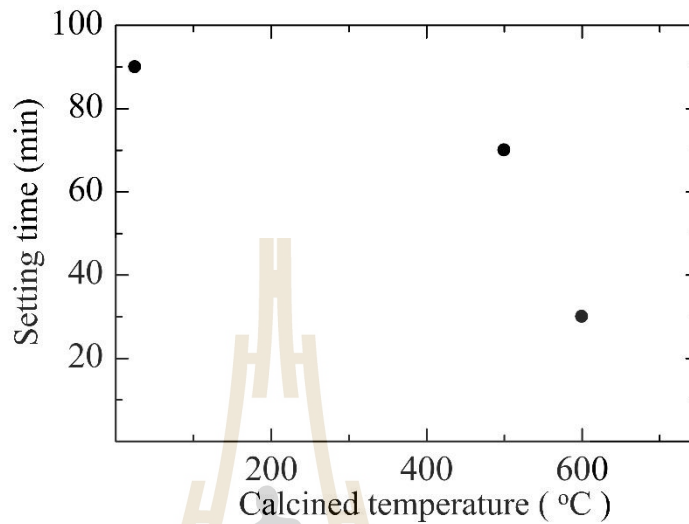


รูปที่ 4.4 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเผาแคลไซน์ดินด่านเกวียนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสโดยใช้เวลาในการเผาแช่ต่างกัน

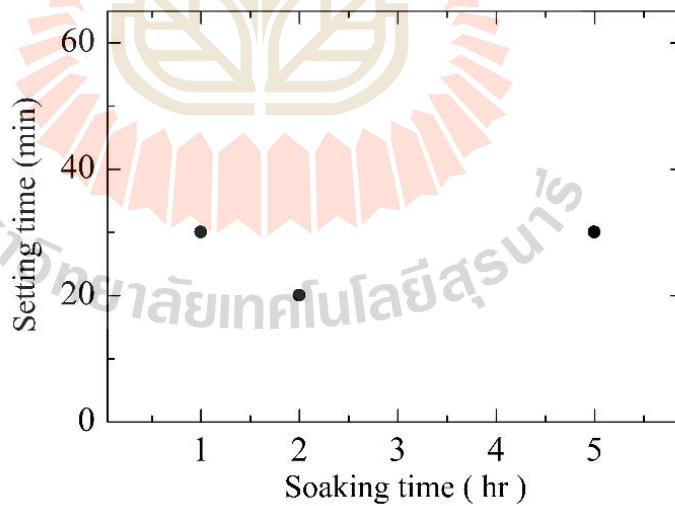
#### 4.3.2 ผลของสถานะการเผาแคลไซน์ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

เวลาการก่อตัวแสดงถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันของดินด่านเกวียนหลังผ่านการเผาแคลไซน์ รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยดินด่านเกวียนที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียสมีเวลาในการก่อตัวสั้นที่สุด และเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์จะลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการเผาแช่จาก 1 ชั่วโมงเป็น 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 อย่างไรก็ตาม เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเผาแช่เป็น 5 ชั่วโมง

เนื่องจากความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันของดินดานเกวียนลดลงตั้งแต่อภิปรายไว้ในหัวข้อ 4.3.1



รูปที่ 4.5 แสดงผลของสภาวะในการเผาแคลไซน์ดินดานเกวียนต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ ทุกตัวอย่างใช้เวลาในการเผาแค่ 1 ชั่วโมง

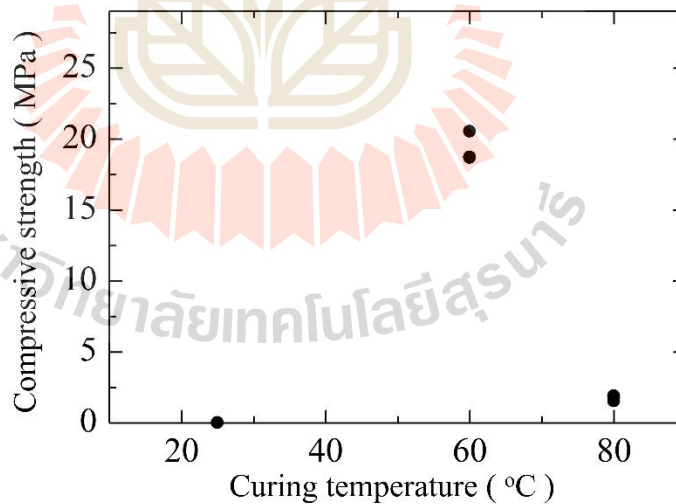


รูปที่ 4.6 แสดงผลของเวลาในการเผาแคลไซน์ดินดานเกวียนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลาต่างๆ ต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

#### 4.4 ผลของสภาวะการบ่มต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

ในการศึกษาผลของสภาวะการบ่มต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ได้ควบคุมตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ให้คงที่โดยตัวอย่างทั้งหมดถูกเตรียมจากดินด้านเกวียนที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียสใช้เวลาเผาแซ่เป็น 2 ชั่วโมง โดยควบคุมความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 8 โมลาร์ ควบคุมอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 ควบคุมอัตราส่วนผงดินด้านเกวียนต่อสารละลายที่ 2.0 และทุกตัวอย่างถูกบ่มเป็นเวลา 7 วัน

หลังการขึ้นรูปแล้วตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ผลของอุณหภูมิการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 4.7 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินด้านเกวียนไม่สามารถบ่มที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากหลังการบ่ม 7 วันวัสดุจีโอพอลิเมอร์ไม่เกิดการแข็งตัว แสดงให้เห็นว่าด้วยการเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินด้านเกวียน ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากปราศจากการกระตุ้นโดยใช้ความร้อนจากภายนอก ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้นหลังบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการบ่มเป็น 80 องศาเซลเซียสพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมีนัยยะ เนื่องจากหลังบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วันชิ้นงานเกิดรอยร้าวขนาดใหญ่ดังแสดงในภาพที่ 4.8 เป็นผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง



รูปที่ 4.7 แสดงผลของอุณหภูมิในการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์



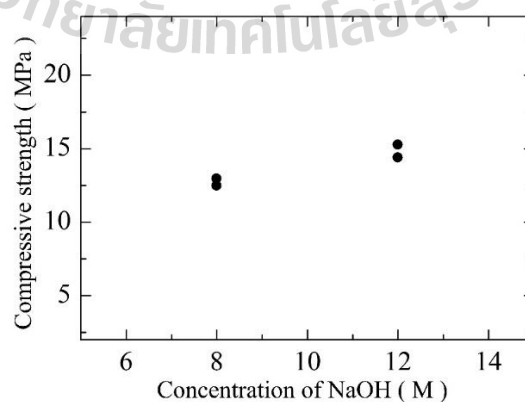


รูปที่ 4.8 แสดงรอยร้าวขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหลังผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

#### 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์

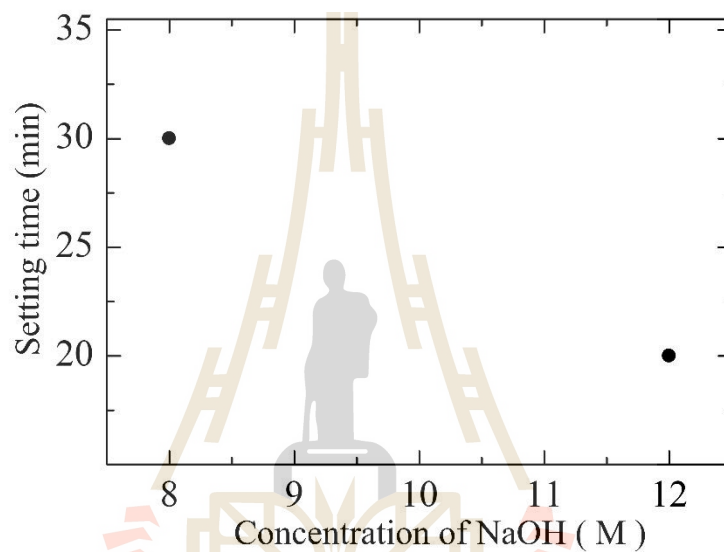
ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ได้ควบคุมตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ให้คงที่โดยควบคุมการเผาแคลไซน์ดิน ด่านเกวียนที่ 600 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ควบคุมอัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 ควบคุมอัตราส่วนผงดินด่านเกวียนต่อสารละลายที่ 2.0 และ ทุกตัวอย่าง ถูกบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ จากรูปพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้นส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินด่านเกวียนมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น เนื่องจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงจะส่งผลให้ขั้นตอนการแตกตัวของดินด่านเกวียนเป็นไอออนของอะลูมิเนียมและซิลิกอนเกิดได้สมบูรณ์มากขึ้น



รูปที่ 4.9 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ แสดงในรูปที่ 4.10 เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มสั้นลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายที่สูงจะส่งผลให้กระบวนการแตกตัวของวัตถุดิบเป็นไอออนของอะลูมิเนียมและซิลิกอนเกิดได้เร็วมากขึ้น (ปริญญญา จินดาประเสริฐ และคณะ 2005) และทำให้มีปริมาณไอออนของโซเดียมซึ่งทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อไอออนของอะลูมิเนียมและซิลิกอนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เร่งขึ้นเกิดได้รวดเร็วมากขึ้น และทำให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลง



รูปที่ 4.10 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน

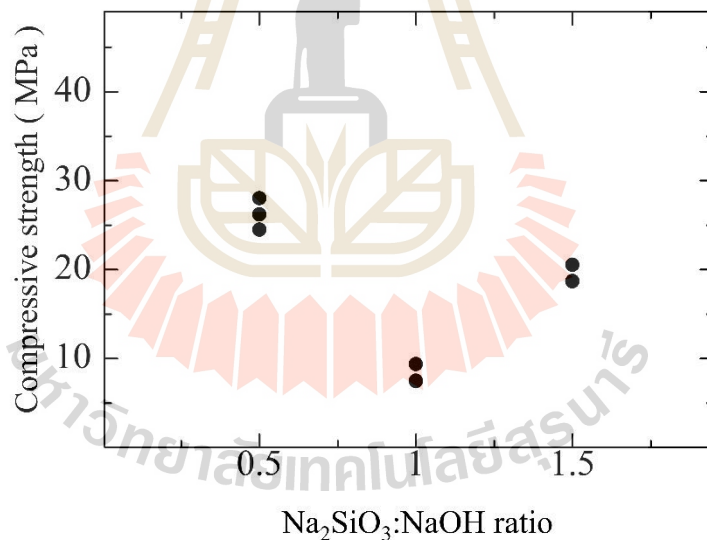
#### 4.6 ผลของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

ในการศึกษาผลของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ได้ควบคุมตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ให้คงที่ โดยควบคุมการเผาแคลไซน์ดินด้านเกวียนที่ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผาแ่ 1 ชั่วโมง ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 8 โมลาร์ ควบคุมอัตราส่วนผงดินด้านเกวียนต่อสารละลายที่ 2.0 และทุกตัวอย่างถูกบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน

รูปที่ 4.11 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างโซเดียม

ซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 1.0 แต่เมื่ออัตราส่วนดังกล่าวเพิ่มจาก 1.0 เป็น 1.5 กลับมีผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น

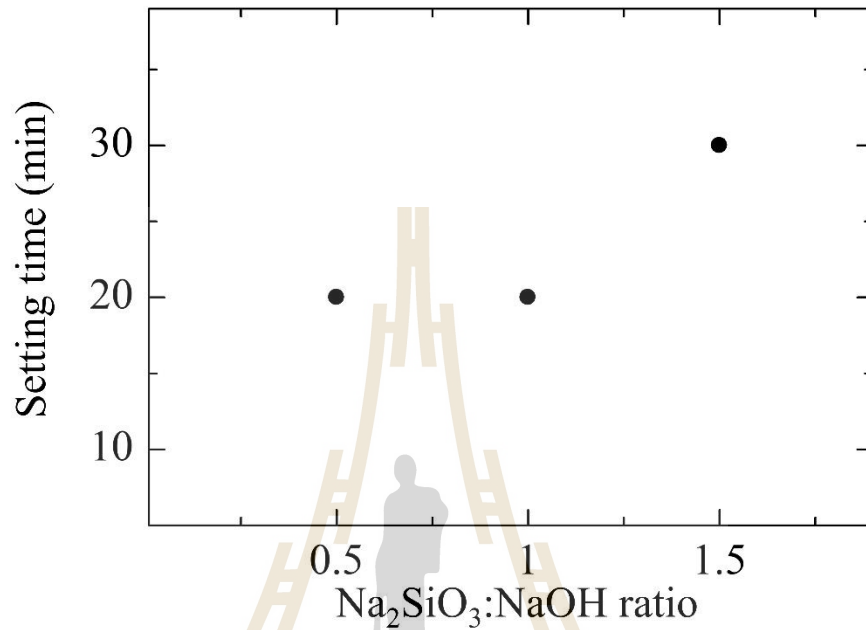
ในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์มีบทบาทในการละลาย (Dissolvent) ไอออนของอะลูมิเนียมและซิลิกอนออกจากสารตั้งต้น (ดินดานเหนียว) ในขณะที่โซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่เป็นตัวยึด (Binder) ไอออนของอะลูมิเนียมและไอออนของซิลิกอนเข้าด้วยกัน ดังนั้นเพื่อให้ได้จีโอพอลิเมอร์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด ส่วนที่เหมาะสมระหว่างตัวละลายและตัวยึดจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญ จากผลการทดลองพบว่าสัดส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 นั้นเป็นสัดส่วนที่ส่งผลให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนที่มีค่าเป็น 0.5 (มีการละลายของไอออนมากแต่มีตัวยึดน้อย) และ 1.5 (มีการละลายของไอออนน้อยแต่มีตัวยึดมาก) ด้วยการใช้อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.5 ส่งผลให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงเฉลี่ย 25 MPa ซึ่งมีความสูงกว่าความแข็งแรงขั้นต่ำของปูนซีเมนต์ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 19 MPa หลังการบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4.11 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน

อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลโดยตรงต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มในการก่อตัวช้าลง (เวลาในการก่อตัวยาวขึ้น) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ

โซเดียมซิลิเกตซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวยึดไอออนของอะลูมิเนียมและซิลิกอนเข้าด้วยกันนั้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของไอออนดังกล่าวเกิดได้ยากขึ้น เป็นผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จากดินดานเกวียน วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้มีความแข็งแรงสูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดขั้นต่ำของปูนซีเมนต์ หลังการบ่ม 7 วัน

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ามีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์อันได้แก่ สภาพการเผาแคลไซน์ดินดานเกวียน ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต โดยสามารถสรุปผลของตัวแปรต่างๆ ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ได้ดังนี้

##### 5.1.1 สภาพการเผาแคลไซน์ดินดานเกวียน

ด้วยการใช้สภาวะในการเผาแคลไซน์ที่เหมาะสม ดินดานเกวียนสามารถพัฒนาเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ สภาพการเผาแคลไซน์ดินดานเกวียนที่ทำให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) สูงสุดคือการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง การเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสจะทำให้ได้จีโอพอลิเมอร์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เนื่องจากดินดานเกวียนที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันได้ดีกว่าและส่งผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์สั้นกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

##### 5.1.2 สภาวะการบ่มต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

อุณหภูมิการบ่มส่งผลโดยตรงต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ ด้วยการบ่มที่อุณหภูมิห้องวัสดุจีโอพอลิเมอร์ไม่ห้กำลังรับแรงอัดหลังจากบ่มเป็นเวลา 7 วัน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากปราศจากการกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนจากภายนอก วัสดุจีโอพอลิเมอร์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดหลังบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิการบ่มที่สูงเกินไปส่งผลให้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เกิดรอยร้าวหลังการบ่ม ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ลดลงอย่างมีนัยยะหลังบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

### 5.1.3 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่สลายโครงสร้างเดิมของดินดานเหนียวให้เป็นไอออนของอะลูมิเนียมและซิลิกอน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักสำหรับปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นสูงจึงทำให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้นและส่งผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์สั้นกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ

### 5.1.4 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์เกิดจากระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ในการละลายไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมออกจากดินดานเหนียว ในขณะที่โซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานไอออนดังกล่าว สัดส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลโดยตรงต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ สัดส่วนที่ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ 0.5 เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้จากผลงานวิจัยชิ้นนี้มีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์และผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างบางชนิด เช่น อิฐก่อสร้าง ฝ้าเพดาน ฝ้าผนัง หรือวัสดุทดแทนไม้ ดังนั้นหากมีการต่อยอดงานวิจัยชิ้นนี้โดยการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินดานเหนียวไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานก่อสร้างชนิดต่างๆ จะเป็นการพัฒนาองค์ความรู้จนสามารถนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้

## รายการอ้างอิง

- กิตติพงษ์ สุตรสุคนธ์ (2007). การใช้ดินตะกอนจากน้ำประปาเพื่อเป็นส่วนผสมในการผลิตกระเบื้องหลังคาดินซีเมนต์. **วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.**
- ซัชพันธ์ ชาตี (2007). การพัฒนาอิฐดินซีเมนต์โดยใช้ดินตะกอนน้ำประปาจังหวัดหนองคายเป็นส่วนผสม. **วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี.**
- ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี (2011). การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21[2]: 257-265.**
- เด่น รักซ้อน, ญัฐนันต์ สิปปภากุล และ วชิรินทร์ แซ่เตีย, “การพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีเนื้อดินและการเคลือบ เครื่องปั้นดินเผาต้านเคียวิน แก้วผู้ประกอบอาชีพเครื่องปั้นดินเผาชุมชนด่านเคียวินจังหวัดนครราชสีมา,” **รายงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, นครราชสีมา (2553).**
- ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005). การศึกษาเบื้องต้นของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยแม่เกาะคัดขนาด. **การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ 1: 111-114.**
- ธีรพร ภู่มาลา, บุญฤกษ์ เกரியวิทยากุล, อนันต์ มิตรประสิทธิ์, สนธยา กิจภคพาณิชย์, ญัฐภูมิ ปุ้ยพันธวงศ์, อภิวัฒน์ นกเกษม, ปฐมทัศน์ โพธิ์เงิน (2010). การบริหารจัดการน้ำเพื่อการประปาของการประปานครหลวง, **โครงการปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.**
- วีระยุทธ์ ลอประยูรี, “การศึกษาผลของวัตถุดิบและส่วนผสมต่ออัตราการขึ้นรูปโดยวิธี Slip Casting ในอุตสาหกรรมเซรามิก,” **รายงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา (2543).**
- เพิ่มพล กาญจนามัย (2003). การใช้ดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง. **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.**
- ภาณุ ศิริพงษ์ไพโรจน์ (2007), ผลของการพัฒนาดินตะกอนประปาที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและรูปแบบเครื่องปั้นดินเผา. **วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**

- ภาคภูมิ กลั่นไพบรี (2008). การปรับปรุงคุณภาพอิฐดินซีเมนต์ที่ผสมดินตะกอนประปาด้วยดินลูกรังและทราย. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วินัย ชัยเพชร (2009). การศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินซีเมนต์ที่ใช้ดินตะกอนประปาผสมกับดินเหนียว. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุธรรม ศรีหล่มสัก, “การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำซีเมนต์อายุคาลิปต์สมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก,” รายงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา (2543).
- สุธรรม ศรีหล่มสัก, อ่อนลมี กมลอินทร์ และ จิตติ รินเสนา, “การวิจัยและพัฒนาส่วนผสมและเคลือบอุณหภูมิสำหรับอุตสาหกรรมสโตนแวร์ (เนื้อดินปั้นสำหรับเครื่องปั้นดินเผาต้านความร้อน),” รายงานวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์, สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา (2550).
- สุภิญญา สอนง่าย (2552). ผลกระทบของดินตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาต่อการสะสมธาตุอาหารพืชของสบู่ดำ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005). การศึกษาสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินขาวเผา. การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ. 1: 153-161.
- อนุรักษ์ จินตนาพันธ์ (2008). การพัฒนากระเบื้องดินซีเมนต์ที่ใช้ดินตะกอนประปาจังหวัดขอนแก่น. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Abhilash S., Singh C.K., and Sharma A.K. (2011). Study of the properties of concrete by partial replacement of ordinary Portland cement by rice husk ash, **International Journal of Earth Sciences and Engineering** 4[6]: 965-968.
- American Society for Testing and Materials, 2011. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM C618, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2012. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM C109 C109M, Philadelphia, United States of America.



- American Society for Testing and Materials, 2013a. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM C138 C138M, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2013. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic- Cement Paste by Gillmore Needles. ASTM C266, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2014. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM D854, Philadelphia, United States of America.
- Ambroise J., Maximilien S., and Pear J. (1994). Properties of metakaolin blended cements. **Advanced Cement Based Materials**. 1: 161–168.
- Amin N.U., Faisal M., Muhammad K., Gul S. (2016). Synthesis and characterization of geopolymer from bagasse bottom ash, waste of sugar industries and naturally available china clay. **Journal of Cleaner Production**. 129: 491-495.
- Anwar N., Nimityongskul P., and Austriaco L.R. (2007). Thailand development and applications of cementitious composites, **CBM-CI International Workshop, Karachi, Pakistan**. 295-303.
- Autef A., Joussein E., Gasgnier G. and Rossignol S., “Role of the silica source on the geopolymerization rate,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358, 2886–2893 (2012).
- Badogiannis E., Kakali G., and Tsvilis S. (2005). Metakaolin as supplementary cementitious material, Optimization of kaolin to metakaolin conversion. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. 81: 457–462.
- Balczar I., Korim T., and Dobradi A. (2015). Correlation of strength to apparent porosity of geopolymers-Understanding through variations of setting time, **Construction and Building Materials**. 93: 983–988.

- Bhowmick A., and Ghosh S. (2012). Effect of synthesizing parameters on workability and compressive strength of Fly ash based Geopolymer mortar. **International Journal of Civil and Structural Engineering**. 3 [1]: 168-177.
- Brown P.W. (1990). The system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ . **Journal of the American Ceramic Society**, 73, 3457–3561.
- Burciaga-Diaz O., Escalante-Garcia J. I. and Gorokhovskiy A., “Geopolymers based on a coarse low-purity kaolin mineral: Mechanical strength as a function of the chemical composition and temperature,” **Cement & Concrete Composites**, 34, 18–24 (2012).
- Carlos F.R., Sagraario R.M., and Terasa B.V.M. (2006). Modeling of slakes lime-metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables, **Cement and Concrete Composites**. 28: 458-467.
- Chen Z., Liu Y., Zhu W., and Yang E.H. (2016). Incinerator bottom ash (IBA) aerated geopolymer. **Construction and Building Materials**. 112: 1025-1031.
- Cheng T.W., and Chiu J.P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. **Minerals Engineering**. 16: 205-210.
- Chiang K.Y., Chou P.H., Hua C.R., Chien K.L., and Cheeseman C. (2009). Light weight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. **Journal of Hazardous Materials**. 171: 76–82.
- Chindaprasirt P., Silva P. D., Crentsil K. S., and Hanjitsuwan S. (2012). Effect of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. **Journal of Material Science**. 47: 4876-4883.
- Chindaprasirt P., Rattanasak U., Chalee W. (2005). A Study of Leaching of Lignite Fly Ash in Sodium Hydroxide Solution. **การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ 1**: 7-11.

- Comrie D.C., and Davidovits J. (1988). Long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals. **Geopolymer '88 First European Conference on Soft Mineralurgy**. 1: 125-134.
- Comrie D.C., Paterson J.H., and Ritchey D.J. (1988). Geopolymer technologies in toxic waste management, **First European Conference on Soft Mineralurgy Geopolymer '88**.
- Crop Prospects and food situation (2012). **Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)**, Rome, Greek.
- Cyr M., Idir R., and Poinot T. (2012). Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. **Journal of Material Science**. 47: 2782–2797.
- Davidovits J. (1987). Ancient and modern concretes: what is the real difference?. **Concrete International**. 9[12]: 23-35.
- Davidovits J., and Davidovics M. (1988a). Geopolymer room temperature ceramic matrix for composites, **Ceramic Engineering and Science Proceedings**. 9: 835-842.
- Davidovits J. (1988b). Geopolymer chemistry and properties, **Geopolymer '88 First European Conference on Soft Mineralurgy**. 1: 25-48.
- Davidovits J. (1988c). Geopolymers of the first generation: SILIFACE- process. **Geopolymer '88 First European Conference on Soft Mineralurgy**. 1: 49-67.
- Davidovits J. (1988d). Soft Mineralurgy and Geopolymers. **Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer '88**. 1: 19–23.
- Davidovits J., Comrie D.C., Paterson J.H., and Ritcey D.J. (1990). Geopolymeric concretes for environmental protection. **Concrete International**. 12[7]: 30-40.
- Davidovits J., and Davidovics M. (1991). Geopolymer: Ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites, **36th International SAMPE Symposium** 36: 1939-1949.
- Davidovits J. (1994a). Properties of geopolymer cements. **First International Conference on Alkaline Cements and Concretes**. 1: 131-149

- Davidovits J. (1994b). Geopolymer: Inorganic polymeric new materials, **Journal of Materials Education** 16: 91-139.
- Davidovits J., Davidovics M., and Davidovits N. (1994c), Processing for obtaining a geopolymeric aluminosilicate and products thus obtained. **U.S. Patent no. 5: 342-595.**
- Davidovits J. (1994d). High-Alkali Cements for 21st Century Concretes, Past, Present and Future. **University of California, Berkeley.**
- Davidovits J. (1999). Chemistry of Geopolymeric system, terminology. **Proceedings of the 2nd International Conference on Geopolymer '99.** 1: 9–40.
- Davidovits J. (2005). Geopolymer chemistry and sustainable Development. The Poly(sialate) terminology : a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry. **Proceedings of the World Congress Geopolymer.** 9–15.
- Duxson P., Fernández-Jiménez A., J. Provis L., Lukey G. C., Palomo A. and Deventer J. S. J. van (2007). Geopolymers technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science.** 42: 2917-2933.
- Elimbi A., Tchakoute H. K. and Njopwouo D. (2011)., “Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements,” **Construction and Building Materials**, 25, 2805–2812.
- Ganesan K., Rajagopal K., and Thangavelu K. (2007). Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete, **Construction and Building Materials** 22: 1675-1683.
- Gastaldini A.L.G., Isaia G.C., Gomes N.S., and Sperb J.E.K. (2007). Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators. **Cement and Concrete Composites.** 29: 176–180.

- Glukhovskiy V.D. (1989). Some Aspects of Admixtures and Industrial By-Products on the Durability of Concrete. **Proceedings of the 2nd International Seminar**. 2: 59-62.
- Granizo M.L., and Blanco M.T. (1998). Alkaline activation of metakaolin – An isothermal conduction calorimetry study. **Journal of Thermal Analysis**. 52: 957–965.
- Granizo M.L., Blanco-Varela M.T., and Martínez-Ramírez S. (2007). Alkali activation of metakaolins: Parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties. **Journal of Materials Science**. 42: 2934–2943.
- Gualtieri M.L., Cavallini A., and Romagnoli M. (2016). Interactive powder mixture concept for the preparation of geopolymers with fine porosity, **Journal of the European Ceramic Society**. 36: 2641–2646.
- Hardjito D. and Rangan B.V. (2005). Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash- based Geopolymer Concrete. **Research Report GC1**, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, available at [espace@curtin](mailto:espace@curtin).
- Habeeb G.A., and Mahmud H.B. (2010). Study on Properties of rice husk ash and its use as cement replacement material. **Materials Research**. 13[2]: 185-190.
- He J., Jie Y., Zhang J., Yu Y., and Zhang G. (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash. **Cement & Concrete Composites**. 37: 108–118.
- Heaha C. Y., Kamarudina H., Bakria A. M. M. A., Binhussainb M., Luqmana M., Nizarc I. K., Ruzaidia C. M. and Liewa Y. M. (2011). “Effect of Curing Profile on Kaolin-based Geopolymers,” **Physics Procedia**, 22, 305–311.
- Horpibulsuk S., Suksiripattanapong C., Samingthong W., Rachan R., and Arulrajah A. (2015). Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymer and water treatment sludge-cement and silty clay-cement systems. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 28[1]: ISSN 1943-5533.

- Ismail M.S., and Waliuddin A.M. (1996). Effect of rice husk ash on high strength concrete. **Construction and Building Material**. 10(7): 521–526.
- Kannan V., and Ganesan K. (2014). Chloride and chemical resistance of self-compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials** 51: 225-234.
- Khan R., Jabbar A., Ahmad I., Khan W., Khan A. N., and Mirza J. (2012). Reduction in environmental problems using rice husk ash in concrete. **Construction and Building Materials**. 30: 360-365.
- Komnitsas K., and Zaharaki D. (2007). Geopolymerization: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**. 20: 1261-1277.
- Kostuch J.A., Walters G.V., and Jones T.R. (1993). High performance concrete containing metakaolin- A review. **Proceedings of the Concrete 2000 International Conference on Economic and Durable Concrete Through Excellence**. 2: 1799–1811.
- Krishnarao R.V., and Mahajan Y.R. (1996). Formation of SiC whiskers from raw rice husks in argon atmosphere. **Ceramic International**. 22(5): 353–358.
- Kua T.A., Arulrajah A., Horpibulsuk S., Duc Y.J., Shen S.L. (2016). Strength assessment of spent coffee grounds-geopolymer cement. **Construction and Building Materials**. 115: 565–575.
- Kyncl M. (2008). Opportunity for water treatment sludge re- use. **GeoScience Engineering** 54[1]: 11-22.
- Ikpong A. A., and Okpala D.C. (1992). Strength characteristics of medium workability ordinary Portland cement-rice husk ash concrete. **Building and Environment**. 27(1): 105–111
- Langton C.A., Roy D.A. (1984). Longevity of borehole and shaft sealing materials: Characterisation of ancient cement- based building materials, **Materials Research Society**. 26; 543-549.

- Malone P.G., Kirkpatrick T., and Randall C.A. (1986). Potential applications of alkali-activated aluminosilicate binders in military operations. **Report WES/MP/GL-85-15.**
- MacKenzie K.J.D., Brown I.W.M., Meinhold R.H., and Bowden M.E. (1985). Outstanding problems in the kaolinite-mullite reaction sequence investigated by  $^{29}\text{Si}$  and  $^{27}\text{Al}$  solid-state nuclear magnetic resonance: I. Metakaolinite. *Journal of the American Ceramic Society.* 68: 293–297.
- Mackenzie K.J.D., and Welter M. (2014). Geopolymers (aluminosilicate) composites synthesis, properties and applications, Woodhead Publishing Limited, Victoria University of Wellington, New Zealand. 445-470
- Medri V., and Ruffini A. (2012). Alkali-bonded SiC based foams. *Journal of the European Ceramic Society.* 32: 1907–1913.
- Mo K.H., Alengaram U.J., and Jumaat M.Z. (2016). Structural performance of reinforced geopolymer concrete member : a review. *Construction and Building Materials.* 120: 251-264.
- Nagrata S.D., Hajare H., and Modak P.R. (2012). Utilization of rice husk ash. **International Journal of Engineering Research and Application.** 2: 1-5.
- Nimwinya E., Arjhan W., Horpibulsuk S., Phoo-ngernkham T., and Poowancum A. (2016). A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer. **Journal of Cleaner Production.** 119: 128-134.
- Omatola K.M., and Onojah A.D. (2009). Elemental analysis of rice husk ash using X-ray fluorescence technique. **International Journal of Physical Sciences.** 4[4]: 189-193.
- Onutai S., Jiemsirilars S., Thavorniti P., and Kobayashi T. (2016). Fast microwave syntheses of fly ash based porous geopolymers in the presence of high alkali concentration. *Ceramic International.* 42: 9866-9874.

- Owens P. (1999). Pulverized Fuel Ash Part 1: Origin and Properties. **Current Practice**. 116: 27.
- Palomo A., Marcias A., Blanco M.T., and Puertas F. (1992). Physical, chemical and mechanical characterisation of geopolymers. **Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement**. 9: 505-511.
- Pangdaeng S., Phoo-ngernkham T., Sata V., and Chindaprasirt P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials & Design*. 53: 269-274.
- Pontikes Y., Machiels L., Onisei S., Pandelaers L., Geysen D., Jones P.T., and Blanpain B. (2013). Slags with a high Al and Fe content as precursors for inorganic polymers. **Applied Clay Science**. 73: 93-102.
- Poowancum A., Nimwinya E., and Horpibulsuk S. (2015). Development of Room Temperature Curing Geopolymer from Calcined Water-Treatment-Sludge and Rice Husk Ash. **Calcined Clay for Sustainable Concrete 1**; 291-297.
- Provis J.L., and Van-Deventer J. S. J. (2009). Introduction to geopolymers. *Geopolymers structure processing properties and industrial applications*. 1-11.
- Provis J.L. (2014). Geopolymers and other alkali activated materials why how and what, *Materials and Structures*. 47: 11–25.
- Ranjbar N., Mehrali M., Mehrali M., Alengalam U.J., and Jumaat M.Z. (2016). High tensile strength fly ash based geopolymer using copper coated micro steel fiber. **Construction and Building Materials**. 112: 629-638.
- Ramezaniapour A.A. (2014). Rice husk ash. **Cement replacement materials**. 257-298.
- Rashad A.M. (2013). Alkali-activated metakaolin: a short guide for civil engineer – an overview. **Construction and Building Materials**. 41: 751-765.
- Rattanasak U., and Chindaprasirt P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*. 22: 1073-1078.
- Rattanachan S. (2007), “Dan Kwian Clays for Slip Casting,” *Science Asia*, 33, 239-43.



- Rodriguez N.H., Ramirez S.M., Varela M.T.B., Guillem M., Puig J., Larrotcha E., and Flores J. (2010). Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. **Cement and Concrete Research** 40: 778–786.
- Rocha J., and Klinowski J. (1990). Solid-state NMR studies of the structure and reactivity of metakaolinite. *Angewandte Chemie International Edition, English*. 29: 553–554.
- Rocha J., Adams J.M., and Klinowski J. (1990). The rehydration of metakaolinite to kaolinite: Evidence from solid-state NMR and cognate techniques. *Journal of Solid State Chemistry*. 89: 260–274.
- Rovnanik P. (2010). Effects of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**. 24: 1176-1183.
- Rukzon S., and Chindaprasirt P. (2010). Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness. *Journal of Material Civil Engineering*. 22[3]: 253-259.
- Runttia H., Luukkonenb T., Niskanena M., Tuomikoskia S., and Kangasa T. (2016). Sulphate removal over barium- modified blast-furnace-slag geopolymer. **Journal of Hazardous Materials**. 317: 373–384.
- Safiuddin M.D., and West J.S. (2010). Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash, **Cement and Concrete Composites** 32: 708-717.
- Sangsuk S., Khunthon S., and Nilpairach S. (2010). Nano-Porous pottery using calcined waste sediment from tap water production as an additive. *Journal of Waste Management & Research*. 28: 908-912.
- Saraswathy V., and Song H. (2007). Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Material**. 21(8): 1779–1784

- Silva P.D., and Sagoe-Crentsil K. (2008). The effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> on setting and hardening 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. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 44: 39-46.
- Singh B., Gupta I. G. M., and Bhattacharyya S.K. (2015). Geopolymer concrete A review of some developments. *Construction and Building Materials*. 85: 78-90.
- Smith J.W., and Comrie D.C. (1988). Geopolymeric building materials in third world countries. *Proceedings of the 1st International Conference Geopolymer '88*. 1: 89-92.
- Songpiriyakij S. (2005). Effect of Temperature on Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer mortar. การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ 1: 83-87.
- 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: 236-240.
- Srilomsak S., Wonginjun M., Kanjanasin M., Ahosi R., Sittisue R., Thongkan R., Udon L., and Thaitong W. (2006). "Celadon Glaze on Dan Kwian Pottery,"(in Thai) *Suranaree Journal of Science and Technology*, 13 [2] 197-205.
- Sua-iam G., and Makul N. (2014). Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal fly ash and rice husk ash in self-consolidating concrete. *Journal of Cleaner Production*. 78: 184-194.
- Sugita S. (1993). On the Economical Production of Large Quantities of Highly Reactive Rice Husk Ash. *International Symposium on Innovative World of Concrete*. 2: 3-71.
- Suksiripattanapong C., Horpibulsuk S., Boongrasan S., Udomchai A., Chinkulkijniwat A., Arulrajah A. (2015). Unit weight, strength and microstructure of water treatment sludge- fly ash geopolymer lightweight cellular geopolymer. *Construction and Building Materials*. 94: 807-816.
- Vail J.G. (1952). *Soluble Silicates: Their Properties and Uses*, New York, Reinhold.

- Van-Jaarsveld J.G.S., Van-Deventer J.S.J., Lorenzer L. (1995). Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized fly ash. University of Stellenbosch Research Report.
- Van-Jaarsveld J.G.S., and Van-Deventer J.S.J. (1996). The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metal. *Minerals Engineering*. 10[7]: 659-669.
- Waijarean N., Asavapisit S., and Sombatsompop K. (2014). Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals. *Construction and Building Materials*. 50: 486-491.
- Wallah S.E., and Rangan B.V. (2006). Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long- term properties. **Research Report GC2, Curtin University of Technology**. 14.
- Wang M. R., Jia D. C., He P. G. and Zhou Y. (2010). "Influence of calcination temperature of kaolin on the structure and properties of final geopolymer," *Materials Letters*, 64, 2551–2554.
- Xie J., Yin J., Chen J., Xu J. (2009). Study on the geopolymer based on fly ash and slag. **Proceeding of 2009 International Conference on Energy**.
- Xu H., and Van Deventer J. S. J. (2000). The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*. 59[3]: 247–266.
- Yun Leong H. (2016). Suitability of Sarawak and Gladstone fly ash to produce geopolymer A physical, chemical, mechanical, mineralogical and microstructural analysis. *Ceramics International*. 42: 9613-9620.
- Yunsheng Z., Wei S. and Zongjin L. (2010). "Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement," *Applied Clay Science*, 47, 271–275.
- Zhang Z., Wang H., Yao X. and Zhu Y. (2012). "Effects of halloysite in kaolin on the formation and properties of geopolymers," *Cement & Concrete Composites*, 34, 709-715.

Zibouche F., Kerdjoudj H., d'Espinose de Lacaillerie J. B. and Damme H. V. (2009).  
“Geopolymers from Algerian metakaolin. Influence of secondary minerals,”  
Applied Clay Science, 43, 453–458.





## ประวัติผู้วิจัย

### ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรัตน์ ภูวานคำ

- การศึกษา/คุณวุฒิ : ปริญญาเอก : Doctor of Engineering  
(Material Science and Engineering)  
Nagaoka University of Technology, Japan  
ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2011
- ปริญญาโท : Master of Engineering (Ceramic Engineering),  
Suranaree University of Technology, Thailand  
ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2006
- ปริญญาตรี : Bachelor of Engineering (Ceramic Engineering),  
Suranaree University of Technology, Thailand  
ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2002
- ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก
- ประวัติการทำงาน : 2002-2003 Assistant Chief, Research and Development Division  
Standard Insulator Co., Ltd., Thailand  
2006-2011 Lecturer, Faculty of Industrial Technology, Valaya  
Alongkorn Rajabhat University, Thailand  
2011-Present Lecturer, School of Ceramic Engineering, Institute of  
Engineering, Suranaree University of Technology

ผลงานทางวิชาการ / ผลงานวิจัย :

- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “Development of Low-Thermal-Expansion Silicon Carbide / Zirconium Tungstate Porous Ceramics”, Journal of American Ceramic Society, **93**[10], 2978-2980,(2010)
- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, Isaias Juarez Ramirez, Leticia M. Torres Martines, Zhengyi Fu, Soo Wahn Lee and Kozo Ishizaki, “Fabrication of Low Thermal Expansion SiC / ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub> Porous Ceramics”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **20**, 012010, (2010)
- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “Low-Temperature Glass Bonding for Development of Silicon Carbide / Zirconium Tungsten Oxide Porous Ceramics with Near Zero Thermal Expansion Coefficient”, Journal of American Ceramic Society, **94**[5], 1354-1356, (2011).
- Anurat Poowancum and Sukasem Watcharamaisakul, “Effect of Nano-oxide Addition on Mechanical Properties of Alumina-Mullite-Zirconia Composites” Advanced Materials Research Vol. 1102 (2015) pp 87-90
- Anurat Poowancum, Ekkasit Nimwinya and Suksun Horpibulsuk, “Development of Room Temperature Curing Geopolymer from Calcined Water-Treatment-Sludge and Rice Husk Ash”, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Springer, London, (2015).
- Anurat Poowancum and Suksun Horpibulsuk, “Development of Low Cost Geopolymer from Calcined Sedimentary Clay”, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Springer, London, (2015).
- Anurat Poowancum, Development of Dan Kwian Clay for Use in Ceramic Tile Industry”, Suranaree Journal of Science and Technology, **22** [1], 15-20, (2015).
- Ekkasit Nimwinya, Weerachai Arjharn, Suksun Horpibulsuk, Tanakorn Phoo-ngernkham and Anurat Poowancum, “A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer”, Journal of Cleaner Production, **119**, 128-134, (2016).
- Jakrapong Kumsap, Anurat Poowancum and Anucha Wannagon, “Redox Effects of Erbium Oxide Doped Industrial Soda-Lime Glasses by UV-VIS-NIR Study”, Key Engineering Materials, **702**, 121-124 (2016).

- Nuttapon Phachan, Siriwan Chokkha and Anurat Poowancum, “A sustainable cement replacement material from a coal-fired power plant waste”, Proceedings of The Asian Conference on Sustainability, Energy & the Environment, Japan, (2017).

#### International Conferences:

- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “*Effects of Sintering Methods on Thermal Expansivity of SiC/ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub> Porous Materials*”, The CJK2009 Seminar and Summer Workshop, Jeju Island, Korea, 2009 (June 28 - July 3).
- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “*Fabrication of low thermal expansion SiC/ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub> porous ceramics*”, International Symposium on Multifunctional Ceramic Materials Based on Nanotechnology, Tokyo, Japan, 2010 (March 6-8).
- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “*Fabrication of Ultra Low Thermal Expansion SiC/ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub> Porous Ceramics*”, The Symposium on Hybrid Nano Materials Toward Future Industries, Nagaoka, Japan, 2010 (November 19-20).
- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “*Low-Temperature Vitrified Bonding for Near Zero Thermal Expanding SiC/ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub> Porous Ceramics*”, The CJK2011 Meeting, Niigata, Japan, 2011 (June 3–5).
- Anurat Poowancum, Ekkasit Nimwinya and Suksun Horpibulsuk, “*Development of Room Temperature Curing Geopolymer from Calcined Water-Treatment-Sludge and Rice Husk Ash*”, The 1<sup>st</sup> International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Lausanne, Switzerland, 2015 (June 23<sup>rd</sup> - 25<sup>th</sup>).
- Anurat Poowancum and Suksun Horpibulsuk, “*Development of Low Cost Geopolymer from Calcined Sedimentary Clay*”, The 1<sup>st</sup> International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Lausanne, Switzerland, 2015 (June 23<sup>rd</sup> - 25<sup>th</sup>).