



## KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

### วัสดุประสานจากการกระตุ้นด้วยด่าง/จีโอโพลิเมอร์ และการประยุกต์ใช้กับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม Alkali-activated binders/geopolymer and an application to environmental engineering

นิดา ชัยมูม<sup>1)</sup> และ กริสน์ ชัยมูม<sup>2)</sup>

Nida Chaimoon<sup>1)</sup> and Krit Chaimoon<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

Field of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham, Thailand, 44150.

<sup>2)</sup>สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham, Thailand, 44150.

Received April 2013

Accepted November 2013

#### บทคัดย่อ

ด้วยเหตุผลทางด้านสิ่งแวดล้อม วัสดุประสานชนิดใหม่ที่สามารถช่วยลดการใช้หรือทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ordinary Portland cement, OPC) กำลังเป็นที่ต้องการ วัสดุประสานจากการกระตุ้นด้วยด่าง (alkali-activated binders, AAB) และจีโอโพลิเมอร์ กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เพราะหลายงานวิจัยได้แสดงให้เห็นแล้วว่าวัสดุประสานใหม่ทั้งสองมีศักยภาพที่จะพัฒนาให้เป็นวัสดุทางเลือกแทน OPC ได้ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามยังคงมีความสับสนในการจำแนกวัสดุทั้งสอง บทความนี้นำเสนอความรู้ที่เกี่ยวข้องกับ AAB และจีโอโพลิเมอร์ โดยจะกล่าวถึง ประวัติความเป็นมาที่สำคัญ กลไกของปฏิกิริยา และผลผลิตจากปฏิกิริยา ส่วนที่คล้ายกันและแตกต่างกันของวัสดุทั้งสองจะถูกอภิปราย รวมทั้งการประยุกต์ใช้กับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมในการจัดการของเสียอันตรายด้วยการทำให้เสถียร/การทำให้แข็ง (waste stabilization/solidification)

**คำสำคัญ :** วัสดุประสานจากการกระตุ้นด้วยด่าง จีโอโพลิเมอร์ การทำให้เสถียร การทำให้แข็ง

#### Abstract

For environmental reason, new binders that can be used as Portland cement replacement materials are being needed. Recently, alkali-activated binders (AAB) and geopolymer have found increasing interest. As several research reports have showed that the two new binders are likely to have high potential to be developed and become an alternative to OPC. However, confusion in the classification of both binders is still there. This paper reviews knowledge about AAB and geopolymer including historical background, reaction mechanisms and reaction products. The similarities and differences of both binders are discussed. The application to environmental engineering on hazardous waste management using stabilization/solidification is also described.

**Keywords :** Alkali-activated binder, Geopolymer, Stabilization, Solidification

\*Corresponding author. Tel.: +66-4375-4316; fax: +66-4375-4316

Email address: k.chaimoon@msu.ac.th

## 1. บทนำ

หลายประเทศทั้งที่พัฒนาแล้วและกำลังพัฒนา กำลังหันมาใช้เทคโนโลยีที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง สำหรับอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ก็เป็นที่ยอมรับกันว่ามีความต้องการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland cement, OPC) [1] หรือต้องการวัสดุประสานชนิดใหม่ที่สามารถใช้แทน OPC [2] โดยที่มีความคงทนสูงขึ้นและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุผลเกี่ยวกับ ความ ต้องการ ลด การ ปล่ อ ย กั า ข คาร์บอนไดออกไซด์ (การผลิต OPC 1 ตัน จะเกิด CO<sub>2</sub> ประมาณ 1 ตัน) และความจริงที่กำลังเผชิญคือโครงสร้าง OPC ที่มีอายุเพียง 10-20 ปี เริ่มเกิดความเสียหาย ตัวอย่างเช่น ความเสียหายของเสาเข็มคอนกรีตที่ใช้งานได้เพียง 12 ปี อุโมงค์คอนกรีตในเมืองดูไบอายุเพียง 11 ปี ต้องซ่อมแซมทั้งหมด [3] นอกเหนือจากปัญหาความคงทนของคอนกรีต OPC ที่เกิดจากการร้าวและการบวมคอนกรีตที่ไม่ดีแล้ว สาเหตุที่แท้จริงอีกประการหนึ่งก็คือคุณสมบัติของตัววัสดุเอง การที่มีค่าการซึมผ่าน (Permeability) ที่ค่อนข้างสูง ทำให้น้ำและสารที่เป็นอันตรายซึมผ่านคอนกรีตได้ง่ายอันก่อให้เกิดปัญหาการสึกกร่อนและคาร์บอนชั่น และคอนกรีต OPC ก็มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่สูงซึ่งจะทำปฏิกิริยากับกรดทำให้เกิดสารประกอบที่ละลายน้ำได้

งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุประสานจากการกระตุ้นด้วยต่าง (Alkali-activated binders, AAB) และจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) แสดงให้เห็นว่าวัสดุประสานใหม่ทั้งสองมีศักยภาพที่จะพัฒนาให้เป็นวัสดุทางเลือกแทน OPC ได้ ค่อนข้างสูง และยังต้องการงานวิจัยอีกมากเพื่อให้เป็นวัสดุก่อสร้างที่เหมาะสมทั้งทางด้านเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ [4] โดยพื้นฐานวัสดุทั้งสองมีหลักการเดียวกันคือ วัสดุตั้งต้นถูกกระตุ้นด้วยสารละลายต่างทำให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามก็ยังคงไม่มีข้อตกลงที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปเกี่ยวกับการจำแนกวัสดุประสานสองประเภทนี้

บทความนี้นำเสนอความรู้ที่เกี่ยวข้องกับ AAB และจีโอโพลิเมอร์ โดยจะกล่าวถึง ประวัติความเป็นมาที่สำคัญ กลไกของปฏิกิริยา และผลิตผลจากปฏิกิริยา เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับวัสดุทั้งสองได้ดีขึ้นทั้งในส่วนของคล้ายกันและแตกต่างกัน รวมทั้งการประยุกต์ใช้กับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

## 2. ประวัติความเป็นมาที่สำคัญ

งานวิจัยของ Purdon ในช่วงทศวรรษ 1940 [5] มีส่วนสำคัญอย่างมากในการพัฒนา AAB ซึ่งใช้ตะกั่วเตาถลุง (Blast furnace slag, BFS) กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ Purdon อธิบายว่ากระบวนการเกิดขึ้นใน 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก เกิดการปลดปล่อย (Liberation) ของซิลิกอน อลูมิเนียม และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นจะเกิดการก่อตัว (Formation) ของซิลิกาและอลูมินาไฮดรต พร้อมกับเกิดการปฏิรูปของสารละลายต่าง (Regeneration of alkali solution) การค้นคว้าส่วนใหญ่เกี่ยวกับ AAB ใช้ BFS หรือที่รู้จักกันในชื่อ "alkali-slag cement" หรือ "alkali-activated slag cement" BFS เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก ที่มีส่วนผสมของแคลเซียมในปริมาณสูงเนื่องจากการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในกระบวนการเผา

Glukhovskiy et al. [6] ได้ทำการศึกษาค้นคว้าที่สำคัญเกี่ยวกับ AAB ที่ใช้ BFS คือ ระบุผลิตผลของปฏิกิริยาไฮดรชั่นว่าประกอบด้วย แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และ แคลเซียมและโซเดียมอลูมิโนซิลิเกตไฮดรต และได้สังเกตพบว่า แร่ดินเหนียวเมื่อถูกกระตุ้นด้วยต่างจะให้อลูมิเนียมซิลิเกตไฮดรต (ซีโอไลต์, zeolite) นอกจากนี้ยังได้จำแนกสารกระตุ้นที่เป็นต่างออกเป็น 6 กลุ่ม เมื่อ M เป็นอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์

- 1) อัลคาไลน์ (Alkalis), MOH
- 2) กรดเกลืออ่อน (Weak acid salts), M<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, M<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, M<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, MF
- 3) ซิลิเกต (Silicates), M<sub>2</sub>O·nSiO<sub>2</sub>
- 4) อลูมิเนต (Aluminates), M<sub>2</sub>O·nAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- 5) อลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates), M<sub>2</sub>O·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·(2-6)SiO<sub>2</sub>
- 6) กรดเกลือแก่ (Strong acid salts), M<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

การค้นคว้าเกี่ยวกับการกระตุ้นด้วยต่างได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อมีรายงานการวิจัยที่ถูกเผยแพร่โดย Davidovits [7] ผู้ซึ่งพัฒนาและจดลิขสิทธิ์วัสดุประสานที่ได้จากการกระตุ้นดินขาวเผา (Metakaolin) ด้วยต่าง และตั้งชื่อวัสดุประสานนี้ว่า จีโอโพลิเมอร์ สำหรับชื่อทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์ Davidovits ให้ชื่อว่า โพลีไฮอะเลตส์ (Polysialates) โดยที่ ไฮอะเลตส์ (Sialates) เป็นชื่อย่อสำหรับ อลูมิโนซิลิเกตออกไซด์ (Aluminosilicate oxide) Davidovits กล่าวว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นโพลิเมอร์ที่

เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic) และแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ จีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างคล้ายซีโอไลต์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นที่ประกอบด้วยโครงร่างโพลิเมอร์ของ Si-O-Al แต่ต่างจากซีโอไลต์คือมีโครงสร้างระดับจุลภาคเป็นแบบ ออสัญฐาน (Amorphous) [8]

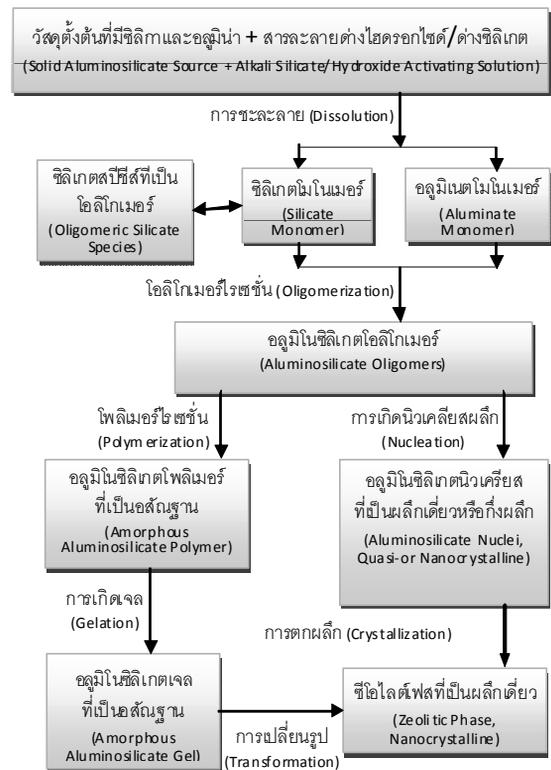
**3. กลไกของปฏิกิริยา**

กลไกจริงๆ ของปฏิกิริยาซึ่งอธิบายการก่อตัวและการแข็งตัวของ AAB ยังคงไม่แน่ชัด แม้ว่าจะเป็นที่เข้าใจว่ามันขึ้นกับวัสดุตั้งต้นและสารกระตุ้นต่าง Glukhovskiy et al. [6] อธิบายไว้ว่ากลไกของการกระตุ้นด้วยต่างเป็นปฏิกิริยาร่วมของการแยกตัวและการควบแน่น (Destruction-condensation) ซึ่งประกอบด้วยการแยกตัวของวัสดุตั้งต้นเป็นหน่วยโครงสร้างที่มีเสถียรภาพต่ำในรูปของเฟสคอลลอยด์ (Colloid phase) การปฏิสัมพันธ์กันกับโครงสร้างที่แข็งตัว (Coagulation structure) และการเกิดของโครงสร้างที่ควบแน่น นักวิจัยหลายคนก็เห็นด้วยว่ากลไกดังกล่าวนี้ชี้ให้เห็นถึงสถานะเริ่มต้นของการชะละลาย (Dissolution) ของซิลิกา ตามด้วยสถานะของการเคลื่อนย้าย (Transportation) และการควบแน่น (Polycondensation) [9-10] อย่างไรก็ตามสถานะต่างๆ เกิดขึ้นเกือบจะพร้อมๆ กัน ทำให้ยากแก่การวิเคราะห์ในแต่ละสถานะแยกกัน [11]

ตามรายงานของ Palomo et al. [11] แบบจำลองของการกระตุ้นด้วยต่างอาจแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ กรณีที่ใช้วัสดุตั้งต้นที่มีซิลิกอนและแคลเซียมสูง (Si + Ca) เช่น BFS กับสารละลายต่างปานกลาง ซึ่งจะมี CSH เป็นผลิตภัณฑ์หลัก และกรณีที่ใช้วัสดุตั้งต้นที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมสูง (Si + Al) เช่น ดินขาวเผา กับสารละลายต่างปานกลางถึงต่างสูง มีผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นโพลิเมอร์และมีกำลังสูง ซึ่งคล้ายกับกระบวนการเกิดซีโอไลต์ (Zeolite formation process) ซึ่งแบบหลังก็คือจีโอโพลิเมอร์ตามที่เรียกโดย Davidovits [7] นั่นเอง นอกจากนี้ Palomo et al. [11] ยังพบว่า ความเข้มข้นของสปีชีส์ที่ละลายสามารถถูกทำให้เพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มซิลิกेटที่ละลายน้ำได้ (Soluble silicate) เข้าไปในส่วนผสมซึ่งจะไปช่วยเร่งการชะละลายและทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น และปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังทางกลคือ อุณหภูมิในการบ่มและชนิดของสารกระตุ้น

ตามที่รายงานโดย Jaarsveld et al. [12] การเกิดจีโอโพลิเมอร์มีกระบวนการเหมือนกับกระบวนการเกิดของ

ซีโอไลต์ คือ ก) การชะละลายเนื่องจากไอออนไฮดรอกไซด์ (OH<sup>-</sup>) ข) การจัดเรียงตัว (Orientation) ของ สปีชีส์ที่ละลาย (Dissolved species) ค) การควบแน่น (Condensation) และการแข็งตัว (hardening) ของโครงสร้างในระบบโพลิเมอร์อนินทรีย์ (Inorganic polymeric system) Xu and Deventer [13] พบว่า อัตราส่วนโมลของซิลิกอนต่ออลูมิเนียม (Si/Al molar ratio) ในเฟสเจล (Gel phase) และความเข้มข้นของวัสดุตั้งต้นเป็นปัจจัยหลักที่กระทบต่อจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) Xu et al. [14] รายงานว่า ระหว่างกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน น้ำทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวทำปฏิกิริยา (Reagent) ชนิดหนึ่งและเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการ โดยในสภาวะการชะละลายจะใช้น้ำ แต่กระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันจะคายน้ำออกมา Provis et al. [15] ได้เสนอแบบจำลองอย่างง่ายของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของดินขาวเผา ดังแสดงในรูปที่ 1

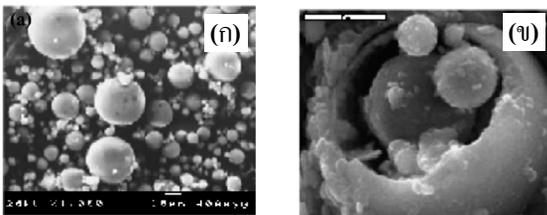


หมายเหตุ: โมโนเมอร์ คือ หน่วยเล็ก (โมเลกุล) ของโพลิเมอร์  
โอลิโกเมอร์ คือ โมเลกุลที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์จำนวนหนึ่ง แต่ยังไม่เป็นโพลิเมอร์

**รูปที่ 1** แบบจำลองอย่างง่ายของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน [15]

Deventer et al. [16] แนะนำว่า รูปที่ 1 ก็อาจสามารถใช้อธิบายจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชันของวัสดุตั้งต้นอื่นที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักได้ นอกจากนี้พวกเขายังได้อธิบายอิทธิพลของแคลเซียมออกไซด์ต่อจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชันของเถ้าลอยว่าไอออนของแคลเซียมจะเป็นนิวเคลียสผลึกอีกตัวนอกเหนือจากไอออนของซิลิกอนและอลูมิเนียม

ตามที่รายงานโดย Fernandez-Jimenez et al. [17] เถ้าลอยซึ่งมี ซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักเมื่อถูกผสมกับสารละลายต่างจะเกิดการชะละลายของซิลิกอนและอลูมิเนียม จนขึ้นควบแน่นเป็นเจลด้วยกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันและการเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation) และต่างจะกีดกันอนุภาคทรงกลมภายนอกของเถ้าลอยสู่อนุภาคทรงกลมที่อยู่ภายใน ซึ่งจะเกิดการชะละลายเช่นกันจนหมด ทำให้ได้ผลผลิตของปฏิกิริยาทั้งภายในและภายนอกอนุภาคของเถ้าลอย ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าลอย (ก) ก่อนทำปฏิกิริยา (ข) หลังทำปฏิกิริยากับ NaOH [18]

Criado et al. [19] รายงานว่า การกระตุ้นเถ้าลอยด้วยต่างเป็นกระบวนการที่แตกต่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมาก แต่คล้ายคลึงกับการเกิดซีโอไลต์ชนิดต่างๆ ที่มีอลูมิเนียมซิลิเกตที่เป็นต่างเป็นผลผลิตหลัก ซึ่งเป็นสารประกอบโคออดิเนชันทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral coordination) ของซิลิกาและอลูมิเนียมแบบห่วงโซ่โพลิเมอร์ (Polymeric chain) ที่มี  $Al^{3+}$  แทนที่  $Si^{4+}$  โดยที่ประจุไฟฟ้าลบถูกชดเชยด้วยไอออนบวกที่เป็นต่าง (Alkali cation) ระหว่างที่วัสดุตั้งต้นที่มีซิลิกาและอลูมินาถูกสารละลายต่างกัด สภาวะเริ่มต้นของการเกิดนิวเคลียสผลึกจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันกับการชะละลาย เมื่อนิวเคลียสมีขนาดใหญ่พอมันจะเริ่มกลายเป็นผลึก (Crystalline) แต่เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต้องใช้เวลาานานกว่าจะเสร็จสมบูรณ์

#### 4. ผลิตผลจากปฏิกิริยา

เมื่อก้าวถึงผลิตผลสุดท้ายจากปฏิกิริยา นักวิจัยหลายท่านรายงานผลการศึกษาค้นคว้าแตกต่างกันตามวัสดุตั้งต้นที่ใช้ Shi et al. [20] ศึกษาการกระตุ้น BFS ด้วยต่างได้สังเกตพบ CSH และ โซนอทไลต์ (Xonotlite) และ Wang and Scrivener [21] ได้ยืนยันว่า เจล CSH เป็นผลิตผลหลักของการกระตุ้น BFS ด้วยต่าง นอกจากนั้นยังพบการเกิดของไฮโดรแทลไซต์ (Hydrotalcite,  $Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16} \cdot 4H_2O$ ) ด้วย ไม่ว่าสารละลายต่างจะมีเพียงโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือผสมกับโซเดียมซิลิเกต แต่พวกเขาไม่พบเฟสซีโอไลต์ มีบางงานวิจัยก็รายงานว่าไม่พบสารประกอบไฮเดรตของโซเดียมหรือซีโอไลต์ แต่กล่าวว่า เป็นไปได้อย่างมากที่โซเดียมอาจจะอยู่ในเจล CSH ซึ่ง Hong and Glasser [22] ถึงกับแสดงให้เห็นว่าปริมาณของโซเดียมภายในเฟส CSH (CSH phase) เพิ่มขึ้นพร้อมกับการลดลงของอัตราส่วนแคลเซียมต่อโซเดียม และถ้าปริมาณของโซเดียมภายในเจล CSH สูงพอ เจลนั้นก็ถูกตั้งชื่อว่า NCSH

Criado et al. [19] ซึ่งศึกษาการกระตุ้นเถ้าลอยด้วยต่าง ได้ตรวจผลิตผลจากโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD พบว่าประกอบด้วย ไฮดรอกซีโซดาไลต์ (Hydroxisodalite,  $Na_4Al_3Si_3O_{12}OH$ ) และ เฮชไลต์ (Herschlite,  $NaAl-Si_2O_6 \cdot 3H_2O$ ) ซึ่งเป็นเฟสซีโอไลต์ (Zeolitic phase) Palomo et al. [11] รายงานว่าไม่พบเฟสผลึก (Crystalline phase) เกิดขึ้นใหม่ นอกจากเฟสผลึกของเถ้าลอยที่มีอยู่แล้วก่อนการทำปฏิกิริยา

Puertas et al. [23] ศึกษาการผสมเถ้าลอยกับ BFS พบว่าเจล CSH เป็นผลิตผลหลัก และพบ ไฮโดรแทลไซต์เพิร์สโซไนต์ (Pirssonite,  $Na_2Ca(CO_3) \cdot 2H_2O$ ) และ แคลไซต์ (calcite,  $CaCO_3$ ) ด้วย อย่างไรก็ตามพวกเขาไม่พบเฟสอลูมิโนซิลิเกตที่เป็นต่าง (Alkaline aluminosilicate phase)

ตามผลการศึกษาของ Fernandez-Jimenez and Palomo [24] แผนภาพ XRD ของเถ้าลอยที่ถูกกระตุ้นด้วยต่างแสดงให้เห็นว่าเฟสผลึกเดิมในเถ้าลอยไม่ได้ถูกทำให้เปลี่ยนแปลงหลังการถูกกระตุ้นด้วยต่าง

#### 5. การประยุกต์ใช้กับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ด้วยข้อดีหลายอย่างทั้งด้านกายภาพและด้านเคมี เช่น การซึมผ่านต่ำ กำลังอัดสูง และความคงทนสูง AAB และจีโอโพลิเมอร์ กำลังได้รับความสนใจมากขึ้นและถูก

ประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน หนึ่งในนั้นคือการนำมาใช้ ในการปรับเสถียรของเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักที่เป็น พิษ (Toxic heavy metal) ด้วยวิธีการ การทำให้เสถียร/ การทำให้แข็ง (Stabilization/solidification) โดยการผสม ของเสียในส่วนผสมแล้วหล่อเป็นก้อนเพื่อให้เกิดการจับ ของเสียไว้ (Encapsulation) ทำให้ของเสียถูกชะล้าง ละลาย (Leaching) ออกมาได้น้อยลง การปรับเสถียรของ เสียเป็นการเตรียมของเสียก่อนนำไปฝังกลบอย่าง ปลอดภัย (Secure landfill) ทั้งนี้สารละลายที่ออกมาจาก การชะล้างของเสียที่ปรับเสถียรแล้วนั้น จะต้องมีความ เข้มข้นของสารปนเปื้อนต่างๆ ต่ำกว่าปริมาณที่กำหนดไว้

การซึมผ่านต่ำ เป็นคุณสมบัติสำคัญและเหมาะใน การปรับเสถียรของเสียที่เป็นอันตราย กลไกการจับของเสีย ไว้เชื่อว่าเป็นทั้งกลไกทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งโลหะ อาจเข้าไปเกี่ยวพันกับโครงสร้างของวัสดุประสานด้วยการ ทำให้เกิดการสมดุลของประจุ (Charge balancing) หรือ ถูกล้อมไว้ด้วยโครงสร้างของวัสดุประสานโดยไม่เปลี่ยน คุณสมบัติทางกายภาพ [25]

Jaarsveld et al. [10] ได้ใช้จีโอโพลิเมอร์ที่มีเถ้า ลอยเป็นสารตั้งต้นในการปรับปรุงการปรับเสถียรน้ำที่ใช้ใน กระบวนการผลิตซึ่งมีทองแดง (Copper, Cu) และตะกั่ว (Lead, Pb) ในปริมาณสูง และมีรายงานว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ ใช้เถ้าลอยถูกใช้ในการปรับเสถียรกากกัมมันตรังสีจำลอง (Simulated radioactive waste) ซึ่งมี ซีเซียม (Cesium, Cs) และ สตรอนเตียม (Strontium, Sr) โดย Cs ถูกรวมเข้าไป ในเมตริกซ์จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer matrix) ที่อยู่ใน รูปอสัณฐาน ในขณะที่ Sr ถูกใช้ร่วมในเฟสผลึกและเฟสอสัณฐาน [26-27] นอกจากนี้ก็มีการใช้ในการกักจับสาร หนู (Arsenic, As) [17] มีการใช้ในการปรับเสถียรของเสีย ที่มีโลหะหนักชนิดต่างๆ คือ แคดเมียม (Cadmium, Cd) โครเมียม (Chromium, Cr) Cu และ Pb [28]

Asavapisit and Chotklang [29] ได้ศึกษาความเป็นไป ได้ในการใช้เถ้าลอยกระตุ้นด้วยด่างในการปรับเสถียรกาก ของเสียจากการชุบโลหะ (Electroplating sludge) กาก ของเสียถูกทำให้แข็งด้วยการใช้ปูนขาว (Lime) ร้อยละ 30 และเถ้าลอยร้อยละ 70 สารละลายต่างสองชนิด คือ โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต ถูกใช้ในอัตรา ส่วนผสมแตกต่างกัน พบว่าความเป็นต่างสูงของ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (pH 13.5) เป็นผลให้เกิดการ ละลายใหม่ (Resolubilization) ของไฮดรอกไซด์ของโลหะ

(Metal hydroxide) จากกากของเสีย จากการทดสอบ ความเป็นพิษโดยใช้วิธี "Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP" ของ US EPA [30] พบว่า Pb, Cu และ Cd ไม่ถูกตรวจพบในน้ำชะล้างของเสีย (Leachate) จากการทดสอบเลย ในขณะที่ สังกะสี (zinc, Zn) เหล็ก (iron, Fe) และ Cr ถูกตรวจพบในบางกรณี โดย Cr มีค่าเกินกว่าค่าที่ยอมให้ซึ่งกำหนดโดยองค์การพิทักษ์ สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency, US EPA)

Fernandez-Pereira et al. [31] ได้ศึกษาการ ประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยเป็นสารตั้งต้นในการ ปรับเสถียรฝุ่นที่เกิดจากการถลุงด้วยไฟฟ้า (Electric arc furnace, EAF, dust) ซึ่งเป็นของเสียที่ยากแก่การกำจัด เพราะมีองค์ประกอบที่เป็นอันตรายจำนวนมาก โดยเฉพาะ Pb, Cd, Cr และ Zn ตัวทำปฏิกิริยาหลายชนิดได้ถูกใช้ในการ ศึกษา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์, โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมซิลิเกต, โปแตสเซียมซิลิเกต, ดินขาว (Kaolinite), ดินขาวเผา และ BFS รวมทั้ง OPC ก็ถูกใช้ เพื่อการเปรียบเทียบ การทดสอบการชะล้างละลายทาง เคมีหลายวิธีได้ถูกใช้ในการประเมินประสิทธิภาพในการ ปรับเสถียร จากการศึกษาพบว่าแต่ละวิธีให้ผลที่แตกต่าง กัน แม้ว่าค่าความเป็นต่างของน้ำชะล้างของเสีย จะเป็น ตัวแปรที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่งเกี่ยวกับการศึกษาการตรึง โลหะ (Metal immobilization) แต่ผลการทดสอบตาม มาตรฐาน UNE-EN 12457 [32] ซึ่งใช้น้ำกลั่น (Distilled water) ในการชะล้างแสดงให้เห็นว่าในบางครั้ง ความสามารถในการชะล้าง (Leachability) ไม่ได้ขึ้นกับค่า ความเป็นต่างของน้ำจากการชะล้าง และผลการทดสอบ ด้วยวิธีนี้พบว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ให้ผลดีที่สุดในการตรึง โลหะโดยเฉพาะเมื่อใช้โปแตสเซียมซิลิเกต ในทางตรงกันข้าม ตัวอย่าง OPC ให้ผลในการตรึงโลหะดีกว่าเมื่อ ทดสอบด้วยวิธี TCLP ซึ่งใช้สารละลายกรดน้ำส้ม (Acetic acid solution) ในการชะล้าง เมื่อทดสอบด้วยวิธี NEN 7341 [33] โดยทั่วไปพบว่า Cr และ Zn ถูกชะล้างออกมา น้อยจากตัวอย่างทั้งที่เป็น OPC และจีโอโพลิเมอร์ แต่ Pb และ Cd มีผลแปรปรวน แม้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จะให้ผล ที่ดีกว่า โดยตัวอย่างที่ใช้โปแตสเซียมซิลิเกตและ BFS ให้ ผลดีที่สุด Fernandez-Pereira et al. [30] สรุปว่าใน ภาพรวมแล้วจีโอโพลิเมอร์โดยเฉพาะที่ใช้ โปแตสเซียมซิลิเกตและ BFS ให้ผลดีที่สุด

## 6. บทสรุป

การพัฒนาของวัสดุประสานจากการกระตุ้นด้วยต่าง (Alkali-activated binders, AAB) และจีโอโพลิเมอร์ แสดงให้เห็นว่าวัสดุประสานใหม่ทั้งสองมีศักยภาพที่จะพัฒนาให้เป็นวัสดุทางเลือกแทน OPC ได้ค่อนข้างสูง บทความนี้ได้นำเสนอความรู้เกี่ยวกับวัสดุทั้งสอง ทั้งประวัติความเป็นมาที่สำคัญ กลไกของปฏิกิริยา ผลผลิตจากปฏิกิริยา ซึ่งน่าจะทำให้เข้าใจในความเหมือนและความแตกต่างของวัสดุทั้งสองได้ดีขึ้น รวมทั้งการประยุกต์ใช้ด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมกับการจัดการของเสียอันตรายจำพวกโลหะหนักด้วยการทำให้เสถียร/การทำให้แข็ง (Waste stabilization/solidification) ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

AAB และจีโอโพลิเมอร์ ต่างก็เป็นวัสดุที่สารตั้งต้นถูกกระตุ้นด้วยสารละลายต่างทำให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน โดย AAB แรกเริ่มถูกพัฒนาโดยใช้ตะกั่วเตาถลุง (Blast furnace slag, BFS) เป็นวัสดุตั้งต้น ขณะที่ จีโอโพลิเมอร์ ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ดินขาวเผา (Metakaolin) และยังถูกจดลิขสิทธิ์ด้วย แต่ยังไม่มียี่ห้อที่เป็นที่ยอมรับทั่วไปเกี่ยวกับการจำแนกวัสดุทั้งสอง

ถ้าพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นและผลผลิตตาม Palomo et al. [11] และกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ตาม Jaarsveld et al. [12] และ Provis et al. [15] อาจพอได้หลักการในการจำแนกวัสดุประสานทั้งสองคือ AAB เป็นกรณีที่ใช้วัสดุตั้งต้นที่มีซิลิกอนและแคลเซียมสูง (Si + Ca) เช่น BFS กับสารละลายต่างปานกลาง ซึ่งจะมี CSH เป็นผลผลิตหลัก และจีโอโพลิเมอร์เป็นกรณีที่ใช้วัสดุตั้งต้นที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมสูง (Si + Al) เช่น ดินขาวเผา กับสารละลายต่างปานกลางถึงต่างสูง มีผลผลิตสุดท้ายเป็นโพลิเมอร์และมีการ้างสูง ซึ่งคล้ายกับกระบวนการเกิดซีโอไลต์ (Zeolite formation process)

สำหรับการประยุกต์ใช้กับการจัดการของเสียอันตรายด้วยการทำให้เสถียร/การทำให้แข็ง (Waste stabilization/solidification) AAB และจีโอโพลิเมอร์มีศักยภาพที่จะถูกพัฒนาให้มีการใช้งานในด้านนี้ได้เป็นอย่างดี

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sata V. The use of local pozzolan in fiber reinforced concrete. *KKU Eng J.* 2010;37(1): 29-37. (In Thai).
- [2] Chindapasirt P, Chareerat T, Kunawanakit W. Geopolymer from Mae Moh fly ash. *KKU Eng J.* 2010;32(5): 715-724. (In Thai).
- [3] Mehta PK. *Concrete in marine environment*, New York, USA: Elsevier Science Publishers. 1991.
- [4] Pacheco-Torgal F, Castro-Gomes J, Jalali S. Alkali-activated binders: a review part 1 historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Cons and Build Mat.* 2008;22:1305–1314.
- [5] Purdon AO. The action of alkalis on blast furnace slag. *J Soc Chem Ind.* 1940;59:191-202.
- [6] Glukhovskiy VD, Rostovskaja GS, Rumyna GV. High strength slag alkaline cements, *Proceedings of the seventh international congress on the chemistry of cement*; 1980 p.164–168.
- [7] Davidovits, J. (1979). Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites. *SPE PACTEC 79 Society of Plastic Engineers, Brookfield Center*, 151-154.
- [8] Chindapasirt P. Geopolymer: cementing material without cement. *Proceedings of Technology and Innovation for Sustainable Development Conference*; 2006 Jan 25-26; Khon Kaen, Thailand. *Khon Kaen Univeristy*; 2006. p. iii-vii. (In Thai).
- [9] Davidovits J, *Geopolymer chemistry and properties*, *Proceedings of 1988 geopolymer conference*; 1988, p.25–48.
- [10] Jaarsveld JGS, Deventer JSJ, Lorenzen L. Factors affecting the immobilisation of metals in geopolymerised fly ash. *Metall Mater Trans B.* 1998; 29B: p. 283–291.

- [11] Palomo A, Grutzek MW, Blanco MT, (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement Concrete Res*: 1999;29: p.1323–1329.
- [12] Jaarsveld JGS, Deventer JSJ, Lukey GC, (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymers. *Chem Eng J*. 2002: 89:p. 63–73.
- [13] Xu H, Van Deventer JSJ. Effect of source materials on geopolymerization. *Ind Eng Chem Res*. 2003: 42:p. 1698–1706.
- [14] Xu, H, Deventer JSJ, Jannie SJ. The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars. *Colloid Surf*. 2003: 216:p. 27–44.
- [15] Provis JL, Duxon P, Deventer JSJ, Lukey GC(2005). The role of mathematical modeling and gel chemistry in advancing geopolymer technology. *Chem Eng Res Des*.2005: 83:p. 853–860.
- [16] Deventer JSJ, Provis JL, Duxon P, Lukey GC. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *J Hazard Mater*. 2007: A139: p 506–513.
- [17] Fernandez-Jimenez A, Palomo A, Criado M. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement Concrete Res*. 2005: 35: p.1204-1209.
- [18] Fernandez-Jimenez A, Lachowski EE, Palomo A, Macphee DE. Microstructural characterisation of alkali-activated PFA matrices for waste immobilisation. *Cement Concrete Compos*. 2004: 26(8): p. 1001–1006.
- [19] Criado M, Palomo A, Fernandez-Jimenez A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel*. 2005: 84: p. 2048-2054.
- [20] Shi C, Wu X, Tang M. Hydration of alkali-slag cements at 150 °C. *Cement Concrete Res*. 1991: 21: p. 91-100.
- [21] Wang Shao-Dong, Scrivener K. Hydration products of alkali activated slag cement. *Cement Concrete Res*. 1995: 25:p. 561–571.
- [22] Hong SY, Glasser FP. Alkali binding in cement pastes. Part I. The C–S–H phase. *Cement Concrete Res*: 1999: 29:p. 1893–1903.
- [23] Puertas F, Martinez-Ramirez S, Alonso S, Vasquez T. Alkaliactivated fly ash/slag cement. Strength behaviour and hydration products. *Cement Concrete Res*. 2000: 30: p. 1625-1632.
- [24] Fernandez-Jimenez A, Palomo A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*. 2003: 82:p. 2259-2265.
- [25] Jaarsveld JGS, Deventer JSJ, Schwartzman A. The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics. *Miner Eng*. 1999: 12(1): p. 75–91.
- [26] Perera DS, Blackford MG, Vance ER, Hanna JV, Finnie KS, Nicholson CL. Geopolymers for the immobilization of radioactive waste. *Mater Res Soc Symp Proc*. 2004: 824:p. 607–612.
- [27] Perera DS, Vance ER, Aly Z, Davis J, Nicholson CL. Immobilization of Cs and Sr in geopolymers with Si/Al molar ratio of approx. 2. *Ceramic Transactions*. 2006: 176: p. 91-96.
- [28] Xu JZ, Zhou YL, Chang Q, Qu HQ. Study on the factors of affecting the immobilization of heavy metals in fly ash-based geopolymers. *Mater Lett*. 2006: 60(6): p. 820–822.
- [29] Asavapisit S, Chotklang D. Solidification of electroplating sludge using alkali-activated pulverized fuel ash as cementitious binder. *Cement Concrete Res*. 2004: 34(2): p. 349-353.

- [30] US EPA. Test methods for evaluating solid wastes, toxicity characteristic leaching procedure (TCLP), Method 1311 SW-846, 3<sup>rd</sup> ed. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA. 1986.
- [31] Fernandez-Pereira C, Luna Y, Querol X, Antenucci D, Vale. J. Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers. *Fuel*. 2009; 88(7): p.1185-1193.
- [32] Spanish Standard UNE-EN 12457. Characterisation of waste. Leaching compliance test for leaching of granular waste materials and sludges. 2003.
- [33] NEN 7341. Leaching characteristics of soil, construction materials and wastes-leaching tests-Determination of the availability of inorganic constituents for leaching from construction materials and waste materials, NNI (Dutch Standardization Institute), Delft, The Netherlands. 1994.