การผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและวัสดุเหลือทิ้ง

ศันศนีย์ บุญสาลี

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้และสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ (geopolymer) ในการนำไปผลิตเป็นวัสดุก่อสร้าง จากดินขาวเผา ดินตะกอนน้ำประปา และเซรามิกแตก ร่วมกับเถ้าลอยในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ วัสดุเหลือทิ้งแต่ละชนิด : เถ้าลอย เท่ากับ 75:25 50:50 25:75 โดยน้ำหนัก ผสมเข้ากับสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ บ่มของเหลวข้นที่ได้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบความทนแรงอัด (compressive strength) ของชิ้นงาน โดยการอบที่อุณหภูมิ 150 อาศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า ความทนแรงอัดที่ได้จากเซรามิกแตก : เถ้าลอย อัตราส่วน 75:25 มีค่าเท่ากับ 37.59 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นค่าความทนแรงอัดที่สูงกว่ามาตรฐานอิฐคอนกรีต (8.63-20.60 เมกะปาสคาล ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 59 - 2516)

Abstract

This research was conducted on the physical properties and feasibility of geopolymer from industrial and municipal waste as an alternative material to concrete bricks. Waste materials used in this study were metakaolin, municipal sludge, and fired ceramic cutlets. Each waste material was added to fly ash by the ratio waste : fly ash 75:25, 50:50, and 25:75, respectively. Sodium silicate and sodium hydroxide were used as alkaline activators. Geopolymer paste was cured at 60 ˚C for 24 hours and then at 150 ˚C for 24 hours to increase the compressive strength. The results revealed that waste material based geopolymer exhibited good performance with compressive strength of 37.59 MPa using 75: 25 ceramic cutlets to fly ash ratio, which was higher than the concrete building brick (8.63-20.60 MPa) according to the Thai Industrial Standards Institute 59-2516.

บทนำ

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างรายได้เข้าประเทศโดยการส่งออกไม่ต่ำกว่าปีละ 20,000 ล้านบาท เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้วัตถุดิบหลักในประเทศ และเป็นแหล่งสร้างแรงงานหลายระดับ นับว่าเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญอีกประเภทหนึ่ง อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตเซรามิกมีข้อจำกัดด้านประสิทธิผลการผลิต ที่ทำให้เกิดของเสียจากการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ ในปริมาณแตกต่างกันไปขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น เทคโนโลยีที่ใช้ กลุ่มของผลิตภัณฑ์ ประสิทธิภาพของบุคลากร การจัดการ เป็นต้น โดยข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรมระบุว่าปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิกในปี 2550 มีประมาณ 1 แสนตันต่อปี เฉพาะ

ของเสียที่เป็นเซรามิกที่เผาแล้วมีปริมาณ 58,000 ตันต่อปี หรือมากกว่าครึ่งหนึ่งของปริมาณของเสียทั้งกระบวนการของเสียประเภทนี้มีสมบัติคงตัวไม่สามารถนำกลับไปหลอมเพื่อผลิตเป็นวัตถุดิบตั้งต้นใหม่ได้ การกำจัดจึงทำได้โดยการนำไปถมที่ เกิดเป็นปัญหาขยะล้นโลกและอาจก่อให้เกิดปัญหาเรื่องความอุดมสมบูรณ์ของดิน การกำจัดขยะประเภทเซรามิกที่ผ่านการเผาแล้วทางหนึ่งคือการนำเซรามิกแตกมาใช้เป็นตัวเติม (filler) เพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงโดยประยุกต์เข้ากับเทคโนโลยีใหม่ ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีนั้นก็คือการทำวัสดุที่เรียกว่า จีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์หรือดินซีเมนต์ (soil-cement) เป็นสารปอซโซลานที่ประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง เป็นตัวทำละลายแล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสารจีโอพอลิเมอร์ที่ได้นี้มีโครงสร้างที่ยึดเกาะกันเป็นลูกโซ่ในลักษณะพอลิเมอร์ ทำให้มีความแข็งแรงยิ่งกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทนความร้อนสูง ทนต่อความเป็นกรด น้ำหนักเบา และที่สำคัญคือประหยัดพลังงาน ไม่ก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจก

เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ในปัจจุบันจึงมีรายงานการศึกษาและวิจัยเพื่อนำสารจีโอพอลิเมอร์มาใช้ประโยชน์เพื่อทดแทนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างหลากหลาย เช่น มีการนำไปใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตทำถนน อิฐบล็อก ใช้แทนท่อระบายน้ำเพื่อให้พืชยึดเกาะและเจริญเติบโตได้เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์มีลักษณะพรุนตัวสูง งานอุตสาหกรรมไฟฟ้า อุตสาหกรรมเครื่องบิน ตัวอย่างของวัสดุปอซโซลานที่เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่นที่ใช้กันในปัจจุบัน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ ไดอะตอมไมต์ (diatomite) ดินขาวเผา (metakaolin) อย่างไรก็ตามในประเทศไทย ยังมีวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอีกเป็นจำนวนมาก ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เช่น ของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิก ดินตะกอน เถ้าชีวะมวลจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาวิจัยและพัฒนาให้เป็นสารจีโอพอลิเมอร์ได้

วิธีการทดลอง

1. วัตถุดิบและสารเคมี

1.1 เถ้าลอย จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

1.2 วัสดุเหลือทิ้ง

1.2.1 ดินขาวเผา เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.2.2 ดินตะกอนน้ำประปา จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน อบแห้ง

1.2.3 เซรามิกแตก ประเภทสุขภัณฑ์ จากบริษัทสยามซานิทารีแวร์ จำกัด

1.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 โมลาร์

2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 นำวัตถุดิบทั้งหมดที่เป็นของแข็ง ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช ค้างตะแกรงขนาด 100 เมช โดยร่อนแยกประเภท

2.2 ชั่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้ำหนัก 20 กรัม ลงในบีกเกอร์ ผสมเข้ากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตปริมาตร 50 มิลลิลิตร เรียกว่าสารละลายด่าง

2.3 เตรียมส่วนผสมแห้ง โดยผสมดินขาวเผากับเถ้าลอยในอัตราส่วน ดินขาวเผา : เถ้าลอย 75:25 50:50 และ 25:75 น้ำหนักอัตราส่วนละ 100 กรัม ผสมส่วนผสมแห้งลงในสารละลายด่างที่เตรียมไว้ คนให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว หากส่วนผสมข้น

เกินไปให้เติมสารละลายด่างอีกเล็กน้อย หากส่วนผสมเหลวเกินไปให้เติมส่วนผสมแห้งเล็กน้อย

2.4 เทลงในพิมพ์ขนาด 2.5 × 2.5 × 2.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปาดหน้าให้เรียบ วางบนเครื่องสั่น 30 นาที

2.5 บ่มส่วนผสมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง จนกระทั่งแข็งตัวแล้วจึงแกะออกจากพิมพ์และนำไปอบต่อในเตาอบไฟฟ้า ที่อัตราเร่ง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง

2.6 นำออกจากเตาและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในถุงพลาสติกเป็นเวลา 7 วัน

2.7 นำตัวอย่างไปหาค่าความทนแรงอัด โดยวัดขนาดของชิ้นทดสอบหลังอบ กดชิ้นทดสอบในแนวตั้งฉากจนได้ค่าแรงอัดสูงสุดเมื่อชิ้นทดสอบแตกเสียหาย

2.8 ทำซ้ำข้อ 2.3 - 2.7 แต่เปลี่ยนจากดินขาวเผาเป็นดินตะกอนน้ำประปา และเซรามิกแตกตามลำดับ

3. เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1 เครื่อง X-ray Fluorescence (XRF): Bruker รุ่น S8 Tiger

3.2 วัดความต้านแรงอัด เครื่อง Toni Technik รุ่น 2010.010 ขนาด 300 กิโลนิวตัน

3.3 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) Hitachi รุ่น S2500

ผลการทดลอง

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ดินขาวเผา ดินตะกอนน้ำประปาและเซรามิกแตก ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าเถ้าลอย ดินขาวเผา ดินตะกอนน้ำประปา และเซรามิกแตก มีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกาและอะลูมินา โดยดินตะกอนน้ำประปามีปริมาณซิลิกาสูงสุด เนื่องจากมีทรายปนอยู่มาก และมีปริมาณโปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O) ถึงร้อยละ 3.66 เถ้าลอยมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) รองลงมาและยังพบซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_3) ด้วย ลักษณะทั่วไปของเถ้าลอยมีสีเทาดำ ดินตะกอนน้ำประปามีสีน้ำตาลเข้ม ดินขาวเผามีสีขาวปนเหลืองอ่อน และเซรามิกแตกเป็นฝุ่นผงสีขาว

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี (XRF) ของเถ้าลอย ดินขาว ดินตะกอนน้ำประปา และเซรามิกแตก (ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง)

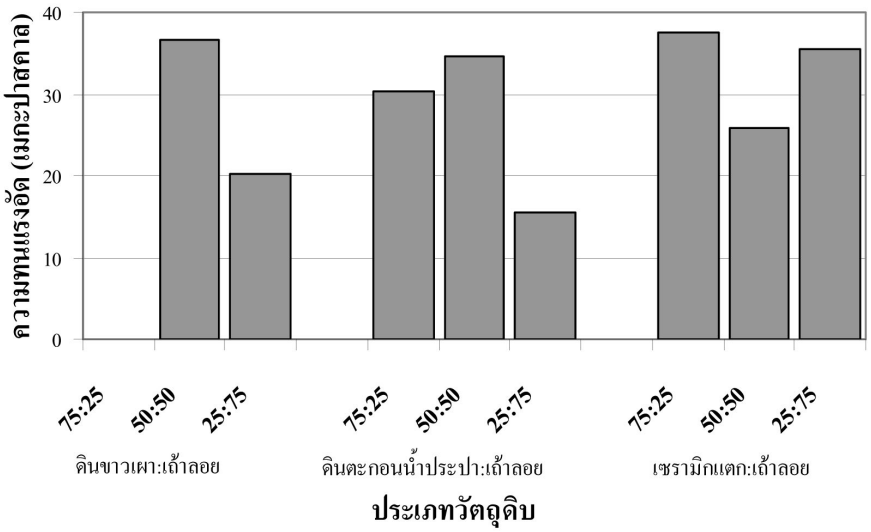
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	TiO_2	MnO	SO_3
เถ้าลอย	40.01	22.47	12.82	13.14	3.08	2.57	1.73	0.48	0.10	2.97
ดินขาวเผา	53.39	43.98	-	0.63	1.64	-	-	-	-	-
ดินตะกอนน้ำประปา	70.4	15.4	1.53	5.3	3.66	0.96	0.90	1.04	0.23	0.31
เซรามิกแตก	69.21	22.27	1.41	1.12	2.77	0.58	1.25	0.35	-	-

หมายเหตุ ตารางที่ 1 ไม่ได้แสดงค่าออกไซด์อื่น ๆ ที่มีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 0.1

การเตรียมตัวอย่างใช้วิธีการหล่อในแบบโลหะ โดยใช้อัตราส่วนของวัสดุเหลือทิ้งแต่ละชนิด : เถ้าลอย เท่ากับ 75:25 50:50 และ 25:75 ตารางที่ 2 แสดงอัตราส่วนของวัสดุที่ใช้และความทนแรงอัด โดยอัตราส่วนของสารละลายด่างและส่วนผสมแห้งจะอยู่ระหว่าง 1 มิลลิลิตรต่อ 1.7 - 2.4 กรัม สำหรับสูตรที่ใช้ดินขาวเผาร้อยละ 75 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากวัสดุไม่แข็งตัวถึงแม้จะใช้เวลาบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มากกว่า 48 ชั่วโมง และนำไปอบอีก 24 ชั่วโมง จึงไม่สามารถหาค่าความทนแรงอัดได้ จากภาพที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความทนแรงอัดของดินขาวเผา ดินตะกอนน้ำประปา และเซรามิกแตก ผสมกับเถ้าลอยในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า หากนำเศษเซรามิกแตกผสมเถ้าลอยจะให้ค่า ความทนแรงอัดโดยเฉลี่ยสูงกว่าการผสมด้วยดินขาว เผาหรือดินตะกอน โดยใช้สารละลายด่างในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน และมีช่วงเวลาอยู่ตัว (setting time) ใกล้เคียงกันสามารถขึ้นรูปได้ดี

ตารางที่ 2 แสดงอัตราส่วนของวัสดุเหลือทิ้งแต่ละชนิดต่อเถ้าลอยสารละลายด่างต่อส่วนผสมแห้ง และความทนแรงอัด

วัสดุเหลือทิ้ง	วัสดุเหลือทิ้ง : เถ้าลอย (กรัม:กรัม)	สารละลายด่าง : ส่วนผสมแห้ง (มิลลิลิตร: กรัม)	ความทนแรงอัด (เมกะปาสคาล)
ดินขาวเผา	75:25	1:2.0	-
	50:50	1:2.1	36.73
	25:75	1:2.4	20.14
ดินตะกอนน้ำประปา	75:25	1:2.0	30.34
	50:50	1:2.7	34.55
	25:75	1:2.5	15.43
เซรามิกแตก	75:25	1:2.0	37.59
	50:50	1:1.7	25.93
	25:75	1:2.0	35.59



ภาพที่ 1 การเปรียบเทียบความทนแรงอัดของวัสดุเหลือทิ้งแต่ละชนิดผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน

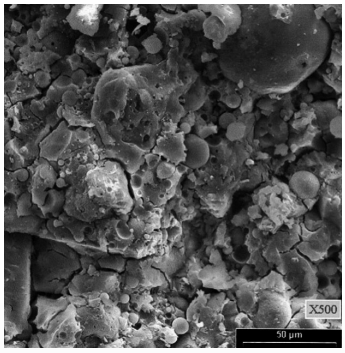
วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองขึ้นรูปพบว่าหากใช้สูตรดินขาวเผาผสมกับเถ้าลอยในอัตราส่วน 75:25 ไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากตัวอย่างไม่แข็งตัวแม้จะอบที่อุณหภูมิสูงแล้วก็ตาม สูตรดินขาวเผาต่อเถ้าลอย 50:50 และ 25:75 สามารถขึ้นรูปได้ดี จีโอพอลิเมอร์ก่อนอบและหลังอบมีสีน้ำตาลเข้ม ผิวเรียบ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ความทนแรงอัดลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น

เมื่อผสมดินตะกอนน้ำประปากับเถ้าลอย พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ดี จีโอพอลิเมอร์มีสีน้ำตาลเข้ม ตัวอย่างผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ยาก หลังอบ ทุกตัวอย่างมีรอยแตกร้าว ซึ่งอาจเกิดจากการมีปริมาณซิลิกาจากทรายมาก ทำให้ตัวอย่างไม่มีความเหนียว ผิวไม่เรียบ ความแข็งแรงน้อยกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วน 50:50 สำหรับสูตรที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 75 มีค่าความแข็งแรงลดลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งผลการทดลองคล้ายคลึงกับสูตรดินขาวเผาที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 75 เนื่องจากการใช้เถ้าลอยผสมมากเกินไปทำให้จีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลง สอดคล้องกับงานวิจัยหลายเรื่องที่ระบุว่าไม่ควรผสมเถ้าลอยในคอนกรีตเกินกว่าร้อยละ 30 เพราะจะทำให้ความทนแรงอัดลดลง

เมื่อเปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งเป็นเซรามิกแตกผสมเถ้าลอย พบว่าตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มีสีเทาอ่อนปนน้ำตาลถึงน้ำตาลเข้ม ขึ้นอยู่กับปริมาณเซรามิกแตกที่ใช้ ตัวอย่างมีความเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถขึ้นรูปได้ดี จีโอพอลิเมอร์หลังอบมีการพองตัวมาก ยกเว้นสูตรที่ผสมเซรามิกแตกต่อเถ้าลอย 25:75 จะมีผิวเรียบไม่พองตัว ขึ้นรูปได้ดี ซึ่งการพองตัวนี้อาจเกิดจากมีฟองอากาศในตัวอย่างมาก เมื่อนำไปอบอากาศพยายามดันตัวออกมาทำให้พื้นผิวโป่งพอง เมื่อทุบตัวอย่างแล้วนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (ภาพที่ 2) พบว่า ยังมีอนุภาคของเถ้าลอยและเซรามิกปนอยู่ทั่วไปในเนื้อตัวอย่าง โดยอนุภาคของเถ้าลอยจะมีลักษณะกลม มีรูพรุน จากการทดสอบความทนแรงอัดพบว่า เมื่ออัตราส่วนของเซรามิกแตกต่อเถ้าลอยเท่ากับ 75:25 จะมีความทนแรงอัดมากที่สุด

คือ 37.59 เมกะปาสคาล แต่เนื่องจากตัวอย่างโป่งพองแสดงให้เห็นว่ามีฟองอากาศมาก จึงน่าจะมีความเปราะมากกว่า ความทนแรงอัดที่สูงจึงอาจไม่ใช่มาจากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่นเท่านั้น แต่น่าจะเป็นผลมาจากความแข็งแรงของเซรามิกแตกที่ผ่านการเผาแล้วโดยตรงร่วมด้วย ดังจะเห็นได้ว่าเมื่อลดปริมาณเซรามิกแตกลงเหลือร้อยละ 25 ยังคงมีความทนแรงอัดไม่ต่างกัน ซึ่งความทนแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเซรามิกแตกและเถ้าลอยสูงกว่ามาตรฐานอิฐคอนกรีต (8.63-20.60 เมกะปาสคาล ตาม มอก. 59 - 2516)



ภาพที่ 2 ลักษณะพื้นผิวภายในของจีโอพอลิเมอร์จากเซรามิกแตกผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน เซรามิกแตก : เถ้าลอย 25:75 ที่กำลังขยาย 500 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้พบว่าเซรามิกแตกมีศักยภาพในการผลิตวัสดุก่อสร้างประเภทรับแรง โดยเมื่อนำไปผสมกับเถ้าลอยในอัตราส่วน เซรามิกแตก : เถ้าลอย 75:25 มีความทนแรงอัดเท่ากับ 37.59 เมกะปาสคาล แต่เนื่องจากตัวอย่างมีฟองอากาศมากและผิวไม่เรียบ จึงอาจใช้เซรามิกแตกผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน 25 : 75 ได้ ซึ่งมีความทนแรงอัดไม่ต่างกันคือ 35.59 เมกะปาสคาล สำหรับจีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปจากวัสดุเหลือทิ้งอื่น ๆ ได้แก่ ดินขาวเผาและดินตะกอนน้ำประปานั้น มีความทนแรงอัดในช่วงอิฐคอนกรีตหรือมากกว่า คือ 15.43-36.73 เมกะปาสคาล ขึ้นอยู่กับปริมาณอัตราส่วนของวัสดุเหลือทิ้งกับเถ้าลอยที่ใช้ จึงสรุปได้ว่าวัสดุเหลือทิ้งมีศักยภาพสามารถนำมาพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างทดแทนอิฐคอนกรีตได้ โดยเฉพาะเซรามิกแตกที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานเซรามิกทำให้สามารถลดการทิ้งโดยการนำไปถมที่ (landfill) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและยังช่วยเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งอีกด้วย การวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยกลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเซรามิก สำนักเทคโนโลยีชุมชน โดยมุ่งการนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

Davidovits, J. **Geopolymer Chemistry and Applications.** 2nd Edition. Saint-Quentin, France. Instutut Geopolymere, c2008. p. 5.

Maholtra, V. M. Making Concrete "Greener" With Fly Ash. **ACI Concrete International.** 1999, 21(5), 61-66.

_____. Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology, **ACI Concrete International.** 2002, 24(7), 22.

McCaffrey, R. Climate Change and the Cement Industry. **Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue).** 2002, 15-19.

Swanepoel, J. C.; Strydom, C. A. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. **Applied Geochemistry.** 2002, 17, 1143.

Wallah, S. E.; Rangan, B. V. Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: **Longterm properties. Research Report GC2.** Perth: Curtin University of Technology,2006. **[Online]**. [cited 28 July 2010] Available from Internet: http://espace.library.curtin.edu.au/view/action/

Xie, Z.; Xi, Y. Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash. **Cement and Concrete Research.** 2001, 31, 1245.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. สารจีโอพอลิเมอร์ : วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ Geopolymer: Cementing Material Without Cement. 25-26 มกราคม 2549. **การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน.** มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐคอนกรีต. มอก. 59-2516.