การประเมินคุณสมบัติและต้นทุนของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่ใช้สารกระตุ้นด่างชนิดห้องปฏิบัติการและชนิดอุตสาหกรรม

EVALUATING PROPERTIES AND UNIT PRICE OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER USING LABORATORY GRADE AND INDUSTRIAL GRADE ALKALINE ACTIVATORS

วิทวัส มูลณี[1], ธีวรา สุวรรณ[1,*]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, จังหวัดเชียงใหม่, ประเทศไทย
[*] Corresponding author address: Witthawat_m@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

การใช้จีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีส่วนช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยจีโอโพลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากการผสมสารละลายด่าง กับวัสดุตั้งต้นประเภทปอซโซลานที่มีองค์ประกอบของซิลิกา และอะลูมินาเป็นหลัก ในปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาวัสดุประเภทจีโอโพลิเมอร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้สารละลายด่างชนิดห้องปฏิบัติการเพื่อความถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์ปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ดีสารละลายด่างชนิดห้องปฏิบัติการนั้นมีราคาสูง ไม่เหมาะกับการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ในการใช้งานในทางปฏิบัติ ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกศึกษาปัจจัยของชนิด(หรือเกรด)ของสารละลายด่างชนิดอุตสาหกรรมนำมาเปรียบเทียบกับสารละลายด่างชนิดใช้ในห้องปฏิบัติการในการผลิตจีโอโพลิเมอร์โดยมีการทดสอบกำลังรับแรงอัด, เวลาก่อตัวเริ่มต้น และราคาต้นทุน พบว่าสารละลายด่างชนิดห้องปฏิบัติการมีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ใกล้เคียงกับสารละลายด่างชนิดอุตสาหกรรมแต่ขนาดอนุภาคของสารละลายด่างชนิดห้องปฏิบัติการมีขนาดที่เล็กกว่าทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้รวดเร็วกว่า จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากสารละลายด่างชนิดอุตสาหกรรมมีกำลังรับแรงอัดต่างจากจีโอโพลิเมอร์จากสารละลายด่างชนิดห้องปฏิบัติการไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยกำลังรับแรงอัดสูงสุดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์จากสารละลายชนิดอุตสาหกรรมและสารละลายด่างชนิดห้องปฏิบัติการเท่ากับ 342.3 ksc และ 343.1 ksc ตามลำดับ เวลาก่อตัวเริ่มต้นของจีโอโพลิเมอร์จากสารละลายด่างทั้ง 2 ชนิดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของซีเมนต์โดยที่เวลาก่อตัวเริ่มต้นของจีโอโพลิเมอร์จากสารละลายด่างชนิดอุตสาหกรรมมีเวลาก่อตัวเริ่มต้นที่มากกว่าสารละลายด่างชนิดห้องปฏิบัติการ และจากการทดสอบต้นทุนในการผลิตพบว่าจีโอโพลิเมอร์จากสารละลายด่างชนิดอุตสาหกรรมมีราคาต่ำกว่าสารละลายด่างชนิดห้องปฏิบัติการมากถึง 78-86 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าสารละลายด่างชนิดอุตสาหกรรมสามารถนำมาใช้ทดแทนสารละลายด่างชนิดห้องปฏิบัติการในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนได้

***คำสำคัญ**: จีโอโพลิเมอร์, สารกระตุ้นด่าง, ห้องปฏิบัติการ, อุตสาหกรรม*

Abstract

The replacement of Portland cement consumption by using fly ash-based geopolymer can alternatively reduce a huge amount of carbon dioxide emission from Portland production. Geopolymer is synthesized by mixing alkaline solutions with pozzolanic materials which mainly contains silica and alumina. At the present, most of the research studies are focusing on the usage of laboratory grade of alkaline solutions, which is quite expensive and impractical in real use. Therefore, the industrial grade of alkaline solution is selected to compare with laboratory grade by compressive strength test, initial setting time and cost. It was found that the amount of sodium hydroxide content of laboratory grade is similar to that of industrial grade. But, the smaller size of laboratory grade led to more dissolution with water due to it higher surface area. The results showed that the difference between compressive strength of geopolymer from industrial and laboratory grade solution is less than 10%. The average maximum compressive strength of the geopolymer from industrial grade solution and laboratory solution were 342.3 ksc and 343.1 ksc, respectively. The initial setting time of geopolymer made from industrial grade alkaline solution is more than laboratory grade. Moreover, initial time of both groups are beyond the standard of TIS. The cost of geopolymer made from industial grade alkaline solution is cheaper than the laboratory grade approximately 78 to 86%. From the results, it can be said that geopolymer from industrial grade of alkaline solutions can be used as a substitution for geopolymers production with possible material cost.

***Keywords:** Geopolymer, Alkaline activator, Laboratory, Industrial*

1. บทนำ

ในงานก่อสร้าง ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่นำมาใช้เป็นจำนวนมาก และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์นั้นได้มาจากการทำเหมืองหินปูน หลังจากนั้นนำเศษหินปูนที่ได้ไปแยกส่วนประกอบออกเป็นส่วนประกอบหลักๆ คือหินปูน ศิลาแลง และดินดาน จากนั้นนำส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วนไปบดให้เป็นผงละเอียดนำมาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วนำเข้าสู่เตาเผา หลังจากการเผาจะได้เม็ดปูน นำเม็ดปูนที่ได้พักให้เย็นตัวแล้วบดผสมกับยิปซัมเพื่อชะลอการเกิดปฏิกิริยา จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมากทั้งทำลายทรัพยากรธรรมชาติจากการทำเหมือง และการใช้พลังงานจำนวนมากในการเผาเม็ดปูนซีเมนต์ เพื่อลดปัญหาดังกล่าวการพัฒนาวัสดุจีโอ โพลิเมอร์เพื่อมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงถือว่าเป็นหนึ่งในทางเลือกสำหรับวัสดุทดแทน

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสานที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐานโดยใช้วัสดุตั้งต้นที่เป็นกากอุตสาหกรรมที่มีองค์ประกอบของซิลิกา SiO_2 และอะลูมินา Al_2O_3 เป็นหลักเช่นเถ้าลอยจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ตะกรันจากอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก ของเหลือจำพวกเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร นำไปผสมกับสารละลาย อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์เพื่อชะล้างสารดังกล่าวออกจากสารตั้งต้น และเชื่อมประสานด้วยสารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกต แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันทำให้จีโอโพลิเมอร์แข็งตัว และมีกำลังที่สูงเพียงพอที่จะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานทดแทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มีหลายปัจจัยเช่น องค์ประกอบของวัสดุตั้งต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มตัวอย่าง และมีปัจจัยที่สำคัญคือสารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์โดยงานวิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้สารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ชนิดห้องปฏิบัติการเพราะมีความบริสุทธิ์ที่สูงกว่าชนิดอุตสาหกรรม แต่มีราคาที่สูงกว่าด้วยเช่นกัน

สารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบสำคัญในการกระตุ้นปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันเนื่องจากเป็นสารที่ทำหน้าที่ละลายซิลิกาและอะลูมินาออกจากวัสดุตั้งต้น เพื่อทำปฏิกิริยาเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี และมีต้นทุนที่ต่ำทำให้เหมาะสมในการนำมาใช้งาน และมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันได้ดี

จากตารางที่ 2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดห้องปฏิบัติการจะมีความบริสุทธิ์มากกว่าชนิดอุตสาหกรรม มีความปนเปื้อนของสารชนิดอื่นน้อยกว่า และมีขนาดของเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เล็กกว่าชนิดอุตสาหกรรมมากทำให้สามารถทำปฏิกิริยาได้รวดเร็ว แต่ความรวดเร็วในการทำปฏิกิริยาทำให้สารละลายเกรดห้องปฏิบัติการไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติเพราะต้องมีการจัดเก็บที่เหมาะสม หากภาชนะที่บรรจุไม่เหมาะสมจะทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศ

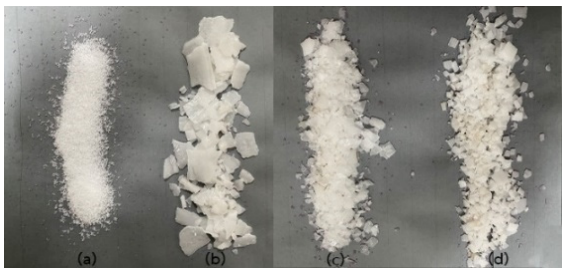
แม้ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะช่วยลดปริมาณขยะจากอุตสาหกรรมและลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ แต่การผลิตจีโอโพลิเมอร์ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก และการใช้สารละลายชนิดห้องปฏิบัติการอาจทำให้มีราคาต้นทุนในการผลิตของจีโอโพลิเมอร์มีราคาสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ไม่คุ้มค่าในการผลิต [4,6] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายชนิดห้องปฏิบัติการ และชนิดอุตสาหกรรมเพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติทั้งในด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรม และต้นทุนด้านสารกระตุ้นปฏิกิริยาในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากสารละลายชนิดอุตสาหกรรมทดแทนสารละลายชนิดห้องปฏิบัติการเพื่อลดต้นทุนในการผลิต

2. วัสดุ และวิธีดำเนินการวิจัย

เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเถ้าลอยโดยวิธีการทดสอบ EDXRF

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
Al_2O_3	9.38
SiO_2	20.05
SO_3	5.34
K_2O	2.59
CaO	30.96
TiO_2	0.68
MnO	0.25
Fe_2O_3	30.34
As_2O_3	0.08
Rb_2O	0.03
SrO	0.30



รูปที่ 1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดห้องปฏิบัติการและชนิดอุตสาหกรรมแบรนด์ RCI (a), AGC (b), China (c), Taiwan (d)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดห้องปฏิบัติการจาก RCI Labscan และโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดอุตสาหกรรมจากร้านเคมีภัณฑ์ใน

จังหวัดเชียงใหม่

ตารางที่ 2 ความแตกต่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดห้องปฏิบัติการและชนิดอุตสาหกรรม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2549)

องค์ประกอบ	% ปริมาณองค์ประกอบ		
	ห้องปฏิบัติการ	อุตสาหกรรมชั้นคุณภาพ 1	อุตสาหกรรมชั้นคุณภาพ2
โซเดียมไฮดรอกไซด์	> 99.0	> 99.0	> 98.0
โซเดียมคาร์บอเนต	< 1.0	< 0.50	< 2.0
โซเดียมคลอไรด์	< 0.03	< 0.10	< 0.15
ไอร์ออนออกไซด์	< 0.001	< 0.005	< 0.005
ปรอท	< 0.00001	< 0.10	< 0.1

ตารางที่ 3 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยวิธีการไทรเทรต

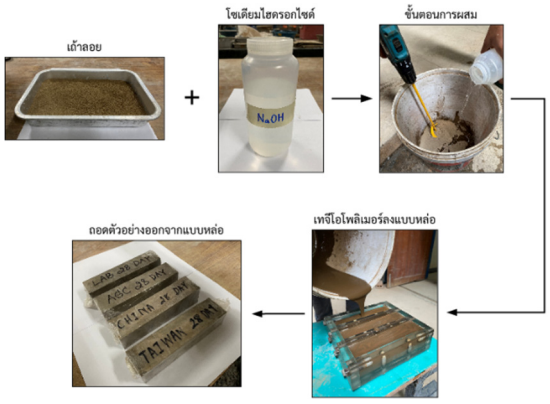
โซเดียมไฮดรอกไซด์	ปริมาณ NaOH (%w/w)
RCI	99.6
Taiwan	99.5
AGC	98.7
China	96.8

ตารางที่ 4 ราคาโซเดียมไฮดรอกไซด์

ชนิด NaOH	ยี่ห้อ NaOH	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
Lab	RCI	295
Industrial	Taiwan	58
	AGC	27.8
	China	34

การผสมตัวอย่างใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 16 โมลาร์ ซึ่งถูกเตรียมล่วงหน้าอย่างน้อย 24 ชั่วโมงเพื่อให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายทั้งหมด

ในขั้นตอนการหล่อตัวอย่าง ผสมสารละลายกับเถ้าลอยโดยใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย (L/B) เท่ากับ 0.4 จากนั้นปั่นด้วยสว่านเป็นเวลา 30 วินาที จนส่วนผสมเข้ากันดี เทส่วนผสมลงในแบบหล่อตัวอย่างทรงปริซึมสี่เหลี่ยมขนาด 40x40x40 มิลลิเมตร แล้วนำเข้าเตาอบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อ ห่อด้วยพลาสติกใสเพื่อป้องกันการสัมผัสกับความชื้นในอากาศ ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุการทดสอบ



รูปที่ 2 ขั้นตอนการหล่อตัวอย่าง

ตัวอย่างถูกทดสอบทดสอบระยะเวลาการก่อตัวตามมาตรฐาน ASTM C191, กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 28 และ 60 วันตามมาตรฐาน BS EN 196-1

ในการทดสอบต้นทุนในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้ทำการเตรียมสารละลาย และผสมเช่นเดียวกับขั้นตอนการหล่อตัวอย่างโดยจดบันทึกปริมาณส่วนผสมที่ได้ใช้ในการผสมโดยละเอียด แต่ในขั้นตอนการหล่อตัวอย่างได้ทำการหล่อตัวอย่างในท่อทรงกระบอกแทนการหล่อตัวอย่างในแบบหล่อ ทิ้งไว้ให้จีโอโพลิเมอร์แข็งตัวและทำการแกะตัวอย่างออกเพื่อวัดขนาดนำไปคำนวณปริมาตรจีโอโพลิเมอร์เพื่อทำการคำนวณปริมาณส่วนผสม และต้นทุนของจีโอโพลิเมอร์ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

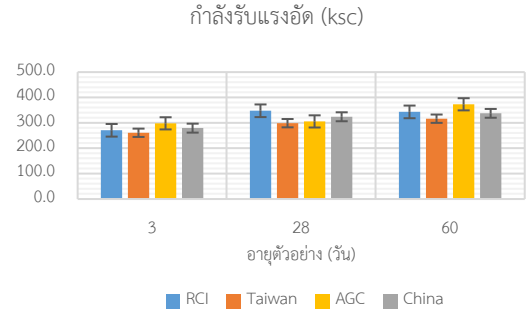
3. ผลการวิจัย

งานวิจัยศึกษาผลของชนิดสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของจีโอโพลิเมอร์ โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ใช้สารละลายชนิดห้องปฏิบัติการเพราะมีความบริสุทธิ์สูง แต่ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีราคาแพงเมื่อนำมาใช้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้สารละลายชนิดอุตสาหกรรมมาผลิตจีโอโพลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนด้านสารกระตุ้นปฏิกิริยา และเพื่อศึกษาผลของชนิดสารกระตุ้นปฏิกิริยาในงานวิจัยจึงได้ทดสอบกำลังรับแรงอัด, เวลาก่อตัวเริ่มต้นของจีโอโพลิเมอร์ และราคาต้นทุนด้านกระตุ้นปฏิกิริยา

3.1. กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์

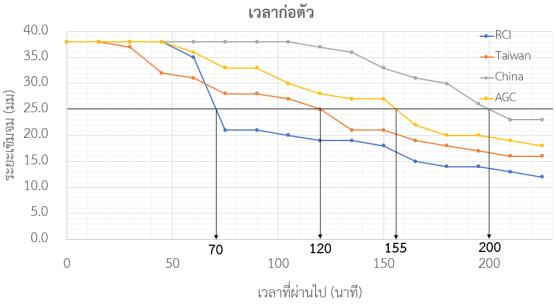
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงผลดังรูปที่ 3 โดยจีโอโพลิเมอร์จากสารกระตุ้นปฏิกิริยาของ RCI, Taiwan, AGC และ China มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 60 วันเท่ากับ 343.1, 316.3, 373.1 และ 337.5 ksc ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากสารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดอุตสาหกรรมมีค่าใกล้เคียงกับจีโอโพลิเมอร์จากสารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดห้องปฏิบัติการเนื่องจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ของสารกระตุ้นปฏิกิริยาซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการชะละลายซิลิกา และอะลูมินา [7] มีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยดัง

แสดงในตารางที่ 3 ทำให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์

3.2. เวลาก่อตัวเริ่มต้น



รูปที่ 4 เวลาก่อตัวเริ่มต้นของจีโอโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4 เวลาก่อตัวเริ่มต้นของจีโอโพลิเมอร์จากสารกระตุ้นปฏิกิริยาของ RCI, Taiwan, AGC และ China เท่ากับ 70, 120, 155 และ 200 นาทีตามลำดับ เมื่อสารละลายมีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้นการละลายของอนุภาคซิลิกอน และอลูมิเนียมจากสารตั้งต้นเพิ่มมากขึ้น [7] ซึ่งทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระบวนการปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน [3,5,8] ดังนั้นเมื่ออนุภาคของซิลิกอน และอลูมิเนียมน้อยลงส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันเกิดได้ลดลง และทำให้เวลาในการแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบเวลาก่อตัวเริ่มต้นของจีโอโพลิเมอร์กับเวลาก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์พบว่าเวลาก่อตัวเริ่มต้นของจีโอโพลิเมอร์เข้าเกณฑ์มาตรฐานของซีเมนต์คือ เวลาก่อตัวเริ่มต้นไม่น้อยกว่า 45 นาที [1] เพื่อให้การนำไปใช้ทางปฏิบัติมีเวลาเพียงพอในการผสมส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถขนส่งไปยังไซต์งาน

3.3. ราคาต้นทุนต่อลูกบาศก์เมตรของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ราคาต้นทุนด้านสารกระตุ้นปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์จากสารกระตุ้นปฏิกิริยาของ RCI, Taiwan, AGC และ China เท่ากับ 29,474.2 6,429.4 4,017.8และ 4,720.5 บาทต่อลูกบาศก์เมตร แสดงในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าการใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดอุตสาหกรรมสามารถลดต้นทุนด้านสารกระตุ้นปฏิกิริยาได้มากถึง 78-86 เปอร์เซ็นต์โดยที่กำลังรับแรงอัดต่างจากการใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดห้องปฏิบัติการไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5 ส่วนผสมในการทดสอบต้นทุน

แบรนด์ NaOH	ส่วนผสม	ปริมาณ (g)	ราคาต่อหน่วย	ราคา
RCI	NaOH	384	0.295	113.3
	น้ำกลั่น	491	0.0125	6.1
	ปริมาตรจีโอโพลิเมอร์ที่ได้	1215.3 ลบ.ซม.		
Taiwan	NaOH	384	0.058	22.3
	น้ำกลั่น	556	0.0125	6.9
	ปริมาตรจีโอโพลิเมอร์ที่ได้	1362.5 ลบ.ซม.		
AGC	NaOH	384	0.0278	10.7
	น้ำกลั่น	520	0.0125	6.5
	ปริมาตรจีโอโพลิเมอร์ที่ได้	1284.3 ลบ.ซม.		
China	NaOH	384	0.034	13.0
	น้ำกลั่น	495	0.0125	6.2
	ปริมาตรจีโอโพลิเมอร์ที่ได้	1220.2 ลบ.ซม.		

คำนวณราคาส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแบรนด์ RCI

$(113.3 + 6.1)x(1000000 / 1215.3)x0.3 = 29,474.2$ บาท

คำนวณราคาส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแบรนด์ Taiwan

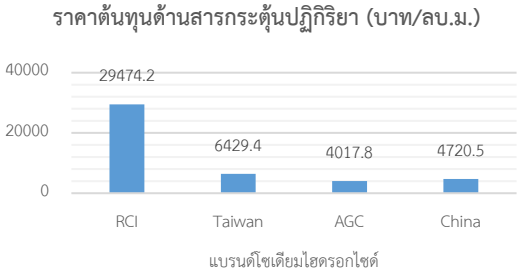
$(22.3 + 6.9)x(1000000 / 1362.5)x0.3 = 6,429.4$ บาท

คำนวณราคาส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแบรนด์ AGC

$(10.7 + 6.5)x(1000000 / 1284.3)x0.3 = 4,017.8$ บาท

คำนวณราคาส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแบรนด์ China

$(13.0 + 6.2)x(1000000 / 1220.2)x0.3 = 4,720.5$ บาท



รูปที่ 5 ราคาต้นทุนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของชนิดของสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่มีผลต่อคุณสมบัติของเชิงวิศวกรรม และต้นทุนของจีโอโพลิเมอร์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดอุตสาหกรรมสามารถนำมาใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ทดแทนสารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดห้องปฏิบัติการได้ โดยที่กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าต่างจากการใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดห้องปฏิบัติการไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

2. จีโอโพลิเมอร์จากสารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดอุตสาหกรรมมีเวลาก่อตัวเริ่มต้นที่มากกว่าสารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดห้องปฏิบัติการ และเวลาก่อตัวเริ่มต้นของสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของซีเมนต์

3. จีโอโพลิเมอร์จากสารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดอุตสาหกรรมมีราคาต่ำกว่าสารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดห้องปฏิบัติการมากถึง 78-86 เปอร์เซ็นต์

5. การนำผลวิจัยไปใช้

จากผลการทดสอบ และเปรียบเทียบคุณสมบัติสามารถนำการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากสารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดอุตสาหกรรมไปประยุกต์ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ในทางปฏิบัติ และงานวิจัยหาวิธีการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมสำหรับการใช้งานจริง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบคุณต่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีวรา สุวรรณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้คำปรึกษา และข้อแนะนำในหัวข้องานวิจัยนี้ และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงานวิจัย และให้การสนับสนุนทุนการศึกษาผู้ช่วยสอน ผู้ช่วยวิจัย (TA&RA) ทำให้การทำวิจัยสำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15-1. กรุงเทพฯ.

[2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2549). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมไฮดรอกไซด์ มอก. 150-2549. กรุงแทพฯ.

[3] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2560). *วัสดุจีโอโพลิเมอร์*. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

[4] Abdollahnejad, Z., Pacheco-Torgal, F., Félix, T., Tahri, W., & Aguiar, J. B. (2015). Mix design, properties and cost analysis of fly ash-based geopolymer foam. Construction and Building Materials, 80, 18-30.

[5] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of Materials Science, 42(9), 2917-2933.

[6] McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., & Corder, G. D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. Journal of cleaner production, 19(9-10), 1080-1090.

[7] Phair, J., & Van Deventer, J. (2001). Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers. Minerals Engineering, 14(3), 289-304.

[8] Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications: Elsevier.