

บทความ: จีโอพอลิเมอร์...ทางเลือกใหม่สู่อุตสาหกรรมการ

ก่อสร้าง

วราพร วงษ์เจริญสมบัติ, วีระวรรณ เฉลิมสกุลกิจ, นุตา ศุภคต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การอ้างอิง: วราพร วงษ์เจริญสมบัติ, วีระวรรณ เฉลิมสกุลกิจ, นุตา ศุภคต. (2563). จีโอพอลิเมอร์...ทางเลือกใหม่สู่อุตสาหกรรมการก่อสร้าง. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 24 (ฉบับที่ 1).

บทนำ

การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรส่งผลให้เกิดการขยายตัวของอุตสาหกรรมการก่อสร้าง โดยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์หรือปูนซีเมนต์ทั่วไปซึ่งเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความแข็งแรงคงทน โดยในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ต้องใช้ความร้อนในการเผามากถึง 1400 องศาเซลเซียส และในการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 1 ตัน จะสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) 0.96 ตันสู่บรรยากาศ (Gartner, 2004) รวมไปถึงอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ยังได้ปล่อยก๊าซกำมะถันออกไซด์ (SO₃) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) อีกด้วย ซึ่งก๊าซเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effects) และเกิดฝนกรดอีกด้วย (Rashad & Zeedan, 2011) นอกจากนี้กรมควบคุมมลพิษ (2560) รายงานว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศไทย มาจากอุตสาหกรรมซีเมนต์มากเป็นอันดับหนึ่ง คิดเป็นสัดส่วนถึงร้อยละ 75 ซึ่งหมายความว่า ถ้าลดการผลิตซีเมนต์ได้บางส่วน จะสามารถช่วยลดปริมาณการผลิต CO₂ ซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้ด้วย ดังนั้นการหาวัสดุที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มาประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างเพื่อลดการใช้พลังงานและลดปริมาณการเกิดก๊าซเรือนกระจก จีโอพอลิเมอร์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารละลายต่างความเข้มข้นสูงและสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของอะลูมินา (Alumina) และซิลิกา (Silica) เป็นหลัก ซึ่งสารตั้งต้นสามารถได้จากธรรมชาติหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ อาทิ ถ้ำลอยจากโรงงานไฟฟ้า ถ้ำกลบจากการเผาข้าวหรือกลบเพื่อทำถ่าน เป็นต้น (Hassan et al., 2019) โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ที่เกิด

จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมีความแข็งแรง สามารถก่อตัว และมีความเสถียร รวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยในกระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้พลังงานน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Neupane, 2016) นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์ยังมีคุณสมบัติที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในหลายประการ เช่น มีคุณสมบัติในการตรึงโลหะที่ดี (Zhang et al, 2008) มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง (Cheng & Chiu, 2003) มีการแข็งตัวที่รวดเร็วและมีความแข็งแรงที่ดี (Lee & Deventer, 2002) มีการทนกรดและซัลเฟตที่ดี มีการหดตัวต่ำ ใช้พลังงานต่ำในการผลิต และมีราคาถูก (Ariffin et al., 2013) นอกจากนี้ประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างแล้ว จีโอพอลิเมอร์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านอื่นๆ ได้แก่ การบำบัดของเสีย การพิสูจน์อักษรไฟ การก่อสร้างวิศวกรรมทหารและใช้เป็นวัสดุชีวภาพ (Apithanyasai, 2018)

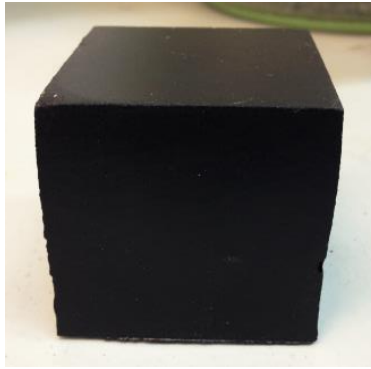
บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้อ่านได้รู้จักวัสดุจีโอพอลิเมอร์ รวมถึงแนวทางการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในอนาคต

จีโอพอลิเมอร์คืออะไร

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1970 โดยศาสตราจารย์โจเซฟ เดวิดตอฟ (Prof. Joseph Davidovits) นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส โดยจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ของสารตั้งต้นที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก (Hassan et al., 2019) ได้แก่ ดินขาวเผา (Metakaolin) เถ้าลอย (Fly ash) หรือ เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ซึ่งสารตั้งต้นดังกล่าวอาจผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การบด หรือ การเผา เพื่อเพิ่มความสามารถของวัสดุในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) และถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายต่างๆที่มีความเข้มข้นสูง ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อชะอะลูมินาและซิลิกาออกมาจากสารตั้งต้น แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้จีโอพอลิเมอร์สามารถก่อตัวและให้กำลังอัดได้ (พีริช ธเนศฐิติวัชร, 2558)



(ก) อิฐจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและกากซีปูน (Sirikingkaw, 2015)



(ข) อิฐจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยและกากซีปูน (Siruekratana, 2015)

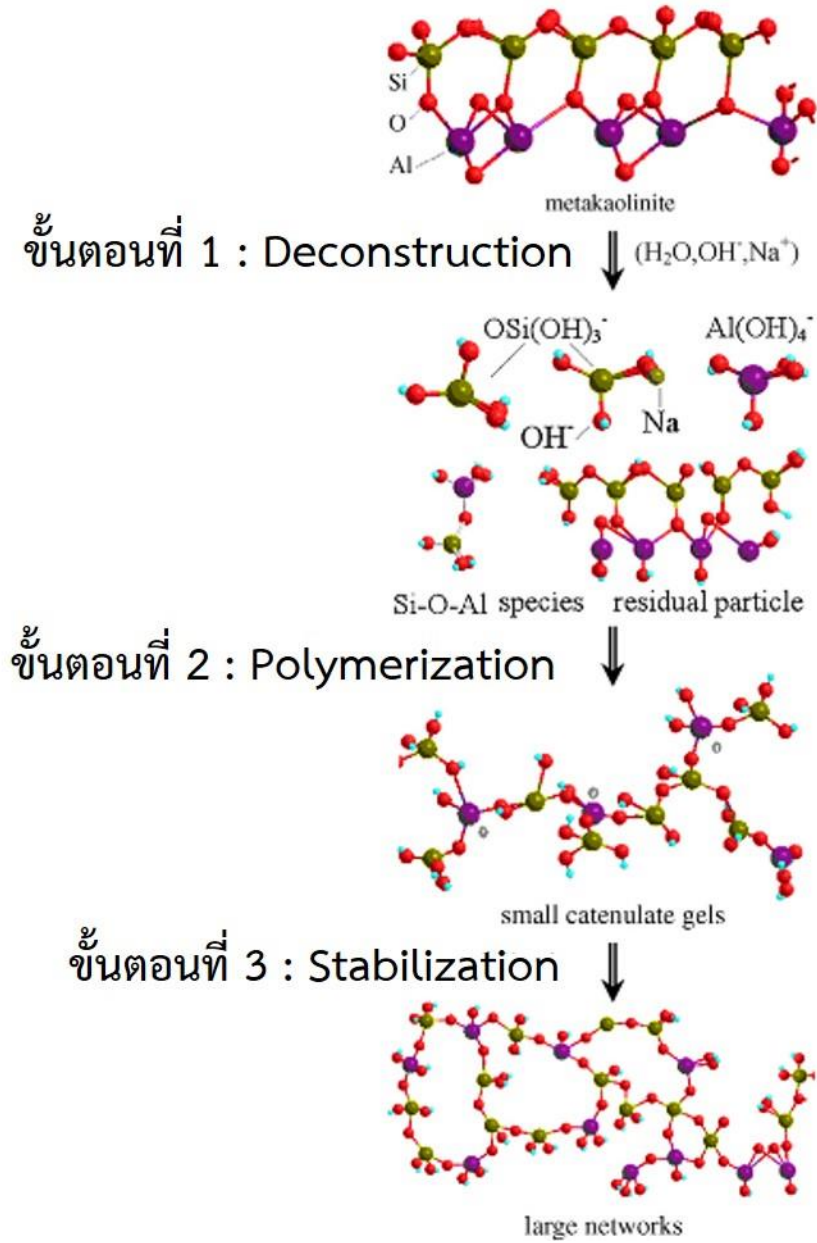


(ค) อิฐจีโอพอลิเมอร์จากกากซีเหล็กและกากซีปูน (Apithanyasai, 2016)



(ง) อิฐจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันและกากขี้ปูน (Dontriros, 2016)

โดยปฏิกิริยาในการเกิดจีโอพอลิเมอร์เป็นกระบวนการที่ปล่อยความร้อนออกมา (Exothermic process) แบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ในขั้นตอนแรกคือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Deconstruction) เป็นการก่อตัวของเครือข่ายอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ซึ่งทำให้เกิดโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างรูปแบบอสัณฐานสามมิติ (Amorphous) ขั้นตอนที่สองคือการเกิดพอลิเมอร์โซล (Polymerization) ก่อให้เกิดโครงสร้างแบบเจลของจีโอพอลิเมอร์จากอะลูมิเนียมและซิลิเกตในสารตั้งต้นกับสารละลายต่าง และขั้นตอนสุดท้ายคือการคงรูป (Stabilization) โดยเกิดขึ้นหลังจากการเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมงในช่วงอุณหภูมิคงที่ ทำให้เครือข่ายของจีโอพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเจลขนาดเล็กถูกเปลี่ยนเป็นเครือข่ายขนาดใหญ่ จากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างนี้เอง ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความเสถียรมากขึ้น (Yip et al., 2005) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization process)

(Yao et al., 2009)

สารตั้งต้นที่ใช้ในการทำจีโอพอลิเมอร์สามารถนำมาจากธรรมชาติ เช่น หินบะซอลต์ (Basalt) และดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นต้น หรือจากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมและการเกษตร เช่น เถ้าลอย (Fly ash) ทราายจากการหลอมโลหะ (Waste Foundry Sand) และตะกรันจากการหลอมเหล็ก (Electric arc furnace slag) เป็น

ต้น โดยคุณสมบัติจากสารตั้งต้นที่กล่าวมานี้ มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกาออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ จึงได้มีการนำสารตั้งต้นไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ แสดงได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์ ดินขาวเผา แก้วลอย ทราจาจากการหลอมโลหะ และตะกรันจากการหลอมเหล็ก

องค์ประกอบทางเคมี	สารตั้งต้น (%)				
	หินบะซอลต์ (Bredikhin et al., 2017)	ดินขาวเผา (Rovnanik, 2010)	แก้วลอย (Apithanyasai, 2018)	ทราจาจากการหลอมโลหะ (Apithanyasai, 2018)	ตะกรันจากการหลอมเหล็ก (Apithanyasai, 2018)
SiO ₂	49.88	55.01	38.0	78.81	8-18
Al ₂ O ₃	10.09	40.94	19.0	6.32	3-10
CaO ₂	9.35	0.14	20.0	1.88	25-30

งานวิจัยที่เกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์

Freidin (2007) ได้ศึกษาการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากแก้วลอย 100% และเถ้าหนัก 100% โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายต่างและบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน พบว่า ส่วนผสมของอิฐจีโอพอลิเมอร์สามารถผลิตวัสดุก่อสร้างคอนกรีตได้ตามมาตรฐานอิสราเอลสำหรับคอนกรีตซีเมนต์ทั่วไป นอกจากนี้ Chindaprasirt และ Rattanasak (2017) ศึกษาการใช้แก้วลอยผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยนำไปบ่มด้วยความร้อน พบว่า การบ่มด้วยความร้อนช่วยเพิ่มการสร้างเครือข่าย Si-O-Al ของจีโอพอลิเมอร์และพบว่าอิฐจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มด้วยอุณหภูมิห้องมีความแข็งแรงเทียบเท่ากับอิฐจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มด้วยความร้อน และจากการศึกษาของ Huseien และคณะ (2018) ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าปาล์มน้ำมันและตะกรันจากการหลอมเหล็ก พบว่า ค่าการทนแรงอัดมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานตาม ASTM C109 (การทดสอบค่าการทนแรงอัดของก้อนคอนกรีต) (ASTM International, 2016) โดยมีค่าการทนแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 70.2 MPa นอกจากนี้ พบว่าจีโอพอลิเมอร์จากตะกรันจากการหลอมเหล็ก แก้วลอย ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และทรายธรรมชาติ มีค่าการทนแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยทราจาจากการหลอมโลหะ 60% ซึ่งมีค่าการทนแรงอัดเท่ากับ 48.5 MPa (Bhardwaj & Kumar 2019) และจากการศึกษาของ Apithanyasai (2018) พบว่า อิฐจีโอพอลิเมอร์

ผลิตจากทรายจากการหลอมโลหะร่วมกับเถ้าลอยและตะกรันจากการหลอมเหล็กที่อัตราส่วน 40:30:30 ให้ค่าการทนแรงอัดสูงสุด (25.76 MPa) นอกจากนี้ Rovnaník (2010) ได้นำดินขาวที่เป็นสารตั้งต้นจากธรรมชาติมาผลิตจีโอพอลิเมอร์ พบว่า การบ่มที่อุณหภูมิ 10 °C เป็นระยะเวลา 28 วัน จะมีค่าการทนแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 62 MPa และจากการศึกษาของ Timakul (2016) พบว่า เมื่อนำใยหินบะซอลต์มาเพิ่มลงในจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบหลัก ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีค่าการทนแรงอัดเพิ่มขึ้น งานวิจัยข้างต้นสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 งานวิจัยเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์

ลำดับที่	สารตั้งต้น	สารละลายต่าง	ขนาดอิฐ	สภาพการบ่ม	ค่าการทนแรงอัด	อ้างอิง
1	เถ้าลอยและเถ้าหนัก	Na_2SiO_3	40 mm x 57 mm	อุณหภูมิห้อง (20-30 °C) เป็นเวลา 28 วัน	15.6 MPa (มาตรฐาน Met Israeli สำหรับคอนกรีตซีเมนต์ทั่วไป)	(Freidin 2007)
2	เถ้าลอย	8 M NaOH	แม่พิมพ์พลาสติก ขนาดเล็ก	เก็บที่ 25±2 °C เป็นเวลา 1 เดือน	35.7 MPa	(Chindaprasirt & Rattanasak 2017)
3	เถ้าน้ำมันปาล์ม (30%) และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (70%)	Na_2SiO_3 และ 4 M NaOH	50 mm x 50 mm x 50 mm	อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	70.2 MPa ที่ 28 วัน	(Husseien et al. 2018)
4	ทรายจากการหลอมโลหะ (60%), ทรายธรรมชาติ (40%) และผงประสาน (ตะกรันจากการหลอมเหล็ก/เถ้าลอย + ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์)	Na_2SiO_3 และ 14 M NaOH	100 mm x 100 mm x 100 mm	อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน	48.5 Mpa	(Bhardwaj & Kumar 2019)
5	ทรายจากการหลอมโลหะ, เถ้าลอยถ่านหิน และตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า(40:30:30)	Na_2SiO_3 และ 10 M NaOH	5 cm x 5 cm x 5 cm	อุณหภูมิโดยรอบเป็นเวลา 28 วัน	25.76 Mpa	(Apithanyasai 2018)
6	ดินขาว	Na_2SiO_3 และ NaOH	40 x 40 x 160 mm	10, 20, 40, 60 และ 80 °C เป็นเวลา 1, 3, 7 และ 28 วัน	62 MPa	(Rovnanik 2010)
7	เถ้าลอย และใยหินบะซอลต์	Na_2SiO_3 และ 5 M NaOH	50 mm x 50 mm x 50 mm	อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง	48 MPa	(Timakul 2016)

จากตารางงานวิจัยข้างต้น พบว่าการทำจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลายต่างที่มาจากโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะส่งผลให้อิฐจีโอพอลิเมอร์มีค่าการทนแรงอัดมากกว่า จีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการเติมโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่มากขึ้นจะเป็นเพิ่มซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ทำให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาและจับตัวกันได้อย่างรวดเร็ว (ณัฐ มา กุล และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ, 2556) ซึ่งแนวทางการศึกษาเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์ในอนาคต ควรมุ่งเน้นไปที่ การปรับปรุงความแข็งแรงและความทนทานของอิฐจีโอพอลิเมอร์ รวมถึงควรมีการพิจารณาการตรวจสอบอิทธิพล จากสารตั้งต้นและสารละลายต่างที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่ออิฐจีโอพอลิเมอร์ เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้ งาน (Amran, 2019)

บทสรุป

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีการหดตัวต่ำ ใช้พลังงานต่ำในการผลิต และมีราคาถูก โดยในการผลิตอิฐจีโอพอลิเมอร์ ตั้งแต่กระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ การผลิต การนำไปใช้งานของอิฐจีโอพอลิเมอร์ พบว่ามีความคุ้มค่ามากกว่าการผลิตอิฐคอนกรีต รวมถึงยังมีการนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้ แต่จีโอพอลิเมอร์ มีค่าการดูดซึมน้ำค่อนข้างสูง ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการใช้งาน อาจส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง นอกจากนี้จีโอ พอลิเมอร์ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่ายเมื่อโดนความร้อน หรืออยู่ในสถานะที่มีความชื้นสูง ดังนั้นการเพิ่มวัสดุ ปอโซโซลาน อาทิเช่น แถ่ลอย ตะกรันถลุงเหล็ก ทราเยจากการหลอมโลหะ ลงไปในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจึง สามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีต เพิ่มค่าการทนแรงอัด ช่วยเพิ่มการทนกรดของคอนกรีต และช่วยลดการดูดซึมน้ำของคอนกรีตอีกด้วย นอกจากนี้อิฐจีโอพอลิเมอร์มี ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าอิฐทั่วไป และสามารถเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมได้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2562, ธันวาคม 24). ความสำเร็จในการจัดการมลพิษของประเทศไทย. [ออนไลน์]. สืบค้น

จาก http://www.pcd.go.th/info_serv/pol_suc_ash.html

ณัฐ งามกุล และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ. (2556). สมบัติจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แก้ลอมภายใต้การบ่มด้วยพลังงาน

ไมโครเวฟ : อิทธิพลของแหล่งแก้ลอมและอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH). วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 36(1), 99-125.

พีรัช ธเนศฐิติวัชร. (2558). *คุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมฝุ่นอิฐฉนวนทนไฟ*. (วิทยานิพนธ์ปริญญา

มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์).

Amran, M.Y.H., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., El-Zeadani, M. (2019). Clean production and

properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*. 251,119679.

Apithanyasai, S. (2018). *Utilization of waste foundry sand with fly ash and electric arc furnace*

slag for geopolymer brick production, (The Degree of Master of Science, Chulalongkorn University).

Ariffin, M.A.M., Bhutta, M.A.R., Hussin, M.W., Tahir, M.M., Aziah, N. (2013). Sulfuric acid resistance of

blended ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 43,80-86.

ASTM International. (2019, December 24). ASTM C109 / C109M - 16a. [Website]. Retrieved

<https://www.astm.org/Standards/C109>

Bhardwaj, B., Kumar, P. (2019). Comparative study of geopolymer and alkali activated slag concrete

comprising waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, 209, 555-565.

Bredikhin, P., Kadykova, Y., Burmistrov, I., Yudinseva, T., Ilinykh, I., Kupava, A. (2016). Preparation

of Basalt Incorporated Polyethylene Composite with Enhanced Mechanical Properties for Various Application. *MATEC Web of Conferences*, 96, 1-5.

Cheng, T.W., Chiu, J.P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace

slag. *Minerals Engineering*, 16(3), 205-210.

- Chindaprasirt, P., Rattanasak, U. (2017). Characterization of the high-calcium fly ash geopolymer mortar with hot-weather curing system for sustainable application. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2317-2324.
- Dontriros, S. (2016). *Utilization of concrete residue with palm oil fuel ash for geopolymer brick production*. (The Degree of Bachelor of Environmental Science, Chulalongkorn University).
- Freidin, C. (2007). Cementless pressed blocks from waste products of coal-firing power station. *Construction and Building Materials*, 21(1), 12-18.
- Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to low-CO₂ cement. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489-1498.
- Hassan, A., Arif, M., Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production*, 223, 704-728.
- Husseien, F.G., Mohammad, I., Mahmood, Md.T., Jahangir, M., Khalid, A.N.H., Mohammad, A.A., Ahmed, A.H., Noor, N.S. (2018). Synergism between palm oil fuel ash and slag: Production of environmental-friendly alkali activated mortars with enhanced properties. *Construction and Building Materials*, 170, 235-244.
- Lee, W.K.W., Deventer, V.J.S.J. (2002). The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211(2-3), 115-126.
- Neupane, K. (2016). Fly ash and GGBFS based powder-activated geopolymer binders: A viable sustainable alternative of portland cement in concrete industry. *Mechanics of Materials*, 103, 110-122.
- Rashad, M.A., Zeedan, R.S. (2010). The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3098-3107.

- Rovnanik, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176-1183.
- Sirikingkaew, S. (2015). *Development of geopolymer facing bricks from synergistic use of fly ash (FA) and concrete residue (CR)*. (The Degree of Bachelor of Environmental Science, Chulalongkorn University).
- Siruekratana, S. (2015). *Development of geopolymer bricks from synergistic use of bagasse ash and concrete residue*. (The Degree of Bachelor of Environmental Science, Chulalongkorn University).
- Timakul, P., Rattanaprasit, W., Aungkavattana, P. (2016). Improving compressive strength of fly ash based geopolymer composites by basalt fibers addition. *Ceramics International*. 42,6288-6295.
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., Chen, Y. (2009). Geopolymerization process of alkalimetakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493(1-2), 49-54.
- Yip, C.K., Lukey, G.C., Deventer, V.J.S.J.. (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1688-1697.
- Zhang, J., Provis, L.J., Feng, D., Deventer, V.S.J.J. (2008). Geopolymers for immobilization of Cr⁶⁺, Cd²⁺, and Pb²⁺. *Journal of Hazardous Materials*, 157(2-3), 587-598.