การศึกษากลสมบัติด้านกำลังของจีโอพอลิเมอร์ผสมถ่านเปลือกกล้วยน้ำวา

A Study of Mechanical Properties of Geopolymer Mortar with Banana Peel Charcoal

ไตรทศ ขำสุวรรณ[1], ภาคภูมิ มงคลสังข์[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธาสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

E-mail address: trithos@siam.edu, phakphumm@yahoo.com,

บทคัดย่อ

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่เป็นทางเลือกสำหรับใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์และก่อให้เกิด CO_2 น้อยมาก โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่นของสารอัคคาไลที่มีความเข้มข้นสูง และออกไซด์ของซิลิกอนและอลูมิเนียม กลายเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ และเมื่อนำมาผสมกับผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวา ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งในผลผลิตทางเกษตรกรรมพืชผลกล้วยน้ำวา จึงได้ศึกษาวิจัยการนำมาผสมเพิ่มที่อัตราส่วนที่ออกแบบเริ่มต้นไว้ เพื่อศึกษากลสมบัติต่างๆ สำหรับตั้งต้นการนำไปใช้ต่อยอดทางอุตสาหกรรมการก่อสร้าง โดยในการนำผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวามาผสมกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ในอัตราส่วนผสมเพิ่มที่เปอร์เซนต์ร้อยละ 0, 5, 10, และ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งออกแบบอัตราส่วนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สัดส่วนเถ้าลอยร้อยละ 50 เปอร์เซนต์ ผสมกับอัตราส่วนผสมระหว่าง สารโซเดียมซิลิเกต 1 ส่วน กับสารโซเดียมไฮดรอไซด์ 12 โมลาร์ 1 ส่วน รวมกันเป็นเปอร์เซนต์ร้อยละ 50 ของทั้งหมด และผสมกับทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ในอัตราส่วนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้า 1 ส่วนต่อทราย 2 ส่วน โดยน้ำหนัก แล้วนำไปทดสอบค่ากลสมบัติ และทดสอบด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) และ Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDS) พบว่าผลการศึกษากลสมบัติด้านกำลังของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมกับผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านกำลังรับแรงอัด,กำลังรับแรงดัด และค่าอัตราส่วนของการดูดซึมน้ำ ได้ในอัตราส่วนผสมเพิ่มที่เหมาะสม

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์, ซีเมนต์, เปลือกกล้วน้ำวา, เถ้าลอย, งานก่อสร้าง

Abstract

Geopolymer is a new alternative material for construction that does not contain cement and produces very little CO_2. Geopolymer was caused by the reaction of geopolymerization of high concentrations of alkali substances and oxides of silicon and aluminum that can transformed into a strong structural material. Therefore it is an alternative material that can be used to replace cement. When mixed with charcoal powder of banana peel which is waste in agricultural products form banana plants. This study is mixing with geopolymer with charcoal powder banana peel at 0, 5, 10, and 15% by weight for testing a mechanical properties. We used a ratio for fly ash 50% and the mixed with solution 1 part sodium silicate and 1 part of 12 molar sodium hydroxide into 50% by total weight. Last process, we mixed geopolymer part with river sand that passing through sieve no.16 in ratio of geopolymer 1 part per river sand 2 part by weight. Also we were tested the mechanical properties and testing both powder with scanning electron microscope (SEM) and Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDS). We found that charcoal powder banana peel mixed with geopolymer can improved the efficiency of compression and flexural strength and water absorption in an appropriate ratio.

Keywords: Geopolymer, Cement, banana peel, fly ash, Construction

1. คำนำ

ปัจจุบันความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของอุตสาหกรรมการก่อสร้างเป็นดัชนีชี้วัดทิศทางการพัฒนาของประเทศไทย ความจำเป็นต่อการพัฒนาในด้านนวัตกรรมทางวัสดุของการก่อสร้าง จึงมีประโยชน์อย่างยิ่ง เพื่อความคุ้มค่าและลดความสิ้นเปลืองในต้นทุนการผลิต สองคล้องตามนโยบายของรัฐบาลที่ต้องการนำพาประเทศไทยสู่โมเดล Thailand 4.0 กับบทบาทของการพัฒนาอุตสาหกรรมการก่อสร้างที่ส่งผลต่อทิศทางการพัฒนาประเทศในกลุ่มวัสดุซีเมนต์เป็นวัสดุที่สำคัญอย่างยิ่งกับการก่อสร้าง สำหรับแนวความคิดการนำเอาผลิตภัณฑ์พืชผลทางการเกษตรเพื่อมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด เป็นองค์ความรู้ที่มีความเหมาะสมสำหรับการพัฒนาประเทศที่ จำเป็นต้องพึ่งพาภาคการเกษตร และประยุกต์สู่ภาคอุตสหกรรมเพื่อนำไปสู่การสร้างนวัตกรรมของประเทศต่อไป

สำหรับในกลุ่มพืชสวน/พืชไร่ กล้วยน้ำวาจัดว่ามีผลผลิตในการเพาะปลูกเป็นจำนวนมากในพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทย ดังนั้น การบริโภคกล้วยน้ำวาจึงมีปริมาณเป็นจำนวนมากโดยทั่วไปของทุกพื้นที่ใน

ประเทศ เปลือกกล้วยน้ำวา ซึ่งเป็นของที่เหลือจากผลผลิตในกล้วยน้ำวา จึงไม่เป็นที่ต้องการในการนำไปใช้ประโยชน์ใดๆต่อเนื่อง กล่าวได้ว่าเปลือกกล้วยน้ำวาจึงเป็นรูปแบบของขยะของเสียที่นำไปกำจัดทิ้ง ดังนี้ การนำเปลือกกล้วยน้ำวามาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์และสร้างมูลค่าให้กับเปลือกกล้วยน้ำวาเหล่านั้น จึงเป็นการศึกษาและวิจัยเพื่อการพัฒนา ในการทดสอบและทดลองผลผลิตจากเปลือกกล้วยน้ำวามาแปรรูปเป็นผงถ่านเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการก่อสร้างและด้านอุตสาหกรรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้อง จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ช่วยสร้างมูลค่าของเปลือกกล้วยน้ำวาให้มีประโยชน์มากขึ้น และยังเป็นการช่วยลดปริมาณของเสียและขยะที่เกิดจากเปลือกกล้วยน้ำวาที่ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างนวัตกรรมทางวัสดุใหม่ให้เกิดขึ้นและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

การศึกษาและประยุกต์ใช้ผงถ่านเปลือกกล้วยในวัสดุจีโอพอลิเมอร์สำหรับการก่อสร้าง เช่น การนำมาเป็นส่วนผสมปูนฉาบ ปูนก่อ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ ที่มีผลจากการผลิตที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน นอกจากนี้ คุณสมบัติของเปลือกกล้วย ยังสามารถมีผลต้านทานเชื้อแบคทีเรียบางชนิดได้ และเมื่อนำมาให้ความร้อนจนเป็นเศษถ่าน จะสามารถมีสรรพคุณในการ ดูดกลิ่น ฟอกอากาศ และทำให้ซีเมนต์ที่ได้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น สำหรับการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลสมบัติที่เหมาะสมของผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาที่นำมาผสมในวัสดุจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้า ให้ได้คุณสมบัติที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานต่อการนำไปใช้งาน ต่อไป

2. การออกแบบวิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ ประกอบด้วย เถ้าลอยจากโรงงานผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง, เถ้าเปลือกกล้วยน้ำวา แสดงในรูปที่ 1 สารโซเดียมซิลิเกต, สารโซเดียมไฮดรอไซด์ 15 Molar และ ทรายแม่น้ำ ร่อนผ่านกระแกรงเบอร์ 16 แสดงวิธีการเตรียมวัสดุที่ใช้การทำจีโอพอลิเมอร์ในรูปที่ 2

ในกรอบการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ใช้เถ้าลอยจากโรงงานผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง มีค่าองค์ประกอบตามตารางที่ 1 และใช้ผงถ่านเปลือกกล้วยที่ผ่านการอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส บดเป็นผงละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีค่าองค์ประกอบตามตารางที่ 2 ซึ่งมาตรฐานของการผสมซีเมนต์มอร์ต้าอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM และทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด, แรงดัด และการดูดซึม อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM เช่นกัน ค่าอัตราส่วนของจีโอพอลิเมอร์ที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติทางองค์ประกอบเคมีของของผงเปลือกถ่านด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) และ Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDS) เพื่อศึกษาอิทธิพลของเคมีธาตุที่อาจจะส่งผลต่อกลสมบัติของก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ การทดสอบค่ากำลังรับแรงต่างๆ เฉลี่ยโดยก้อนตัวอย่างทดสอบอย่างละ 5 ตัวอย่าง อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C109 และ ASTM C1609

รูปที่ 1 แสดงกายภาพของผงเถ้าลอยแม่เมาะจ.ลำปาง และผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวา ที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 2 แสดงการเตรียมส่วนผสมกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของเถ้าลอยและทรายแม่น้ำ

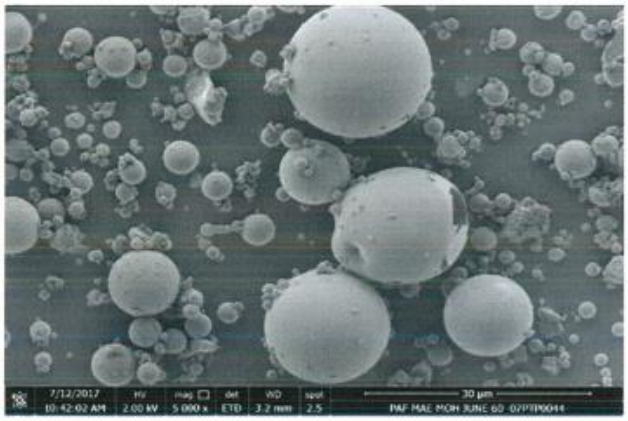
	Fly Ash	Sand
Physical properties		
Specific gravity	2.77	2.56
Absorption (%)		1.21
Moisture content (%)	0.06	0.47
Voids (%)		34.6
Fineness modulus		2.76
Blaine fineness (cm^2/g)	2,580	-
Median particle size (micron)		-
Retained on sieve number 325 (%)		-
Chemical composition (%)		
Silicon dioxide (SiO_2)	26.96	92.86
Aluminum oxide (Al_2O_3)	11.84	3.17
Iron oxide (Fe_2O_3)	10.36	0.27
Calcium oxide (CaO)	39.40	0.55
Magnesium oxide (MgO)	2.88	0.49
Potassium oxide (K_2O)	1.30	0.32
Sodium oxide (Na_2O)	1.30	0.42
Sulfur oxide (SO_3)	4.09	0.55
Loss on Ignition (LOI)	0.86	0.67

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนการออกแบบตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าที่ใช้ทดสอบ

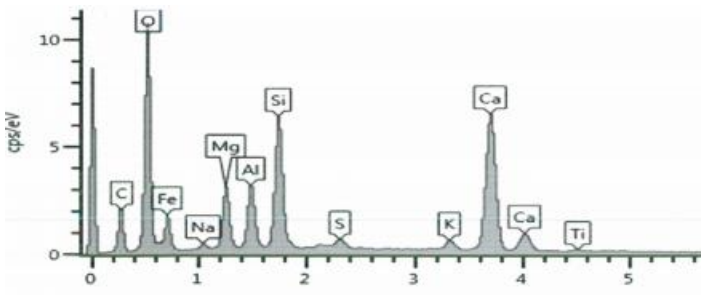
Sample	Fly ash (g.)	NaOH (g.)	Na_2SiO_3 (g.)	Sand (g.)	Banana peel ash (g.)
0% banana peel ash	1500	375	375	3000	0
5% banana peel ash	1425	375	375	3000	75
10% banana peel ash	1350	375	375	3000	150
15% banana peel ash	1275	375	375	3000	225

3. ผลการทดสอบ

จากการทดสอบผงเถ้าลอยที่ใช้เป็นส่วนผสมหลักในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ *Scanning Electron Microscope* (SEM) ผลแสดงดังรูปที่ 3 และการทดสอบด้วย Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX) ผลแสดงดังรูปที่ 4

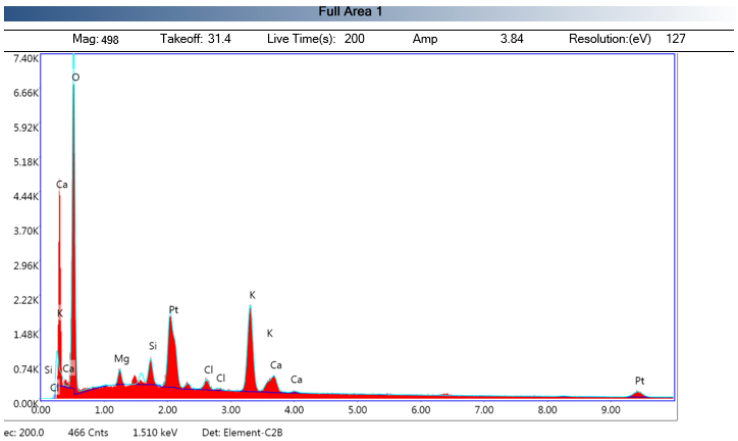


รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบผงเถ้าลอยแม่เมาะด้วยเครื่องทดสอบ *Scanning Electron Microscope* (SEM)

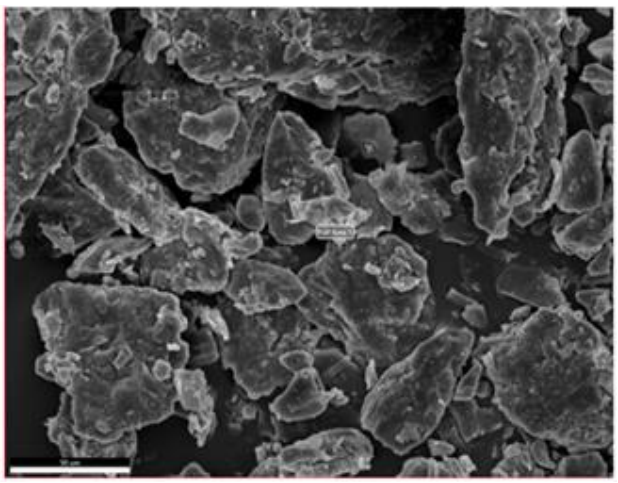


รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบผงเถ้าลอยแม่เมาะด้วยเครื่องทดสอบ Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX)

จากการทดสอบผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำว้าด้วยการใช้เครื่องทดสอบ Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX) ผลแสดงดังรูปที่ 5 และการทดสอบด้วย *Scanning Electron Microscope* (SEM) ผลแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องทดสอบ Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX)



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
O K	53.71	80.23	210.13
MgK	1.5	1.47	12.04
SiK	2.09	1.78	22.39
PtM	19.65	2.41	70.54
ClK	1.31	0.88	9.17
K K	17.63	10.78	100.95
CaK	4.11	2.45	19.03

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องทดสอบ *Scanning Electron Microscope* (SEM)

สำหรับผลการทดสอบด้านกลสมบัติต่างๆของก้อนตัวอย่างการทดสอบจีโอพอลิเมอร์ผสมกับผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาที่อัตราส่วน 5% 10% และ 15% ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงกลสมบัติค่าการรับกำลังแรงอัด แรงดัด และเปอร์เซนต์การดูดซึม ในการทดสอบ

Samples	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Absorption (%)
0%	30.48	3.31	7.83
5% with banana peel	40.94	4.17	2.81
10% with banana peel	42.32	2.78	4.46
15% with banana peel	41.80	2.62	5.13

จากผลการทดสอบสังเกตุได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาที่ 10% สามารถรับแรงอัดได้เท่ากับ 42.32 MPa. ในขณะที่ค่ากำลังรับแรงดัดของก้อนตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาที่ 5% สามารถรับแรงดัดได้เท่ากับ 4.17 MPa. ในส่วนของการเปอร์เซนต์การดูดซึมของก้อนตัวอย่างทดสอบจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมเพิ่มของผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาที่ 5% สามารถรับแรงดัดได้เท่ากับ 4.17 MPa. ในส่วนของการเปอร์เซนต์การดูดซึมของก้อนตัวอย่างทดสอบจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมเพิ่มของผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาที่ 5% 10% และ 15% ตามลำดับ โดยค่าที่มากที่สุดคืออัตราส่วนผสมที่ 0% ค่าการดูดซึมเท่ากับ 7.83%

ทั้งนี้จะสังเกตุได้ว่าการผสมเพิ่มอัตราส่วนของผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ จะช่วยทำให้การรับกำลังแรงอัดและแรงดัดเพิ่มขึ้นได้ในอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ซึ่งน่าจะเกิดจากปฏิภาคของธาตุแคลเซียมในองค์ประกอบทางเคมีของผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวา สำหรับคุณสมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมกับผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพการป้องกันการสะสมของความชื้นในวัสดุจีโอพอเมอร์ ซึ่งในอัตราส่วนที่ไม่ผสมกับผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวา พบว่ามีเปอร์เซนต์การดูดซึมน้ำที่สูงกว่าก้อนตัวอย่างที่ผสมผงถ่าน น่าจะเป็นผลจากโครงสร้างของวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีผลึกโครงสร้างทางกายภาพที่รูปทรงกลม มีช่องว่างในการผลึกตัว ดังนั้นเมื่อผสมผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวารวมเข้ากับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึกที่ค่อนข้างเรียวยาวเป็นหยักจากรูปแสดงโครงสร้างผลึกข้างต้น จึงทำให้เกิดช่องว่างในการเรียงตัวเข้ากับโครงสร้างวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้น้อย ทำให้ลดอัตราส่วนการดูดซึมน้ำได้เพิ่มในสัดส่วนที่เหมาะสม

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษา ทดลองและทดสอบ การนำเอาเปลือกกล้วยน้ำวามาเปลี่ยนสภาพเป็นผงถ่าน ที่ใช้ผสมเพิ่มเข้าไปในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ที่สัดส่วนเถ้าลอยร้อยละ 50 เปอร์เซนต์ ผสมกับอัตราส่วนผสมระหว่าง สารโซเดียมซิลิเกต 1 ส่วน กับสารโซเดียมไฮดรอไซด์ 12 โมลาร์ 1 ส่วน รวมกันเป็นเปอร์เซนต์ร้อยละ 50 ของทั้งหมด ซึ่งผสมกับทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ในอัตราส่วนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้า 1 ส่วนต่อทราย 2 ส่วน โดยน้ำหนัก ซึ่งนำไปทดสอบค่ากลสมบัติ และทดสอบด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) และ Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDS) สำหรับศึกษาโครงสร้างผลึกและส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างทั้งส่วนของผงเถ้าลอยแม่เมาะและผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวา ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของการทดสอบ พบว่า การผสมผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวา สามารถช่วยลดอัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเปอร์เซนต์ ร้อยละ 5
2. การทดสอบค่าการรับกำลังแรงอัด พบว่า การผสมผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวา สามารถเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดได้ที่อัตราส่วนการผสมผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาที่เปอร์เซนต์ ร้อยละ 10
3. การทดสอบค่าการรับกำลังแรงดัด พบว่า การผสมผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวา สามารถเพิ่มค่ากำลังรับแรงดัดได้ที่อัตราส่วนการผสมผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาที่เปอร์เซนต์ ร้อยละ 5
4. โครงสร้างผลึกของผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวา มีลักษณะโครงสร้างผลึกที่มีรูปทรงเป็นก้อนหยัก มีความเป็นเหลียมที่พื้นผิวแตกต่างจากโครงสร้างผลึกของผงเถ้าลอยจากแม่เมาะ จ.ลำปาง ที่มีรูปทรงเป็นก้อนกลม ผิวเรียบ และมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน
5. ผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวา เมื่อนำมาใช้ผสมในวัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพกลสมบัติด้านการรับกำลังได้ อย่างเหมาะสม

<u>ข้อเสนอแนะ</u>

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นของการนำเปลือกกล้วยน้ำวา มาประยุทธใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างในรูปของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ มาศึกษาหากลสมบัติด้านกำลังเบื้องต้น ซึ่งเมื่อทราบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในด้านกำลัง จึงสมควรที่จะนำไปศึกษาเพิ่มเติมในประสิทธิภาพด้านต่างๆ อาทิ เช่น การดูดกลืน การต้านแบคทีเรีย เป็นต้น เพื่อให้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ผสมผงถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาสามารถนำไปใช้งานด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าการแปรรูปจากเปลือกกล้วยน้ำวาด้วยวิธีการอบและตากแห้งเพื่อไล่ความชื้นออก แล้วจึงค่อนนำเปลือกถ่านนำมาบดเป็นผงนั้น ถ่านเปลือกกล้วยน้ำวาก่อนการบดจะให้ค่าความร้อนที่ยาวนานจากสังเกตุโดยเบื้องต้น จึงน่าที่ศึกษาวิธีการทำถ่านจากเปลือกกล้วยน้ำวา ที่เป็นการสร้างมูลค่าใช้งานในเบื้องต้นก่อนการกลายสภาพเป็นผงถ่านต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. Cement and Concrete Composites, vol. 29(3), pp. 224-229

[2] Davidovits, J. (1991). Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis, vol. 37(8), pp. 1633-1656

[3] Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology. In: Davidovits J, Davidovits R, James C , editors. Géopolymère'9 9 , Proceedings of Geopolymer Second International Conference, Saint-Quentin, pp. 9-39.

[4] ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547) เถ้าลอยในงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมคอนกรีตไทย. กรุงเทพฯ.

[5] ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549) สารจีโอพอลิเมอร์: วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2549.

[6] สัมฤทธิ์ โม้พวง วิจิตร อุดอ้าย สุรัตน์ บุญผ่อง และ เริงนภรณ์ โม้พวง. (2548) การผลิตถ่านและถ่านกัมมันต์. จากเปลือกกล้วยและก้านเครือกล้วย. รายงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

[7] ณรงค์ ฤทธิ์เทพ วรุณยุพา วิยาภรณ์ และ สุภาภรณ์ สิงห์เดช " เปลือกกล้วยและงวงเครือกล้วยน้ำว้าดิบ" พฤษภาคม 2547

[8] สมิตร ส่งพิริยะกิจ, มาณัติ ภมะราภา และ อุบลรักษณ์ รัตนศักดิ์. (2551). วัสดุจีโอโพลิเมอร์, พัฒนาเทคนิคศึกษา, ปีที่ 20, ฉบับที่ 65 (มกราคม-มีนาคม), หน้า 11-15.

[9] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2518). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมไฮดรอไซด์ มอก.150-2518. กรุงเทพฯ.

[10] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2539). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมซิลิเกตเหลว มอก.433-2539. กรุงเทพฯ.