

## KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER BERBAHAN ABU SEKAM PADI DAN LIMBAH PLASTIK PET (POLYETHYLENE TEREPHTHALATE)

Andy Suryanto<sup>1\*</sup>, Antonius<sup>1</sup>, Rita Irmawaty<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia

<sup>2</sup> Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

\*Email: [suryantoandy22@gmail.com](mailto:suryantoandy22@gmail.com)

### Abstrak

*Produksi semen merupakan suatu proses energi yang intensif dimana menghabiskan sejumlah besar energi, serta pembuatan semen meyumbang emisi CO<sub>2</sub> sekitar 7% ke atmosfer. Sekam padi bila dibakar dengan suhu tertentu menghasilkan silika amorf yang bersifat reaktif sehingga potensial digunakan sebagai bahan mikrosilika. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai kuat tekan mortar geopolimer yang menggunakan abu sekam padi dan limbah plastik PET (Polyethylene Terephthalate) sebagai material yang ramah terhadap lingkungan. Penelitian ini berbentuk uji eksperimental di laboratorium. Mortar geopolimer diproduksi dengan menggunakan fly ash, abu sekam padi sebesar 5% dari berat fly ash dan limbah plastik PET sebesar 0,25%, 0,50%, 0,75% dan 1,00% dari berat agregat halus. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kuat tekan meningkat seiring dengan penambahan plastik PET 0,25% dan mengalami penurunan dengan penambahan plastik PET hingga 1,00%. Hasil penelitian ini dapat digunakan mendukung penggunaan konstruksi dengan pemanfaatan material-material limbah atau buangan yang pada akhirnya dapat mendukung pembangunan infrastruktur nasional berbasis material limbah (green construction).*

**Kata kunci:** Abu sekam padi, Mortar geopolimer, Kuat tekan, PET

### Abstract

*Around 7% of CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere are produced during the energy-intensive and energy-consuming process of producing cement. Rice husks have the potential to be used as a micro silica material because, when burned at a specific temperature, they form reactive amorphous silica. The objective of this study is to evaluate the compressive strength value of geopolimer mortar, an environmentally friendly material made of PET (polyethylene terephthalate) waste and rice husk ash. The experiments used in this research were conducted in a laboratory. Fly ash, rice husk ash (5% of the fly ash weight), and PET plastic waste (0.25%, 0.50%, 0.75%, and 1.00% of the fine aggregate weight) are used to make geopolimer mortar. The compressive strength was conducted at 7 and 28 days. According to the study's findings, the compressive strength value increased with the addition of PET plastic up to 0.25%, but the compressive strength decreased with the addition of PET plastic up to 1.00%. The findings of this study can be applied to encourage the use of leftover or waste materials in building, which will ultimately help to support the creation of waste-based, national infrastructure (also known as "green construction").*

**Keywords:** Rice husk ash, Geopolymer mortar, Compressive strength, PET

## 1. PENDAHULUAN

Semen secara luas telah banyak digunakan sebagai material dalam mengikat agregat untuk membuat beton dan mortar. Sebagaimana diketahui bahwa produksi semen merupakan suatu proses energi yang intensif dimana menghabiskan sejumlah besar energi, serta pembuatan semen memberikan emisi CO<sub>2</sub> sekitar 7% ke atmosfer. Pembuatan 1 ton semen akan mengeluarkan emisi sekitar 1 ton CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari proses kalsinasi material kapur, dan pembakaran batu bara atau bahan bakar untuk menjaga temperatur tinggi pada mesin rotary ((Ali et al., 2011).

Selain itu untuk menghasilkan listrik maka banyak dibutuhkan batu bara yang digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik di banyak negara. Proses pembakaran batu bara memberikan hasil sampingan berupa abu terbang yang merupakan limbah. Semakin bertambahnya kebutuhan listrik maka pembakaran batu bara semakin meningkat sehingga limbah batu bara semakin meningkat. Hanya sebagian kecil dari limbah batu bara yang terserap digunakan untuk membuat semen campuran (*blended cement*), sebagian besar dibuang di kolam pembuangan. Limbah batu bara yang terus meningkat memberikan gangguan lingkungan karena kurangnya tempat pembuangan (Fennell et al., 2021).

Indonesia merupakan negara agraris penghasil bahan pangan diantaranya beras yang berasal dari tanaman padi. Limbah yang ditinggalkan tanaman padi cukup banyak yaitu batang (jerami) dan sekam. Sekam padi bila dibakar dengan suhu tertentu menghasilkan silika amorf yang bersifat reaktif sehingga potensial digunakan sebagai bahan potensial digunakan sebagai bahan mikrosilika. Pemanfaatan limbah untuk bahan konstruksi akan menunjang pengadaan bahan konstruksi, meningkatkan mutu bahan konstruksi, memberikan nilai tambah dan nilai guna limbah, menciptakan lapangan pekerjaan, dan mengurangi dampak negatif lingkungan (Somna et al., 2012).

Limbah sekam padi memiliki banyak masalah, diantaranya menyebabkan polusi udara dan dekomposisi organik alami yang menghasilkan emisi gas metana. Konversi limbah ini menjadi abu dapat menawarkan kemungkinan untuk kembali menggunakannya dalam sistem pembuatan semen (Roselló et al., 2017). Abu sekam yang dihasilkan dari pembakaran sekam diberbagai daerah menjadi limbah yang cukup besar dan sering ditemukan di persawahan setelah musim panen berakhir.

Permasalahan lain yang muncul saat ini adalah limbah plastik. Menurut *Indonesia Solid Waste Association* (2013), penggunaan material plastik di negara-negara Eropa Barat mencapai 60 kg/orang/tahun, di Amerika Serikat mencapai 80 kg/orang/tahun, dan di Inggris memproduksi sedikitnya 3 juta ton sampah plastik setiap tahun. Terdapat 57% limbah yang ditemukan di pantai berupa limbah plastik dan sebanyak 46 ribu limbah plastik mengapung di setiap mil persegi samudera bahkan kedalaman limbah plastik di samudera pasifik sudah mencapai hampir 100 meter.

Saat ini pemanfaatan material-material buangan semakin digalakkan untuk menjadi bahan baku pembuatan beton atau mortar. Salah satu yang dapat dimanfaatkan adalah abu sekam padi. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menggunakan abu sekam sebagai salah satu bahan pembuatan beton atau mortar.

Kebutuhan perumahan, perhubungan dan industri berdampak pada peningkatan kebutuhan bahan-bahan pendukungnya. Salah satu yang meningkat tajam adalah kebutuhan terhadap produk mortar. Meskipun teknologi mortar telah terbukti kemampuannya, namun karena tuntutan konstruksi terhadap kekuatan, kelenturan, keawetan, teknologi ini dapat ditingkatkan efektifitas kinerjanya dengan pendekatan:

perbaikan atas mutu beton dan penggabungan teknologi pembuatan berbagai komposit. Demikian halnya untuk pembuatan mortar yang juga menggunakan pasir dan semen yang digunakan dalam pembuatan dinding dan lantai (Çolak, 2003).

Semen Portland atau biasa disebut semen adalah bahan pengikat hidrolis berupa bubuk halus yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker (bahan ini terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis), bahan baku pembuatan semen adalah bahan-bahan yang mengandung silika, alumina, oksida besi, dan oksida-oksida lain (Caronge et al., 2022).

Dalam penyediaan bahan material seperti semen pada saat ini sering timbul banyak masalah yaitu biayanya yang relatif mahal. Sehingga mulai muncul banyak pemikiran untuk pengadaan bahan material alternatif sebagai pencampur atau bahan pengganti semen. Berbagai penelitian telah dilakukan berkaitan dengan memanfaatkan material-material pozzolan (banyak mengandung  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sebagai pengganti semen.

Berdasarkan latar belakang yang disebutkan, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai kuat tekan mortar geopolimer yang menggunakan abu sekam padi dan limbah plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*) sebagai material yang ramah terhadap lingkungan. Penelitian ini berbentuk uji eksperimental di laboratorium. Mortar geopolimer diproduksi dengan menggunakan fly ash, abu sekam padi sebesar 5% dari berat fly ash dan limbah plastik PET sebesar 0,25%, 0,50%, 0,75% dan 1,00% dari berat agregat halus. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 dan 28 hari.

## 2. MATERIAL DAN METODE

### 2.1. Abu Terbang (*Fly Ash*)

Abu terbang yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari hasil buangan limbah PLTU di Desa Punagayya Kec. Bangkala, Kab. Jenepono. Tabel 1 memperlihatkan hasil pengujian karakteristik fisik abu terbang. Diperoleh nilai berat jenis yaitu sebesar 2,1. Sedangkan untuk hasil pemeriksaan analisa saringan diperoleh nilai persentase abu terbang yang lolos saringan no. 200 adalah sebesar 90%.

**Tabel 1**  
**Karakteristik fisik abu terbang**

No.	Karakteristik Material	Hasil Pemeriksaan
1.	Berat jenis	2,1
2.	Analisa saringan	90% lolos saringan No. 200

**Tabel 2**  
**Karakteristik kimia abu terbang**

No.	Komposisi	Hasil pemeriksaan
1.	SiO <sub>2</sub> (%)	30,72
2.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	16,27
3.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	8,73
4.	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	55,72
5.	CaO (%)	26,16
6.	SO <sub>3</sub> (%)	4,22

Komposisi kandungan kimia abu terbang dari hasil uji XRD diperlihatkan pada Tabel 2. Abu terbang merupakan salah satu jenis limbah hasil pembakaran batu bara. ASTM C618-05 membagi abu terbang dalam tiga kategori, yaitu kelas N, kelas F, dan kelas C. Minimum kandungan senyawa SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> adalah 70% untuk kelas N dan kelas F, sedangkan kelas C antara 50%-70%. Berdasarkan hasil pengujian karakteristik kimia, terlihat bahwa abu terbang yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu terbang kelas C.

### 2.2. Abu Sekam Padi (*Rice Husk Ash*)

Abu sekam padi digunakan dalam penelitian ini merupakan material pozzolan yang dapat berkontribusi sebagai material pengganti semen. Abu sekam padi diperoleh dari hasil pembakaran limbah pabrik padi yang ada di Kab. Gowa. Tabel 3 dan Tabel 4 masing-masing memperlihatkan hasil pengujian karakteristik fisik dan kimia abu sekam padi.

**Tabel 3**  
**Karakteristik fisik abu sekam padi**

No.	Jenis pemeriksaan	Hasil pemeriksaan
1.	Berat jenis	2,36
2.	Penyerapan air agregat halus	172,78%

**Tabel 4**  
**Karakteristik kimia abu sekam padi**

No.	Komposisi	Hasil pemeriksaan
1.	SiO <sub>2</sub> (%)	92,93
2.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1,18
3.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,33
4.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,79
5.	CaO (%)	0,45
6.	SO <sub>3</sub> (%)	0,64
7.	K <sub>2</sub> O (%)	1,30

### 2.3. PET (*Polyethylene Terephthalate*)

Botol plastik yang akan digunakan pada penelitian ini adalah jenis PET (*Polyethylene Terephthalate*) yang merupakan salah satu dari jenis *polyethylene*, yaitu polimer yang terdiri dari rantai panjang monomer etilena (IUPAC : etena). Struktur molekul etena C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> adalah -CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-<sub>n</sub>. Dua grup CH<sub>2</sub> bersatu dengan ikatan ganda, Polietilena dibentuk melalui proses polimerisasi dari etena.

Plastik jenis PET merupakan plastik tipe cokelat yang dibuat dari minyak bumi. Sifat mekanis jenis plastik PET adalah kuat, agak tembus cahaya, mempunyai sifat fleksibilitas yang tinggi dan permukaan agak berlemak. Pada suhu 60°C sangat resisten terhadap senyawa kimia, Selain itu, plastik jenis ini mudah diproses, mudah larut dalam campuran, daya proteksi terhadap uap air tergolong baik, serta memiliki berat jenis 0,91 – 0,94 gr/cm<sup>3</sup>.

### 2.4. Agregat Halus

Tabel 5 memperlihatkan karakteristik fisik agregat halus. Agregat halus yang digunakan adalah pasir silika yang berasal dari Kabupaten Pinrang.

**Tabel 5**  
**Karakteristik fisik agregat halus**

No.	Karakteristik material	Hasil pemeriksaan
1.	Berat jenis	
	-Berat jenis kering	2,52
	-Berat jenis SSD	2,55
	-Berat jenis semu	2,60
2.	Penyerapan air (%)	1,34
3.	Kadar lumpur (%)	0,21
4.	Modulus kehalusan	2,64
5.	Berat volume (kg/l)	
	-Lepas	1,38
	-Padat	1,51
6.	Soundness test (%)	4,64
7.	Kadar organik	No. 2

### 2.5. Alkalin Aktivator

Alkalin aktivator diklasifikasikan dalam enam kelompok berdasarkan komposisi kimianya (Glukhovskiy dkk, 1980):

1. *Caustic alkalis*: MOH
2. *Non-silicate weak acid salts*:  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF dan lain-lain.
3. *Silicates*:  $M_2O.nSiO_2$
4. *Aluminates*:  $M_2O.nAl_2O_3$
5. *Alumino-silicates*:  $M_2O.nAl_2O_3.(2-6)SiO_2$
6. *Non-silicate strong acid salts*:  $M_2SO_4$

Penelitian menunjukkan alkali aktivator berupa *sodium silicate* ( $Na_2SiO_3$ ) atau *sodium silicate* dengan *sodium hydroxide* (NaOH) memberikan kekuatan yang baik pada abu terbang geopolimer. Campuran antara  $Na_2SiO_3$  dan NaOH digunakan pada penelitian ini karena telah sering digunakan oleh para peneliti sebelumnya dan memberikan hasil yang memuaskan.

### 2.6. Kuat Tekan

Berdasarkan SNI-03-6825-2002 dan SNI 1974-2011, pengujian kuat tekan yaitu memberi beban monoton secara terus menerus dengan laju yang konstan pada benda uji di antara dua batang pembebanan yang akan menciptakan tegangan tekan pada benda uji yang diberi beban. Pada pengujian kuat tekan posisi benda uji yang berbentuk silinder pada saat dibebani yaitu dalam keadaan berdiri/tegak. Tegangan tekan yang dialami benda uji lama kelamaan akan menyebabkan benda uji runtuh/hancur. Gambar 9 memperlihatkan posisi benda uji pada pengujian kuat tekan mortar.



Gambar 1. Pengujian kuat tekan

### 2.7. Rancangan Laboratorium

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental di laboratorium. Abu terbang dan abu sekam padi dikombinasikan untuk menggantikan sepenuhnya semen sebagai bahan pengikat untuk memproduksi mortar geopolimer. Abu sekam padi digunakan untuk mensubstitusi abu terbang sebesar 5,0%. Konsentrasi larutan NaOH yang digunakan

untuk mengaktifkan silika dan alumina pada abu terbang dan abu sekam padi adalah sebesar 10 M. Limbah plastik PET digunakan persentase sebesar 0,0%, 0,25%, 0,50% dan 0,75% yang mensubstitusi agregat halus. Pengujian kuat tekan digunakan untuk mengevaluasi mortar geopolimer yang dihasilkan pada umur 7 dan 28 hari. Mortar geopolimer yang dilakukan diberikan perlakuan curing udara hingga tiba waktu pengujian kuat tekan.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Rancangan Campuran Mortar Geopolimer

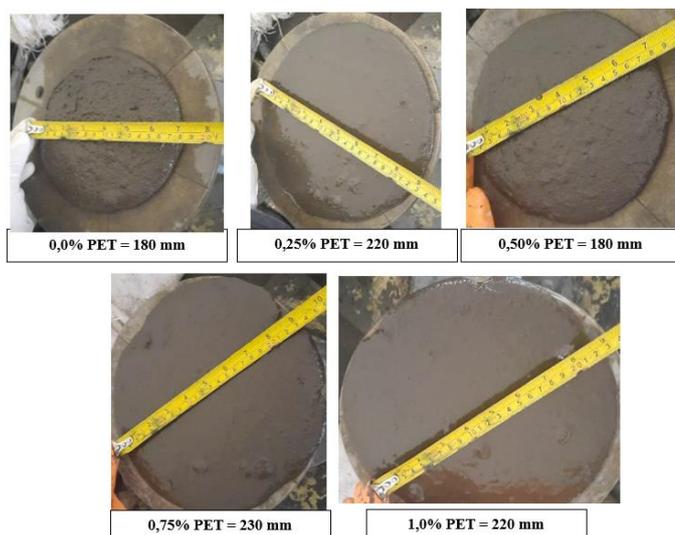
Komposisi rancang campuran mortar geopolimer dalam volume  $1\text{ m}^3$  yang terbuat dari abu terbang, abu sekam padi, agregat halus, limbah plastik PET dan alkalin aktivator diperlihatkan pada Tabel 6.

Tabel 6  
Rancangan mortar geopolimer ( $1\text{ m}^3$ )

No.	Material	Berat (kg)				
1	Abu terbang	1,544				
2	Abu sekam padi (5%)	0,081				
3	Sodium tetraborate decahydrate (1,5%)	0,023				
4	Superplasticizer (2,0%)	0,031				
5	Larutan NaOH	0,244				
6	$Na_2SiO_3$	0,488				
7	Agregat halus	1,964	1,957	1,951	1,945	1,944
8	Serat plastik PET	-	0,006	0,012	0,019	0,020
9	Kadar plastik PET (%)	0,0	0,25	0,5	0,75	1,0

### 3.2. Konsistensi Flow Mortar Geopolimer

Perilaku mortar geopolimer saat kondisi segar ditunjukkan dengan pengujian konsistensi *flow*. Gambar 2 memperlihatkan hasil pengujian *flow* untuk seluruh campuran mortar geopolimer. Terlihat *flow* mortar yang dihasilkan adalah sebesar 180 mm, 220 mm, 180 mm, 230 mm dan 220 mm untuk campuran mortar geopolimer tanpa dan menggunakan 0,25%, 0,5%, 0,75% dan 1,0% PET.



**Gambar 2. Flow mortar dalam kondisi segar**

Secara visual campuran mortar geopolimer mampu mengikat agregat halus dan serat limbah plastik PET sehingga mortar segar dapat mengalir dan menyebar secara merata tanpa akumulasi di tengah lingkaran dan tanpa terjadinya bleeding sehingga workabilitas mortar dapat terjaga.

### 3.3. Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Tabel 7 memperlihatkan hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer yang dilakukan di laboratorium. Hasil pengujian kuat tekan yang disajikan merupakan rata-rata dari 3 benda uji untuk masing-masing umur pengujian yaitu 7 dan 28 hari.

**Tabel 7**

**Kuat tekan mortar geopolimer**

No.	Serat plastik PET (%)	Kuat tekan (MPa)		Kekuatan (kuat tekan 7/28 hari × 100%) (%)
		7 hari	28 hari	
1	0,0	9,34	14,36	46,68
2	0,25	15,07	23,19	75,35
3	0,5	10,82	16,62	54,02
4	0,75	10,27	15,80	51,35
5	1,0	9,74	14,98	48,68

Kuat tekan yang dihasilkan oleh mortar geopolimer pada umur 7 hari dengan kadar serat plastik PET 0,0, 0,25, 0,5, 0,75 dan 1,0% adalah masing-masing sebesar 9,34 MPa, 15,07 MPa, 10,82 MPa, 10,27 MPa dan 9,74 MPa. Sedangkan pada umur 28 hari pada masing-masing kadar serat plastik PET adalah masing-masing sebesar 14,36 MPa, 23,19 MPa, 16,62 MPa, 15,80 MPa dan 14,98 MPa.

Kuat tekan mortar geopolimer untuk semua variasi benda uji semakin meningkat

dengan meningkatnya umur mortar geopolimer hingga pada umur 28 hari. Peningkatan kuat tekan yang terjadi pada mortar geopolimer dengan kadar serat plastik PET 0,0%, 0,25%, 0,5%, 0,75% dan 1,0% adalah masing-masing sebesar 53,74%, 53,88%, 53,60%, 53,85% dan 53,80%.

Terlihat pula bahwa kuat tekan mortar geopolimer semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kadar serat plastik PET yang digunakan hingga pada kadar 0,25% dan mengalami penurunan hingga pada kadar 1,0%. Peningkatan kuat tekan yang terjadi pada umur 7 hari dan 28 hari adalah masing-masing sebesar 61,35% dan 61,49%. Sedangkan penurunan nilai kuat tekan yang terjadi pada umur 7 dan 28 hari dengan penggunaan serat plastik PET 0,5, 0,75 dan 1,0% adalah masing-masing sebesar 28,20%; 28,33%, 31,85%; 31,87% dan 35,37%; 35,40%.

Pada semua campuran mortar geopolimer terlihat jelas bahwa dengan bertambahnya umur benda uji maka kuat tekan semakin meningkat, hal ini sama dengan perilaku mortar berbahan dasar semen Portland. Kuat tekan mortar geopolimer terus meningkat seiring dengan bertambahnya umur mortar tersebut. Peningkatan kuat tekan terjadi diakibatkan proses reaksi geopolimerisasi yang sudah terbentuk akibat reaksi antara abu terbang dan abu sekam padi dengan alkalin aktivator saat pencampuran material mortar geopolimer kemudian dilanjutkan dengan proses hidrasi berlangsung hingga umur 28 hari. Penambahan serat plastik PET dalam campuran mortar geopolimer dapat mempengaruhi nilai kuat tekan mortar geopolimer. Berdasarkan hasil pengujian diperoleh hasil bahwa penambahan serat plastik PET kedalam campuran mortar geopolimer memiliki pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan nilai kuat tekan hingga pada kadar 0,25% dan penurunan nilai kuat tekan hingga pada kadar 1,0%. Berdasarkan nilai kuat tekan yang dihasilkan dapat diketahui kuat tekan semakin menurun dengan semakin banyaknya serat plastik PET yang digunakan.

Gambar 3 memperlihatkan pola retak benda uji mortar geopolimer yang telah mengalami beban tekan. Pola retak yang terjadi memperlihatkan pola yang sama untuk semua benda uji baik tanpa dan dengan menggunakan serat plastik PET.

Terlihat pola retak yang terjadi pada benda uji mortar geopolimer secara visual adalah pola keruntuhan kerucut, geser, serta pola keruntuhan bentuk sejajar sumbu tegal (kolumnar). Hal ini

menunjukkan bahwa semua material baik abu terbang, abu sekam padi, alkalin aktivator, superplasticizer dan agregat halus serta serat plastik PET dapat menyatu dengan baik membentuk mortar geopolimer dengan pemadatan dan pengikatan yang baik.



**Gambar 3. Pola retak mortar geopolimer**

#### 4. KESIMPULAN

1. Abu terbang, abu sekam padi, alkalin aktivator, superplasticizer dan agregat halus memiliki pengikatan yang baik sehingga dapat bercampur menjadi mortar yang kemudian bersama-sama dengan serat plastik PET membentuk mortar geopolimer yang ditunjukkan dengan pemadatan yang baik. Peningkatan kuat tekan mortar geopolimer dari umur 7 hingga 28 hari menunjukkan bahwa pada proses pengikatan, pengerasan mortar dapat berjalan dengan baik akibat kompatibilitas yang baik dari semua material yang digunakan.
2. Kuat tekan mortar geopolimer semakin meningkat hingga penggunaan serat plastik PET sebesar 0,25% dan mengalami penurunan secara perlahan hingga penggunaan serat plastik PET 1,0%.
3. Hasil penelitian ini dapat digunakan mendukung penggunaan konstruksi dengan pemanfaatan material-material limbah atau buangan yang pada akhirnya dapat mendukung pembangunan infrastruktur nasional berbasis material limbah (*green construction*).

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M. B., Saidur, R., & Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Issue 5). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>
- Caronge, M. A., Tjaronge, M. W., Rahim, I. R., Irmawaty, R., & Lapian, F. E. P. (2022).

Feasibility study on the use of processed waste tea ash as cement replacement for sustainable concrete production. *Journal of Building Engineering*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104458>

Çolak, A. (2003). Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, 33(4). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01027-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01027-X)

Fennell, P. S., Davis, S. J., & Mohammed, A. (2021). Decarbonizing cement production. *Joule*, 5(6). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.011>

Roselló, J., Soriano, L., Santamarina, M. P., Akasaki, J. L., Monzó, J., & Payá, J. (2017). Rice straw ashA potential pozzolanic supplementary material for cementing systems. *Industrial Crops and Products*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.030>

Somna, R., Jaturapitakkul, C., Rattanachu, P., & Chalee, W. (2012). Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Design*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.065>