

Analisis Biaya terhadap Penggunaan Limbah Marmer dan Abu Sekam Padi pada Mortar Geopolimer

Erma Desimaliana^{1*}, Ratih Dewi Shima, Fathan Musyaffa

Submitted: 24/04/2024

Revised: 28/04/2024

Submitted: 28/04/2024

ABSTRAK

Mortar geopolimer merupakan alternatif mortar konvensional yang mengandalkan reaksi pengikatan terhadap senyawa silikat alumina anorganik dengan material *fly ash*. Harga dan komposisi material *fly ash* sangat mempengaruhi nilai biaya produksi serta kualitas mortar geopolimer di Indonesia. Oleh karena itu, komposisi material *fly ash* pada campuran mortar geopolimer perlu dikembangkan dengan teknologi substitusi material pozzolan hasil limbah lainnya untuk mengurangi biaya produksi yang masif. Penelitian secara eksperimental di laboratorium ini bertujuan untuk menganalisis biaya produksi per m³ mortar geopolimer dengan substitusi limbah marmer (LM) dan abu sekam padi (ASP) terhadap *fly ash* (FA) sebagai *binder* yang mencapai kekuatan tekan mortar konvensional tipe M sekitar 17 MPa. Variasi substitusi parsial LM dan ASP terhadap FA yaitu 0%:0%:100%; 5%:5%:90%; 10%:10%:80% dan 15%:15%:70%. Pengujian kekuatan tekan mortar dilakukan pada usia 28 hari, dengan benda uji berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar kadar substitusi parsial LM dan ASP terhadap FA ternyata kekuatan tekan mortar geopolimer mengalami penurunan tetapi masih melebihi kekuatan tekan mortar konvensional tipe M. Dari segi biaya produksi, semakin besar kadar substitusi parsial LM dan ASP terhadap FA ternyata mampu mengurangi total biaya produksi mortar geopolimer konvensional. Maka, LM dan ASP dapat direkomendasikan sebagai material alternatif substitusi FA dalam komposisi campuran mortar geopolimer dan diaplikasikan pada proyek infrastruktur di Indonesia.

Kata kunci: abu sekam padi, biaya, *fly ash*, kekuatan tekan, limbah marmer, mortar geopolimer

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya pertumbuhan di berbagai bidang seperti populasi, urbanisasi dan industrialisasi dewasa ini, juga disertai meningkatnya permintaan penyediaan infrastruktur fisik seperti bangunan, jalan dan jembatan. Pembangunan infrastruktur bangunan terutama elemen strukturalnya, umumnya menggunakan material beton. Material beton memiliki kelebihan daripada material lainnya, yaitu harganya relatif murah, serta mudah mendapatkan material penyusunnya dan kuat [1]. Beton terdiri dari campuran semen, air, agregat baik halus maupun kasar, yang mengalami reaksi hidrasi. Produksi beton konvensional biasanya memberikan dampak negatif terhadap lingkungan akibat meningkatnya CO₂ yang dihasilkan dari pembuatan semen [2], sehingga mulai diperkenalkan beton geopolimer tahun 1980-an dan selanjutnya berkembang ke banyak negara termasuk Indonesia. Beton geopolimer biasanya terdiri dari campuran material *binder* anorganik berupa *fly ash* limbah PLTU dan alkali aktivator, serta material *filler* berupa agregat yang mengalami reaksi polimerisasi. Pengaplikasian beton geopolimer pada proyek infrastruktur di Indonesia sudah ada namun masih terbatas, karena keterbatasan tidak semua daerah memiliki PLTU sehingga harga material *fly ash* relatif tinggi sehingga diperlukan alternatif material substitusi *fly ash* yang lebih ekonomis harganya.

¹ Institut Teknologi Nasional Bandung, Jl. PH.H. Mustofa No. 23, Bandung 40124

* Corresponding Author: ermadesmaliana@itenas.ac.id



Seiring juga dengan meningkatnya limbah yang dihasilkan dari pengolahan batuan marmer untuk keperluan interior, maka dapat menanggulangi permasalahan harga material *fly ash* yaitu penggantian material *fly ash* baik secara keseluruhan maupun parsial dengan substitusi limbah marmer dalam campuran mortar geopolimer. Secara umum, limbah industri marmer merupakan sisa hasil produksi yang tidak berfungsi dalam industrinya dan juga tidak memiliki nilai jual yang tinggi [3] sehingga memiliki harga material residu yang relatif rendah. Dalam sekali produksi, industri pengolahan batuan marmer mampu menghasilkan 5% sampai dengan 10% limbah marmer dari total produksi [4]. LM biasanya berupa pasir yang memiliki ukuran butiran 0,5 mm dan 5 mm, warna putih kecoklatan, permukaan tahan dan keras, serta bersih dari lempung dan lumpur sehingga dapat memberikan ikatan yang kuat [5] [6] [7]. Oleh karena itu, LM berpotensi digunakan sebagai material *binder* dalam campuran mortar geopolimer karena memiliki kandungan kalsium sebesar 98% [8].

Demikian juga dengan abu sekam padi yang merupakan limbah hasil pembakaran sekam atau kulit padi, biasanya memiliki kandungan silika lebih dari 90% [9] berkisar antara 87% sampai dengan 97% [10] sehingga dapat digunakan sebagai material pengganti *fly ash*. ASP merupakan salah satu material yang bersifat pozzolan halmana mampu menjadi unsur peningkatan kekuatan tekan mortar konvensional, karena kandungan silika yang cukup tinggi akibat penyerapan tanah [11]. Harga satuan ASP di pasaran juga relatif murah, bahkan dapat diperoleh secara gratis karena berasal dari sekam padi hasil produksi padi yang mudah ditemukan hampir di seluruh Indonesia.

Beberapa penelitian secara eksperimental mulai berinovasi mengkombinasikan teknologi substitusi *fly ash* baik secara parsial maupun keseluruhan dengan material pozzolan lain. Material pozzolan lain ini berupa material daur ulang (*recycle*) dari limbah/residu yang memiliki karakteristik yang sama seperti *fly ash* seperti abu sekam padi, limbah marmer, limbah bata ringan [12] ataupun limbah kaca [13] dalam campuran mortar geopolimer konvensional yaitu kandungan alumina (Al_2O_3) atau silika (SiO_2). Kuat tekan beton geopolimer dengan pemanfaatan limbah *fly ash* tertinggi sebesar 14,72 MPa didapatkan dari variasi perbandingan agregat dan *binder* 70%:30% [2] [14]. Kekuatan tekan mortar geopolimer kering dengan substitusi limbah marmer 10%, NaOH 10M dan metode *wet mixing* memiliki kekuatan tekan tertinggi sebesar 13,09 MPa pada umur 28 hari [15]. Mortar geopolimer lain dengan substitusi abu sekam padi 7,5%; NaOH 8 M; rasio larutan alkali aktivator 1:5 memiliki kuat tekan tertinggi sebesar 39,41 MPa pada umur 28 hari [9].

Limbah umumnya merupakan material yang tidak diinginkan, terutama jika limbah yang dihasilkan jumlahnya melimpah. LM khususnya melimpah di daerah Padalarang karena daerah penghasil batu marmer dan ASP juga di daerah Majalaya, menjadikan kedua material tersebut berpotensi untuk menghasilkan mortar geopolimer alternatif yang lebih ekonomis dengan tetap memiliki mutu yang baik. Oleh sebab itu, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh penggunaan LM dan ASP sebagai *binder* dalam campuran mortar geopolimer terhadap kekuatan tekannya, serta biaya produksinya sehingga dapat diaplikasikan pada industri konstruksi infrastruktur di Indonesia.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Geopolimer

Geopolimer merupakan senyawa silikat alumina anorganik yang disintesis dari material yang banyak mengandung silika dan alumina seperti *fly ash*, abu sekam padi, abu tebu dan lainnya [16]. Pertama kali, Prof. Joseph Davidovits memperkenalkan material geopolimer yang merupakan sintesis material alam non-organik melalui proses polimerisasi [17]. Material dasar penyusun geopolimer yaitu material yang memiliki kandungan unsur silika (Si) dan alumina (Al).

Beton Geopolimer

Beton geopolimer merupakan hasil proses dari reaksi polimerisasi material yang berasal dari alam non-organik bersifat pozzolan memiliki kandungan unsur Si dan Al yang banyak [18], dengan alkali aktivator [19] yang biasanya berupa natrium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat (Na_2SiO_3) [20]. Kandungan unsur Si dan Al seringkali dijumpai pada material buangan atau limbah hasil industri, misalnya FA yang merupakan limbah hasil pembakaran batu bara pada tungku PLTU, ASP yang merupakan limbah hasil pembakaran sekam padi, atau LM hasil pengolahan batu marmer.

Reaksi kimia yang terjadi selama proses pengikatan kandungan unsur alumina-silikat oksida dengan alkali polisilikat yaitu reaksi polimerisasi, mampu menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al yang biasanya disebut juga sebagai material geopolimer [18]. Material geopolimer ini memiliki kemampuan mengikat layaknya pasta semen pada beton konvensional. Beton geopolimer juga merupakan perpaduan antara campuran material geopolimer dengan agregat tanpa menggunakan semen. Biaya produksi beton geopolimer organik biasanya jauh lebih murah dibandingkan beton konvensional karena menggunakan material buangan/limbah hasil industri.

Mortar Geopolimer

Mortar geopolimer merupakan campuran yang tersusun dari komposisi material *filler* berupa agregat halus dan material *binder* baik berupa prekursor (yang memiliki kandungan Si atau Al) maupun alkali aktivator [12]. Mortar umumnya diaplikasikan pada pekerjaan non-struktural seperti dalam aplikasi pemasangan, plesteran, lantai dan lainnya. Mortar juga bersifat tahan lama dan tahan lama. Dalam plesteran, mortar berfungsi sebagai material perekat untuk melindungi keawetan pasangan bata, meratakan permukaan bata yang tidak rata untuk menyalurkan beban [21]. Dari segi kekuatan tekannya [22], mortar konvensional diklasifikasikan menjadi tipe M memiliki kekuatan tekan minimum 175 kg/cm^2 ; tipe N memiliki kekuatan tekan minimum 124 kg/cm^2 ; tipe S memiliki kekuatan tekan minimum $52,5 \text{ kg/cm}^2$; tipe O memiliki kekuatan tekan minimum $24,5 \text{ kg/cm}^2$; dan tipe K memiliki kekuatan tekan minimum $5,25 \text{ kg/cm}^2$.

Fly Ash (FA)

FA merupakan produk berupa limbah akibat sisa pembakaran batu bara pada PLTU yang halus dialirkan dari ruang pembakaran melalui ketel dalam bentuk semburan dan mampu ditangkap oleh sistem elektrostatis presipitator. Adapun sisa pembakaran lain yang lebih berat jatuh ke dasar tungku seringkali dikenal dengan sebutan *bottom ash* [23]. FA memiliki bentuk fisik berupa butiran halus dan bulat, halmana ukuran butirannya ($45 \mu\text{m}$) yang lebih kecil dibandingkan dengan butiran semen ($75 \mu\text{m}$) akan mampu memperkecil ruang antar partikel sehingga juga mampu meningkatkan *workability* pasta beton [24].

FA memiliki karakteristik layaknya semen, yaitu tidak berpori dan sangat ringan. *Fly ash* juga memiliki sifat pozzolanik yang bereaksi hidrasi membentuk senyawa yang bersifat mengikat [25] [26]. Menurut komposisinya, FA diklasifikasikan menjadi 3 (tiga) kelas [27] yaitu kelas C yang mengandung CaO lebih dari 10% dan berasal dari pembakaran lignit atau sub bitumen, kelas F yang mengandung CaO kurang dari 10% dan berasal dari pembakaran batu bara jenis anthracite, serta kelas N yang merupakan pozzolan alam.

Limbah Marmer (LM)

LM merupakan produk berupa limbah atau residu akibat proses pengolahan batu marmer menjadi berbagai macam bentuk kerajinan, seperti meja, patung, tegel dan lainnya. Selama proses penggergajian dan pemotongan batu marmer yang semula berukuran besar menjadi berbagai ukuran bentuk kerajinan akan diperoleh LM yang berlimpah [15] [28] [5] [29] [30] [31]. LM berupa tepung yang sangat melimpah [32], biasanya menjadi material yang tidak diinginkan karena akan berdampak buruk terhadap lingkungan jika hanya dibiarkan begitu saja pada ruangan terbuka apalagi bercampur dengan tanah. LM ini dapat digunakan kembali sebagai material alternatif lain untuk substitusi *binder fly ash* dalam pembuatan material beton geopolimer yang ramah lingkungan karena memiliki kandungan unsur kimia CaO sebesar 55,2%; SiO_2 sebesar 9,61% dan Al_2O_3 sebesar 0,06% [33].

LM juga biasanya dijual kembali oleh perusahaan pengolah batuan marmer dan gamping alam dalam bentuk eceran satuan kilogram dengan kisaran harga Rp. 1.000,00 hingga Rp. 1.500,00. Salah satu daerah penghasil dan pengolah batuan marmer terbesar di Jawa Barat yakni Padalarang Kabupaten Bandung Barat, menjual limbah hasil pengolahan batuan marmer untuk konsumsi publik seharga Rp. 1.400,00 per kg.

Abu Sekam Padi (ASP)

ASP merupakan produk berupa limbah akibat proses pembakaran sekam atau kulit padi [34], seringkali dijumpai terutama di daerah penghasil beras. ASP yang telah dibakar, bersifat pozzolanik halmana mampu meningkatkan kekuatan mortar karena memiliki kandungan unsur kimia SiO_2 sebesar 93,44%; CaO 0,72% dan Al_2O_3 sebesar 0,10% [35] [9] [36]. ASP memiliki kandungan Si yang tinggi karena mampu menyerap Si dari tanah [10]. Pemanfaatan ASP sebagai material *binder* dalam campuran beton geopolimer karena memiliki sifat pozzolan, sehingga dapat mengurangi jumlah limbah yang dihasilkan dari sekam padi serta menciptakan lingkungan yang sehat dan bersih. ASP merupakan material yang mudah dicari di pasaran terutama daerah penghasil beras. Harga material abu sekam padi per satuan kilogramnya relatif murah yakni dari rentang Rp. 1.500,00 hingga Rp. 2.000,00.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi penggunaan LM dari Padalarang Kabupaten Bandung Barat dan ASP dari Majalaya Kabupaten Bandung sebagai material substitusi, baik parsial maupun keseluruhan, terhadap *fly ash* pada campuran mortar geopolimer. Penelitian dimulai dengan melakukan kajian pustaka dari penelitian terdahulu, kemudian melakukan pengujian karakteristik material penyusun berupa material *filler* (Pasir Galunggung) dan material binder (FA, LM dan ASP) untuk mencari *mix-design* mortar geopolimer. Benda uji mortar geopolimer dibuat 3 (tiga) buah tiap variasi, kubus berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm dengan *curing* metode membran.

Metode membran merupakan metode perawatan yang paling baik untuk menjaga mutu mortar geopolimer karena kandungan airnya tidak cepat menguap akibat dibungkus dengan lapisan plastik yang kedap air. Selanjutnya, dilakukan pengujian eksperimental di laboratorium struktur Institut Teknologi Nasional Bandung yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik kuat tekan beton dan juga dilakukan analisis biaya produksi material berdasarkan *mix-design* per m^3 mortar geopolimer. Adapun hasil akhir dari penelitian ini, diharapkan dapat memberikan gambaran tentang potensi pengaplikasian mortar geopolimer dengan material berkelanjutan dalam pembangunan konstruksi infrastruktur di Kota Bandung, baik dari segi kekuatan maupun biaya produksinya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Material Penyusun Mortar Geopolimer

Dalam penelitian ini, *fly ash* kelas C yang digunakan berasal dari PLTU Paiton, Probolinggo. LM berasal dari PT Multi Marmer Alam Padalarang, Kabupaten Bandung Barat. ASP berasal dari pabrik material di Majalaya, Kabupaten Bandung. Agregat halus yaitu Pasir Galunggung berasal dari Tasikmalaya, lolos saringan no. 4 ukuran 4,75 mm dengan kondisi SSD (*Saturated Surface Dry*).

Pengujian material penyusun mortar geopolimer bertujuan untuk memenuhi standar kualitas yang ditetapkan. Tabel 1 menyajikan parameter yang diuji meliputi berat jenis, kadar lumpur dan modulus kehalusan. Baik material *binder* maupun *filler*, karakteristik materialnya berada dalam rentang standar kualitas.

Tabel 1. Hasil Pengujian Material Penyusun Mortar Geopolimer

Pengujian	Material				Standar Kualitas
	Binder			Filler	
	FA	LM	ASP	PG	
Berat Jenis (g/cm ³)	2,65	2,90	2,10	2,50	2,1 – 2,9
Kadar Lumpur (%)	-	-	-	3,20	< 5
Modulus Kehalusan	-	-	-	1,93	1,5 – 3,8

Hasil *Mix-Design* Mortar Geopolimer

Mortar geopolimer akan didesain dengan kekuatan tekan rencana yang sama seperti mortar konvensional tipe M yaitu 175 kg/m² atau setara dengan 17 MPa berdasarkan ASTM C270-10. Dalam perhitungan *mixed-design* beton geopolimer jumlah prekursor biasanya sama dengan jumlah semen dalam beton konvensional. Berdasarkan *mix-design* penelitian sebelumnya prekursor tidak akan berfungsi sebagai *binder* jika tidak dicampur dengan alkali aktivator, maka akan digunakan rasio *filler* terhadap *binder* sebesar 70%:30% [14] dengan rasio prekursor terhadap alkali aktivator 60%:40%. Sementara itu, rasio larutan alkali aktivator (NaOH:Na₂SiO₃) yang digunakan yaitu 1:3 dari berat prekursor yang digunakan dengan konsentrasi molaritas NaOH 10M [15] [29]. Tabel 2 menyajikan komposisi campuran beton geopolimer dengan material LM dan ASP sebagai substitusi parsial FA direncanakan sebagai berikut:

- Variasi 1 (FA:LM:ASP) yaitu 100%:0%:0%.
- Variasi 2 (FA:LM:ASP) yaitu 90%:5%:5%.
- Variasi 3 (FA:LM:ASP) yaitu 80%:10%:10%.
- Variasi 4 (FA:LM:ASP) yaitu 70%:15%:15%.
- Rasio larutan alkali aktivator (NaOH:Na₂SiO₃) yaitu 1:3.
- Konsentrasi molaritas NaOH 10M.

Tabel 2. Rekapitulasi *Mixed-Design* Mortar Geopolimer

Material	Variasi			
	1	2	3	4
Fly Ash (g)	65,59	59,03	52,47	45,91
Limbah Marmer (g)	0	3,59	7,18	10,77
Abu Sekam Padi (g)	0	2,59	5,18	7,77
Pasir Galunggung (g)	240,63	240,63	240,63	240,63
NaOH (g)	8,79	8,79	8,79	8,79
Na ₂ SiO ₃ (g)	29,70	29,70	29,70	29,70

Hasil Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Geopolimer

Pengujian kuat tekan mortar geopolimer dilakukan pada umur 28 hari dengan menggunakan alat *compression machine*. Dalam penelitian ini, total benda uji mortar geopolimer sebanyak 24 buah dengan setiap variasi 3 buah. Tabel 3 menyajikan nilai kuat tekan rerata setiap variasi.

Dari Tabel 4 di bawah tersaji bahwa semakin bertambah banyaknya kadar substitusi LM dan ASP pada campuran mortar geopolimer maka kekuatan tekan pada umur 28 hari mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa material LM dan ASP memberikan pengaruh yang kurang baik terhadap reaksi polimerisasi dalam campuran mortar geopolimer.

Tabel 3. Rekapitulasi Kekuatan Tekan Mortar Geopolimer

Variasi	Benda Uji	28 Hari	
		f'_c (MPa)	Rerata (MPa)
1	1	45,20	43,82
	2	42,43	
	3	33,94*	
2	1	46,87	44,75
	2	39,76*	
	3	40,17	
3	1	40,17	42,70
	2	42,45	
	3	45,27	
4	1	41,59	41,79
	2	42,04	
	3	41,74	

Analisis Biaya Produksi Mortar Geopolimer

Setelah mengetahui sifat mekanik mortar geopolimer terutama kekuatan tekannya, maka dilakukan perbandingan harga mortar geopolimer konvensional (variasi 1) dengan mortar geopolimer substitusi parsial LM dan ASP terhadap FA (variasi 2, 3, 4) berdasarkan harga material penyusun. Harga material penyusun diperoleh melalui survei lapangan seperti tersaji berikut:

- Harga Fly Ash = Rp 15.000,00/kg.
- Harga Limbah Marmer = Rp 1.400,00/kg.
- Harga Abu Sekam Padi = Rp 2.000,00/kg.
- Harga Pasir Galunggung = Rp 1.000,00/kg.
- Harga NaOH = Rp 21.000,00/kg.
- Harga Na₂SiO₃ = Rp 11.000,00/kg.

Rekapitulasi perhitungan biaya produksi setiap variasi mortar geopolimer per m³ dapat dilihat pada Tabel 4. Tabel 4 memperlihatkan bahwa nilai variasi termurah dalam satuan m³ yaitu variasi 4 sebesar Rp. 1.472.820,00. Semakin besar kadar substitusi parsial LM dan ASP sebagai *binder* terutama prekursor terhadap FA pada campuran mortar geopolimer menghasilkan biaya yang semakin murah, karena berkurangnya penggunaan FA yang memiliki harga material relatif mahal juga memberikan pengaruh terhadap total biaya produksi. Hal ini disebabkan Kota Bandung, tempat penelitian berlangsung, bukan merupakan daerah penghasil batu bara atau daerah yang dekat dengan pengguna tenaga batu bara seperti pembangkit listrik, sehingga mempengaruhi harga material FA.

Tabel 4. Rekapitulasi Perhitungan Biaya Produksi Mortar Geopolimer

Material	Harga			
	Variasi			
	1	2	3	4
Fly Ash (gr)	Rp 984.000,00	Rp 885.000,00	Rp 787.500,00	Rp 690.000,00
Limbah Marmer (g)	Rp 0,00	Rp 5.040,00	Rp 10.080,00	Rp 15.120,00
Abu Sekam Padi (g)	Rp 0,00	Rp 5.200,00	Rp 10.400,00	Rp 15.600,00
Pasir Galunggung (g)	Rp 240.600,00	Rp 240.600,00	Rp 240.600,00	Rp 240.600,00
NaOH (g)	Rp 184.800,00	Rp 184.800,00	Rp 184.800,00	Rp 184.800,00
Na ₂ SiO ₃ (g)	Rp 326.700,00	Rp 326.700,00	Rp 326.700,00	Rp 326.700,00
Total per m ³	Rp 1.736.100,00	Rp 1.647.340,00	Rp 1.560.080,00	Rp 1.472.820,00
Total per volume benda uji	Rp 240,00	Rp 226,50	Rp 214,50	Rp 202,50

Analisis biaya hanya terbatas pada biaya produksi campuran mortarnya saja, namun akan mampu menaikkan nilai ekonominya secara keseluruhan karena mortar geopolimer memiliki kemampuan untuk mempercepat pelaksanaan konstruksi infrastruktur di Indonesia. Baik substitusi parsial *fly ash* maupun secara keseluruhan dengan material bersifat pozzolan lainnya dari limbah seperti LM dan ASP sehingga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap lingkungan hidup yang berkelanjutan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil pembahasan mampu ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) *Mix-design* mortar geopolimer dengan substitusi parsial LM dan ASP sebagai *binder* terhadap FA pada penelitian ini menghasilkan kekuatan tekan lebih besar dari kekuatan tekan rencana mortar tipe M menurut ASTM C270-10 yaitu melebihi 17 MPa. Hal ini ditunjukkan bahwa pada umur 28 hari nilai kekuatan tekan mortar geopolimer terkecil pada variasi 4 sebesar 41,79 MPa. Peningkatan kadar substitusi parsial LM dan ASP ternyata tidak terlalu mempengaruhi kekuatan tekan mortar geopolimer, karena hanya mengalami penurunan sebesar 3% sampai dengan 5% (variasi 2, 3 dan 4).
- 2) Mortar geopolimer dengan substitusi parsial LM dan ASP sebagai *binder* (variasi 2, 3 dan 4) terhadap FA menghasilkan biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan mortar geopolimer konvensional (variasi 1). Hal ini dikarenakan FA di tempat penelitian berlangsung, ternyata memiliki harga material yang relatif tinggi akibat biaya transportasi karena letak tempat penelitian jauh dari PLTU, sehingga jika penggunaannya sebagai *binder* terutama prekursor menjadi lebih sedikit pada campuran mortar geopolimer akan mampu mengurangi total biaya produksi.
- 3) Variasi 4 (70%FA:15%LM:15%ASP) merupakan variasi yang paling optimum sebagai material alternatif *binder* pada campuran mortar geopolimer. Hal ini dibuktikan dari segi kekuatan tekan variasi 4 memiliki kekuatan tekan yang lebih besar dibandingkan dengan kekuatan tekan rencana mortar tipe M, serta dari segi biaya produksi memiliki harga yang paling murah.

Oleh sebab itu, LM dan ASP dapat direkomendasikan sebagai material *binder* alternatif substitusi parsial FA dalam komposisi campuran mortar geopolimer karena dari segi kekuatan melebihi kekuatan tekan rencana dan dari segi biaya mengurangi total biaya produksi serta sehingga dapat diaplikasikan pada proyek infrastruktur bangunan di Indonesia. Sebagai tindak lanjut dari penelitian ini, juga disarankan agar dilakukan analisis biaya secara keseluruhan terhadap percepatan pelaksanaan konstruksi serta pengurangan jumlah tenaga kerja dan kebutuhan alat.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] S. Priyono dan H. Agustapraja, "Limbah Bata Ringan untuk Bahan Campuran Agregat Halus terhadap Kuat Tekan pada Beton K-250," *Jurnal Teknik*, vol. 10, no. 1, pp. 23-31, 2021.
- [2] A. Kurniawan, G. Yanti dan S. Megasari, "Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Pemanfaatan Limbah Fly Ash," dalam *SENKIM: Seminar Nasional Karya Ilmiah Multidisiplin*, 2022.
- [3] A. Lestari, "Penguujian kuat tekan pada beton dengan limbah marmer sebagai substitusi agregat kasar," *Reka Buana: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, vol. 6, no. 1, pp. 61-69, 2021.
- [4] A. Amal dan W. Saputra, "Pemanfaatan Limbah Abu Marmer sebagai Filler terhadap Karakteristik Marshall pada Campuran Lapis Tipis Aspal Pasir (Latasir) B," *Media Teknik Sipil*, vol. 16, no. 2, pp. 67-78, 2019.
- [5] N. Herman, A. Fitriani dan Istiqomah, "Substitusi Semen dengan Limbah Marmer terhadap Kuat Tekan Mortar," *Jurnal Sipil KOKOH*, vol. 19, no. 1, pp. 57-68, 2021.

- [6] C. Aditya, A. Hamil dan S. Silviana, "Pemanfaatan limbah marmer dan serbuk zeolit sebagai material pada bata ringan CLC (Cellular Lightweight Concrete)," dalam *Seminar Nasional Sistem Informasi (SENASIF)*, Malang, 2017.
- [7] A. C., A. Halim dan S. Silviana, "Pemanfaatan limbah marmer dan serbuk silika pada industri bata beton pejal dan berlubang," dalam *Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri (Seniati)*, Malang, 2016.
- [8] S. Pratama dan Y. Risdianto, "Pengaruh Substitusi Fly Ash pada Bahan Pengikat Campuran Paving Block Ditinjau dari Kuat Tekan, Keausan dan Penyerapan Air," *Rekayasa Teknik Sipil*, vol. 7, no. 2, pp. 4-7, 2019.
- [9] D. Setiawan dan A. Wardhono, "Penggunaan Abu Sekam Padi sebagai Bahan Substitusi Fly Ash pada Mortar Geopolimer dengan NaOH 8 Molar ditinjau dari Kuat Tekan dan Porositas," *REKATS: Rekayasa Teknik Sipil*, vol. 7, no. 3, pp. 1-8, 2019.
- [10] Y. Sandya, Prihantono dan S. Musalamah, "Penggunaan Abu Sekam Padi Sebagai Pengganti Semen Pada Beton Geopolimer," *Geopolimer, Educational Building: Jurnal Pendidikan Teknik Bangunan dan Sipil*, vol. 5, no. 2, pp. 59-63, 2019.
- [11] S. Sudirman, "Effects of Adding Coal Ash vs Rice Husk Ash on Compressive Strength of Mortar," *Journal of Engineering, Electrical and Informatics*, vol. 4, no. 1, 2024.
- [12] N. Pratama dan E. Desimaliana, "Pengaruh Substitusi Parsial Limbah Bata Ringan terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer," *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 10, no. 1, pp. 51-59, 2024.
- [13] S. Angelika dan E. Desimaliana, "Pengaruh Substitusi Parsial Variasi Tepung Kaca terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer," *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 9, no. 2, pp. 157-166, 2023.
- [14] I. Salain, M. Wiryasa dan I. Pamungkas, "Kuat Tekan Beton Geopolimer Menggunakan Abu Terbang," *Jurnal Spektran*, vol. 24, no. 1, pp. 71-78, 2018.
- [15] D. Saldi, "Pengaruh Substitusi Limbah Marmer Terhadap Nilai Kuat Tekan Dry Geopolymer Mortar dengan Metode Wet Mixing Berbahan Dasar Abu Terbang dan NaOH 10 M," *REKATS: Rekayasa Teknik Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 1-15, 2020.
- [16] A. Lisantono dan Y. Purnandi, "Pengaruh Penambahan Kapur Terhadap Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton Geopolimer," dalam *Konferensi Nasional Teknik Sipil 4 (KoNTekS 4)*, Denpasar, 2010.
- [17] A. Kusuma, S. Wallah dan S. Dapas, "Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Berbasis Abu Terbang," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 2, no. 7, 2014.
- [18] C. Sondakh, S. Gumalang dan M. Pinori, "Analisa Biaya Pemanfaatan Fly Ash Sebagai Material Dasar Beton Self Compacting Geopolymer," *PADUKARSA*, vol. 10, no. 1, pp. 158-168, 158-168.
- [19] R. E. Triantono dan A. Wardhono, "Pengaruh Substitusi Limbah Marmer Terhadap Nilai Kuat Tekan Dry Geopolymer Mortar Metode Wet Mixing dengan Berbahan Dasar Abu Terbang Dan NaOH 8 M," 2018. [Online].
- [20] N. Salwatul, "Pengaruh Rasio Sodium Hidroksida dengan Sodium Silikat Pada Mortar Geopolymer Berbahan Dasar Abu terbang Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Geser Pada Aplikasi Spesi Batu Bata," *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, vol. 2, 2017.
- [21] R. Wesno, S. Wallah dan R. Pandaleke, "Kuat Tekan Mortar dengan Menggunakan Abu Terbang (Fly Ash) Asal PLTU Amurang sebagai Substitusi Parsial Semen," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 2, no. 5, pp. 252-259, 2019.
- [22] ASTM C270-10, "Standard Specification for Mortar for Unit Masonry," 2010. [Online]. Available: [chrome-](https://www.astm.org/standards/C270)

- extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.masonryinstitute.com/wp-content/uploads/ASTM_C270-10.pdf.
- [23] M. Thomas, "Optimalizing the Use of Fly Ash in Concrete," 1 Juli 2007. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/236509473_Optimizing_the_use_of_fly_ash_in_concrete.
- [24] I. Muthoharoh, R. Agustin dan E. Sunarnasih, "Self-Healing Capability Beton dengan Fly Ash sebagai Pengganti Sebagian Semen ditinjau dari Workability, Kuat Tekan dan Permeabilitas," 2014. [Online]. Available: <https://jurnal.fkip.uns.ac.id/index.php/ptb/article/view/3629>.
- [25] H. Suprpto dan Mardiono, "Pengaruh Pemanfaatan Abu Terbang (Fly Ash) dalam Beton Mutu Tinggi," *Jurnal Ilmiah Desain & Konstruksi*, vol. 9, no. 1, 2010.
- [26] N. Agustini dan P. Aryastana, "Pengaruh Penambahan Abu Sekam dan Serbuk Kaca terhadap Kuat Tekan dan Berat Jenis Beton," *PADURAKSA*, vol. 6, no. 2, pp. 190-202, 2017.
- [27] ASTM C618-12, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," 2012. [Online]. Available: <https://www.astm.org/c0618-22.html>.
- [28] D. Wijayanti dan A. Wardhono, "Pengaruh Substitusi Limbah Marmer Terhadap Nilai Kuat Tekan Dry Geopolymer Mortar dengan Metode Wet Mixing Berbahan Dasar Abu Terbang dan NaOH 12 M," *REKATS: Rekayasa Teknik Sipil*, vol. 8, no. 1, 2020.
- [29] I. A. Arifin dan A. Wardhono, "Pengaruh Substitusi Limbah Marmer pada Fly Ash terhadap Kuat Tekan dan Porositas Beton Geopolimer pada Molaritas 10M," *REKATS: Rekayasa Teknik Sipil*, vol. 1, no. 1, pp. 16-23, 2018.
- [30] B. Fitriahsari dan A. Wardhono, "Pengaruh Substitusi Fly Ash dengan Limbah Marmer terhadap Kuat Tekan dan Porositas Beton Geopolimer pada NaOH 15M," *REKATS: Rekayasa Teknik Sipil*, vol. 1, no. 1, pp. 10-15, 2018.
- [31] R. Triantono dan A. Wardhono, "Pengaruh Substitusi Limbah Marmer terhadap Nilai Kuat Tekan Dry Geopolymer Mortar Metode Wet Mixing dengan Berbahan Dasar Abu Terbang dan NaOH 8M," *REKATS: Rekayasa Teknik Sipil*, vol. 7, no. 3, pp. 1-5, 2019.
- [32] W. Kushartomo dan D. Sari, "Sifat Mekanis Beton Normal dengan Campuran Tepung Marmer," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 24, no. 1, pp. 71-78, 2018.
- [33] S. Kurniawati dan A. Titisari, "Rekomendasi Pemanfaatan Marmer Berdasarkan Karakteristiknya," *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 5, no. 2, pp. 251-266, 2019.
- [34] A. Sefta, A. Adiguna dan R. Kustam, "Pengaruh Penambahan Sabut Kelapa dan Abu Sekam Padi terhadap Kuat Geser Tanah," *Jurnal Deformasi*, vol. 6, no. 1, pp. 42-50, 2021.
- [35] A. Latief, "Kuat Tarik langsung, Kuat Tarik Lentur, Susut, dan Density Mortar Campuran Semen, Abu Sekam Padi, dan Precious Slag Ball," 2010. [Online]. Available: <http://lib.ui.ac.id/opac/ui/detail.jsp?id=20292407&lokasi=lokal>.
- [36] C. Yusnar, R. Ruhana dan Y. Sulaiman, "Mechanical Properties Beton Agropolimer Abu Sekam Padi dengan Aktivator Sodium Silikat dan Sodium Hidroksida," *Inersia: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 9, no. 2, pp. 23-32, 2017.