

Pemanfaatan Limbah Kaca Sebagai Substitusi *Filler* Dalam Campuran Mortar Geopolimer

FARIS GILAR SANDIKA¹, ERMA DESIMALIANA^{2*}, RATIH DEWI SHIMA²

¹ Mahasiswa Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

² Dosen Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Email: ermadesmaliana@itenas.ac.id

ABSTRAK

Limbah kaca merupakan material anorganik yang tidak dapat didaur ulang secara alami, sehingga perlu penanganan yang tepat supaya tidak mencemari lingkungan. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan kembali limbah kaca sebagai alternatif material konstruksi, seperti material pengisi (filler) dalam campuran beton geopolimer karena memiliki kandungan kimia silika yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemanfaatan limbah kaca sebagai filler dalam campuran mortar geopolimer. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium. Pengujian kuat tekan mortar geopolimer dengan variasi penambahan limbah kaca sebesar 0%, 25%, 50% dan 75% terhadap agregat halus. Limbah kaca yang digunakan yaitu lolos saringan no. 4. Rasio larutan alkali aktivator (NaOH:Na₂SiO₃) yaitu 1:3 dengan konsentrasi 10M. Hasil kuat tekan maksimum rata-rata didapatkan pada substitusi limbah kaca 25%; yaitu 37,39 MPa melampaui kuat tekan rencana mortar tipe M 17,16 MPa berdasarkan ASTM C 270. Walaupun nilai tersebut menurun 14,81% dari variasi 0% sebagai mortar geopolimer kontrol.

Kata kunci: limbah kaca, substitusi filler, kuat tekan, mortar geopolimer

ABSTRACT

Glass waste is an inorganic material that cannot be recycled naturally, so it needs proper handling so as not to pollute the environment. This can be done by reusing glass waste as an alternative construction material, such as filler material in geopolymer concrete mixtures because it has a high silica chemical content. This study aims to determine the effect of utilizing glass waste as a filler in a geopolymer mortar mixture. The study was conducted experimentally in the laboratory. Testing the compressive strength of geopolymer mortar with variations in the addition of glass waste of 0%, 25%, 50% and 75% to fine aggregate. The glass waste used is that which passes sieve no. 4. The ratio of alkali activator solution (NaOH: Na₂SiO₃) is 1: 3 with a concentration of 10M. The average maximum compressive strength results were obtained at 25% glass waste substitution; namely 37.39 MPa exceeding the planned compressive strength of type M mortar 17.16 MPa based on ASTM C 270. Although the value decreased by 14.81% from the 0% variation as a control geopolymer mortar.

Keywords: glass waste, filler substitution, compressive strength, geopolymer mortar

1. PENDAHULUAN

Limbah kaca seringkali dijumpai dalam kehidupan sehari-hari berupa produk manufaktur seperti kaca lembaran, botol ataupun barang pecah belah. Pemanfaatan limbah kaca merupakan salah satu bentuk penggunaan kembali (*reuse*) yang bertujuan untuk mengurangi dampak buruk limbah kaca ketika dibuang terhadap lingkungan. Limbah kaca memiliki sifat *pozzolan* yang tinggi seiring dengan halusnya butiran limbah kaca [38]. Limbah kaca dapat digunakan sebagai material substitusi, baik sebagian maupun seluruh pasir dalam campuran mortar geopolimer. Keuntungan pemanfaatan limbah kaca sebagai material konstruksi dapat mengurangi emisi karbon. Limbah kaca merupakan material yang paling sesuai sebagai substitusi agregat halus karena kandungan unsur silika yang tinggi. Kekerasan dari limbah kaca juga menjadikan mortar geopolimer tahan terhadap abrasi. Hal ini dikarenakan limbah kaca dapat memperbaiki komposisi campuran mortar geopolimer sehingga memiliki kuat tekan yang tinggi tanpa perlu menggunakan bahan tambah *superplasticizer*. Limbah kaca memiliki kandungan unsur silika (Si) sebesar 71% - 74%. Limbah kaca berupa serbuk ternyata memiliki kelebihan dibandingkan material pengisi pori lainnya [15]. Limbah kaca berpotensi sebagai material pengisi (*filler*) dan juga material pengikat (*binder*) karena sifat pozzolaniknya.

Beton geopolimer merupakan inovasi material konstruksi ramah lingkungan yang semakin berkembang pesat dewasa ini. Pemanfaatan material *reuse* ataupun *recycle* dari hasil sampingan limbah industri, seperti limbah kaca, berpotensi sebagai material konstruksi ramah lingkungan [28]. Keuntungan beton geopolimer tidak hanya terletak pada kuat tekannya yang tinggi, melainkan juga pada aspek keberlanjutan. Beton geopolimer biasanya tidak menggunakan semen sama sekali, tetapi menggunakan material pengikat (*binder*) dengan kandungan unsur silika dan alumina yang tinggi seperti abu terbang atau abu sekam padi [9]. Komposisi material penyusun beton geopolimer biasanya terdiri dari material pengisi (*filler*) berupa pasir dan material pengikat (*binder*) berupa abu terbang, serta larutan alkali aktivator kombinasi antara NaOH:Na₂SiO₃. Material lainnya yang dapat dijadikan sebagai *binder* dalam beton geopolimer yaitu limbah bata ringan [30], limbah marmer [9].

Dari penelitian terdahulu sudah dilakukan pemanfaatan limbah kaca untuk pengganti sebagian material penyusun beton normal [26]. Penelitian lainnya juga menjadikan limbah kaca sebagai bahan tambah dalam pembuatan batako [27]. Limbah kaca sudah dimanfaatkan sebagai substitusi agregat kasar [4][20][36]. Akan tetapi, limbah kaca ternyata paling sesuai jika dimanfaatkan sebagai substitusi sebagian agregat halus dan semen [18]. Hal ini dikarenakan komposisi kimia dan sifat fisik limbah kaca itu sendiri [25]. Limbah kaca juga dapat digunakan sebagai substitusi semen [10][16][18][21][25][31][34][39-40]. Pemanfaatan pecahan limbah kaca sebagai substitusi sebagian agregat halus ternyata cukup baik karena mampu menambah kuat tekan beton normal dengan variasi tertentu [1-2][12][22-24][29][32-33][37]. Limbah kaca juga mulai dimanfaatkan sebagai substitusi sebagian abu terbang pada beton geopolimer [3], halmana beton geopolimer tersebut diaplikasikan sebagai *paving block* [35].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi parsial agregat halus dengan limbah kaca terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Kuat tekan mortar geopolimer rencana yaitu 17,16 MPa sesuai dengan ASTM C 270. Adapun dari hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang lebih tepat mengenai kadar substitusi limbah kaca yang optimal sebagai material *filler* dalam campuran mortar geopolimer.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan. Tahapan tersebut adalah tahap persiapan limbah kaca sebagai substitusi parsial agregat halus. Limbah kaca yang digunakan berasal dari

pabrik di daerah Banjarnegara Kabupaten Bandung, yang dihancurkan menjadi pecahan kaca lolos saringan no. 4. Abu terbang yang digunakan tipe F dari PLTU Paiton Probolinggo, sebelumnya sebagai material pengikat abu terbang dikeringkan menggunakan oven terlebih dahulu. Selanjutnya abu terbang akan diayak menggunakan saringan no. 200. Agregat halus berupa pasir Galunggung yang telah lolos saringan no. 4 menerus sampai no. 100. Larutan alkali aktivator terdiri dari campuran larutan NaOH berkonsentrasi 10M dan larutan Na₂SiO₃ dengan rasio 1:3. Tahapan lainnya yaitu uji kualitas pasir, limbah kaca dan abu terbang. Pengujian kualitas material ini meliputi berat jenis dan absorpsi, kadar lumpur, berat isi serta analisis saringan.

Tahapan selanjutnya yaitu *mixed design* mortar geopolimer dengan menggunakan pendekatan rasio berat jenis. Hal ini dikarenakan tidak terdapat standar yang merumuskan *mixed design* mortar geopolimer baik ACI maupun SNI. Oleh karena itu, perlu dilakukan *trial mix* dari penelitian-penelitian terdahulu untuk memperoleh kisaran *mixed design* dengan *workability* yang baik.

Lalu, tahapan berikutnya adalah pembuatan sampel mortar geopolimer dengan metode perawatan *membrane curing*. Setelah sampel dibuat, lalu dilakukan tahapan pengujian kuat tekan mortar geopolimer pada umur 7, 14 dan 28 hari. Pengujian kuat tekan mortar geopolimer terhadap sampel berbentuk kubus 5 cm x 5 cm x 5 cm sesuai dengan SNI 03-6852-2002. Sampel mortar geopolimer berjumlah 3 (tiga) buah untuk setiap variasi substitusi limbah kaca 0%, 25%, 50% dan 75% sebagai *filler*, sehingga total sampel sekitar 36 buah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Uji Karakteristik Agregat Halus

Uji karakteristik agregat halus bertujuan untuk memeriksa kualitas material yang digunakan sudah memenuhi standar. Pengujian ini meliputi berat jenis dan absorpsi berdasarkan SNI 03-1969-1990, berat isi berdasarkan SNI 03-1801-1993, kadar lumpur berdasarkan SNI 03-2461-2002, serta analisis saringan berdasarkan SNI 03-1968-1990. Hasil pengujian kualitas material agregat halus disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Uji Kualitas Material Agregat Halus

No.	Pengujian	Nilai Rata-Rata	Syarat	Keterangan
1	Berat Jenis			
	- Bulk <i>specific gravity</i> kondisi kering [gr/cm ³]	2,42	2,1 – 2,9	Terpenuhi
	- Penyerapan [%]	3,44	< 5	Terpenuhi
2	Berat Isi			
	- Kondisi padat [gr/cm ³]	1,48	1,2 – 1,75	Terpenuhi
	- Kondisi gembur [gr/cm ³]	1,39	1,2 – 1,75	Terpenuhi
3	Kadar Lumpur [%]	3,2	< 5	Terpenuhi
4	Modulus Kehalusan [%]	1,92	1,5 – 3,8	Terpenuhi

Dari **Tabel 1** di atas, didapatkan hasil pengujian berat jenis kering agregat halus telah memenuhi syarat SNI karena nilai yang didapatkan berada pada rentang yang disyaratkan. Adapun untuk hasil pengujian berat isi agregat halus terdapat selisih 0,09 gr/cm³ antara berat isi padat terhadap berat isi gembur. Baik berat isi kondisi padat maupun berat isi kondisi gembur telah memenuhi syarat SNI karena nilai yang didapatkan berada pada rentang yang disyaratkan.

Pengujian kadar lumpur dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kandungan lumpur pada agregat halus. Dari hasil pengujian kadar lumpur dinyatakan bahwa kandungan lumpur telah memenuhi syarat SNI karena nilainya kurang dari yang disyaratkan. Di samping itu, juga

dilakukan pengujian analisis saringan agregat halus yang bertujuan untuk mengetahui kehalusan butirannya. Saringan yang digunakan yaitu no. 4, no. 8, no. 16, no. 30, no. 50 dan no. 100. Dari hasil pengujian analisis saringan dinyatakan bahwa nilai modulus kehalusan butiran agregat halus telah memenuhi syarat SNI karena nilainya berada dalam rentang yang disyaratkan.

3.2 Hasil Uji Karakteristik Limbah Kaca

Uji karakteristik limbah kaca juga bertujuan untuk memeriksa kualitas material yang digunakan sudah memenuhi standar. Pengujian ini meliputi berat jenis dan absorpsi berdasarkan SNI 03-1969-1990, serta analisis saringan berdasarkan SNI 03-1968-1990. Hasil pengujian kualitas material limbah kaca disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil Uji Kualitas Material Limbah Kaca

No.	Pengujian	Nilai Rata-Rata	Syarat	Keterangan
1	Berat Jenis			
	- Bulk <i>specific gravity</i> kondisi kering [gr/cm ³]	2,70	2,1 – 2,9	Terpenuhi
	- Penyerapan [%]	1,21	< 5	Terpenuhi
2	Modulus Kehalusan [%]	1,85	1,5 – 3,8	Terpenuhi

Dari **Tabel 2** di atas, didapatkan hasil pengujian berat jenis kering limbah kaca telah memenuhi syarat SNI karena nilai yang didapatkan berada pada rentang yang disyaratkan. Selain itu, juga dilakukan pengujian analisis saringan limbah yang bertujuan untuk mengetahui kehalusan butirannya untuk mensubstitusi parsial agregat halus. Saringan yang digunakan sama seperti pengujian karakteristik material sebelumnya yaitu no. 4, no. 8, no. 16, no. 30, no. 50 dan no. 100. Dari hasil pengujian analisis saringan dinyatakan bahwa nilai modulus kehalusan butiran limbah kaca telah memenuhi syarat SNI karena nilainya berada dalam rentang yang disyaratkan.

3.3 Hasil Uji Karakteristik Abu Terbang

Pengujian karakteristik abu terbang bertujuan untuk memeriksa kualitas material yang digunakan sudah memenuhi standar, karena abu terbang memiliki peranan sangat penting dalam campuran mortar geopolimer. Pengujian ini meliputi berat jenis saja. Hasil pengujian kualitas material abu terbang disajikan pada **Tabel 3**.

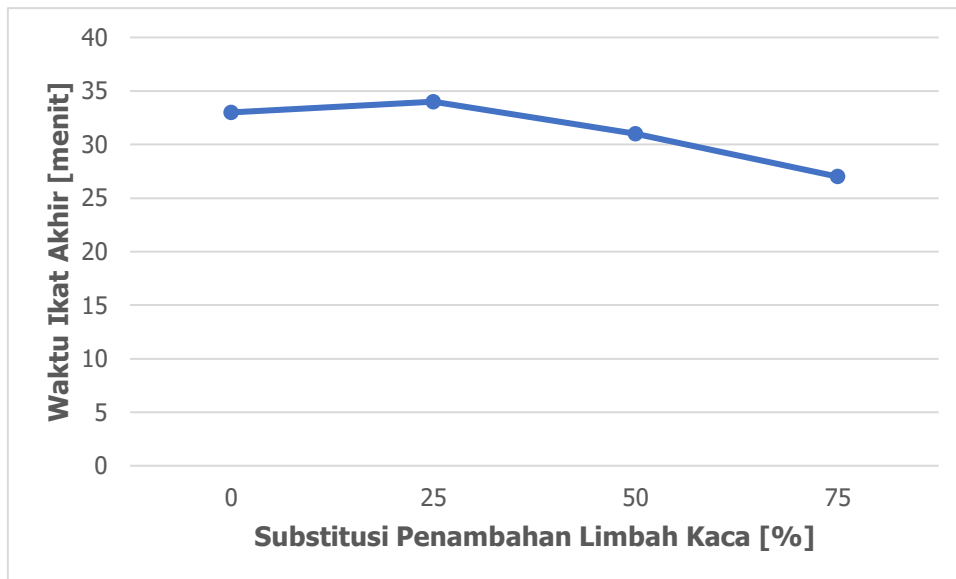
Tabel 3. Hasil Pengujian Kualitas Material Abu Terbang

No.	Pengujian	Nilai Rata-Rata	Syarat	Keterangan
1	Berat Jenis [gr/cm ³]	2,65	2,1 – 2,9	Terpenuhi

Dari **Tabel 3** di atas, nilai berat jenis abu terbang akan digunakan dalam perhitungan *mixed design* campuran mortar geopolimer agar diketahui besarnya kebutuhan abu terbang dalam pembuatan benda uji.

3.4 Hasil Uji Waktu Ikat Akhir

Uji waktu ikat akhir bertujuan untuk menentukan perbandingan komposisi yang paling efektif dalam pembuatan sampel mortar geopolimer. Hal ini dilakukan sebagai pertimbangan bahwa abu terbang bereaksi polimerisasi sangat cepat dengan larutan alkali aktivator, sehingga berpengaruh terhadap waktu pengerasan dan kekentalan campuran mortar geopolimer. Dengan kata lain, pengujian ini dilakukan agar mendapatkan komposisi campuran mortar geopolimer ideal yaitu benda uji dapat dicetak dengan waktu ikat yang tidak terlalu cepat. Hasil pengujian waktu ikat tersaji pada **Gambar 1**.

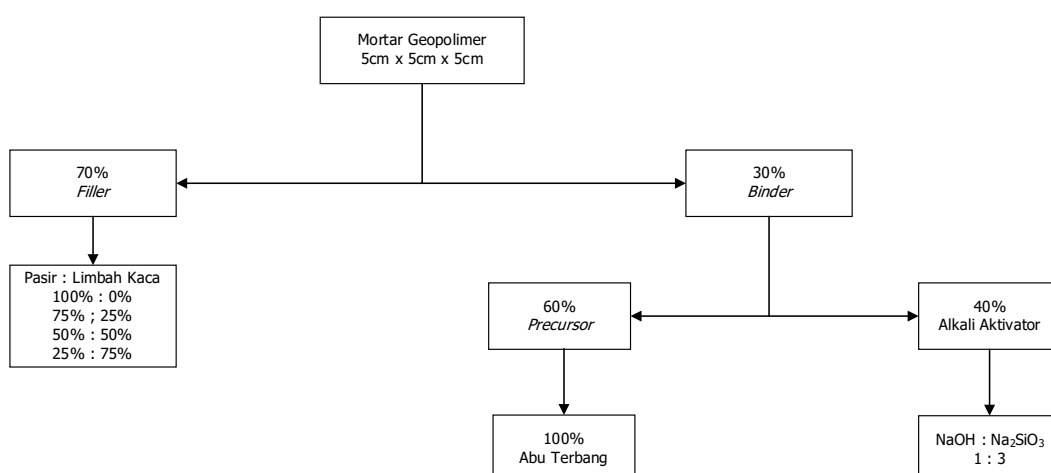


Gambar 1. Hasil pengujian waktu ikat akhir terhadap substitusi penambahan limbah kaca 0%, 25%, 50%, 75%

Berdasarkan **Gambar 1**, waktu ikat akhir yang paling lama terdapat pada substitusi penambahan limbah kaca 25% terhadap agregat halus yaitu sebesar ± 34 menit.

3.5 Komposisi *Mixed Design* Mortar Geopolimer

Pada penelitian ini komposisi material penyusun campuran geopolimer terdiri dari agregat halus, limbah kaca, abu terbang dan larutan alkali aktivator. Larutan alkali aktivator merupakan campuran antara larutan NaOH berkonsentrasi 10M dengan larutan Na_2SiO_3 , halmana rasio perbandingan campurannya yaitu 1:3. Larutan ini berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi dalam pembuatan mortar geopolimer. Komposisi antara material pengisi dan material pengikat yaitu 70%:30%, sedangkan komposisi material prekursor dan larutan alkali aktivator yaitu 60%:40%. Hal tersebut tersaji pada **Gambar 2**. Adapun proporsi mixed design campuran mortar geopolimer tersaji pada Tabel 4, sedangkan proporsi mixed design campuran mortar geopolimer dengan faktor koreksi tersaji pada Tabel 5.



Gambar 2. Komposisi mortar geopolimer

Tabel 5. Proporsi Campuran Mortar Geopolimer

Variasi	Filler		Binder	Alkali Aktivator		Total [gr]
	Agregat Halus [gr]	Limbah Kaca [gr]	Abu Terbang [gr]	NaOH [gr]	Na ₂ SiO ₃ [gr]	
1 (100%AH:0%LK)	218,75	0	59,63	7,99	27,00	313,36
2 (75%AH:25%LK)	164,06	59,50	59,63	7,99	27,00	318,18
3 (50%AH:50%LK)	109,38	119,00	59,63	7,99	27,00	322,99
4 (25%AH:75%LK)	54,69	178,50	59,63	7,99	27,00	327,80

Tabel 6. Proporsi Campuran Mortar Geopolimer dengan Faktor Koreksi

Variasi	Filler		Binder	Alkali Aktivator		Total [gr]
	Agregat Halus [gr]	Limbah Kaca [gr]	Abu Terbang [gr]	NaOH [gr]	Na ₂ SiO ₃ [gr]	
1 (100%AH:0%LK)	240,63	0	65,59	8,79	29,70	344,70
2 (75%AH:25%LK)	180,47	65,45	65,59	8,79	29,70	349,99
3 (50%AH:50%LK)	120,31	130,90	65,59	8,79	29,70	355,29
4 (25%AH:75%LK)	60,16	196,35	65,59	8,79	29,70	360,58

3.6 Metode Perawatan Mortar Geopolimer dengan *Curing Membrane*

Metode perawatan terhadap sampel mortar geopolimer yaitu *curing membrane*. Sampel mortar geopolimer setelah dikeluarkan dari cetakan kemudian dimasukkan ke dalam plastik membran, dengan tujuan untuk menjaga suhu mortar geopolimer agar tidak terlalu tinggi saat mengeras dan untuk mencegah kehilangan air. **Gambar 3** menyajikan sampel mortar geopolimer dengan *curing membrane*.



Gambar 3. Metode *curing membrane* pada mortar geopolimer

3.7 Hasil Uji Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Pengujian kuat tekan mortar geopolimer dilakukan pada umur 7, 14 dan 28 hari pada benda uji berbentuk kubus 5 cm x 5 cm x 5 cm dengan menggunakan CTM (*compression testing machine*) seperti tersaji pada **Gambar 4**. Pengujian kuat tekan dilakukan di Laboratorium Institut Teknologi Nasional Bandung. Kuat tekan rencana mortar geopolimer sebesar 175

kg/cm² atau setara 17,16 MPa. Hal ini mengacu pada ASTM C 270 perihal mortar tipe M yang memiliki kekuatan tekan sebesar 175 kg/cm². Mortar tipe M ini biasanya diaplikasikan untuk dinding, pasangan fondasi dan adukan.



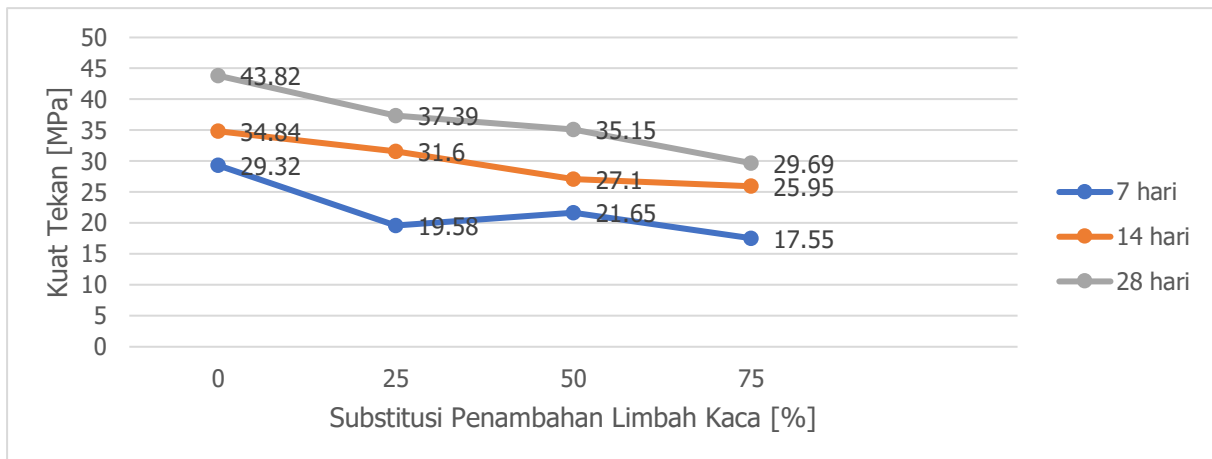
Gambar 4. Compression testing machine

Tabel 7 menyajikan hasil uji kuat tekan rata-rata maksimum mortar geopolimer pada umur 7, 14 dan 28 hari.

Tabel 8. Pemeriksaan Berat pada Struktur

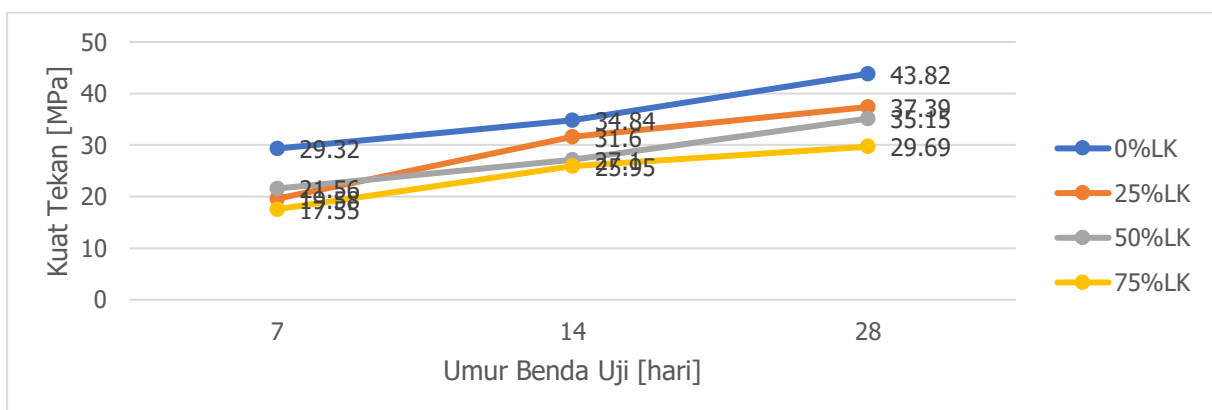
Variasi	Kuat Tekan Rata-Rata [MPa]		
	Umur 7 Hari	Umur 14 Hari	Umur 28 Hari
1 (100%AH:0%LK)	29,32	34,84	43,82
2 (75%AH:25%LK)	19,58	31,60	37,39
3 (50%AH:50%LK)	21,65	27,10	35,15
4 (25%AH:75%LK)	17,55	25,95	29,69

Berdasarkan **Gambar 5**, hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer mengalami penurunan kekuatan dari persentase 0% hingga 75% penambahan limbah kaca terhadap agregat halus. Kuat tekan maksimum rata-rata mortar geopolimer dengan 0%, 25%, 50% dan 75% penambahan limbah kaca berturut-turut pada umur 28 hari yaitu 43,82 MPa; 37,39 MPa; 35,15 MPa dan 29,69 MPa. Nilai kuat tekan maksimum rata-rata tersebut ternyata sangat jauh melebihi kuat tekan mortar rencana yang disyaratkan ASTM C 270 sebesar 17,16 MPa sehingga dapat diaplikasikan untuk elemen struktural bukan hanya sebagai dinding dan adukan.



Gambar 5. Persentase substitusi limbah kaca terhadap kuat tekan mortar geopolimer

Hasil uji kuat tekan maksimum rata-rata mortar geopolimer dengan persentase 25% hingga 75% penambahan limbah kaca terhadap agregat halus ternyata mengalami peningkatan yang lumayan dari umur 7 hari hingga 28 hari. Berdasarkan **Gambar 6** juga diinformasikan bahwa seiring bertambahnya umur mortar geopolimer maka bertambah pula nilai kekuatan tekan maksimum rata-ratanya. Nilai kuat tekan mortar geopolimer maksimum yaitu pada persentase 25%, walaupun hanya selisih $\pm 2,24$ MPa dengan persentase 50%. Oleh karena itu, persentase penggunaan limbah kaca sebagai substitusi *filler* yang optimal untuk campuran mortar geopolimer dengan kuat tekan tinggi adalah 25% – 50%.



Gambar 6. Hubungan umur benda uji mortar geopolimer terhadap kuat tekan

Adanya kandungan unsur silika yang dimiliki oleh limbah kaca, membuat mortar geopolimer tidak mudah hancur ketika dilakukan pengujian kuat tekan. Hal itu terjadi karena mortar geopolimer uji mengalami kehomogenan yang baik dengan agregat halus akibat penggunaan limbah kaca yang cukup banyak (25% – 50%). Distribusi kekuatan mortar geopolimer juga merata akibat reaksi kimia polimerisasi yang baik. Hal ini terlihat dari pola keruntuhan mortar daktail saat dilakukan pengujian kuat tekan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dan saran yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan limbah kaca yang cukup banyak dapat mengakibatkan proses reaksi polimerisasi yang terjadi maksimum sehingga mampu meningkatkan nilai kuat tekan

mortar geopolimer tersebut. Di samping itu, penggunaan limbah kaca yang cukup banyak juga dapat menyebabkan homogenitas seluruh material penyusun mortar geopolimer sehingga menyebabkan tercapainya kuat tekan rencana disyaratkan ASTM C 270 untuk mortar tipe M. Nilai kuat tekan maksimum yang didapatkan lebih besar dari 17,16 MPa. Oleh karena itu, penggunaan limbah kaca sangat direkomendasikan sebagai alternatif material konstruksi substitusi *filler* dalam campuran mortar geopolimer.

2. Hasil kuat tekan maksimum rata-rata pada umur 28 hari yaitu 37,39 MPa didapatkan dari substitusi limbah kaca terhadap agregat halus sebesar 25%. Walaupun nilai tersebut masih di bawah mortar geopolimer normal (100% pasir). Dengan demikian, persentase penambahan limbah kaca sebesar di atas 25% dan di bawah 50% lebih direkomendasikan untuk digunakan dalam campuran mortar geopolimer.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Adaway, M. & Wang, Y., (2015). "Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength", *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 14, no. 1, p. 116-122.
- [2] Ali, E.E. & Al-Tersawy, S.H., (2012). "Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete", *Construction and Building Materials*, 35, p. 785-791, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117.
- [3] Angelika, S.K., (2023). "Pengaruh Substitusi Parsial Variasi Tepung Kaca Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer", *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 9, no. 2, p. 157-166.
- [4] Aswad, N.H. & Soeparyanto, T.S., (2014). "Penggunaan Pecahan Botol Kaca Sebagai Agregat Kasar Pada Campuran Beton", *Jurnal Stabilita*, vol. 2, no. 1, p. 101-108.
- [5] Badan Standardisasi Nasional. (1990). *SNI 03-1968-1990 tentang Metode Pengujian Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- [6] Badan Standardisasi Nasional. (1996). *SNI 03-4142-1996 tentang Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregat yang Lolos Saringan*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- [7] Badan Standardisasi Nasional. (1998). *SNI 03-4804-1998 tentang Metode Pengujian Berat Isi dan Rongga Udara dalam Agregat*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- [8] Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 1970:2008 tentang Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- [9] Desimaliana, E., et al., (2024). "Analisis Biaya terhadap Penggunaan Limbah Marmer dan Abu Sekam Padi pada Mortar Geopolimer", *JoSC: Journal of Sustainable Construction*, vol. 3, no. 2, pp: 45-53.
- [10] Du, H. & Tank, K.H., (2014). "Waste glass powder as replacement in concrete", *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 12, no. 11, p. 486-477, doi: 10.3151/jact.12.468.
- [11] Ganiron Jr., T.U., (2014). "The Effect of Waste Glass Bottles as an Alternative Coarse Aggregate in Concrete Mixture", *International Journal of ICT-aided Architecture and Civil Engineering*, vol. 1, no. 2, p. 1-10, doi: 10.21742/ijiaace.2014.1.2.01.
- [12] Ganiron, T.J., (2013). "Use of Recycled Glass Bottles as Fine Aggregates in Concrete Mixture", *International Journal of Advanced Science and Technology*, 61, p. 17-28, doi: 10.14257/ijast.2013.61.03.
- [13] Handayasari, I., et al., (2016). "Studi Penggunaan Limbah Serbuk Kaca Sebagai Bahan Substitusi Semen Pada Pembuatan Bata Beton Pejal", *Jurnal Forum Mekanika*, vol. 5, no. 1, p. 1-8.
- [14] Hayu, G.A., et al., (2021). "The Evaluation of Mechanical Properties of Concrete Due to The Use of Glass Waste as Partial Substitution of Fine Aggregate", *BERKALA SAINSTEK*, vol. 9, no. 3, p. 117, doi: 10.19184/bst.v9i3.26628.

- [15] Hendi, A., et al., (2019). "Mix design of the green self-consolidating concrete: Incorporating the waste glass powder", *Construction and Building Materials*, 199, p. 369-384, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.020.
- [16] Islam, G.M., et al., (2017). "Waste glass powder partial replacement of cement for sustainable concrete practice", *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, no. 1, p. 37-44, doi: 10.1016/j.ijbsbe.2016.10.005.
- [17] Jani, Y. & Hogland, W., (2014). "Waste glass in the production of cement and concrete – A Review", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, no. 3, p. 1767-1775, doi: 10.1016/j.jece.2014.03.016.
- [18] Januar, C., (2011). *Pemanfaatan Serbuk Kaca Sebagai Powder pada Self-Compacting Concrete – Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung.
- [19] Karwur, H.Y., et al., (2013). "Kuat Tekan Beton dengan Bahan Tambah Serbuk Kaca Sebagai Substitusi Parsial Semen", *Jurnal Sipil Statik*, vol. 1, no. 4, p. 276-281.
- [20] Liaqat, M., et al., (2018). "Effect of Waste Glass as a Partial Replacement for Coarse Aggregate in Concrete", *International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science*, vol. 4, no. 6, p. 2455-2585.
- [21] Lolo, J.A., et al., (2020). "Karakterisasi Serbuk Kaca Sebagai Substitusi Parsial Semen Terhadap Sifat Fisis Mekanis Campuran Beton", *Jurnal Dynamic Sanit*, vol. 4, no. 2, p. 850-854, doi: 10.47178/dynamicsaint.v4i2.887.
- [22] Malek, M., et al., (2020). "Effect of waste glass addition as a replacement for fine aggregate on properties of mortar", *Materials*, vol. 13, no. 14, p. 1-9, doi: 10.3390/ma13143189.
- [23] Meddah, M.S., (2019). "Use of waste window glass as substitute of natural sand in concrete production", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 603, no. 3, doi: 10.1088/1757-899X/603/3/032011.
- [24] Mushtofa & Purnomo, M.J., (2020). "Pengaruh Penambahan Limbah Serbuk Kaca Sebagai Pengganti Sebagian Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton", *De'Teksi: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 5, no. 1, p. 49-60, doi: 10.56071/de'teksi.v5i1.244.
- [25] Nassar, R.U.D. & Soroushian, P., (2012). "Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement", *Construction and Building Materials*, 29, p. 368-377, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061.
- [26] Nicolaas, S., et al., (2019). "Pengaruh Penambahan Limbah Kaca Terhadap Perilaku Mekanis Beton", *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, vol. 1, no. 2, doi: 10.47600/jtst.v1i2.232.
- [27] Nursyamsi, et al., (2016). "Pemanfaatan Serbuk Kaca Sebagai Bahan Tambah Dalam Pembuatan Batako", *Jurnal Media Teknik Sipil*, vol. 14, no. 1, pp: 84, doi: 10.22219/jmts.v14i1.3292.
- [28] Ogundairo, T.O., et al., (2019). "Sustainable use of recycled glass waste as an alternative material for building construction – A review", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 640, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/640/1/012073.
- [29] Olij, M.R., et al., (2021). "Limbah Kaca Sebagai Pengganti Agregat Halus Untuk Beton Ramah Lingkungan", *Teras Jurnal*, vol. 11, no. 1, p. 113-124.
- [30] Pratama, N.A., et al., (2024). "Pengaruh Substitusi Parsial Limbah Bata Ringan terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer", *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 10, no. 1, pp: 51-59.
- [31] Purnomo, H. & Hisyam, E.S., (2014). "Pemanfaatan Serbuk Kaca Sebagai Substitusi Parsial Semen pada Campuran Beton Ditinjau Dari Kekuatan Tekan dan Kekuatan Tarik Belah", *Jurnal Fropil*, vol. 2, no. 1, p. 45-55.
- [32] Rahim, N.L., et al., (2015). "Utilization of recycled glass waste as partial replacement of fine aggregate in concrete production", *Materials Science Forum*, 803, p. 16-20, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.803.16.

- [33] Sadoon, A. & Fan, M., (2014). "Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement", *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, vol. 2, no. 6, p. 11-17.
- [34] Setiahutama, H.I., (2022). *Pemanfaatan Serbuk Kaca Sebagai Substitusi Parsial Semen Terhadap Beton Normal – Tugas Akhir*, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- [35] Sofyan, M., et al., (2023). "Kinerja Pozzolan Glasspowder pada Karakteristik Mekanis dan Fisis Paving Blok Geopolimer", *Borneo Engineering Jurnal Teknik Sipil*, vol. 1, no. 1, p. 15-24, doi: 10.35334/be.v1i1.3318.
- [36] Srivastava, V., et al., (2014). "Glass Waste as Coarse Aggregate in Concrete", *Journal of Environmental Nanotechnology*, vol. 3, no. 1, p. 61-71, doi: 10.13074/jent.2013.12.132059.
- [37] Suhartini, A., et al., (2014). "Pengaruh Penambahan Tumbukan Limbah Botol Kaca Sebagai Bahan Substitusi Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton", *Jurnal Bentang*, vol. 2, no. 1, p. 66-80.
- [38] Tamanna, N., et al., (2016). "Pozzolanic Properties of Glass Powder in Cement Paste", *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, vol. 2, no. 1, p. 75-81, doi: 10.33736/jcest.307.2016.
- [39] Tamanna, N. & Tuladhar, R., (2020). "Sustainable Use of Recycled Glass Powder as Cement Replacement in Concrete", *The Open Waste Management Journal*, vol. 13, no. 1, p. 1-13, doi: 10.2174/1874347102013010001.
- [40] Tenda, W., (2013). *Kuat Tekan Beton dengan Bahan Tambah Serbuk Kaca Sebagai Substitusi Parsial Semen – Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi, Manado.