

PRODUKSI DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT RINGAN GEOPOLIMER-SERAT GELAS

***Amran**
Universitas Negeri
Makassar
amranphysics@gmail.com

Subaer
Universitas Negeri
Makassar
subaer@unm.ac.id

Husain
Universitas Negeri
Makassar
husain.physics@unm.ac.id

*koresponden author

Abstrak - Telah dilakukan penelitian yang bertujuan untuk memproduksi komposit ringan geopolimer-serat gelas berbahan dasar *Fly-ash*. Komposit disintesis dengan metode aktivasi alkali, kemudian ditambahkan agen berpori Hidrogen Peroksida (H_2O_2). Serat gelas ditambahkan pada geopolimer dan disusun berlapis membentuk komposit dan di *curing* pada suhu $70^\circ C$ selama 3 jam, kemudian disimpan selama 28 hari sebelum dilakukan pengujian. Karakterisasi sampel dilakukan dengan pengujian SEM, massa jenis, porositas, daya serap air, konduktivitas termal, dan kuat tekan. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa material geopolimer dengan serat gelas tidak berikatan dengan baik karena terdapat retakan disekitar serat gelas. Hasil pengujian massa jenis dan porositas sampel berturut-turut $1,35 \text{ gr/cm}^3$; $1,31 \text{ gr/cm}^3$; $1,27 \text{ gr/cm}^3$; dan $1,25 \text{ gr/cm}^3$ dan 10,7%, 12,7%, 13,19%, dan 13,71%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa massa jenis menurun seiring dengan penambahan konsentrasi serat gelas sedangkan porositasnya meningkat. Daya serap air sampel meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi serat gelas, diperoleh daya serap air tertinggi sebesar 11,7 % pada sampel komposit 1,5% serat gelas. Hasil pengujian konduktivitas termal menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai konduktivitas termal sampel seiring dengan penambahan serat gelas. Kuat tekan tertinggi pada komposisi sampel tanpa serat yaitu sebesar 6,4 MPa. Penurunan kuat tekan sampel diakibatkan oleh geopolimer dengan serat gelas tidak berikatan dengan baik, terlihat pada hasil karakterisasi SEM.

Kata Kunci : Komposit Ringan, Serat Gelas, Hidrogen Peroksida, Konduktivitas Termal, Scanning Electron Microscopy

Abstract – This research was production lightweight composite of geopolymer-fiber glass basen on fly ash. Composites were synthesized by alkaline activation method, then added porous agent Hydrogen Peroxide (H_2O_2). Fiber glass was added to the geopolymer and arranged in layers to form a composite and cured at $70^\circ C$ for 3 hours, then stored for 28 days before testing. Sample characterization by testing SEM, density, porosity, water absorption, thermal conductivity, and compressive strength. The results of SEM characterization of geopolymer material with fiber glass do not good bond, because there are crack. The results of testing the density and porosity of the samples 1.35 gr/cm^3 ; 1.31 g/cm^3 ; 1.27 gr/cm^3 ; and 1.25 gr/cm^3 and 10.7%, 12.7%, 13.19%, and 13.71%. These results indicate density decreases with addition of glass fiber concentration while the porosity increases. The water absorption of the sample increased with the addition of the glass fiber concentration, the highest water absorption was 11.7% in the 1.5% glass fiber composite sample. The results of the thermal conductivity test showed that there was a decrease in the value of the thermal conductivity of the sample along with the addition of glass fiber. The highest compressive strength in the composition of the sample without fiber is 6.4 MPa. The decrease in the compressive strength of the sample was caused by the geopolymer with glass fibers not bonding well, as seen in the SEM characterization results.

Keywords : Leigweight Composite, Fiber Glass, Hydrogen Peroxide, Thermal Conductivity, Scanning Electron Microscopy

A. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan material baru yang memiliki sifat unggul terus berkembang seiring dengan perkembangan zaman. Rekayasa material yang banyak dikembangkan saat ini adalah komposit geopolimer. Salah satu sifat komposit geopolimer yang menjanjikan adalah memiliki massa yang rendah (komposit ringan), namun memiliki sifat fisik dan mekanik yang tinggi. Komposit merupakan campuran dua komponen atau lebih yang menghasilkan material baru yang memiliki sifat unggul dari material pembentuknya (Nazim et al., 2020). Sedangkan geopolimer merupakan bahan pengikat yang dapat mengikat serat atau partikel organik maupun anorganik untuk memperkuat bentuk komposit (Syamsidar et al., 2017).

Geopolimer telah menjadi bahan yang memiliki potensi komersial dikarenakan harganya yang murah, ramah lingkungan, kekuatan tinggi, dan sintesisnya yang mudah (Wang et al., 2020). Geopolimer dapat disintesis dengan memanfaatkan limbah aluminosilikat seperti *fly-ash* yang berasal dari limbah padat hasil pembakaran batu bara, dan umumnya banyak di PLTU yang menyebabkan pencemaran lingkungan (Malkawi et al., 2018).

Di sisi lain, geopolimer juga dapat dijadikan sebagai material berpori dengan penambahan agen berpori seperti bubuk aluminium ataupun H_2O_2 (Hidrogen Peroksida). Penelitian ini akan diproduksi komposit ringan geopolimer-serat gelas, adapun syarat komposit ringan berdasarkan SNI 03-3449-2002 adalah memiliki massa jenis = $<1,5 \text{ gr/cm}^3$, dan konduktivitas termal = $<0,6 \text{ Watt/mK}$. Pada penelitian H_2O_2 dipilih sebagai agen pembentuk pori pada komposit ringan geopolimer, hal ini dikarenakan H_2O_2 lebih mudah terurai menjadi H_2O dan O_2 . Selain itu, H_2O_2 menghasilkan gas di skala molekuler dan menghasilkan pori yang lebih homogen (Petlitchkaia & Poulesquen, 2019). Beberapa keuntungan komposit geopolimer berpori adalah memiliki massa yang lebih ringan, daya serap air yang tinggi, sifat termal dan akustik yang baik (Dembovska et al., 2017). Namun produksi geopolimer berpori dapat mengurangi kekuatan mekanik komposit geopolimer (Senff et al., 2020). Sehingga untuk memperkuat struktur geopolimer adalah dengan menambahkan serat pada komposit geopolimer.

Produksi komposit tidak terlepas dari penggunaan serat, baik serat alami maupun serat sintesis. Beberapa serat yang populer digunakan untuk memproduksi komposit diantaranya serat karbon, serat baja, serat ijuk, serat gelas, serat kenaf ataupun serat dari tumbuhan seperti serat bambu, serat daun nanas, serat daun pandan, serat kapas, dan lain-lain. Penambahan serat pada komposit bertujuan untuk meningkatkan sifat fisik maupun sifat mekanik dari komposit tersebut.

Salah satu serat yang menjanjikan untuk aplikasi geopolimer adalah serat gelas. Serat gelas merupakan material dengan kuat tarik yang sangat tinggi, elastisitas sempurna, kinerja termal yang baik, ketahanan air yang sangat baik, isolasi listrik yang baik, isolasi termal, isolasi suara yang baik dan kemampuannya untuk menahan penyusutan (Wang et al., 2020). Serat gelas banyak digunakan untuk memperkuat komposit geopolimer, baik secara fisik maupun mekanik. Penelitian (Rashidian-Dezfouli & Rangaraju, 2017) melaporkan bahwa penambahan serat gelas pada geopolimer berbasis *fly-ash* dapat

meningkatkan sifat tahan asam geopolimer. Selain itu, penelitian (Wang et al., 2020) melaporkan bahwa penambahan serat gelas pada komposit memberikan keunggulan pada kekuatan tarik, kekakuan dan ketahanan terhadap retak pada suhu tinggi.

Adapun sifat fisik dan sifat mekanik komposit ringan berdasarkan penelitian sebelumnya yaitu penelitian Senff et al., 2020 melaporkan bahwa penambahan serat gelas pada geopolimer berpori dapat meningkatkan massa jenis dan menurunkan porositas geopolimer, sehingga dengan peningkatan massa jenis tersebut membuat nilai kuat tekan geopolimer juga mengalami peningkatan. Selain itu, penelitian tersebut juga melaporkan diperoleh nilai konduktivitas termal yang rendah tanpa berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik komposit geopolimer.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengamati/menyelidiki pengaruh penambahan serat gelas terhadap sifat fisik dan sifat mekanik komposit. Diharapkan penambahan serat gelas mampu meningkatkan sifat fisik ataupun sifat mekanik komposit ringan geopolimer yang diproduksi.

B. METODE

Penelitian eksperimen yang memanfaatkan limbah *fly-ash* sebagai bahan dasar produk geopolimer yang dikombinasikan dengan serat gelas dan H₂O₂ (Hidrogen peroksida) dalam pengembangan komposit ringan geopolimer. Metode yang digunakan adalah metode aktivasi larutan alkali dan metode *hand lay-up* dalam membentuk komposit ringan geopolimer. Penelitian ini berlangsung mulai dari bulan Juni - Nopember 2021

Dalam penelitian ini dibuat empat sampel dengan memvariasikan konsentrasi penambahan serat gelas. Berikut komposisi bahan dasar yang digunakan:

Tabel 1. Komposisi Bahan Dasar yang Digunakan

Sampel	<i>Fly-ash</i> (g)	NaOH (g)	Sodium Silikat (g)	H ₂ O (g)	H ₂ O ₂ (%)	Serat Gelas (%)
K1	90	4	26,33	11,89	0,7	0
K2						0,5
K3						1
K4						1,5

Proses pembuatan sampel dilakukan dengan mencampur pasta geopolimer dengan hidrogen peroksida, kemudian pencetakan sampel dilakukan dengan metode *Hand Lay-up*, yaitu sampel dicetak dengan susunan berlapis dengan susunan geopolimer-serat gelas-geopolimer. Setelah itu, sampel di *Curing* dalam keadaan tertutup pada suhu 70°C selama 1 jam sehingga proses polikondensasi sempurna dapat tercapai. Sebelum dilakukan pengujian, sampel disimpan di ruang terbuka pada suhu ruang selama 14 hari hingga mencapai ikatan polimerisasi.

Karakterisasi dan pengukuran terhadap sampel komposit ringan geopolimer-serat gelas yaitu: Karakterisasi mikrostruktur menggunakan *Scanning Eletron Microscopy* (SEM) dengan spesifikasi alat

Jeol JSM-6000 PLUS Neo Scope. Pengukuran massa jenis dan porositas dengan prinsip Archimedes. Untuk menghitung nilai massa jenis dan porositas sampel digunakan persamaan sebagai berikut:

$$D_b = \frac{m_d}{m_s - m_i} \times D_i \quad (1)$$

$$Pa = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_i} \times 100\% \quad (2)$$

D_b massa jenis, m_d massa geopolimer kering, m_i massa geopolimer jenuh air dan disuspensi di dalam air, m_s massa jenuh air dan disuspensi di udara, D_i massa jenis air pada temperatur kamar, dan P_a menyatakan porositas (Subaer, 2015).

Pengukuran daya serap air sampel dilakukan dengan menimbang massa sampel sebelum dan setelah direndam di dalam air selama 24 jam. Adapun persamaan untuk menghitung daya serap air sampel:

$$(C) = \frac{(A-B)}{B} \times 100\% \quad (3)$$

(C) menyatakan daya serap air (%), A menyatakan berat setelah direndam (gr), dan B menyatakan berat kering (gr) setelah dipanaskan dalam oven dengan suhu 110°C.

Pengukuran konduktivitas termal pada geopolimer umumnya dilakukan dengan metode *hot plate*. Untuk menghitung konduktivitas termal sampel digunakan persamaan sebagai berikut:

$$k = \frac{Q}{A} \times \frac{dX}{dT} \quad (4)$$

k = koefisien perpindahan panas (W/m-°C), Q = laju aliran panas (W), A = luas penampang normal terhadap arah aliran panas (m²), dan dX/dT = gradien suhu arah aliran panas (°C/m).

Untuk menguji kekuatan mekanik sampel, maka dilakukan pengujian kuat tekan. Adapun persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$C = \frac{P}{A} \quad (5)$$

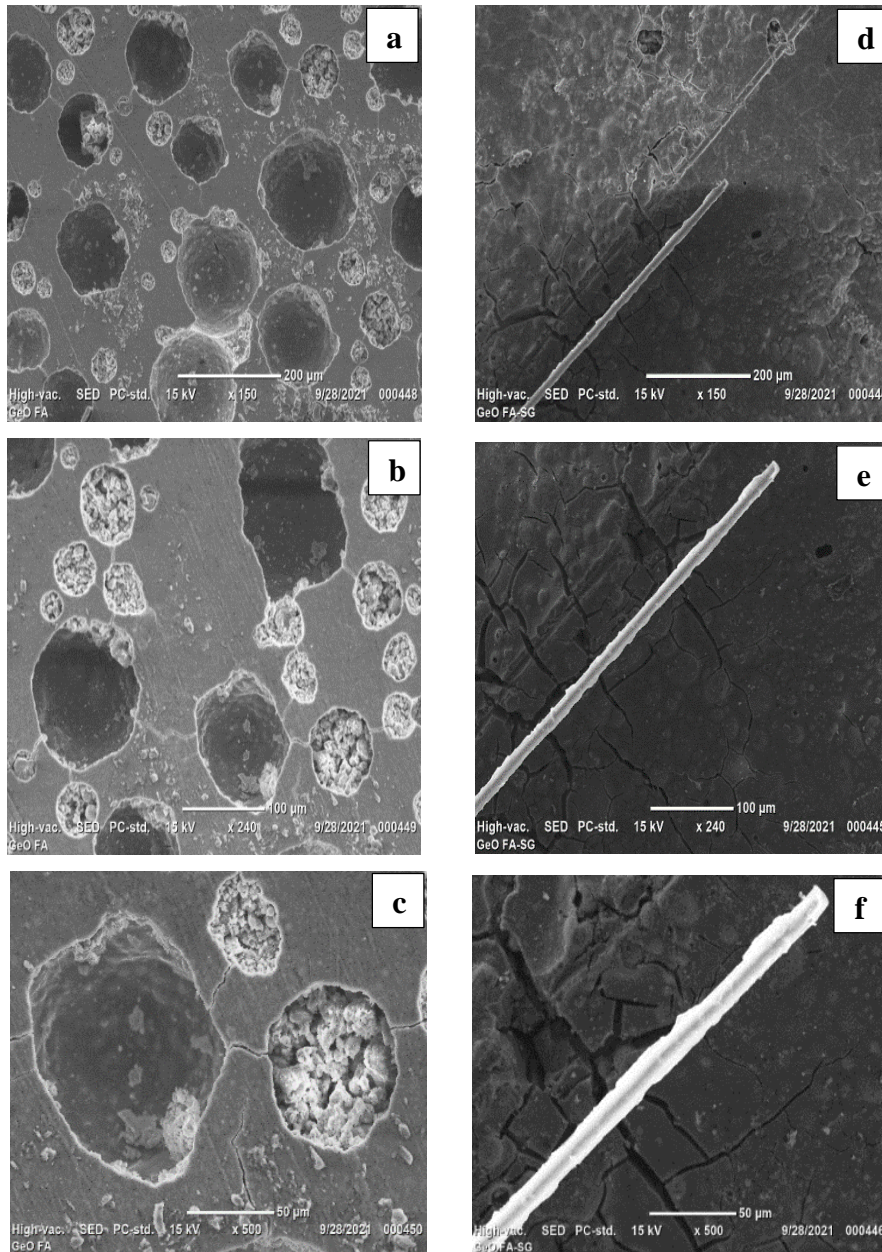
C = Kekuatan tekan (MPa), P = Beban total hingga sampel retak (N), dan A = Luas permukaan sampel yang ditekan (mm²).

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. *Microstructure* Komposit Ringan Geopolimer-Serat Gelas

Karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk menyelidiki struktur mikro (termasuk porositas dan pembentukan retakan), dan antar muka (*interface*) antara agregat-matriks sampel. Untuk mengamati morfologi komposit ringan geopolimer-serat gelas digunakan perbesaran 150x, 240x, dan 500x untuk masing-masing sampel. Gambar 1 merupakan morfologi sampel komposit ringan geopolimer tanpa serat dan dengan menggunakan 1% serat gelas masing-masing perbesaran 150x, 240x, dan 500x. Sampel tanpa serat pada Gambar 1 (a, b, dan c) menunjukkan morfologi permukaan yang tidak homogen. Hal ini mengindikasikan pembentukan pori-pori tidak terdistribusi merata dan dengan ukuran yang bervariasi. Pada Gambar 1 (b) perbesaran 240x mulai terlihat retakan pada sampel tanpa serat, dan retakan tersebut lebih jelas pada Gambar 1 (c) perbesaran 500x. Sedangkan morfologi sampel yang menggunakan 1% serat gelas ditunjukkan pada Gambar 1 (d,

e, dan f), terlihat bahwa geopolimer dengan serat gelas telah berikatan yang ditandai dengan adanya zona transisi antara matriks dan agregat.



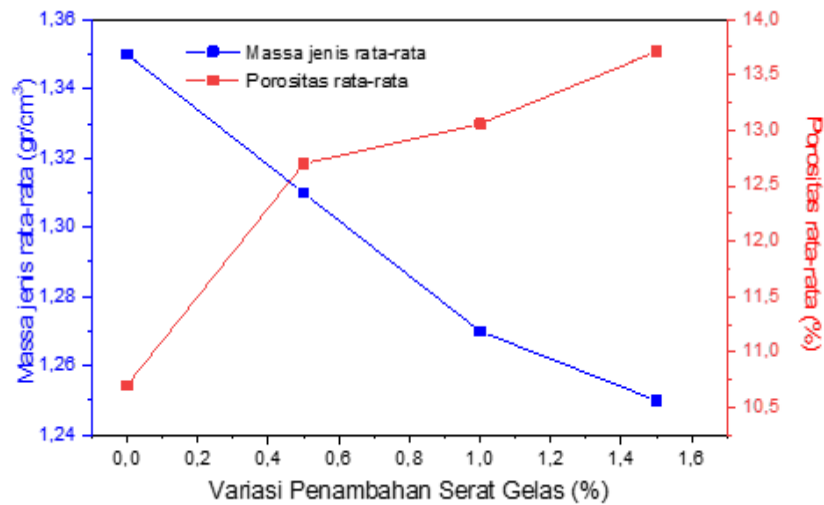
Gambar 1. Morfologi SEM Komposit Ringan Geopolimer (a, b, c) tanpa Serat dan (d, e, f) dengan Serat Gelas Masing-masing Perbesaran 150x, 240x, dan 500x

Pada permukaan sampel menunjukkan bahwa berkurangnya pori-pori ketika penambahan serat gelas, namun kehadiran serat gelas tersebut menimbulkan retakan, hal ini menunjukkan bahwa ikatan yang kurang baik antara matriks dan agregat (serat dengan geopolimer). Retakan tersebut berdampak pada massa jenis, porositas, dan daya serap air, serta sifat mekanik (kuat tekan) sampel.

2. Massa Jenis dan Porositas

Pengukuran ini bertujuan untuk (1) Mempelajari pengaruh penambahan serat gelas terhadap sifat fisik komposit ringan geopolimer-serat gelas dan (2) Sebagai pengujian dasar untuk memperoleh

komposisi terbaik sampel komposit ringan geopolimer-serat gelas yang memenuhi kriteria komposit ringan. Pengujian porositas dan massa jenis dilakukan dengan menggunakan metode *Archimedes* dan pengukuran dilakukan secara berulang (3 kali pengukuran) pada setiap komposisi sampel



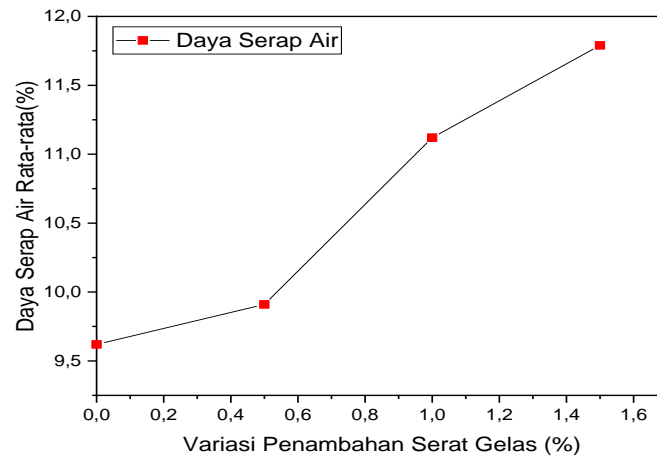
Gambar 2. Grafik hubungan antara Variasi Penambahan Serat Gelas dengan Massa Jenis dan Porositas Rata-rata Komposit Ringan Geopolimer-Serat Gelas

Gambar 2 menunjukkan nilai massa jenis dan porositas rata-rata komposit ringan geopolimer dengan variasi penambahan serat gelas. Berdasarkan grafik pada Gambar 2 terlihat bahwa penambahan serat gelas mengakibatkan massa jenis sampel menurun sedangkan porositas sampel meningkat. Hal ini kurang sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Senff et al., 2020 yang melaporkan bahwa nilai massa jenis meningkat dan nilai porositas menurun seiring dengan peningkatan variasi serat gelas pada komposit geopolimer berpori. Pada penelitian ini diharapkan dengan penambahan serat gelas pada komposit dapat meningkatkan massa jenis dan menurunkan porositas agar diperoleh sifat mekanik komposit yang tinggi. Namun hasil yang diperoleh adalah massa jenis menurun dan porositas meningkat seiring dengan penambahan serat gelas, hal tersebut berdampak pada kekuatan mekanik sampel. Hal ini disebabkan karena pada saat memasukkan sampel ke dalam cetakan terjadi proses pemadatan yang tidak merata dan disebabkan pula cara mengeluarkan sampel dari cetakan yang kurang hati-hati sehingga menyebabkan adanya retakan pada sampel yang mengakibatkan meluas atau membesarnya pori sampel.

3. Daya Serap Air

Daya serap air suatu material dipengaruhi oleh besarnya kadar pori yang ada pada material tersebut. Semakin besar kadar pori suatu material maka daya serap airnya juga besar, begitupun sebaliknya. Pada gambar 3 dapat disimpulkan bahwa penambahan serat gelas berpengaruh terhadap nilai daya serap air. Terlihat bahwa daya serap air sampel meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi serat gelas. Berdasarkan penelitian Senff et al., 2020 yang melaporkan bahwa penurunan massa jenis dan peningkatan porositas total sampel akan berpengaruh terhadap daya serap air sampel

tersebut. Semakin rendah massa jenis sampel dan semakin tinggi porositas sampel maka daya serap air sampel akan meningkat.

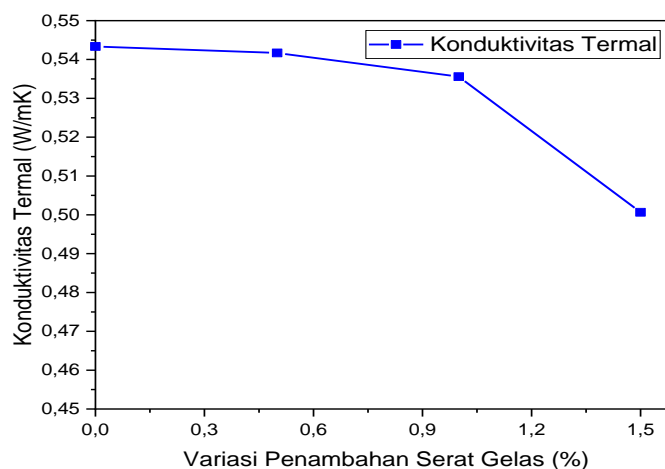


Gambar 3. Grafik hubungan antara Variasi Penambahan Serat Gelas dengan Daya Serap Air Komposit Ringan Geopolimer-Serat Gelas

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini sesuai dengan teori tersebut. Hasil penelitian ini juga didukung hasil penelitian dari Ray et al., 2020 yang melaporkan bahwa penambahan serat gelas pada komposit polimer polipropilen hibrida (70% polimer polipropilen + 30 % serat gelas) meningkatkan daya serap komposit sebesar 66% yaitu dari 0,03% menjadi 0,09%. Peningkatan kekuatan daya serap air sampel dikarenakan adanya ruang kosong pada sampel akibat dari penambahan serat gelas yang mengakibatkan air akan mudah masuk kedalam pori-pori sampel ketika sampel direndam dalam air.

4. Konduktivitas Termal

Pengujian konduktivitas dilakukan untuk mengetahui kemampuan sampel untuk menghantarkan panas.

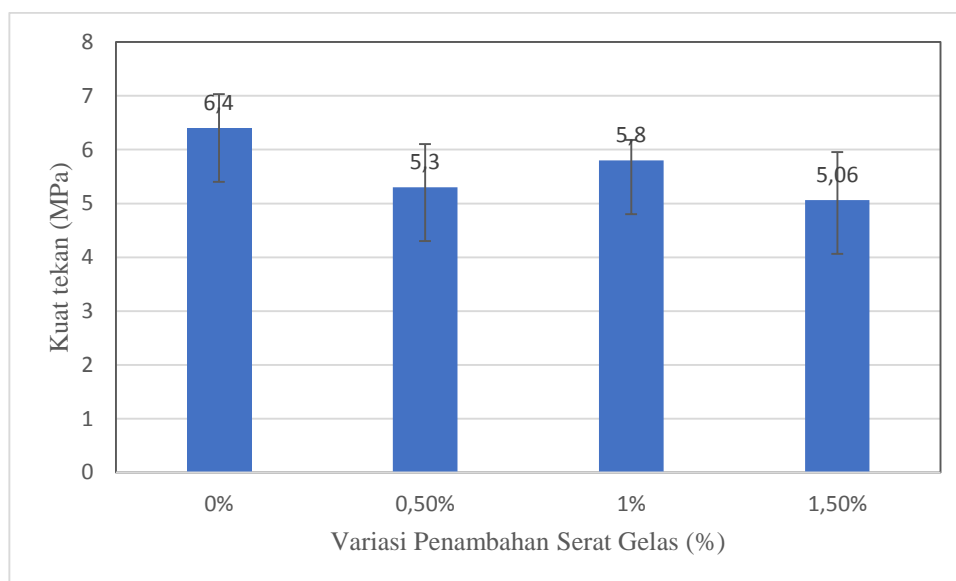


Gambar 4. Grafik hubungan antara Variasi Penambahan Serat Gelas dengan Konduktivitas Termal Komposit Ringan Geopolimer-Serat Gelas

Hasil pengukuran konduktivitas termal sampel menunjukkan bahwa nilai konduktivitas termal sampel menurun seiring dengan penambahan serat gelas, namun penurunan nilai tersebut tidak signifikan. Penurunan nilai konduktivitas termal sampel diakibatkan oleh penambahan serat gelas, serat gelas merupakan bahan isolator (non-konduktor) sehingga dengan penambahannya akan menghambat terjadinya perpindahan panas dari satu permukaan ke permukaan yang lain. Berdasarkan hasil penelitian Hassan et al., 2018 yang melaporkan bahwa penurunan massa jenis dan peningkatan porositas mengakibatkan sampel mengalami penurunan nilai konduktivitas termal, hal ini dikarenakan adanya ruang kosong yang terdapat pada sampel sehingga menghambat proses terjadinya perpindahan panas dari suatu permukaan ke permukaan lainnya. Hasil ini didukung penelitian oleh Senff et al., 2020 yang melaporkan bahwa penambahan serat gelas < 2% pada geopolimer berpori secara tidak signifikan menurunkan nilai konduktivitas termal geopolimer. Hasil pada penelitian ini menunjukkan bahwa sampel komposit ringan geopolimer-serat gelas memiliki nilai konduktivitas termal yang rendah yakni dibawah 0,66 W/mK dan memenuhi syarat sebagai komposit ringan.

5. Kuat Tekan

Uji kuat tekan terhadap sampel bertujuan untuk melihat pengaruh penambahan serat gelas terhadap kuat tekan sampel komposit ringan geopolimer-serat gelas.



Gambar 5. Grafik hubungan antara Variasi Penambahan Serat Gelas dengan Kuat Tekan Komposit Ringan Geopolimer-Serat Gelas

Terlihat bahwa sampel tanpa serat memiliki kuat tekan lebih besar daripada sampel dengan menggunakan serat. Dalam penelitian ini diharapkan dengan penambahan serat gelas akan diperoleh peningkatan kuat tekan. Namun, hasil yang diperoleh tidak sesuai dengan yang diharapkan, karena berdasarkan penelitian (Senff et al., 2020) melaporkan bahwa penggunaan serat gelas < 2% pada komposit geopolimer berpori meningkatkan kuat tekan dan kuat lentur komposit tersebut. Akan tetapi, pada penelitian ini penambahan serat gelas justru menurunkan kuat tekan komposit geopolimer. Salah satu faktor penyebab penurunan nilai kuat tekan adalah menurunnya nilai massa jenis dari sampel

tersebut. Semakin besar massa jenis suatu material, maka kerapatan strukturnya semakin rapat sehingga nilai kuat tekan juga akan tinggi. Sebaliknya semakin rendah massa jenis suatu material, maka kerapan strukturnya akan rendah pula yang berarti bahwa terdapat ruang-ruang kosong (pori) dalam material tersebut, sehingga dengan adanya pori tersebut akan mengakibatkan nilai kuat tekan menurun.

Berdasarkan penelitian (Hassan et al., 2018) melaporkan bahwa penurunan massa jenis akan mengakibatkan nilai kuat tekan juga ikut menurun. Selain pengaruh massa jenis penurunan nilai kuat tekan juga dipengaruhi oleh tidak terjadinya ikatan yang baik antara binder (geopolimer) dengan serat gelas, serta banyaknya retakan yang terjadi pada sampel ketika penambahan serat gelas pada komposit, hal ini dapat dilihat pada hasil karakterisasi SEM sampel pada Gambar 1 (d, e, dan f). Meskipun hasil pengukuran kuat tekan sampel mengalami penurunan pada saat penambahan konsentrasi serat gelas, akan tetapi nilai kuat tekan sampel yang dihasilkan pada penelitian ini telah memenuhi syarat komposit ringan berdasarkan SNI 03-3449-2002 untuk structural ringan yaitu memiliki kuat tekan minimal 6,89 MPa-maksimal 17,24 MPa.

D. SIMPULAN

1. Geopolimer disintesis melalui metode aktivasi *Fly-ash* dengan larutan alkali teraktivasi telah berhasil digabungkan dengan serat gelas dan ditambahkan H₂O₂ sebagai agen pori sehingga membentuk komposit ringan geopolimer-serat gelas.
2. Massa jenis komposit ringan geopolimer-serat gelas menurun seiring dengan penambahan serat gelas, sedangkan porositas dan daya serap air meningkat seiring dengan penambahan serat gelas.
3. Nilai konduktivitas termal komposit ringan geopolimer-serat gelas menunjukkan penurunan seiring dengan penambahan serat gelas, sehingga nilai konduktivitas termal komposit ringan geopolimer-serat gelas telah memenuhi syarat sebagai komposit ringan sesuai syarat SNI 03-3449-2002.
4. Karakteristik mekanik kuat tekan komposit ringan geopolimer-serat gelas menurun saat penambahan serat gelas.

DAFTAR RUJUKAN

- Dembovska, L., Bajare, D., Ducman, V., Korat, L., & Bumanis, G. (2017). The use of different by-products in the production of lightweight alkali activated building materials. *Construction and Building Materials*, *135*, 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.005>
- Hassan, H. S., Abdel-Gawwad, H. A., García, S. R. V., & Israde-Alcántara, I. (2018). Fabrication and characterization of thermally-insulating coconut ash-based geopolimer foam. *Waste Management*, *80*, 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.022>
- Malkawi, A. B., Al-Mattarneh, H., Achara, B. E., Mohammed, B. S., & Nuruddin, M. F. (2018). Dielectric properties for characterization of fly ash-based geopolimer binders. *Construction and Building Materials*, *189*, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.180>

- Nazim, A. R. M., Ansari, M. N. M., & Atiqah, A. (2020). Impact strength and morphological properties of Kenaf/glass fibre/polyester hybrid composite for attenuator application. *Materials Today: Proceedings*, 29, 119–122. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.683>
- Petlitzkaia, S., & Poulesquen, A. (2019). Design of lightweight metakaolin based geopolymer foamed with hydrogen peroxide. *Ceramics International*, 45(1), 1322–1330. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.021>
- Rashidian-Dezfouli, H., & Rangaraju, P. R. (2017). A comparative study on the durability of geopolymers produced with ground glass fiber, fly ash, and glass-powder in sodium sulfate solution. *Construction and Building Materials*, 153, 996–1009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.139>
- Ray, K., Patra, H., Swain, A. K., Parida, B., Mahapatra, S., Sahu, A., & Rana, S. (2020). Glass/jute/sisal fiber reinforced hybrid polypropylene polymer composites: Fabrication and analysis of mechanical and water absorption properties. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5273–5278. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.964>
- Senff, L., Novais, R. M., Carvalheiras, J., & Labrincha, J. A. (2020). Eco-friendly approach to enhance the mechanical performance of geopolymer foams: Using glass fibre waste coming from wind blade production. *Construction and Building Materials*, 239, 117805. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117805>
- Syamsidar, D., Nurfadilla, & Subaer. (2017). The Properties of Nano TiO₂-Geopolymer Composite as a Material for Functional Surface Application. *MATEC Web of Conferences*, 97, 01013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701013>
- Wang, W.-C., Wang, H.-Y., Chang, K.-H., & Wang, S.-Y. (2020). Effect of high temperature on the strength and thermal conductivity of glass fiber concrete. *Construction and Building Materials*, 245, 118387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118387>