

PENGARUH PENAMBAHAN ABU SEKAM PADI TERHADAP SIFAT MEKANIK *ONE-PART GEOPOLYMER* BERBASIS *FLY ASH* DAN *SILICA FUME*

***A Ida Nurfaida Nur**
Universitas Negeri Makassar
idhanur99@gmail.com

Subaer
Universitas Negeri Makassar
subaer@unm.ac.id

Nurhayati
Universitas Negeri Makassar
nurhayati@unm.ac.id

*koresponden author

Abstrak – Telah dilakukan penelitian yang bertujuan untuk melihat pengaruh penambahan abu sekam padi terhadap sifat mekanik komposit *one-part geopolymer* berbasis *Fly Ash* dan *Silica Fume*. *One-part geopolymer* diproduksi dengan bahan dasar *Fly Ash*, *Silica Fume*, NaOH. Sintesis *one-part geopolymer* dilakukan dengan mencampurkan bahan dasar berupa *Fly Ash*, *Silica Fume*, dan NaOH (*Natrium Hidroksida*) yang diaktivasi menggunakan H₂O (*Aquades*). Abu sekam padi ditambahkan pada bahan dasar dengan variasi tertentu yang sudah ditentukan. Sampel dirawat (*cure*) pada suhu 60°C selama 10 jam. Sampel disimpan pada ruang terbuka selama 28 hari. Berdasarkan hasil karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) material *one-part geopolymer* membentuk komposisi yang baik dengan partikel bahan dasar yang masing-masing terlihat dengan jelas. Kuat lentur tertinggi diperoleh sebesar 3.55 MPa dengan massa abu sekam padi 0 gram. Untuk kuat tekan tertinggi diperoleh sebesar 8.1 MPa dengan massa abu sekam padi 0 gram. Hal ini juga didukung oleh pengujian mikrostruktur yang memperlihatkan ikatan yang baik antara matriks dan agregat. Karakterisasi XRD menunjukkan bahwa sampel tersebut didominasi oleh mineral *silicon oxide* dan *aluminium oxide* yang tidak bereaksi bersama. Kekuatan mekanik semakin menurun seiring dengan penambahan abu sekam padi karena terbentuknya lebih banyak pori.

Kata Kunci : Abu Sekam Padi, *Silica Fume*, *One-part Geopolymer*.

Abstract – Research has been carried out with the aim of examining the effect of adding rice husk ash to the mechanical properties of *one-part geopolymer* composites based on *Fly Ash* and *Silica Fume*. *One-part geopolymer* is produced with the basic ingredients of *Fly Ash*, *Silica Fume*, NaOH. synthesis *One-part geopolymer* is done by mixing the basic materials such as *Fly Ash*, *Silica Fume* and NaOH (sodium hydroxide) which was activated by H₂O (distilled) Rice husk ash is added to the basic ingredients with certain predetermined variations. Samples were cured (*cure*) at 60°C for 10 hours. Based on the results of the characterization, the *Scanning Electron Microscopy* (SEM) *one-part geopolymer* material forms a good composition with each of the basic material particles clearly visible. The highest flexural strength was obtained at 3.55 MPa with a mass of 0 grams of rice husk ash. The highest compressive strength was obtained at 8.1 MPa with a mass of 0 grams of rice husk ash. This is also supported by microstructural testing which shows a good bond between the matrix and the aggregate. XRD characterization showed that the sample was dominated by minerals *silicon oxide* and *aluminum oxide* which did not react together. Mechanical strength decreases with the addition of rice husk ash due to the formation of more pores.

Keywords : Rice Husk Ash, *Silica Fume*, *One-part Geopolymer*

A. PENDAHULUAN

Beton merupakan material bangunan paling populer yang banyak digunakan untuk membangun berbagai infrastruktur seperti gedung, jembatan, dan jalan raya saat ini. Meningkatnya pembangunan infrastruktur mengakibatkan produksi semen juga meningkat. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2014 menunjukkan produksi semen Portland (OPC) di Indonesia terus meningkat dari sebanyak 130 ribu ton menjadi 143 ribu ton dalam kurun waktu 9 bulan. Namun dalam proses produksi semen Portland (OPC) menghasilkan gas CO₂ dalam jumlah besar sehingga menjadi salah satu penyumbang gas CO₂ terbesar (Askarian et al., 2019). Setiap produksi 1 ton semen portland akan menghasilkan sekitar 0,8 ton CO₂ yang dilepas ke udara dan mencemari lingkungan, sehingga dibutuhkan alternatif pengganti semen yang ramah lingkungan. Salah satu material yang proses produksinya ramah lingkungan adalah geopolimer.

Geopolimer hadir sebagai alternatif berkelanjutan untuk semen Portland selama beberapa dekade. Geopolimer termasuk bahan struktural amorf yang dianggap sebagai *green materials* karena memiliki banyak keunggulan seperti ramah lingkungan, ekonomis, hemat energi, emisi gas buang rendah, dan berasal dari bahan yang dapat di daur ulang (Ge et al., 2015; Wu et al., 2019). Berkembangnya teknologi dan informasi membuat para peneliti geopolimer terus mencari cara untuk menghasilkan geopolimer dari prekursor siap pakai yang dapat langsung bercampur dengan air seperti pada semen Portland (OPC). Proses pencampuran ini disebut juga sebagai sistem geopolimer pencampuran satu bagian (*one-part geopolimer*).

One-part geopolimer merupakan metode sintesis geopolimer yang berbeda dari metode konvensional yang biasa digunakan. Geopolimer biasanya disintesis dengan melarutkan aktivator alkali dalam air sebelum dicampur dengan prekursor aluminosilikat padat yang disebut sebagai geopolimer dua bagian (*two-part geopolimer*). Geopolimer yang dirancang dari campuran dua bagian terdiri dari basa larutan dan prekursor bubuk padat (Nematollahi et al., 2015). Sedangkan pada geopolimer satu bagian (*one-part geopolimer*), prekursor bubuk padat yang disiapkan sudah dicampurkan dengan bubuk silikat dan padatan basa (NaOH) sehingga prekursor yang tersedia hanya ditambahkan dengan air dan terbentuk geopolimer, metode ini dinamakan metode pencampuran satu bagian karena hanya dengan menambahkan air ke dalam prekursor. Geopolimer satu bagian memiliki kelebihan dalam bidang pembuatan massal karena tidak menggunakan larutan basa yang menyebabkan korosi pada wadah yang digunakan karena hanya menggunakan air sebagai larutan pembentuk geopolimer (Liew et al., 2017). Oleh karena itu, dikembangkan geopolimer alternatif yang disebut sebagai geopolimer satu bagian.

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian terkait geopolimer menggunakan limbah industri sebagai bahan dasar sintesis geopolimer. Bahan dasar utama yang diperlukan untuk pembuatan material geopolimer ini adalah bahan-bahan yang banyak mengandung unsur-unsur silika dan alumina (Manuahe et al., 2014). Sifat-sifat Geopolimer dipengaruhi oleh karakteristik bahan baku yaitu komposisi kimia, jumlah silikon dan aluminium yang larut, serta ukuran partikel. Perbandingan atomik Si:Al di dalam struktur geopolimer menjadi faktor yang sangat penting dalam menentukan sifat dan

aplikasi material tersebut. Sebagai contoh abu terbang (*Fly Ash*) dan *silica fume* yang biasanya digunakan sebagai agregat.

Penggunaan bahan alternatif yang kaya SiO_2 diperlukan untuk membuat komposit yang lebih ramah lingkungan, salah satu limbah dengan kandungan SiO_2 yang tinggi yaitu abu sekam padi. Penggunaan abu sekam padi di industri beton membantu mengurangi masalah polusi yang ditimbulkan oleh pembuangan sekam padi terutama di negara-negara penghasil beras seperti Indonesia. Abu sekam padi memiliki banyak variasi tergantung pada berbagai kriteria, seperti suhu pembakaran dan lama waktu pembakaran. Suhu yang lebih tinggi menghasilkan silika kristal. Kondisi abu sekam padi yang sudah terbakar sangat mempengaruhi sifat fisikokimia seperti ukuran partikel, luas permukaan, kristalografi, mineralogi, komposisi, kadar abu, porositas, dan struktur pori. Reaktivitas abu sekam padi sebagian besar tergantung pada mineraloginya (Das et al., 2020). Limbah pertanian yang melimpah seperti abu sekam padi atau *rice husk ash* (RHA) dapat menjadi bahan alternatif untuk membuat komposit ramah lingkungan karena mengandung SiO_2 yang tinggi (Prasara-A & Gheewala, 2017). Penambahan abu sekam padi pada komposit geopolimer selain ramah lingkungan juga berpotensi untuk meningkatkan sifat mekanik geopolimer. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh (Nuaklong et al., 2020) menunjukkan bahwa seiring dengan penambahan abu sekam padi pada geopolimer dapat meningkatkan kekuatan mekaniknya.

B. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental murni, yang mengarah pada pengembangan produk geopolimer (*development research*) menggunakan bahan dasar *fly ash*, abu sekam padi, dan *silica fume*. Proses produksi *One-part Geopolymer* diawali dengan bahan dasar *fly ash* yang tersedia dipanaskan untuk mengurangi kadar air dalam *fly ash*. Untuk abu sekam padi yang akan divariasikan, ditimbang dengan komposisi yang telah ditentukan. Sintesis *one-part geopolymer* dilakukan dengan mencampurkan bahan dasar berupa *Fly Ash*, *Silica Fume*, dan NaOH (*Natrium Hidroksida*) yang diaktivasi menggunakan H_2O (*Aquades*). Sebelum mencampurkan semua bahan dasar, *silica fume* terlebih dahulu digerus bersama dengan NaOH. Setelah pasta *one-part geopolymer* terbentuk kemudian dimasukkan kedalam cetakan dan di *curing* pada suhu 60°C selama 10 jam. Sampel yang telah dicuring tersebut dibiarkan pada cetakan selama 24 jam. Adapun pengujian yang dilakukan yaitu struktur mikro meliputi, karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dengan menggunakan alat Jeol JSM-6000 PLUS Neo Scope untuk mengetahui keadaan morfologi dari sampel, karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) dengan menggunakan alat X-ray Diffractometer Rigaku Miniflex untuk mengetahui fase yang terbentuk pada sampel dan panjang gelombang yang digunakan adalah $\text{Cu-}\alpha$ sebesar $1.54056 \text{ \AA}$. Sudut 2θ yang digunakan untuk karakterisasi sampel *one-part geopolymer*, yaitu 10° sampai 90° . Untuk mengetahui gugus fungsi dari sampel dilakukan karakterisasi *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) dengan menggunakan alat FTIR HazMatID 360. Sampel kemudian dianalisis dengan melihat nilai ATR (*attenuated total reflection*) yang diukur pada panjang gelombang 400 sampai 4000 cm^{-1} dengan

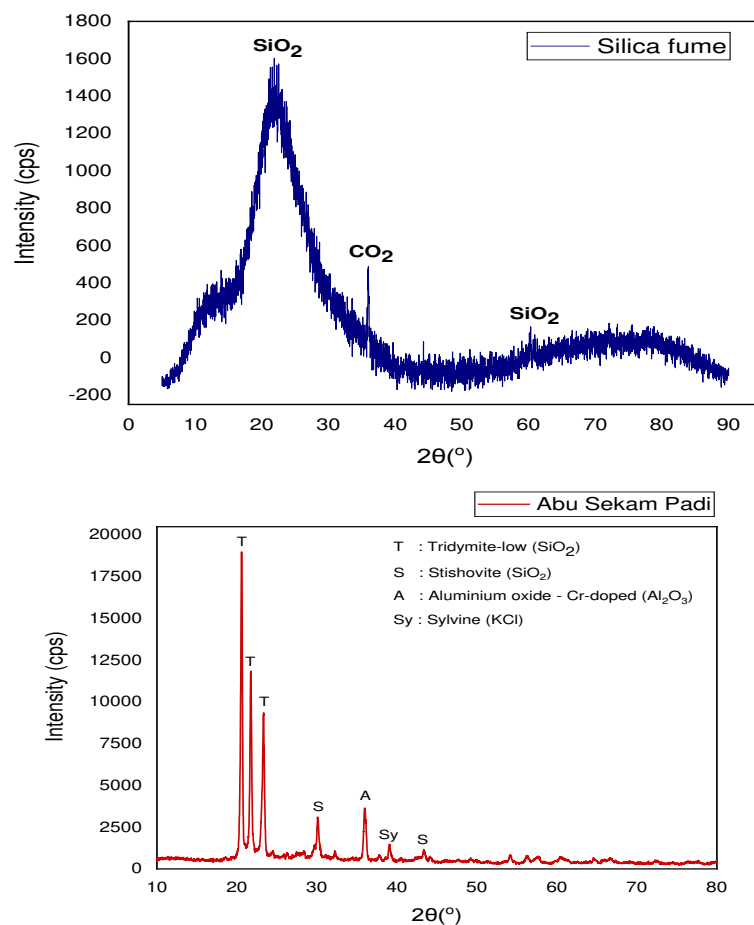
melakukan pengukuran transmitansi dan untuk sifat fisis dan mekaniknya dilakukan pengujian porositas dan massa jenis dilakukan dengan menggunakan prinsip Archimedes dengan cara menenggelamkan material ke dalam air, kuat tekan dan kuat lentur dari sampel masing masing diukur dengan menggunakan alat kuat tekan dan kuat lentur. Untuk kuat lentur menggunakan metode *three-point flexure test* atau biasa disebut *three-point bending test* Terdapat empat sampel yang akan dihasilkan yaitu *One-part Geopolymer-Abu Sekam Padi 0% (OPG-ASP 0%)*, *One-part Geopolymer-Abu Sekam Padi 2.5% (OPG-ASP 2.5%)*, dan *One-part Geopolymer-Abu Sekam Padi 5% (OPG-ASP 5%)*, *One-part Geopolymer-Abu Sekam Padi 7.5% (OPG-ASP 7.5%)*.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

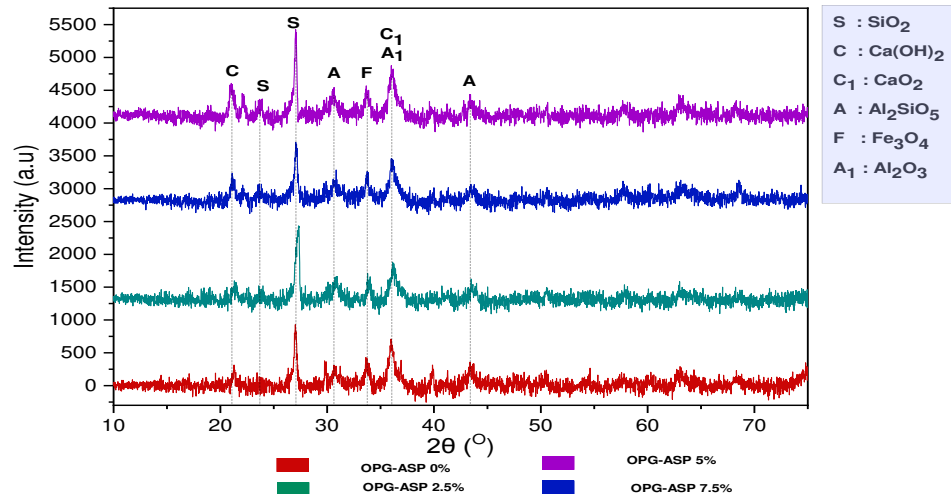
1. Struktur dan Morfologi *One-part Geopolymer* berbasis *Fly Ash* dan *Silica Fume*

a. Karakterisasi *X-Ray Diffraction (XRD)*

Karakterisasi XRD bertujuan mengetahui struktur kristal dari bahan dasar yang telah disintesis. Struktur kristal diperoleh dengan menggunakan aplikasi PDXL2 dari mesin XRD Rigaku Miniflex terhadap produk *one-part geopolymer* diperoleh informasi adanya fase kristal dan amorf. Fase kristal ditandai dengan adanya puncak yang tajam sedangkan fase amorf ditandai dengan terbentuknya punuk atau (gundukan/*hump*) dengan intensitas yang rendah.



Gambar 1. Difraktogram Silica Fume dan Abu Sekam Padi



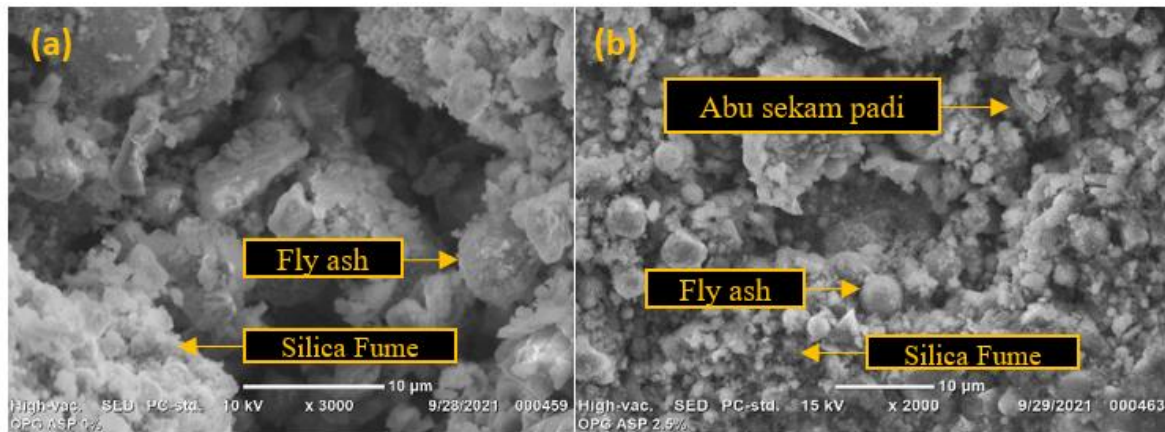
Gambar 2. Difraktogram *one-part geopolymer* dengan variasi abu sekam padi

Berdasarkan hasil analisis XRD *silica fume* pada gambar 1 merupakan fase semi amorf ditandai dengan gundukan lebar dan terdapat puncak kristal Cristobalite low (SiO_2) dengan intensitas yang tinggi, dengan komposisi sebesar 98 wt% , dan terdapat fase kristal lain yaitu Stishovite (SiO_2) dalam jumlah yang kecil yaitu sebanyak 2,05 wt%. Gambar 1 menunjukkan hasil analisis XRD dari abu sekam padi yang digunakan menunjukkan fase kristalin dengan 4 fase yaitu Tridymite-low 94,3%, Stishovite 1,7%, Aluminium Oxide 3,42% dan Sylvine 0,56%. Puncak tertinggi terdapat pada fase Tridymite (SiO_2) yang terdapat pada sudut $20,58^\circ$.

Gambar 2 menunjukkan hasil analisis XRD sampel *one-part geopolymer* tanpa penambahan abu sekam padi dan dengan penambahan abu sekam padi. Terdapat perbedaan yang tidak signifikan antara sampel tanpa penambahan abu sekam padi dan dengan penambahan abu sekam padi. Untuk *one-part geopolymer* tanpa penambahan abu sekam padi atau diberi nama sampel OPG-ASP 0% diperoleh pola difraksi yang memperlihatkan 6 fase yakni, Silicon Oxide 42%, Magnetite low 15%, Aluminium Oxide 14%, Sillimanite 10%, Calcium Peroxide 10%, dan Calcium Hydroxide sebesar 9%. Fase Silicon Oxide yang tinggi diperoleh pada rentang sudut $2\theta = 27^\circ$. Jika dibandingkan dengan penambahan abu sekam padi pada sampel OPG-ASP 2,5% diperoleh pola difraksi dengan 4 fase yakni, Silicon Oxide yang mengalami penambahan dibanding sampel OPG-ASP 0 yaitu sebesar 56%, Silimanite 18%, Portlandite 18% dan Magnetite sebesar 7%. Fase Aluminium Oxide yang sebelumnya berada di sampel OPG-ASP 0% tidak terlihat pada hasil pengujian sampel OPG-ASP 2,5%. Fase Silicon Oxide yang tinggi diperoleh pada sudut $2\theta = 27,34^\circ$.

b. Scanning Electron Microscopy (SEM)

Karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk menyelidiki struktur mikro pada permukaan material (geopolimer), dan antar muka (*interface*) antara agregat-matriks sampel komposit *one-part geopolymer*. Untuk mengamati morfologi komposit digunakan perbesaran 2000x dan 3000x untuk masing-masing sampel.

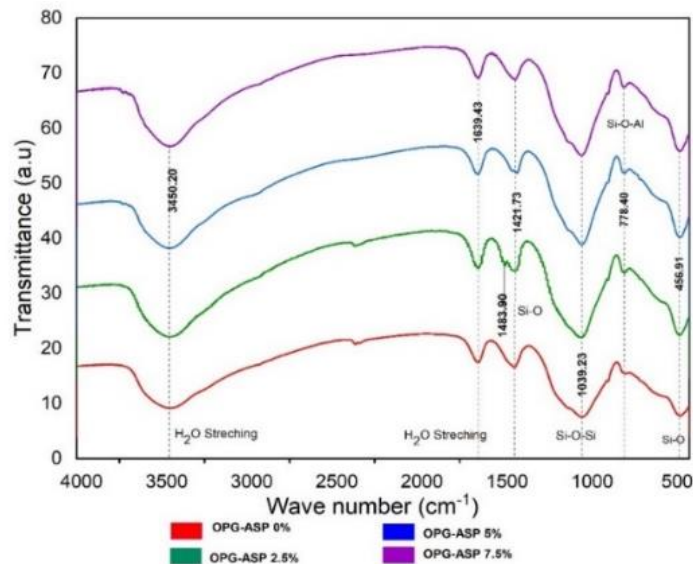


Gambar 3 Citra SEM *one-part geopolymer* (a) ASP 0% dengan scale bar 10 µm (b) ASP 2.5% dengan scale bar 20 µm

Berdasarkan citra SEM (*Scanning Electron Microscopy*) pada gambar 3 (a) morfologi sampel *one-part geopolymer* tanpa penambahan abu sekam padi menunjukkan bahwa struktur material yang teramati tidak homogen karena bentuk dan ukuran partikel dari bahan dasar berbeda sehingga menimbulkan pori pada sampel. Gambar (b) menunjukkan permukaan sampel *one-part geopolymer* dengan penambahan abu sekam padi sebanyak 2,5% pada gambar (b) menunjukkan morfologi dari sampel bahwa struktur bahan dasar dan abu sekam padi tidak homogen karena bentuk dan ukuran partikelnya tidak serupa, *fly ash* dan *silica fume* yang berbentuk bulat sedangkan abu sekam padi yang bentuknya tidak teratur sehingga antara partikel terdapat ruang kosong yang memperbanyak pori.

c. Spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Karakterisasi spektroskopi Fourier transform infrared (FTIR) dilakukan untuk mendeteksi gugus fungsi dan mengidentifikasi senyawa yang ada dalam *one-part geopolymer*.



Gambar 4. Spektrum FTIR *one-part geopolymer* dengan variasi abu sekam padi yang berbeda

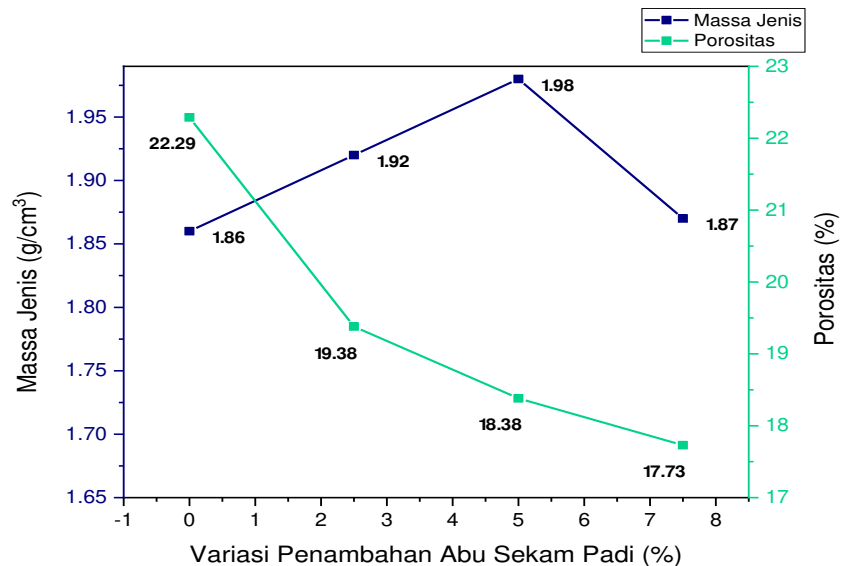
Gambar 4 menunjukkan spektrum IR (Infra Red) dari sampel *one-part geopolymer* dengan 4 komposisi yang berbeda dan menunjukkan bahwa pada bilangan gelombang 3855 - 3450 cm^{-1} terjadi stretching dari ikatan O-H. Pada bilangan gelombang 1423 - 1420 cm^{-1} dikaitkan dengan stretching

pada ikatan Si-O. Pada bilangan gelombang sekitar 1085 - 1039 cm^{-1} merupakan stretching pita Si-O-Si. Pada bilangan gelombang 791 - 778 cm^{-1} terjadi stretching Si-O/Al-O dan untuk bilangan gelombang 478 - 456 cm^{-1} terjadi bending O-Si-O (SiO_4). Bending dan stretching yang terjadi menunjukkan acuan utama terbentuknya jaringan atau rantai *one-part geopolymer* seperti penelitian yang telah dilakukan oleh (Mohammed et al., 2019) tentang pembuatan *one-part geopolymer* dengan memvariasikan aktivatornya, terlihat tidak ada perbedaan dari struktur utama geopolimer dari tiap sampel. Perbedaan penambahan abu sekam padi yang terbentuk di dalam jaringan geopolimer pada penambahan 5% dan 7,5% abu sekam padi tampak tidak berpengaruh pada pita vibrasi gugus fungsional geopolimer.

2. Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi terhadap Sifat Fisis *One-part Geopolymer*

Pengukuran Massa Jenis dan Porositas

Pengukuran massa jenis dan porositas pada penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh penambahan abu sekam padi terhadap sifat fisik *one-part geopolymer* dan dilakukan dengan menggunakan metode Archimedes secara berulang (sebanyak 3 kali pengukuran).



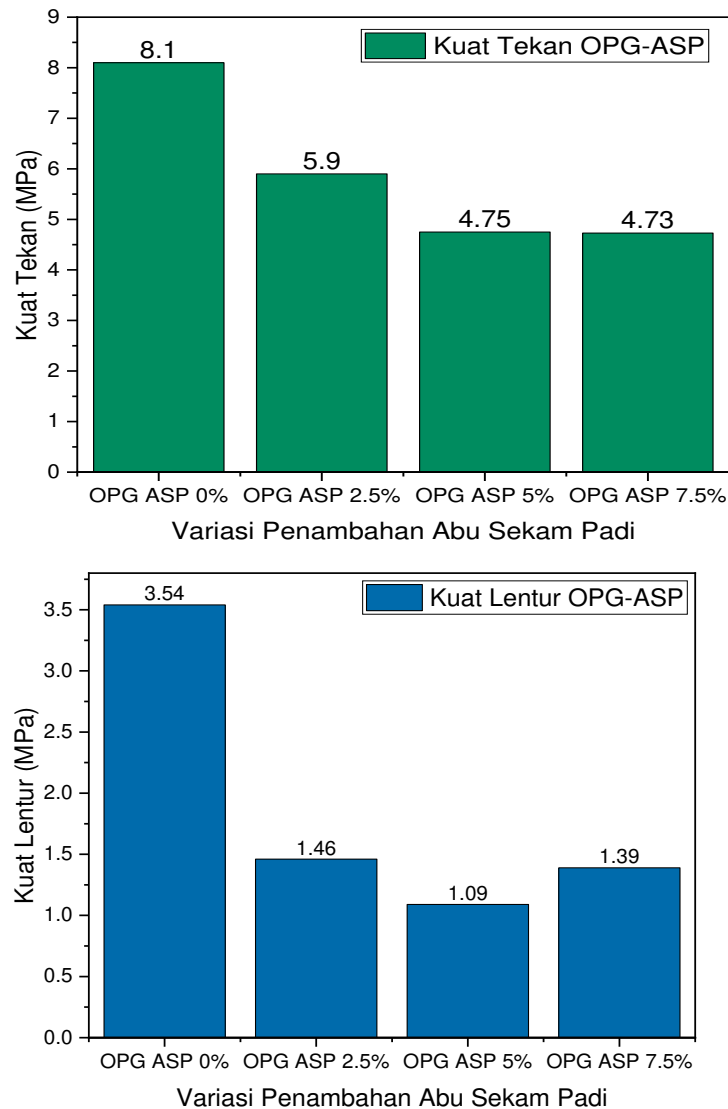
Gambar 5 Grafik Hubungan Antara Penambahan Abu Sekam Padi Terhadap Massa Jenis Rata-rata dan Porositas Rata-rata Sampel

Pada gambar 5 hasil pengukuran massa jenis pada sampel geopolimer berbasis *fly ash* dengan penambahan abu sekam padi nilai massa jenis yang diperoleh ialah semakin meningkat seiring dengan penambahan abu sekam padi, tetapi pada penambahan dengan komposisi abu sekam padi tertinggi massa jenis kembali turun disebabkan pengukuran massa jenis dan porositas dengan metode Archimedes menyebabkan tidak semua air masuk kedalam pori sampel dengan variasi penambahan abu sekam padi yang semakin bertambah karena partikel abu sekam padi yang berbentuk kristal menumpuk pori menyebabkan beberapa partikel air tidak lolos masuk kedalam pori yang lebih kecil dan bersifat hidrofobik sehingga jika dibandingkan antara pengukuran porositas dan pengukuran massa jenis maka semakin menurun porositas maka semakin besar massa jenis yang diperoleh.

3. Pengaruh Abu Sekam Padi Terhadap Sifat Mekanik *One-part Geopolymer*

Karakterisasi Kuat Tekan dan Kuat Lentur (*Compressive Strength*)

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengetahui kemampuan sampel *one-part geopolymer* menahan beban yang diberikan hingga mengalami kerusakan. Pengujian kuat lentur dimaksudkan untuk mengetahui seberapa lentur atau elastis produk *one-part geopolymer* jika diberikan beban.



Gambar 6 Diagram batang hasil kuat tekan dan kuat lentur sampel *one-part geopolymer* dengan variasi penambahan abu sekam padi 0%, 2,5%, 5%, dan 7,5%

Pada grafik diperoleh, kuat tekan paling rendah terdapat pada sampel OPG-ASP 7.5% sebesar 4,73 MPa. Kuat tekan sampel OPG ASP 2,5% diperoleh 5,9 MPa, dan kuat tekan sampel OPG ASP 5% sebesar 4,75 MPa sedangkan untuk kuat tekan maksimum terdapat pada sampel OPG-ASP 0% sebesar 8,1 MPa sehingga dapat diketahui bahwa semakin besar massa agregat (Abu Sekam Padi) sampel maka nilai kuat tekan semakin rendah. Penambahan abu sekam padi yang lebih besar menyebabkan terjadinya penurunan kekuatan kinerja dari komposit *one-part geopolymer* karena penambahan abu sekam padi dengan komposisi yang ekstrim menyebabkan rasio Al/Si yang tidak seimbang sehingga menghambat

proses geopolimerisasi (Das et al., 2020). Kuat lentur paling rendah terdapat pada sampel OPG-ASP 5% sebesar 1,09 MPa. Kuat lentur sampel OPG ASP 2,5% diperoleh 1,46 MPa, dan kuat tekan sampel OPG ASP 7,5% sebesar 1,39 MPa sedangkan untuk kuat lentur maksimum terdapat pada sampel OPG-ASP 0% sebesar 3,54 MPa. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Nasrul et al., 2021) hubungan kuat tekan dan kuat lentur pada beton berbanding lurus yang artinya semakin turun nilai kuat tekan dengan penambahan agregat maka kuat lentur dari beton juga semakin turun. Sedangkan hasil pengukuran kuat lentur pada sampel *one-part geopolimer* terlihat sesuai kecuali pada komposisi 5% dan 7,5% kuat lentur *one-part geopolimer* naik sebanyak 0,3 MPa dikarenakan sampel yang bentuknya tidak merata ketika diberi gaya pada titik tengah sampel bergeser sedikit sehingga pembacaan pengukuran tidak tepat.

D. SIMPULAN

Pengaruh penambahan abu sekam padi terhadap sifat mekanik *one-part geopolimer* dapat diketahui berdasarkan hasil uji kuat lentur dan kuat tekan yaitu berbanding terbalik artinya semakin meningkat penambahan abu sekam padi maka sifat mekanik dari *one-part geopolimer* semakin menurun. Adapun hubungan massa jenis dan porositas *one-part geopolimer* terhadap kuat tekan menunjukkan porositas mengalami penurunan seiring dengan penambahan abu sekam padi namun, massa jenis mengalami peningkatan seiring dengan penambahan abu sekam padi.

E. DAFTAR RUJUKAN

- Askarian, M., Tao, Z., Samali, B., Adam, G., & Shuaibu, R. (2019). Mix composition and characterisation of one-part geopolymers with different activators. *Construction and Building Materials*, 225, 526–537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.083>
- Das, S. K., Mishra, J., Singh, S. K., Mustakim, S. M., Patel, A., Das, S. K., & Behera, U. (2020). Characterization and utilization of rice husk ash (RHA) in fly ash – Blast furnace slag based geopolimer concrete for sustainable future. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5162–5167. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.870>
- Ge, Y., Yuan, Y., Wang, K., He, Y., & Cui, X. (2015). Preparation of geopolimer-based inorganic membrane for removing Ni²⁺ from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 299, 711–718. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.006>
- Liew, Y.-M., Heah, C.-Y., Li, L., Jaya, N. A., Abdullah, M. M. A. B., Tan, S. J., & Hussin, K. (2017). Formation of one-part-mixing geopolymers and geopolimer ceramics from geopolimer powder. *Construction and Building Materials*, 156, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.110>
- Manuahe, R., Sumajouw, M. D. J., & Windah, R. S. (2014). *KUAT TEKAN BETON GEOPOLYMER BERBAHAN DASAR ABU TERBANG (FLY ASH)*. 6.
- Mohammed, B. S., Haruna, S., Wahab, M. M. A., Liew, M. S., & Haruna, A. (2019). Mechanical and microstructural properties of high calcium fly ash one-part geopolimer cement made with granular activator. *Heliyon*, 5(9), e02255. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02255>
- Mor, S., Manchanda, C. K., Kansal, S. K., & Ravindra, K. (2017). Nanosilica extraction from processed agricultural residue using green technology. *Journal of Cleaner Production*, 143, 1284–1290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.142>
- Nasrul, S., Yanti, G., & Megasari, S. W. (2021). *Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Lentur pada Beton Berpori*. 04, 13.
- Nematollahi, B., Sanjayan, J., & Shaikh, F. U. A. (2015). Synthesis of heat and ambient cured one-part geopolimer mixes with different grades of sodium silicate. *Ceramics International*, 41(4), 5696–5704. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.154>

- Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Pothisiri, T., Sata, V., & Chindapasirt, P. (2020). Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119797. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119797>
- Prasara-A, J., & Gheewala, S. H. (2017). Sustainable utilization of rice husk ash from power plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1020–1028. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.042>
- Wu, Y., Lu, B., Bai, T., Wang, H., Du, F., Zhang, Y., Cai, L., Jiang, C., & Wang, W. (2019). Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges. *Construction and Building Materials*, 224, 930–949. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.112>