

PENGARUH PENAMBAHAN *SUPERPLASTICIZER* TERHADAP NILAI MODULUS ELASTISITAS PADA BETON GEOPOLIMER

Erika Cahyani Putri¹ dan Rachmansyah²

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Krida Wacana, Jl. Tanjung Duren Raya No. 4 Jakarta
Erika.2018ts025@civitas.ukrida.ac.id

²Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Krida Wacana, Jl. Tanjung Duren Raya No. 4 Jakarta
Rachmansyah@ukrida.ac.id

Masuk: 16-04-2023, revisi: 19-06-2023, diterima untuk diterbitkan: 20-06-2023

ABSTRACT

Geopolymer concrete is a type of environment friendly concrete because in term of its manufacture, cement can be replaced by waste materials such as fly ash. Based on several previous studies, the modulus elasticity of geopolymer concrete is still below the modulus elasticity of cement concrete is $4700 \sqrt{f_c'}$. To increase the value of modulus elasticity in geopolymer concrete can be obtained by increasing the density of the concrete. In this research, an experimental study was carried out by adding superplasticizer which is expected to increase the density and modulus elasticity in geopolymer concrete. Experimental studies were carried out by testing the compressive strength and modulus elasticity on geopolymer concrete specimens. The specimens were made in form of a cylinder 15 cm with 30 cm height having design compressive strength of 30 to 55 MPa. To obtain design compressive strength, NaOH was used with molarities of 8M, 10M, 14M, and 16M with the concrete being steam curing for 4 hours at 70°C, 80°C, and 90°C. The results showed that the superplasticizer can increase the compressive strength and modulus elasticity in geopolymer concrete. The modulus elasticity of geopolymer concrete is $3500 \sqrt{f_c'}$ or 75% of the modulus elasticity in cement concrete.

Keywords: Geopolymer Concrete; Compressive Strength; Modulus Elasticity; Superplasticizer

ABSTRAK

Beton geopolimer merupakan salah satu jenis beton ramah lingkungan, karena dalam pembuatannya material semen dapat digantikan dengan material limbah seperti abu terbang. Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya, nilai modulus elastisitas beton geopolimer masih di bawah standar modulus elastisitas beton semen yaitu $4700 \sqrt{f_c'}$. Untuk meningkatkan nilai modulus elastisitas pada beton geopolimer dapat dilakukan dengan meningkatkan kepadatan betonnya. Pada penelitian ini dilakukan studi eksperimental dengan menambahkan *superplasticizer* yang diharapkan dapat meningkatkan kepadatan dan modulus elastisitas pada beton geopolimer. Studi eksperimental yang dilakukan dengan menguji kuat tekan dan modulus elastisitas pada benda uji beton geopolimer yang sudah dibuat. Benda uji yang dibuat berbentuk silinder 15 cm dan tinggi 30 cm dengan mutu rencana 30 sampai 55 MPa. Untuk mendapatkan mutu rencana, NaOH yang digunakan dengan molaritas 8M, 10M, 14M, dan 16M dengan beton dirawat uap selama 4 jam pada suhu 70°C, 80°C dan 90°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *superplasticizer* dapat meningkatkan nilai kuat tekan dan modulus elastisitas pada beton geopolimer. Nilai modulus elastisitas beton geopolimer yang didapatkan sebesar $3500 \sqrt{f_c'}$ atau sebesar 75% terhadap modulus elastisitas beton semen.

Kata kunci: Beton Geopolimer; Kuat Tekan; Modulus Elastisitas; *Superplasticizer*

1. PENDAHULUAN

Selama lima tahun terakhir, perkembangan infrastruktur meningkat dengan pesat. Banyak bangunan konstruksi yang menggunakan beton sebagai material struktural. Dalam pembuatan beton, digunakan material berupa agregat halus, agregat kasar, dan pengikat berupa air dan semen. Semen adalah salah satu material yang saat proses pembuatannya mengeluarkan gas CO₂ yang mengakibatkan terjadinya emisi gas rumah kaca dan menimbulkan terjadinya pencemaran lingkungan (Indrayani et al., 2022). Oleh karena itu, salah satu alternatif pengganti beton semen yaitu beton geopolimer yang ramah lingkungan.

Beton geopolimer merupakan salah satu beton yang ramah lingkungan, karena dalam pembuatannya, beton geopolimer tidak menggunakan semen sebagai bahan pengikat agregat. Salah satu material yang digunakan adalah abu terbang yang berasal dari limbah hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap. Abu terbang yang digunakan merupakan material pengganti semen yang mengandung Silika (Si) dan Aluminium (Al).

Selain abu terbang, pembuatan beton geopolimer menggunakan material larutan kimia berupa larutan alkali yang terdiri dari Natrium Hidroksida (NaOH) yang dapat memberikan sifat fluida terhadap campuran beton geopolimer dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3) yang memiliki sifat kekentalan, sehingga dapat menentukan kelayakan *workability* dalam campuran geopolimer yang memiliki fungsi sebagai aktivator dan bahan pengikat pada beton geopolimer (Putra et al., 2022).

Beton geopolimer juga memerlukan perawatan beton seperti suhu *curing*, karena berpengaruh terhadap mutu beton. Apabila suhu *curing* yang digunakan semakin meningkat, maka terjadi peningkatan terhadap nilai modulus elastisitas pada beton (Triwullan et al., 2017). Oleh karena itu, faktor yang harus di perhatikan sebagai penentu kualitas pada pembuatan struktur beton yaitu nilai modulus elastisitas. Nilai modulus elastisitas sangat penting untuk lendutan dan kekuatan pada beton (Elisabeth et al., 2020).

Penelitian mengenai nilai modulus elastisitas pada beton semen sudah banyak dilakukan, sehingga nilai modulus elastisitas beton yang dijadikan sebagai parameter desain dapat ditetapkan, yaitu sebesar $4700\sqrt{f_c'}$ (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Akan tetapi, pada penelitian beton geopolimer masih belum mendapatkan nilai modulus elastisitas yang tepat untuk dijadikan sebagai keperluan desain. Berdasarkan hasil modulus elastisitas dari beberapa penelitian, pada beton geopolimer mendapatkan hasil sebesar $3282\sqrt{f_c'}$ (Bellum et al., 2019), $1088f_c^{0.815}$ (Khalaf & Kopecskó, 2022), $2,5f_c^{3/5}$ (Waqas et al., 2021). Melihat hasil penelitian beton geopolimer sebelumnya, hasil modulus elastisitas masih di bawah standar beton semen. Nilai modulus yang rendah bisa terjadi karena memiliki rongga udara yang cukup besar pada beton. Sehingga, hal yang harus diperhatikan dalam pembuatan beton yaitu rongga udara pada beton yang berpengaruh terhadap nilai modulus elastisitas, karena nilai modulus elastisitas dapat meningkat seiring dengan kepadatan yang meningkat dan kepadatan yang tinggi terhadap beton dapat menunjukkan porositas rendah dengan demikian berkurangnya rongga udara pada beton dapat meningkatkan kekakuan material (Loya, 2011).

Superplasticizer memiliki fungsi untuk mengurangi pori pada beton yang dapat meningkatkan kuat tekan dan berpengaruh terhadap nilai modulus elastisitas (Lisantonio & Jenifer, 2020) seperti yang dilakukan penelitian sebelumnya, menggunakan variasi kadar *superplasticizer* dengan berbagai jenis merek yaitu *polycarboxylate conplast SP* dan *naphthalene* memperoleh hasil korelasi modulus elastisitas sebagai berikut $2506,68\sqrt{f_c'}$ (Putra et al., 2016), $15080+240f_c'$ (Chouksey et al., 2022), $3510 \times f_c^{0.5}$ (Bhavsar & Panchal, 2022). Untuk itu, pada penelitian ini dilakukan dengan penambahan *superplasticizer Sika Viscocrete-1003* berharap mendapatkan nilai modulus elastisitas melebihi beton semen yaitu $4700\sqrt{f_c'}$.

Ruang lingkup pada penelitian ini yaitu hasil pengujian modulus elastisitas dan kuat tekan pada umur 28 hari dengan menggunakan benda uji berbentuk silinder ukuran 15 x 30 cm dan menggunakan campuran *superplasticizer* 2%. Molaritas NaOH yang digunakan yaitu 8 M, 10 M, 12 M, 14 M dan 16 M. Perawatan pada benda uji menggunakan metode suhu ruang dan metode *steam curing* dengan durasi 4 jam pada suhu 90°C, 80°C, dan 70°C.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan merupakan salah satu jenis penelitian eksperimen. Tahap pertama yang dilakukan pada penelitian adalah melakukan kajian studi literatur terhadap topik yang akan diteliti yaitu pengaruh penambahan *superplasticizer* pada nilai modulus elastisitas. Kemudian dilakukan persiapan dan pengujian material yang akan digunakan. Setelah mengetahui hasil pengujian material sudah memenuhi persyaratan, maka material tersebut dapat digunakan sebagai material pembuatan beton geopolimer. Selanjutnya dilakukan pembuatan benda uji menggunakan mutu beton 30-55 MPa dengan kode benda uji yang berbeda dan terdapat 3 buah benda uji di setiap pembuatan benda uji dengan bentuk silinder $\varnothing 15 \times 30$ cm. Pada benda uji, dilakukan pengujian modulus elastisitas dan pengujian kuat tekan setelah umur beton 28 hari dengan total keseluruhan benda uji sebanyak 30 benda uji. Dari hasil pengujian tersebut dapat di simpulkan hasil yang didapatkan.

Persiapan dan pengujian material

Sebelum dilakukan pembuatan benda uji, untuk tahap pertama yaitu melakukan pengujian material yang digunakan sebagai data properti untuk pembuatan rancangan campuran beton. Untuk tahap kedua sebelum pembuatan benda uji, dilakukan persiapan material supaya pada saat pembuatan benda uji, semua material sudah dipersiapkan. Adapun material yang harus dipersiapkan dan di uji untuk pembuatan benda uji beton geopolimer yaitu agregat kasar, agregat halus, abu terbang, larutan alkali dan *superplasticizer*.

Agregat kasar

Agregat kasar adalah butiran kerikil yang didapatkan dari pecahan batu alam. Agregat kasar harus memiliki susunan gradasi yang baik, agar material tersebut dapat mengisi rongga pada beton. Persiapan yang dilakukan pada agregat

kasar yaitu mencuci agregat kasar hingga bersih, setelah itu dilakukan pengujian material yaitu pengujian analisis saringan, kadar air, berat jenis, penyerapan, kadar lumpur, keausan, berat isi padat dan berat isi lepas. Apabila hasil pengujian sudah memenuhi persyaratan, material agregat kasar dapat digunakan untuk material campuran beton geopolimer. Adapun persiapan sebelum dilakukan pembuatan benda uji, agregat kasar direndam selama 24 jam kemudian ditiriskan hingga keadaan agregat kasar kering jenuh permukaan.

Agregat halus

Agregat halus merupakan material campuran beton dapat berupa pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami dari batu batuan. Agregat halus memiliki fungsi yaitu membentuk mortar yang berperan sebagai pengikat agregat kasar. Persiapan yang dilakukan pada agregat halus yaitu mencuci agregat halus hingga bersih, setelah itu dilakukan pengujian material yaitu pengujian analisa saringan, kadar air, berat jenis, penyerapan, berat isi lepas dan berat isi padat. Apabila hasil pengujian sudah memenuhi persyaratan maka, material tersebut dapat digunakan. Adapun persiapan agregat halus sebelum pembuatan benda uji, agregat halus di rendam selama 24 jam sebanyak yang dibutuhkan, selanjutnya agregat halus ditiriskan hingga dalam keadaan kering jenuh permukaan.

Abu terbang

Abu terbang merupakan bagian dari sisa-sisa pembakaran batu bara dari pembangkit listrik tenaga uap. Abu terbang mengandung senyawa kimia bersifat *pozzolan* yang dapat digunakan sebagai bahan pengganti semen dalam pembuatan beton. Pengujian yang dilakukan pada abu terbang terdiri dari pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengetahui ukuran butiran, pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia dan pengujian berat jenis. Abu terbang memiliki peran sebagai pengikat pada campuran geopolimer dan memiliki ikatan senyawa aluminium (Al) yang kaya akan silika (Si) yang dapat merubah karakteristik beton geopolimer. Sebelum digunakan sebagai material campuran beton, dilakukan proses persiapan penyaringan dengan ukuran lolos saringan no.30.

Larutan alkali

Larutan alkali atau aktivator merupakan salah satu material beton geopolimer dari dua larutan campuran utama yaitu NaOH dengan kadar 99% yang dilarutkan dengan air sesuai dengan molaritas yang diinginkan dan Na_2SiO_3 yang memiliki peran penting untuk mempercepat proses polimerisasi. Kedua larutan tersebut memiliki fungsi sebagai pengikat pada beton geopolimer. Proses pelarutan NaOH menggunakan air yang berperan sebagai pelarut NaOH. Apabila NaOH dicampur dengan air, maka akan mengalami reaksi yang panas. Campuran NaOH dibuat satu hari sebelum melakukan pembuatan benda uji dan disimpan pada wadah yang tertutup untuk mencegah penguapan sampai pembuatan benda uji dilakukan. Larutan Na_2SiO_3 dipersiapkan sebelum pengecoran dilakukan agar tidak terjadi penguapan pada larutan tersebut. Larutan alkali memiliki peran penting terhadap beton geopolimer semakin tinggi molaritas yang digunakan, maka semakin besar mutu beton yang didapat (Hardjasaputra et al., 2019). Molaritas yang digunakan pada penelitian yaitu 8 M, 10 M, 12 M, 14 M dan 16 M berdasarkan Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan NaOH (Rajamane & Jeyalakshmi, 2014)

| Molaritas | Persiapan 1 kg Larutan NaOH | | | Konsentrasi Larutan NaOH | |
|-----------|-----------------------------|------|-----------------|--------------------------|-------|
| | NaOH padat | Air | NaOH Hidroksida | Berat NaOH | % |
| | gram | gram | gram | | |
| 8 | 255 | 745 | 1000 | 2,55 | 25,50 |
| 10 | 306 | 694 | 1000 | 3,06 | 30,60 |
| 12 | 354 | 646 | 1000 | 3,54 | 35,40 |
| 14 | 400 | 600 | 1000 | 4,00 | 40,00 |
| 16 | 443 | 557 | 1000 | 4,43 | 44,30 |

Superplasticizer

Superplasticizer merupakan material tambahan pencampur beton (*admixtures*) yang digunakan pada saat melakukan pengadukan material beton atau proses pelaksanaan pembuatan benda uji (*placing*). *Superplasticizer* ini berfungsi sebagai peningkatan terhadap nilai *slump* dan mempermudah *workability* dan juga dapat meningkatkan hasil mutu beton (Umiati et al., 2019). Pada penelitian penambahan *superplasticizer*, sebanyak 2% dari abu terbang. Fungsi dari penggunaan *superplasticizer* yaitu dapat meningkatkan kepadatan pada beton, yang diharapkan berpengaruh pada nilai modulus elastisitas. Pada penelitian ini menggunakan *superplasticizer Sika Viscocrete-1003*.

Rancangan campuran

Rancangan campuran dalam pembuatan campuran beton geopolimer mengacu pada Tabel 2. Jumlah pasta (abu terbang dan larutan alkali) yang digunakan dalam perencanaan campuran beton geopolimer yaitu sebesar 600 kg/m³. Untuk mendapatkan mutu rencana 30 – 55 MPa, digunakan konsentrasi (molaritas) larutan NaOH dengan variasi 8 M, 10 M, 12 M, 14 M dan 16 M. Pada rancangan campuran di tambahkan *superplasticizer* 2% dari berat abu terbang.

Tabel 2. Rancangan campuran beton geopolimer (Rachmansyah et al., 2021)

| Material | Jumlah Pasta | | | | |
|----------------------------------|--------------|------|------|------|------|
| | 500 | 550 | 600 | 650 | 700 |
| Abu Terbang | 350 | 385 | 420 | 455 | 490 |
| Agregat Kasar | 1040 | 1040 | 1040 | 1040 | 1040 |
| Agregat Halus | 931 | 872 | 813 | 754 | 695 |
| NaOH | 37 | 41 | 45 | 48 | 52 |
| Na ₂ SiO ₃ | 112 | 123 | 135 | 146 | 157 |
| Berat Total | 2471 | 2462 | 2453 | 2444 | 2436 |

Pembuatan benda uji

Proses pembuatan benda uji beton geopolimer, dapat dilihat pada Tabel 3. Proses tersebut menjelaskan tahapan dan waktu yang digunakan dalam pembuatan benda uji.

Tabel 3. Proses pembuatan beton geopolimer

| No | Tahapan Pembuatan Benda Uji | Waktu |
|----|---|---------|
| 1 | Memasukkan agregat halus dan abu terbang ke dalam molen dan pengadukan material | 2 menit |
| 2 | Memasukkan agregat kasar dan pengadukan material | 2 menit |
| 3 | Memasukkan Na ₂ SiO ₃ dan pengadukan material | 2 menit |
| 4 | Memasukkan NaOH dan pengadukan material | 2 menit |
| 5 | Memasukan <i>superpalsticizer</i> dan pengadukan material | 3 menit |
| 6 | Melakukan uji <i>slump</i> | - |
| 7 | Memasukan campuran beton ke dalam cetakan | - |
| 8 | Campuran beton yang sudah di cetak dидiamkan hingga mengeras | 24 jam |

Perawatan benda uji

Perawatan benda uji yang dilakukan menggunakan metode penguapan (*steam curing*) seperti pada Gambar 1. Proses perawatan dilakukan dengan membuat uap panas dengan alat *boiler* sederhana dan uap dialirkan ke dalam kotak yang berisi benda uji. Penguapan benda uji dilakukan selama 4 jam dengan temperatur yang digunakan pada suhu 90°C, 80°C, dan 70°C. Tahapan awal dalam perawatan yaitu benda uji dibuka dari cetakan dan diletakkan ke dalam kotak penguapan. Kemudian kotak penguapan ditutup dan alat *boiler* dinyalakan hingga temperatur yang akan digunakan konstan. Setelah temperatur konstan, maka proses perawatan dimulai dengan durasi yang sudah ditentukan. Tahapan terakhir yaitu, benda uji di keluarkan dari kotak dan diletakkan dalam ruangan hingga umur beton 28 hari sebelum dilakukan pengujian.



Gambar 1. Perawatan benda uji dengan metode penguapan

Pengujian benda uji

Pada pengujian benda uji beton geopolimer terdapat dua pengujian yaitu modulus elastisitas dan kuat tekan. Pengujian modulus elastisitas dan kuat tekan dilakukan setelah umur benda uji sudah mencapai 28 hari. Persiapan yang dilakukan dalam pengujian modulus elastisitas dan kuat tekan, yaitu penimbangan terlebih dahulu untuk mengetahui berat benda uji dan melakukan *capping* pada benda uji yang menggunakan belerang. Pengujian diawali dengan pengujian modulus elastisitas dengan beban sebesar 40% dari mutu rencana dan setelahnya dilanjutkan pengujian kuat tekan sampai benda uji hancur.

Pengujian modulus elastisitas

Pengujian modulus elastisitas yang dilakukan mengacu pada ASTM C469 (American Society for Testing and Material, 2002). Langkah pertama yang dilakukan dalam pengujian modulus elastisitas yaitu menentukan 40% beban maksimum dari mutu rencana diantara 30-55 MPa yang digunakan sebagai standar akhir pembacaan. Pengujian modulus elastisitas menggunakan alat *compressometer-extensometer* yang dipasang pada benda uji beton geopolimer. Selanjutnya, benda uji diletakkan pada alat *compression testing machine* seperti pada Gambar 2. Kemudian, alat *compression testing machine* dijalankan dan dilakukan pencatatan deformasi yang terdapat pada kedua *dial* di setiap kelipatan pembebanan 10 kN. Pembacaan dihentikan pada saat beban sudah mencapai 40% dari mutu rencana. Langkah terakhir yaitu melakukan perhitungan modulus elastisitas dengan rumus yang dapat dilihat pada persamaan 1 (American Society for Testing and Material, 2002).

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,000050} \quad (1)$$

dengan E_c = modulus elastisitas (MPa), S_1 = kuat tekan pada saat regangan longitudinal mencapai $\epsilon_1 = 0,000050$ dalam MPa, S_2 = kuat tekan pada saat 40% dari beban maksimum, dalam MPa, ϵ_2 = regangan longitudinal yang dihasilkan dari tegangan S_2 .



Gambar 2. Pengujian modulus elastisitas

Pengujian kuat tekan

Pengujian kuat tekan dilanjutkan setelah pengujian modulus elastisitas selesai dengan menggunakan benda uji yang sama. Pengujian kuat tekan menggunakan alat *compression testing machine* seperti pada Gambar 3 yang mengacu pada SNI 1974 (Badan Standardisasi Nasional, 2011). Setelah didapatkan gaya tekan maksimal, dilakukan perhitungan kuat tekan dengan rumus yang dapat dilihat pada persamaan 2 (Badan Standardisasi Nasional, 2011).

$$\text{Kuat Tekan} = \frac{P}{A} \quad (2)$$

dengan P = gaya tekan aksial, dinyatakan dalam Newton (N), A = luas penampang melintang benda uji, dinyatakan dalam mm^2 .



Gambar 3. Pengujian kuat tekan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian material agregat kasar

Hasil rekapitulasi pengujian agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 4 yang terdiri dari pengujian analisis saringan, kadar air, berat jenis, penyerapan, kadar lumpur, keausan, berat isi. Pengujian agregat kasar mendapatkan hasil yang memenuhi persyaratan Standar Nasional Indonesia. Oleh karena itu, agregat kasar dapat digunakan sebagai bahan untuk pembuatan campuran beton geopolimer.

Tabel 4. Rekapitulasi hasil pengujian material agregat kasar

| Parameter | | Satuan | Hasil Pengujian |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Analisis saringan | Modulus Kehalusan | % | 7,12 |
| | Gradasi | - | Gradasi Rapat |
| Kadar air | | % | 2,41 |
| Berat jenis | <i>Bulk</i> | - | 2,50 |
| | <i>SSD</i> | - | 2,56 |
| | <i>Apparent</i> | - | 2,65 |
| Penyerapan | | % | 2,34 |
| Kadar lumpur | | % | 0,92 |
| Keausan | | % | 19,36 |
| Berat isi | Padat | kg/m ³ | 1246,01 |
| | Lepas | kg/m ³ | 1497,08 |

Hasil pengujian material agregat halus

Hasil rekapitulasi pengujian material agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5 yang terdiri dari analisis saringan, kadar air, berat jenis, penyerapan, dan berat isi. Pengujian agregat mendapatkan hasil yang memenuhi persyaratan Standar Nasional Indonesia. Oleh karena itu, agregat halus dapat digunakan sebagai material pembuatan campuran beton geopolimer.

Tabel 5. Rekapitulasi hasil pengujian material agregat halus

| Parameter | | Satuan | Hasil Pengujian |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Analisis saringan | Modulus Kehalusan | % | 2,34 |
| | Gradasi | - | Gradasi Rapat |
| Kadar air | | % | 2,25 |
| Berat jenis | <i>Bulk</i> | - | 2,25 |
| | <i>SSD</i> | - | 2,29 |
| | <i>Apparent</i> | - | 2,36 |
| Penyerapan | | % | 2,15 |
| Berat isi | Padat | kg/m ³ | 1480,3 |
| | Lepas | kg/m ³ | 1500,3 |

Hasil pengujian material abu terbang

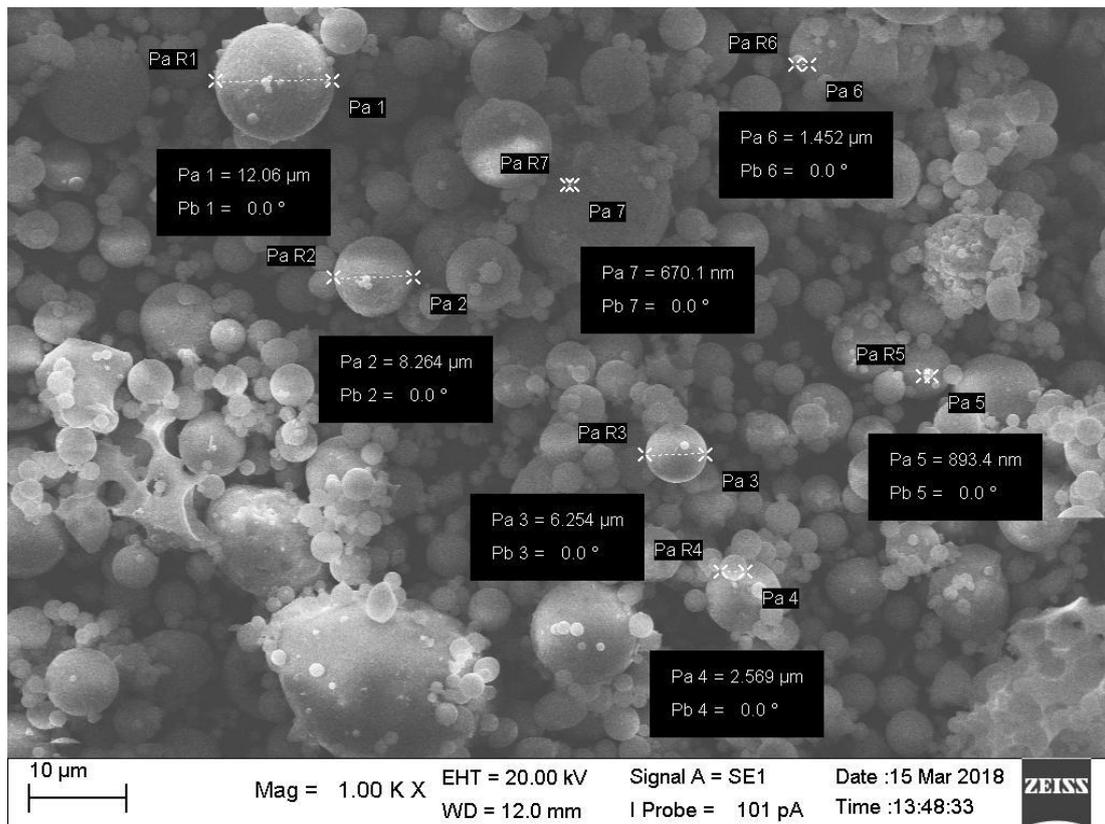
Hasil pengujian XRF dapat dilihat pada Tabel 6, total komposisi senyawa SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₂O₃ sebesar 75,15%. Berdasarkan SNI 2460 (Badan Standardisasi Nasional, 2014), hasil pengujian XRF pada abu terbang termasuk kriteria kelas F. Sedangkan untuk pengujian SEM yang dapat dilihat pada Gambar 4, butiran abu terbang memiliki bentuk bulat tidak beraturan dan memiliki ukuran butiran di antara 12,06 – 0,60 mikron. Adapun hasil pengujian berat jenis abu terbang sebesar 2,41. Setelah dilakukan pengujian material maka, abu terbang bisa digunakan untuk material campuran beton geopolimer.

Tabel 6. Komposisi kimia abu terbang

| Nama Senyawa | % | Nama Senyawa | % |
|--------------------------------|--------|--------------|-------|
| SiO ₂ | 37,385 | BaO | 0,349 |
| Fe ₂ O ₃ | 25,223 | SrO | 0,275 |

Tabel 6 (Lanjutan). Komposisi kimia abu terbang

| | | | |
|--------------------------------|--------|-------------------------------|-------|
| CaO | 14,084 | Na ₂ O | 0,173 |
| Al ₂ O ₃ | 12,543 | ZrO ₂ | 0,144 |
| K ₂ O | 3,484 | ZnO | 0,121 |
| TiO ₂ | 2,757 | Cl | 0,048 |
| P ₂ O ₅ | 1,638 | Rb ₂ O | 0,045 |
| MgO | 0,855 | Br | 0,016 |
| SO ₃ | 0,853 | Y ₂ O ₂ | 0,015 |



Gambar 4. Hasil pengujian SEM pada abu terbang

Hasil pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas

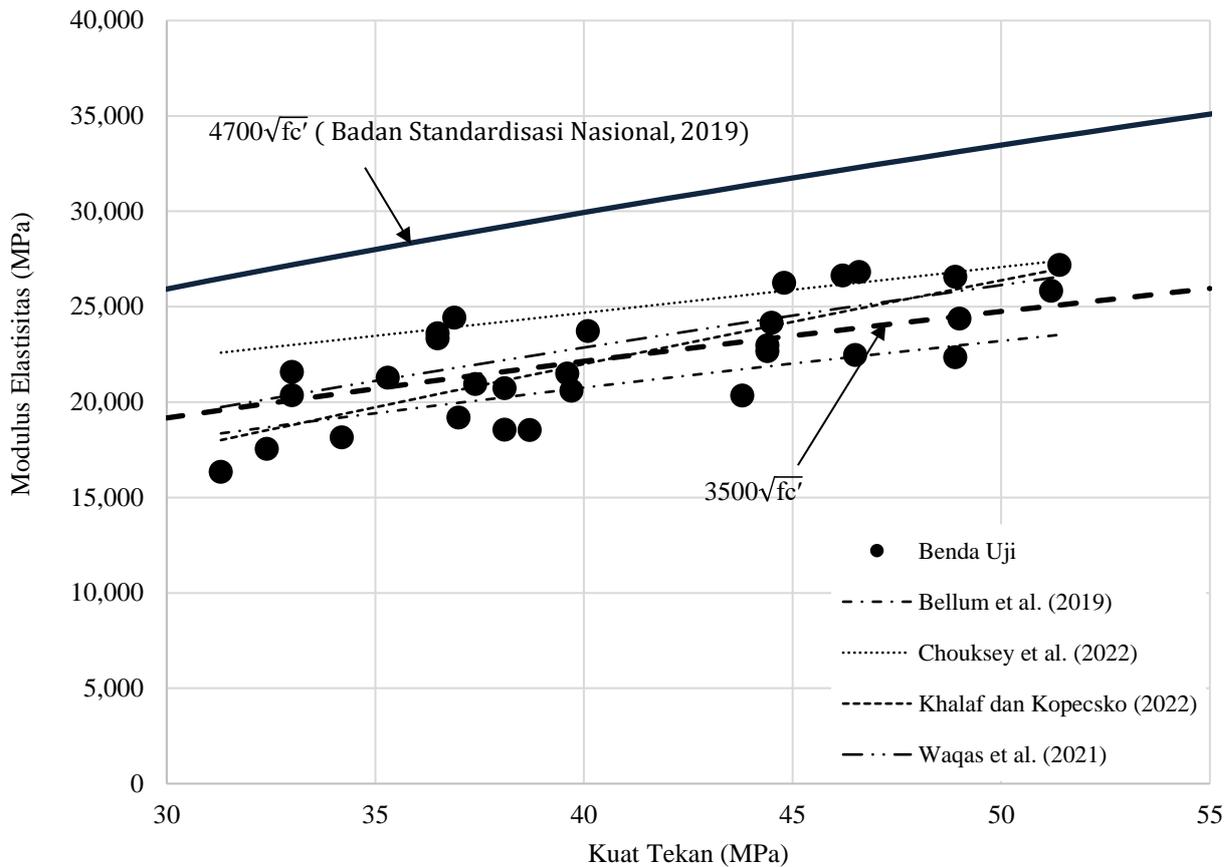
Hasil pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas didapatkan dari 30 data benda uji berbentuk silinder dengan ukuran 15 x 30 cm pada umur 28 hari. Hasil perhitungan modulus elastisitas dihitung menggunakan rumus persamaan 1 dan hasil kuat tekan yang didapatkan dari rumus persamaan 2. Pada Tabel 7 didapatkan hasil eksperimental kuat tekan dan modulus elastisitas dari penelitian ini, selain itu disajikan juga beberapa hasil modulus elastisitas dari literatur beton geopolimer yang digunakan. Hasil pengujian modulus elastisitas pada penelitian ini jika dibandingkan dengan hasil modulus elastisitas dari penelitian yang dilakukan oleh Chouksey et al. (2022), Bellum et al. (2019), Waqas et al. (2021) dan Khalaf dan Kopecsko (2022), nilai modulus Chouksey et al. (2022) mendapatkan hasil modulus elastisitas terbesar.

Tabel 7. Hasil pengujian modulus elastisitas dan kuat tekan

| Eksperimental | | | Literatur Beton Geopolimer | | | |
|------------------|---------------------------|---------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Kuat Tekan (MPa) | Modulus Elastisitas (MPa) | Suhu °C | Chouksey et al., 2022 (MPa) | Bellum et al., 2019 (MPa) | Khalaf dan Kopecsko, 2022 (MPa) | Waqas et al., 2021 (MPa) |
| 31,3 | 16.333 | 70 | 22.592 | 18.362 | 18.009 | 19.736 |
| 32,4 | 17.546 | 70 | 22.856 | 18.681 | 18.524 | 20.150 |
| 33,0 | 20.359 | 80 | 23.000 | 18.854 | 18.803 | 20.373 |
| 33,0 | 21.565 | 90 | 23.000 | 18.854 | 18.803 | 20.373 |
| 34,2 | 18.144 | 80 | 23.288 | 19.193 | 19.358 | 20.814 |
| 35,3 | 21.276 | 80 | 23.552 | 19.500 | 19.864 | 21.213 |
| 36,5 | 23.604 | 80 | 23.840 | 19.828 | 20.413 | 21.643 |
| 36,5 | 23.328 | 90 | 23.840 | 19.828 | 20.413 | 21.643 |
| 36,9 | 24.425 | 70 | 23.936 | 19.937 | 20.595 | 21.785 |
| 37,0 | 19.172 | 80 | 23.960 | 19.964 | 20.640 | 21.820 |
| 37,4 | 20.933 | 70 | 24.056 | 20.071 | 20.822 | 21.962 |
| 38,1 | 18.536 | 80 | 24.224 | 20.258 | 21.139 | 22.207 |
| 38,1 | 20.722 | 70 | 24.224 | 20.258 | 21.139 | 22.207 |
| 38,7 | 18.529 | 70 | 24.368 | 20.417 | 21.410 | 22.416 |
| 39,6 | 21.493 | 80 | 24.584 | 20.653 | 21.815 | 22.728 |
| 39,7 | 20.578 | 70 | 24.608 | 20.679 | 21.860 | 22.762 |
| 40,1 | 23.713 | 70 | 24.704 | 20.783 | 22.039 | 22.900 |
| 43,8 | 20.337 | 80 | 25.592 | 21.721 | 23.683 | 24.145 |
| 44,4 | 22.655 | 80 | 25.736 | 21.869 | 23.947 | 24.343 |
| 44,4 | 23.969 | 90 | 25.736 | 21.869 | 23.947 | 24.343 |
| 44,5 | 24.158 | 80 | 25.760 | 21.894 | 23.991 | 24.376 |
| 44,8 | 26.242 | 80 | 25.832 | 21.967 | 24.122 | 24.474 |
| 46,2 | 26.619 | 80 | 26.168 | 22.308 | 24.735 | 24.930 |
| 46,5 | 22.461 | 70 | 26.240 | 22.380 | 24.866 | 25.027 |
| 46,6 | 26.817 | 80 | 26.264 | 22.404 | 24.909 | 25.059 |
| 48,9 | 22.335 | 70 | 26.816 | 22.951 | 25.907 | 25.794 |
| 48,9 | 26.567 | 80 | 26.816 | 22.951 | 25.907 | 25.794 |
| 49,0 | 24.368 | 70 | 26.840 | 22.974 | 25.950 | 25.826 |
| 51,2 | 25.816 | 80 | 27.368 | 23.484 | 26.896 | 26.516 |
| 51,4 | 27.186 | 90 | 27.416 | 23.530 | 26.981 | 26.578 |

Hasil perbandingan kuat tekan dan modulus elastisitas

Pada Gambar 5 dapat dilihat hasil hubungan antara kuat tekan dan modulus elastisitas yang disajikan dalam bentuk grafik yang bertujuan untuk mengetahui seberapa besar tingkatan nilai modulus elastisitas yang didapatkan pada penelitian yang sudah dilakukan dengan modulus elastisitas pada penelitian yang sudah ada. Penelitian yang dilakukan menghasilkan modulus elastisitas terhadap nilai kuat tekan sebesar $3500\sqrt{f_c'}$ yang dapat dilihat pada Gambar 5. Nilai modulus elastisitas pada penelitian mendapatkan persentase 75% terhadap nilai modulus elastisitas beton semen yaitu $4700\sqrt{f_c'}$. Hasil modulus elastisitas pada penelitian ini berada di atas garis persamaan hasil modulus elastisitas penelitian Bellum et al. (2020). Sedangkan, untuk hasil modulus elastisitas yang didapatkan dari penelitian Khalaf dan Kopecsko (2022) dan Waqas et al. (2021) berada pada garis persamaan yang hampir mendekati garis hasil penelitian ini. Kemudian, untuk hasil modulus elastisitas dari penelitian Chouksey et al. (2022) berada di atas dari hasil modulus elastisitas penelitian, tetapi ada beberapa data hasil modulus elastisitas yang tersebar di antara garis persamaan hasil penelitian Chouksey et al. (2022).



Gambar 5. Hubungan hasil kuat tekan dengan modulus elastisitas

4. KESIMPULAN

Dari hasil dari penelitian yang sudah dilakukan pada beton geopolimer dengan penambahan *superplasticizer* didapatkan hasil modulus elastisitas sebesar $3500\sqrt{f_c'}$ atau sebesar 75% terhadap modulus beton semen sebesar $4700\sqrt{f_c'}$. Nilai modulus elastisitas yang didapat masih di bawah nilai modulus beton semen. Hal ini dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan *superplasticizer*, penggunaan molaritas dan suhu *curing* yang semakin tinggi dapat meningkatkan hasil modulus elastisitas pada beton geopolimer, tetapi masih belum mendekati atau melebihi modulus beton semen.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Testing and Material. (2002). C469: Standard Test Method For Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *ASTM Standard Book, 04*, 1–5. [http://portales.puj.edu.co/wjfajardo/mecanica de solidos/laboratorios/astm/C469.pdf](http://portales.puj.edu.co/wjfajardo/mecanica%20de%20solicidos/laboratorios/astm/C469.pdf)
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 1974-2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder. *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*, 20. www.bsn.go.id
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). Spesifikasi abu terbang batubara dan pozolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozolan for use in concrete. *Badan Standardisasi Nasional*, 16.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. *SNI 2847-2019*, 8, 720.
- Bellum, R. R., Muniraj, K., Rama, S., & Madduru, C. (2019). Annales de Chimie - Science des Matériaux Empirical Relationships on Mechanical Properties of Class-F Fly Ash and GGBS Based Geopolymer Concrete. *Annales de Chimie - Science Des Matériaux*, 43(3), 189–197.
- Bhavsar, J. K., & Panchal, V. (2022). Ceramic Waste Powder as a Partial Substitute of Fly Ash for Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. *December*. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-07-05>

- Chouksey, A., Verma, M., Dev, N., Rahman, I., & Upreti, K. (2022). An investigation on the effect of curing conditions on the mechanical and microstructural properties of the geopolimer concrete. *Materials Research Express*, 9(5), 55003. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac6be0>
- Elisabeth, S., Lukar, C., Pandaleke, R., & Wallah, S. (2020). Pengujian Modulus Elastisitas Pada Beton Dengan Menggunakan Tras Sebagai Substitusi Parsial Agregat Halus. *Jurnal Sipil Statik*, 8(1), 33–38.
- Hardjasaputra, H., Cornelia, M., Gunawan, Y., Surjaputra, I. V., Lie, H. A., Rachmansyah, & Pranata Ng, G. (2019). Study of mechanical properties of fly ash-based geopolimer concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 615(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/615/1/012009>
- Indrayani, P., Sulianti, I., Flaviana Tilik, L., Suhirkam, D., Prawira Wardana, M., & Milawati, I. (2022). Pengaruh Penambahan Serat Kawat Bendrat Terhadap Kuat Lentur Beton Geopolimer. *Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 10(1), 69–76. <http://jurnal.unismabekasi.ac.id/index.php/bentang>
- Khalaf, A. A., & Kopeckó, K. (2022). Modelling of Modulus of Elasticity of Low-Calcium-Based Geopolymer Concrete Using Regression Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4528264>
- Lisantono, A., & Jenifer, W. Y. (2020). Pengaruh Penambahan Superplasticizer Terhadap Sifat Mekanik Beton Memadat Mandiri Dengan Serat Serabut Kelapa. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 12*, 5(3), 248–253.
- Loya, E. I. D. (2011). Development of approximating functions to model and predict the properties of fresh and hardened fly ash-based geopolimer concrete. *Dissertations, ProQuest Dissertations Publishing, Ann Arbor, Michigan*, 1–126.
- Putra, E. P., Herbudiman, B., & Irawan, R. R. (2016). Efek Kadar Polycarboxylate Ether (PCE) terhadap Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 2(4), 136–147.
- Putra, I., Hajani, C. N., Fauzi, A., & Mahyar, H. (2022). Penggunaan Fly Ash Pangkalan Susu Terhadap Ikatan Mikrostruktur Dan Karakteristik Pasta Geopolimer. *Jurnal Bissotek, ISSN 1412-3800 81*, 12(2), 81–89.
- Rachmansyah, Adventi Auditia, B., & Hardjasaputra, H. (2021). Pengaruh Jumlah Pasta Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Teknik Pembangunan Sipil*, 1–6.
- Rajamane, N. P., & Jeyalakshmi, R. (2014). Quantities Of Sodium Hydroxide Solids and Water to Prepare Sodium Hydroxide Solution of Given Molarity for Geopolymer Concrete Mixes. *ICI Technical Paper*, 4–9.
- Triwullan, Ekaputri, J. J., & Priyanka, N. F. (2017). The Effect of Temperature Curing on Geopolymer Concrete. *MATEC Web of Conferences*, 97, 0–5. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701005>
- Umiati, S., Thamrin, R., & Harti, N. (2019). Pengaruh Penambahan Superplasticizer Terhadap Kuat Tekan Beton. In *ACE Conference*.
- Waqas, R. M., Butt, F., Zhu, X., Jiang, T., & Tufail, R. F. (2021). A Comprehensive Study on the Factors Affecting the Workability and Mechanical Properties of Ambient Cured Fly Ash and Slag Based Geopolymer applied sciences A Comprehensive Study on the Factors Affecting the Workability and Mechanical Properties of Ambien. *Applied Sciences*, September, 1–30. <https://doi.org/10.3390/app11188722>