

Sifat Mekanik Bata Ringan Geopolimer Berdasarkan Rasio Si/Al

Mechanical Properties of Lightweight Geopolymer Brick Based on Si/Al Ratio

Fasya Khoirianti Rafrita, Siti Nur Rahmah Anwar, B. Sri Umniati*

Program Studi Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik;
Universitas Negeri Malang; Jl. Semarang No. 5, Kota Malang, Indonesia; e-mail :
fasyarafrita@gmail.com; siti.nur.rahmah.ft@um.ac.id; b.sri.umniati.ft@um.ac.id

* Korespondensi: e-mail: b.sri.umniati.ft@um.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.33558/bentang.v11i2.6773>

ABSTRAK

Pemanfaatan *fly ash* atau abu terbang masih minim diterapkan di Indonesia. Persentase pemanfaatan *fly ash* hanya 10-12% dengan 73% di Pulau Jawa dan 27% di pulau lainnya, maka akan terjadi penumpukan *fly ash* hingga 10,4 juta-ton per tahun pada tahun 2027. *Fly ash* yang melimpah dapat dimanfaatkan dengan menjadikan komposisi utama bata ringan sebagai pengganti semen yang disebut bata ringan geopolimer. *Fly ash* yang digunakan adalah kelas F dengan pengujian mekanik berdasarkan rasio Si/Al. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kadar aktivator terhadap pengujian mekanik yang terdiri dari kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus runtuh sehingga didapatkan sifat mekanik bata ringan geopolimer. Semakin tinggi kandungan kadar aktivator, menyebabkan rasio Si/Al semakin besar. Rasio pada kadar aktivator 35, 40, dan 45% adalah 2,42; 2,45; dan 2,48. Selisih antara kuat tarik belah terhadap kuat tekan untuk kadar aktivator 35% adalah 6,45%; 40% adalah 5,94%; dan 45% adalah 6,04% sehingga termasuk dalam bata ringan bermutu tinggi. Kadar aktivator berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus runtuh. Pada rasio Si/Al yang lebih rendah menyebabkan kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus runtuh yang didapatkan lebih tinggi dan lebih baik.

Kata kunci: bata ringan; CLC; *fly ash*; geopolimer; mekanik

ABSTRACT

The use of *fly ash* or *fly ash* is still minimally applied in Indonesia. The percentage of *fly ash* utilization is only 10-12% with 73% on Java Island and 27% on other islands, so there will be an accumulation of *fly ash* of up to 10.4 million tons per year by 2027. Abundant *fly ash* can be utilized by making lightweight brick the main composition as a substitute for cement called geopolymer lightweight brick. The *fly ash* used is class F with mechanical testing based on the Si/Al ratio. This research was conducted to analyze the effect of activator content on mechanical testing consisting of compressive strength, split tensile strength, and modulus of rupture in order to obtain the mechanical properties of lightweight geopolymer bricks. The higher of the activator content, got the greater Si/Al ratio. The ratios at activator levels of 35, 40, and 45% were 2.42; 2.45; and 2.48. The difference between split tensile strength and compressive strength for 35% activator content is 6.45%; 40% is 5.94%; and 45% is 6.04% so it is included in high quality lightweight brick. The level of activator has a significant effect on the compressive strength, split tensile strength, and modulus of rupture. The lower Si/Al ratio results in higher and better compressive strength, split tensile strength, and modulus of rupture.

Keywords: CLC; *fly ash*; geopolymer; lightweight bricks; mechanical

Received: March, 27, 2023 ; Revised: March, 27, 2023; Accepted: March, 27, 2023; Available Online: July, 07, 2023

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan *fly ash* atau abu terbang masih minim diterapkan di Indonesia. Persentase pemanfaatan *fly ash* hanya 10-12% dengan 73% di Pulau Jawa dan 27% di pulau lainnya, maka akan terjadi penumpukan *fly ash* hingga 10,4 juta-ton per tahun pada tahun 2027 karena aktivitas pengolahan limbah B3 dengan izin dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan/KLKH (Ekaputri & Bari, 2020). *Fly ash* yang melimpah seharusnya dapat dimanfaatkan dengan semaksimal mungkin, tetapi pada kenyataannya di Indonesia masih terbatas karena tergolong limbah B3.

Pada tahun 2021, *fly ash* dan *bottom ash (FABA)* sudah tidak terdaftar sebagai limbah B3 pada Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Pedoman Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (2021) (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia, 2021). Peraturan Nomor 22 menjelaskan bahwa *fly ash* dan *bottom ash (FABA)* yang bersumber dari proses pembakaran batu bara pada fasilitas pembangkitan listrik tenaga uap PLTU atau dari kegiatan lain yang menggunakan teknologi selain *stocker boiler* dan/atau tungku industri terdaftar dalam limbah non B3 (bahan berbahaya dan beracun). Berdasarkan peraturan baru tersebut, diharapkan FABA dapat dimanfaatkan lebih banyak karena pengolahannya sudah tidak memerlukan izin KLKH. Pemanfaatan dari *fly ash* yang telah diteliti diantaranya adalah beton tanpa semen atau disebut beton geopolimer (Ekaputri et al., 2019; Wattimena et al., 2017), campuran aspal beton (Widayanti et al., 2021), dan *paving* geopolimer (Thahir, 2017), dari penelitian tersebut terdapat peluang lain pemanfaatan *fly ash* yaitu pada bata ringan.

Bata ringan terbuat dari bahan dasar semen, pasir, air, dan *foaming agent*. Semen diproduksi dengan bahan baku dari aktivitas penambangan serta proses pengolahan pada pabrik skala besar. Pada tahun 2021, emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari pabrik Semen Indonesia Group adalah sebesar 593kg CO₂/ton semen ekuivalen atau turun 2,3% dari tahun 2020 dan 16,2% dari *baseline* 2010 (PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk, 2021). Dengan lebih mendukung pengurangan emisi gas rumah kaca (CO₂), maka perlu mengurangi penggunaan semen dan menggantikannya dengan *fly ash* yang tersedia melimpah, selanjutnya disebut bata ringan geopolimer. Bata ringan yang akan digunakan adalah jenis CLC karena menggunakan proses pengeringan alami.

Penelitian beton dan bata ringan geopolimer jenis CLC dengan bahan dasar *fly ash* telah dilakukan sebelumnya, di antaranya adalah Abdullah et al., (2012), Ibrahim et al., (2017), Wongkeo et al., (2019), Yumnam & Dande, (2020), Wongkvanklom et al., (2021), dan Lan et al., (2021). Pada penelitian terdahulu terdapat perbedaan metode pembuatan benda uji, komposisi, kelas *fly ash* dan jenis *foaming agent* yang mempengaruhi hasil penelitian. Selain itu, metode perawatan setelah benda uji tercetak juga berpengaruh terhadap hasil penelitian (Abdullah et al., 2012; Ibrahim et al., 2017). Hasil pengujian dari penelitian terdahulu terdapat berbagai macam, ada yang searah namun juga ada yang bertolak belakang. Perbedaan tersebut seharusnya dapat dikontrol dengan melakukan perhitungan Si/Al sebagai mineral utama terhadap reaksi polimerisasi. Rasio Si/Al *fly ash* yang dapat digunakan berkisar antara 1 – 2,5 dengan rasio terbaik antara 1,3 – 1,8 (Ekaputri, 2020). Dari beberapa kajian penelitian terdahulu, maka penelitian ini difokuskan pada pengujian mekanik yaitu kuat tarik belah, dan modulus runtuh menggunakan *fly ash* kelas F berdasarkan rasio Si/Al. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh kadar aktivator terhadap pengujian mekanik yang terdiri dari kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus runtuh sehingga didapatkan sifat mekanik bata ringan geopolimer.

2. METODE PENELITIAN

Fly ash sebagai material utama dalam bata ringan geopolimer. Selanjutnya *fly ash* diuji XRF (*X-Ray Fluorescence*) di Laboratorium Sucofindo Surabaya untuk mengetahui komposisi untuk menentukan jenis kelas dan alkali aktivator. Hasil uji XRF tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Uji XRF *Fly Ash*

| Komposisi | Persentase |
|--------------------------------|------------|
| Al ₂ O ₃ | 17,56 % |
| SiO ₂ | 44,57 % |
| CaO | 11,47 % |
| Fe ₂ O ₃ | 15,08 % |

Sumber: Lab. Sucofindo, 2022

Dari pengujian XRF pada Tabel 1, dapat ditentukan *fly ash* termasuk dalam kelas F – medium Ca dengan kandungan SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ adalah 77,21% dan kandungan CaO kurang dari 18 %.

Komposisi yang terkandung dalam *fly ash* kemudian dijadikan dasar untuk menentukan alkali aktivator. Alkali Aktivator yang digunakan adalah NaOH 8 M dan Na₂SiO₃ dengan perbandingan 1:1. Na₂SiO₃ dengan komposisi 15% Na₂O, 30% SiO₂, dan 55% H₂O. Persentase alkali aktivator terhadap yang digunakan pada penelitian ini adalah sebesar 35, 40, dan 45% dari berat *fly ash*. Bahan utama lainnya adalah pasir dengan perbandingan 1:1 terhadap berat *fly ash*. *Foam* yang digunakan terbuat dari *foam agent* sebesar 6% terhadap berat *fly ash*. Perencanaan komposisi secara keseluruhan tertera pada Tabel 2.

Tabel 2. Perencanaan Komposisi

| Var. % | Fly Ash g | Pasir g | NaOH 8 M g | Na ₂ SiO ₃ g | Foam ml | Total g | Si/Al | H ₂ O/Na ₂ O | Water to Solid Ratio |
|--------|-----------|---------|------------|------------------------------------|---------|---------|-------|------------------------------------|----------------------|
| 35 | 6000 | 6000 | 1080 | 1080 | 360 | 14.520 | 2,42 | 11,45 | 0,22 |
| 40 | 5902 | 5902 | 1180 | 1180 | 354 | 14.520 | 2,45 | 11,45 | 0,24 |
| 45 | 5785 | 5785 | 1302 | 1302 | 347 | 14.520 | 2,48 | 11,45 | 0,27 |

Rasio terbaik untuk Si/Al adalah 1,3-1,8 tetapi untuk rasio maksimal Si/Al pada geopolimer adalah 2,5 (Ekaputri, 2020). Digunakan alkali aktivator NaOH 8M dan Na₂SiO₃ dengan perbandingan 1:1 karena rasio Si/Al yang didapatkan adalah kurang dari 2,5. Jika menggunakan perbandingan 2,5:1 maka rasio Si/Al yang didapatkan lebih dari 2,5 sehingga digunakan perbandingan 1:1 pada alkali aktivator NaOH 8M dan Na₂SiO₃.

Rasio H₂O/Na₂O yang didapatkan pada perhitungan adalah 11,45. Rasio tersebut masih memenuhi kriteria untuk geopolimer dari *fly ash* yaitu antara 5-15 (Ekaputri, 2020). Kadar aktivator juga berpengaruh terhadap water to solid rasio, yang akan mempengaruhi kemudahan dalam pengerjaan atau pengecoran. Water to solid rasio dengan 0,2 tergolong dalam kategori berat dalam pengerjaan sehingga dibutuhkan kandungan air yang lebih besar. Dilakukan variasi pada kadar aktivator untuk mengetahui pengaruh rasio Si/Al dan dibutuhkan penambahan rasio air pada proses pembuatan bata ringan geopolimer untuk meningkatkan kemudahan pengerjaan.

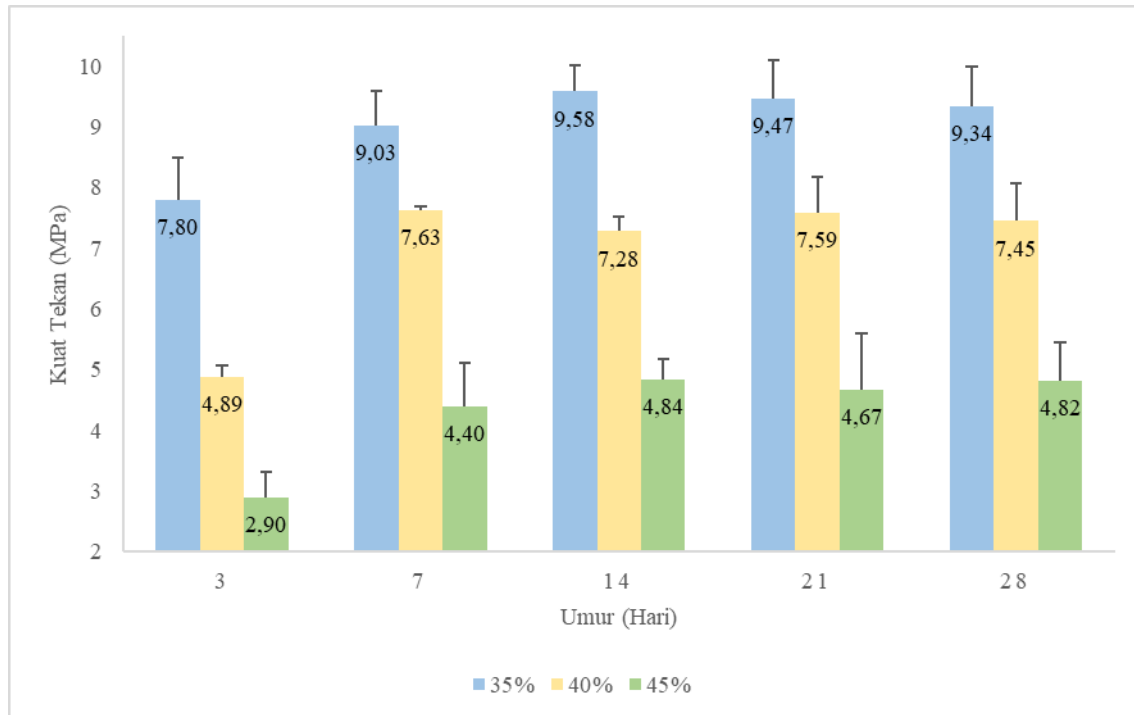
Pengujian yang dilakukan adalah kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus runtuh. Pengujian kuat tekan berdasarkan SNI 8640 (Standar Nasional Indonesia, 2018), kuat tarik belah SNI 2491 (Standar Nasional Indonesia, 2014a), dan modulus runtuh SNI 4154 (Standar Nasional Indonesia, 2014b). Kuat tekan dan kuat tarik belah diuji menggunakan *hydraulic concrete beam testing machine*, sedangkan untuk modulus runtuh menggunakan *universal testing machine* (UTM). Penelitian dilakukan di Laboratorium Bahan dan Laboratorium Struktur, Gedung D19, Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang.

Setelah didapatkan data penelitian, selanjutnya dilakukan analisa secara statistik untuk mengetahui pengaruh dari persentase kadar alkali aktivator pada benda uji. Pengaruh kadar alkali aktivator terhadap pengujian mekanik diketahui dari uji F atau uji simultan F. Tingkatan yang digunakan adalah sebesar 5%, jika nilai signifikan $F < 0,05$ maka kadar aktivator mempengaruhi pengujian mekanik dan sebaliknya. Nilai F didapatkan dari pengujian statistik dalam tabel anova.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kuat Tekan

Kuat tekan adalah kemampuan untuk menerima gaya tekan persatuan luas. Pengujian kuat tekan dilakukan pada 3 benda uji kubus pada setiap varian dengan ukuran 5 cm pada hari ke-3, 7, 14, 21, dan 28. Sebelum diuji, benda uji ditimbang berat dan diukur dimensi. Grafik pengujian kuat tekan tertera pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik pengujian kuat tekan

Kuat tekan pada bata ringan geopolimer hari ke-3 pada varian 35, 40, dan 45% adalah 7,80; 4,89; dan 2,90 MPa. Kuat tekan mengalami kenaikan pada hari berikutnya dan cenderung konstan sampai hari ke-28 dengan kuat tekan rata-rata pada varian 35, 40, dan 45% adalah 9,34; 7,45; dan 4,82 MPa. Hasil dari pengujian kuat tekan berbanding terbalik terhadap kadar aktivator pada bata ringan geopolimer. Uji F dilakukan untuk mengetahui pengaruh kadar aktivator terhadap kuat tekan, tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji F Kadar Aktivator terhadap Kuat Tekan

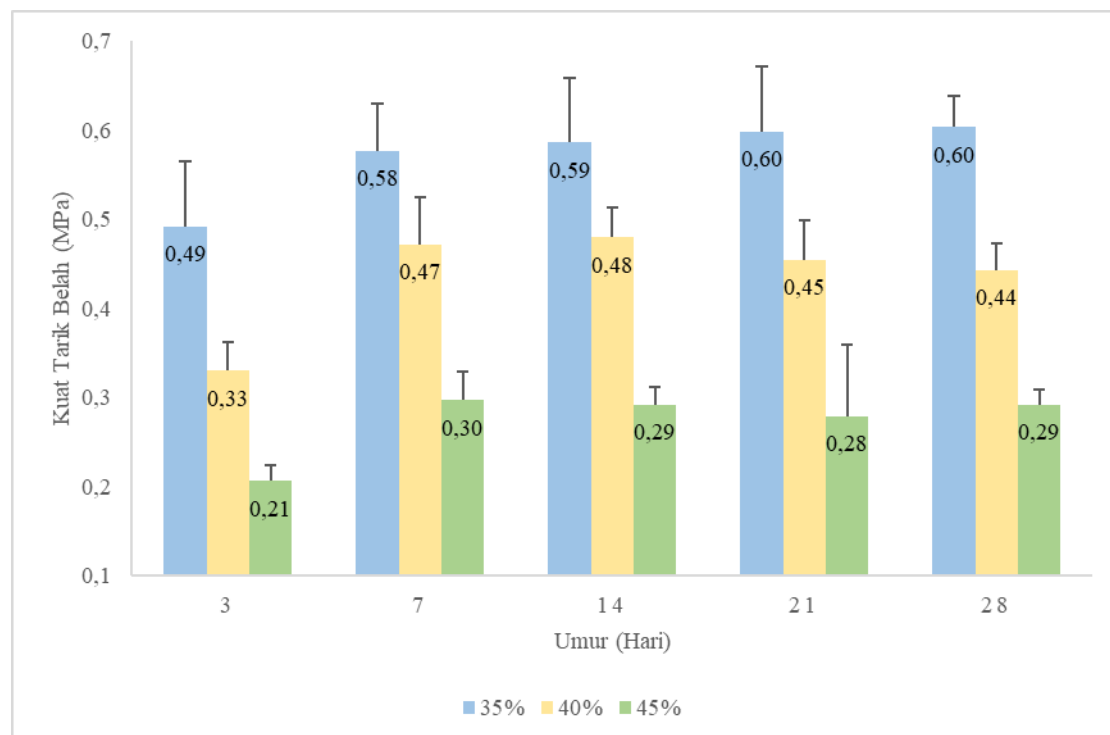
| | df | SS | MS | F | Significance F |
|------------|----|---------|---------|---------|----------------|
| Regression | 1 | 30,5898 | 30,5898 | 81,5532 | 0,000042 |
| Residual | 7 | 2,6256 | 0,3751 | | |
| Total | 8 | 33,2154 | | | |

Dari hasil uji F, nilai signifikansi F kuat tekan kurang dari α , yaitu $0,000042 < 0,05$ sehingga kadar aktivator memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kuat tekan. Hasil pengujian sebanding dengan penelitian yang telah dilakukan Wongkeo et al., (2019) pada benda uji kubus berukuran 5x5x5 cm yaitu berat isi berbanding lurus dengan kuat tekan, dengan variasi perbedaan rasio NaOH dan Na₂SiO₃ karena peningkatan kandungan Na₂SiO₃ menghambat pembentukan pori sehingga benda uji menjadi lebih padat. Hasil serupa juga didapatkan oleh (Wongkvanklom et al., 2021) pada benda uji kubus berukuran 5x5x5 cm yaitu berat isi berbanding lurus dengan kuat tekan dengan variasi persentase kadar *foam*, kandungan kadar *foam* yang tinggi menyebabkan terjadinya pengelompokan gelembung-gelembung dan

mengakibatkan pori-pori tidak beraturan sehingga terjadi penurunan kuat tekan yang signifikan. Dari penelitian terdahulu dengan perbedaan variasi kadar aktivator, rasio alkali aktivator, dan kadar *foam* didapatkan hasil yang sama yaitu kuat tekan yang berbanding lurus dengan berat isi, namun untuk mendukung hasil penelitian seharusnya dilakukan perhitungan Si/Al karena perbedaan variasi yang dapat mempengaruhi rasio Si/Al.

Kuat Tarik Belah

Kuat tarik belah digunakan untuk mengevaluasi ketahanan geser pada komponen struktur. Pengujian kuat tarik belah pada bata ringan geopolimer dilakukan pada benda uji silinder berukuran 7,5 x 15 cm masing-masing tiga setiap varian pada hari ke-3, 7, 14, 21, dan 28 hari.. Grafik pengujian kuat tarik belah terdapat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik pengujian kuat tarik belah

Kuat tarik belah bata ringan geopolimer hari ke-3 pada varian 35, 40, dan 45% adalah 0,49; 0,33; dan 0,21 MPa. Kuat tarik mengalami kenaikan pada hari berikutnya dan cenderung konstan sampai hari ke-28 sama halnya dengan pengujian kuat tekan. Kuat tekan pada hari ke-28 pada varian 35, 40, dan 45% adalah 0,60; 0,44; dan 0,29 MPa. Hasil dari kuat tarik belah berbanding terbalik terhadap kadar aktivator pada bata ringan geopolimer. Uji F dilakukan untuk mengetahui pengaruh kadar aktivator terhadap kuat tarik belah, tertera pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji F Kadar Aktivator terhadap Kuat Tarik Belah

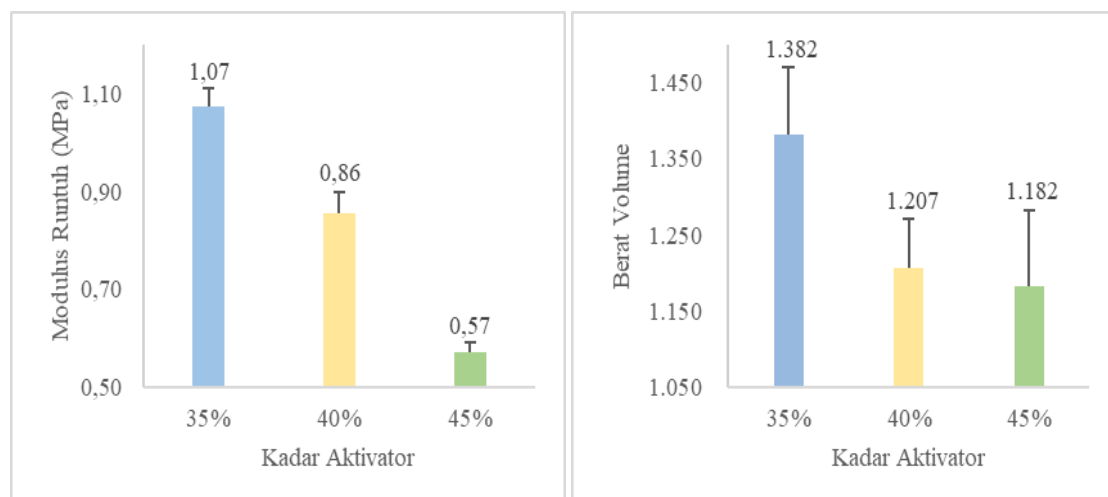
| | df | SS | MS | F | Significance F |
|------------|----|--------|--------|----------|----------------|
| Regression | 1 | 0,1455 | 0,1455 | 209,4166 | 0,000001793 |
| Residual | 7 | 0,0049 | 0,0007 | | |
| Total | 8 | 0,1503 | | | |

Dari hasil uji F, nilai signifikansi F kuat tarik belah kurang dari α , yaitu 0,00000179 < 0,05 sehingga kadar aktivator memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kuat tarik belah. Kuat tarik belah berbanding lurus dengan kuat tekan, dan berbanding terbalik terhadap kadar aktivator. Hal tersebut serupa dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Widodo (2015) pada

bata ringan dengan komposisi semen, pasir kuarsa, air, serbuk gypsum, dan menggunakan variasi kadar foam. Terdapat perbedaan selisih antara kuat tarik belah terhadap kuat tekan, untuk kadar aktivator 35% dengan selisih 6,45%; 40% dengan selisih 5,94%; dan 45% dengan selisih 6,04%. Sedangkan penelitian yang dilakukan Widodo (2015), selisih antara kuat tarik belah terhadap kuat tekan pada kadar *foam* agent 0,7lt/m³ adalah 9,50%; 0,9lt/m³ adalah 7,38%; dan 1,1 lt/m³ adalah 4,66%. Hal ini terjadi karena terdapat perbedaan pada komposisi utama dan variasi benda uji, yaitu kadar aktivator dengan *foam* agent yang hasilnya adalah perbedaan selisih kuat tarik belah terhadap kuat tekan. Penambahan kadar *foam* agent menyebabkan penurunan kuat tarik belah dan kuat tekan dengan selisih yang tidak konstan, sedangkan penambahan kadar aktivator menyebabkan penurunan kuat tarik belah dan kuat tekan dengan selisih yang cenderung konstan. Selisih kuat tarik belah terhadap kuat tekan yang kurang dari 10% menunjukkan sifat yang getas dan dapat dikategorikan sebagai beton mutu tinggi (Risdanareni et al., 2015).

Modulus Runtuh

Modulus runtuh atau kuat tarik dalam lentur berfungsi untuk mengetahui ketahanan terhadap kuat tarik yang dapat diterima tanpa tulangan tarik. Hasil pengujian modulus runtuh memperkuat hasil pengujian kuat tarik belah. Pengujian modulus runtuh menggunakan benda uji berbentuk bata ringan dengan ukuran 60 x 20 x 10 cm. Pengujian dilakukan pada hari ke-28 masing-masing berjumlah tiga benda uji tiap varian. Grafik hubungan kadar aktivator terhadap modulus runtuh dan berat *volume* tertera pada Gambar 3.



Gambar 3. Hubungan Kadar Aktivator terhadap Modulus Runtuh dan Berat *Volume*

Rata-rata hasil pengujian modulus runtuh pada varian 35, 40, dan 45% adalah 1,07; 0,86; dan 0,57 MPa. Hasil pengujian modulus runtuh bata ringan geopolimer berbanding terbalik dengan kadar alkali aktivator. Semakin besar kadar alkali aktivator, maka modulus runtuh yang terjadi semakin rendah. Uji F dilakukan untuk mengetahui pengaruh kadar aktivator terhadap modulus runtuh, tertera pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji F Kadar Aktivator terhadap Modulus Runtuh

| | df | SS | MS | F | Significance F |
|------------|----|-----------|-----------|----------|----------------|
| Regression | 1 | 0,3811097 | 0,3811097 | 283,9306 | 0,000000635 |
| Residual | 7 | 0,0093958 | 0,0013422 | | |
| Total | 8 | 0,3905055 | | | |

Dari hasil uji F, nilai signifikansi F modulus runtuh kurang dari *alpha*, yaitu 0,00000063 < 0,05 sehingga kadar aktivator memiliki pengaruh yang signifikan terhadap modulus runtuh. Hubungan antar sifat mekanik bata ringan geopolimer dari modulus runtuh, kuat tekan, dan kuat

tarik belah dapat dihitung sesuai SNI 2847 (Standar Nasional Indonesia, 2019) dengan Persamaan 1 dan Persamaan 2.

$$f_r = 0,62\lambda\sqrt{f_c'} \quad (1)$$

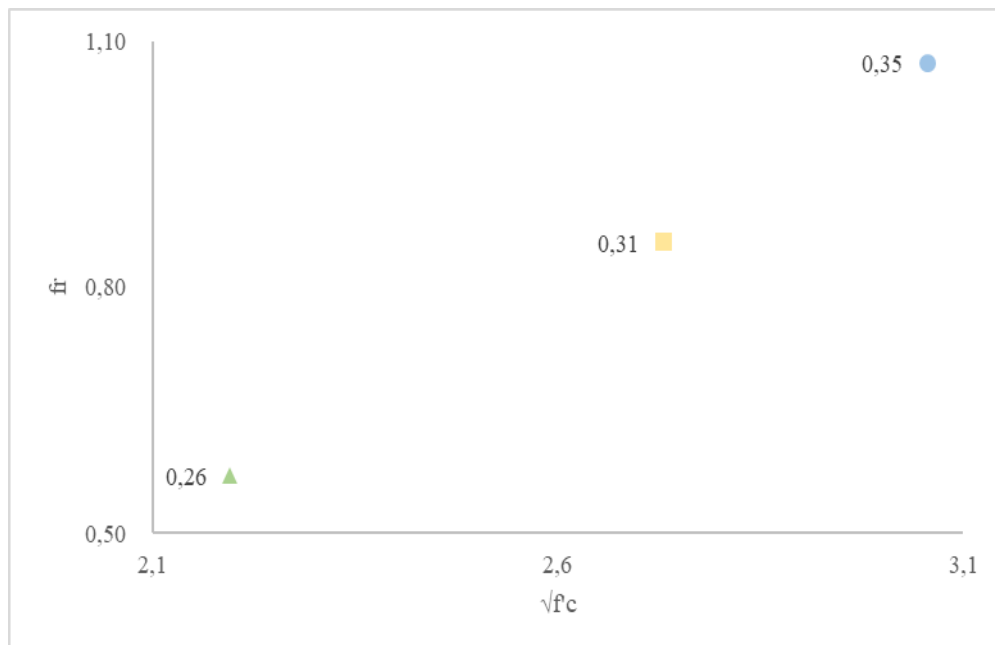
$$\lambda = \frac{f_{ct}}{0,56\sqrt{f_{cm}}} \leq 1 \quad (2)$$

Dengan f_r adalah modulus runtuh (MPa); f_c' adalah kuat tekan (MPa); f_{ct} adalah kuat tarik belah rata-rata (MPa); dan f_{cm} adalah kuat tekan rata-rata (MPa). Pada Persamaan 2 terdapat λ untuk beton ringan yang didapatkan dari hasil pengujian, maka dapat diketahui perbedaan hasil modulus runtuh dari perhitungan dan pengujian. Dengan tujuan untuk koreksi koefisien $0,62\lambda$ sudah sesuai dengan pengujian atau tidak. Tabel perhitungan dan pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus runtuh tertera pada Tabel 3.

Tabel 6. Perhitungan Sifat Mekanik

| Var (%) | f_{ct} | f_{cm} | λ | f_r (hitung) | f_r | Koef |
|---------|----------|----------|-----------|----------------|-------|------|
| 35 | 0,60 | 9,34 | 0,35 | 0,67 | 1,07 | 1,00 |
| 40 | 0,44 | 7,45 | 0,29 | 0,49 | 0,86 | 1,08 |
| 45 | 0,29 | 4,82 | 0,24 | 0,32 | 0,57 | 1,10 |

Dari Tabel 6 dapat ditentukan untuk koefisien pada rumus perhitungan modulus runtuh sesuai dengan pengujian yang telah dilakukan pada variasi 35% adalah $f_r = 0,35\sqrt{f_c'}$; 40% adalah $f_r = 0,31\sqrt{f_c'}$; dan 45% adalah $f_r = 0,26\sqrt{f_c'}$ yang terdapat pada Gambar 4. Hasil tersebut serupa dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Kuncoro & Djayaprabha (2021) untuk mortar geopolimer berbahan dasar asar slag feronikel halus (FAM) dengan koefisien 0,369 menggunakan NaOH 6M; 0,394 menggunakan NaOH 8M; dan 0,369 menggunakan NaOH 10M. Namun pada penelitian tersebut menggunakan hasil pengujian kuat tarik belah saja, tidak menggunakan modulus runtuh.



Gambar 4. Hubungan Kuat Tekan dan Modulus Runtuh

Nilai pada Gambar 4 didapatkan dari hasil perkalian antara λ dan koefisien masing-masing variasi yang telah dihitung berdasarkan pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan

modulus runtuh yang telah dilakukan. Nilai modulus runtuh dari hasil pengujian (f_r) lebih besar dari perhitungan (f_r ,*hitung*). Hasil pengujian modulus runtuh dengan beban terpusat di tengah bentang yang mengacu pada SNI 4154 (Standar Nasional Indonesia, 2014b) adalah signifikan lebih besar dari pengujian modulus runtuh normal dengan dua titik pembebanan yang mengacu pada SNI 4431 (Standar Nasional Indonesia, 2011). Nilai modulus runtuh dari hasil pengujian (f_r) dan perhitungan (f_r ,*hitung*) terdapat selisih pada variasi 35% sebesar 38% dan pada variasi 40 dan 45% dengan selisih 43%. Namun pada SNI 2847 (Standar Nasional Indonesia, 2019) hanya disebutkan jika f_r adalah modulus retak atau modulus runtuh, tanpa diberi keterangan untuk pengujian yang mengacu pada standar apa dan untuk modulus runtuh pada SNI 4154 (Standar Nasional Indonesia, 2014b) disimbolkan dengan huruf “R” sedangkan pada SNI 4431 (Standar Nasional Indonesia, 2011) kuat lentur disimbolkan dengan “ σ_l ”. Perbandingan hasil pengujian kuat tarik belah terhadap modulus runtuh terdapat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Perbandingan Pengujian Kuat Tarik Belah dan Modulus Runtuh

| Var (%) | f_{ct} | f_r | f_{ct}/f_r |
|---------|----------|-------|--------------|
| 35 | 0,60 | 1,07 | 1,78 |
| 40 | 0,44 | 0,86 | 1,93 |
| 45 | 0,29 | 0,57 | 1,96 |

Hasil yang didapat dari modulus runtuh selalu menunjukkan hasil lebih besar dari hasil pengujian kuat tarik belah. Hal ini terjadi karena beton runtuh akibat memikul momen lentur pada sisi bawah yang mengalami kegagalan tarik sisi atas yang masih mampu menahan tekanan tekan, sehingga beton tidak langsung runtuh melainkan akan bertahan untuk menahan momen lentur (Abdilah, 2009).

4. KESIMPULAN

Semakin tinggi kandungan kadar aktivator, menyebabkan rasio Si/Al semakin besar yaitu untuk kadar aktivator 35, 40, dan 45% dengan rasio 2,42; 2,45; dan 2,48. Selisih antara kuat tarik belah terhadap kuat tekan untuk kadar aktivator 35% adalah 6,45%; 40% adalah 5,94%; dan 45% adalah 6,04% sehingga termasuk dalam bata ringan bermutu tinggi.

Kadar aktivator berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus runtuh. Kuat tekan terbaik terdapat pada kadar aktivator 35% dengan rerata 9,34 MPa. Kuat tekan yang terjadi akan menurun pada saat kadar aktivator meningkat. Kuat tarik belah terbaik terdapat pada kadar aktivator 35% dengan rerata 0,60 MPa. Semakin banyak kadar aktivator maka akan menurunkan kuat tarik belah. Modulus runtuh tertinggi terdapat pada kadar aktivator 35% dengan rerata 1,07 MPa. Modulus runtuh lebih tinggi didapatkan pada saat kadar aktivator yang lebih rendah. Pada rasio Si/Al yang lebih rendah menyebabkan kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus runtuh yang didapatkan lebih tinggi dan lebih baik.

REFERENSI

- Abdilah, D. A. (2009). *Studi Kekuatan Tarik dan Lentur Beton dengan Menggunakan Kaca sebagai Filler dan Pengganti Agregat Halus Pada Campuran Beton*. Universitas Indonesia.
- Abdullah, M. M. A. B., Hussin, K., Bnhussain, M., Ismail, K. N., Yahya, Z., & Abdul Razak, R. (2012). Fly Ash-based Geopolymer Lightweight Concrete Using Foaming Agent. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(6), 7186–7198. <https://doi.org/10.3390/ijms13067186>
- Ekaputri, J. J. (2020). *[Teknologi Beton dan Bahan] Pertemuan Finale “Mix Design Geopolymer - Part 2.”* <https://www.youtube.com/watch?v=FT2AO0IHIL4>
- Ekaputri, J. J., & Bari, M. S. Al. (2020). Perbandingan Regulasi Fly Ash sebagai Limbah B3 di Indonesia dan Beberapa Negara. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(2), 150–162.

- Ekaputri, J. J., Lie, H. A., Fujiyama, C., Shovitri, M., Alami, N. H., & Setiamarga, D. H. E. (2019). The Effect of Alkali Concentration on Chloride Penetration in Geopolymer Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 615(1), 012114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/615/1/012114>
- Ibrahim, W. M. W., Hussin, K., Abdullah, M. M. A. B., & Kadir, A. A. (2017). Geopolymer Lightweight Bricks Manufactured From Fly Ash And Foaming Agent. *AIP Conference Proceedings*, 1835(April), 020048. <https://doi.org/10.1063/1.4981870>
- Kuncoro, A., & Djayaprabha, H. S. (2021). The Effect of Sodium Hydroxide Molarity on The Compressive and Splitting Tensile Strength of Ferronickel Slag-Based Alkali-Activated Mortar. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 27(2), 151–160. <https://doi.org/10.14710/mkts.v27i2.32706>
- Lan, T. T., Duong, N. A., Anh, P. L., & Thi, M. T. (2021). Use Fly Ash for The Production of Lightweight Building Materials. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 43(3), 323–335. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/16204>
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Pedoman Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup* (Vol. 1, Issue 078487A, p. 483). Sekretariat Negara Republik Indonesia.
- PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk. (2021). *Strengthening Capabilities To Sustain Growth*. <https://sig.id/wp-content/uploads/2022/03/AR-Semen-Indonesia-SIG-2021-rev.pdf>
- Risdanareni, P., Ekaputri, J. J., & Al Bakri Abdullah, M. M. (2015). Effect of Alkaline Activator Ratio to Mechanical Properties of Geopolymer Concrete with Trass as Filler. *Applied Mechanics and Materials*, 754–755(January), 406–412. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.754-755.406>
- Standar Nasional Indonesia. (2011). *SNI 4431: Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal Dengan Dua Titik Pembebanan* (p. 16). Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2014a). *SNI 2491: Metode Uji Kekuatan Tarik Belah Spesimen Beton Silinder Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of* (pp. 1–17). Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2014b). *SNI 4154: Metode Uji Kekuatan Lentur Beton (Menggunakan Balok Sederhana Dengan Beban Terpusat di Tengah Bentang)* (p. 12). Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2018). *SNI 8640: Spesifikasi Bata Ringan Untuk Pasangan Dinding*. Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2019). *SNI 2847: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung* (Issue 8, p. 720). Badan Standardisasi Nasional.
- Thahir, Z. A. (2017). *Pemanfaatan Fly Ash Dan Bottom Ash dari PLTU Suralaya Banten untuk pembuatan GEOPAV* [Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. <http://repository.its.ac.id/44709/3-8>
- Wattimena, O. K., Antoni, & Hardjito, D. (2017). A Review on the Effect of Fly Ash Characteristics and Their Variations on the Synthesis of Fly Ash Based Geopolymer. *AIP Conference Proceedings*, 1887(September), 020041. <https://doi.org/10.1063/1.5003524>
- Widayanti, A., Aryani Soemitro, R. A., Ekaputri, J. J., & Suprayitno, H. (2021). Asphalt Concrete Mixture Produced using Reclaimed Asphalt Pavement and Fly Ash as Artificial Aggregate and Filler. *Jurnal Teknologi*, 83(4), 17–29. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v83.16289>
- Widodo, L. S. (2015). *Pengaruh Foam Agent dan Serbuk Gypsum terhadap Kualitas Bata Ringan* [Universitas Muhammadiyah Surakarta]. <https://eprints.ums.ac.id/35543/1/naskah publikasi.pdf>
- Wongkeo, W., Seekaew, S., & Kaewrahan, O. (2019). Properties of high calcium fly ash geopolymer lightweight concrete. *Materials Today: Proceedings*, 17, 1423–1430. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.163>

- Wongkvanklom, A., Posi, P., Kasemsiri, P., Sata, V., Cao, T., & Chindaprasirt, P. (2021). Strength, Thermal Conductivity and Sound Absorption of Cellular Lightweight High Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. *Engineering and Applied Science Research*, 48(4), 487–496. <https://doi.org/10.14456/easr.2021.51>
- Yumnam, M., & Dande, M. (2020). Experimental Study of Fly-Ash Based Geopolymer Lightweight Concrete using Foaming Agent. *International Journal of Civil Engineering*, 7(6), 88–91. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V7I6P111>