



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 1 (2026) pp: 5274-5287

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Analisis Ketahanan Geopolymer Foam Concrete terhadap Lingkungan Asam, Netral dan Basa dengan Variasi Foam Agent

Fitri Nur'Aini¹, Arie Taveriyanto²

^{1,2}Prodi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang

nuraini77162@students.unnes.ac.id, arietaveriyanto@mail.unnes.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketahanan Geopolymer Foam Concrete (GFC) berbasis fly ash kelas F terhadap paparan lingkungan dengan variasi lingkungan asam (pH 4), lingkungan netral (pH 7), dan lingkungan basa (pH 12) melalui pengaturan kadar foam agent, dimana sebanyak 18 benda uji silinder berukuran 15×30 cm disiapkan dan diuji menggunakan variasi foam agent 0% (tanpa foam), 1:15, dan 1:25 terhadap berat pasta geopolimer serta sistem aktivator NaOH 10 M dan Na₂SiO₃ pada rasio 1:2,5, kemudian mengevaluasi parameter slump flow untuk workability, perubahan massa setelah perendaman 28 hari sebagai indikator durabilitas, dan kuat tekan sebagai representasi performa mekanik, dimana hasil menunjukkan bahwa peningkatan kadar foam agent secara konsisten meningkatkan nilai slump flow dari 66 cm menjadi 76 cm dan 82 cm yang memenuhi klasifikasi Self-Compacting Concrete (SCC) kelas SF2–SF3, namun pada saat yang sama menyebabkan peningkatan porositas yang berdampak pada penurunan signifikan kuat tekan dari 43,63 MPa menjadi 18,80 MPa dan 10,73 MPa, serta memperbesar perubahan massa terutama pada lingkungan asam dengan degradasi tertinggi mencapai 8,84% pada variasi 1:25, sehingga variasi 1:15 dinilai memberikan keseimbangan paling optimal antara kemampuan alir, stabilitas dimensi, dan ketahanan mekanik untuk aplikasi konstruksi berkelanjutan pada kondisi lingkungan multi-pH.

Kata kunci: Geopolymer Foam Concrete, Fly Ash, Foam Agent, Kuat Tekan, Perubahan Massa, Lingkungan Multi-pH.

1. Latar Belakang

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, kebutuhan material konstruksi yang memiliki kinerja mekanik baik sekaligus berdampak lingkungan rendah menjadi isu strategis. Produksi semen Portland diketahui menghasilkan emisi karbon yang signifikan, mencapai sekitar 0,9 ton CO₂ per ton semen [1]. Selain itu, beton konvensional rentan terhadap degradasi ketika terpapar lingkungan agresif seperti asam dan basa, yang dapat menurunkan stabilitas mikrostruktur dan kekuatan mekaniknya.

Beton geopolimer dikembangkan sebagai alternatif dengan memanfaatkan material kaya silika dan alumina, seperti fly ash kelas F, yang diaktivasi menggunakan larutan alkali [2]. Sistem ini menghasilkan matriks gel aluminosilikat yang relatif lebih tahan terhadap serangan kimia dibandingkan beton berbasis kalsium tinggi [3]. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa geopolimer memiliki ketahanan lebih baik terhadap paparan sulfat dan asam dibanding beton konvensional [4].

Pengembangan lebih lanjut menghasilkan Geopolymer Foam Concrete (GFC), yaitu beton geopolimer dengan penambahan foam agent untuk membentuk struktur berpori. Sistem ini berpotensi meningkatkan workability dan mengurangi berat sendiri elemen, namun peningkatan porositas dapat menurunkan kuat tekan dan mempengaruhi ketahanan terhadap penetrasi larutan agresif [5]. Studi sebelumnya umumnya berfokus pada sifat mekanik atau karakteristik termal GFC, sedangkan kajian yang mengintegrasikan variasi foam agent dengan paparan lingkungan multi-pH masih terbatas.

Lingkungan dengan pH ekstrem dapat memengaruhi stabilitas gel N-A-S-H pada sistem geopolimer. Pada kondisi asam, ion H⁺ berpotensi melarutkan komponen alkali, sedangkan pada kondisi basa tinggi dapat terjadi proses leaching dan perubahan fase mineral [6]. Interaksi antara tingkat porositas akibat penambahan foam dan kondisi pH lingkungan menjadi aspek penting dalam menentukan durabilitas GFC.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini menganalisis ketahanan Geopolymer Foam Concrete berbasis fly ash kelas F dengan variasi foam agent 0%, 1:15, dan 1:25 terhadap lingkungan asam (pH 4), netral (pH 7), dan

Analisis Ketahanan Geopolymer Foam Concrete terhadap Lingkungan Asam, Netral dan Basa dengan Variasi Foam Agent

basa (pH 12). Evaluasi dilakukan melalui pengujian slump flow, perubahan massa, dan kuat tekan pada umur 28 hari setelah perendaman. Penelitian ini menggunakan aktivator NaOH 10 M dan Na₂SiO₃ dengan rasio 1:2,5 serta sistem full replacement semen Portland. Kebaruan penelitian terletak pada analisis simultan variasi foam agent dan kondisi multi-pH terhadap perubahan massa dan kuat tekan GFC dalam satu rancangan eksperimental terkontrol. Hasil penelitian diharapkan memberikan dasar dalam menentukan komposisi foam agent yang mampu menjaga keseimbangan antara workability dan ketahanan mekanik pada berbagai kondisi lingkungan.

2. Metode Penelitian

2.1 Pendekatan, Jenis dan Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk mengevaluasi ketahanan Geopolymer Foam Concrete (GFC) terhadap lingkungan agresif dengan variasi kadar foam agent. Benda uji berbentuk silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm, sebanyak 18 spesimen. Variasi foam agent terhadap berat pasta geopolimer adalah 0% (kontrol), rasio 1:15, dan rasio 1:25. Setiap variasi terdiri atas enam spesimen, kemudian masing-masing dua spesimen direndam dalam tiga kondisi pH: asam (pH 4), netral (pH 7), dan basa (pH 12). Pengujian dilakukan pada umur 28 hari dan meliputi slump flow, perubahan massa, dan kuat tekan.

2.2 Material dan Komposisi Campuran

Material utama terdiri atas fly ash kelas F sebagai binder penuh, NaOH 10 M, dan Na₂SiO₃ dengan rasio berat NaOH : Na₂SiO₃ = 1:2,5. Agregat terdiri atas pasir halus dan kerikil kasar. Foam agent ditambahkan sesuai rasio terhadap berat pasta geopolimer, yaitu 5,9 ml untuk rasio 1:15 dan 9,8 ml untuk rasio 1:25. Foam diencerkan menggunakan air sesuai spesifikasi pabrik (1 L untuk 60 L campuran foam), sehingga kebutuhan air pembentuk foam per spesimen adalah 348 ml untuk rasio 1:15 dan 580 ml untuk rasio 1:25. Proporsi campuran secara keseluruhan terdiri atas 25% binder dan 75% agregat terhadap total berat campuran.

Tabel 2. 1 Komposisi Material per Spesimen

Per 1 Sampel Silinder 15x30 cm

Variasi Foam Agent	Fly Ash	Pasir	Kerikil	Air Pelarut NaOH	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Foam Agent	Air Pelarut Foam
%	gr	gr	gr	ml	gr	gr	ml	ml
0	3.126	5.393	3.986	782,00	313,00	782,00	-	-
15	3.126	5.393	3.986	782,00	313,00	782,00	35,40	348,00
25	3.126	5.393	3.986	782,00	313,00	782,00	58,80	580,00

Larutan NaOH 10 M dibuat menggunakan Persamaan (1):

$$M = \frac{m}{M_r \times V}$$

dengan:

M = molaritas mol (mol/L)

m = massa NaOH yang akan dilarutkan (g)

M_r = massa molar NaOH = 40 g/mol

V = volume larutan (L)

2.3 Prosedur Pembuatan Spesimen

Pembuatan benda uji dilakukan dengan langkah sistematis agar hasil homogen dan dapat direplikasi. Pertama, larutan NaOH 10 M disiapkan 24 jam sebelum pencampuran untuk mencapai kestabilan suhu, kemudian dicampur dengan Na₂SiO₃ dengan rasio 1:2,5 hingga merata.

Agregat halus dan kasar dicampur kering bersama fly ash hingga homogen. Larutan aktivator ditambahkan secara bertahap sambil diaduk menggunakan mixer borfoam generator hingga terbentuk pasta geopolimer yang merata. Foam agent ditambahkan ke pasta sesuai rasio terhadap berat pasta, yaitu 5,9 ml untuk rasio 1:15 dan 9,8 ml untuk rasio 1:25, dengan air pelarut masing-masing 348 ml dan 580 ml. Pembentukan foam dan pendispersiannya dilakukan secara perlahan dengan mixer bor agar gelembung udara stabil.

Campuran dituangkan ke dalam cetakan silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm tanpa pemadatan mekanis, untuk menjaga struktur pori tetap utuh. Spesimen didiamkan selama sekitar 24 jam sebelum pembongkaran cetakan, lalu siap untuk direndam pada larutan pH sesuai variasi penelitian (asam, netral, dan basa) selama prosedur curing.

2.4 Prosedur Perawatan (Curing)

Setelah proses demoulding, benda uji direndam ke dalam tiga jenis larutan, yaitu larutan asam dengan (pH 4) yang dibuat menggunakan HCl (asam klorida), larutan netral dengan (pH 7), dan larutan basa dengan (pH 12) yang dibuat menggunakan NaOH (natrium hidroksida). Larutan perendaman disiapkan dengan pengaturan pH yang terkontrol.

Seluruh spesimen direndam selama 28 hari pada suhu ruang laboratorium, dan setiap wadah perendaman berisi dua spesimen sesuai variasi yang telah ditentukan.

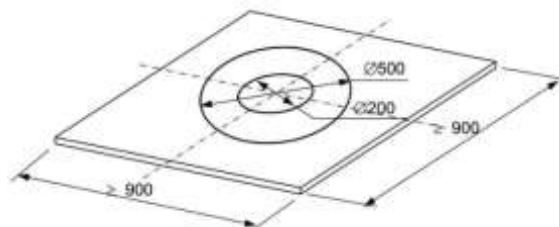
2.5 Metode Pengujian

2.5.1 Slump Flow

Self-Compacting Concrete (SCC) adalah beton segar yang mampu mengalir, mengisi cetakan, dan memadat sendiri tanpa bantuan pemadatan mekanik. Beton SCC memiliki viskositas dan konsistensi baik, tidak mengalami segregasi atau bleeding, serta setelah mengeras menjadi padat dan homogen, dengan sifat mekanik dan durabilitas setara atau lebih baik dibanding beton konvensional.

Pada penelitian ini, Slump Flow digunakan untuk mengevaluasi workability Geopolymer Foam Concrete (GFC) dengan variasi foam agent 0%, 1:15, dan 1:25 terhadap berat pasta geopolimer. Benda uji dibuat menggunakan cetakan silinder berdiameter 150 × 300 mm sesuai metode SCC. Setelah pencampuran fly ash, agregat halus, larutan aktivator (NaOH 10 M + Na₂SiO₃), dan foam agent, adukan homogen dituangkan ke dalam slump cone standar EFNARC tanpa pemadatan mekanik.

Slump cone diangkat secara vertikal, dan beton dibiarkan mengalir di permukaan datar. Diameter aliran maksimum diukur sebagai nilai slump flow (SF_{max}). Selama pencampuran foam, metode folding digunakan agar pori tetap stabil dan distribusi foam merata.



Gambar 2. 1 Diameter Slump Flow Test

Tabel 2. 2 Kriteria Penerimaan Slump Flow Test

Class	Slump flow (mm)
SF 1	550 – 650
SF 2	650 – 750
SF 3	750 – 850

Pengujian ini memberikan indikasi seberapa baik GFC dengan variasi foam agent dapat mengalir dan memenuhi standar SCC, yang menjadi dasar evaluasi workability beton segar.

2.5.2 Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari menggunakan Compression Testing Machine (CTM). Nilai kuat tekan dihitung menggunakan Persamaan (2):

$$f'c = \frac{P}{A}$$

dengan:

$f'c$ = kuat tekan (MPa)

P = massa NaOH yang akan dilarutkan (g)

A = luas penampang silinder (mm²)

Perhitungan ini digunakan untuk menentukan kemampuan material dalam menahan beban tekan setelah mengalami proses perendaman. Nilai kuat tekan yang lebih tinggi menunjukkan struktur matriks geopolymer yang lebih padat dan kuat, sedangkan penurunan kuat tekan mengindikasikan adanya kerusakan mikrostruktur akibat serangan kimia, peningkatan porositas, atau degradasi ikatan gel geopolymer.

2.5.3 Perubahan Massa

Perubahan massa dihitung berdasarkan selisih berat sebelum dan sesudah perendaman menggunakan Persamaan (3):

$$\% \Delta W = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\%$$

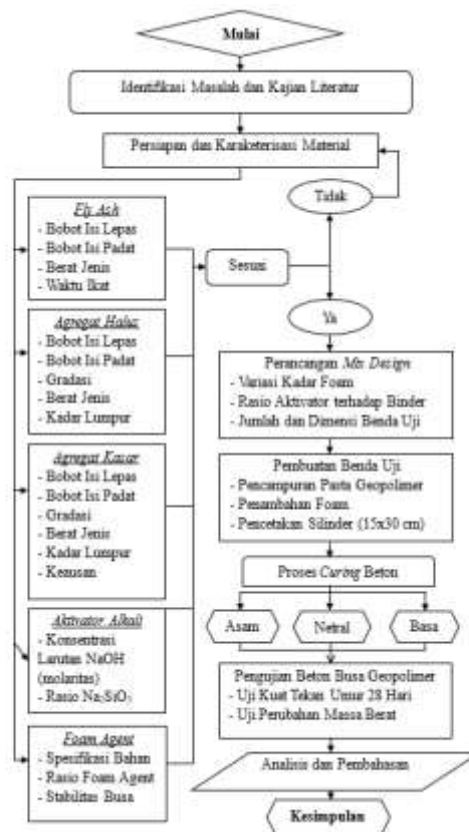
dengan:

W_0 = massa awal sebelum perendaman (kg)

W_t = massa akhir setelah perendaman (kg)

Perubahan massa ini digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana interaksi antara material GFC dan lingkungan perendaman. Nilai perubahan massa yang semakin besar menunjukkan terjadinya pelarutan, degradasi matriks, atau pelepasan partikel akibat serangan kimia, sedangkan nilai yang kecil menunjukkan stabilitas dimensional dan ketahanan material yang lebih baik.

2.5.4 Diagram Alir



3. Hasil Penelitian

3.1 Hasil Pemeriksaan Material dan Komposisi Campuran

Seluruh material penyusun GFC, meliputi fly ash/slag sebagai prekursor, pasir, kerikil berukuran maksimum 5 mm, larutan aktivator alkali (NaOH 10 M dan Na₂SiO₃ dengan rasio 1:2,5), serta foam agent sintesis telah melalui pemeriksaan sesuai standar yang berlaku. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material memenuhi persyaratan teknis dari segi bobot isi, berat jenis, gradasi, kadar lumpur, dan keausan, sehingga layak digunakan dalam campuran geopolymer foam concrete.

Material Penyusun Geopolymer Foam Concrete (GFC)



NaOH 10M : Na₂SiO₃ Rasio 1:2,5

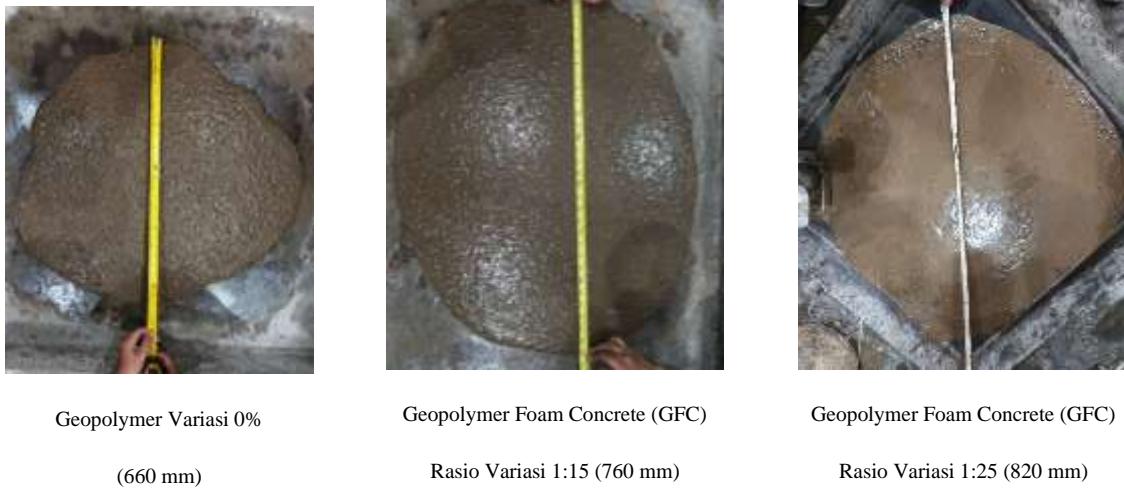
Fly Ash Tipe F, Agregat Halus, Agregat Kasar ukuran 5 mm

Foam Agent Synthetic

Gambar 3. 1 Material Penyusun GFC

3.2 Hasil Uji Slump Flow (SCC)

Hasil uji slump flow pada Geopolymer Foam Concrete (GFC) SCC dilakukan sesuai standar EFNARC (2005) untuk menilai flowability beton segar. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.1



Gambar 3. 2 Sampel Hasil Uji Diameter Slump Flow

Tabel 3. 1 Hasil Uji Slump Flow Test

No.	Jumlah Benda Uji (buah)	EFNARC (2005)	Hasil Uji Slump Flow (mm)	Kelas SCC
1	6 Sampel Beton Geopolimer variasi foam 0%	650 – 750	660	SF 2
2	6 Sampel GFC rasio foam 1:15	750 – 850	760	SF 3
3	6 Sampel GFC rasio foam 1:25	750 – 850	820	SF 3

Variasi kadar foam mempengaruhi workability GFC SCC. Slump flow meningkat dari 66 cm (0% foam, SF2) menjadi 76 cm (rasio 1:15) dan 82 cm (rasio 1:25, keduanya SF3) sesuai EFNARC (2005). Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan foam meningkatkan aliran campuran, namun slump flow tinggi pada SF3 berpotensi menurunkan stabilitas beton akibat rongga udara dan risiko segregasi jika tidak dikontrol.

3.3 Kuat Tekan



Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengevaluasi performa mekanik Geopolymer Foam Concrete (GFC) pada berbagai variasi foam agent dan kondisi lingkungan, yakni asam (pH 4), netral (pH 7), dan basa (pH 12). Setiap sampel silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm diuji menggunakan mesin uji tekan (CTM), dengan perhitungan kuat tekan aktual $f'_c = P/A$ berdasarkan beban puncak yang tercatat.

Hasil uji menunjukkan bahwa sampel tanpa foam (0%) memiliki kuat tekan tertinggi pada seluruh kondisi lingkungan, dengan nilai berkisar antara 44 hingga 45 MPa. Penambahan foam agent menurunkan kuat tekan secara konsisten. Variasi foam 1:15 menghasilkan nilai kuat tekan antara 18 hingga 20 MPa, sedangkan variasi 1:25 memberikan nilai terendah, yaitu antara 9 hingga 12 MPa. Penurunan kuat tekan ini menunjukkan bahwa peningkatan rasio foam meningkatkan porositas matriks geopolimer, sehingga mengurangi kapasitas menahan beban dan densitas struktur beton.

Pengaruh kondisi lingkungan juga terlihat dari variasi kuat tekan. Sampel yang direndam pada pH basa menunjukkan performa tertinggi, mendekati nilai kuat tekan maksimum untuk setiap variasi foam, sedangkan kondisi pH asam memberikan nilai sedikit lebih rendah. Lingkungan netral menghasilkan nilai kuat tekan stabil, namun tetap berada di bawah kondisi basa. Hal ini mengindikasikan bahwa GFC memiliki ketahanan yang lebih baik pada kondisi basa, sementara kondisi asam menyebabkan degradasi ringan terhadap struktur geopolimer.

Secara keseluruhan, penambahan foam agent mengurangi kekuatan beton secara signifikan, terutama pada rasio 1:25. Dengan demikian, untuk aplikasi struktural, penggunaan foam tidak direkomendasikan, sedangkan untuk kebutuhan material ringan atau non-struktural, foam masih dapat digunakan dengan mempertimbangkan penurunan kuat tekan yang terjadi.

Rekapitulasi kuat tekan 18 sampel uji ditampilkan dalam Tabel 3.1 sampai Tabel 3.3, masing-masing untuk kondisi pH asam, netral, dan basa. Grafik Gambar 3.5 hingga Gambar 3.7 menunjukkan tren kuat tekan menurun seiring peningkatan rasio foam agent. Sampel tanpa foam memiliki nilai tertinggi, sementara variasi foam 1:25 terendah. Kondisi pH basa memberikan performa kuat tekan lebih baik dibanding pH netral dan asam.

Tabel 3.1 Rekapitulasi Hasil Uji Kuat Tekan Lingkungan Netral (pH 7)

No	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	Berat (kg)	Slump (cm)	Umur maks (hari)	Beban (KN)	Kuat Tekan (MPa)
1	15	30	13.051	66	28	792,4	44.8
2	15	30	13.051	66	28	792,7	44.8
3	15	30	12.325	76	28	323,6	18.3
4	15	30	12.325	76	28	328,1	18.5
5	15	30	12.041	82	28	168,2	9.5
6	15	30	12.041	82	28	175,3	9.9

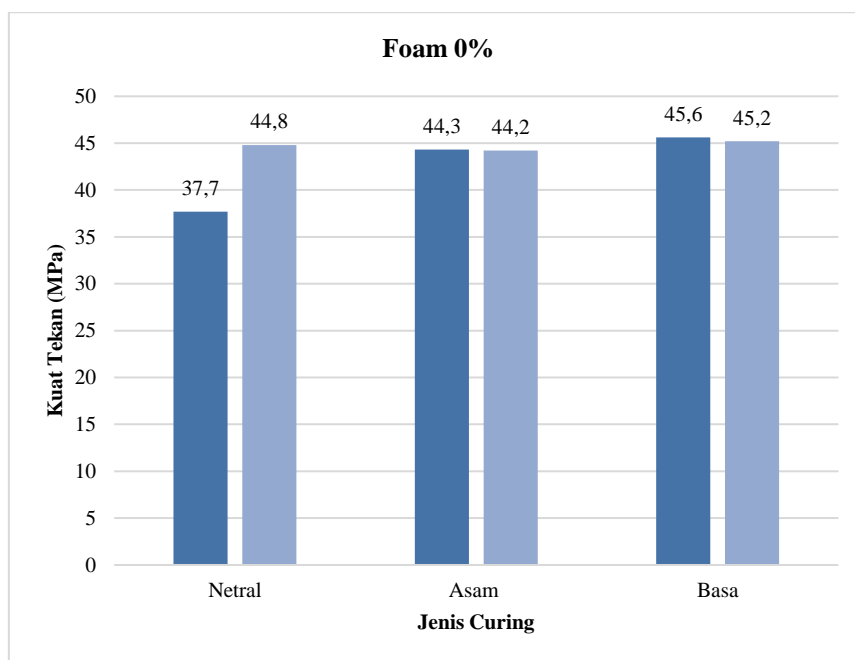
Tabel 3.2 Rekapitulasi Hasil Uji Kuat Tekan Lingkungan Asam (pH 4)

No	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	Berat (kg)	Slump (cm)	Umur maks (hari)	Beban (KN)	Kuat Tekan (MPa)
1	15	30	13.051	66	28	783,6	44.3
2	15	30	13.051	66	28	781,6	44.2
3	15	30	12.325	76	28	279,2	15.8
4	15	30	12.325	76	28	352,0	19.9
5	15	30	12.041	82	28	200,3	11.3

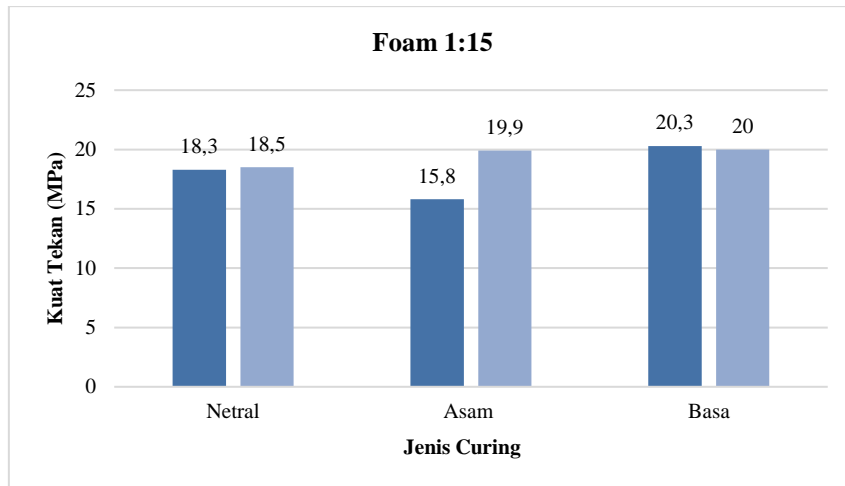
6	15	30	12.041	82	28	193,6	11.0
---	----	----	--------	----	----	-------	------

Tabel 3. 3 Rekapitulasi Hasil Uji Kuat Tekan Lingkungan Basa (pH 12)

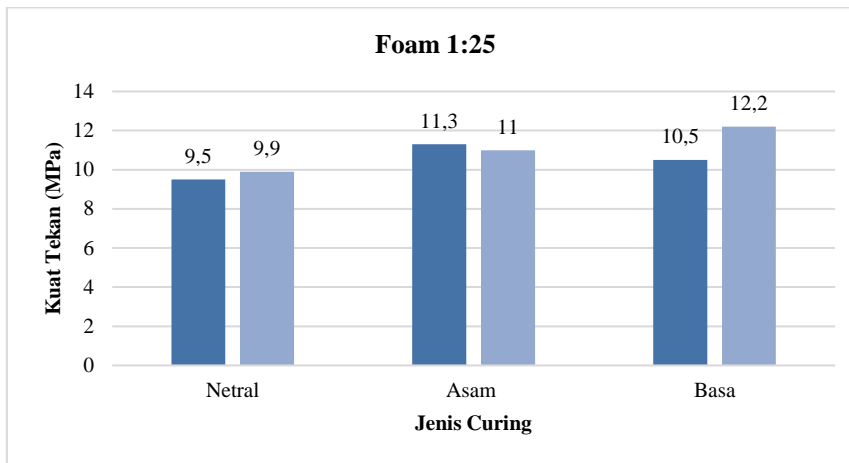
No	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	Berat (kg)	Slump (cm)	Umur maks (hari)	Beban (KN)	Kuat Tekan (MPa)
1	15	30	13.051	66	28	806,2	45.6
2	15	30	13.051	66	28	799,6	45.2
3	15	30	12.325	76	28	358,7	20.3
4	15	30	12.325	76	28	353,7	20.0
5	15	30	12.041	82	28	186,5	10.5
6	15	30	12.041	82	28	215,8	12.2



Gambar 3. 1 Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Beton Lingkungan Netral (pH 7)



Gambar 3.2 Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Beton Variasi Rasio Foam 1:15



Gambar 3.3 Hasil Uji Kuat Tekan Variasi Rasio Foam 1:25

3.4 Perubahan Massa Setelah Perendaman

Pengujian perubahan massa dilakukan untuk menilai stabilitas fisik Geopolymer Foam Concrete (GFC) setelah perendaman 28 hari pada berbagai kondisi pH: asam (pH 4), netral (pH 7), dan basa (pH 12). Massa setiap sampel silinder (15 × 30 cm) ditimbang sebelum dan sesudah perendaman, kemudian dihitung selisih dan persentase perubahan massa (% ΔW) sebagai indikator degradasi fisik. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.4 sampai Tabel 3.6

Tabel 3.4 Perubahan Massa Beton Lingkungan Netral (pH 7)

No	Variasi Foam	pH Lingkungan	Massa Awal (kg)	Massa Akhir (kg)	ΔW (kg)	ΔW (%)
1	0%	Netral (pH 7)	13.051	11.08	1.971	15,10
2	0%	Netral (pH 7)	13.051	11.08	1.971	15,10
3	1:15	Netral (pH 7)	12.325	11.23	1.095	8,88
4	1:15	Netral (pH 7)	12.325	11.1	1.225	9,93

5	1:25	Netral (pH 7)	12.041	10.8	1.601	12,91
6	1:25	Netral (pH 7)	12.041	10.76	1.641	13,2

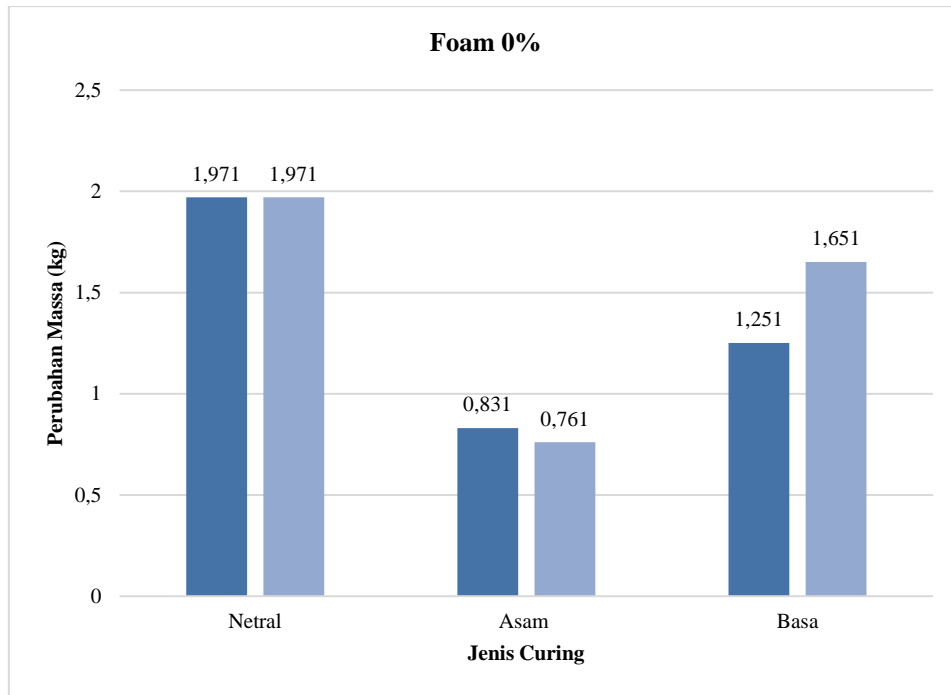
Tabel 3. 5 Perubahan Massa Beton Lingkungan Asam (pH 4)

No	Variasi Foam	pH Lingkungan	Massa Awal (kg)	Massa Akhir (kg)	ΔW (kg)	ΔW (%)
1	0%	Asam (pH 4)	13.051	12.22	0.831	6,37
2	0%	Asam (pH 4)	13.051	12.29	0.761	5,83
3	1:15	Asam (pH 4)	12.325	11.53	0.795	6,45
4	1:15	Asam (pH 4)	12.325	11.54	0.785	6,37
5	1:25	Asam (pH 4)	12.041	11.45	0.951	7,67
6	1:25	Asam (pH 4)	12.041	11.16	1.241	10,01

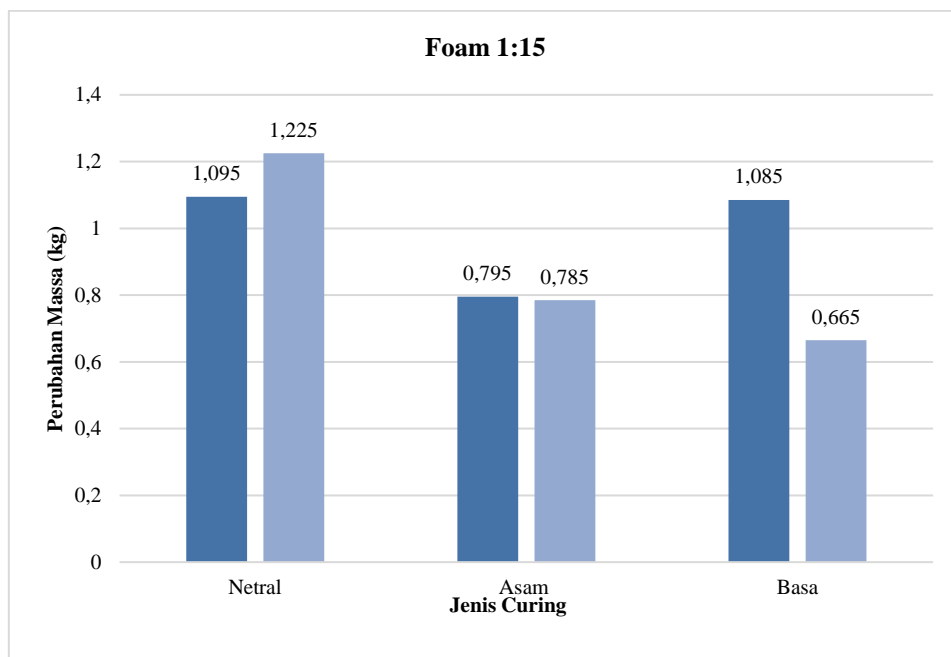
Tabel 3. 6 Perubahan Massa Beton Lingkungan Basa (pH 12)

No	Variasi Foam	pH Lingkungan	Massa Awal (kg)	Massa Akhir (kg)	ΔW (kg)	ΔW (%)
1	0%	Basa (pH 12)	13.051	11.8	1.251	9,58
2	0%	Basa (pH 12)	13.051	11.4	1.651	12,65
3	1:15	Basa (pH 12)	12.325	11.24	1.085	8,80
4	1:15	Basa (pH 12)	12.325	11.66	0.665	5,39
5	1:25	Basa (pH 12)	12.041	11.01	1.391	11,21
6	1:25	Basa (pH 12)	12.041	11.31	1.091	8,79

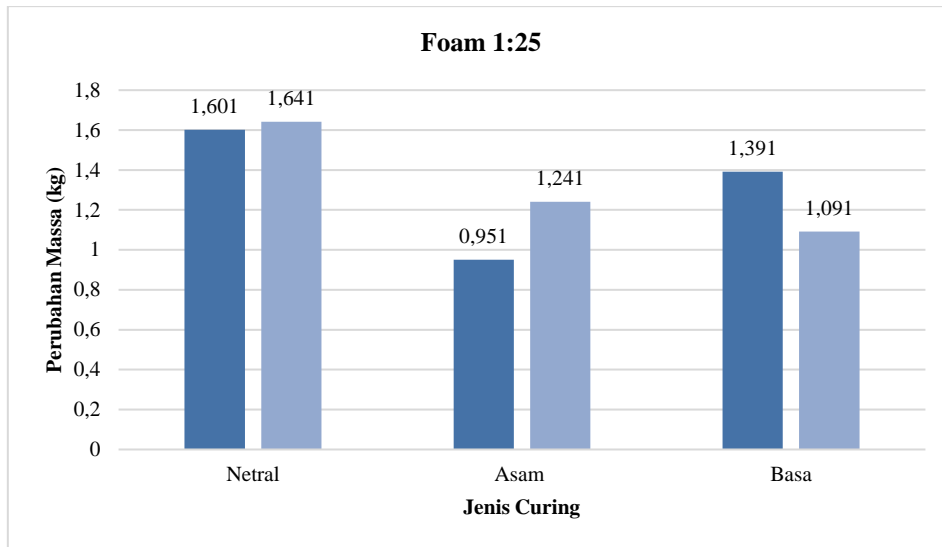
Hasil uji menunjukkan bahwa beton tanpa foam (0%) pada pH netral mengalami penurunan massa sebesar 15,10%, sementara GFC dengan rasio foam 1:15 hanya turun 8,88–9,93% dan rasio 1:25 sebesar 12,91–13,20%. Pada pH asam, penurunan massa tercatat lebih rendah, yaitu 5,83–6,37% untuk 0%, 6,37–6,45% untuk 1:15, dan 7,67–10,01% untuk 1:25. Sedangkan pada pH basa, penurunan massa terjadi sebesar 9,58–12,65% untuk 0%, 5,39–8,80% untuk 1:15, dan 8,79–11,21% untuk 1:25.



Gambar 3.4 Grafik Perubahan Massa Beton Variasi Foam 0%



Gambar 3.5 Grafik Perubahan Massa Beton Variasi Rasio Foam 1:15



Gambar 3. 6 Grafik Perubahan Massa Beton Variasi Rasio Foam 1:25

Hasil pengujian perubahan massa setelah 28 hari perendaman menunjukkan pola yang konsisten pada seluruh variasi. Lingkungan asam menghasilkan kehilangan massa paling signifikan dibandingkan lingkungan netral dan basa. Hal ini mengindikasikan terjadinya degradasi matriks akibat reaksi antara ion hidrogen dengan struktur gel geopolimer.

Pada kondisi netral, perubahan massa relatif kecil dan menunjukkan kestabilan struktur material. Lingkungan basa juga menyebabkan perubahan massa, namun tidak sebesar kondisi asam. Perbedaan ini menunjukkan bahwa mekanisme degradasi pada lingkungan asam lebih agresif terhadap struktur N-A-S-H dibandingkan kondisi basa.

Variasi dengan kadar foam lebih tinggi menunjukkan persentase kehilangan massa lebih besar dibandingkan campuran tanpa foam. Peningkatan porositas memperbesar jalur difusi larutan agresif sehingga mempercepat proses pelarutan komponen alkali dalam matriks. Hubungan ini menegaskan adanya korelasi langsung antara tingkat porositas dan resistansi kimia material.

3.5 Tampak Visual Geopolymer Foam Concrete (GFC) setelah perendaman

Lingkungan Asam (pH 4)



Perawatan Beton Lingkungan Asam (pH 4)



Geopolymer Variasi 0%



Geopolymer Foam Concrete Variasi Rasio 1:15



Geopolymer Foam Concrete Variasi Rasio 1:25

Lingkungan Netral (pH 7)



Lingkungan Basa (pH 12)



Gambar 3. 3 Tampak Visual Geopolymer Foam Concrete (GFC)

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian terhadap 18 sampel Geopolymer Foam Concrete (GFC) berbasis fly ash kelas F dengan variasi foam agent 0% (tanpa foam), 1:15, dan 1:25 serta perendaman pada lingkungan pH 4 (asam), pH 7 (netral), dan pH 12 (basa) hingga umur 28 hari, diperoleh bahwa variasi foam agent memberikan pengaruh signifikan terhadap kuat tekan GFC. Campuran tanpa foam menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 43,63 MPa, sedangkan penambahan foam menurunkan kuat tekan secara drastis menjadi 18,80 MPa pada rasio 1:15 dan 10,73 MPa pada rasio 1:25. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar foam meningkatkan porositas dan menurunkan kepadatan matriks gel sehingga mengurangi daya dukung tekan. Kondisi lingkungan perendaman pH 4, pH 7, dan pH 12 juga memengaruhi perubahan massa. Pada kondisi netral pH 7, perubahan massa tertinggi terjadi pada variasi tanpa foam, sedangkan variasi 1:15 menunjukkan kestabilan massa terbaik. Pada kondisi asam dan basa, perubahan massa beton dengan foam 1:15 tetap relatif lebih kecil dibandingkan dua variasi lainnya, menunjukkan bahwa perubahan massa dipengaruhi oleh kombinasi tingkat porositas dan agresivitas lingkungan. Ketahanan GFC setelah perendaman pada lingkungan pH 4 (asam), pH 7 (netral), dan pH 12 (basa) menunjukkan bahwa variasi tanpa foam dan foam 1:15 memiliki performa paling baik, sedangkan foam 1:25 menunjukkan ketahanan paling rendah. Ditinjau dari perubahan massa, variasi 1:15 memberikan stabilitas terbaik dengan nilai perubahan massa paling kecil pada seluruh kondisi pH. Sementara itu, ditinjau dari kuat tekan setelah perendaman, variasi tanpa

foam mempertahankan kekuatan tertinggi pada seluruh lingkungan, diikuti oleh variasi 1:15. Variasi 1:25 mengalami penurunan massa maupun kuat tekan paling besar akibat tingginya porositas. Dengan demikian, ketahanan optimal diperoleh pada campuran tanpa foam dari segi kekuatan dan pada foam 1:15 dari segi kestabilan massa, sedangkan campuran dengan foam 1:25 memiliki ketahanan paling rendah terhadap lingkungan asam, netral, dan basa. Secara keseluruhan, GFC berbasis fly ash kelas F dengan optimasi kadar foam dan kondisi curing yang tepat berpotensi diterapkan sebagai material beton ringan ramah lingkungan. Variasi 1:15 memberikan keseimbangan terbaik antara workability SCC, stabilitas massa, dan ketahanan terhadap lingkungan, sehingga layak digunakan untuk elemen non-struktural maupun semi-struktural seperti panel dinding, bata ringan, dan partisi bangunan.

Referensi

1. T. S. Alahmari, T. A. Abdalla, and M. A. M. Rihan, "Review of recent developments regarding the durability of geopolymer concrete," *Materials*, vol. 16, no. 4, pp. 1–22, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16041452>
2. D. S. Devi, M. Fauzi, B. Syafitri, and A. Laksono, "Durabilitas geopolymer foam concrete terhadap ketahanan sulfat," *Jurnal Tekno Global*, vol. 12, no. 1, pp. 24–29, 2023. <https://doi.org/10.36982/jtg.v12i01.3175>
3. R. A. Ikomudin, B. Herbudiman, and R. R. Irawan, "Ketahanan beton geopolimer berbasis fly ash terhadap sulfat dan klorida," *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, vol. 2, no. 4, pp. 33–43, 2016.
4. J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, 5th ed., Saint-Quentin, France: Institut Géopolymère, 2008.
5. I. Nurhuda, Y. A. Priastiwati, V. Ardidawa, and C. AlFahd Nizami, "Daya tahan mortar geopolimer dan mortar semen portland pozzolan terhadap larutan asam sulfat," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 28, no. 2, pp. 219–229, 2022. <https://doi.org/10.14710/mkts.v28i2.39354>
6. P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed., New York: McGraw-Hill Education, 2014.
7. A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed., London: Pearson Education Limited, 2011.
8. A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
9. J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2009.
10. Y. H. M. Amran, N. Farzadnia, and A. A. A. Ali, "Properties and applications of foamed concrete: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 990–1005, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>
11. X. Zhou and Y. Su, "Durability of geopolymer concrete under acidic environments," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 35, no. 2, pp. 1–12, 2023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004500](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004500)
12. ACI Committee 201, *Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R-12)*, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2012.
13. EFNARC, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*, Norfolk, UK: EFNARC, 2005.
14. Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1974:2011 – Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*, Jakarta: BSN, 2011.
15. ASTM International, *ASTM C39/C39M – Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.
16. ASTM International, *ASTM C143/C143M – Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.
17. ASTM International, *ASTM C618 – Standard Specification for Coal Fly Ash for Use in Concrete*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
18. ASTM International, *ASTM C642 – Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
19. ASTM International, *ASTM C796 – Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
20. American Concrete Institute, *ACI 318-19 – Building Code Requirements for Structural Concrete*, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.