

PENGARUH KONDISI CURING DENGAN MOLARITAS NaOH RENDAH TERHADAP SIFAT MEKANIK BETON GEOPOLIMER

Ivan Nichollas^{1*}, Bimo B. Adhitya² dan Budi Nayobi³

¹Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

²Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

³Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Paalembang

*Corresponding author e-mail: v.r.agustin@school.ac.id

ABSTRAK: Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kondisi perawatan (curing) dan molaritas rendah larutan NaOH terhadap sifat mekanik beton geopolimer berbasis *fly ash* sebagai alternatif ramah lingkungan pengganti beton konvensional. Variasi molaritas NaOH yang digunakan yaitu 6 M, 8 M, dan 10 M, dengan dua metode *curing*: *oven curing* pada suhu 90°C dan 120°C, serta *curing* pada suhu ruang. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, dan 28 hari. Hasil menunjukkan bahwa kuat tekan tertinggi diperoleh pada *oven curing* 90°C dengan nilai 40,514 MPa pada umur 28 hari, sedangkan nilai terendah sebesar 7,992 MPa terjadi pada *ambient curing*. Peningkatan kuat tekan dari *ambient curing* ke *oven curing* 90°C mencapai 173,82% pada umur 3 hari dan 135,16% pada umur 28 hari. Selain itu, peningkatan molaritas NaOH dari 6 M ke 10 M juga meningkatkan kuat tekan secara signifikan, dengan rata-rata kenaikan 32,25% pada umur 3 hari dan 44,84% pada umur 28 hari. Secara keseluruhan, *oven curing* pada suhu 90°C memberikan hasil paling optimal, sementara suhu 120°C menghasilkan performa sedikit lebih rendah. Penelitian ini menegaskan bahwa kontrol suhu *curing* dan molaritas aktivator berperan penting dalam mengoptimalkan kekuatan beton geopolimer berbasis *fly ash*.

Kata Kunci: Beton Geopolimer, Perawatan, Molaritas NaOH, Abu Terbang, Kuat Tekan.

ABSTRACT: This study aims to analyze the effect of curing conditions and low NaOH molarity on the mechanical properties of fly ash-based geopolимер concrete as an environmentally friendly alternative to conventional concrete. The NaOH molarity variations used were 6 M, 8 M, and 10 M, with two curing methods: oven curing at 90°C and 120°C, and ambient curing. Compressive strength tests were conducted at 3, 7, and 28 days. The results showed that the highest compressive strength was achieved under oven curing at 90°C, reaching 40.514 MPa at 28 days, while the lowest value of 7.992 MPa occurred under ambient curing. The increase in compressive strength from ambient curing to oven curing at 90°C reached 173.82% at 3 days and 135.16% at 28 days. Furthermore, increasing the NaOH molarity from 6 M to 10 M significantly improved compressive strength, with an average increase of 32.25% at 3 days and 44.84% at 28 days. Overall, oven curing at 90°C provided the most optimal results, while curing at 120°C produced slightly lower performance. This study highlights that controlling curing temperature and activator molarity plays a crucial role in optimizing the strength of fly ash-based geopolимер concrete.

Keywords: Geopolymer Concrete, Curing, NaOH Molarity, Fly Ash, Compressive Strength.

1 Pendahuluan

Indonesia terus mengupayakan penguatan ekonomi nasional melalui pembangunan infrastruktur secara menyeluruh. Langkah ini tidak hanya dimaksudkan untuk meningkatkan aktivitas ekonomi, tetapi juga sebagai respons terhadap pertumbuhan jumlah penduduk yang semakin meningkat. Infrastruktur yang dibangun mencakup sarana transportasi, fasilitas perdagangan, serta perumahan yang layak bagi masyarakat. Dalam proses

pembangunan tersebut, semen menjadi salah satu bahan utama yang paling banyak digunakan. Namun, meskipun penting dalam industri konstruksi, produksi semen memiliki dampak besar terhadap lingkungan, terutama terkait dengan emisi karbon dioksida. Proses pembakaran semen di *rotary kiln* menggunakan bahan bakar batubara yang menghasilkan gas buang seperti sulfida dan CO₂. Selain itu, reaksi kimia saat pembakaran batu kapur (CaCO₃) melepaskan sekitar 50% gas CO₂ ke udara. Akibatnya, setiap 1 ton semen yang diproduksi bisa

menghasilkan emisi gas rumah kaca sebesar 1 ton, yang kemudian berkontribusi pada pemanasan global dan kerusakan lingkungan [1].

Sebagai solusi alternatif untuk mengurangi dampak lingkungan dari produksi semen, penggunaan beton geopolimer mulai dikembangkan. Beton ini memanfaatkan material *pozzolanik* atau pengikat anorganik seperti *fly ash*, yang mampu menggantikan sebagian besar peran semen portland dalam campuran beton. *Fly ash* diketahui dapat meningkatkan kekuatan mekanik beton, sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap semen konvensional [2]. Untuk mengaktifkan proses *geopolimerisasi* dari *fly ash*, dibutuhkan larutan alkali seperti natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat. NaOH memainkan peran penting dalam memecah struktur silika-alumina sehingga membentuk gel *aluminosilikat* yang memberikan kekuatan mekanik pada beton.

Tingkat molaritas NaOH sangat mempengaruhi kekuatan tekan beton geopolimer. Semakin tinggi molaritas, semakin besar pula kekuatan tekan yang dihasilkan. Namun demikian, peningkatan molaritas juga berdampak negatif terhadap sifat segar beton, bahkan menimbulkan risiko korosi yang dapat membahayakan keselamatan pekerja dan meningkatkan biaya produksi [3]. Oleh karena itu, penggunaan NaOH dengan molaritas rendah menjadi pilihan menarik karena lebih aman dan ekonomis, meskipun menghasilkan beton dengan kekuatan tekan yang relatif lebih rendah [4]. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, pengaturan kondisi *curing* menjadi penting. Penelitian menunjukkan bahwa *curing* pada suhu tinggi dapat meningkatkan kekuatan tekan beton geopolimer meskipun dengan molaritas NaOH yang rendah [5].

Dengan mempertimbangkan hal tersebut, pemahaman mendalam mengenai interaksi antara kondisi *curing*, molaritas rendah NaOH, dan penggunaan *fly ash* dalam beton geopolimer menjadi penting. Tujuannya adalah untuk mencapai keseimbangan optimal antara kekuatan mekanik, efisiensi biaya, dan dampak lingkungan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi kombinasi bahan yang paling tepat, sehingga *fly ash* dapat dimanfaatkan secara maksimal

Tabel 1. JMF untuk 1 Sampel

Jenis Curing	Suhu (°C)	Molaritas NaOH (M)	Agregat		Fly Ash (kg)	Alkali Aktivator (kg)
			Kasar (kg)	Halus (kg)		
<i>Ambient Curing</i>	30	6, 8, 10	2.381	1.020	0.897	0.404
<i>Oven Curing</i>	90	6, 8, 10	2.381	1.020	0.897	0.404
<i>Oven Curing</i>	120	6, 8, 10	2.381	1.020	0.897	0.404

sebagai substansi semen tanpa mengurangi kualitas mekanik beton yang dibutuhkan.

2 Metode

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah metode eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Struktur, Konstruksi, dan Material Universitas Sriwijaya. Langkah pertama dalam penelitian ini adalah melakukan uji karakteristik *fly ash* dari PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang sebagai bahan utama dalam pembuatan beton geopolimer. Ada tiga metode pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik *fly ash*, yaitu *X-ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi fase mineralogi dan struktur kristal, *X-ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia unsur penyusun, serta *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati morfologi dan struktur permukaan partikel. Dari hasil ketiga metode ini, *fly ash* akan dievaluasi kelayakannya sebagai prekursor dalam sistem geopolimer, khususnya dalam kandungan aluminosilikat dan ukuran partikel.

Penelitian dimulai dengan studi literatur dan dilanjutkan dengan persiapan material seperti *fly ash*, agregat halus dan kasar, serta larutan alkali aktivator yang terdiri dari NaOH (6 M, 8 M, dan 10 M) dan Na₂SiO₃. Setelah itu dilakukan pengujian karakteristik material, termasuk XRF, XRD, dan SEM untuk *fly ash*, serta pengujian agregat berdasarkan standar ASTM. Selanjutnya dilakukan proses pencampuran dan pembuatan benda uji silinder (100 mm x 200 mm), yang kemudian dikenai dua metode *curing*, yaitu *ambient curing* (suhu ruang) dan *oven curing* pada suhu 90°C dan 120°C. Pengujian kuat tekan dilakukan pada hari ke-3, ke-7, dan ke-28. Total benda uji sebanyak 81 sampel (3 molaritas x 3 suhu x 3 pengujian x 3 pengulangan).

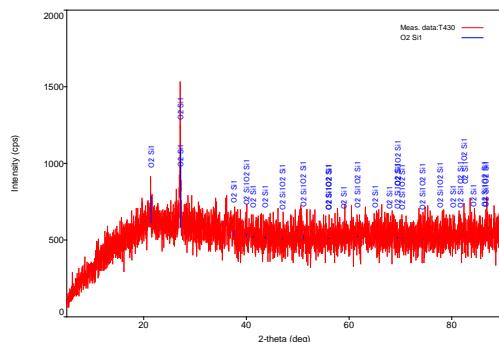
3 Hasil dan Pembahasan

Hasil Pengujian Fly Ash

Dalam penelitian ini digunakan *fly ash* dari PT. Pupuk Sriwidjaja (Pusri) dengan melakukan uji karakteristik *fly ash* dari metode XRF, XRD, dan SEM.

a. Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD bertujuan untuk menemukan dan mengidentifikasi fase-fase kristal yang terdapat dalam *fly ash*. Adapun hasil pengujian XRD dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Hasil Pengujian XRD

Metode ini melibatkan penggunaan sinar X-Ray dengan tegangan 40 kV dan arus 10 mA, serta menggerakkan sampel pada kecepatan 10°/menit dengan sudut difraksi sebesar 2Θ dalam rentang sudut antara 5 hingga 90 derajat. Pada hasil XRD menunjukkan bahwa puncak dengan intensitas tertinggi sebesar 1533,33 cps yang terletak pada sudut 2Θ sebesar 27,14°. Fase kristal paling tinggi pada *fly ash* yang digunakan adalah kristal SiO_2 , sehingga *fly ash* memiliki kandungan SiO_2 yang paling tinggi. Dengan menggunakan *software* OriginPro®8.5, didapatkan presentase fase kristalin sebesar 2,83%, sedangkan fase amorf mencapai 97,17%.

b. Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF)

Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui komposisi senyawa kimia dari *fly ash* dan mengklasifikasikan jenis *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini. Sesuai dengan ASTM C618-2019, kelas F adalah kategori *fly ash* yang memiliki kandungan senyawa kimia dengan jumlah SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 memiliki nilai minimal 50%, kandungan CaO maksimal 18%, dan kandungan SO_3 maksimal 5% [6]. Adapun hasil pengujian XRF dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

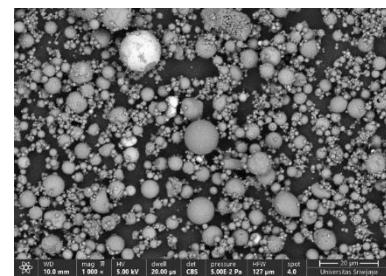
Tabel 2. Hasil Pengujian XRF

Komposisi Kimia	Jumlah (%)
SiO_2	50.513
Al_2O_3	22.944
Fe_2O_3	11.298
CaO	4.927
Na_2O	4.472
MgO	1.853
SO_3	1.526
K_2O	1.369
TiO_2	0.837
P_2O_5	0.174
Mn_3O_4	0.070

SiO_2 (silikon dioksida) berfungsi sebagai sumber silikat yang, bersama dengan Al_2O_3 (aluminium oksida), akan membentuk jaringan tiga dimensi aluminosilikat saat direaksikan dengan aktuator alkali. Al_2O_3 sendiri sangat penting untuk kestabilan termal dan kekuatan struktural geopolimer. Fe_2O_3 (besi oksida) juga berperan dalam memperkuat struktur ikatan dan dapat memberikan kontribusi tambahan terhadap ketahanan kimia maupun warna dari produk akhir. Sementara itu, kandungan CaO (kalsium oksida) harus dikendalikan, dengan batas maksimal 18%, karena keberadaan CaO dalam jumlah tinggi dapat mengarahkan reaksi menuju pembentukan produk hidrat seperti C-S-H (Calcium Silikat Hidrat) yang umum ditemukan pada semen Portland, bukan gel N-A-S-H (Natrium-Aluminium-Silikat-Hidrat) yang menjadi ciri khas geopolimer. Hal ini bisa mengurangi kestabilan jangka panjang dan mengubah sifat dari material geopolimer itu sendiri. Kandungan SO_3 (sulfur trioksida) juga dibatasi maksimal 5% karena dalam jumlah tinggi dapat menyebabkan ekspansi yang berlebihan, keretakan, dan menurunkan durabilitas material.

c. Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)

Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) bermaksud menampilkan struktur butiran *fly ash*. Adapun hasil pengujian SEM dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Pengujian SEM

Hasil pengujian SEM menunjukkan bahwa butiran *fly ash* umumnya berbentuk bulat, seperti yang terlihat pada Gambar 4.2 dengan pembesaran 1.000x. Bentuk butiran *fly ash* yang bulat memudahkan *fly ash* untuk bereaksi dengan senyawa lain selama proses pencampuran beton disebabkan derajat keamorfan *fly ash* yang semakin tinggi dan semakin reaktif sehingga akan memberikan kontribusi kuat tekan dari reaksi pozzolanik *fly ash* [7]. Bentuk sferis dan ukuran yang relatif kecil ini memberikan luas permukaan yang tinggi, sehingga meningkatkan reaktivitas silika dan alumina terhadap larutan alkali pada proses geopolimerisasi. Selain itu, distribusi ukuran partikel yang merata memungkinkan penyusunan partikel yang lebih rapat dan padat, sehingga dapat mengurangi

porositas dan memperbaiki struktur mikro geopolimer. Karakteristik morfologi ini secara keseluruhan mendukung terbentuknya ikatan geopolimer yang lebih kuat dan stabil [8].

Hasil Pengujian Beton Geopolimer

a. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer

Berikut merupakan tabel dan grafik hasil dari pengujian kuat tekan beton geopolimer dengan penambahan triethanolamine pada umur beton 3 hari, 7 hari, dan 28 hari:

Tabel 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Ambient Curing*; 6M

Umur (Hari)	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
3	1	3,540	63,440	7857,143	8,074	
	2	3,390	54,83	7857,143	6,978	7,992
	3	3,550	70,12	7857,143	8,924	
7	1	3,420	67,190	7857,143	8,551	
	2	3,520	69,630	7857,143	8,862	8,713
	3	3,680	68,550	7857,143	8,725	
28	1	3,470	80,38	7857,143	10,230	
	2	3,700	87,030	7857,143	11,077	10,934
	3	3,500	90,320	7857,143	11,495	

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Ambient Curing*; 8M

Umur (Hari)	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
3	1	3,440	89,970	7857,143	11,451	
	2	3,520	75,81	7857,143	9,649	10,793
	3	3,540	88,63	7857,143	11,280	
7	1	3,500	89,28	7857,143	11,363	
	2	3,600	88,92	7857,143	11,317	11,392
	3	3,570	90,32	7857,143	11,495	
28	1	3,700	102,570	7857,143	13,054	
	2	3,540	112,190	7857,143	14,279	13,838
	3	3,680	111,430	7857,143	14,182	

Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Ambient Curing*; 10M

Umur (Hari)	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
3	1	3,530	149,940	7857,143	19,083	
	2	3,600	110,110	7857,143	14,014	15,397
	3	3,600	102,890	7857,143	13,095	
7	1	3,630	134,970	7857,143	17,178	
	2	3,580	102,940	7857,143	13,101	15,832
	3	3,590	135,270	7857,143	17,216	
28	1	3,710	110,690	7857,143	14,088	
	2	3,650	140,94	7857,143	17,938	16,391
	3	3,640	134,73	7857,143	17,147	

Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Oven Curing* (90° C); 6M

Umur (Hari)	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
3	1	3,620	181,03	7857,143	23,040	
	2	3,590	158,49	7857,143	20,171	23,495
	3	3,660	214,28	7857,143	27,272	
7	1	3,690	213,95	7857,143	27,230	
	2	3,590	154,23	7857,143	19,629	23,657
	3	3,690	189,45	7857,143	24,112	
28	1	3,720	145,18	7857,143	18,477	
	2	3,780	216,32	7857,143	27,532	23,745
	3	3,740	198,21	7857,143	25,227	

Tabel 7. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Oven Curing* (90° C); 8M

Umur (Hari)	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
3	1	3,710	253,43	7857,143	32,255	
	2	3,570	264,03	7857,143	33,604	31,974
	3	3,640	236,22	7857,143	30,064	
7	1	3,660	319,86	7857,143	40,709	
	2	3,660	209,45	7857,143	26,657	33,226
	3	3,650	253,88	7857,143	32,312	

	1	3,750	197,99	7857,143	25,199	
28	2	3,760	298,46	7857,143	37,986	33,370
	3	3,750	290,13	7857,143	36,926	

Tabel 8. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Oven Curing* (90° C); 10M

Umur (Hari)	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
3	1	3,720	297,17	7857,143	37,822	
	2	3,470	240,65	7857,143	30,628	35,607
	3	3,740	301,49	7857,143	38,371	
7	1	3,520	284,76	7857,143	36,242	
	2	3,770	258,81	7857,143	32,939	35,848
	3	3,780	301,43	7857,143	38,364	
28	1	3,810	301,83	7857,143	38,415	
	2	3,800	347,60	7857,143	44,240	40,514
	3	3,810	305,54	7857,143	38,887	

Tabel 9. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Oven Curing* (120° C); 6M

Umur (Hari)	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
3	1	3,540	143,160	7857,143	18,220	
	2	3,650	127,710	7857,143	16,254	17,154
	3	3,570	133,470	7857,143	16,987	
7	1	3,590	129,18	7857,143	16,441	
	2	3,660	147,040	7857,143	18,714	17,243
	3	3,580	130,230	7857,143	16,575	
28	1	3,750	165,740	7857,143	21,094	
	2	3,710	104,11	7857,143	13,250	17,638
	3	3,740	145,900	7857,143	18,569	

Tabel 10. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Oven Curing* (120° C); 8M

Umur (Hari)	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
3	1	3,590	140,51	7857,143	17,883	
	2	3,640	124,84	7857,143	15,889	17,870
	3	3,620	155,87	7857,143	19,838	

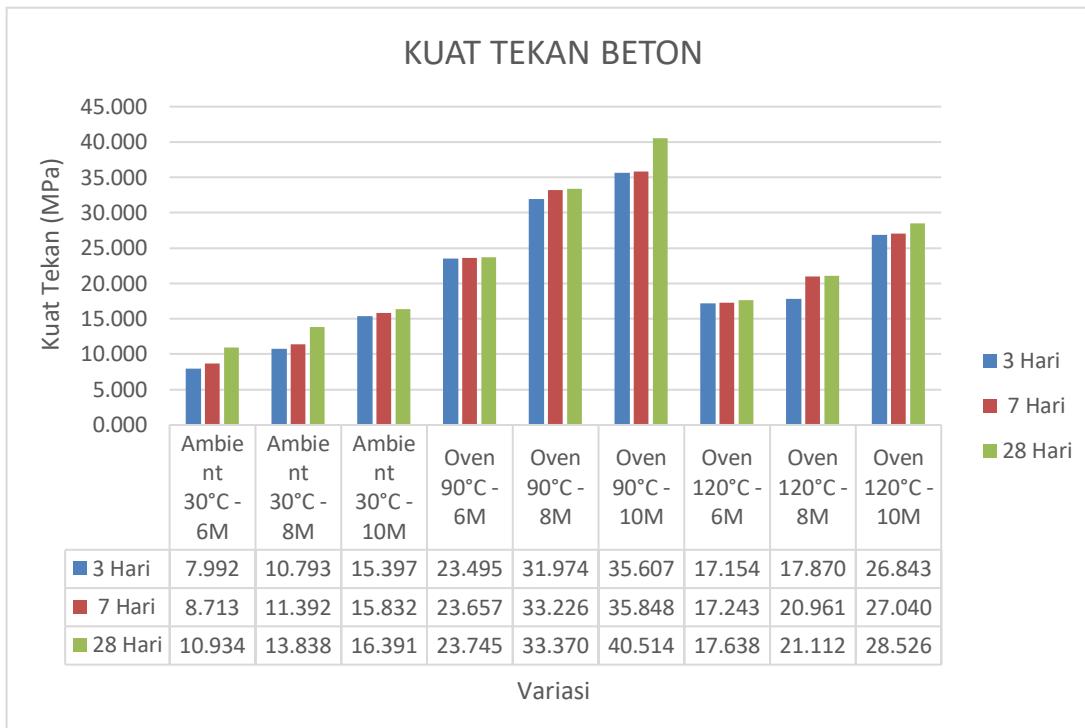
	1	3,640	157,28	7857,143	20,017	
7	2	3,560	173,57	7857,143	22,091	20,961
	3	3,670	163,22	7857,143	20,773	
	1	3,710	138,94	7857,143	17,683	
28	2	3,700	179,28	7857,143	22,817	21,112
	3	3,740	179,43	7857,143	22,837	

Tabel 11. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Oven Curing* (120 °C); 10M

Umur (Hari)	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
	1	3,610	211,23	7857,143	26,884	
3	2	3,610	203,16	7857,143	25,857	26,843
	3	3,640	218,33	7857,143	27,787	
	1	3,680	218,00	7857,143	27,745	
7	2	3,600	214,87	7857,143	27,347	27,040
	3	3,680	204,51	7857,143	26,029	
	1	3,660	217,94	7857,143	27,738	
28	2	3,690	237,13	7857,143	30,180	28,526
	3	3,660	217,34	7857,143	27,661	

Penggunaan larutan NaOH dengan molaritas tinggi dapat mempercepat pengembangan kekuatan awal beton, bahkan tanpa bantuan pemanasan eksternal. Semakin tinggi nilai molaritas NaOH yang digunakan, semakin tinggi juga nilai kuat tekan beton yang dihasilkan. Proses geopolimerisasi terjadi lebih cepat pada suhu yang lebih tinggi [9]. Penggunaan molaritas NaOH juga berpengaruh dalam proses geopolimerisasi dimana semakin tinggi nilai

molaritas NaOH, semakin tinggi juga kuat tekan beton. suhu oven yang terlalu tinggi justru dapat menyebabkan over-curing atau kerusakan mikrostruktur beton geopolimer, sehingga efektivitasnya tidak sebanding dengan peningkatan suhu. Agar analisis dan pemahaman terhadap perkembangan kuat tekan beton pada setiap variasi serta umur beton lebih mudah, data pada tabel sebelumnya disajikan dalam bentuk grafik yang ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer

Berdasarkan gambar 3 terlihat bahwa kuat tekan meningkat seiring bertambahnya umur beton pada semua variasi. Kuat tekan tertinggi tercapai pada perlakuan *oven curing* 90°C dengan larutan NaOH 10M pada umur 28 hari, yaitu 40,514 MPa. Sebaliknya, perlakuan beton dengan *ambient curing* (30°C) menghasilkan kuat tekan paling rendah yaitu 7,992 MPa pada umur 3 hari. Terlihat terjadinya peningkatan kuat tekan beton dari *oven curing* (90°C) dengan molaritas NaOH 10 M terhadap kuat tekan beton dari *ambient curing* dengan molaritas NaOH 10 M sebesar 131,253% di hari ke-3 dan 147,171% di hari ke-28. Terjadi peningkatan juga pada kuat tekan beton dari *oven curing* (120°C) dengan molaritas NaOH 10 M terhadap kuat tekan beton dari *ambient curing* dengan molaritas NaOH 10 M sebesar 74,332% di hari ke-3 dan 74,037% di hari ke-28. Untuk yang menggunakan molaritas NaOH 8M, peningkatan kuat tekan beton dari *oven curing* (90°C) terhadap kuat tekan beton dari *ambient curing* sebesar 196,246% di hari ke-3 dan 141,142% di hari ke-28. Sedangkan kuat tekan beton dari *oven curing* (120°C) terhadap kuat tekan beton dari *ambient curing* mengalami peningkatan sebesar 65,567% di hari ke-3 dan 52,564% di hari ke 28. Untuk yang menggunakan molaritas NaOH 6M, peningkatan kuat tekan beton dari *oven curing* (90°C)

terhadap kuat tekan beton dari *ambient curing* sebesar 193,965% di hari ke-3 dan 117,169% di hari ke-28. Sedangkan kuat tekan beton dari *oven curing* (120°C) terhadap kuat tekan beton dari *ambient curing* mengalami peningkatan sebesar 114,629% di hari ke-3 dan 61,312% di hari ke 28. Jadi, bisa dilihat bahwa kuat tekan beton dengan *oven curing* (90°C) terhadap kuat tekan beton dari *ambient curing* terjadi peningkatan dengan rata-rata sebesar 173,821% di hari ke-3 dan 135,161% di hari ke-28. Sedangkan kuat tekan beton dengan *oven curing* (120°C) terhadap kuat tekan beton dari *ambient curing* terjadi peningkatan dengan rata-rata sebesar 84,843% di hari ke-3 dan 62,638% di hari ke-28.

Hasil ini menunjukkan bahwa perlakuan *oven curing* (120°C) menghasilkan kuat tekan yang tidak lebih tinggi dari perlakuan *oven curing* (90°C), bahkan kuat tekan yang dihasilkan lebih rendah dari semua molaritas. Hal ini menunjukkan bahwa suhu curing memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap percepatan dan hasil akhir proses geopolimerisasi. Geopolimerisasi terjadi lebih cepat pada suhu yang lebih tinggi (Nurruddin, 2018). Perlakuan *oven curing* (120°C) menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan perlakuan *oven curing* (90°C) dikarenakan pada suhu 90°C, terjadi reaksi aktivasi

alkali yang optimal terhadap *fly ash* dimana membentuk ikatan N-A-S-H (*sodium-alumino-silicate hydrate*) yang padat dan kuat. Namun, saat suhu dinaikkan menjadi 120°C, kuat tekan justru menurun, karena penguapan air yang terlalu cepat sehingga menghambat pembentukan gel pengikat dan menimbulkan porositas dalam struktur beton. Suhu curing optimal berada di kisaran 90°C, karena suhu lebih tinggi dapat menyebabkan *over-curing* dan retak mikro akibat hilangnya kelembaban internal [10]. Pada *ambient curing* menghasilkan kuat tekan yang paling lemah dikarenakan proses geopolimerisasi bergantung pada metode pemanasan.

Dari ke-4 grafik di atas juga menunjukkan bahwa molaritas NaOH berperan penting, di mana setiap variasi mengalami peningkatan kuat tekan dari 6M ke 10M dengan rata-rata 32,253% di hari ke-3 dan 44,843% di hari ke-28. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi larutan alkali, semakin besar juga pelarutan silika dan alumina dari *fly ash*, yang memperkaya pembentukan gel geopolimer. Efek molaritas ini paling efektif jika diimbangi dengan suhu curing yang sesuai yang dimana terbukti bahwa pada perlakuan suhu *Oven curing* 120°C, peningkatan molaritas tidak mampu mengimbangi efek negatif dari suhu yang terlalu tinggi. Efek molaritas dan suhu harus saling mendukung untuk mendapatkan hasil maksimal [11].

4 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, berikut merupakan kesimpulan yang dapat diambil pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan pengujian kuat tekan yang telah dilakukan dari berbagai jenis curing, yaitu *ambient curing*, *oven curing* (90°C) dan (120°C), didapatkan hasil tertinggi kuat tekan di metode *oven curing* (90°C) di hari ke-28 yaitu 40,514 MPa dan yang terendah 7,992 MPa pada beton dengan *ambient curing*.
2. Kuat tekan beton dari *ambient curing* ke *oven curing* (90°C) terjadi peningkatan dengan rata-rata sebesar 173,821% di hari ke-3 dan 135,161% di hari ke-28. Untuk kuat tekan beton dari *ambient curing* ke *oven curing* (120°C) terjadi peningkatan dengan rata-rata sebesar 84,843% di hari ke-3 dan 62,638% di hari ke-28. Hasil ini menunjukkan bahwa *oven curing* 90°C memberikan hasil kuat tekan terbaik, sedangkan *ambient curing* menghasilkan kuat tekan terendah.
3. Berdasarkan dari data yang telah di uji, diperoleh bahwa penggunaan molaritas NaOH berperan penting, di mana setiap variasi mengalami peningkatan kuat tekan dari 6M ke 10M dengan rata-rata 32,253% di hari ke3 dan 44,843% di hari ke-28. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan molaritas NaOH yang lebih tinggi, membuat beton geopolimer menjadi lebih cepat keras dan kuat.

Daftar Pustaka

- [1] M. Amin dan S. User, "Pembuatan semen geopolimer ramah lingkungan berbahan baku mineral basal guna menuju lampung sejahtera," vol. 5, pp. 30-45, 2017.
- [2] Ginanjar dan B. Prasetyo, "TINJAUAN KUAT TEKAN BETON GEOPOLYMER DENGAN FLY ASH SEBAGAI BAHAN PENGGANTI SEMEN," pp. 1-3, 2015.
- [3] K. Kumar dan R. Reddy, "A study on the effect of NaOH molarity on flyash based self compacting geopolymer concrete," *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [4] K. Munish, K. Abhishek, S. Dhruv dan M. Mahesh, "Low molarity geopolymers concrete: Effects on compressive strength, elastic modulus, sorptivity and chloride migration," *Construction and Building Materials*, vol. 409, 2023.
- [5] B. Rangan dan D. Hardjito, "Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," *ACI Materials Journal*, pp. 101(6), 467-472, 2014.
- [6] ASTM, "Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," 2019.
- [7] W. D. Pratiwi, "Hubungan Morfologi, Ukuran Partikel dan Keamorfan Fly Ash dengan Kuat Tekan Pasta High-Volume Fly Ash (HVFA) Cement," 2019.
- [8] P. K. Sharma, J. P. Singh dan A. Kumar, "Effect of Particle Size on Physical and Mechanical Properties of Fly Ash Based Geopolymers," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 72, pp. 1323-1337, 2019.
- [9] Nurruddin, "Methods of curing geopolymer concrete: A review," *International Journal of*

ADVANCED AND APPLIED SCIENCES, vol. 5,
pp. 31-36, 2018.

- [10] M. R. Nagral, O. Tejas dan M. V. Chitawadagi,
“Effect of curing temperature and curing hours on
the properties of geo-polymer concrete,”
*International Journal of Computational
Engineering Research*, vol. 4, no. 9, pp. 1-11, 2014.
- [11] S. Mustafa, K. Robin dan K. V. Subramaniam,
“Impact of low NaOH molarities on mechanical and
durability properties of ambient and oven-cured fly
ash geopolymers concrete,” *Journal of Building
Engineering*, vol. 105, 2025.
- [12] D. Pratiwi dan W. , “Hubungan Morfologi, Ukuran
Partikel dan Keamorfan Fly Ash dengan Kuat
Tekan Pasta High-Volume Fly Ash (HVFA)
Cement,” 2019.