

PENGARUH RASIO AGREGAT/BINDER DENGAN PENAMBAHAN *EARLY STRENGTH AGENT* TERHADAP KUAT TEKAN BETON GEOPOLIMER

Zalfa Annisa^{1*}, Bimo B. Adhitya² dan Budi Nayobi³

¹Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

²Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

³Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

*Corresponding author e-mail: zalf4annisa@gmail.com

ABSTRAK: Beton geopolimer merupakan alternatif inovatif terhadap beton konvensional yang mendukung konstruksi berkelanjutan dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi rasio agregat/binder (65:35, 70:30, dan 75:25) dengan penambahan Triethanolamine (TEA) sebagai *early strength agent* (0%, 0,2%, dan 0,4%) terhadap kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar *fly ash*. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 1, 7, 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa baik rasio agregat/binder maupun dosis TEA berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan. Kuat tekan optimal pada umur 1 hari diperoleh pada rasio agregat/binder 65:35 dengan penambahan TEA sebesar 0,4%: 23,59 Mpa. Penggunaan TEA secara efektif mempercepat proses geopolimerisasi dan meningkatkan kekuatan pada usia awal. Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi rasio yang tepat dan penambahan *early strength agent* dapat meningkatkan performa mekanik beton geopolimer, sehingga menjadikannya alternatif yang menjanjikan untuk konstruksi berkelanjutan.

Kata Kunci: beton geopolimer, rasio agregat/binder, *early strength agent*, triethanolamine (TEA), kuat tekan beton.

ABSTRACT: Geopolymer concrete is an innovative alternative to conventional concrete that supports sustainable and environmentally friendly construction. This study aims to determine the effect of varying aggregate-to-binder ratios (65:35, 70:30, and 75:25) with the addition of Triethanolamine (TEA) as an *early strength agent* (0%, 0.2%, and 0.4%) on the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. Compressive strength tests were conducted at 1, 7, and 28 days of age. The results show that both the aggregate-to-binder ratio and the TEA dosage significantly affect compressive strength. The optimal compressive strength at aged 1 day was obtained at a 65:35 aggregate-to-binder ratio with 0.4% TEA addition: 23,59 MPa. The use of TEA effectively accelerated the geopolymerization process and enhanced early-age strength. This research demonstrates that a proper ratio combination and the inclusion of *early strength agents* can improve the mechanical performance of geopolymer concrete, making it a promising alternative for sustainable construction.

Keywords: geopolymer concrete, aggregate-to-binder ratio, *early strength agent*, triethanolamine (TEA), compressive strength

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material utama dalam industri konstruksi karena kemudahan produksinya di lapangan, kekuatan tekan yang tinggi, serta biaya produksinya yang relatif rendah. Namun, penggunaan *Ordinary Portland Cement* (OPC) sebagai bahan utama dalam beton menimbulkan permasalahan lingkungan, karena proses produksinya menghasilkan emisi karbon dalam jumlah besar. OPC menyumbang sekitar 2,4 juta ton CO₂ setiap tahunnya dan berkontribusi terhadap pemanasan global [1]. Selain itu, ketersediaan bahan mentah pembuat semen di

alam semakin terbatas seiring waktu. proses dalam pembuatan OPC yang menghasilkan CO₂.

Sebagai negara yang telah meratifikasi *Kyoto Protocol* melalui UU No. 17 Tahun 2004, Indonesia memiliki komitmen dalam mengurangi emisi gas rumah kaca, salah satunya dengan mendorong riset dan penggunaan teknologi ramah lingkungan di sektor konstruksi. Pasal 2 ayat 1 dari protokol tersebut menyebutkan pentingnya riset dan pengembangan teknologi energi terbarukan dan teknologi lingkungan yang inovatif. Dalam konteks ini, industri konstruksi Indonesia

mulai mencari metode alternatif untuk meningkatkan performa beton sekaligus mengurangi dampak negatif dari penggunaan OPC.

Salah satu alternatif tersebut adalah penggunaan beton geopolimer. Beton geopolimer merupakan beton yang disusun dari bahan anorganik berbasis *alkali aluminosilikat*, menggantikan sebagian atau seluruh kandungan OPC namun tetap mempertahankan bahkan melampaui kinerja durabilitasnya [1]. Dalam hal *mechanical properties* seperti kuat tekan, rasio *Poisson*, dan kuat lentur, beton geopolimer masih mampu menyaingi beton konvensional [1]. Komponen utama dalam beton geopolimer terdiri dari material alkali serta material berbasis silika (Si) dan aluminium (Al), atau *alumino-silicate technology*. Beberapa contoh material aluminosilikat adalah zeolites, glasses, dan gels, namun bahan padat terbukti lebih efektif dalam proses geopolimerisasi dibandingkan bentuk gel atau zeolit.

Salah satu bahan aluminosilikat yang banyak digunakan adalah *fly ash*, yaitu limbah hasil pembakaran batubara yang ringan dan memiliki karakteristik fisik serta kimia yang sesuai untuk digunakan dalam beton [1]. Penggunaan *fly ash* tidak hanya menurunkan biaya produksi beton tetapi juga memberikan manfaat lingkungan dengan mengurangi limbah batubara dan emisi CO₂, sekaligus menjadi metode pembuangan limbah yang aman [2].

Agar beton geopolimer memiliki kekuatan tekan yang memadai pada usia awal (*early age*), perlu diperhatikan proses hidrasi. Pada *early strength*, hidrasi lebih berperan penting dibandingkan *late strength* yang lebih tergantung pada mikrostruktur hasil hidrasi semen [3]. Jika menggunakan *fly ash* yang rendah kandungan kalsium, proses hidrasi menghasilkan *sodium aluminum silicate hydrate* (N-A-S-H) [4]. Suhu rendah dapat menghambat proses ini dan memperlambat perkembangan kekuatan beton [5].

Adapun penelitian yang dilakukan dengan membandingkan metode *ambient curing* dan *oven curing* pada beton geopolimer berbasis *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) dan *fly ash* dengan hasil menunjukkan bahwa perlakuan *oven curing* memberikan kuat tekan lebih tinggi (45,1 MPa) dibanding *ambient curing* (43,1 MPa) pada hari ke-28 [6]. Hal ini menandakan bahwa reaksi geopolimerisasi pada suhu rendah tidak berjalan optimal. Oleh karena itu, untuk meningkatkan kekuatan pada usia awal, perlu ditambahkan *admixtures* berupa *early strength agent* yang mempercepat proses geopolimerisasi [5].

Salah satu *early strength agent* yang digunakan adalah *Triethanolamine* (TEA), senyawa *alkanolamin* tingkat rendah. TEA dapat mempercepat waktu ikat beton serta meningkatkan kekuatan awal baik pada mortar maupun beton [7]. Selain itu, TEA juga bisa berfungsi sebagai *chemical admixture* untuk mempercepat waktu ikat maupun mengurangi kebutuhan air [8].

Dalam penelitian terdahulu digunakan tiga variasi rasio agregat terhadap *binder*, yaitu 65:35, 70:30, dan 75:25 [9]. Hasil menunjukkan bahwa rasio 70:30 menghasilkan kuat tekan tertinggi, yaitu 14,72 MPa pada hari ke-28. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar rasio agregat terhadap *binder*, kuat tekan beton cenderung menurun. Oleh karena itu, pemilihan rasio agregat dan *binder* yang optimal sangat penting dalam desain beton geopolimer agar karakteristik mekaniknya sesuai [10].

Penelitian ini akan membahas lebih lanjut mengenai pengaruh rasio agregat:*binder* dengan penambahan TEA sebagai *early strength agent* terhadap nilai kuat tekan beton geopolimer, serta menentukan nilai optimum dari sifat mekaniknya.

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.

Pengujian ini menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan dimensi 10x20 cm dengan proporsi campuran yang digunakan mengacu pada hasil studi dan penelitian-penelitian sebelumnya. Adapun proporsi campuran yang akan digunakan dapat dilihat pada Tabel 1. Tabel 1. Proporsi campuran beton geopolimer

Agregat kasar : Agregat halus	70:30
AA/FA	0,45
Na ₂ SiO ₃ : NaOH	5:2

Dalam menyusun perencanaan campuran beton (*Job Mix Design*) disesuaikan dengan penelitian-penelitian terdahulu. Variasi rasio agregat:binder (65:35, 70:30, dan 75:25) [9] serta penambahan *Triethanolamine* (TEA) sebagai *early strength agent* sebesar 0%, 0,2%, dan 0,4% dari massa *fly ash* [11]. Bahan utama yang digunakan adalah *fly ash* sebagai binder, agregat kasar dan halus, serta larutan alkali aktivator (NaOH 14 M dan Na₂SiO₃ dengan rasio 2:5) [12]. Proses pembuatan beton dimulai dari persiapan dan penimbangan material, pencampuran menggunakan *concrete mixer*, pengecoran ke dalam cetakan silinder, pemadatan bertahap, kemudian dilakukan *curing* dalam oven pada suhu 90°C selama 24 jam dan dilanjutkan dengan *wrap curing*. Pengujian kuat tekan

dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) pada usia beton 1, 7, dan 28 hari untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi rasio agregat:binder dan TEA terhadap sifat mekanik beton geopolimer. *Job Mix Design* (JMD) untuk satu sampel benda uji dapat dilihat pada Tabel 2.

Dalam penyusunan *Job mix Design* (JMD) beton geopolimer dalam penelitian ini disusun berdasarkan penyesuaian antara proporsi campuran pada Tabel 1 terhadap ukuran benda uji yang digunakan. Penyesuaian ini dilakukan agar jumlah dan susunan bahan material sesuai dengan kebutuhan cetakan silinder 10x20 cm, sehingga hasil pengujian kuat tekan dapat menggambarkan kinerja campuran dengan tepat.

Tabel 2. *Job Mix Design* (JMD) Untuk 1 Sampel

Perbandingan Agregat : Binder	Agregat		<i>Fly Ash</i> (kg)	Alkali Aktivator (kg)	TEA (kg)		
	Kasar (kg)	Halus (kg)			0%	0.2%	0.4%
65 : 35	1.844	0.790	0.871	0.392	-	0.0017	0.0035
70 : 30	1.984	0.850	0.748	0.337	-	0.0015	0.0030
75 : 25	2.127	0.911	0.623	0.280	-	0.0012	0.0024

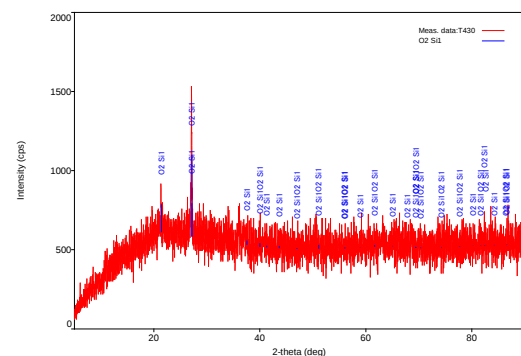
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

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 2 θ 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 2 θ sebesar 27,14°. Fase kristal paling tinggi pada *fly ash* yang digunakan adalah kristal SiO₂, sehingga *fly ash* memiliki kandungan SiO₂ 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% [13]. Adapun hasil pengujian XRF dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian XRF

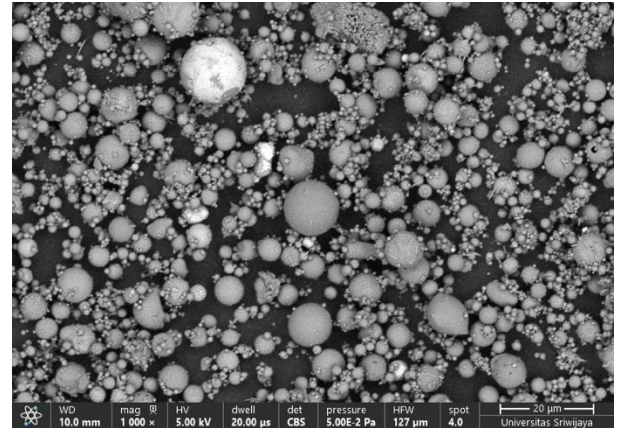
Komposisi Kimia	Jumlah (%)
SiO_2	50.513
Al_2O_3	22.944
Fe_2O_3	11.298
CaO	4.927
Na_2O	4.472
MgO	1.853
SO_3	1.526
K_2O	1.369
TiO_2	0.837
P_2O_5	0.174
Mn_3O_4	0.070

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 aktivator 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 keamorfian *fly ash* yang semakin tinggi dan semakin reaktif sehingga akan memberikan kontribusi kuat tekan dari reaksi pozzolanik *fly ash* [14]. 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 [15].

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 1 hari, 7 hari, dan 28 hari:

Tabel 4. Hasil pengujian kuat tekan beton agregat:binder 65:35 TEA 0%

Umur	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	1	3,61	137,09	7857,143	17,45	17,92
	2	3,63	138,78	7857,143	17,66	
	3	3,53	146,53	7857,143	18,65	
7	1	3,69	184,13	7857,143	23,43	30,36
	2	3,67	266,5	7857,143	33,92	
	3	3,61	264,96	7857,143	33,72	
28	1	3,65	370,45	7857,143	47,15	45,09
	2	3,64	310,01	7857,143	39,46	
	3	3,65	382,46	7857,143	48,68	

Tabel 5. Hasil pengujian kuat tekan beton agregat:binder 65:35 TEA 0,2%

Umur	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	1	3,60	151,61	7857,143	19,30	18,90
	2	3,58	143,44	7857,143	18,26	
	3	3,57	150,51	7857,143	19,16	
7	1	3,61	168,39	7857,143	21,43	21,83
	2	3,60	175,66	7857,143	22,36	
	3	3,64	170,41	7857,143	21,69	
28	1	3,66	185,83	7857,143	23,65	23,29
	2	3,65	176,75	7857,143	22,50	
	3	3,62	186,42	7857,143	23,73	

Tabel 6. Hasil pengujian kuat tekan beton agregat:binder 65:35 TEA 0,4%

Umur	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	1	3,61	161,45	7857,143	20,55	23,59
	2	3,50	218,93	7857,143	27,86	
	3	3,62	175,63	7857,143	22,35	
7	1	3,62	182,25	7857,143	23,20	24,27
	2	3,62	203,97	7857,143	25,96	
	3	3,60	185,75	7857,143	23,64	
28	1	3,69	229,56	7857,143	29,22	29,24
	2	3,67	249,19	7857,143	31,72	

3	3,66	210,56	7857,143	26,80
---	------	--------	----------	-------

Tabel 7. Hasil pengujian kuat tekan beton agregat:binder 70:30 TEA 0%

Umur	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	1	3,61	98,47	7857,143	12,53	12,78
	2	3,60	104,92	7857,143	13,35	
	3	3,66	97,88	7857,143	12,46	
7	1	3,78	151,44	7857,143	19,27	18,35
	2	3,67	142,71	7857,143	18,16	
	3	3,66	138,45	7857,143	17,62	
28	1	3,75	308,22	7857,143	39,23	37,63
	2	3,70	298,55	7857,143	38,00	
	3	3,71	280,32	7857,143	35,68	

Tabel 8. Hasil pengujian kuat tekan beton agregat:binder 70:30 TEA 0,2%

Umur	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	1	3,66	124,06	7857,143	15,79	16,20
	2	3,70	135,22	7857,143	17,21	
	3	3,62	122,67	7857,143	15,61	
7	1	3,73	185,34	7857,143	23,59	21,82
	2	3,72	160,47	7857,143	20,42	
	3	3,71	168,45	7857,143	21,44	
28	1	3,71	178,89	7857,143	22,77	27,50
	2	3,75	280,6	7857,143	35,71	
	3	3,72	188,76	7857,143	24,02	

Tabel 9. Hasil pengujian kuat tekan beton agregat:binder 70:30 TEA 0,4%

Umur	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	1	3,68	126,64	7857,143	16,12	20,38
	2	3,65	172,42	7857,143	21,94	
	3	3,69	181,22	7857,143	23,06	
7	1	3,70	262,08	7857,143	33,36	22,88
	2	3,70	93,79	7857,143	11,94	

	3	3,67	183,52	7857,143	23,36	
	1	3,68	218,64	7857,143	27,83	
28	2	3,75	280,24	7857,143	35,67	29,41
	3	3,73	194,37	7857,143	24,74	

Tabel 10. Hasil pengujian kuat tekan beton agregat:binder 75:25 TEA 0%

Umur	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	1	3,65	86,53	7857,143	11,013	11,790
	2	3,67	95,87	7857,143	12,202	
	3	3,52	95,51	7857,143	12,156	
7	1	3,63	98,93	7857,143	12,591	15,373
	2	3,74	134,99	7857,143	17,181	
	3	3,72	128,45	7857,143	16,348	
28	1	3,69	213,24	7857,143	27,140	28,261
	2	3,67	217,08	7857,143	27,628	
	3	3,73	235,83	7857,143	30,015	

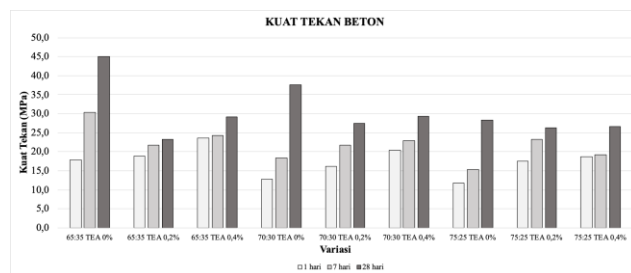
Tabel 11. Hasil pengujian kuat tekan beton agregat:binder 75:25 TEA 0,2%

Umur	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	1	3,72	176,94	7857,143	22,52	17,57
	2	3,64	124,31	7857,143	15,82	
	3	3,62	112,83	7857,143	14,36	
7	1	3,66	171,31	7857,143	21,80	23,31
	2	3,63	211,86	7857,143	26,96	
	3	3,7	166,24	7857,143	21,16	
28	1	3,73	234,75	7857,143	29,88	26,26
	2	3,72	213,07	7857,143	27,12	
	3	3,71	171,16	7857,143	21,78	

Tabel 12. Hasil pengujian kuat tekan beton agregat:binder 75:25 TEA 0,4%

Umur	Benda uji	Berat (kg)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	1	3,61	135,73	7857,143	17,27	18,77
	2	3,73	155,92	7857,143	19,84	
	3	3,72	150,81	7857,143	19,19	
7	1	3,75	114,08	7857,143	14,52	19,18
	2	3,72	170,45	7857,143	21,69	
	3	3,74	167,58	7857,143	21,33	
28	1	3,74	202,76	7857,143	25,81	26,66
	2	3,76	223,89	7857,143	28,50	
	3	3,74	201,87	7857,143	25,69	

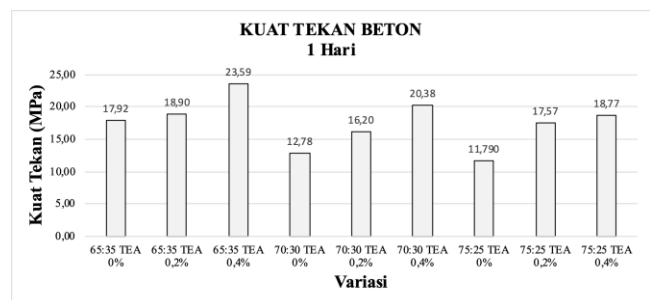
Rasio agregat terhadap binder mempengaruhi nilai kuat tekan yang dihasilkan. Hal ini terlihat dari hasil pengujian kuat tekan yang terlampir dari Tabel 4. hingga Tabel 12. Variasi optimal berada pada Tabel 6. dengan variasi 65:35 penambahan TEA 0,4% memiliki nilai kuat tekan pada usia 1 hari 23,59 Mpa. Kinerja penambahan TEA terhadap variasi agregat:binder berpengaruh juga terhadap nilai kuat tekan dihasilkan. Untuk mempermudah pemahaman dan analisis perkembangan kekuatan beton pada masing-masing variasi dan umur beton, data pada tabel di atas tersebut disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengujian kuat tekan beton

Berdasarkan Gambar 4 perkembangan *early strength* beton mengalami kenaikan saat komposisi binder yang digunakan semakin tinggi. Hal ini dialami serupa dalam penelitian Adi dkk. (2018) yang menyatakan bahwa semakin banyak komposisi binder yang digunakan pada campuran beton maka semakin tinggi kuat tekan beton yang didapat [16]. Hal ini dikarenakan semakin banyak kandungan silika dan alumina yang bereaksi dengan alkali aktivator dalam proses geopolimerisasi untuk membentuk

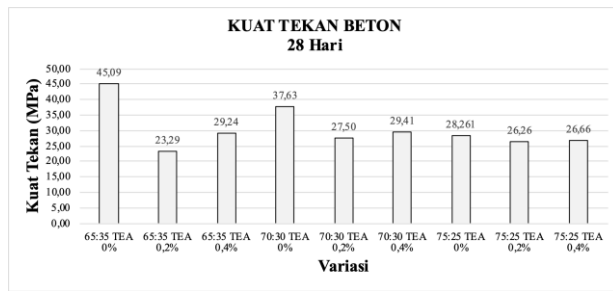
ikatan kristal antara Si dan Al sehingga menghasilkan perkembangan nilai kuat tekan yang lebih optimal.



Gambar 5. Hasil pengujian kuat tekan beton pada usia 1 hari

Penggunaan TEA pada beton terbukti mempercepat pertumbuhan pada usia awal beton tetapi, tidak semua variasi termasuk ke dalam *high early strength concrete* (HESC). *High Early Strength Concrete* (HESC) merupakan beton yang mencapai nilai kuat tekan minimal 20 Mpa pada usia 24 jam [17]. Untuk mendapatkan *high early strength concrete* (HESC) dapat dilakukan dengan penambahan *additives* dan material *pozzolans* pada campuran beton [18] seperti pada penelitian ini, yaitu penambahan: TEA. Pada penelitian ini terdapat 2 variasi yang tergolong pada *high early strength concrete* (HESC), yaitu: variasi 65:35 TEA 0,4% (23,59 Mpa) dan variasi 70:30 TEA 0,4% (20,38 Mpa). Pertumbuhan nilai kuat tekan pada usia yang cepat diakibatkan adanya TEA yang mempercepat peleburan *metal ions* saat proses geopolimerisasi [19], mempercepat reaksi alumina

sehingga mempercepat setting time beton, dan membantu membentuk mikrostruktur beton pada usia awal beton [11]



Gambar 6. Hasil pengujian kuat tekan beton pada usia 28 hari

Pada Gambar 6 juga menunjukkan bahwa penambahan TEA ini tidak memberikan efek tambahan lanjutan terhadap perkembangan nilai kuat tekan lanjut khususnya pada usia beton 28 hari. Perilaku ini dialami oleh seluruh variasi jika dibandingkan dengan tanpa penambahan TEA. Hal serupa juga dialami oleh dengan menggunakan TEA 0,1% pada usia 1 dan 28 hari: 12 Mpa dan 43 Mpa, sedangkan untuk beton *fly ash* tanpa penambahan TEA pada usia 1 dan 28 hari: 8 Mpa dan 52 Mpa [20]. Fenomena ini terjadi karena TEA lebih efektif bekerja pada usia awal beton yang lebih mempercepat penyerapan C_3S , C_3A , $C-S-H$, CH , dan mineral-mineral lainnya [21]. TEA mempercepat proses peleburan *fly ash* yang membentuk senyawa Al^{3+} , senyawa ini terlalu ‘berpartisipasi’ dalam proses geopolimerisasi dalam membentuk gel, sehingga menghambat hasil *skeleton* lebih lanjut (*gel phase*, hasil proses geopolimerisasi) [19].

Dapat disimpulkan bahwa pengaruh agregat:binder berpengaruh pada nilai kuat tekan yang dihasilkan. Semakin besar nilai perbandingan agregat:binder maka semakin kecil pula nilai kuat tekan yang dihasilkan. Nilai perbandingan agregat:binder ini pula berpengaruh pada kinerja TEA. Semakin kecil nilai perbandingan agregat:binder maka semakin efektif pula hasil kerja dari TEA pada usia awal beton. Tetapi penggunaan TEA tidak memberikan efek tambahan pada perkembangan kuat tekan lanjutan. Fenomena ini perlu dikaji lebih lanjut.

Berdasarkan data kuat tekan beton geopolimer campuran dengan variasi 65:35 TEA 0,4% memberikan kuat tekan awal tinggi (23,59 MPa pada 1 hari), variasi ini cocok untuk percepatan pekerjaan pada pembongkaran bekisting dini atau komponen pracetak. Beton ini merupakan beton geopolimer yang memerlukan proses *curing* khusus, yaitu pemanasan suhu tinggi, maka penggunaannya terbatas pada sistem pracetak (*precast*)

Oleh karena itu, penerapannya di lapangan harus mempertimbangkan sistem produksi terkontrol di pabrik dan transportasi elemen ke lokasi proyek.

4. KESIMPULAN

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

1. Rasio agregat:binder mempengaruhi sifat mekanik beton dan kinerja TEA yang dihasilkan baik pada usia awal beton maupun usia 28 hari. Semakin besar nilai perbandingan agregat:binder maka semakin kecil pula nilai kuat tekan yang dihasilkan. Penurunan terjadi 28,58% (5,14 MPa) pada variasi 70:30 dan 34,21% pada variasi 75:25 (6,13 MPa) dibandingkan dengan variasi 65:35 tanpa penambahan TEA. TEA bekerja sesuai dengan dosis dan rasio agregat:binder. Semakin kecil nilai perbandingan agregat:binder maka semakin efektif pula hasil kerja dari TEA pada usia awal beton dan semakin besar dosis TEA yang digunakan maka semakin besar pula kenaikan umur beton pada usia awal. Pada penambahan TEA 0,4%: variasi 65:35 23,59 Mpa; variasi 70:30 20,38 Mpa; dan variasi 75:25 18,77 Mpa pada usia beton 1 hari, sedangkan pada penambahan TEA 0,2%: variasi 65:35 18,90 Mpa; variasi 70:30 16,20 Mpa; dan variasi 75:25 17,57 Mpa.
2. Nilai optimum dari pengujian ini adalah variasi agregat:binder 65:35 TEA 0,4% dengan memiliki nilai *early strength* yang paling optimal yaitu 23,59 Mpa.
3. Penambahan TEA mempercepat pertumbuhan nilai kuat tekan pada usia 1 hari. Pada penambahan TEA 0,2% pertumbuhan nilai kuat tekan rata-rata mencapai hingga 69% dari nilai kuat tekan pada usia 28 hari. Sedangkan untuk penambahan TEA 0,4% pertumbuhan nilai kuat tekan rata-rata mencapai 73% dari nilai kuat tekan pada usia 28 hari.

Daftar Pustaka

- [1] R. S. S. Ranasinghe dkk., “Eco-friendly mix design of slag-ash-based geopolymers concrete using explainable deep learning,” *Results Eng.*, vol. 23, no. May, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102503.
- [2] O. J. Olatoyan, M. A. Kareem, A. U. Adebajo, S. O. A. Olawale, dan K. T. Alao, “Potential use of

- biomass ash as a sustainable alternative for fly ash in concrete production: A review,” *Hybrid Adv.*, vol. 4, no. June, hal. 100076, 2023, doi: 10.1016/j.hybadv.2023.100076.
- [3] H. Liu, S. P. Cui, J. F. Wang, S. G. Yang, X. L. Wang, dan C. W. Liu, “Influence of triethanolamine on strength development and hydration of cementitious systems blended with titanium slag,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 898 MSF, no. 18, hal. 1984–1989, 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.898.1984.
- [4] B. Zhang, “Durability of low-carbon geopolymer concrete: A critical review,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 40, no. March, 2024, doi: 10.1016/j.susmat.2024.e00882.
- [5] T. dkk. Chen, “1.4 3 Early Strength Agent.pdf,” 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csm.2022.e01419>.
- [6] K. K. Poloju dan K. Srinivasu, “Impact of GGBS and strength ratio on mechanical properties of geopolymer concrete under ambient curing and oven curing,” *Mater. Today Proc.*, vol. 42, hal. 962–968, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.934.
- [7] Z. Lu dkk., “Towards a further understanding of cement hydration in the presence of triethanolamine,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 132, no. December 2019, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106041.
- [8] J. Han, K. Wang, J. Shi, dan Y. Wang, “Mechanism of triethanolamine on Portland cement hydration process and microstructure characteristics,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, hal. 457–462, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.018.
- [9] A. Kurniawan, G. Yanti, dan S. W. Megasari, “Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Pemanfaatan Limbah Fly Ash,” *Pros. SENKIM Semin. Nas. Karya Ilm. Multidisiplin*, vol. 2, no. 1, hal. 189–194, 2022.
- [10] R. Arellano-Aguilar, O. Burciaga-Díaz, A. Gorokhovsky, dan J. I. Escalante-García, “Geopolymer mortars based on a low grade metakaolin: Effects of the chemical composition, temperature and aggregate:binder ratio,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, hal. 642–648, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.023.
- [11] Z. Lu, X. Peng, T. Dorn, T. Hirsch, dan D. Stephan, “Early performances of cement paste in the presence of triethanolamine: Rheology, setting and microstructural development,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 138, no. 31, hal. 1–13, 2021, doi: 10.1002/app.50753.
- [12] M. Verma dan N. Dev, “Sodium hydroxide effect on the mechanical properties of flyash-slag based geopolymer concrete,” *Struct. Concr.*, vol. 22, no. S1, hal. E368–E379, 2021, doi: 10.1002/suco.202000068.
- [13] ASTM, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use,” Annual Book of ASTM Standards.
- [14] W. D. Pratiwi, “Hubungan Morfologi , Ukuran Partikel dan Keamorfian Fly Ash dengan Kuat Tekan Pasta,” Seminar Nasional MASTER 2019. Maritim, Sains dan Teknologi Terapan. [Daring]. Tersedia pada: <https://journal.ppns.ac.id/index.php/SeminarMASTER/article/view/1316/946>
- [15] A. Sharma dan J. Ahmad, “Experimental Study of Factors Influencing Compressive Strength of Geopolymer Concrete,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 5, hal. 1306–1313, 2017, [Daring]. Tersedia pada: <https://www.irjet.net/archives/V4/i5/IRJET-V4I5253.pdf>
- [16] M. M. Adi, B. Burhanuddin, dan D. Darwis, “Pengaruh Rasio Agregat Binder Terhadap Prilaku Mekanik Beton Geopolimer Dengan Campuran Abu Sekam Padi Dan Abu Ampas Tebu,” *Teras J.*, vol. 7, no. 1, hal. 163, 2018, doi: 10.29103/tj.v7i1.109.
- [17] P. Ananyachandran dan V. Vasugi, “Development of a sustainable high early strength concrete incorporated with pozzolans, calcium nitrate and triethanolamine: An experimental study,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 54, no. November, hal. 102857, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102857.
- [18] P. Ananyachandran dan V. Vasugi, “Development of a sustainable high early strength concrete incorporated with pozzolans, calcium nitrate and triethanolamine: An experimental study,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 54, no. May, hal. 102857, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102857.
- [19] W. Feng, Y. Jin, D. Zheng, Y. Fang, Z. Dong, dan H. Cui, “Study of triethanolamine on regulating early strength of fly ash-based chemically foamed geopolymer,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 162, no. May, hal. 107005, 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.107005.
- [20] Y. R. Zhang dkk., “Influence of triethanolamine on the hydration product of portlandite in cement paste and the mechanism,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 87, hal. 64–76, 2016, doi: 10.1016/j.cemconres.2016.05.009.