

Optimalisasi penggunaan pasir besi sebagai pengganti agregat halus dalam campuran beton mutu tinggi

Bangkit Aryoputro Firjatullah¹, Mochamad Teguh^{2,*}, Elvis Saputra³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

Article Info

Article history:

Received: May 25, 2022
Revised: May 31, 2022
Accepted: May 31, 2022
Available online:
Jun 15, 2022

Keywords:

Iron sand
Concrete characteristic
High-strength concrete

Abstract

Infrastructure progress needs to be supported by the development of research on construction material technology, one of which is concrete technology. With its various advantages, concrete is continuously used to solve infrastructure problems. However, it also impacts the use of large-scale materials and has the potential to deplete natural resources if not handled properly. One material that can be used as an alternative is iron sand. Iron sand is a mineral resource with magnesium content and has characteristics as a substitute for fine aggregate in concrete mixes. This study aimed to determine the effect of iron sand as a substitute for fine aggregate in high-strength concrete mixtures. This research method was a laboratory experiment by testing the characteristics of high-strength concrete, namely compressive strength, tensile strength, and modulus of elasticity. This study found that the optimum concrete compressive strength occurred in the V-02 sample with 51.71 MPa from the design compressive strength (f_{cr}) = 45 MPa. The optimum tensile strength test happened in the V-02 sample with a result of 4.13 MPa, and the optimum elasticity modulus test occurred in the V-02 sample producing 28684.37 MPa

Corresponding author:

Mochamad Teguh
m.teguh@uii.ac.id

Copyright © 2022 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Kemajuan infrastruktur perlu didukung dengan perkembangan penelitian tentang teknologi bahan konstruksi salah satunya yakni teknologi beton. Beton merupakan komponen struktur yang berperan dalam menopang beban-beban yang bekerja di atasnya. Keunggulan beton dalam kuat tekan dan mudah didapat menyebabkan beton terus-menerus digunakan sebagai solusi permasalahan infrastruktur. Hal tersebut juga berdampak pada penggunaan material berskala besar dan berpeluang menghabiskan sumber daya alam jika tidak ditanggulangi dengan baik. Salah satu material yang bisa dijadikan alternatif adalah pasir besi. Pasir besi merupakan sumber daya mineral di Indonesia dengan kandungan Magnesium (Mg) dan memiliki karakteristik sebagai pengganti agregat halus pada campuran beton.

Kandungan ini mampu memperbaiki ikatan antara semen dengan agregat kasar dan mampu meningkatkan kualitas beton seperti kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitasnya.

Penelitian mengenai beton telah banyak dilakukan oleh peneliti di masa lampau seperti Rafii dan Hakim (2000), Gunawan dan Setiono (2010), Prahara, *et al* (2015), Haqqi (2016), Pratama (2018), Rochmawati dan Widiati (2019), dan lain-lain. Penelitian ini membahas tentang upaya meningkatkan mutu beton melalui kombinasi campuran dengan material yang memiliki karakteristik baik untuk meningkatkan mutu beton, yaitu penggunaan pasir besi. Haqqi (2016) melakukan pengujian beton menggunakan campuran pasir besi dan pasir silika untuk menguji permeabilitas beton pada umur 28 hari. Pratama (2018) melakukan penelitian

pengujian beton menggunakan campuran pasir besi untuk menentukan kuat tarik dan kuat tekan. Dari beberapa penelitian terdahulu masih sedikit yang menyinggung bagaimana karakteristik pasir besi jika direncanakan dalam campuran beton mutu tinggi. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan pengaruh pasir besi sebagai pengganti agregat halus dalam campuran beton mutu tinggi.

Dengan garis pantai yang sangat panjang, Indonesia memiliki total sumber daya pasir besi sebesar 4280 juta ton dan cadangan 750 juta ton dengan derajat kemagnetan endapan pasir 65% dan kandungan Fe mencapai 45% (KemenESDM, 2018). Pasir besi terdiri dari mineral Sungai Opak yang bercampur dengan butiran-butiran non-logam seperti *kuarsa*, *kalsit*, *feldspar*, *amphibole*, *piroksen*, *biotit*, dan *tourmaline*. Kandungan besi yang terdapat pada endapan pasir utama adalah mineral tetanomagnetik dan terdiri dari butir-butir pasir dengan diameter antara 0,074 - 0,075 mm (butiran halus), dan 3-5 mm (butiran kasar) (Hilman, 2014). Pasir ini mempunyai kandungan Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO yang mempunyai karakteristik untuk digunakan sebagai pengganti agregat halus dalam memproduksi beton bermutu tinggi. Menurut Pratama (2018) karakteristik beton dapat ditingkatkan secara optimal dengan melakukan substitusi pasir besi sebagai agregat halus dengan komposisi material 80%. Kuat tekan yang dihasilkan mampu mencapai 32,942 MPa dari kuat tekan rencana 25 MPa. Dalam penelitian ini diterapkan 3 jenis variasi campuran pasir besi yakni 60%, 70%, dan 80%, serta 1 variasi kontrol (0%). Variasi tersebut menggambarkan seberapa banyak substitusi pasir besi terhadap agregat halus dalam suatu *mix-design*. Nilai kuat tekan yang direncanakan (f_{cr}) = 45 MPa pada tiap *mix-design* dengan penambahan bahan tambah *silica fume* dan *superplasticizer*. Penggunaan *silica fume* dalam campuran beton dimaksud-

kan untuk menghasilkan beton dengan mutu tinggi, sedangkan *superplasticizer* berfungsi memberikan efek *high water reducing*, karena beton mutu tinggi berbanding lurus dengan pengurangan faktor air semen (FAS) (Fitriani dan Pungky, 2018). Penggunaan *superplasticizer* memberi dampak positif pada campuran dengan FAS yang kecil agar meningkatkan kelecakan dan *workability* dari campuran beton tersebut, sehingga tidak menimbulkan permasalahan pada proses pemadatan seperti hasil beton yang keropos dan tidak homogen.

Metode penelitian

Material penyusun

Material-material penyusun yang digunakan dalam campuran beton mutu tinggi pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Material penyusun campuran beton

Material	Keterangan
Semen <i>portland</i>	Semen dengan berat jenis 3.15 kg/m^3 .
Air	Cairan jernih untuk mengaktifkan reaksi kimiawi dari semen <i>portland</i> .
Agregat kasar	Ukuran butir antara 4,75–40 mm.
Agregat halus	Ukuran butir lebih kecil dari 4,75 mm.
<i>Silica fume</i>	Material yang berfungsi untuk mengisi rongga pada permukaan agregat.
Pasir besi	Material dengan kandungan partikel <i>magnetit</i> .
<i>Superplasticizer</i>	Cairan kental yang berfungsi untuk meningkatkan <i>workability</i> dan mempermudah pemadatan.

Hasil perencanaan komposisi *mix-design* beton mutu tinggi menggunakan SNI 6468:2000 per satuan m^3 dimuat dalam Tabel 2.

Tabel 2. *Mix-design* beton mutu tinggi

No.	Material	Nilai	Satuan
1	Semen portland	575,4	kg
2	Agregat halus	635,5	kg
3	Agregat kasar	979,9	kg
4	Air	220,9	kg

Tabel 3. Hasil *mix-design* kebutuhan total material beton mutu tinggi per-m³

No.	Kode	Semen (kg)	Silica fume (10%) (kg)	Air (kg)	Kerikil (kg)	Pasir (kg)	Super-plasticizer (0,9%) (kg)	Pasir besi	
								(kg)	(%)
1	N-00	518	58	221	980	613	5	0	0
2	V-01	518	58	221	980	245	5	368	60
3	V-02	518	58	221	980	184	5	429	70
4	V-03	518	58	221	980	123	5	490	80

Komposisi campuran beton mutu tinggi pada Tabel 2 dikalikan dengan persentase rencana *silica fume* dan pasir besi, sehingga diperoleh hasil *mix design* akhir seperti yang disajikan pada Tabel 3.

Metode pengujian

Metode penelitian ini merupakan eksperimen laboratorium yang diawali dengan pemeriksaan kelayakan material penyusun campuran beton yaitu agregat kasar, agregat halus, semen dan material tambahan lainnya. Setelah material penyusun memenuhi persyaratan campuran, dilanjutkan dengan pembuatan *mix design*, pencetakan benda uji, dan perawatan benda uji. Setelah benda uji mencapai umur 28 hari dilakukan pengujian karakteristik beton yaitu uji kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitas.

Standar-standar yang dijadikan acuan dalam pemeriksaan kelayakan material penyusun campuran beton yaitu SNI 1670:2008 untuk pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus dan SNI 1696:2008 untuk pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar. Sedangkan standar yang dijadikan acuan dalam merancang campuran beton yaitu SNI 6468:2000. Adapun standar yang digunakan untuk menguji karakteristik beton yaitu kuat tekan (SNI 1974-2011), kuat tarik belah (SNI 03-2491-2014), dan Modulus Elastisitas (SNI 2826-2008).

Variasi benda uji yang diterapkan dalam penelitian ini adalah substitusi pasir besi terhadap agregat halus sebanyak 0%, 60%, 70%, dan 80% dengan besaran masing-masing jumlah benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rincian benda uji

Kode	Komposisi kandungan pasir besi	Jumlah benda uji		
		Kuat tekan	Kuat tarik	Modulus elastisitas
N-00	0%	5	5	5
V-01	60%	5	5	5
V-02	70%	5	5	5
V-03	80%	5	5	5

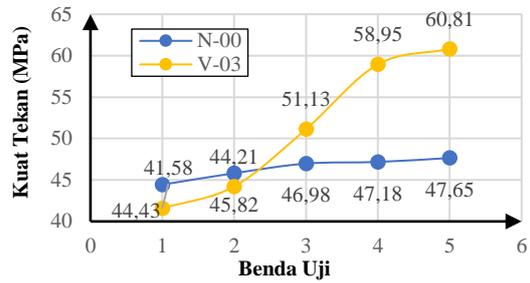
Hasil dan pembahasan

Pengujian kuat tekan beton

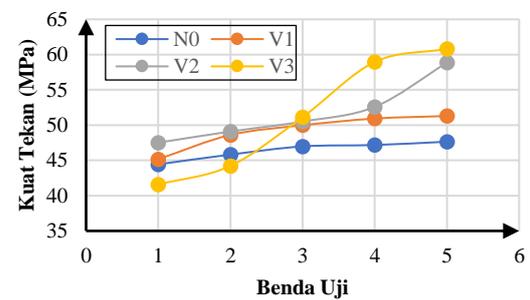
Pengujian kuat tekan beton dilakukan untuk mengukur kemampuan benda uji dalam menerima beban yang bekerja di atasnya. Pengujian ini dilakukan pada sampel benda uji silinder berumur 28 hari dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian dilakukan menggunakan alat desak *Compression Testing Machine* (CTM) dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5. Dari tabel tersebut diketahui bahwa beton variasi V-01, V-02, dan V-03 memiliki nilai kuat tekan rata-rata yang lebih tinggi daripada beton tanpa pasir besi. Benda uji dengan nilai kuat tekan tertinggi terdapat pada beton V3-04 = 60,81 MPa, dan V3-05 = 58,95 MPa. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu oleh Agus (2019) yang menyatakan bahwa nilai kuat tekan beton mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya komposisi substitusi pasir besi. Perbedaan dengan penelitian tersebut adalah jumlah persentase yang digunakan yaitu 5%, 10%, dan 15%, tetapi secara *trend* menunjukkan pola yang sama. Komparasi hasil kuat tekan beton normal dengan variasi pasir besi dapat dilihat pada Gambar 2 sampai Gambar 5.

Tabel 5. Hasil kuat tekan benda uji

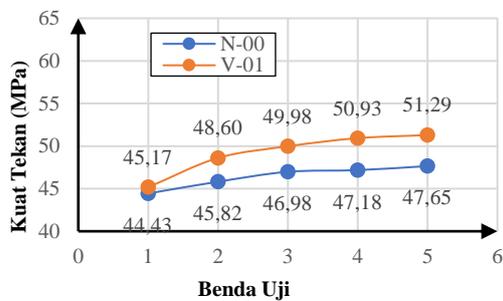
Kode benda uji	Luas (mm ²)	Beban maksimum (kN)	Kuat tekan (MPa)	
			Unit	Rerata
N-00-01	17986,328	845	46,980	
N-00-02	17678,571	810	45,818	
N-00-03	17891,351	795	44,435	46,41
N-00-04	18153,143	865	47,650	
N-00-05	18440,903	870	47,178	
V-01-01	17796,64	865	48,605	
V-01-02	17867,64	910	50,930	
V-01-03	18153,14	820	45,171	49,20
V-01-04	17607,93	880	49,977	
V-01-05	18033,91	925	51,292	
V-02-01	18513,2	935	50,505	
V-02-02	17584,41	1035	58,859	
V-02-03	17678,57	840	47,515	51,71
V-02-04	18129,27	890	49,092	
V-02-05	19490,63	1025	52,589	
V-03-01	17678,57	735	41,576	
V-03-02	17867,65	790	44,214	
V-03-03	17796,63	910	51,133	51,34
V-03-04	17678,57	1075	60,808	
V-03-05	17725,75	1045	58,954	



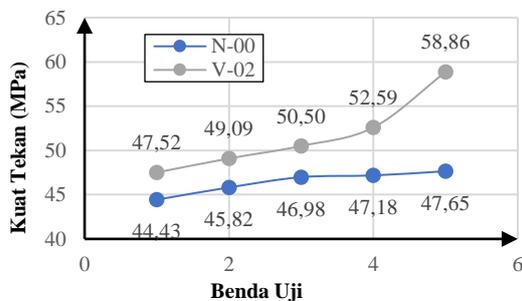
Gambar 4. Komparasi kuat tekan beton beton N-00 dengan beton V-03



Gambar 5. Komparasi kuat tekan beton beton pada semua variasi benda uji



Gambar 2. Komparasi kuat tekan beton N-00 dengan beton V-01

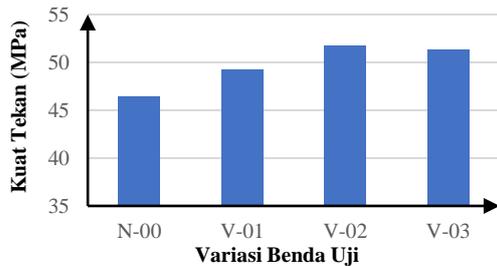


Gambar 3. Komparasi kuat tekan beton normal dengan beton V-02

Berdasarkan Gambar 2 – 5, diketahui bahwa benda uji pasir besi selain beton V-03-01 dan V-03-02 memiliki nilai kuat tekan lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji pasir biasa. Hal ini disebabkan oleh pengaruh pasir besi yang dapat menutup void di dalam campuran beton, sehingga beton memiliki ikatan yang lebih homogen. Pasir besi juga memiliki kandungan magnesium yang mampu memperbaiki proses pengikatan semen saat terhidrasi oleh air. Beton V-03-01 = 41,58 MPa dan V-03-02 = 44,21 MPa memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah dari beton normal meskipun hasil yang diperoleh kedua benda uji tersebut tergolong mutu tinggi (>41,4 MPa). Hal ini disebabkan oleh kurang meratanya adonan beton saat proses pencampuran. Perbandingan kuat rata-rata tekan beton tanpa substitusi pasir besi (N-00) dengan beton substitusi pasir besi (V-01, V-02, dan V-03) dimuat dalam Gambar 5. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa kuat tekan rata-rata yang dimiliki benda uji pada penelitian ini mengalami kenaikan konstan hingga menemui nilai optimum pada variasi V-02 (70%).

Tabel 6. Kenaikan nilai kuat tekan beton

No.	Kode	Kuat tekan (MPa)	Kenaikan (%)
1	N-00	46,41	3,13
2	V-01	49,20	9,33
3	V-02	51,71	14,91
4	V-03	51,34	14,09



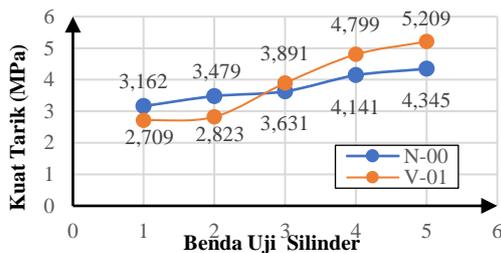
Gambar 6. Hubungan kuat tekan beton dan variasi pasir besi

Berdasarkan Gambar 6 dan Tabel 6, kenaikan nilai kuat tekan maksimum terjadi pada variasi campuran V-02 yaitu substitusi pasir besi terhadap agregat halus 70% dengan kenaikan kuat tekan beton terhadap campuran normal mencapai 14.91%.

Pengujian kuat tarik

Pengujian kuat tarik beton dilakukan untuk menentukan seberapa besar kekuatan tarik optimum yang dapat dihasilkan benda uji menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM). Hasil dari pengujian kuat tarik dapat dilihat pada Tabel 7.

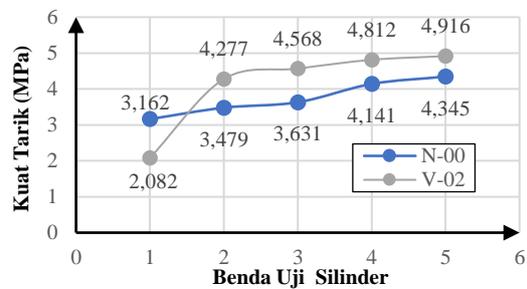
Hasil pengujian kuat tarik benda uji beton pasir besi dibandingkan dengan beton normal. Perbandingan tersebut dilakukan untuk menganalisis selisih nilai kuat tarik antara beton normal dengan beton pasir besi. Selisih tersebut akan digambarkan melalui grafik komparasi hasil kuat tarik beton normal dengan beton pasir besi yang disajikan dalam Gambar 7 – 9.



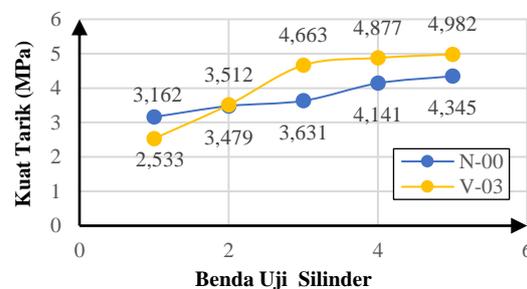
Gambar 7. Komparasi kuat tarik beton N0 dengan beton V1

Tabel 7. Hasil analisis nilai kuat tarik beton

Kode benda uji	Luas (mm ²)	Beban maksimum (kN)	Kuat tarik (MPa)	
			Unit	Rerata
N0-11	147637,764	268	3,63	
N0-12	144535,567	314	4,34	
N0-13	142010,669	294	4,14	3,75
N0-14	146027,133	254	3,48	
N0-15	143584,953	227	3,16	
V1-11	143829,652	203	2,82	
V1-12	143975,044	195	2,71	
V1-13	142362,968	277	3,89	3,89
V1-14	145438,273	349	4,80	
V1-15	147449,709	384	5,21	
V2-11	144057,731	329	4,57	
V2-12	147314,086	315	4,28	
V2-13	139312,544	145	2,08	4,13
V2-14	144640,497	348	4,81	
V2-15	146061,753	359	4,92	
V3-11	141794,968	249	3,51	
V3-12	144927,575	361	4,98	
V3-13	143262,343	334	4,66	4,11
V3-14	144498,811	183	2,53	
V3-15	143118,175	349	4,88	



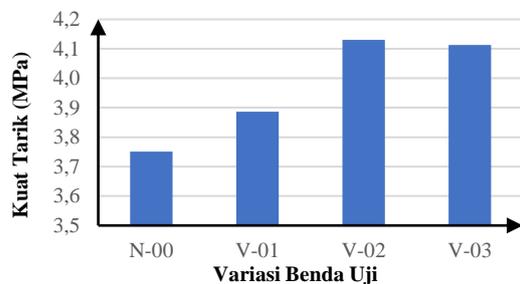
Gambar 8. Komparasi kuat tarik beton N0



Gambar 9. Komparasi kuat tarik beton N0 dengan beton V3

Penggunaan pasir besi sebagai substitusi agregat halus dalam campuran memiliki

pengaruh terhadap kuat tarik belah beton (Maulani, 2018). Berdasarkan gambar-gambar di atas, dapat ditarik kesimpulan bahwa sebagian besar benda uji silinder pasir besi memiliki nilai kuat tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji silinder pasir biasa. Hal ini disebabkan oleh pengaruh magnesium yang terkandung di dalam pasir besi dapat memperbaiki ikatan semen dengan agregat kasar. Hasil grafik di atas juga dipengaruhi oleh diameter butir pasir besi yang sangat halus, karakteristik material tersebut dapat mengurangi *void* yang terdapat di dalam benda uji.



Gambar 10. Grafik nilai rerata kuat tarik beton normal dan pasir besi

Tabel 8. Kenaikan kuat tarik beton

No.	Kode	Kuat tarik (MPa)	Kenaikan (%)
1	V-01	3,89	3,733
2	V-02	4,13	10,133
3	V-03	4,11	9,600

Hasil pada Tabel 8 dan Gambar 10 secara statistik menyimpulkan bahwa beton pasir besi variasi V-02 memiliki nilai kuat tarik yang paling optimum dibanding dengan beton normal dan variasi pasir besi lainnya dengan angka kenaikan sebesar 10,133% diikuti oleh variasi V-03 sebesar 9,6%, dan variasi V-01 sebesar 3,799%. Hasil tersebut berbeda dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Pratama (2018) dimana kuat tarik beton optimum terjadi pada sample benda ujian dengan substitusi pasir besi sebesar 60% (V-01). Perbedaan tersebut bisa saja terjadi karena adanya pengaruh bahan tambah *silica fume* dan *superplasticizer* dalam campuran beton.

Pengujian modulus elastisitas

Analisis modulus elastisitas dilakukan untuk meninjau peningkatan daktilitas beton dan perubahan bentuk benda uji akibat proses pembebanan. Sifat getas (*ductile*) merupakan kemampuan struktur dalam berdeformasi tanpa kehilangan kekuatan untuk menahan beban lainnya. Pengujian modulus elastisitas beton dilaksanakan secara bersamaan dengan pengujian kuat tekan beton. Analisis peningkatan daktilitas beton dilakukan dengan menganalisis kenaikan beban aksial tiap 10 kN pada pengujian tegangan-regangan seperti yang dimuat dalam Tabel 9. Contoh perhitungan tegangan dan regangan dari pembacaan dial sebagai berikut.

- Tegangan (δ)

$$P = 10000 \text{ N}$$

$$A = 18057,73 \text{ mm}^2$$

$$\delta = \frac{18057,73}{10000} = 0,554 \text{ MPa}$$

- Regangan (ϵ)

$$\Delta L = 0,0115 \text{ mm}$$

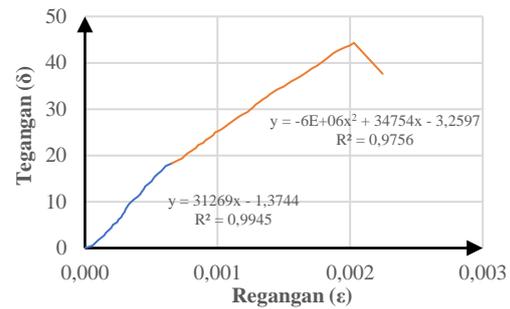
$$L_0 = 200 \text{ mm}$$

$$\epsilon = \frac{0,0115}{200} = 0,00006 \text{ mm}$$

Hasil analisis Tabel 9 digambarkan melalui grafik untuk mengamati hubungan tegangan-regangan saat beton dalam kondisi plastis dan elastis seperti yang disajikan dalam Gambar 10. Grafik tersebut diperoleh dari fitur *trendline* garis linear dan polinomial aplikasi Microsoft Excel. Daerah elastis saat beton >40% dari beban maksimumnya digambarkan dengan garis linear, sementara daerah plastis saat beton <40% dari beban maksimumnya ditandai dengan garis polinomial. Berdasarkan Gambar 11 diketahui nilai koefisien korelasi (R) untuk mengetahui hubungan tegangan-regangan pada beton dengan nilai R elastis = 0,9945 dan R plastis = 0,9756, artinya nilai R tersebut memiliki tingkat hubungan yang sangat kuat.

Tabel 9. Analisis tegangan-regangan

Beban (kN)	Pemba-caan Dial	ΔL (mm)	Regang-an (MPa)	Tegang-an (MPa)
0	0	0,0000	0,00000	0,000
10	23	0,0115	0,00006	0,554
20	31	0,0155	0,00008	1,108
30	39	0,0195	0,00010	1,661
40	49	0,0245	0,00012	2,215
50	58	0,0290	0,00015	2,769
60	63	0,0315	0,00016	3,323
70	72	0,0360	0,00018	3,876
80	80	0,0400	0,00020	4,430
90	85	0,0425	0,00021	4,984
100	97	0,0485	0,00024	5,538
110	101	0,0505	0,00025	6,092
120	110	0,0550	0,00028	6,645
130	114	0,0570	0,00029	7,199
140	119	0,0595	0,00030	7,753
150	122	0,0610	0,00031	8,307
160	127	0,0635	0,00032	8,860
170	132	0,0660	0,00033	9,414
180	140	0,0700	0,00035	9,968
190	149	0,0745	0,00037	10,522
200	159	0,0795	0,00040	11,076
210	167	0,0835	0,00042	11,629
220	172	0,0860	0,00043	12,183
230	178	0,0890	0,00045	12,737
240	182	0,0910	0,00046	13,291
250	191	0,0955	0,00048	13,844
260	201	0,1005	0,00050	14,398
270	206	0,1030	0,00052	14,952
280	212	0,1060	0,00053	15,506
290	220	0,1100	0,00055	16,060
300	230	0,1150	0,00058	16,613
310	237	0,1185	0,00059	17,167
320	244	0,1220	0,00061	17,721
330	262	0,1310	0,00066	18,275
dst	---	---	---	---



Gambar 11. Grafik hubungan tegangan-regangan beton

Setelah persamaan daerah plastis dan elastis diketahui, dilakukan interpolasi menggunakan Microsoft Excel untuk mendapatkan nilai-nilai berikut:

$$S_2 = 24,323 \text{ MPa}$$

$$S_1 = 0,4040 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_2 = 0,001263$$

$$\epsilon_1 = 0,00005$$

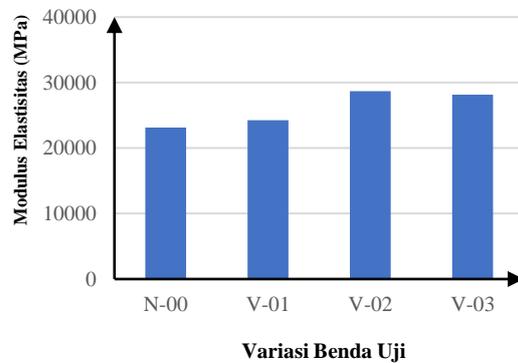
Setelah itu, diperoleh nilai modulus elastisitas

$$Ec = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

$$Ec = \frac{24,323 - 0,4040}{0,001263 - 0,00005}$$

$$Ec = 19727,1702 \text{ MPa}$$

dengan S_2 = kuat tekan pada 40% tegangan runtuh (kg), S_1 = kuat tekan pada saat regangan longitudinal ($\epsilon_1 = 0,000005$), ϵ_2 = regangan longitudinal yang dihasilkan saat S_2 . Hasil perhitungan modulus elastisitas benda uji lebih lengkapnya dapat dilihat pada Tabel 10 dan Gambar 12.



Gambar 12. Hasil perhitungan modulus elastisitas

Tabel 10. Hasil perhitungan modulus elastisitas

No.	Kode	Modulus Elastisitas (MPa)	
		Unit	Rerata
1	N0-06	22541,166	
2	N0-07	29001,512	
3	N0-08	25309,698	23144,284
4	N0-09	22745,517	
5	N0-10	16123,527	
6	V1-06	29800,433	
7	V1-07	15867,981	
8	V1-08	21615,727	24231,041
9	V1-09	23086,422	
10	V1-10	30784,642	
11	V2-06	19586,399	
12	V2-07	30690,882	
13	V2-08	30639,094	28684,371
14	V2-09	34507,173	
15	V2-10	27998,305	
16	V3-06	36241,200	
17	V3-07	35977,392	
18	V3-08	27788,278	28133,440
19	V3-09	20812,951	
20	V3-10	19847,379	

Kemampuan benda uji menerima beban besar dengan nilai regangan kecil ditunjukkan oleh nilai modulus elastisitas yang kaitannya sangat erat dengan kekakuan suatu bahan. Kecilnya nilai modulus elastisitas beton berbanding lurus dengan menurunnya kekakuan diakibatkan oleh deformasi besar saat menerima gaya maksimum. Berdasarkan data yang telah disajikan dalam Tabel 10, diketahui bahwa modulus elastisitas optimum terdapat pada beton variasi V-02 diikuti oleh beton V-03, V-01, dan terakhir N-00.

Nilai modulus elastisitas yang tinggi menandakan bahwa beton dapat berdeformasi inelastis berulang-ulang. Sebaliknya, nilai modulus elastisitas yang kecil menandakan bahwa beton mudah getas. Penurunan nilai modulus elastisitas yang terjadi pada beton variasi V-03 disebabkan oleh penggunaan pasir besi yang terlalu banyak. Hal ini

mengakibatkan terjadinya penurunan fungsi semen sebagai bahan ikat. Penurunan fungsi semen tersebut disebabkan oleh karakteristik material pasir besi dan *silica fume* yang sangat halus mampu merusak proses hidrasi antara air dengan semen.

Validasi hasil modulus elastisitas adalah pembahasan khusus untuk membandingkan hasil pengujian modulus elastisitas penelitian ini dengan penelitian terdahulu yang melibatkan pasir besi, *silica fume*, dan *superplasticizer*. Nilai modulus elastisitas optimum penelitian ini terdapat pada variasi V-02 dengan nilai E_c rata-rata = 28684,37 MPa dan persentase kenaikan terhadap beton normal 23,94%. Penelitian Rahady (2017) mendapatkan nilai modulus elastisitas optimum pada variasi SCC-3 dengan E_c = 292675,28 MPa dengan persentase kenaikan terhadap beton normal 13,55%. Pratama (2018) mendapatkan nilai modulus elastisitas optimum pada variasi 80% dengan E_c = 21729,96 MPa dan persentase kenaikan = 22,65%. Yulianto (2021) mendapatkan nilai kuat tarik optimum pada variasi 70% dengan E_c = 32202,08 MPa dan persentase kenaikan = 6,16%.

Selain dengan metode eksperimen laboratorium, modulus elastisitas juga dapat diperoleh dengan cara analitis. Berdasarkan SNI 2847-2019 modulus elastisitas beton dapat ditentukan dengan persamaan $E_c = 4700 \sqrt{f'c}$ dimana $f'c$ adalah kuat tekan beton rencana. Oleh karena itu, dapat dilakukan perbandingan hasil antara modulus elastisitas maksimum dari eksperimen laboratorium dan modulus elastisitas dengan menggunakan persamaan.

Modulus Elastisitas maksimum dari pengujian laboratorium adalah sebesar 28.684,371 MPa, sedangkan dari hasil persamaan SNI adalah 31.528,56 MPa. Nilai modulus elastisitas dari pengujian laboratorium untuk semua variasi pasir besi lebih rendah dari nilai modulus elastisitas yang dihitung berdasarkan persamaan SNI 2847.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Kuat tekan beton rerata dengan campuran pasir besi melampaui kuat tekan beton normal mutu tinggi sebesar 4,91 %. Kuat tekan optimum tersebut dicapai oleh variasi V-02, dan sebaliknya penurunan kuat tekan terjadi pada variasi V-03.
2. Kuat tekan rerata untuk variasi N-00, V-01, V-02, dan V-03 secara berurutan yakni 46,41 MPa, 49,20 MPa, 51,71 MPa, dan 51,34 MPa.
3. Kuat tarik rerata untuk variasi N-00, V-01, V-02, dan V-03 secara berurutan yakni 3,75 MPa, 3,89 MPa, 4,13 MPa, dan 4,11 MPa.
4. Modulus elastisitas optimum dihasilkan dari variasi V-02, sedangkan variasi V-01 dan V-03 memberikan modulus elastisitas yang lebih rendah sesuai dengan komposisi agregat halus yang digantikan oleh pasir besi. Semakin besar persentase pasir besi dalam campuran beton mutu tinggi akan semakin tinggi mutu betonnya dan lebih getas.

Daftar pustaka

- Agus. (2019). Pengaruh Susbtitusi Pasir Besi Terhadap Nilai Kuat Tekan Beton. *Jurnal Media Inovasi*. Pp. 110-120.
- Badan Standarisasi Nasional Bandung. (2013). SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. BSN. Bandung.
- Badan Standarisasi Nasional Jakarta. (2000). SNI 03-2834-2000: Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. BSN. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional Jakarta. (2008). SNI 1969 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar. BSN. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional Jakarta. (2008). SNI 1970 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus. BSN. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional Jakarta. (2008). SNI 2826 Cara Uji Modulus Elastisitas Batu dengan Tekanan Sumbu Tunggal. BSN. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional Jakarta. (2011). SNI 1974-2011 Tentang Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder. BSN. Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional Jakarta. (2014). SNI 03-2491-2014 Tentang Metode uji kekuatan tarik belah spesimen beton silinder. BSN. Jakarta.
- Fitriani. (2018). Pengaruh Penggunaan *Chemical Admixture Silica Fume* dan *Superplasticizer* Terhadap Perkembangan Kuat Tekan Awal Beton Pada Umur 24 Jam. *Jurnal ArTSip*. Vol. 1, No. 1 2018. Pp. 43-53.
- Gunawan, P. dan Setiono. (2010). Program Mix Design Untuk Beton Mutu Tinggi. *Media Teknik Sipil*. X(1), pp. 42-48.
- Haqqi, H. H. (2016). *Permeabilitas Beton Dengan Penggantian Pasir Biasa Menggunakan Pasir Besi dan Pasir Silika*. Laporan Penelitian. Universitas Islam Indonesia.
- Hilman, P. M. (2014). *Pasir Besi Di Indonesia Geologi, Eksplorasi Dan Pemanfaatannya*. Pusat Sumber Daya Geologi - Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, pp. 1-141.
- KemenESDM. 2018. *Potensi Endapan Pasir Besi di Indonesia*. http://psdg.geologi.esdm.go.id/index.php?option=com_content&view=article&id=1288&Itemid=610#:~:text=Dengan%20garis%20pantai%20yang%20sangat,konsentrat%20pasir%20besi%20mencapai%2045%25. Di akses pada 30 Mei 2022.

- Maulani. (2018). Pengaruh Tempurung Kelapa Sebagai Substitusi Agregat Kasar dengan Penggunaan Pasir Besi Terhadap Kuat Tarik Belah Beton. *Teras Jurnal*, 8(2), Pp. 409 – 415.
- Prahara, E., Liong, G. T. and Rachmansyah, R. (2015). Analisis Pengaruh Penggunaan Serat Serabut Kelapa dalam Persentase Tertentu pada Beton Mutu Tinggi. *ComTech: Computer, Mathematics and Engineering Applications*, 6(2). p. 208.
- Pratama, R. (2018). *Pengaruh Pasir Besi Sebagai Pengganti Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan dan Kuat tarik*. Laporan Penelitian. Universitas Islam Indonesia.
- Rafii, M. and Hakim, M. L. (2000). *Pengaruh Pemakaian Agregat Pasir Besi Terhadap Kuat Desak Beton*. Laporan Penelitian. Universitas Islam Indonesia.
- Rahady, M. A. (2019). *Pengaruh Penambahan Silica Fume Pada Self-Compacting Concrete (SCC)*. Laporan Penelitian. Universitas Islam Indonesia.
- Rochmawati, R. and Widiati, I. R. (2019). Pembuatan Beton Mutu Tinggi K-450 Menggunakan Agregat Kasar Dari Kampung Harapan Dan Agregat Halus Dari Doyo Kabupaten Sentani. *Journal of Portal Civil Engineering*, 2(1 SE-Articles), pp. 35–39.
- Yulianto. (2021). *Pengaruh Pasir Besi Sebagai Pengganti Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton*. Laporan Penelitian. Universitas Islam Indonesia.