

Kajian Eksperimental Pemanfaatan Limbah Batu Kerajinan Sebagai Agregat Limbah Pada Beton

**Ira Puspitasari¹, Harianto Zaidulfar², Try Kurniawan Akhbar³, Muhamad Irfan Nurdin⁴,
Amirah Zakiyyah⁵**

¹³⁴⁵Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung
Kabupaten Bandung Barat, Indonesia

²Program Studi Konstruksi Bangunan, Politeknik TEDC
Kota Cimahi, Indonesia
ira.puspitasari@polban.ac.id

Abstrak

Beton adalah material konstruksi yang diperoleh dari pencampuran pasir, kerikil/agregat kasar, semen serta air. Di sisi lain penggunaan kerikil yang merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui secara terus menerus sebagai bahan beton dikhawatirkan merusak lingkungan. Dalam mengatasi isu itu maka riset tentang konstruksi hijau (*Green Construction*) mulai digalakkan dengan salah satunya adalah pemanfaatan limbah batu kerajinan di Padalarang. Tujuan penelitian adalah mengetahui komposisi optimum agregat kasar dari limbah pada beton sehingga menghasilkan kuat tekan yang maksimum. Tahapan Pertama dalam penelitian ini adalah pengumpulan data selanjutnya adalah analisis Laboratorium meliputi uji sifat teknis material penyusun beton yang meliputi pasir, kerikil alami dan kerikil dari limbah batu kerajinan. Selanjutnya proses mix desain dimana penelitian dilakukan dengan 30 benda uji dengan komposisi antara split dan limbah adalah 100% : 0%, 80% : 20%, 60% : 40%, 40% : 60%, 20% : 80% dan 0% : 100%, masing masing komposisi berjumlah lima benda uji. Pengujian meliputi berat jenis, kuat tekan dan modulus elastisitas beton. Hasil penelitian menunjukkan kuat tekan maksimum diperoleh pada proporsi 40% split dan 60% limbah yaitu 14.35 MPa. Modulus elastisitas maksimum diperoleh pada proporsi 20% split dan 80% limbah yaitu 18367.8 MPa.

Kata kunci: Batu Kerajinan, Beton, Konstruksi Hijau, Limbah, Padalarang

Abstract

Concrete is a construction material obtained from mixing sand, gravel, or cement. On the other hand the use of gravel which is a natural resource that cannot be used continuously as concrete material is feared to damage the environment. In overcoming this problem, research on green construction began to be promoted, one of which was the utilization of stone craft waste in Padalarang. The purpose of this research is to find the most appropriate composition. The first stage in this research is the next data collection is laboratory analysis to test the technical composition of concrete that contains sand, natural gravel and gravel from craft stone waste. Furthermore, the design mix process while the research was carried out with 30 specimens with a composition between split and waste is 100% : 0%, 80% : 20%, 60% : 40%, 40% : 60%, 20% : 80% and 0% : 100%, respectively Test for specific gravity, compressive strength and modulus of elasticity of concrete. The results showed that the maximum compressive strength was obtained in the proportion of 40% split and 60% waste, namely 14.35 MPa. Maximum modulus of elasticity is obtained at a ratio of 20% split and 80% waste which is 18367.8 MPa.

Keywords: Concrete, Green Construction, Padalarang, Stone Crafts, Waste

I. PENDAHULUAN

Perkembangan dunia konstruksi saat ini menunjukkan bahwa material struktur yang sangat

populer digunakan di seluruh dunia adalah beton. Beton adalah material konstruksi yang diperoleh dari pencampuran pasir, kerikil/ agregat kasar, semen serta air. Agregat kasar merupakan sumber daya

alam yang lama kelamaan akan habis dan tidak dapat diperbarui, permasalahan inilah yang akan dicari alternatif penggantinya [1], [11]. Alternatif pengganti material digunakan limbah batu kerajinan dimana melanjutkan penelitian sebelumnya, bahwasannya penggunaan agregat kasar dari limbah batu kerajinan bisa dimanfaatkan untuk pembuatan beton ringan dengan berat jenis beton sekitar 1700 kg/dm³ lebih kecil dari berat jenis beton normal yaitu 2400 kg/m³ namun kuat tekan rendah karena non pasir. Berdasarkan permasalahan tersebut maka penulis berencana melakukan penelitian beton normal dengan agregat berasal dari limbah batu kerajinan. Pembuatan mix desain kebutuhan bahan beton sesuai beton normal dengan metode SK SNI T-15-1990-03/Current British Method (D0E), disusun oleh British Departement of Environment pada tahun 1975 untuk menggantikan Road Note 4 di Inggris. Untuk kondisi di Indonesia telah diadakan penyesuaian pada besarnya variasi kuat tekan beton. Pembuatan campuran beton dengan metode DOE, kemudian hasil mix desain disubtitusikan ke proporsi benda uji dengan kandungan material agregat dari limbah batu kerajinan sebesar 0%, 20%, 40%, 60%, 80% dan 100% di mana masing-masing proporsi berjumlah 5 benda uji berbentuk silinder.

State of the art dari topik penelitian ini adalah bersesuaian dengan bidang arsitektur, *real estate*, dan teknik lingkungan. Penelitian ini dilakukan terkait dengan bidang keahlian teknik sipil, di mana di dalamnya terdapat rekayasa bahan, jadi penelitian ini dapat dikategorikan sebagai bidang Teknologi Material Maju [2], [3]. Hasil penelitian sangat berpotensi untuk adanya diversifikasi bahan dengan pemanfaatan material lokal di wilayah kerja jasa konstruksi [10], [12], [13].

Tujuan dari penelitian beton dari limbah batu kerajinan karakteristik mekanis beton dengan pemakaian limbah batu kerajinan sebagai substitusi agregat kasar adalah:

- a. Mengetahui karakteristik mekanis agregat kasar dari limbah batu kerajinan meliputi berat jenis, berat isi, daya serap air, keausan.
- b. Mengetahui perbandingan karakteristik beton limbah kerajinan dengan beton normal pada pengujian kuat tekan, berat jenis dan modulus elastisitas.
- c. Mengetahui komposisi split dan limbah yang menghasilkan kuat tekan, berat jenis dan modulus elastisitas yang optimum.

Penelitian tentang beton dari limbah saat ini sedang mulai dikembangkan. Hal ini terkait tentang kebutuhan masyarakat akan sebuah infrastruktur yang murah namun aman dan ramah lingkungan [4],

[5]. Temuan/inovasi dan indikator kinerja penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem pengolahan limbah kerajinan berupa batu pecah ringan.
2. Biaya pembelian agregat kasar murah karena berasal dari limbah.
3. Direncanakan memiliki kekuatan lebih tinggi dari beton dengan agregat split.

Berikut merupakan penelitian sejenis yang sudah dilakukan:

1. Penelitian dilakukan oleh Satriani, S., & Bastomi, M menunjukkan bahwa abu batu limbah stone crusher bisa digunakan sebagai substitusi parsial agregat halus dalam beton sebagai alternatif daur ulang sekaligus solusi ekonomi untuk konstruksi di dekat lokasi quarry [1]
2. Penelitian dilakukan oleh Darmayasa menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah batu cadas sebagai agregat kasar pada campuran beton hingga proporsi maksimal 50% terbukti mampu memberikan nilai kuat tekan yang memenuhi standar mutu (K225) dan berpotensi sebagai solusi pemanfaatan limbah dan konservasi sumber daya alam [2]
3. Penelitian dilakukan oleh Koesno, I., Pribadi, G., & Purba, T. F. menunjukkan bahwa penambahan limbah batu bata pada agregat kasar menurunkan kuat tekan beton dibanding beton konvensional. Substitusi 5% menghasilkan penurunan yang relatif lebih kecil (~11%) dibanding 10% (~24%). Oleh karena itu, penggunaan limbah bata sebagai pengganti agregat kasar hingga 5% mungkin masih dapat diterima untuk beton mutu K-25, namun kadar lebih tinggi lebih mengganggu performa beton [9]

II. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan selama 6 bulan, yaitu mulai dari bulan Maret sampai Januari di laboratorium konstruksi beton.

B. Metode Penelitian

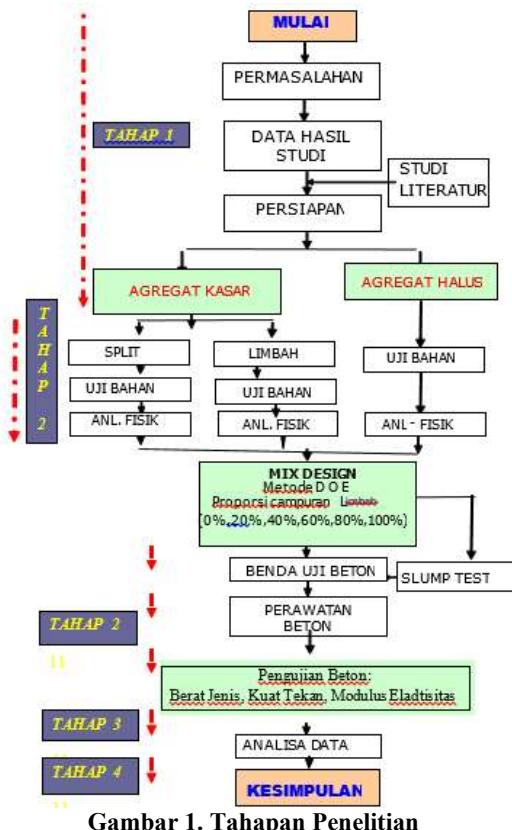
Penelitian ini dilaksanakan dengan metode eksperimen. Metode eksperimen adalah metode penelitian dengan memberikan perlakuan tertentu pada sampel penelitian [6], [7]. Eksperimen merupakan modifikasi secara sengaja dan terkontrol dalam menentukan peristiwa atau kejadian, serta pengamatan terhadap perubahan yang terjadi pada peristiwa itu sendiri.

Penelitian eksperimen adalah suatu penelitian di dalamnya ditemukan minimal satu variabel yang dimanipulasi untuk mempelajari hubungan sebab

akibat. Oleh karena itu, penelitian eksperimen erat kaitannya dalam menguji suatu hipotesis dalam rangka mencari pengaruh, hubungan, maupun perbedaan perubahan terhadap kelompok yang dikenakan perlakuan.

C. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini digambarkan pada bagan di bawah ini:



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Penjelasan alur penelitian:

a. Tahap Pertama

Pada tahap pertama dilakukan persiapan berdasarkan data hasil studi, observasi lapangan dan studi literature. Persiapan meliputi bahan maupun peralatan yang akan digunakan dalam pembuatan benda uji. Persiapan bahan meliputi pencucian pasir, split dan limbah batu kerajinan. Pasir yang digunakan adalah pasir Cimalaka, split diperoleh dari toko material sekitar Cimahi dan limbah diperoleh dari toko material Fahmi Klg 2 Alam Jaya yang khusus menjual batu split hasil pengolahan limbah batu kerajinan yang beralamat di Jalan Prapatan Arab Kp. Cipadang Manah RT 03 RW 16 Desa Padalarang Kabupaten Bandung Barat. Pada dasarnya batu limbah yang digunakan merupakan jenis batu andesit sisa pembuatan kerajinan seperti patung, hiasan

taman dan aksesoris rumah. Limbah sudah dicrusher menjadi batu pecah dengan ukuran 1 dan $\frac{1}{2}$ inch.

b. Tahap Kedua

Pada tahap kedua dilakukan pengujian karakteristik bahan meliputi uji fisik yaitu berat jenis, berat isi, daya serap air pasir, kerikil biasa dan kerikil dari limbah batu kerajinan. Selanjutnya dilakukan pembuatan benda uji dengan metode DOE ditetapkan $f'c$: 30 MPa kemudian hasil mix desain disubtitusikan ke proporsi benda uji dengan komposisi antara split dan limbah sebagai berikut : 100 % : 0% (Beton normal) , 80% : 20%, 60% : 40%, 40%: 60%, 20% : 80% , 0% : 100% masing – masing proporsi berjumlah 5 benda uji sehingga total keseluruhan benda uji adalah 30 buah silinder dan dilakukan perawatan (*curing*) dengan cara perendaman dalam air setelah berumur 28 hari dilakukan pengujian kuat tekan, berat jenis dan modulus elastisitas.

c. Tahap Ketiga

Pada tahap ketiga dilakukan analisis data dan penarikan kesimpulan dan saran. Analisis data menggunakan software mixsrosoft excel untuk megolah dan menyajikan data dalam bentuk tabel dan grafik.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Observasi Batu Limbah Kerajinan

Limbah batu kerajinan terdapat di Padalarang, Kabupaten Bandung Barat – Jawa Barat. Batu ini diambil dari bongkahan batu besar kemudian dijadikan kerajinan seperti patung, bola bola, dll.

Batu yang digunakan dalam pembuatan kerajinan ini merupakan jenis batu andesit dan basalto, batu andesit mempunyai ciri titik-titik hitam pada batu tersebut sedangkan batu basalto mempunyai ciri titik-titik putih pada batu tersebut.



Gambar 2. Kerajinan dan Limbah Batu Kerajinan sebelum dijadikan split

Gambar 2 di atas adalah kerajinan yang dibuat dari batu bongkahan besar dan menghasilkan sisa (limbah) dalam pembuatannya. Sisa dari hasil batu kerajinan tersebut dipecah menjadi batu-batu kecil (split) dengan ukuran $\frac{1}{2}$ inch menggunakan

mesin *crusher*. Penghasil split dari limbah batu kerajinan ini adalah toko “Fahmi klg 2 alam Jaya” daerah Kp. Cipadang Manah – Padalarang. Bentuk split yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Split dari limbah batu kerajinan

B. Hasil Pemeriksaan Agregat Kasar dan Halus

Pengujian agregat dilakukan di laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil. Agregat yang akan digunakan sebagai material campuran pada beton pada benda uji diperiksa parameternya. Parameter agregat halus yang diuji meliputi berat isi, kadar air, kadar lumpur, berat jenis dan penyerapan, analisa saringan. Sedangkan pada split dan limbah meliputi berat isi, kadar air, kadar lumpur, berat jenis dan penyerapan, analisa saringan, keausan agregat. Sebelum dilakukan pemeriksaan, pasir, split dan limbah dicuci terlebih dulu supaya memenuhi standar SNI untuk material beton. Setelah dicuci, agregat dijemur pada suhu ruangan. Berikut merupakan hasil rekapitulasi pengujian agregat kasar dan halus.

Tabel 1 Hasil Rekapitulasi Pemeriksaan Agregat (Hasil Analisis, 2019)

Agregat Halus		Hasil	
Parameter	Satuan		
Kadar Lumpur	%	0.92	
Kadar Air Asli	%	0.75	
Kadar Air SSD	%	2.882	
Berat isi	kg/m ³	1543.61	
Berat Jenis Semu		2.708	
Berat Jenis Kering		2.512	
Berat Jenis SSD		2.584	
Analisa Saringan (FM)	%	2.64	
Agregat Kasar		Split	Limbah
Kadar Lumpur	%	0.2	0.3
Kadar Air Asli	%	2.45	2.4
Kadar Air SSD	%	5.08	3.3
Berat Isi	kg/m ³	1281.9	1427.47

Berat Jenis Semu		2.6	2.66
Berat Jenis Kering		2.29	2.44
Berat Jenis SSD		2.41	2.52
Analisa saringan (FM)	%	3.53	4.07
Keausan Agregat	%	26.19	17.34

Hasil pembahasan pada pengujian agregat halus, agregat kasar antara batu split dan batu limbah:

1. Hasil kadar lumpur dari batu split sebesar 0.2 % dan limbah sebesar 0.3% memenuhi syarat acuan SNI 03-2461-1991 parameter agregat kasar dengan maksimal 1% untuk agregat kasar [8]. Sedangkan syarat acuan SNI untuk agregat halus adalah 5%, hasil pemeriksaan pada agregat halus kadar lumpur adalah 0.92% yang artinya memenuhi syarat.
2. Kadar air pada agregat split lebih besar dari limbah batu yaitu 2,45% sedangkan limbah kerajinan 2.4% [9]. Menurut SNI 03-2461-1991 parameter agregat kasar, kadar air untuk agregat kasar maks. 3% sehingga agregat kasar pada split dan limbah batu kerajinan memenuhi syarat.
3. Berat isi batu split 1281.9 lebih kecil dari pada berat isi batu limbah kerajinan 1427.47. Disimpulkan bahwa batu limbah dan split tersebut baik karena dihasilkan antara 1,0-2,0. Bila mendekati antara 1,50-2,00 dapat digunakan untuk beton normal.
4. Berat jenis SSD batu split 2.41 lebih kecil dari berat jenis limbah batu kerajinan yaitu 2.52 namun keduanya memenuhi syarat SNI karena nilainya antara 2.0 – 3.0 yang baik digunakan untuk beton
5. Keausan agregat pada batu split 26.19% lebih besar dari agregat limbah batu kerajinan 17.34%. Keduanya dalam kategori baik, karena nilai keausannya kurang dari 50%, dimana pada agregat dari limbah batu kerajinan lebih kuat dikarenakan nilai keausannya lebih kecil.

C. Mix Desain Beton

Mix desain beton dalam penelitian ini menggunakan metode DOE dengan direncanakan $F_c' = 30$ MPa. Perencanaan beton merupakan beton normal, kemudian agregat kasar diganti sebagian dengan agregat dari limbah batu kerajinan sesuai dengan variabel yang ditentukan. Hasil dari mix desain diperoleh komposisi agregat kasar dalam satuan kilogram (kg), kemudian diubah ke dalam satuan volume dengan membaginya terhadap berat isi. Proporsi ditentukan dari volume agregat, misal

diperoleh proporsi agregat pada variabel 80% split dan 20% limbah adalah 18.2 kg. Kemudian massa dikonversi ke volume dengan membagi 18.2 kg terhadap berat isi agregat yaitu 1.28 kg/dm³ diperoleh 14.2 dm³. 80% dari volume agregat adalah 11.4 dm³ yang merupakan volume split biasa dan 20% nya adalah 2.85 dm³ merupakan volume split dari limbah batu kerajinan. Hasil volume masing-masing dikonversikan ke massa dengan mengalikannya terhadap berat isi masing-masing jenis split yaitu split biasa 1.2819 kg/dm³ dan split dari limbah sebesar 1.427 kg/dm³. Rekapitulasi hasil

Proporsi	Sm (kg)	Ps (kg)	Kr (kg)		Air (kg)
			S	L	
100% S:0% L	6.25	13.8	18.2	0	4.7
80% S:20% L	6.25	13.8	14.59	4.06	4.7
60% S:40% L	6.25	13.8	10.94	8.12	4.7
40% S:60% L	6.25	13.8	7.29	12.2	4.7
20% S:80% L	6.25	13.8	3.64	16.2	4.7
0% S:100% L	6.25	13.8	0	20.3	4.7

mix desain terhadap proporsi masing-masing material disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Rekapitulasi Proporsi Campuran Material

Keterangan : S = Split biasa, L = Kerikil dari Limbah, Sm = Semen, Ps = Pasir, Kr = Kerikil

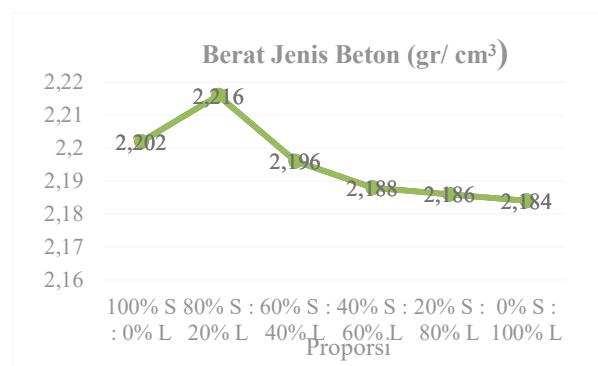
D. Hasil Pengujian Berat Jenis Beton

Sebelum benda uji dites kuat tekan, maka dilakukan pengukuran dimensi dan massa benda uji. Pengukuran dimensi meliputi diameter dan tinggi silinder kemudian dihitung volume silinder. Berat jenis diperoleh dari massa / berat beton dibagi dengan volume beton dalam satuan gr/cm³. Rumus perhitungan berat jenis beton, adalah m / V dimana m = Massa Beton, (kg) dan V = Volume silinder beton, (m³).



Gambar 4. Pengukuran Dimensi Beton untuk Perhitungan Berat Jenis

Rekapitulasi hasil perhitungan berat jenis adalah sebagai berikut:

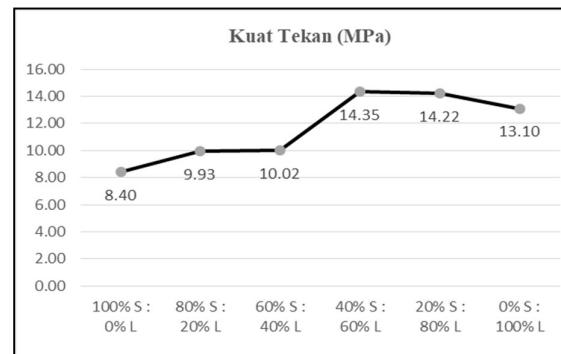


Gambar 5. Grafik Berat Jenis Berdasarkan Proporsi Campuran Split dan Limbah

Berdasarkan dari gambar 5 bisa disimpulkan bahwa berat jenis paling kecil dimiliki oleh beton dengan proporsi limbah (L) 100% dan split (S) 0%. Ini membuktikan bahwa semakin besar proporsi limbah maka beton semakin ringan dimana diperlihatkan melalui berat jenis yang kecil[4,5].

E. Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian selanjutnya adalah uji kuat tekan beton menggunakan alat compression test. Pada saat pengujian, alat menunjukkan besarnya gaya yang dimiliki oleh masing-masing benda uji. Kemudian hasil gaya tersebut dibagi dengan luasan topping silinder sehingga diperoleh nilai kuat tekan dalam satuan MPa. Rekapitulasi hasil perhitungan kuat tekan beton dengan berbagai proporsi adalah sebagai berikut:



Gambar 6 Grafik Perbandingan Kuat Tekan Beton dengan Berbagai Proporsi

Berdasarkan gambar 6, bisa disimpulkan bahwa kuat tekan maksimum beton diperoleh pada proporsi 40% split dan 60% limbah yaitu 14.35 MPa dengan berat jenis 2.188 gr/ cm³ lebih kecil dari berat jenis

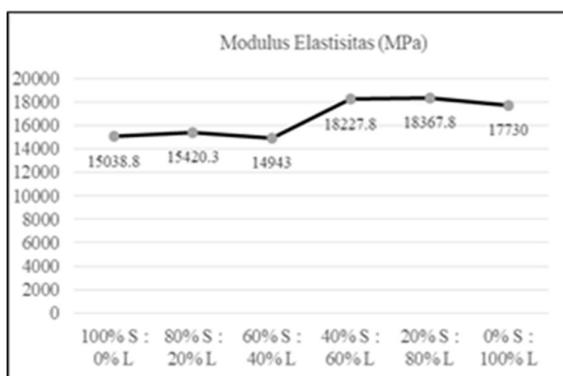
beton normal yaitu 2.4 gr/ cm³. Hal ini dapat disimpulkan bahwa beton dengan agregat kasar berasal dari limbah batu kerajinan lebih ringan dibandingkan beton normal pada umumnya.

F. Pengujian Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas adalah kemampuan beton untuk berubah bentuk akibat pembebanan tekan tanpa terjadi deformasi plastis atau permanen. Pada umumnya bahan, termasuk beton memiliki daerah awal pada diagram tegangan regangan dimana bahan berkelakuan secara elastis dan linier. Kemiringan diagram tegangan regangan dalam daerah elastis linier itulah yang dinamakan modulus elastisitas. Nilai modulus elastisitas yang besar menunjukkan kemampuan menahan tegangan yang cukup besar akibat beban-beban yang terjadi pada suatu regangan (kemungkinan terjadi retak) yang kecil.

Berdasarkan gambar 7 bisa disimpulkan bahwa modulus elastisitas paling besar terdapat pada beton dengan komposisi 80% limbah dan 20% split. Semakin besar nilai modulus elastisitas beton maka kemampuan menahan perpendekan atau perpanjangan semakin baik. Artinya penggunaan limbah semakin memperser nilai modulus elastisitas beton.

Berikut merupakan hasil rekapitulasi modulus elastisitas beton berdasarkan proporsi agregat split dan limbah:



Gambar 7. Grafik Perbandingan Modulus Elastisitas Pada Beton berdasarkan proporsi split dan limbah

IV. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Penggunaan agregat limbah sebagai pengganti agregat kasar alami mengurangi berat jenis beton dibandingkan beton normal yaitu 2.184 gr/cm³ pada proporsi 100% limbah dan 0% split dibandingkan berat jenis pada beton normal atau proporsi 0% limbah dan 100% split yaitu 2.2 gr/cm³. Kuat tekan

optimum diperoleh pada proporsi 40% split dan 60% limbah dengan kuat tekan 14.35 MPa dan yang terkecil pada proporsi 100% split dan 0% limbah (beton normal) yaitu 8.4 MPa. Modulus elastisitas maksimum diperoleh pada proporsi agregat 20% split dan 80% limbah dengan nilai 18367.8 MPa dan paling kecil terdapat pada beton dengan proporsi 60% split dan 40% limbah yaitu 14943 MPa. Melihat nilai berat jenis, kuat tekan dan modulus elastisitas pada beton dengan campuran agregat yang memiliki nilai lebih baik dibandingkan beton normal pada mix desain yang sama maka penggunaan agregat kasar dari limbah batu kerajinan bisa digunakan sebagai alternatif dalam meningkatkan kuat tekan beton dan substitusi agregat alam [14], [15]. Hasil kuat tekan beton normal yang rendah dibandingkan rencana dikarenakan pengujian mix desain hanya sekali dan perlu dilakukan uji coba berulang kali sehingga kuat akan mendekati rencana.

B. Saran

1. Jumlah benda uji diperbanyak yaitu minimal 10 buah per proporsi
2. Memperbanyak jumlah variabel proporsi dan umur pengujian
3. Uji coba mix desain campuran diperbanyak dan diulang agar diperoleh kuat tekan yang direncanakan sehingga beton bisa digunakan untuk bagian struktural

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada Kemendikiristek yang telah memberikan pendanaan hibah dosen pemula serta teman-teman penelitian yang sudah membantu dalam menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Satriani, S., & Bastomi, M. (2023). Tinjauan kualitas beton menggunakan abu batu limbah stone crusher sebagai substitusi parsial agregat halus. *Jurnal Industrial Galuh*, 3(01), 37–42. <https://doi.org/10.25157/jig.v3i01.3003>
- [2] Darmayasa, I. G. O. (2023). Penggunaan limbah batu cadas sebagai agregat kasar dalam campuran beton. *Jurnal Ecocentrism*, 3(2). <https://doi.org/10.36733/jecon.v3i2.7311>
- [3] Hapsari, R. N. A., Yuhanafia, N., Anggraini, N. K., Muna, Y. M., Istianti, M. A., & Zulfiqor, R. A. (2024). Infrastruktur ramah lingkungan dengan beton limbah batu bata Penggaron dan zat adiktif Sikament-NN. *Jurnal Teknik Sipil*, 17(1), 30–45. <https://doi.org/10.56444/jts.v17i1.1585>
- [4] Karimah, R., & Rusdianto, Y. (2020).

- Pemanfaatan limbah keramik sebagai agregat halus pada beton ramah lingkungan. *Media Teknik Sipil*, 19(1). <https://doi.org/10.22219/jmts.v19i1.15386>
- [5] Nabhan, D., Anisah, A., & Lenggogeni, L. (2023). Inovasi pemanfaatan limbah marmer sebagai substutusi agregat kasar untuk beton yang ramah lingkungan. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7(3). <https://doi.org/10.31004/jptam.v7i3.11217>
- [6] Putri, S. M., & Romadhon, R. (2023). Pengaruh penambahan limbah serbuk besi dan serbuk kayu terhadap kuat tekan beton. *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Sipil*, 8(1). <https://doi.org/10.32832/komposit.v8i1.1475>
- [7] Wilda, K., Nasution, M. A., & Sitanggang, E. S. Y. (2022). Pengaruh penggantian sebagian semen dengan limbah B3 las karbit terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Agregat*, 2(1). <https://doi.org/10.51510/agregat.v2i1.563>
- [8] Fatwa, R., Handayani, N., & Faradila, A. (2024). Penggunaan limbah abu batu sebagai campuran pada agregat halus terhadap kuat tekan beton. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 12(2), 167–175. <https://doi.org/10.33084/mits.v12i2.7427>
- [9] Koesno, I., Pribadi, G., & Purba, T. F. (2022). Analisis kuat tekan beton menggunakan limbah batu bata sebagai pengganti sebagian agregat kasar. *Jurnal Sipil Krisna*, 8(2), 68–80. <https://doi.org/10.61488/sipilkrisna.v8i2.16>
- [10] Puspitasari, I. P., Maulana, Q. D., & Prasetyo, D. A. (2023). Studi eksperimental beton dari limbah abu batu sebagai substutusi pasir alami. *Jurnal Teknik Sipil*, 13(1), 30–35. <https://doi.org/10.36546/tekniksipil.v13i1.96>
- [11] Lumenta, H., Bintoro, S. T., Widianto, D., & Suseno, W. (2021). Pengaruh substutusi sebagian agregat halus dengan abu batu dan penambahan fly ash terhadap kuat tekan beton. *G-Smart*, 3(1), 28. <https://doi.org/10.24167/gs.v3i1.1765>
- [12] Astariani, N. K., Salain, I. M. A. K., Sutarja, I. N., & Widarsa, I. B. R. (2021). Mechanical properties and microstructure of geopolymers binder based on umeanyar slatestone powder. *Civil Engineering and Architecture*, 9(6), 1698–1716. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090604>
- [13] Bere, M. D., Simanihuruk, B., & Dewita, H. (2022). Analisis kuat tekan dan kuat tarik belah pada beton busa dengan pemakaian pasir abu batu sebagai agregat halus. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*, 6(2), 1–10. <https://doi.org/10.52447/jkts.v6i2.5206>
- [14] Astariani, N. K., Sudika, I. G. M., & Budiarta, I. W. (2024). Mechanical properties and microstructure of concrete using Umeanyar slate stone powder as a filler. *AIP Conference Proceedings*, 3110.
- [15] Sekarini, D., Sunarsih, E. S., & Siswanto, B. (2020). Pengaruh serbuk keramik sebagai pengganti agregat halus dan abu terbang (fly ash) sebagai pengganti 15% berat semen terhadap kuat tarik belah dan porositas pada beton. *Indonesian Journal Of Civil Engineering Education*, 5(2), 27. <https://doi.org/10.20961/ijcee.v5i2.43485>

