

EVALUASI PERBANDINGAN KUAT TEKAN DAN BERAT JENIS BETON RINGAN MENGGUNAKAN AGREGAT BUATAN BERBASIS FLY-ASH EPOXY SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT NORMAL

Muhammad Farhan^{1*}, Saloma¹, Anis Saggaff¹, Arie Putra Usman¹

¹Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

*Corresponding author e-mail: muh.farhan.9h@gmail.com

ABSTRAK: Beton konvensional dengan berat jenis 2.400 kg/m³ mempengaruhi massa gedung cukup signifikan, sehingga mendorong pengembangan beton ringan sebagai material alternatif. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perbandingan kuat tekan dan berat jenis antara beton normal (BN) dan beton ringan (BR) yang menggunakan agregat buatan berbasis *fly ash* dan resin epoksi sebagai substitusi agregat kasar. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental di laboratorium dengan membuat benda uji silinder Ø150 x 300 mm, dengan target kuat tekan rencana $f'_c = 20$ MPa. Pengujian utama meliputi pengukuran densitas dan uji kuat tekan pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan agregat buatan berhasil menurunkan densitas rata-rata beton secara signifikan dari 2385 kg/m³ pada BN menjadi 2035 kg/m³ pada BR. Penurunan berat ini dicapai tanpa mengurangi performa mekanik, dimana kuat tekan rata-rata BR pada umur 28 hari mencapai 20,26 MPa, nilai yang sangat kompetitif dan hampir setara dengan kuat tekan rata-rata BN sebesar 20,35 MPa. Temuan ini mengindikasikan bahwa agregat buatan dari *fly ash-epoxy* memiliki potensi besar untuk diaplikasikan pada elemen struktural yang memerlukan reduksi beban mati tanpa kehilangan kapasitas mekanik secara signifikan.

Kata Kunci: Beton ringan, Kuat tekan, Agregat Buatan, Epoxy, *Fly ash*

ABSTRACT: Conventional concrete with a unit weight of 2,400 kg/m³ significantly affects the mass of a building, thereby encouraging the development of lightweight concrete as an alternative material. This study aims to evaluate the comparison of compressive strength and unit weight between normal concrete (BN) and lightweight concrete (BR) that use artificial aggregate based on fly ash and epoxy resin as a substitution for coarse aggregate. The research method used was a laboratory experimental method by producing cylindrical specimens Ø150 × 300 mm, with a target design compressive strength $f'_c = 20$ MPa. The main tests included density measurement and compressive strength testing at 28 days of age. The results show that the use of artificial aggregate succeeded in significantly reducing the average density of the concrete from 2385 kg/m³ in BN to 2035 kg/m³ in BR. This weight reduction was achieved without reducing mechanical performance, where the average compressive strength of BR at 28 days reached 20.26 MPa, a value that is very competitive and almost equivalent to the average compressive strength of BN of 20.35 MPa. These findings indicate that artificial aggregate from fly ash-epoxy has great potential to be applied to structural elements that require dead-load reduction without significantly losing mechanical capacity.

Keywords: Lightweight Concrete, Compressive Strength, Artificial aggregate , Epoxy, *Fly Ash*

1 Pendahuluan

Beton konvensional pada banyak aplikasi struktur menyumbang beban mati (*dead load*) yang besar sehingga mendorong kebutuhan akan material alternatif yang lebih ringan untuk meningkatkan efisiensi struktur dan mengurangi konsumsi material. Pengembangan beton

ringan (*lightweight concrete*) dengan agregat ringan telah dilaporkan mampu menurunkan densitas beton secara substansial dan memberikan keuntungan termal serta ekonomi pada desain struktural tertentu [1].

Agregat ringan (*Lightweight Aggregate*) seperti *expanded clay* (LECA), *pumice*, dan *perlite* sering digunakan untuk menghasilkan beton ringan. Studi-studi

menampilkan variasi densitas beton ringan antara ~ 1300 sampai $>2000 \text{ kg/m}^3$, dengan rentang kuat tekan yang bergantung pada tipe agregat dan proporsi pengganti. Perbandingan sifat fisik dan mekanik agregat-agregat ini menjadi fokus banyak penelitian karena hubungan langsungnya dengan performa beton akhir [2].

Namun demikian, literatur konsisten menunjukkan adanya perbandingan terbalik antara pengurangan berat dan penurunan kuat tekan. Semakin rendah *specific gravity* agregat umumnya berkorelasi dengan penurunan kekuatan tekan beton, sehingga desain beton ringan memerlukan perhitungan pada rasio penggantian, perekat, dan optimalisasi campuran [3]. Hal ini menegaskan perlunya metode desain untuk mempertahankan kekuatan sambil menurunkan berat beton tersebut.

Faktor fisik agregat, terutama porositas dan kapasitas penyerapan air, diidentifikasi sebagai faktor utama perilaku mekanik dan durabilitas beton ringan. Agregat dengan porositas tinggi cenderung meningkatkan *water demand* dan Interfacial Transition Zone (ITZ), menyebabkan penurunan kuat tekan dan peningkatan absorpsi; oleh karena itu beberapa studi menekankan peran perawatan permukaan atau penggunaan aditif pozzolanik untuk mengurangi porositas dan memperbaiki performa mekanik [1], [4].

Di samping agregat granular tradisional, kajian terbaru menunjukkan potensi *fly ash cenospheres* dan *perlite microspheres* sebagai mikro-agregat ringan yang dapat menghasilkan beton dengan berat jenis rendah tanpa kehilangan penuh sifat mekanik. [5] melaporkan formulasi yang mencapai *compressive strength* yang cukup tinggi (hingga $\sim 46,7 \text{ MPa}$) pada berat jenis rendah dengan menggunakan *fly ash cenospheres* dan *perlite microspheres*. Temuan ini membuka kemungkinan penggunaan *fly ash* bukan hanya sebagai pozzolan tetapi juga sebagai sumber mikro-agregat ringan.

Penggunaan agregat ringan juga terbukti efektif memperbaiki sifat fisik dan mekanik. [6] menunjukkan bahwa perlakuan *alkalin* pada *pumice* dapat meningkatkan *specific gravity* dan resistensi abrasi sehingga meningkatkan *compressive strength* hingga signifikan pada beberapa kasus penelitian. Pendekatan pengolahan agregat ini relevan untuk metode meningkatkan performa agregat buatan berbasis limbah industri.

Studi lapangan dan meta-analisis menyarankan rentang penggantian agregat optimal *partial replacement* sekitar 20–50% untuk menyeimbangkan pengurangan berat dan retensi kuat tekan pada level struktural. Sull

replacement memungkinkan tetapi sering memerlukan langkah tambahan seperti perawatan agregat, penambahan pozzolan atau *fiber* untuk mengembalikan performa yang terdegradasi [4], [7]. Oleh karena itu desain campuran dan proporsi penggantian menjadi parameter kunci.

Selain perilaku mekanik jangka pendek, aspek durabilitas, seperti ketahanan terhadap *chlorida*, *freeze-thaw*, dan penyerapan, masih menjadi lingkup dengan data terbatas pada banyak studi. Beberapa penelitian [8], [9] menunjukkan bahwa pengurangan porositas melalui *admixture pozzolanic* atau sifat agregat dapat memperbaiki durabilitas, tetapi diperlukan uji jangka panjang untuk validasi aplikasi struktur. Kekurangan data durabilitas ini menjadi salah satu batasan penting pada literatur beton ringan saat ini.

Dalam ranah *artificial aggregate* (AA) berbasis limbah industri, penggunaan *fly ash* yang dikombinasikan dengan resin/*epoxy* sebagai matriks pengikat masih relatif jarang dalam studi-studi tinjauan komprehensif menunjukkan kemajuan pada model prediktif dan penelitian agregat buatan namun menyoroti celah penelitian khusus pada kombinasi *fly ash + resin* untuk agregat buatan yang teruji secara mekanik dan densitasnya [10]. Hal ini menandakan peluang riset eksperimental untuk menguji apakah pendekatan campuran *fly ash* dan resin *epoxy* mampu menghasilkan AA yang memiliki densitas rendah dengan kuat tekan yang dapat diterima.

Berdasarkan sintesis temuan-temuan tersebut, khususnya potensi *fly ash cenospheres* sebagai mikro-agregat ringan [5], efektivitas sifat agregat dalam meningkatkan *specific gravity* dan kekuatan [6], serta gap literatur pada agregat buatan berbasis resin. Penelitian ini berfokus pada analisis perbandingan berat jenis dan kuat tekan antara beton normal (BN) dan beton ringan (BR) yang menggunakan AA berbasis *fly ash + epoxy*. Tujuan utamanya adalah mengisi celah pengetahuan dengan menyediakan data eksperimental mengenai apakah agregat buatan berbasis fly-ash yang terikat epoxy dapat menghasilkan beton dengan berat jenis yang lebih rendah tanpa penurunan kekuatan yang besar pada kuat tekan 20 MPa.

2 Material dan Metode

2.1 Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi semen PCC, agregat halus, agregat kasar (batu

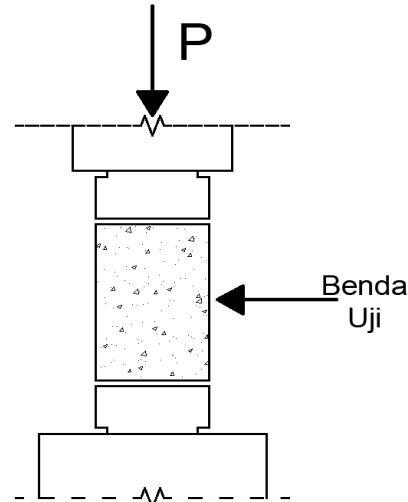
pecah), AA berbahan dasar *fly ash* dan epoxy resin, serta air. Semen yang digunakan memenuhi spesifikasi SNI 2049:2015. Agregat halus berasal dari sumber Tanjung Raja dan disyaratkan memiliki gradasi yang baik serta bebas dari lumpur dan zat organik; sebelum digunakan agregat halus di karakterisasi melalui pengujian kadar air (SNI 1971:2011), kadar lumpur (ASTM C117), kandungan organik (SNI 2816:2014), analisis saringan (ASTM C136), berat volume (SNI 03-4804-1998), serta *specific gravity* dan penyerapan (SNI 1970:2016). Agregat kasar yang digunakan untuk beton kontrol BN berupa batu pecah (split) yang juga diuji gradasi, berat volume, kadar air, *specific gravity*, dan penyerapan menurut standar yang berlaku (SNI 1969:2016) untuk memastikan kesesuaian sebagai bahan struktur.

2.2 Pembuatan Artificial aggregate

AA dikembangkan dari *Fly ash* tipe F yang berasal dari PT. Pupuk Sriwijaya yang berperan sebagai *filler/phase* pembentuk butir ringan dan epoxy resin beserta hardener sebagai perekat. Pembuatan dilakukan berdasarkan Langkah-langkah yang diterapkan pada penelitian [11]. *Fly ash* dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C selama 24 jam untuk menghilangkan kandungan air, lalu disaring dan hanya bagian yang lolos saringan No. 100 yang dipilih untuk proses pembuatan butir. Epoxy resin dan hardener dicampur dengan perbandingan berat resin : *hardener* = 2 : 1 dan dihomogenkan menggunakan *mixer* laboratorium pada kecepatan sedang selama ±3 menit; larutan epoxy yang homogen kemudian dicampurkan ke dalam *Fly ash* secara *simple mixing* selama ±5 menit hingga tercapai pencampuran yang seragam. Campuran *Fly Ash-epoxy* dibentuk menjadi butiran bulat pipih secara manual, dibiarkan pada kondisi ruang selama kurang lebih 3 jam sampai permukaan mengering dan memperoleh kekakuan awal, kemudian hasil tersebut dihancurkan menggunakan palu bodem sehingga menghasilkan fragmen berukuran yang lebih kecil. Gunakan ayakan saringan pada pecahan AA dengan ukuran terbesar yang lolos gradasi 19 mm (3/4 inch) dan terkecil tertahan di gradasi 4,75 mm (No.4) yang akan digunakan sebagai material beton ringan (BR).

Peralatan laboratorium yang digunakan mencakup neraca digital terkalibrasi, gelas ukur, pan, *mixer* beton, oven, rangkaian saringan hingga No. 100, cetakan silinder Ø150 × 300 mm, alat uji slump, tongkat pematat, peralatan pematat, serta *Universal Testing Machine* (UTM) untuk pengujian kuat tekan. Seluruh prosedur

pembuatan dan pengujian mengikuti acuan standar nasional yang relevan; pembuatan dan perawatan benda uji mengacu pada SNI 2493:2011, sementara pengujian sifat fisik agregat dan pengujian kuat tekan mengacu pada SNI dan ASTM yang tercantum pada bagian pengujian.



Gambar 1 Ilustrasi pengujian kuat tekan beton

2.3 Perencanaan Campuran Beton

Perencanaan campuran dilakukan dengan target kuat tekan rencana dengan nilai $f_c' = 20$ MPa untuk beton kontrol. *Job Mix Formula* (JMF) disusun berdasarkan karakterisasi bahan sehingga diperoleh proporsi material per m³ yang direkapitulasi untuk mempermudah penimbangan batch. Untuk tujuan komparatif dibuat dua tipe campuran, yaitu beton normal (BN) yang tersusun dari semen, agregat kasar (batu pecah), agregat halus, dan air; serta BR yang menggantikan agregat kasar konvensional dengan AA *Fly ash-epoxy* pada volume yang sama sehingga bahan lain (semen, pasir, air) tetap konsisten dengan dasar perencanaan. Konversi antara berat dan volume material dilakukan menggunakan persamaan dasar:

$$\text{Volume material} = \frac{\text{berat material}}{\text{berat jenis}} \quad (1)$$

Tabel 1 menunjukkan proporsi campuran untuk kebutuhan material pembuat sampel beton untuk pengujian.

2.4 Pembuatan benda uji

Pembuatan benda uji mengikuti tata kerja standar. Setiap bahan ditimbang sesuai JMF, kemudian dicampur di dalam *concrete mixer*. Untuk BN, urutan pencampuran

dimulai dengan memasukkan agregat halus dan semen, diaduk sampai homogen, dilanjutkan dengan penambahan agregat kasar dan air secara bertahap hingga tercapai konsistensi yang diinginkan. Untuk BR, agregat buatan dimasukkan terlebih dahulu diikuti agregat halus dan semen, kemudian air ditambah secara bertahap dan diaduk selama ± 4 menit agar tercampur merata. Pengukuran konsistensi campuran dilakukan dengan uji slump sesuai prosedur standar, yaitu mengisi kerucut terpancung secara bertahap, menumbuk tiap lapis 25 kali, dan mengukur penurunan setelah pelepasan kerucut. Hasil slump dicatat untuk setiap *batch* sebagai bagian dari kontrol mutu.

Tabel 1 Kebutuhan material beton normal

PROPORSI CAMPURAN (KG)				
Material	Tiap m ³	Satu silinder	1 silinder	Rasio terhadap semen +20%
Semen	394.23	2.08	2.50	1.00
Agregat halus	729.60	3.86	4.63	1.85
Agregat kasar/ <i>Artificial aggregate</i>	1158.23	6.13	7.36	2.93
Air	167.93	0.89	1.06	0.42

Setiap campuran dimasukkan ke cetakan silinder $\varnothing 150 \times 300$ mm yang telah diberi pelepasan minyak; pengisian dilakukan secara berlapis per sepertiga tinggi *slump* dengan pemadatan tiap lapis menggunakan tongkat pemadat sebanyak 25 kali atau alat pemadat mekanis sesuai standar. Setelah 24 jam, sampel dikeluarkan dari cetakan, diberi penandaan, dan *curing* dalam kondisi perendaman pada suhu sekitar 20 ± 2 °C atau metode *curing* basah lain yang sesuai sampai mencapai umur uji.



Gambar 2 Penimbangan beton



Gambar 3 Pengujian kuat tekan beton

Jumlah sampel yang disiapkan adalah tiga silinder untuk BN (kontrol) dan lima kelompok umur untuk BR 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Dengan tiga sampel pada setiap pengujian, sehingga total sampel BR sebanyak 15 silinder. Rangkaian pengujian meliputi pengukuran berat jenis aktual masing-masing silinder sebelum pengujian kuat tekan serta pengujian kuat tekan pada *Universal Testing Machine* sesuai SNI 1974:2011.

3 Analisis Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Agregat

Karakterisasi agregat halus dilakukan dengan rangkaian uji yang meliputi kadar lumpur, kadar organik, kadar air, berat volume pada kondisi lepas dan padat, absorpsi, *specific gravity* pada berbagai kondisi, modulus kehalusan, dan gradasi.

Tabel 2 Rekapitulasi Pengujian Karakteristik Agregat Halus

No.	Karakteristik	Hasil Pengamatan
1	Kadar lumpur	0,55 %
2	Kadar organik	NO 2
3	Kadar Air	6,339 %
4	Berat Volume — Kondisi Lepas	1,314 kg/L
	Berat Volume — Kondisi Padat	1,407 kg/L
5	Absorpsi	1,215 %
6	Specific gravity — Berat Jenis Curah	2587 kg/m ³
	Specific gravity — Berat Jenis Kering permukaan	2618 kg/m ³
	Specific gravity — Berat Jenis dalam air	2671 kg/m ³
7	Modulus kehalusan	2,446
8	Gradasi agregat	Zona 2 (agak halus)

Karakterisasi agregat kasar dilakukan dengan uji kadar air, berat volume pada kondisi lepas dan padat, absorpsi, *specific gravity*, modulus kehalusan, dan gradasi. Hasil ditunjukkan pada Tabel 3

Tabel 3 Rekapitulasi Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

Karakteristik	Hasil Pengamatan
Kadar Air	1,340 %
Berat Volume — Kondisi Lepas	1,413 kg/L
Berat Volume — Kondisi Padat	1,480 kg/L
Absorpsi	1,210 %
Berat jenis spesifik — Curah	2728 kg/m ³
Berat jenis spesifik — Kering permukaan	2821 kg/m ³
Berat jenis spesifik — Dalam air	2761 kg/m ³
Modulus kehalusan	3,844
Gradasi agregat	40 mm

AA dari hasil pencampuran *fly ash* dan epoxy diuji untuk menentukan *specific gravity* dan penyerapan karena karakteristik berat jenis menjadi parameter kunci dalam BR. Hasil ditunjukkan pada Tabel 4

Tabel 4 Rekapitulasi Pengujian Karakteristik *Artificial aggregates*

Karakteristik	Hasil Pengamatan
Absorpsi	1,02 %
Specific gravity — Curah	1740,8 kg/m ³
Specific gravity — Kering permukaan	1741,7 kg/m ³
Specific gravity — Dalam air	1773,1 kg/m ³

3.2 Nilai Berat Jenis Beton Berdasarkan *Job Mix Formula*

Perencanaan campuran untuk BN disusun menggunakan Job Mix Formula (JMF) dengan target kuat tekan f'_c = MPa. Untuk BN, komposisi per 1 m³ tercatat semen 394,231 kg, pasir 729,604 kg, kerikil 1158,24 kg, dan air 167,929 kg. Untuk BR, prosedur JMF mempertahankan volume agregat sama dengan BN tetapi mengganti kerikil dengan AA sehingga komposisi per 1 m³ menjadi semen 394,23 kg, pasir 729,60 kg, AA 722,41 kg, dan air 167,93 kg. Tabel 5 dan Tabel 6 menyajikan komposisi tersebut.

Tabel 5 Komposisi kebutuhan bahan campuran beton normal untuk 1 m³

Material	Berat (kg)	Volume (m ³)
Semen	394,231	0,168
Pasir	729,604	0,279
Kerikil	1158,24	0,411
Air	167,929	0,168
Total	2450	1,026

Material	Berat (kg)	Volume (m ³)
Semen	394,23	0,168
Pasir	729,60	0,279
Artificial aggregate	722,41	0,411
Air	167,93	0,168
Total	2014,17	1,026

Tabel 6 Komposisi kebutuhan bahan campuran beton ringan untuk 1 m³

Material	Berat (kg)	Volume (m ³)
Semen	394,23	0,168
Pasir	729,60	0,279
Artificial aggregate	722,41	0,411
Air	167,93	0,168
Total	2014,17	1,026

Meskipun volume per 1 m³ direncanakan sama, penggantian agregat kasar oleh AA yang memiliki berat jenis jauh lebih rendah menyebabkan pengurangan berat beton yang signifikan; dari perhitungan berat total, BR yang direncanakan mempunyai berat sekitar 2014,17 kg per m³ dibandingkan BN 2450 kg per m³, sehingga tercatat pengurangan berat 435,83 kg atau sekitar 17,79 % relatif terhadap BN. Pengurangan berat ini konsisten dengan perbedaan *specific gravity* antara AA dan agregat kasar.

3.3 Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* dengan kapasitas 1300 kN. BN diuji pada umur 28 hari dengan tiga sampel, sedangkan BR diuji pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari dengan masing-masing tiga sampel. Tujuan pengujian adalah menentukan nilai kuat tekan terhadap waktu pengerasan serta membandingkan kuat tekan BR terhadap BN sebagai kontrol. Tabel 7 dan tabel 8 menunjukkan data hasil pengujian sampel BN dan BB

Tabel 7 Nilai hasil pengujian berat dan kuat tekan sampel beton normal

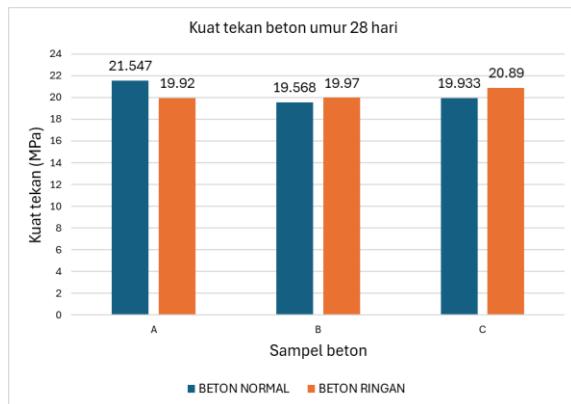
Kode beton	Slump (cm)	Umur (hari)	Berat beton	Kuat tekan (MPa)
BN-A28	12	28	12.7	21,55
BN-B28	12	28	12.6	19,57
BN-C28	12	28	12.6	19,93
Rata-rata				20,35

Tabel 8 Nilai hasil pengujian berat dan kuat tekan sampel beton ringan

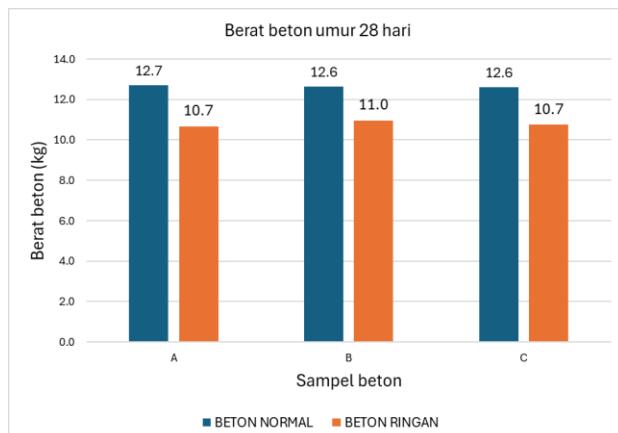
Kode beton	Slump (cm)	Umur (hari)	Berat beton	Kuat tekan (MPa)
BR-A3	8.2	3	10,58	13,16

BR-A7	8.2	7	10,62	17,25
BR-A14	8.2	14	10,68	19,52
BR-A21	12.5	21	10,96	19,63
BR-A28	12.5	28	10,67	19,92
BR-B3	6.2	3	10,66	13,53
BR-B7	6.2	7	10,70	18,34
BR-B14	8.2	14	10,89	19,66
BR-B21	8.2	21	10,79	19,74
BR-B28	12.5	28	10,95	19,97
BR-C3	6.2	3	10,74	14,57
BR-C7	6.2	7	10,69	18,90
BR-C14	8.2	14	10,67	20,28
BR-C21	8.2	21	10,59	20,45
BR-C28	12.5	28	10,75	20,89

3.4 Analisis Perbandingan Berat Jenis dan Kuat Tekan Beton



Gambar 4 Pengujian berat sampel BN dan BR pada umur 28 hari



Gambar 5 Pengujian kuat tekan sampel BN dan BR pada umur 28 hari

Berdasarkan hasil pengujian eksperimen, BR yang dibuat menggunakan AA berbasis *fly ash* dan epoxy resin, dengan metode perhitungan ekuivalensi volume dan berat terhadap BN, Gambar 4 menunjukkan performa mekanik

yang cukup kompetitif. Nilai kuat tekan BR rata-rata pada umur 28 hari sebesar 20,26 Mpa menunjukkan hasil yang mendekati BN yang kuat tekan sebesar 20,35 Mpa pada umur 28 hari, meskipun terdapat sedikit penurunan dibandingkan dengan BN pada sampelnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa *job mix formula* yang umum digunakan untuk BN yang menggunakan standar SNI masih dapat diaplikasikan pada BR berbasis *Artificial Aggregate*, dengan penyesuaian kecil pada proporsi campuran untuk menyeimbangkan perbedaan berat jenis dan sifat pengikatan agregat.

Walaupun terjadi sedikit penurunan pada kuat tekan, hasil perbandingan berat total antara BR dan BN menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan. Gambar 5 menunjukkan penurunan berat yang merupakan indikasi bahwa penggunaan *Artificial Aggregate* secara efektif mampu mengurangi berat jenis beton secara keseluruhan. Dari hasil pemeriksaan berat satuan BR, baik hasil uji maupun perhitungan dari berat rata-rata benda uji, diperoleh data yang konsisten dengan teori bahwa penggantian agregat normal dengan agregat ringan berdampak langsung terhadap penurunan densitas beton.

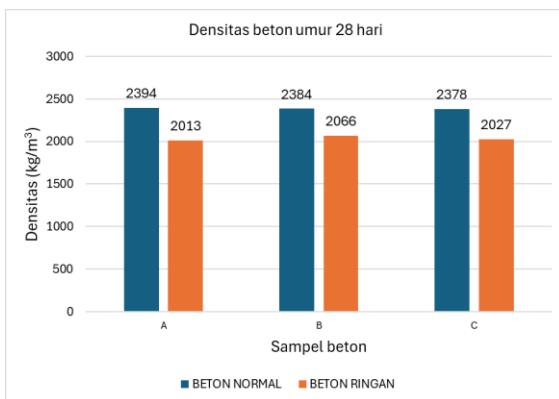
Tabel 9 Berat sampel beton normal

Kode Beton	Berat benda uji (kg)	Berat rata-rata (kg)
BN-A28	12,69	
BN-B28	12,639	12,645
BN-C28	12,605	

Tabel 10 Berat sampel beton normal

Kode Beton	Berat benda uji (kg)	Berat rata-rata (kg)
BR3-A	10.580	
BR3-B	10.658	
BR3-C	10.741	
BR7-A	10.620	10.728
BR7-B	10.695	
BR7-C	10.687	
BR14-A	10.678	

BR14-B	10.893
BR14-C	10.665
BR21-A	10.956
BR21-B	10.790
BR21-C	10.585
BR28-A	10.674
BR28-B	10.952
BR28-C	10.745



Gambar 6 Densitas sampel BN dan BR pada umur 28 hari

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa berat rata-rata BR adalah sebesar 10,728 kg, sedangkan BN memiliki berat rata-rata sebesar 12,645 kg. Selisih tersebut menegaskan bahwa BR memiliki reduksi berat yang cukup signifikan dibandingkan BN, yaitu sekitar 15% dari total berat. Perbedaan ini terutama disebabkan oleh karakteristik fisik agregat buatan yang digunakan. Agregat buatan berbasis *fly ash*-epoxy memiliki berat jenis sebesar 1740,8 kg/m³, jauh lebih rendah dibandingkan agregat kasar konvensional yang memiliki berat jenis 2821 kg/m³.

Gambar 6 menunjukkan perbedaan berat jenis BN dan BB, ini secara langsung memengaruhi berat total beton karena berbanding lurus dalam rumusnya. Agregat dengan berat jenis lebih rendah menghasilkan volume beton yang lebih besar untuk berat yang sama, sehingga beton yang dihasilkan menjadi lebih ringan. Sampel BN dan BR berumur 28 hari memiliki masing-masing densitas rata-rata sebesar 2385 kg/m³ dan 2035 kg/m³. Selain itu, komposisi mikrostruktur dari *artificial aggregate*, yang memiliki pori-pori halus akibat proses pencampuran *fly ash* dan epoxy, turut memberikan efek penurunan berat tanpa menyebabkan degradasi signifikan pada sifat mekanik utama seperti kuat tekan.

Fenomena ini menunjukkan bahwa BR berbasis *artificial aggregate* memiliki potensi besar untuk diaplikasikan pada struktur bangunan yang membutuhkan reduksi beban mati, seperti pada elemen lantai, panel dinding pracetak, atau struktur bertingkat tinggi. Dengan perbandingan berat yang jauh lebih rendah dan kuat tekan yang masih berada dalam rentang standar beton struktural ringan, material ini menawarkan keseimbangan antara efisiensi struktural dan keberlanjutan penggunaan material.

4 Kesimpulan

Temuan utama penelitian ini menunjukkan bahwa BR dengan AA mencapai densitas rata-rata 2035 kg/m³ dan kuat tekan rata-rata 20,26 MPa pada umur 28 hari, yang hampir setara dengan beton normal (BN). Berikut penjelasan lebih detailnya:

- (1) Hasil pengujian menunjukkan bahwa BR memiliki berat jenis rata-rata sebesar 2035 kg/m³, lebih rendah sekitar 14–15% dibandingkan BN dengan rata-rata sebesar 2385 kg/m³. Penurunan berat jenis ini terutama disebabkan oleh penggunaan AA yang memiliki berat jenis lebih rendah yaitu 1740,8 kg/m³ dibandingkan agregat kasar yaitu 2821 kg/m³. Dengan demikian, material ini berpotensi digunakan untuk mengurangi beban mati struktural secara efektif.
- (2) Kuat tekan BN rata-rata mencapai 20,35 MPa, sedangkan BR mencapai 20,26 MPa. Nilai ini menunjukkan bahwa penggunaan agregat buatan tidak memberikan penurunan signifikan terhadap kuat tekan. Hasil tersebut menegaskan bahwa BR dengan agregat *fly ash*-epoxy masih memenuhi kriteria beton struktural normal dengan kuat tekan rencana sekitar 20 MPa.
- (3) Hasil penelitian ini membuktikan bahwa BR tersebut memiliki keseimbangan antara pengurangan berat dan kekuatan mekanik.

5 Rekomendasi Penelitian Lanjutan

Penelitian ini berfokus pada sifat fisik berat jenis dan kuat tekan beton. Durabilitas jangka panjang seperti *Heat-resistance concrete*, dan *chloride testing*, belum diuji dan merupakan faktor penting dalam pengujian beton. Mengingat epoxy sebagai binder agregat, uji

perilaku termal, *aging* dan uji penetrasi klorida direkomendasikan untuk penelitian berikutnya.

Kemudian untuk catatan pada nilai ekonomi dan lingkungan, penggunaan *epoxy* pada pembuatan AA berpotensi meningkatkan biaya material dibandingkan agregat alami. Namun, pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan baku memberikan keuntungan pengurangan limbah industri. Oleh karena itu, studi kelayakan ekonomi (cost analysis) dan life cycle assessment (LCA) diperlukan untuk menilai trade-off antara biaya produksi dan manfaat lingkungan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Prof. Dr. Ir. H. Anis Saggaff, MSCE., MKU., IPU., ASEAN.Eng. APEC.Eng selaku pembimbing pertama atas bimbingan, arahan, serta motivasi yang diberikan selama proses penelitian ini hingga berhasil diselesaikan dengan baik. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Ibu Dr. Ir. Saloma, S.T., M.T. selaku pembimbing dalam penyusunan paper, atas bantuan, saran, dan dukungan yang sangat berharga sehingga karya ilmiah ini dapat tersusun dan siap dipresentasikan pada Seminar Avoer 2025. Tidak lupa, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada keluarga tercinta atas doa, dukungan moral, serta semangat yang tiada henti hingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] O. Uysal, İ. Uslu, C. B. Aktaş, B. Chang, and İ. Ö. Yaman, “Physical and Mechanical Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete,” *Buildings*, vol. 14, no. 6, p. 1871, Jun. 2024, doi: 10.3390/buildings14061871.
- [2] A. Pujiyanto, H. Prayuda, F. Asani, M. B. Santoso, and F. Wirawan, “Influence of Expanded Clay Aggregate on the Engineering Properties of Lightweight Concrete,” *Ingeniería e Investigación*, vol. 44, no. 1, p. e106174, Feb. 2024, doi: 10.15446/ing.investig.106174.
- [3] S. KIMURA and N. SUZUKI, “The Effect of Qualities of Artificial Lightweight-Aggregate upon Compressive Strength of the Concrete,” *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, vol. 15, no. 157, pp. 699–706, 1966, doi: 10.2472/jsms.15.699.
- [4] Akshaya Varghese, Amrutha Shaji, Diyana Tomy, Jomet Thomas, and Bennet Kuriakose, “An experimental study of concrete with expanded clay replacement,” *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research-DISCONTINUED*, Dec. 2023, doi: 10.7770/safer-V12N-art761.
- [5] G. W. Leong, K. H. Mo, Z. Ibrahim, M. K. H. Radwan, T.-C. Ling, and S. S. Sinoh, “Lightweight cementitious composites incorporating fly ash cenospheres and perlite microspheres,” *Constr Build Mater*, vol. 404, p. 133226, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133226.
- [6] H. AlSharie, “Properties of Lightweight Concrete Containing Treated Pumice by Alkaline Solution,” *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 124–131, Jan. 2016, doi: 10.14525/JJCE.10.1.3410.
- [7] H. A. Numan, M. H. Yaseen, and H. A. M. S. Al-Juboori, “Comparison Mechanical Properties of Two Types of Light Weight Aggregate Concrete,” *Civil Engineering Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 1105–1118, May 2019, doi: 10.28991/cej-2019-03091315.
- [8] M. Ibrahim, A. Ahmad, M. S. Barry, L. M. Alhems, and A. C. Mohamed Suhoothi, “Durability of Structural Lightweight Concrete Containing Expanded Perlite Aggregate,” *Int J Concr Struct Mater*, vol. 14, no. 1, p. 50, Dec. 2020, doi: 10.1186/s40069-020-00425-w.
- [9] M. C. Stratoura, G.-E. D. Lazari, E. G. Badogiannis, and V. G. Papadakis, “Perlite and Rice Husk Ash Re-Use As Fine Aggregates in Lightweight Aggregate Structural Concrete—Durability Assessment,” *Sustainability*, vol. 15, no. 5, p. 4217, Feb. 2023, doi: 10.3390/su15054217.
- [10] J. Fořt, A. Afolayan, I. Medved', L. Scheinherrová, and R. Černý, “A review of the role of lightweight aggregates in the development of mechanical strength of concrete,” *Journal of Building Engineering*, vol. 89, p. 109312, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jobr.2024.109312.
- [11] A. Firda, A. Saggaff, Hanafiah, and Saloma, “Experimental study of artificial lightweight aggregates using coal fly ash and epoxy resin,” *Engineering Solid Mechanics*, vol. 11, no. 4, pp. 369–378, 2023, doi: 10.5267/j.esm.2023.5.007.