

## PENGARUH RCA PADA BETON DENGAN PENINGKATAN MUTU RCA OLEH BAHAN POZZOLAN

Ahmad Yudi<sup>1,\*</sup>, Ayu Sinta Aprilia<sup>1</sup>, Anggarani Budi Ribowo<sup>1</sup>, Kirtinanda P<sup>1</sup>, Alfajar Puja Kusuma<sup>1</sup>, Sultan Aziz Azhami<sup>1</sup>, Yoel Parulian Tambunan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Sumatera  
Jln Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kecamatan Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung 35365

\*Corresponding authors: [ahmad.yudi@si.itera.ac.id](mailto:ahmad.yudi@si.itera.ac.id)

**Abstract:** The increasing demand for concrete has driven the search for more sustainable construction materials, one of which is the use of recycled concrete aggregate (RCA) as a partial substitute for natural coarse aggregate. However, characteristics of RCA such as residual cement paste and relatively high porosity can reduce its performance in concrete mixtures. Therefore, this study applies a treatment using pozzolanic materials to improve the quality of RCA before use. This research compares the physical properties of treated and untreated RCA and evaluates the effect of RCA substitution on concrete compressive strength. The quality enhancement of RCA was carried out by soaking it in a mixture of pozzolanic materials (nano silica, silica fume, and fly ash) and Portland cement for 3, 4, and 5 hours. The treated RCA was then used to replace part of the coarse aggregate at substitution levels of 25%, 50%, and 75% by weight. The results showed that a 4-hour treatment duration yielded the best performance. Treated RCA exhibited higher specific gravity, lower water absorption, and less abrasion compared to untreated RCA. At 28 days of age, concrete with 25% treated RCA substitution achieved the highest compressive strength: 24.83 MPa (nano silica), 24.19 MPa (silica fume), and 23.55 MPa (fly ash), compared to 23.17 MPa for untreated RCA. These findings indicate that RCA treatment using pozzolanic materials is effective in improving the quality of recycled aggregates and concrete compressive strength, thus offering potential as a more sustainable and environmentally friendly structural material.

**Keywords:** recycled concrete aggregate, pozzolanic materials, quality improvement, compressive strength, abrasion

**Abstrak:** Kebutuhan beton yang terus meningkat mendorong pencarian alternatif material konstruksi yang lebih berkelanjutan, salah satunya melalui pemanfaatan *recycled concrete aggregate* (RCA) sebagai substitusi sebagian agregat kasar alami. Namun, karakteristik RCA seperti adanya residu pasta semen dan porositas yang relatif tinggi dapat menurunkan kinerjanya dalam campuran beton. Oleh karena itu penelitian ini menerapkan *treatment* menggunakan bahan pozzolan untuk meningkatkan kualitas RCA sebelum digunakan. Penelitian ini membandingkan sifat fisik RCA yang telah dan belum mengalami *treatment*, serta mengevaluasi pengaruh substitusi RCA terhadap kuat tekan beton. Peningkatan mutu RCA dilakukan melalui perendaman dalam campuran bahan pozzolan (*nano silica*, *silica fume* dan *fly ash*) serta semen Portland selama 3, 4, dan 5 jam. RCA hasil *treatment* kemudian digunakan sebagai substitusi sebagian agregat kasar dengan variasi 25%, 50%, dan 75% dari total berat agregat kasar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RCA *treatment* selama 4 jam memberikan performa terbaik. RCA yang telah melalui *treatment* memiliki berat jenis lebih tinggi, penyerapan air lebih rendah, dan keausan lebih kecil dibandingkan RCA *non treatment*. Pada umur 28 hari, beton dengan substitusi 25% RCA hasil *treatment* menunjukkan kuat tekan tertinggi, yaitu 24,83 MPa (*nano silica*), 24,19 MPa (*silica fume*), dan 23,55 MPa (*fly ash*), dibandingkan RCA *non treatment* yang hanya mencapai 23,17 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa *treatment* RCA menggunakan bahan pozzolan efektif dalam meningkatkan mutu agregat daur ulang dan kuat tekan beton, sehingga berpotensi digunakan sebagai material struktural yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

**Kata kunci:** : *recycled concrete aggregate*, bahan pozzolan, peningkatan mutu, kuat tekan, keausan.

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan pesat sektor konstruksi sejalan dengan peningkatan jumlah penduduk menyebabkan lonjakan kebutuhan akan material bangunan, khususnya beton. Beton merupakan material konstruksi paling banyak digunakan di dunia karena kekuatannya, kemudahan dalam pembentukan, serta daya tahan yang tinggi (Meyer, 2009). Namun, produksi beton dalam skala besar juga memicu eksploitasi agregat alam secara masif, yang berdampak buruk terhadap lingkungan. Di sisi lain, sektor konstruksi juga menjadi salah satu penyumbang terbesar limbah bangunan, terutama limbah beton dari pembongkaran struktur (Tam et al., 2018).

Salah satu solusi berkelanjutan untuk mengatasi permasalahan ini adalah pemanfaatan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA), yaitu agregat kasar yang diperoleh dari daur ulang limbah beton. Meskipun secara teknis RCA dapat digunakan sebagai substitusi agregat kasar alami, kualitas RCA umumnya lebih rendah karena mengandung pasta semen lama yang rapuh dan memiliki porositas tinggi (Malešev et al., 2010; Ismail & Ramli, 2013). Hal ini berdampak negatif terhadap sifat mekanik beton seperti kuat tekan, durabilitas, dan workabilitas.

Untuk meningkatkan mutu RCA, berbagai teknik telah dikembangkan, seperti yang telah dilakukan oleh (Shaban, et al., 2019) dengan mencampurkan RCA dalam campuran bahan pozzolan (*nano silica*, *silica fume*, dan *fly ash*) dan semen Portland. Material pozzolan, memiliki kemampuan pengisian mikro pori dan reaktivitas tinggi terhadap kalsium hidroksida sehingga berpotensi memperbaiki zona transisi antarmuka (*Interfacial Transition Zone / ITZ*) antara RCA dan pasta semen baru (Gong et al., 2020; William et al., 2023). Pada penelitian ini terdapat perbedaan dengan penelitian sebelumnya, dimana bahan pozzolan yang dipakai tidak dicampur secara langsung kedalam proses *mixing* melainkan dilakukan proses *treatment* tersendiri terlebih dahulu yaitu dengan proses perendaman sebelum digunakan sebagai bahan campuran beton.

Melalui penelitian ini, dilakukan perbandingan sifat fisik RCA dengan dan tanpa

perlakuan perendaman menggunakan bahan pozzolan, serta evaluasi pengaruh substitusi RCA terhadap kuat tekan beton pada umur 28 hari. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi beton berkelanjutan dengan memanfaatkan material daur ulang secara efektif dan efisien.

## 2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini merupakan kuantitatif eksperimental. Penelitian ini berfokus membahas penggunaan *recycled concrete aggregate* sebagai bahan substitusi sebagian agregat kasar baik itu RCA yang dilakukan *improvement* dengan bahan pozzolan (*silica fume*, *nano silica*, dan *fly ash*) maupun dengan yang tidak dilakukan *improvement* dengan variasi substitusi agregat kasar sebesar 25%, 50%, dan 75% dari berat total agregat kasar per 3 sampel. Kuat tekan yang direncanakan sebesar 25 MPa, dengan bentuk benda uji yaitu silinder, berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm.

### *Improvement of recycled concrete aggregate*

Penelitian ini menerapkan metode *pozzolanic treatment* menggunakan bahan pozzolan (*nano silica*, *silica fume*, *fly ash*) dan semen untuk meningkatkan kualitas RCA. Penggunaan bubuk pozzolan dengan kadar SiO<sub>2</sub> tinggi memungkinkan reaksi dengan kalsium hidroksida dalam mortar. Reaksi ini menghasilkan material yang mengisi pori-pori mortar, sehingga mengurangi penyerapan air dan meningkatkan kekuatan mortar (Shaban, et al., 2019). Pada penelitian ini dibuat tiga sampel berbeda untuk waktu perendaman selama 3, 4, dan 5 jam dan variasi waktu perendaman tersebut diberlakukan pada semua jenis bahan pozzolan yang dipakai pada penelitian ini, dengan harapan makin lama perendaman dan variasi bahan pozzolan maka semakin meningkat pula kualitasnya. Dapat dilihat pada Tabel 1 merupakan kebutuhan berat RCA dan persentase campuran *nano silica* (NS), *silica fume* (SF), dan *fly ash* (FA) serta semen (C) yang ingin dilakukan perendaman per variasi waktu. Untuk Tabel 2 merupakan komposisi bahan pozzolan yang ingin dipakai sebagai bahan *treatment* RCA sebesar 40% dari berat RCA yang akan dilakukan *treatment*.

**Tabel 1.** Kebutuhan Bahan *Treatment*

Jenis Campuran	Persentase Campuran	Waktu Perendaman			Total
		4 Jam	6 Jam	8 Jam	
NS & C	40%	5 Kg	5 Kg	5 Kg	15 Kg
SF & C	40%	5 Kg	5 Kg	5 Kg	15 Kg
FA & C	40%	5 Kg	5 Kg	5 Kg	15 Kg

**Tabel 2.** Komposisi Campuran *Treatment*

Persentase Campuran	Campuran (Kg)		RCA (Kg)	Air (Kg)
	Semen	Pozzolan		
40% NS	1	1	5	10
40% SF	1	1	5	10
40% FA	1	1	5	10

Setelah dilakukan *treatment*, akan dilakukan pengujian berat jenis dan penyerapan serta uji keausan terhadap RCA dan hasil terbaik dari masing-masing bahan pozzolan akan dipakai sebagai bahan substitusi sebagian agregat kasar pada campuran beton.

### Pengujian bahan

Berikut merupakan beberapa pengujian yang dilaksanakan pada penelitian ini:

#### a. Agregat Kasar

Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap agregat kasar untuk mengetahui sifat fisik agregat kasar yang akan dipakai pada campuran beton. Tahapan dan standar yang dilakukan mengikuti spesifikasi SNI yang berlaku. Adapun tahapan pengujian sebagai berikut:

- 1) Uji analisis saringan agregat kasar menurut SNI 03 2843-2000, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran gradasi agregat dan juga nilai modulus kehalusan.
- 2) Uji berat volume, pengujian ini bertujuan membandingkan antara volume agregat dan berat kering agregat.
- 3) Uji ASG dan penyerapan agregat, pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai berat jenis semu, kering, dan SSD serta penyerapan agregat kasar.
- 4) Uji kadar air, pengujian ini bertujuan untuk menghitung persentase kadar air yang terdapat pada agregat kasar.

5) Uji keausan, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat ketahanan agregat terhadap tingkat keausan, pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mesin *Los Angeles*.

6) *Recycled concrete Aggregate*, RCA atau limbah beton dipakai pada penelitian ini sebagai bahan substitusi sebagian agregat kasar. Material RCA juga dilakukan pengujian properties agar mengetahui kelayakan dari RCA, pengujian yang dilakukan sama seperti pengujian agregat kasar.

#### b. Agregat Halus

Pengujian ini dilakukan untuk melihat kualitas dari agregat halus yang akan dipakai. Berikut tahapan pengujian agregat halus:

- 1) Analisis saringan agregat halus, pengujian ini bertujuan untuk melihat gradasi yang terdapat pada agregat serta menentukan nilai modulus kehalusan agregat halus.
- 2) Uji berat volume, pengujian ini bertujuan membandingkan antara volume agregat dan berat kering agregat halus.
- 3) Uji ASG dan penyerapan agregat, pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai berat jenis semu, kering, dan SSD serta penyerapan agregat halus.
- 4) Uji kadar air, pengujian ini bertujuan untuk menghitung persentase kadar air yang terdapat pada agregat halus.
- 5) Uji kandungan zat organik pada agregat halus, pengujian ini bertujuan guna mengidentifikasi kadar zat organik yang dapat mempengaruhi mutu beton.
- 6) Uji kadar lumpur, pengujian ini bertujuan untuk melihat kandungan persentase kadar lumpur yang terdapat pada agregat halus.

#### c. Semen

Semen yang dipakai pada penelitian ini adalah semen *portland* tipe *Ordinary Portland Cement* (OPC). Semen yang layak menjadi bahan campuran adalah semen yang lolos dari ayakan no. 200, sehingga semen yang akan dipakai tidak menggumpal dan dapat mudah tercampur pada proses *mixing*.

**Variasi benda uji**

Pada penelitian ini terdapat beberapa variasi campuran substitusi agregat kasar, seperti yang tertera pada Tabel 3 untuk masing-masing bahan pozzolan akan dibuat 21 sampel. Sehingga jumlah total sampel yang akan dibuat sebanyak 63 sampel. Berikut merupakan variasi yang akan digunakan per 1 bahan pozzolan:

**Tabel 3.** Variasi Campuran Beton

Jenis Benda Uji	Persentase Penggunaan RCA (%)	Umur Pematangan Beton (Hari)	Jumlah Benda Uji
Normal	0	28	3
RCA Non Improvement	25		3
	50		3
	75		3
RCA Improvement	25		3
	50		3
	75	3	
Total			21

**Pembuatan benda uji**

Terdapat beberapa tahapan yang akan dilakukan dalam proses pembuatan benda uji di penelitian kali ini yaitu sebagai berikut:

- a. Persiapan alat-alat dan bahan sesuai dengan komposisi rencana, seperti agregat kasar, agregat halus, RCA, air, dan semen.



- b. Pencampuran beton menggunakan molen, setelah seluruh bahan sudah ditimbang dan sesuai dengan komposisi yang sudah direncanakan berdasarkan *mix design*. Bahan dimasukkan secara bertahap dengan diawali agregat halus, agregat kasar (jika variasi substitusi sesuaikan dengan persentasenya), semen, lalu air dimasukkan secara bertahap.
- c. Pengujian *slump*, pengujian ini dilakukan demi mengetahui tingkat konsistensi atau kekentalan yang dihasilkan dalam campuran beton yang sudah direncanakan sesuai dengan *mix design* yang ada, langkah kerja yang akan dilakukan dalam pengujian ini adalah adukan beton segar yang sudah dicampurkan dengan sempurna kemudian

dimasukkan kedalam kerucut abrams dengan dialaskan pelat baja.

- d. Pencetakan beton, setelah dilakukan pengujian *slump* dengan nilai hasil yang sesuai dengan rencana, campuran beton yang sudah sesuai dapat dimasukkan kedalam cetakan beton silinder dengan ukuran diameter 100 mm dan tinggi 200 mm yang sudah diolesi dengan oli pada bagian dinding dalamnya.
- e. Pemadatan campuran dalam cetakan yang dilakukan dengan memukul cetakan yang sudah terisi dengan campuran beton dengan palu karet.
- f. Pelepasan cetakan beton, proses ini dapat dilakukan setelah campuran beton sudah mengeras dan solid, pada penelitian ini cetakan beton dilepas setelah 24 jam campuran didiamkan dalam cetakan, kemudian diberikan keterangan jenis sampel.

**Perawatan beton (*curing*)**

Proses perawatan dan pematangan beton (*curing*) memiliki tujuan untuk memastikan reaksi hidrasi yang terjadi pada senyawa semen yang sudah diberikan material substitusi agar dapat matang dengan optimal agar mutu beton yang direncanakan dapat tercapai. Perawatan beton yang dilakukan pada penelitian ini sebesar 28 hari, sebelum dilakukan proses uji kuat tekan.

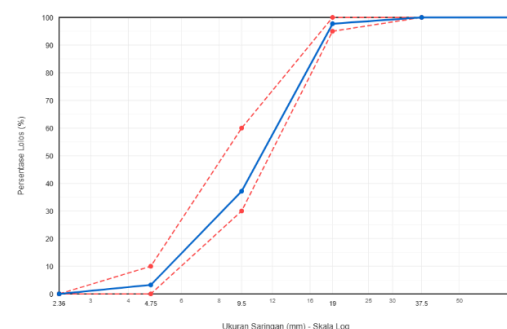
**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berikut merupakan pembahasan mengenai hasil dari pengujian dan kuat tekan pada penelitian ini:

**Pengujian sifat RCA**

- a. Analisis Saringan RCA

Pada pengujian pertama dilakukan uji analisis saringan pada RCA, dilakukan untuk melihat bentuk gradasi pada RCA apakah memenuhi nilai batas atas dan batas bawah.



**Gambar 1.** Grafik gradasi analisis saringan RCA

Berdasarkan Gambar 1 gradasi RCA yang didapat dari hasil analisis saringan menunjukkan bahwa nilai gradasi RCA masih memenuhi nilai batas atas-bawah, meskipun nilai gradasi per saringannya tidak jauh dari nilai batas bawah, RCA masih dapat terbilang lolos uji analisis saringan.

b. Berat Jenis dan Penyerapan RCA Serta Keausan Agregat

Pengujian ini dilakukan untuk menghitung berat jenis dan persentase penyerapan air serta tingkat keausan pada RCA. Pada proses pengujian terhadap RCA treatment didapatkan hasil yang paling optimal pada variasi waktu perendaman selama 4 jam pada masing-masing jenis bahan pozzolan.

**Tabel 4.** Hasil Pengujian RCA dengan Perendaman 4 Jam

Pen-gujian	NA	RCA	SF	NS	FA
BJ Semu	2,616	3,03	2,66	2,66	2,65
BJ Ker- ing	2,532	2,72	2,51	2,51	2,5
BJ SSD	2,564	2,82	2,57	2,57	2,56
Penye- ra- pan	1,26%	3,73%	2,34 %	2,28%	2,37%
Uji Keau- san	14,52 %	23,30 %	15,12	13,54 %	18,76 %

Berdasarkan Tabel 4 perolehan nilai terbaik berada pada RCA treatment dengan menggunakan bahan pozzolan nano silica. Hal ini sesuai dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Shaban, et al., 2019) dimana untuk treatment nano silica memang menghasilkan nilai paling optimal. Perlakuan ini dapat dibilang berpengaruh karena pori-pori yang ada pada mortar dapat disumbat oleh nano silica, mengingat bahwa nano silica memiliki ukuran permukaan lebih kecil daripada bahan pozzolan lainnya sehingga pengisian ruang pada pori-pori agregat lebih optimal.

**Slump test**

Uji slump test dilaksanakan pada beton silinder, uji ini dilakukan pada setiap campuran beton sebelum dilakukan pencetakan.

**Tabel 5.** Nilai Slump Setiap Variasi

Bahan Poz- zolan	Kadar RCA			
	0%	25%	50%	75%

Nano Silica	7,6 cm	7,9 cm	6,4 cm	5,5 cm
Silica Fume	7,6 cm	7,7 cm	6,2 cm	5,5 cm
Fly Ash	7,6 cm	7,5 cm	5,8 cm	5,2 cm
Non Treat- ment	7,6 cm	6,8 cm	5,3 cm	4,8 cm

Berdasarkan Tabel 5 nilai slump yang didapat merupakan dengan penggunaan RCA treatment variasi perendaman 4 jam. Didapatkan nilai slump pada tiap variasi kadar campuran RCA dengan masing-masing bahan pozzolan dengan nilai terbaik berada pada kadar RCA 25% dengan treatment nano silica yaitu 7,9 cm. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan nano silica melapisi permukaan pada RCA dan mengisi rongga pori-pori RCA sehingga daya serap airnya menjadi berkurang membuat proses slump menjadi lebih stabil. Dari hasil tabel diatas dapat dianalisis bahwa substitusi RCA pada beton dapat mempengaruhi nilai slump beton baik itu RCA yang telah dilakukan treatment maupun yang tidak dilakukan perbaikan, akan tetapi untuk RCA yang tidak dilakukan treatment mendapati nilai slump yang tidak baik hal itu dimungkinkan terjadi dikarenakan RCA sendiri memiliki sisa-sisa pasta semen yang lama, hal itu menyebabkan daya serap RCA terhadap air menjadi tinggi sehingga nilai slump menurun drastis, dan adukan semen menjadi kaku.

**Berat volume beton**

Tahapan ini dilakukan sebelum dilaksanakannya uji kuat tekan beton.

**Tabel 6.** Rekap Berat Volume Beton

Bahan Pozzolan	Kadar RCA			
	0% (Kg/m <sup>3</sup> )	25% (Kg/m <sup>3</sup> )	50% (Kg/m <sup>3</sup> )	75% (Kg/m <sup>3</sup> )
Nano Silica	2287,59	2278,04	2288,01	2290,98
Silica Fume	2287,59	2293,53	2306,26	2310,93
Fly Ash	2287,59	2288,86	2295,23	2309,02
Non Treat- ment	2287,59	2295,65	2307,11	2312,84

Berdasarkan data yang didapat pada Tabel 6 dapat disimpulkan bahwa terdapat pengaruh variasi substitusi RCA terhadap volume beton. Substitusi RCA non treatment cenderung meningkatkan berat volume beton seiring dengan bertambahnya persentase dari substitusi RCA, yang bahkan berat volume betonnya melebihi berat beton normal, hal ini dimungkinkan terjadi akibat dari pasta semen lama yang meskipun RCA dianggap lebih ringan dibandingkan agregat alami karena adanya porositas, pasta semen lama yang melekat pada RCA dapat menambah massa dari RCA itu sendiri terlebih apabila beton lama yang

digunakan merupakan beton mutu tinggi. Penurunan berat volume pada beton dengan substitusi RCA yang diberi perlakuan dengan berbagai jenis bahan pozzolan juga disebabkan oleh perubahan sifat fisik RCA setelah treatment, proses perlakuan dengan bahan pozzolan dapat mengikis atau melarutkan sebagian pasta semen lama di permukaan RCA, sehingga agregat menjadi lebih ringan (Shaikh. F., 2017). Perlu diperhatikan juga bahwa dengan nilai berat volume yang lebih tinggi bukan berarti memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi juga.

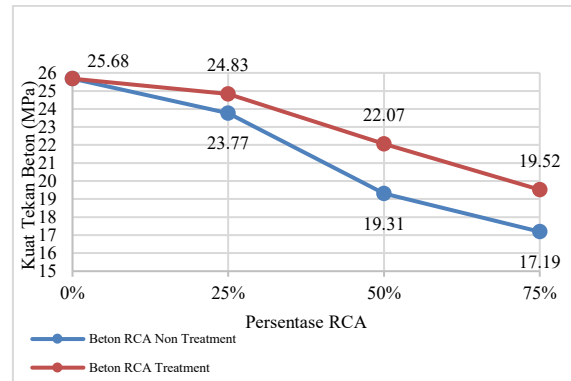
**Pengujian kuat tekan beton silinder**

Pengujian kuat tekan beton dalam penelitian ini dilakukan pada umur beton 28 hari. Kuat tekan beton normal pada penelitian ini didapatkan sebesar 25,68 MPa dan akan digunakan sebagai tolak ukur keberhasilan dari nilai kuat tekan beton yang menggunakan substitusi RCA. Penelitian ini menggunakan beberapa variasi campuran untuk mengevaluasi persentase substitusi RCA *non-treatment* dan *RCA treatment* dengan beberapa jenis bahan pozzolan, guna mengetahui komposisi yang menghasilkan kuat tekan paling optimal di antara seluruh sampel yang diuji.

**Tabel 7.** Rekapitulasi Kuat Tekan Beton

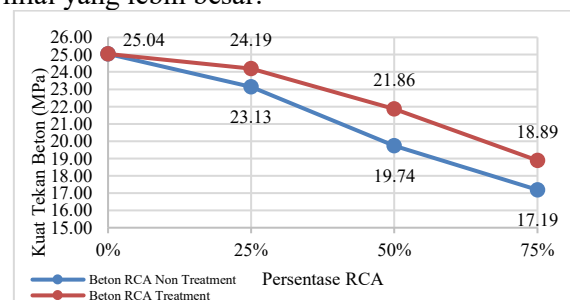
Bahan Pozzo- lan	Kadar RCA			
	0% (MPa)	25% (MPa)	50% (MPa)	75% (MPa)
<i>Nano Silica</i>	25,68	24,83	22,07	19,52
<i>Silica Fume</i>	25,68	24,19	21,86	18,98
<i>Fly Ash</i>	25,68	23,55	21,22	18,25
<i>Non Treatment</i>	25,68	23,13	19,31	17,19

Berdasarkan Tabel 7 untuk *RCA non treatment* ketika digunakan sebagai substitusi agregat kasar terjadi penurunan kuat tekan yang bertahap. Dengan substitusi RCA sebesar 25%, kuat tekan rata-rata menurun menjadi 23,77 MPa, lalu pada 50% menjadi 19,31 MPa, dan mencapai titik terendah di 75% sebesar 17,19 MPa. Penurunan ini dapat dijelaskan oleh sifat RCA yang lebih rapuh dan berpori dibanding agregat alam, serta adanya sisa mortar dari beton lama yang melemahkan daya ikat antar partikel. Absorpsi air yang tinggi dari RCA juga memengaruhi rasio air-semen efektif, sehingga mengurangi kepadatan dan kekuatan beton.



**Gambar 2.** Kuat Tekan Beton RCA Treatment Nano Silica

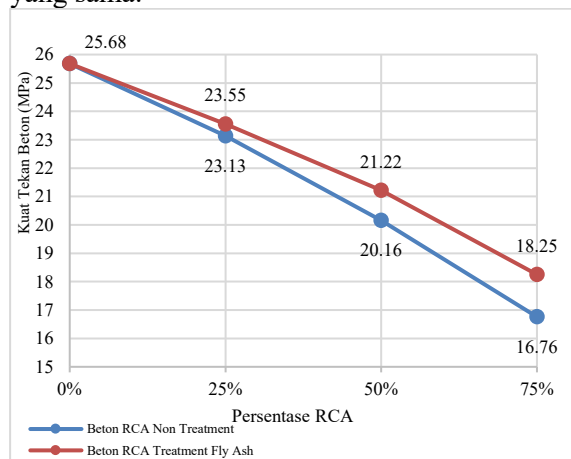
Pada Gambar 2 memperlihatkan perbandingan nilai kuat tekan dengan penggunaan *RCA treatment* dan *RCA non treatment* sebagai substitusi agregat kasar. Berdasarkan grafik itu dapat dikatakan bahwa penguatan RCA dengan bahan pozzolan *nano silica* mempunyai pengaruh terhadap perubahan nilai kuat tekan beton. Pada penggunaan *RCA treatment* 25% didapatkan nilai kuat tekan 24,83 MPa, untuk substitusi 50% sebesar 22,07 MPa, dan untuk substitusi 75% sebesar 19,52 MPa. Jika dibandingkan, tidak ada variasi yang nilainya melebihi kuat tekan beton normal, hanya variasi substitusi 25% yang nilainya mendekati beton normal, akan tetapi jika dibandingkan dengan beton *RCA non treatment* dengan variasi substitusi yang sama nilai kuat tekan beton RCA dengan *treatment nano silica* memiliki nilai yang lebih besar.



**Gambar 3.** Kuat Tekan Beton RCA Treatment Silica Fume

Pada Gambar 3 memperlihatkan perbandingan nilai kuat tekan dengan penggunaan *RCA treatment silica fume* dan *RCA non treatment* sebagai substitusi sebagian agregat kasar. Berdasarkan grafik pada Gambar 2. dapat dikatakan bahwa penguatan RCA dengan bahan pozzolan *silica fume* berpengaruh terhadap perubahan nilai kuat tekan beton. Pada penggunaan *RCA treatment* 25% didapatkan nilai kuat tekan 24,19 MPa, untuk substitusi 50% sebesar 21,86 MPa, dan untuk substitusi 75% sebesar 18,89 MPa. Hanya variasi 25% RCA

*treatment*, kuat tekan mendekati beton normal dengan nilai 24,19 MPa, bahkan melebihi RCA non-treatment dengan variasi yang sama. Perlakuan *silica fume* memberikan efek pozzolanik yang memperbaiki struktur mikro RCA, mengisi pori-pori dan memperkuat zona transisi antar pasta dan agregat. Meskipun pada variasi 50% dan 75% nilai kuat tekan tetap menurun dengan nilai masing-masing 21,86 MPa dan 18,89 MPa, performanya masih lebih baik dibandingkan RCA non-treatment pada variasi yang sama.



**Gambar 4.** Kuat Tekan Beton RCA Treatment Fly Ash

Pada Gambar 4 menyajikan perbandingan nilai kuat tekan beton dengan menggunakan RCA yang telah diberi perlakuan (*treatment*) dan RCA tanpa perlakuan sebagai pengganti sebagian agregat kasar. Berdasarkan grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa penggunaan bahan pozzolan seperti fly ash dalam proses *treatment* RCA memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan mutu beton, khususnya dalam hal kuat tekan. Pada proporsi substitusi RCA *treatment* sebesar 25%, kuat tekan beton mencapai 23,55 MPa. Namun, seiring dengan meningkatnya persentase substitusi menjadi 50% dan 75%, nilai kuat tekan menurun masing-masing menjadi 21,22 MPa dan 18,25 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun *treatment* RCA dapat memperbaiki kualitas agregat daur ulang, peningkatan persentase penggunaannya secara berlebihan tetap berdampak pada penurunan performa mekanis beton.

Berdasarkan hasil pengujian dari berbagai jenis penggunaan pozzolan sebagai bahan penguatan RCA terlihat bahwa nilai yang didapat pada setiap jenis bahan pozzolan dan berbagai variasi penggunaan RCA tidak dapat melebihi dari

beton dengan agregat normal itu sendiri, untuk beton yang menggunakan substitusi RCA *treatment* hanya dapat mendekati nilai dari kuat tekan beton normal tetapi tidak dapat melebihi. Untuk hasil paling optimal yang didapatkan pada penelitian ini terdapat pada penggunaan bahan pozzolan *nano silica* sebagai bahan *treatment* RCA dengan variasi penggunaan RCA pada campuran beton sebesar 25%, nilai yang didapatkan pada variasi tersebut adalah sebesar 24,19 MPa, hal ini dimungkinkan terjadi dikarenakan perlakuan *nano silica* memberikan efek pozzolanik yang memperbaiki struktur mikro RCA, mengisi pori-pori dan memperkuat zona transisi antar pasta dan agregat (Younis, 2018). Secara keseluruhan, penggunaan RCA dalam beton memang berpotensi menurunkan kuat tekan, namun perlakuan dengan bahan pozzolan terbukti mampu meningkatkan kembali kualitas RCA pada beton sehingga beton RCA mampu mendekati atau menyamai beton normal. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan RCA dengan peningkatan mutu menggunakan bahan pozzolan dapat menjadi opsi, terlebih lagi pada RCA dengan *treatment nano silica* pada variasi substitusi 25% merupakan alternatif yang paling optimal, karena memberikan keseimbangan antara pemanfaatan limbah konstruksi dan kinerja struktural beton yang masih dapat diterima secara teknis.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil berbagai jenis pengujian yang telah dilakukan pada penelitian ini, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengujian bahwa RCA *non improvement* memiliki berat jenis semu dan SSD yang tinggi, namun disertai dengan nilai penyerapan air dan keausan yang juga tinggi, masing-masing sebesar 3,73% dan 23,30%. RCA *treatment* dari setiap bahan pozzolan selama 4 jam memberikan hasil paling optimal dari variasi waktu perendaman lainnya, dengan berat jenis semu, persentase penyerapan air, dan keausan agregat untuk bahan *nano silica* sebesar 2,66 gr/cm<sup>3</sup>; 2,28% dan 13,54%, untuk bahan *silica fume* sebesar 2,66 gr/cm<sup>3</sup>; 2,34% dan 15,12%, untuk bahan *fly ash* sebesar 2,65 gr/cm<sup>3</sup>; 2,37% dan 18,76%. Berat jenis agregat hasil *treatment* juga mengalami penyesuaian mendekati nilai agregat alam, menunjukkan adanya penurunan porositas internal. Secara keseluruhan, dari ketiga

bahan pozzolan yang digunakan, *nano silica* memberikan hasil paling optimal dalam meningkatkan kualitas RCA. Hal ini disebabkan ukuran partikel *nano silica* yang sangat halus mampu mengisi mikro pori dan memperbaiki zona transisi antar muka (ITZ), sehingga meningkatkan densitas dan kekuatan beton.

2. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton dengan variasi kadar RCA (0%, 25%, 50%, dan 75%), untuk kadar RCA 25%, semua jenis treatment masih mampu mempertahankan nilai kuat tekan yang cukup tinggi, dengan *nano silica* menunjukkan performa terbaik sebesar 24,83 MPa, diikuti oleh *silica fume* (24,19 MPa), *fly ash* (23,55 MPa), dan *non treatment* (23,13 MPa). Seiring dengan meningkatnya kadar RCA menjadi 50% dan 75%, kuat tekan terus menurun, namun beton dengan *nano silica* tetap menunjukkan nilai tertinggi (22,07 MPa dan 19,52 MPa), sedangkan nilai terendah tercatat pada beton tanpa *treatment* (19,31 MPa dan 17,19 MPa). Secara keseluruhan, *nano silica* terbukti paling efektif dalam menjaga performa kuat tekan beton meskipun pada kadar RCA tinggi, diikuti oleh *silica fume* dan *fly ash*. Beton dengan RCA tanpa *treatment* mengalami penurunan kuat tekan paling signifikan. Dengan demikian, penggunaan bahan pozzolan, terutama *nano silica*, sangat direkomendasikan dalam perbaikan kualitas RCA agar tetap memenuhi standar kekuatan yang dibutuhkan dalam konstruksi beton.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- A.A. Gde Agung Oka W, E. (2018). Pengaruh Penggunaan Silica Fume dan Fly Ash Sebagai Pengganti Semen Terhadap Kuat Tekan Beton Porous Yang Menggunakan RCA.
- Dahlia .P., A. .. (2022). Pengaruh Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Kekuatan Beton. *Jurnal Teknologi Terpadu*, Vol 10 No.2.
- Fadi Althoey, O. Z. (2023). Impact of Nano-silica on the hydration, strength, durability, and microstructural properties of concrete: A state-of-the-art review . *Case Studies in Construction Materials* .
- Faiz Shaikh, V. C. (2017). Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete, Volume 19, Edisi 2*, 387–399.
- Firmandika Dwi Prastiyo, R. H. (2022). PEMANFAATAN LIMBAH PECAHAN BETON SEBAGAI PENGGANTI SEBAGIAN AGREGAT KASAR TERHADAP KUAT TEKAN BETON DENGAN MUTU F'C 18,68 MPa. *Jurnal Nucleus* , Vol. 1 No.1, 21-28.
- Han. S., d. (2023). Performance Improvement of Recycled Concrete Aggregates and Their Potential Applications in Infrastructure: A Review. *Buildings*, 1-23.
- Karen L, d. (2004). The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. *Interface Science*.
- Khaleel H. Younis, S. M. (2018). Feasibility of Using Nanoparticles of SiO<sub>2</sub> to Improve the Performance of Recycled Aggregate Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- M. Krejci Kotlanova, d. (2022). Study of interfacial transition zone in concrete with SCMs . *Study of interfacial transition zone in concrete with*.
- Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled concrete as aggregate for structural . *Sustain*, 5.
- Midia Rahma, M. P. (2024). OPTIMASI KOMPOSISI SILICA FUME DALAM MENINGKATKAN MUTU BETON AGREGAT DAUR ULANG. *JURNAL REKAYASA INFRASTRUKTUR* , Vol. 10 No.1, 46-58.
- Poon, C. S. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. . *Cement and concrete research*, Vol 34 No 1.
- Setiawati, M. (2018). Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton. *Jurnal UMJ*.
- Shaban.W.M., d. (2019). Quality Improvement Techniques for Recycled Concrete Aggregate: A Review. *Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 17*, 151-167.
- Shaban, W. M., Yang, J., Su, H., Liu, Q.-f., Tsang, D. C., Wang, L., . . . Li, L. (2019). Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry. *Construction and Building Materials*, 216.
- Shima, H, T. R. (2005). Teknologi daur ulang beton yang dan penilaian penerapannya berdasarkan analisis input-output. *Journal of Advanced Concrete Technology Vol.3 No.1*.
- Soelarso, B. N. (2016). Pengaruh Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada beton Normal Terhadap Kuat tekan Beton Dan Modulus Elastisitas . *Jurnal Fondasi, Volume 5 No.2*.
- William, M. H. (2023). Analisis Pengaruh Penggunaan Campuran Nano Silika Terhadap Kuat Tekan

Beton Ringan . *Journal of Civil Engineering and Planning, Vol 4*, 128.

Yang, J., Mohseni, E., Behforouz, B., & Khotbehsara, M. (2015). An experimental investigation into the effect of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan ZnO<sub>2</sub> nanoparticles on the mechanical properties and durability of self compacting mortar. *International Journal Material*.

Yingqiang Su, Y. Y. (2023). Modification of Recycled Concrete Aggregate and Its Use in Concrete. *MDPI, 16*.

Younis, K. H. (2018). Feasibility of Using Nanoparticles of SiO<sub>2</sub> to Improve the Performance of Recycled Aggregate Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*.

Yra Maya .S.N.R., S. N. (2023). Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Beton Fc'25. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi), Vol 5*