

LIMBAH BETON DAN FLY ASH DALAM CAMPURAN BETON

Ideastuty El Haraky¹, Galih Rio Prayogi^{2*}, Syahidus Syuhada³, Ilpandari⁴

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Infrastruktur dan Kewilayahaan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia

⁵Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Bangka Belitung, Indonesia

*Email: galih.prayogi@si.itera.ac.id

Abstrak

Limbah beton dapat diperoleh dari limbah hasil konstruksi dan pembongkaran dan limbah dari sisa pengujian beton. Limbah beton yang berasal dari laboratorium dan batching plant belum adanya pengelolaan kembali sehingga banyaknya limbah yang dihasilkan setiap hari. Adapun limbah lainnya yaitu *Fly ash* pada industri yang dapat menghasilkan 200-1000 ton per hari. Pemanfaatan limbah beton dapat dijadikan sebagai RCA karena memiliki karakteristik fisik yang sama dengan agregat kasar dan *fly ash* sebagai bahan substitusi terhadap semen karena memiliki unsur penyusun yang sama dengan semen. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan pendekatan SNI 7656:2012 dan menganalisis biaya pembuatan beton menggunakan bahan substitusi tersebut. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan nilai tekan beton yaitu mampu mengalami peningkatan kuat tekan hingga nilai optimum pada variasi RCA 45% FA 12,5%. Nilai kuat tekan beton RCA dan *fly ash* pada variasi tersebut sebesar 27,62 MPa. Selisih antara kuat tekan optimum beton RCA dengan kuat tekan beton variasi 0% yaitu sebesar 2,35 MPa. Penelitian beton berkelanjutan yang memanfaatkan limbah beton (RCA) dan *fly ash* menawarkan solusi inovatif yang tidak hanya berpotensi menekan biaya pengeluaran material, tetapi juga menuntut evaluasi struktural yang lebih komprehensif. Karena karakteristik material substitusi ini sangat kompleks, mengandalkan uji kuat tekan standar saja belum cukup untuk menjamin keamanannya. Analisis mikrostruktur secara mendalam menjadi sangat krusial untuk memastikan bahwa interaksi pengikat antara pasta semen dan *fly ash* benar-benar mampu mengisi dan memulihkan retakan mikro bawaan dari limbah beton, dan bukan sebaliknya menjadi titik lemah yang memicu kegagalan struktural saat beton menahan beban maksimal.

Kata kunci: Limbah Beton, Fly ash, Kuat Tekan, Analisis Biaya.

Abstract

Concrete waste can be obtained from construction and demolition waste, as well as from the residue of concrete testing. Concrete waste originating from laboratories and batching plants currently lacks proper recycling management, resulting in a large volume of daily waste. Another waste material is fly ash from industries, which can produce 200–1,000 tons per day. Concrete waste can be utilized as Recycled Coarse Aggregate (RCA) because it shares the same physical characteristics as coarse aggregate, while fly ash can serve as a cement substitute because it has the same constituent elements as cement. The research was conducted experimentally using the SNI 7656:2012 approach, alongside an analysis of the manufacturing costs of concrete using these substitution materials. The results showed that the compressive strength of the concrete was able to increase, reaching an optimum value at a variation of 45% RCA and 12.5% Fly Ash (FA). The compressive strength value of the RCA and fly ash concrete at this variation was 27.62 MPa. The difference between the optimum compressive strength of the RCA concrete and the 0% variation concrete was 2.35 MPa. Sustainable concrete research utilizing concrete waste (RCA) and fly ash offers an innovative solution that not only has the potential to reduce material costs but also demands a more comprehensive structural evaluation. Because the characteristics of these substitution materials are highly complex, relying solely on standard compressive strength testing is not enough to guarantee safety. An in-depth microstructural analysis becomes highly crucial to ensure that the bonding interaction between the cement paste and fly ash is truly capable of filling and healing the inherent micro-cracks from the concrete waste, rather than acting as a weak point that triggers structural failure under maximum load.

Keywords: Concrete Waste, fly ash, compressive strength, cost analysis.

1. PENDAHULUAN

Saat ini persentase penggunaan beton normal yang merupakan salah satu jenis struktur tersebut telah mencapai 80% penggunaannya dalam bidang konstruksi pembangunan di Indonesia (Pradoto et al., 2022). Penggunaan beton tersebut dapat mempengaruhi masalah lingkungan atau adanya dampak negatif yang ditimbulkan seperti penumpukan limbah, pemanasan global, polusi udara, dan penipisan sumber daya alam (Wimala et al., 2011). Hal ini didukung oleh data penumpukan limbah yaitu limbah hasil konstruksi dan pembongkaran yang dapat mencapai 2.146 di Queensland pada tahun 2017 (Risamawarni et al., 2020). Sebagian besar limbah ini memiliki dampak negatif terkait lingkungan yaitu semakin banyaknya penumpukan limbah beton dikarenakan limbah beton jarang digunakan kembali atau dimanfaatkan. Berdasarkan hal tersebut, limbah beton dapat didaur ulang atau dimanfaatkan sebagai pengganti material penyusun beton (Sudika et al., 2019). Limbah beton ini memiliki sifat fisik karakteristik yang hampir sama dengan agregat yang diambil langsung dari alam yaitu material penyusun beton (Risamawarni et al., 2020). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa dibandingkan dengan agregat alami, RCA menunjukkan kualitas yang kurang baik. Hal ini khususnya terjadi ketika lapisan sisa mortar pada permukaan RCA menunjukkan porositas tinggi dan retakan mikro yang berada pada daerah *Interfacial Transition Zone* (ITZ) yang berkaitan dengan proses penghancuran. Sehingga perlu adanya upaya dalam menghilangkan mortar perekat atau memperkuat mortar perekat dalam meningkatkan kualitas RCA (Liu et al., 2016).

Selain limbah beton yang terdapat hingga ratusan juta ton, limbah lainnya yang banyak ditemukan yaitu *fly ash*. *Fly ash* yang dihasilkan PT Bukit Asam dapat mencapai 200 – 1000 ton per hari. Berdasarkan banyaknya *fly ash* yang dihasilkan tersebut, maka diperlukan adanya pemanfaatan *fly ash* dalam pembuatan beton untuk mengurangi banyaknya limbah hasil dari pembakaran batu bara yang dapat menjadi sumber masalah pada lingkungan. Abu batubara yang dihasilkan dari penggunaan batubara yaitu mencapai nilai 2% hingga 10% dimana terdapat *fly ash* sebanyak 80% hingga 90% dari abu tersebut. *Fly ash* memiliki unsur senyawa yang serupa dengan semen Portland yaitu mengandung aluminium oksida (Al_2O_3), silikon dioksida (SiO_2), kapur, dan ferri oksida (Fe_2O_3). *Fly ash* digunakan sebagai bahan substitusi dikarenakan memiliki sifat *pozzolonic* atau bahan yang mengandung silika seperti material semen. Sifat antara semen dan *fly ash* yaitu pada sifat fisik memiliki kemiripan dalam kehalusan butirannya, sedangkan pada sifat kimiawi yaitu terdapat kapur, besi atau ferri oksida (Fe_2O_3), serta 80% persentase silika dan alumina yang ada pada semen (Setiawati, 2018).

Adanya dampak negatif yang diakibatkan seperti penipisan sumber daya alam dan penumpukan limbah, maka diperlukannya inovasi dalam pembuatan beton agar dampak negatif tersebut dapat teratasi. Inovasi yang dapat dilakukan yaitu pemanfaatan limbah beton sebagai *Recycled Coarse Aggregate* (RCA), hal ini berdasarkan penelitian terdahulu yaitu penggunaan 70% RCA pada beton berhasil mencapai nilai optimum atau meningkatkan kuat tekan sebesar 1 – 7 MPa (Xianggang et al., 2018). Adapun pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan substitusi semen dikarenakan penelitian terdahulu berhasil menaikkan kuat tekan beton campuran RCA sebesar 5-7 MPa (Kou et al., 2008). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui beberapa pengaruh berdasarkan bahan substitusi yang digunakan. Beberapa hal yang dipengaruhi yaitu berat volume dan nilai *slump*. Hal ini dikarenakan berat jenis yang berbeda dan perbedaan penyerapan yang dimiliki antara RCA dengan agregat (Kusumawardhana, 2018). *Fly ash* yang digunakan juga memiliki berat jenis yang berbeda dengan semen sehingga berpengaruh pada berat volume dan nilai *slump* (Muhammady, E. (2022)). Selain berdampak pada berat volume dan nilai *slump*, substitusi material juga secara signifikan memengaruhi kuat tekan beton. Berdasarkan penelitian (Kusumawardhana, 2018), penggunaan 40% RCA mampu menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi hingga lebih dari 6 MPa dibandingkan beton konvensional. Di sisi lain, Setiawati & Immaluddin (2018) membuktikan bahwa penggunaan *fly ash* sebesar 12,5% dapat meningkatkan kuat tekan hingga 27,95%. Peningkatan ini terjadi karena *fly ash* tidak hanya mengisi pori-pori beton, tetapi juga bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$). Berangkat dari potensi tersebut, penelitian ini akan menguji campuran beton dengan variasi RCA sebesar 15%, 25%, 35%, dan 45%, dipadukan dengan proporsi *fly ash* tetap sebesar 12,5%. Penggunaan kedua bahan ini diproyeksikan mampu menekan biaya material dengan mengurangi kebutuhan semen dan agregat kasar. Meski demikian, evaluasi efisiensi biaya tetap perlu dilakukan untuk memastikan kelayakan ekonomis dari substitusi tersebut.

2. METODE

Penelitian yang dilakukan menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan SNI 7656:2012 Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa. Penelitian dimaksudkan untuk memahami pengaruh dari setiap variasi beton campuran terhadap nilai kuat tekannya yaitu pada umur 28 hari. Hasil dari pengujian setiap variasi akan dianalisis menggunakan pendekatan metode kuantitatif dengan benda uji silinder berdimensi diameter 15cm dan tinggi 30cm. Variasi yang diteliti yaitu RCA 0%, 15%, 25%, 35%, dan 45% terhadap kebutuhan agregat kasar dan bahan alternatif *fly ash* sebesar 12,5% terhadap kebutuhan semen.

2.1 Mechanical Treatment

Berdasarkan adanya tingkatan ITZ pada beton RCA yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton tanpa RCA, maka diperlukannya upaya dalam mengatasi ITZ yang ada pada beton RCA tersebut. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan mengurangi kandungan mortar yang menempel pada RCA dengan cara memisahkan mortar menggunakan palu dan mesin Los Angeles. Upaya tersebut dapat meningkatkan kekuatan, daya tahan RCA dalam pengontrolan ITZ, dan nilai abrasi. Dalam proses peningkatan kualitas, didapatkan adanya penurunan nilai penghancuran yang menunjukkan kemampuan atau tingkatan kerapuhan suatu agregat. Dengan adanya penurunan nilai penghancuran tersebut memungkinkan adanya peningkatan kuat tekan karena pengaruh ketahanan agregat yang digunakan (Wang et al., 2021)

Treatment yang digunakan pada material RCA penelitian ini yaitu untuk menghilangkan lapisan mortar lama pada RCA yaitu daerah ITZ menggunakan metode pendekatan *mechanical treatment* yaitu *hammer crusher*. Hal tersebut dilakukan dengan menghancurkan limbah beton hingga menjadi puing-puing RCA dan memisahkan mortar yang menempel dengan palu (*hammer*). Selain menggunakan palu, dibantu dengan alat bantu Los angeles, dan pemisahan kembali mortar yang tersisa dengan palu (*hammer crusher*) untuk mengoptimalkan pembersihan atau menghilangkan mortar yang tidak dapat dihilangkan oleh *Los Angeles*.

2.2 Pengujian Material

Pengujian Agregat Halus berdasarkan pada ASTM C128, nilai standar SG SSD atau berat jenis SSD hasil pengujian masih dalam batas standar yaitu 2,54 dengan batas standar pada ASTM C128 yaitu pada nilai 1,6 hingga 3,3. Untuk pengujian Agregat Kasar dapat dilihat pada Tabel 1 dapat dilihat perbandingan pengujian agregat kasar antara Natural Agregat dan RCA.

Tabel 1. Perbandingan Pengujian Agregat Kasar dan Limbah Beton (RCA)

Pengujian	Hasil Pengujian		Syarat Pengujian
	Agregat Kasar	Limbah Beton (RCA)	
Kadar Air	3,48%	1,76%	0,5-2% (ASTM C566)
Berat Jenis (SSD)	2,56	2,51	1,6-3,3 (ASTM C127)
Penyerapan	1,73%	2,03%	<4% (ASTM C127)
Berat Volume Padat	1,41 gr/m ³	1,47 gr/m ³	>1,2 gr/m ³ (ASTM C29)
Berat Volume Lepas	1,31 gr/m ³	1,37 gr/m ³	>1,2 gr/m ³ (ASTM C29)
Analisis Saringan (Fine Modulus)	6,49	6,51	6,00-7,10 (ASTM C33)
Keausan Agregat	20,32%	25,50%	<40% (ASTM C131)

Fly ash mengandung 49,772% silika, berikut merupakan data senyawa *fly ash* yang digunakan yaitu berasal dari PT Bukit Asam berdasarkan pengujian XRF (*X-Ray Fluoresence*) pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Kandungan Senyawa Fly Ash

No	Senyawa	Persentase Kandungan (%)
1	Al ₂ O ₃ (Alumina)	21,715
2	Fe ₂ O ₃ (Besi)	14,523
3	CaO (kapur)	7,335
4	SiO ₂ (Silika)	49,722

2.3 Presisi Data

Berdasarkan ASTM C.39/C.39M–21 bahwa hasil pengujian yang didapat perlu dilakukan pengecekan presisinya dengan sampel laboratorium memiliki syarat maksimal koefisien variasi sebesar 2,4% dan maksimal rentang hasil yang dapat diterima yaitu dengan syarat maksimal 7,8%. Adapun rumus yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$Coefficient\ of\ Variation = \frac{S_r}{\mu} \times 100\% \tag{1}$$

dengan S_r adalah standar deviasi, dan " μ " adalah rata-rata hasil kuat tekan *treatment*. Adapun rumus mencari nilai *Acceptable Range of Individual Cylinder Strengths*.

$$Acceptable\ Range = \frac{J_2 - J_1}{J_2} \times 100\% \tag{2}$$

dengan J_1 adalah nilai terendah sampel suatu variasi, dan J_2 adalah Nilai tertinggi sampel suatu variasi.

2.4 Analysis of Variance

Hasil penelitian yang didapatkan perlu dilakukan analisis kembali untuk memastikan apakah hasil penelitian ini signifikan atau tidak dengan hipotesis formulasi $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots$ (μ_i sama, yaitu tidak signifikan), sedangkan $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots$ (μ_i berbeda, yaitu adanya signifikan). Berikut merupakan perhitungan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$SSTr = \sum_{i=1}^I J_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \tag{3}$$

dengan SSTr adalah *The Treatment Sum of Squares*, I adalah jumlah *treatment*, J_i adalah banyaknya sampel dari populasi i , \bar{x}_i adalah rata-rata sampel dari populasi i , dan \bar{x} adalah rata-rata keseluruhan (dari seluruh nilai data). Setelah mendapatkan nilai SSTr perhitungan selanjutnya yaitu nilai SSE dengan rumus berikut Navidi, W. (2021).

$$SSE = \sum_{i=1}^I \cdot \sum_{j=1}^{J_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \tag{4}$$

dengan SSE adalah *The Error Sum of Squares*, I adalah jumlah *treatment*, J_i adalah Banyaknya sampel dari populasi i , \bar{x}_i adalah Mean sampel dari populasi I , dan x_{ij} adalah pengukuran ke- j dari populasi i . Setelah nilai SSTr dan SSE didapatkan, maka berikut derajat kebebasan untuk mencari rata-rata *treatment* dan *error* Navidi, W. (2021).

$$MSTr = \frac{SSTr}{I - 1} \tag{5}$$

$$MSE = \frac{SSE}{N - I} \tag{6}$$

Dengan $MSTr$ adalah *The Treatment Mean of Square*, MSE adalah *The Error Mean of Square*, I adalah banyaknya sampel dalam suatu *treatment*, dan N adalah total sampel seluruhnya. Maka dapat diperhitungkan nilai F_{value} Navidi, W. (2021).

$$F_{value} = \frac{MSTr}{MSE} \tag{7}$$

Hasil kesimpulan apabila $F_{value} > F_{table}$ menyatakan bahwa H_0 ditolak dan H_1 diterima. Apabila $F_{value} < F_{table}$ menyatakan H_0 diterima dan H_1 ditolak. Sedangkan untuk perhitungan P_{value} apabila didapatkan $P_{value} < \alpha$, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Apabila $P_{value} > \alpha$, maka H_0 diterima, dan H_1 ditolak Navidi, W. (2021).

2.5 Analisis Biaya

Anggaran biaya suatu proyek atau bangunan dapat diperhitungkan dengan mengalikan total volume pekerjaan dengan harga satuan pekerjaannya. Volume pekerjaan didapatkan dari gambar rencana yang menjelaskan bahan material sehingga disesuaikan dengan harga satuannya. Sedangkan perhitungan harga satuan material merupakan salah satu komponen atau dibutuhkan dalam mencari nilai harga satuan pekerjaan. Berikut merupakan rumus kebutuhan bahan (Sari, 2019).

$$\Sigma \text{Bahan} = \text{Volume pekerjaan} \times \text{Koefisien analisa bahan} \tag{8}$$

Rencana Anggaran Biaya (RAB) diperhitungkan berdasarkan kebutuhan per meter kubiknya (m^3) yang akan dikalikan dengan harga satuan bahan. Pada Tabel 3 berikut merupakan daftar harga satuan bahan material yang digunakan dalam pembuatan beton variasi berdasarkan SSH Kota Bandar Lampung Tahun 2023.

Tabel 2. Harga Satuan Berdasarkan SSH Kota Bandar Lampung 2023

Uraian	Satuan	Kebutuhan	Harga Satuan
Pasir (Agregat Halus)	Kg	874,63	Rp316,00
Batu Split (Agregat Kasar)	Kg	934,33	Rp593,00
Semen PC	Kg	336,07	Rp1.260,00
Air	Liter	185,02	Rp120,00
Limbah Beton (RCA)	Kg	0	Rp0,00
<i>Fly ash</i>	Kg	0	Rp0,00

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Nilai *Slump* Dan Berat Volume

Dari penelitian ini didapatkan adanya penurunan nilai *slump*, yaitu semakin bertambahnya material limbah beton (RCA) yang digunakan pada penelitian ini maka konsistensi *slump* semakin mengental. Hal ini disebabkan perbedaan penyerapan suatu material yang digunakan yaitu pada material RCA dan *fly ash* yang digunakan. Penyerapan yang lebih besar pada RCA yang digunakan memiliki pengaruh yaitu yang menyebabkan konsistensi beton segar lebih kental selaras dengan penelitian (Kusumawardhana, 2018) Diketahui bahwa *fly ash* memiliki daya serap yang akan berpengaruh pada nilai *slump* suatu beton segar. Hal ini selaras dengan penelitian sebelumnya yang dimana dalam penelitian tersebut terjadi penurunan nilai *slump* seiring dengan penambahan variasi *fly ash* yang digunakan berdasarkan penelitian Muhammadiyah, E. (2022). pada nilai *slump*, berat volume suatu beton menunjukkan adanya penurunan terhadap variasi RCA yang digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa berat jenis setiap material yaitu bahan substitusi seperti limbah beton (RCA) dan *fly ash* yang digunakan berbeda terhadap bahan substitusinya. Berat jenis mempengaruhi berat volume didukung oleh penelitian M.Etxeberria [17] dan (Kou et al., 2008). Berikut

rekapitulasi kebutuhan campuran beton per m³ dan pengujian *slump* beserta berat volumenya Tabel 4. di bawah ini.

Tabel 4. Kebutuhan Campuran Beton per m³ dan Hasil Pengujian *Slump*

Variasi Beton	Agregat Halus	Agregat Kasar	Semen	Air	RCA	Fly ash	Nilai <i>Slump</i> (mm)	Berat Volume (Kg/m ³)
RCA 0% FA 0%	874,63	934,33	336,07	185,02	0,00	0,00	100,00	2295,31
RCA 15% FA 12,5%	874,63	794,18	298,86	185,02	140,15	37,21	98,00	2291,54
RCA 25% FA 12,5%	874,63	700,75	298,86	185,02	233,58	37,21	88,00	2276,45
RCA 35% FA 12,5%	874,63	607,31	298,86	185,02	327,02	37,21	73,00	2270,17
RCA 45% FA 12,5%	874,63	513,88	298,86	185,02	420,45	37,21	69,00	2262,63

3.2. Hasil Kuat Tekan Beton

Hasil penelitian menunjukkan adanya kenaikan kuat tekan hingga mencapai titik optimum pada variasi maksimal RCA 45%. Adanya peningkatan kuat tekan hingga variasi RCA 45% tersebut dikarenakan adanya perawatan RCA yang digunakan dan pengaruh dari FAS terhadap beton. Perawatan beton yang dilakukan pada penelitian ini yaitu pendekatan metode *mechanical treatment* yaitu alat bantu mesin Los angeles dan dioptimalkan dengan metode *hammer crusher* sebagai upaya menghilangkan tebalnya mortar yang menyebabkan tingginya ITZ pada beton RCA. Hal ini karena upaya atau *treatment* dalam menghilangkan mortar yang ada pada RCA untuk meningkatkan kualitas RCA yang digunakan dalam beton dibuktikan dengan hasil bahwa RCA dengan mortar yang lebih sedikit memiliki tingkatan kehancuran yang lebih rendah selaras dengan penelitian oleh (Wang et al., 2021). Adapun upaya lain yang digunakan dalam mengatasi porositas yang ada akibat penggunaan RCA. Upaya yang dilakukan yaitu dengan penambahan material *fly ash* yang bersifat *pozzolan*. Senyawa SiO₂ (silika) dan senyawa Al₂O₃ yang terdapat pada *fly ash* dapat bereaksi dengan Ca(OH)₂ yang terdapat pada pori-pori beton sehingga mampu membentuk gel C-S-H yang mampu mengisi porositas beton tersebut sehingga mampu meningkatkan kuat tekan selaras dengan penelitian (Kou et al., 2008). Adapun pengaruh dari kenaikan diakibatkan oleh adanya penurunan FAS pada beton akibat adanya perbedaan penyerapan material yang digunakan. FAS yang semakin kecil tersebut mempengaruhi kuat tekan beton yaitu semakin kecil suatu FAS maka semakin besar nilai kuat tekannya oleh penelitian (Kim et al., 2014). Berikut merupakan hasil kuat tekan dengan variasi RCA yang digunakan pada penelitian ini pada Tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Hasil Kuat Tekan Beton

No	Variasi Beton	Rata-Rata Kuat Tekan (Mpa)	Standar Deviasi	Coefficient of Variation (Max 2,4%)	Acceptable Range of Individual Cylinder Strength (Max 7,8%)	Keterangan
1	RCA 0% FA 0%	25,27	0,16	0,65	1,11	Diterima
2	RCA 15% FA 12,5%	25,60	0,43	1,69	3,30	Diterima
3	RCA 25% FA 12,5%	26,30	0,28	1,08	2,13	Diterima
4	RCA 35% FA 12,5%	27,15	0,49	1,80	3,06	Diterima
5	RCA 45% FA 12,5%	27,62	0,66	2,39	5,94	Diterima

3.3. Analysis of Variance

Setelah data didapatkan, berikut hasil dari perhitungan *Analysis of Variance* yang didapatkan pada Tabel 5 berikut ini. Berikut hipotesis formulasi yang didapatkan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 \text{ (} \mu_i \text{ sama, yaitu tidak ada pengaruh dari variasi RCA)}$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \text{ (} \mu_i \text{ berbeda, yaitu adanya pengaruh dari variasi RCA)}$$

Diketahui:

$$V_1 \text{ (Df Treatment)} = I - 1 = 4 - 1 = 3$$

$$V_2 \text{ (Df Error)} = N - I = 12 - 4 = 8$$

Tabel 5. Hasil Rekapitulasi *Analysis of Variance*

No	Source	Degree of Freedom (DF)	Sum of Square (SS)	Mean Square (MS)	Fvalue	Pvalue
1	Treatment	3	8,93	2,98	9,50	0,00516
2	Error	8	2,51	0,31		

Tabel 5. menunjukkan hasil *Fvalue* (9,50) > *Ftable* (4,07) menunjukkan bahwa rata-rata hasil variasi RCA yang digunakan memiliki pengaruh atau adanya perbedaan setiap hasil rata-rata variasi terhadap kuat tekan beton. Hasil dari *Fvalue* (9,50) untuk α berada di antara 0,010 dan 0,001 (0,010 < α < 0,001) sehingga nilai *Pvalue* < α (0,050) menunjukkan adanya signifikansi rata-rata hasil variasi RCA yang digunakan terhadap kuat tekan beton.

3.4. Analisis Biaya

Perhitungan analisis biaya sebagai bentuk perbandingan antara penggunaan beton tanpa campuran dengan beton yang memanfaatkan RCA dan *fly ash*. Hal ini diperhitungkan berdasarkan kebutuhan per meter kubiknya (m³) yang dikalikan dengan harga satuan. Rekapitulasi dari hasil analisis biaya pembuatan beton per m³ dengan menggunakan bahan substitusi RCA dan *fly ash* pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Rekapitulasi Analisis Biaya Pembuatan Beton Per m³

No	Variasi Beton	Jumlah Harga
1	RCA 0% FA 0%	Rp1.276.091,37
2	RCA 15% FA 12,5%	Rp1.148.903,16
3	RCA 25% FA 12,5%	Rp1.095.369,32
4	RCA 35% FA 12,5%	Rp1.041.829,76
5	RCA 45% FA 12,5%	Rp988.295,93

Semakin banyaknya limbah beton (RCA) yang digunakan maka akan semakin sedikit atau berkurangnya biaya yang diperlukan dalam pembuatan 1 m³ beton. Selisih antara beton tanpa campuran dengan beton variasi penggunaan *fly ash* dan limbah beton (RCA) biaya tertinggi dibandingkan beton campuran lainnya yaitu RCA 15% FA 12,5% yaitu sebesar Rp129.993,55 atau

pengurangan sebanyak 10,19%. Adapun selisih masing-masing setiap variasi khusus beton campuran memiliki selisih kurang lebih sebesar Rp55.400,00.

4. KESIMPULAN

Penelitian dengan beberapa variasi penggunaan limbah beton (*Recycled Coarse Aggregate*) dan *fly ash* memiliki pengaruh terhadap nilai kuat tekan beton. Hasil penelitian menunjukkan adanya kenaikan kuat tekan hingga mencapai titik optimum pada variasi maksimal RCA 45%. Adanya peningkatan kuat tekan hingga variasi RCA 45% tersebut dikarenakan adanya perawatan RCA yang digunakan dan pengaruh dari FAS terhadap beton. Perawatan beton yang dilakukan pada penelitian ini yaitu pendekatan metode *mechanical treatment* yaitu alat bantu mesin Los angeles dan dioptimalkan dengan metode *hammer crusher* sebagai upaya menghilangkan tebalnya mortar yang menyebabkan tingginya ITZ pada beton RCA. Selain berdasarkan hasil kuat tekannya, analisis biaya yang menunjukkan bahwa dengan pemanfaatan RCA dan *fly ash* dapat mengurangi biaya pengeluaran material pembuatan beton, maka efisiensi biaya pembuatan beton dengan bahan substitusi RCA dan *fly ash* terhadap beton normal. Dalam penelitian material beton tingkat lanjut, terutama yang melibatkan material kompleks seperti *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) dan *fly ash*, pengujian kuat tekan saja tidak cukup. Pengujian ini membantu memverifikasi apakah kombinasi *fly ash* dan pasta semen mampu mengisi dan "menyembuhkan" retakan mikro tersebut, atau justru retakan tersebut menjadi titik awal kegagalan beton saat diberi beban.

DAFTAR PUSTAKA

- Kim, Y. Y., Lee, K. M., Bang, J. W., & Kwon, S. J. (2014). Effect of W/C ratio on durability and porosity in cement mortar with constant cement amount. *Advances in Materials Science and Engineering, 2014*. <https://doi.org/10.1155/2014/273460>
- Kou, S. C., Poon, C. S., & Chan, D. (2008). Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 41*(7). <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9317-y>
- Kusumawardhana, I. (2018). Pengaruh Penggunaan Agregat Kasar Beton Limbah Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton Normal. *Jurnal Publikasi*.
- Muhammady, E. (2022). Analisis peningkatan kuat tekan beton terhadap umur beton dengan menggunakan fly ash sebagai bahan substitusi parsial [Skripsi, Universitas Islam Indonesia].
- Navidi, W. (2021). *Principles of statistics for engineers and scientists* (2nd ed.). McGraw-Hill Education..
- Liu, Z., Cai, C. S., Peng, H., & Fan, F. (2016). Experimental Study of the Geopolymeric Recycled Aggregate Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering, 28*(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001584](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001584)
- Pradoto, R. G. K., Soemardi, B. W., Gazali, A., Putri, A. T., Purba, R. P., & Mahardika, I. (2022). Development of Concrete Material Technology in the context of supply - Demand based on geographical aspects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1065*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012044>
- Risamawarni, Bachtiar, E., & Rachim, F. (2020). Pengaruh Subtitusi Limbah Beton Sebagai Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan Beton Curing Air Laut. *Indonesian Journal Of Fundamental Sciences (IJFS), 6*(1).

- Sari, S. N. (2019). Evaluasi Anggaran Biaya menggunakan Batu Bata Merah dan Batu Bata Ringan Gedung Kantor Kelurahan Bareng Kecamatan Klaten Tengah Kabupaten Klaten. *Jurnal Qua Teknika*, 9(1). <https://doi.org/10.35457/quateknika.v9i1.635>
- Setiawati, M. (2018). Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2018*.
- Wang, X., Yang, X., Ren, J., Han, N., & Xing, F. (2021). A novel treatment method for recycled aggregate and the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.095>
- Wimala, M., Fujiki, A., & Kawai, K. (2011). Environmental impact of waste concrete treatment in precast concrete production. *Proceedings of the Annual Conference Japan Concrete Institute*, 33(February 2021).
- Xianggang, Z., Shuren, W., & Xiang, G. (2018). Mechanical properties of recycled aggregate concrete subjected to compression test. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 11(6). <https://doi.org/10.25103/jestr.116.04>