

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji Pendahuluan

Pada penelitian ini, dilakukan uji pendahuluan berupa pemeriksaan kelayakan terhadap beberapa bahan utama yang digunakan (**Gambar 4.1**), yaitu semen, pasir, dan CRA.



Gambar 4. 1 Semen, Pasir, dan CRA

4.1.1 Semen

Semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen portland tipe I dengan merek dagang Tiga Roda. Hasil pengujian berat jenis semen pada penelitian ini mengacu berdasarkan data dari *Material Safety Data Sheet (MSDS)* semen portland merek dagang Tiga Roda, yang diketahui bahwa berat jenis (*specific gravity*) semen ini berada pada kisaran 3,1–3,2 gr/cc. Nilai ini menunjukkan bahwa semen tersebut termasuk dalam rentang standar berat jenis semen portland tipe I sebagaimana tercantum dalam SNI maupun literatur konstruksi lainnya, yakni sekitar 3,15 gr/cc (Semen Tiga Roda, 2019). Berat jenis semen portland merek dagang Tiga Roda dapat dilihat pada **Tabel 4.1** dibawah ini :

Tabel 4. 1 Berat Jenis Semen Portland Tiga Roda

No	Parameter	Hasil Uji	Batas Standar Pengujian
1.	Berat Jenis	3,15 gr/cc	3,10 – 3,20 gr/cc

Sumber : Semen Tiga Roda, 2019

Selain itu, dalam penelitian ini dilakukan juga uji vicat untuk menentukan perbandingan kebutuhan air serta kecepatan waktu ikat awal semen tiap variasi yang dilakukan di Lab Bahan Bangunan Sipil Arsitektur Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro. Berikut hasil perbandingan penetapan konsistensi normal semen portland pada **Tabel 4.2** :

Tabel 4. 2 *Perbandingan Penetapan Konsistensi Normal Semen Portland*

No	Berat (gram)	Persentase Air (%)	Penetrasi Jarum (mm)	Suhu (°C)	Keterangan
1	300	28	7	28	Tiga Roda
2	300	29	8	28	Tiga Roda
3	300	30	11	31	Tiga Roda

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada **Tabel 4.2**, dapat disimpulkan bahwa semen portland (Tiga Roda) dengan kondisi penetrasi jarum sebesar 10 mm tercapai pada kadar air sebesar 29,67% berdasarkan hasil interpolasi linear antara 29% dan 30%. Selain itu, peneliti juga membandingkan penetapan konsistensi normal semen portland pada setiap variasi substitusi *CRA* menggunakan takaran persentase air yang sama yaitu sebesar 30% pada **Tabel 4.3**:

Tabel 4. 3 *Perbandingan Penetapan Konsistensi Normal Semen Portland Substitusi CRA*

No	Variasi	Berat Semen (gram)	Berat CRA (gram)	Persentase Air (%)	Penetrasi Jarum (mm)	Suhu (°C)
1	<i>CRA0</i>	300	0	30	11	31
2	<i>CRA5</i>	285	5	30	11	31
3	<i>CRA10</i>	270	30	30	11,5	31
4	<i>CRA15</i>	255	45	30	14,5	31

Berdasarkan **Tabel 4.3** hasil uji konsistensi normal menunjukkan bahwa substitusi semen portland dengan *CRA* memengaruhi nilai penetrasi jarum. Meskipun persentase air konstan, peningkatan *CRA* hingga 15% menyebabkan penetrasi meningkat dari 11 mm menjadi 14,5 mm, menandakan konsistensi pasta semakin lunak. Hal ini menunjukkan bahwa *CRA* cenderung menurunkan kekentalan campuran. Temuan ini sejalan dengan Justo Reinoso et al. (2019) yang melaporkan bahwa karbon aktif granular meningkatkan kelunakan mortar segar.

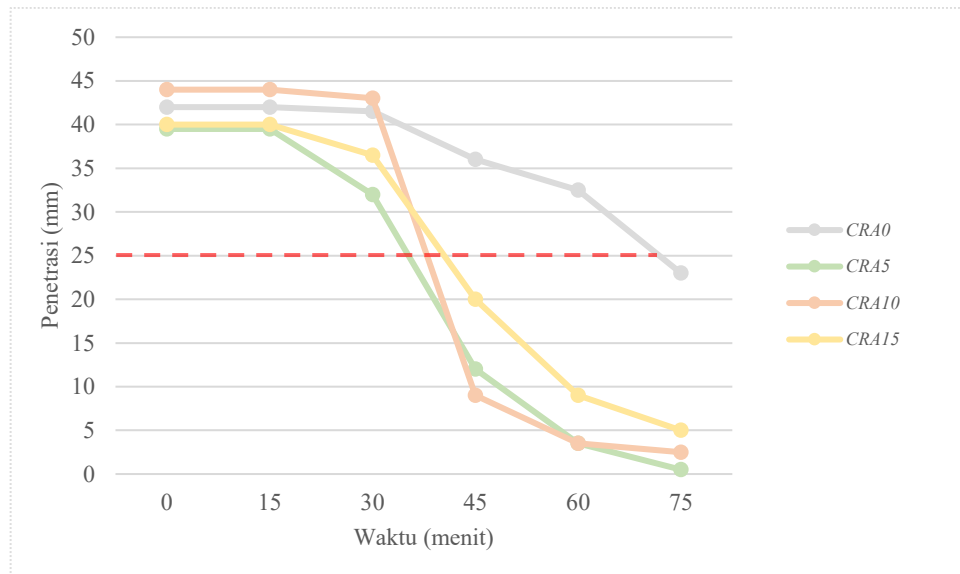
Lekkam et al. (2019) juga menyatakan bahwa karbon aktif memengaruhi viskositas dan tegangan alir, yang berdampak pada peningkatan penetrasi jarum.

Seiring dengan perubahan konsistensi, penting pula untuk memahami bagaimana substitusi *CRA* memengaruhi daya ikat awal semen. Oleh karena itu, dilakukan pengujian waktu penetrasi jarum menggunakan Vicat untuk menentukan waktu ikat awal pada masing-masing variasi, sebagaimana disajikan pada **Tabel 4.4**.

Tabel 4. 4 *Pemeriksaan Waktu Ikat Awal Semen dan Bahan Substitusi CRA*

No	Waktu Penetrasi Vicat Air 30% (menit)	Penetrasi Jarum (mm)			
		<i>CRA</i> 0%	<i>CRA</i> 5%	<i>CRA</i> 10%	<i>CRA</i> 15%
1	15	42	39,5	44	40
2	30	41,5	32	43	36,5
3	45	36	12	9	20
4	60	32,5	3,5	3,5	9
5	75	23	0,5	2,5	5

Berdasarkan **Tabel 4.4**, penambahan *CRA* mempercepat waktu ikat awal pasta semen. Pada variasi tanpa *CRA*, penetrasi jarum masih terjadi hingga menit ke-75, sedangkan pada *CRA* 15%, penetrasi sudah di bawah 1 mm pada menit ke-60, menandakan pengerasan lebih cepat. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh porositas tinggi dan luas permukaan aktif *CRA* yang mempercepat hidrasi awal. Temuan ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menyatakan bahwa substitusi biomassa meningkatkan kebutuhan air karena luas permukaan dan mikropori yang besar (Muthusamy & Zamri, 2015), serta kandungan silika dan alkali yang mempercepat hidrasi semen (Jaturapitakkul et al., 2007).



Grafik 4.1 Hasil Uji Vicat Penetrasi Jarum 25 mm dengan Interpolasi Linear

Berdasarkan hasil uji Vicat yang divisualisasikan pada **Grafik 4.1**, penambahan *CRA* pada campuran semen menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap waktu *setting*, yaitu waktu yang dibutuhkan jarum Vicat untuk mencapai kedalaman 25 mm. Pada variasi *CRA*0%, waktu *setting* tertinggi tercatat sebesar 71,8 menit, yang menunjukkan bahwa campuran tanpa substitusi membutuhkan waktu pengerasan paling lama. Penambahan *CRA* sebesar 5% menyebabkan penurunan waktu *setting* secara drastis menjadi 15,1 menit, yang merupakan nilai terendah di antara seluruh variasi. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan *CRA* dalam jumlah kecil dapat mempercepat proses hidrasi awal semen secara signifikan.

Namun demikian, saat kadar *CRA* ditingkatkan hingga 10% dan 15%, waktu *setting* justru kembali meningkat menjadi 37,6 menit dan 40,3 menit. Meskipun masih lebih rendah dibandingkan tanpa substitusi, fenomena ini menandakan adanya pola non-linear dalam pengaruh *CRA* terhadap waktu *setting*. Hal ini disebabkan oleh sifat adsorptif karbon aktif dalam *CRA* yang pada konsentrasi lebih tinggi dapat mengganggu difusi ion-ion penting dalam proses hidrasi, seperti ion Ca^{2+} dan SO_4^{2-} , sehingga memperlambat pembentukan produk hidrasi awal (Sata et al., 2012; Liu et al., 2020).

Karakteristik fisik *CRA* yang ringan dan berpori turut memperkuat pengaruh ini, karena porositas tinggi memungkinkan permukaan kontak yang lebih luas antara partikel dan air, mempercepat reaksi pada kadar rendah, namun dapat menyerap sebagian air pada kadar tinggi, sehingga memengaruhi ketersediaan air bebas dalam campuran. Oleh karena itu, meskipun penggunaan *CRA* terbukti dapat mempercepat *setting* awal dan memberikan nilai tambah ekologis melalui kemampuannya menyerap CO₂ (Setiyono et al., 2018; Tan et al., 2015), proporsi penggunaannya harus disesuaikan secara cermat, khususnya terhadap rasio air terhadap campuran, guna menjaga mutu dan kinerja beton secara optimal. Dengan demikian, pemanfaatan limbah biomassa sebagai substitusi parsial semen dalam *CRA* tidak hanya berkontribusi pada pengurangan emisi karbon, tetapi juga menjadi solusi inovatif dalam pengembangan material konstruksi ramah lingkungan.

4.1.2 Pasir

Pasir yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir Muntilan. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini ialah analisis pembagian butiran, kadar lumpur, kandungan lumpur organis, dan berat jenis. Pengujian dilakukan di Lab Bahan Bangunan Sipil Arsitektur Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro. Berikut hasil pengujian pasir pada **Tabel 4.5**.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Pasir

No	Parameter	Hasil Uji	Batas Standar Pengujian		Keterangan
1.	Persentase Kehilangan Berat	1,97%	Maks. 2%	SNI 03-1968-1990	Memenuhi
2.	Diameter Butir Kasar	11,71%	Min. 2%	SNI 03-2834-2000	Memenuhi
3.	Diameter Butir Halus	63,83%	Min. 10%	SNI 03-2834-2000	Memenuhi
4.	Kadar Lumpur	2,985%	Maks. 5%	SNI 03-2834-2000	Memenuhi
5.	Modulus Kehalusan (FM)	3,076	2,4 – 3,6	SNI 03-1968-1990	Pasir Kasar
6.	Kandungan Lumpur Organik	Kuning Tua	-	SNI 03-2835-2000	Dapat Dipakai
7.	Berat Jenis	2,52	2,55 – 2,7	SNI 1970:2008	Dapat Dipakai

Berdasarkan **Tabel 4.5** pada halaman sebelumnya, hasil pengujian terhadap agregat halus (pasir), dapat disimpulkan bahwa pasir yang digunakan memenuhi persyaratan teknis sebagai material campuran beton sesuai dengan acuan beberapa standar nasional. Nilai kehilangan berat sebesar 1,97% masih berada di bawah batas maksimum 2% sesuai SNI 03-1968-1990, menunjukkan ketahanan terhadap kehilangan massa dalam proses pencucian. Distribusi gradasi pasir juga memenuhi syarat, dengan diameter butir kasar 11,71% dan butir halus 63,83%, yang sesuai dengan batas minimum pada SNI 03-2834-2000.

Kadar lumpur sebesar 2,985% masih di bawah batas maksimum 5%, menandakan pasir cukup bersih dan tidak mengandung banyak partikel halus yang dapat mengganggu ikatan semen. Sementara itu, nilai modulus kehalusan (FM) sebesar 3,076 menunjukkan bahwa pasir tergolong dalam kategori pasir kasar berdasarkan rentang 2,4 – 3,6 menurut SNI 03-2834-2000, yang mengindikasikan potensi stabilitas yang baik dalam campuran beton.

Kandungan lumpur organis yang ditunjukkan oleh warna kuning tua pada hasil pengujian menunjukkan bahwa pasir masih dapat digunakan menurut SNI 03-2834-2000. Kemudian, diperoleh juga nilai berat jenis jenuh permukaan kering (SSD) sebesar 2,52 dari pengujian yang dilakukan. Menurut SNI 1970:2008, tentang *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*, standar ini memang tidak secara eksplisit mencantumkan nilai baku batas berat jenis SSD pasir. Namun, berdasarkan praktik umum dan acuan teknis, berat jenis SSD agregat halus (pasir) umumnya berada dalam kisaran 2,55 hingga 2,70 untuk pasir alami berkualitas baik. Nilai 2,50 hingga 2,54 masih dapat dipakai, tetapi mengindikasikan bahwa pasir tersebut cenderung lebih ringan, berpori, atau memiliki kandungan bahan halus/organik yang relatif lebih tinggi. Dengan demikian, nilai 2,52 yang diperoleh dalam penelitian ini masih berada dalam batas wajar dan layak digunakan sebagai agregat halus dalam pembuatan *paving block*.

Dengan demikian, agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini dinyatakan layak dan memenuhi standar teknis untuk digunakan sebagai material penyusun dalam campuran beton.

4.1.3 CRA

CRA yang digunakan sebagai bahan substitusi semen pada pembuatan *paving block* yang dapat menyerap emisi gas buang CO₂ ini berasal dari limbah tempurung kelapa yang diaktivasi menggunakan larutan asam fosfat (H₃PO₄) dengan konsentrasi 8% yang telah melalui aktivasi rendaman selama 24 jam dan dioven di suhu 100°C selama 3 jam setelah dilakukan proses aktivasi tersebut disaring dengan saringan ASTM no.200 (0,007 mm).

Pada pengujian berat jenis *CRA* dilakukan di Lab Bahan Bangunan Sipil Arsitektur Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro. Sedangkan pengujian beberapa parameter *CRA* dilakukan di Lab *Quality* Teknik Rekayasa Kimia Industri Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro. Berikut hasil pengujian *CRA* pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian CRA

No	Parameter	Hasil Uji	Batas Standar Pengujian		Keterangan
1.	<i>Volatile Matter</i>	12,032	Maks. 25%	SNI 06-3730-1995	Memenuhi
2.	Kadar Air	7,5	Maks. 15%	SNI 06-3730-1995	Memenuhi
3.	Kadar Abu	82,165	Maks. 10%	SNI 06-3730-1995	Tidak Memenuhi
4.	Karbon Aktif Murni	5,804	Min. 65%	SNI 06-3730-1995	Tidak Memenuhi
5.	Berat Jenis	1,493	-	-	-

Berdasarkan hasil pengujian terhadap parameter dasar mutu arang aktif teknis yang dibandingkan dengan standar SNI 06-3730-1995 pada **Tabel 4.6**, diperoleh bahwa nilai *volatile matter* sebesar 12,032% berada di bawah batas maksimal sebesar 25%, sehingga memenuhi standar mutu. Kandungan *volatile matter* memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas karbon aktif karena memengaruhi struktur pori material. Kadar *volatile* yang tinggi menandakan proses karbonisasi yang belum sempurna, sehingga berpotensi menyumbat pori-pori dan menurunkan kapasitas adsorpsi. Sebaliknya, kadar *volatile* yang rendah mencerminkan struktur pori yang lebih stabil dan terbuka, sehingga lebih efisien dalam menangkap molekul gas seperti CO₂ (Ioannidou & Zabaniotou, 2007;

Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006). Dengan demikian, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan telah memiliki karakteristik fisik awal yang mendukung kemampuannya dalam aplikasi adsorpsi gas.

Selain itu, diperoleh kadar air sebesar 7,5%, yang juga berada di bawah batas maksimal 15% sesuai SNI 06-3730-1995, sehingga parameter ini pun memenuhi standar yang ditetapkan. Kandungan air dalam karbon aktif turut berperan penting terhadap performa adsorpsinya. Kadar air yang terlalu tinggi dapat mengisi ruang pori dan bersaing dengan molekul target seperti CO₂ dalam proses adsorpsi, sehingga menurunkan efisiensi penyerapan gas (Ioannidou & Zabaniotou, 2007). Oleh karena itu, kadar air yang rendah seperti yang ditunjukkan pada hasil pengujian ini menjadi indikator positif terhadap potensi material dalam aplikasi penyerapan emisi gas.

Namun demikian, kadar abu yang sangat tinggi, yaitu sebesar 82,165%, jauh melebihi batas maksimal 10% yang ditetapkan dalam SNI 06-3730-1995, sehingga parameter ini tidak memenuhi standar. Abu merupakan residu anorganik yang tidak berkontribusi terhadap kemampuan adsorpsi dan justru dapat menyumbat pori-pori karbon aktif. Akibatnya, struktur pori yang seharusnya menjadi jalur difusi gas menjadi tersumbat, sehingga luas permukaan aktif menurun secara signifikan. Penurunan luas permukaan ini berdampak langsung pada turunnya efisiensi penyerapan molekul gas seperti CO₂. Semakin tinggi kadar abu, semakin kecil ruang yang tersedia untuk adsorpsi, dan semakin besar pula kompetisi antara molekul-molekul pengganggu dengan molekul target. Studi sebelumnya bahkan menunjukkan bahwa peningkatan kadar abu sebesar 1% saja dapat menurunkan kapasitas adsorpsi CO₂ hingga 21% (Gao & Han, 2013; Heliyon, 2024). Oleh karena itu, tingginya kadar abu pada sampel ini menjadi salah satu faktor utama penyebab rendahnya performa adsorpsi karbon aktif terhadap CO₂.

Studi sebelumnya juga menemukan bahwa biomassa seperti tempurung kelapa secara alami cenderung memiliki *ash content* tinggi (>15%), yang menyebabkan tersumbatnya pori karbon serta menurunkan luas permukaan

spesifik dan kapasitas adsorpsi (Lee et al., 2018; Pandey et al., 2015). Hasil analisis karakterisasi *biochar* dari berbagai jenis *feedstock* menunjukkan bahwa kadar abu dapat mencapai 40–50%, tergantung pada jenis bahan baku, dan tingginya kandungan abu tersebut secara langsung berkontribusi terhadap rendahnya kadar karbon tertambat (*fixed carbon*) dalam produk akhir. Kondisi ini menjelaskan mengapa kadar karbon aktif murni pada sampel *CRA* sangat rendah, yakni hanya 5,804%, serta tidak memenuhi standar teknis yang ditetapkan oleh SNI 06-3730-1995.

Selain faktor alami dari bahan baku, durasi proses pengabuan yang tidak sesuai standar yakni hanya dilakukan selama 1 jam dibandingkan ketentuan SNI 06-3730-1995 yang merekomendasikan pemanasan selama 2 jam turut berkontribusi terhadap tingginya residu anorganik (*ash content*) dalam karbon aktif. Pemanasan yang belum mencapai durasi optimal dapat menyebabkan dekomposisi material tidak berlangsung sempurna, sehingga senyawa anorganik tidak sepenuhnya terurai dan tetap tertahan dalam struktur karbon (Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

Namun demikian, penggunaan durasi 1 jam dapat dipertimbangkan sebagai pendekatan yang efisien dalam konteks eksperimental. Pemendekan waktu pembakaran ini bertujuan menghindari risiko *over-decomposition* yang dapat merusak struktur mikropori karbon serta menghasilkan emisi CO₂ sekunder akibat oksidasi termal lanjutan (Lehmann & Joseph, 2009; Ronsse et al., 2013). Dari sisi efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan, durasi pembakaran yang lebih singkat secara signifikan menurunkan konsumsi energi dan jejak karbon (*carbon footprint*) selama proses produksi (Zaini et al., 2019). Lebih lanjut, hasil pengujian menunjukkan bahwa pemanasan selama 1 jam telah cukup efektif dalam menghilangkan kandungan *volatile matter* (12,032%) dan kadar air (7,5%), yang keduanya memenuhi syarat maksimum dalam SNI. Hal ini mengindikasikan bahwa tahap awal dehidrasi dan devolatilisasi sudah tercapai dengan baik, meskipun belum mampu menurunkan kadar abu hingga ambang standar.

Dengan demikian, meskipun kadar abu dan karbon aktif murni belum memenuhi spesifikasi teknis, strategi pemanasan 1 jam tetap memberikan sejumlah keuntungan, baik dari sisi efisiensi energi, pengendalian emisi CO₂, maupun adaptabilitas terhadap keterbatasan alat laboratorium. Ke depan, pendekatan ini masih dapat dikembangkan melalui optimasi aktivasi kimia atau metode *post-treatment* seperti proses *de-ashing*, untuk meningkatkan performa adsorpsi material tanpa harus memperpanjang durasi pembakaran secara signifikan (Qizhong Carbon, 2023; Bioresources, 2014).

Di lain sisi, hasil pengujian menunjukkan bahwa pemanasan selama 1 jam sudah cukup efektif dalam menghilangkan *volatile matter* (12,032%) dan kadar air (7,5%), yang keduanya telah memenuhi batas maksimum sesuai standar SNI. Temuan ini menunjukkan bahwa proses dehidrasi dan devolatilisasi telah berlangsung secara optimal pada tahap awal, meskipun belum cukup untuk menurunkan kadar abu hingga ke tingkat yang disyaratkan.

Dengan demikian, walaupun kadar abu dan karbon aktif murni masih belum memenuhi spesifikasi teknis, strategi pemanasan 1 jam tetap memberikan sejumlah keunggulan, terutama dari segi efisiensi energi, pengendalian emisi CO₂, dan kemampuan beradaptasi terhadap keterbatasan alat laboratorium. Pendekatan ini masih memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut melalui optimasi aktivasi kimia atau penerapan metode *post-treatment* seperti *de-ashing*, guna meningkatkan performa adsorpsi material tanpa perlu memperpanjang waktu pembakaran secara signifikan (Qizhong Carbon, 2023; Bioresources, 2014).

Karbon aktif murni yang diperoleh dari sampel hanya sebesar 5,804%, jauh di bawah batas minimal 65% sebagaimana yang ditetapkan dalam SNI 06-3730-1995, sehingga parameter ini tidak memenuhi standar kualitas arang aktif teknis. Rendahnya kadar karbon murni menunjukkan bahwa sebagian besar massa material terdiri dari zat non-karbon, seperti abu atau senyawa *volatile*, yang tidak berkontribusi terhadap proses adsorpsi. Hal ini menyebabkan kemampuan material dalam menyerap zat pencemar, seperti gas CO₂, menjadi sangat terbatas. Kandungan karbon aktif murni merupakan indikator utama dalam menilai kualitas

adsorben, karena semakin tinggi nilai karbon murni, maka semakin besar pula luas permukaan aktif dan kapasitas adsorpsi yang dimiliki oleh material. Dengan kadar karbon yang rendah, efisiensi pengikatan molekul target menurun drastis, sehingga adsorben menjadi kurang efektif dalam aplikasi lingkungan maupun industri (Murniati et al., 2018; Mahida et al., 2022). Oleh karena itu, kadar karbon murni yang rendah pada sampel ini menjadi salah satu penyebab utama kegagalan material dalam berfungsi optimal sebagai penyerap CO₂.

Rendahnya kadar karbon aktif murni, hanya sebesar 5,804%, erat kaitannya dengan tingginya kadar abu, karena massa karbon aktif murni berkurang secara signifikan akibat dominasi komponen anorganik. Dengan demikian, perbaikan pada pemilihan bahan baku, pengaturan suhu dan aktivator sangat diperlukan untuk meningkatkan mutu arang aktif agar sesuai dengan standar yang ditetapkan.

Sementara itu, berat jenis *CRA* sebesar 1,493 g/cm³ tidak tercantum dalam SNI 06-3730-1995. Hal ini menunjukkan bahwa *CRA* jauh lebih ringan dibanding semen, sehingga substitusi sebagian semen dengan *CRA* berpotensi mengurangi berat total *paving block*. Namun, karena perbedaan densitas yang cukup signifikan, volume *CRA* yang digunakan akan lebih besar untuk massa yang sama, sehingga perlu penyesuaian komposisi campuran agar kuat tekan dan durabilitas *paving block* tetap terjaga. Perbedaan densitas antara semen portland dan *CRA* cukup signifikan, di mana semen portland memiliki densitas sekitar 3,15 g/cm³, sedangkan *CRA* hanya sekitar 1,493 g/cm³. Perbedaan ini menunjukkan bahwa pada volume yang sama, massa semen jauh lebih besar dibanding *CRA*, sehingga penggunaan *CRA* sebagai substitusi parsial semen berpotensi menurunkan densitas total campuran beton atau *paving block*. Meskipun demikian, karbon aktif tetap dipertimbangkan sebagai bahan substitusi karena sebagian fraksi abunya mengandung senyawa anorganik seperti SiO₂, Al₂O₃, dan CaO yang berperan dalam reaksi pozzolanik. Selain itu, luas permukaan spesifik karbon aktif yang tinggi memberikan efek pengisian (*filler effect*) pada mikrostruktur pasta semen sehingga dapat meningkatkan kerapatan pori dan mendukung pengembangan sifat mekanik maupun daya serap material.

Dalam kajian literatur, berat jenis arang aktif berpengaruh terhadap sifat fisik dan kimia adsorben, di mana densitas tinggi sering dikaitkan dengan struktur pori yang lebih rapat dan dominasi makropori atau mesopori, yang berpotensi menurunkan kapasitas adsorpsi jika pori mikropori tidak berkembang optimal (Putri et al., 2020). Selain itu, semakin tinggi berat jenis, semakin besar massa arang aktif per satuan volume, namun hal ini tidak selalu sejalan dengan peningkatan kemampuan adsorpsi, karena kemampuan tersebut lebih ditentukan oleh luas permukaan dan distribusi ukuran pori (Wijayanti & Arifin, 2022). Oleh karena itu, nilai berat jenis sebesar $1,493 \text{ g/cm}^3$ perlu dianalisis lebih lanjut melalui uji karakteristik pori dan kapasitas adsorpsi aktual untuk memahami secara lebih menyeluruh pengaruhnya terhadap performa arang aktif dalam aplikasi tertentu.

Dengan demikian, meskipun arang aktif ini memenuhi standar pada parameter *volatile matter* dan kadar air, kegagalan pada kadar abu dan kandungan karbon aktif murni menunjukkan bahwa produk ini belum memenuhi kriteria arang aktif teknis sesuai SNI 06-3730-1995. Tingginya kadar abu mencerminkan kontaminasi anorganik yang signifikan, sedangkan rendahnya karbon aktif murni menandakan belum terbentuknya struktur mikropori yang berperan penting dalam proses adsorpsi. Oleh sebab itu, berdasarkan karakteristik tersebut, peneliti menyimpulkan bahwa material ini lebih tepat dikategorikan sebagai *CRA* yaitu karbon hasil aktivasi yang belum layak disebut arang aktif teknis karena masih memerlukan optimasi proses aktivasi, pemurnian, serta peningkatan struktur pori untuk mencapai performa adsorpsi yang sesuai standar. Meskipun belum memenuhi spesifikasi teknis secara penuh, material ini tetap dapat dilanjutkan penggunaannya dalam penelitian ini, sesuai dengan praduga awal bahwa keberadaan pori dan struktur karbon yang terbentuk tetap berpotensi memberikan kontribusi positif, khususnya dalam aplikasi sebagai material modifikasi paving block yang ramah lingkungan.

4.2 Analisa Hasil Pengujian Benda Uji

Pengujian material berpedoman pada SNI 03-0691-1996 yaitu bata beton untuk lantai (*paving block*). Adapun pengujian yang dilakukan adalah pengujian sifat tampak dan ukuran, daya serap air, kuat tekan serta terdapat pengujian tambahan untuk menganalisis daya serap CO₂ dengan metode gravimetri pengendapan.

4.2.1 Sifat Tampak dan Ukuran

Pengujian sifat tampak dan ukuran *paving block* dilakukan untuk memastikan bahwa setiap benda uji memenuhi persyaratan fisik sesuai standar SNI 03-0691-1996.

Parameter yang diamati meliputi dimensi panjang, lebar, dan tinggi, serta kondisi visual seperti kesempurnaan bentuk dan tidak adanya cacat permukaan. Tinggi nominal *paving block* yang digunakan adalah 60 mm, dengan toleransi $\pm 8\%$ atau berada dalam rentang 55,2 mm hingga 64,8 mm. Hasil pengujian lengkap disajikan pada **Tabel 4.7** berikut:

Tabel 4. 7 Uji Sifat Tampak Dan Ukuran

Variasi	Kode Variasi	Ukuran (mm)	Kondisi Visual	Standar SNI	Keterangan	Dokumentasi
CRA0	A	200 x 100 x 55,2	√	h $\pm$ 8%	Panjang = Memenuhi Lebar = Memenuhi Tinggi = Memenuhi	 Gambar 4. 2 Benda uji CRA0
	B	200 x 100 x 55,3	√			
	C	200 x 100 x 55,8	√			
	D	200 x 100 x 55,2	√			
	E	200 x 100 x 55,4	√			
	F	200 x 100 x 55,2	√			
	G	200 x 100 x 55,2	√			
	H	200 x 100 x 55,6	√			
	I	200 x 100 x 55,3	√			
	J	200 x 100 x 55,7	√			
	K	200 x 100 x 55,3	√			
	L	200 x 100 x 55,8	√			
CRA5	A	200 x 100 x 55,3	√	h $\pm$ 8%	Panjang = Memenuhi Lebar = Memenuhi Tinggi = Memenuhi	 Gambar 4. 3 Benda uji CRA5
	B	200 x 100 x 55,4	√			
	C	200 x 100 x 55,8	√			
	D	200 x 100 x 55,2	√			
	E	200 x 100 x 55,4	√			
	F	200 x 100 x 55,6	√			
	G	200 x 100 x 55,2	√			
	H	200 x 100 x 55,3	√			
	I	200 x 100 x 55,7	√			
	J	200 x 100 x 55,4	√			
	K	200 x 100 x 55,3	√			
	L	200 x 100 x 55,2	√			

Variasi	Kode Variasi	Ukuran (mm)	Kondisi Visual	Standar SNI	Keterangan	Dokumentasi
CRA10	A	200 x 100 x 55,2	✓	$h \pm 8\%$	Panjang = Memenuhi Lebar = Memenuhi Tinggi = Memenuhi	 Gambar 4. 4 Benda uji CRA10
	B	200 x 100 x 55,3	✓			
	C	200 x 100 x 55,3	✓			
	D	200 x 100 x 55,2	✓			
	E	200 x 100 x 55,4	✓			
	F	200 x 100 x 55,2	✓			
	G	200 x 100 x 55,9	✓			
	H	200 x 100 x 55,8	✓			
	I	200 x 100 x 55,9	✓			
	J	200 x 100 x 55,8	✓			
	K	200 x 100 x 55,8	✓			
	L	200 x 100 x 55,2	✓			
CRA15	A	200 x 100 x 55,2	✓	$h \pm 8\%$	Panjang = Memenuhi Lebar = Memenuhi Tinggi = Memenuhi	 Gambar 4. 5 Benda uji CRA15
	B	200 x 100 x 55,8	✓			
	C	200 x 100 x 55,8	✓			
	D	200 x 100 x 55,7	✓			
	E	200 x 100 x 55,4	✓			
	F	200 x 100 x 55,2	✓			
	G	200 x 100 x 55,2	✓			
	H	200 x 100 x 55,3	✓			
	I	200 x 100 x 55,6	✓			
	J	200 x 100 x 55,8	✓			
	K	200 x 100 x 55,3	✓			
	L	200 x 100 x 55,2	✓			

Berdasarkan hasil pengujian dimensi *paving block* dengan variasi substitusi *CRA* pada berat semen sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% (**Tabel 4.7**), seluruh benda uji menunjukkan ukuran panjang dan lebar hingga kondisi visual yang sesuai dengan standar. Untuk dimensi tinggi, meskipun terdapat variasi antar benda uji, seluruhnya masih berada dalam batas toleransi tinggi menurut standar SNI 03-0691-1996, yaitu antara 55,2 mm hingga 64,8 mm untuk tinggi nominal 60 mm.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan *CRA* sebagai substitusi semen hingga 15% tidak memengaruhi kestabilan dimensi *paving block* secara signifikan. Dimensi tetap sesuai standar, sehingga produk layak diuji lebih lanjut. Temuan ini sejalan dengan penelitian Chantaramanee et al. (2024) dan Sata et al. (2020), yang melaporkan bahwa penggunaan abu biomassa sebagai pengganti sebagian semen tidak menyebabkan perubahan dimensi yang berarti pada produk beton pracetak.

4.2.2 Uji Daya Serap Air

Hasil pengujian daya serap air ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik guna memudahkan analisis pengaruh variasi komposisi material terhadap kemampuannya dalam menyerap air. Rincian hasil pengujian daya serap air *paving block* dengan substitusi *CRA* disajikan pada **Tabel 4.8**.

Tabel 4.8 Hasil Pengujian Daya Serap Air

Variasi	Kode Variasi	Daya Serap Air (%)	Daya Serap Air Rata-rata (%)	SNI 03-0691-1996
CRA0	A	3,644%	3,891%	≤ 6%
	B	3,165%		
	C	4,863%		
	D	8,068%	7,801%	
	E	7,660%		
	F	7,676%		
CRA5	A	3,279%	3,014%	
	B	4,752%		
	C	1,012%		
	D	6,624%	6,949%	
	E	7,930%		
	F	6,292%		
CRA10	A	3,805%	2,962%	
	B	2,725%		
	C	2,355%		
	D	4,113%	3,385%	
	E	2,737%		
	F	3,304%		
CRA15	A	2,449%	2,319%	
	B	2,245%		
	C	2,263%		
	D	2,692%	3,279%	
	E	2,263%		
	F	4,883%		

Keterangan:

Variasi terbaik :

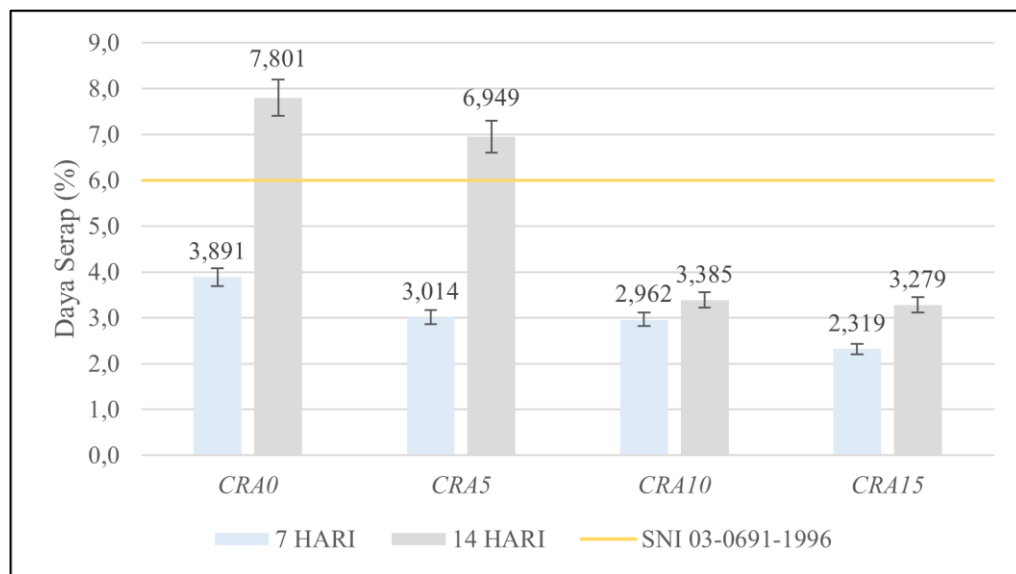
7 Hari
14 Hari

Variasi terburuk :

7 Hari
14 Hari

Berdasarkan data yang tersaji pada **Tabel 4.8** di halaman sebelumnya, dapat diamati bahwa setiap variasi komposisi campuran menunjukkan perbedaan nilai daya serap air yang cukup signifikan. Variasi yang mengandung substitusi *CRA* umumnya menunjukkan penurunan nilai daya serap dibandingkan dengan kontrol tanpa substitusi. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Alfirdaus dan Erniwati (2021) yang menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif dalam campuran beton dapat menurunkan daya serap air hingga 17,9% dibandingkan dengan beton normal tanpa substitusi.

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas terhadap tren data tersebut, maka dilakukan visualisasi dalam bentuk grafik yang menampilkan nilai rata-rata daya serap air dari masing-masing variasi. **Grafik 4.2** membantu mempermudah analisis kecenderungan perubahan daya serap air akibat perlakuan material, serta mengidentifikasi komposisi yang menghasilkan nilai optimum sesuai kriteria standar kualitas *paving block*.



Grafik 4. 2 Uji Daya Serap Air Rata-Rata

Berdasarkan **Grafik 4.2** tentang uji daya serap air, terlihat bahwa nilai daya serap air dari *paving block* bervariasi tergantung pada prosentase penambahan *CRA* dan waktu pengujian (7 hari dan 14 hari). Secara umum, hasil menunjukkan bahwa semakin lama umur pengujian (14 hari), daya serap air cenderung menurun, yang mengindikasikan peningkatan kepadatan dan penurunan porositas

material. Menurut SNI 03-0691-1996, pengujian daya serap air pada *paving block* ditetapkan dengan batas maksimum $\leq 6\%$ untuk mutu B, namun standar ini tidak membedakan hasil berdasarkan umur beton. Pengujian umumnya dilakukan setelah benda uji dikeringkan hingga mencapai massa konstan, sehingga mewakili kondisi kering sepenuhnya yang lebih relevan untuk menilai kemampuan aktual material dalam menyerap air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama periode curing, porositas beton cenderung menurun sehingga daya serap air juga berkurang. Selvan (2021) melaporkan bahwa perpanjangan masa curing pada beton berkontribusi signifikan dalam menekan nilai daya serap air melalui proses hidrasi yang lebih sempurna, yang menyebabkan struktur pori menjadi lebih rapat. Hal ini juga sejalan dengan studi yang dilakukan Gupta et al. (2021) menunjukkan bahwa mortar berbasis *biochar* awalnya menurunkan porositas dan daya serap kapiler setelah proses *accelerated carbonation curing* dan seiring bertambahnya umur (hingga 28 hari), sehingga terjadi densifikasi mikrostruktur. Temuan ini menegaskan bahwa proses curing dan waktu pengujian sangat berpengaruh terhadap sifat fisik material. Dengan demikian, meskipun SNI tidak menekankan variasi umur, pendekatan pengujian dalam kondisi kering sepenuhnya tetap dapat dipandang sejalan dengan praktik ilmiah dalam mengevaluasi kinerja *paving block*.

Menurut acuan SNI 03-0691-1996, batas maksimum daya serap air adalah 6% untuk *paving block* mutu B. Dari hasil yang ditampilkan, variasi terbaik pada umur 7 hari terdapat pada campuran *CRA15* dengan daya serap air sebesar 2,319%, sementara pada umur 14 hari, variasi terbaik juga diperoleh pada campuran *CRA15* dengan nilai 3,279%. Kedua nilai ini berada jauh di bawah ambang batas SNI yaitu $\leq 6\%$, menandakan kualitas yang sangat baik sesuai dengan mutu yang diharapkan yaitu mutu B. Sebaliknya, variasi terburuk atau dengan daya serap air tertinggi pada umur 7 hari ditemukan pada *CRA0* dengan nilai 3,891 %, dan variasi terburuk pada umur 14 hari juga pada *CRA0* dengan nilai 7,801%.

Dalam konteks SNI 03-0691-1996, *paving block* mutu B mensyaratkan daya serap air maksimum sebesar 6%, tanpa adanya pembagian berdasarkan umur beton. Hal ini berarti pengujian dilakukan pada benda uji yang benar-benar kering sehingga hasil mencerminkan kondisi kering sepenuhnya. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa semakin rendah nilai daya serap air, semakin baik kualitas dan durabilitas beton karena berkurangnya pori dan permeabilitas yang dapat memperpanjang ketahanan terhadap lingkungan agresif. Herki et al. (2024) melaporkan adanya korelasi negatif yang kuat antara kuat tekan dan daya serap air ($R^2 = 0,93$), di mana semakin tinggi kuat tekan beton, semakin rendah daya serapnya. Temuan ini sejalan dengan penelitian lain yang menegaskan bahwa daya serap air merupakan parameter penting untuk mengevaluasi durabilitas beton, mengingat air berperan sebagai media utama transportasi ion agresif yang mempercepat kerusakan material (Zhang et al, 2022). Dengan demikian, meskipun SNI hanya menetapkan batas maksimum tanpa mempertimbangkan umur beton, nilai daya serap air yang semakin mendekati batas terendah tetap menunjukkan kinerja struktural dan durabilitas *paving block* yang lebih baik.

Hal ini juga mengindikasikan bahwa nilai terendah pada umur 7 hari belum dapat dijadikan acuan performa terbaik, karena struktur material masih dalam tahap pengerasan awal dan belum sepenuhnya padat. Qin et al. (2022) menyatakan bahwa kepadatan mikrostruktur beton meningkat signifikan setelah 7 hari, sehingga karakteristik sebenarnya lebih akurat dinilai pada umur lanjut. Sedangkan pada umur 14 hari, nilai terburuk terjadi pada *CRA0* dengan nilai 7,801%, yang bahkan melebihi batas maksimum SNI sebesar 6%. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa penambahan *CRA*, *paving block* memiliki porositas lebih tinggi dan kualitas penyerapan air yang lebih buruk, terutama pada umur 14 hari. Tren ini sejalan dengan penelitian oleh Sata et al. (2007), yang menyatakan bahwa penambahan abu biomassa dapat memperbaiki struktur mikro dan menurunkan porositas beton. Selain itu, studi oleh Muthusamy & Zamri (2015) menunjukkan bahwa penggunaan limbah organik sebagai substitusi semen meningkatkan densitas dan menurunkan daya serap air campuran, bila digunakan dalam proporsi yang tepat.

Dengan demikian, penambahan *CRA* sebagai substitusi semen khususnya pada kisaran 10–15%, terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas *paving block*, terutama dari segi ketahanan terhadap serapan air serta variasi *CRA15* dapat dikategorikan sebagai komposisi paling optimal dalam meningkatkan kualitas *paving block* sesuai standar SNI, dengan nilai sebesar 2,319% (7 hari) dan 3,279% (14 hari).

4.2.3 Uji Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik guna memudahkan analisis pengaruh variasi komposisi material terhadap kemampuannya dalam menahan beban tekan hingga hancur, yang dipengaruhi oleh faktor seperti kepadatan, rasio air-semen, kualitas dan jenis semen, karakteristik agregat, efisiensi peralatan, serta mutu bahan penyusun. Rincian hasil pengujian kuat tekan *paving block* dengan substitusi *CRA* disajikan pada **Tabel 4.9**.

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Variasi	Kode Variasi	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	SNI 03-0691-1996
CRA0	A	38,20	34,90	≥ 20 Mpa
	B	34,30		
	C	32,20		
	D	36,20	36,73	
	E	36,90		
	F	37,10		
	G	35,30	36,57	
	H	40,10		
	I	34,30		
CRA5	A	32,10	29,63	
	B	31,20		
	C	25,60		
	D	32,80	33,67	
	E	33,20		
	F	35,00		
	G	34,20	32,80	
	H	36,60		
	I	27,60		
CRA10	A	35,90	29,10	
	B	30,90		
	C	20,50		
	D	31,20	28,97	
	E	27,80		
	F	27,90		

Variasi	Kode Variasi	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	SNI 03-0691-1996
	G	36,70	34,47	
	H	38,40		
	I	28,30		
CRA15	A	36,20	33,97	
	B	34,30		
	C	31,40		
	D	33,80	35,80	
	E	40,20		
	F	33,40		
	G	36,20	35,03	
	H	33,80		
	I	35,10		

Keterangan:

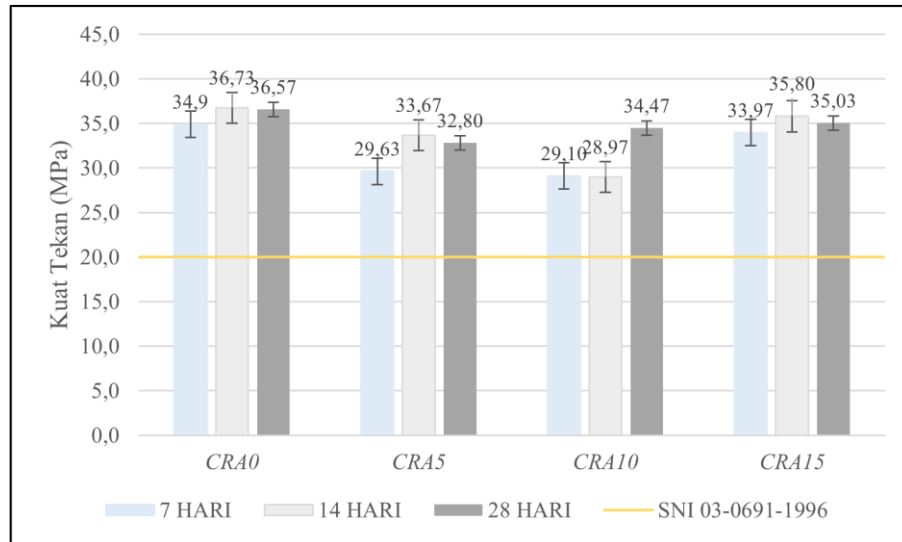
Variasi terbaik:

7 Hari
14 Hari
28 Hari

Variasi terendah :

7 Hari
14 Hari
28 Hari

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas terhadap tren data tersebut, maka dilakukan visualisasi dalam bentuk grafik yang menampilkan nilai rata-rata kuat tekan dari masing-masing variasi. **Grafik 4.3** membantu mempermudah analisis kuat tekan, serta mengidentifikasi komposisi yang menghasilkan nilai optimum sesuai kriteria standar kualitas *paving block*.



Grafik 4.3 Uji Kuat Tekan Rata-Rata

Berdasarkan **Grafik 4.3** pada halaman sebelumnya, hasil uji kuat tekan *paving block* pada umur 7 hari menunjukkan bahwa variasi tanpa penambahan *CRA* (*CRA0*) memiliki kuat tekan sebesar 34,90 MPa, sedangkan pada variasi dengan penambahan *CRA* sebesar 15% (*CRA15*), kuat tekan tercatat sebesar 33,97 MPa. Selisih kuat tekan antara kedua variasi tersebut relatif kecil sebesar 2,67%, dan keduanya jauh melebihi standar minimum SNI 03-0691-1996 untuk mutu B, yaitu rata-rata 20 MPa atau minimal 17 MPa. Pada umur 14 hari, kuat tekan *paving block* dengan variasi *CRA0* mencapai 36,73 MPa, sementara variasi *CRA15* menunjukkan nilai sebesar 35,80 MPa. Selanjutnya, pada umur 28 hari, kuat tekan *paving block* dengan variasi *CRA0* tercatat sebesar 36,57 MPa, dan pada variasi *CRA15* sebesar 35,03 MPa. Fenomena ini sejalan dengan hasil studi oleh Pratiwi et al. (2021), yang melaporkan bahwa penggunaan limbah tempurung kelapa sebagai substitusi hingga 10 % masih menghasilkan kuat tekan beton yang memenuhi standar minimal 20 MPa pada umur 28 hari. Selain itu, meta-analisis oleh Zhao et al. (2024) terhadap penggunaan *biochar* sebagai bahan tambahan semen menunjukkan bahwa substitusi *biochar* hingga sekitar 10 % biasa menurunkan kuat tekan beton hanya sedikit dan tetap berada dalam batas aman untuk aplikasi struktural.

Perlu juga dicatat bahwa seluruh sampel pada penelitian ini dicetak secara manual sesuai batasan penelitian, sehingga variasi proses penuangan, pemadatan,

dan *finishing* antar benda uji berpotensi menimbulkan fluktuasi kuat tekan antar umur. Ketidakkonsistenan cetak manual tersebut termasuk perbedaan tingkat pemadatan, distribusi air, dan kondisi curing local dapat menghasilkan variasi yang lebih besar pada nilai kuat tekan pengukuran awal (7 dan 14 hari). Akibatnya, ketika nilai 7 hari atau 14 hari dikonversi ke estimasi 28 hari menggunakan faktor koreksi, ketidakpastian akibat variasi proses ini akan terakumulasi sehingga estimasi konversi dapat menyimpang cukup signifikan dibandingkan dengan nilai 28 hari yang diukur langsung.

Dalam penelitian ini, hasil kuat tekan yang disajikan pada tiap umur (7, 14, dan 28 hari) merupakan hasil uji langsung, bukan nilai hasil konversi ke 28 hari. Perbedaan relatif antara *CRA0* dan *CRA15* pada umur 28 hari tercatat sekitar 4,21%, nilai yang masih kecil dan berada di atas ambang mutu B. Namun, perlu diperhatikan bahwa perbedaan pada hasil estimasi konversi dari umur 7 atau 14 hari dapat menjadi lebih besar apabila variasi pencetakan manual tidak terkendali, sehingga hasil konversi mungkin kurang merepresentasikan nilai aktual pada umur 28 hari.

Dengan demikian melalui pendekatan tersebut, penambahan *CRA* hingga 15 % terbukti aman untuk penguatan struktur *paving block*, sekaligus membuka peluang pemanfaatan *CRA* sebagai bahan ramah lingkungan yang tidak mengorbankan mutu kuat tekan karena penurunan kuat tekan yang terjadi pada *CRA0* dengan *CRA15* umur 28 hari relatif kecil, yaitu hanya 4,21%.

4.2.4 Uji Daya Serap CO₂

Hasil pengujian daya serap CO₂ ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik guna memudahkan analisis pengaruh variasi komposisi material terhadap kemampuannya dalam adsorpsi CO₂. Rincian hasil pengujian daya serap CO₂ *paving block* dengan substitusi CRA disajikan pada **Tabel 4.10**.

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Daya Serap CO₂

Variasi	Kode Variasi	Daya Serap CO ₂ (%)	Daya Serap CO ₂ Rata-rata (%)
CRA0	G	0,008	0,007
	H	0,008	
	I	0,006	
	J	0,007	0,007
	K	0,009	
	L	0,006	
CRA5	G	0,015	0,015
	H	0,015	
	I	0,016	
	J	0,014	0,014
	K	0,015	
	L	0,013	
CRA10	G	0,021	0,019
	H	0,017	
	I	0,020	
	J	0,015	0,015
	K	0,015	
	L	0,014	
CRA15	G	0,022	0,022
	H	0,024	
	I	0,020	
	J	0,017	0,015
	K	0,013	
	L	0,015	

Keterangan:

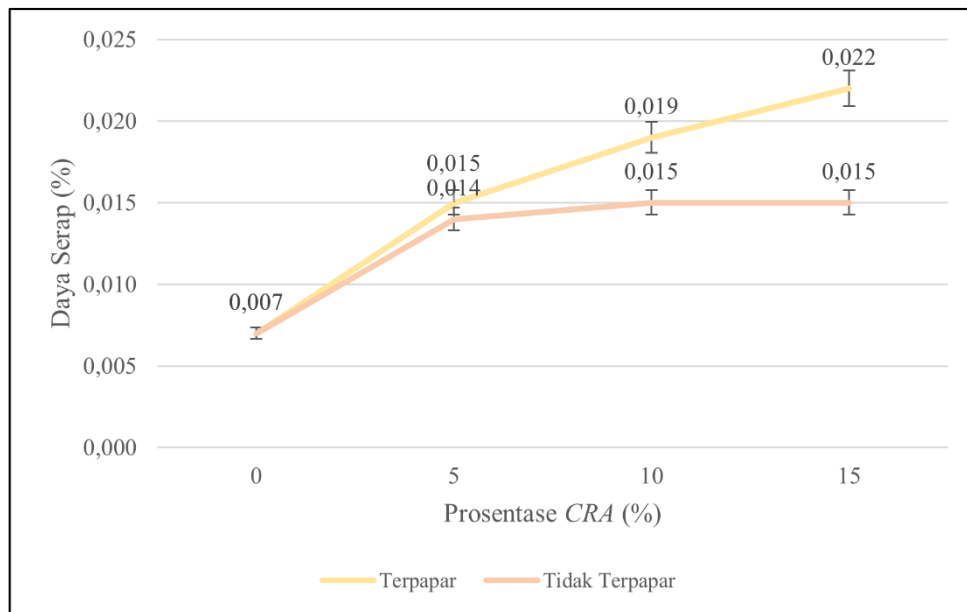
Variasi terbaik :

Terpapar
Tidak Terpapar

Variasi terendah :

Terpapar
Tidak Terpapar

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas terhadap tren data tersebut, maka dilakukan visualisasi dalam bentuk grafik yang menampilkan nilai rata-rata kuat tekan dari masing-masing variasi. **Grafik 4.4** membantu mempermudah analisis daya serap CO_2 , serta mengidentifikasi komposisi yang menghasilkan nilai optimum sesuai kriteria standar kualitas *paving block*.



Grafik 4. 4 Hasil Daya Serap CO_2 Rata-Rata

Berdasarkan **Grafik 4.4**, terlihat bahwa variasi *CRA* memengaruhi kemampuan daya serap CO_2 baik pada kondisi terpapar maupun tidak terpapar. Pada kondisi terpapar CO_2 , nilai daya serap mengalami peningkatan seiring bertambahnya prosentase *CRA*, dengan nilai tertinggi terdapat pada *CRA15* sebesar 0,022%, dan nilai terendah pada *CRA0* sebesar 0,007%. Sedangkan pada kondisi tidak terpapar CO_2 , peningkatan daya serap terjadi dengan nilai tertinggi terdapat pada *CRA10* dan *CRA15* sebesar 0,015%, dan nilai terendah tetap terjadi pada *CRA0* sebesar 0,007%.

Secara keseluruhan, variasi terbaik dalam menyerap CO_2 adalah *CRA15* pada kondisi terpapar, sedangkan variasi terbaik tanpa paparan adalah *CRA15*. Sementara itu, variasi dengan performa terburuk baik pada kondisi terpapar

maupun tidak terpapar adalah *CRA0*, yang menunjukkan bahwa ketiadaan *CRA* menyebabkan rendahnya kemampuan adsorpsi CO₂. Tren ini konsisten dengan hasil penelitian mengenai akselerasi karbonasi pada beton yang mengandung campuran *biochar* dan *fly ash*, di mana penambahan *biochar* secara optimal meningkatkan penyerapan CO₂ secara signifikan tanpa menurunkan kuat tekan, sekaligus memperbaiki kualitas fisik material (Wang et al., 2020). Selain itu, ulasan menyeluruh oleh Li et al. (2024) menyatakan bahwa karbon aktif seperti *biochar* dapat meningkatkan kapasitas penangkapan CO₂ melalui struktur mikropori dan interaksinya dengan Ca(OH)₂ dalam matriks semen, sehingga meningkatkan stabilitas karbonasi. Temuan ini juga selaras dengan hasil penelitian Nor Adilla Rashidi et al. (2014), yang menunjukkan bahwa *activated carbon* dari tempurung kelapa memiliki kapasitas adsorpsi CO₂ cukup tinggi yang berkorelasi dengan luas permukaan pori dan struktur mikro yang dominan pada pori mikropori.

Dengan demikian, penambahan *CRA* hingga 15% menunjukkan potensi signifikan dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi CO₂ tanpa menurunkan mutu kuat tekan *paving block*. Temuan ini membuka peluang penelitian lanjutan terkait pemanfaatan *CRA* sebagai substitusi sebagian semen pada berbagai aplikasi konstruksi ramah lingkungan. Meskipun tidak sepenuhnya memenuhi standar SNI SNI 06-3730-1995 mengenai mutu arang aktif teknis, *CRA* tetap memiliki kemampuan menyerap CO₂ secara efektif.

4.3 Analisis Biaya

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis biaya antara pembuatan *paving block* konvensional dan *CRA paving* sebagai bahan perbandingan. Perhitungan volume bahan didasarkan pada dimensi *paving block* berukuran 200 x 100 x 60 mm. Berikut ini merupakan **Tabel 4.11** yang menyajikan hasil survei harga bahan berdasarkan referensi dari *e-commerce Shopee* :

Tabel 4. 11 Hasil Survei Harga Bahan

No.	Bahan	Nama Toko	Lokasi	Harga (Rp)	Satuan	Harga per kg (Rp)	Harga Rata-rata per kg (Rp)
1.	Semen Tiga Roda	grosirbahan bangunan	Jakarta Pusat	52.496,00	40 kg	1.312,40	1.390,30
2.	Semen Tiga Roda	Mandala Abadi TB	Bogor	58.500,00	40 kg	1.462,50	
3.	Semen Tiga Roda	Satu Bangunan	Bekasi	55.840,00	40 kg	1.396,00	
4.	Pasir Muntilan	swalayan udluthfi	Jepara	424.860,00	1 Colt	226,59	201,10
5.	Pasir Muntilan	Combo Putra	Semarang	270.000,00	1 Colt	144,00	
6.	Pasir Muntilan	TB ABADI KUDUS	Kudus	436.320,00	1 Colt	232,70	
7.	Tempurung Kelapa	Media_Tanam	Ciamis	6.000,00	1 kg	6.000,00	5.766,67
8.	Tempurung Kelapa	CCnett	Sumedang	5.000,00	1 kg	5.000,00	
9.	Tempurung Kelapa	Galeri Mustika 27	Trenggalek	6.300,00	1 kg	6.300,00	

Berdasarkan **Tabel 4.11**, hasil survei harga bahan dari berbagai toko yang diakses melalui *e-commerce Shopee*, dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. Semen Tiga Roda memiliki kisaran harga per kilogram antara Rp. 1.312,40,- hingga Rp. 1.462,50,- , dengan harga rata-rata sebesar Rp. 1.390,30,- /kg.
2. Pasir Muntilan menunjukkan fluktuasi harga yang lebih signifikan, yakni dari Rp. 144,00,- /kg hingga Rp. 232,70,- /kg, dengan harga rata-rata sebesar Rp. 201,10,- /kg.

3. Tempurung kelapa sebagai bahan baku *CRA* menunjukkan harga tertinggi per kilogram dibandingkan material lainnya, dengan kisaran antara Rp. 5.000,00,- – Rp. 6.300,00,- /kg, dan harga rata-rata sebesar Rp. 5.766,67,- /kg.

Secara umum, harga bahan dari *platform e-commerce* dapat digunakan sebagai referensi untuk estimasi biaya produksi, namun tetap perlu mempertimbangkan variabel logistik, volume pembelian, dan ketersediaan lokal yang bisa memengaruhi harga aktual di lapangan.

Untuk *CRA*, peneliti memproduksi dengan total harga Rp. 112.929,17,- per tiga kilogram dengan mempertimbangkan penyusutan hingga 70% dari berat tempurung kelapa karena proses karbonisasi sehingga hanya tersisa sekitar 30% dalam bentuk arang. Hal ini menunjukkan bahwa proses pembakaran menyebabkan penyusutan massa yang signifikan (*WaterTech Online*, 2022). Berikut dapat dilihat rincian pada **Tabel 4.12** :

Tabel 4. 12 *Biaya Produksi CRA*

No.	Uraian	Kebutuhan	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
A.	Bahan				
	Tempurung Kelapa	10	kg	5.766,67	57.666,67
	Soda Kue	1	kg	14.000,00	14.000,00
	Asam Fosfat	0,15	liter	51.800,00	7.770,00
	Aquades	10	liter	800,00	8.000,00
Jumlah Harga Bahan					87.437,67
B.	Peralatan				
	Furnace, Oven, dll	kwh	15	1.699,50	25.492,50
Jumlah Harga Peralatan					25.492,50
C.	Jumlah Harga Tenaga dan Bahan (A+B)				112.929,17

Berdasarkan **Tabel 4.12**, total biaya produksi *CRA* sebesar Rp112.929,17,- untuk tiga kilogram produk, sehingga biaya produksi per satu kilogram *CRA* adalah sekitar Rp. 37.643,06,-. Biaya tersebut terdiri dari bahan sebesar Rp. 29.145,89 dan peralatan sebesar Rp. 8.497,50,- per kilogram. Komponen biaya terbesar berasal dari bahan baku, khususnya tempurung kelapa yang menyumbang

sekitar Rp. 19.222,22,- per kilogram. Hal ini menunjukkan bahwa bahan baku merupakan faktor utama yang memengaruhi total biaya produksi *CRA*.

Setelah dihitung, total biaya produksi *CRA* sebesar Rp. 112.929,17,- untuk tiga kilogram, atau setara dengan Rp. 37.643,06,- per kilogram. Nilai ini menjadi acuan dalam perhitungan biaya campuran *paving block* berbasis *CRA*. Sementara itu, komponen biaya pekerja dalam pembuatan *paving block* mengacu pada Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) Kota Semarang. Setelah dilakukan analisis sesuai SNI yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini, perhitungan biaya campuran *paving block* hanya difokuskan pada variasi *CRA10* dan *CRA15*. Hal ini dikarenakan variasi *CRA5* dikategorikan sebagai produk yang tidak berhasil, meskipun memiliki kuat tekan sesuai mutu B, namun tidak memenuhi persyaratan daya serap air karena melebihi batas maksimum yang ditetapkan dalam SNI.

Selanjutnya, analisis biaya pembuatan *paving block CRA0* (konvensional) dapat dilihat pada **Tabel 4.13** berikut:

Tabel 4. 13 Analisis Biaya CRA0

No.	Uraian	Kebutuhan	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
A.	Tenaga Kerja				
	Pekerja	1	per <i>paving block</i>	648,76	648,76
Jumlah Harga Tenaga Kerja					648,76
B.	Bahan				
	Semen <i>PCCI</i>	1,26	kg	1.390,30	1.751,78
	Pasir Muntlan	2,016	kg	201,10	405,41
	<i>CRA</i>	0,00	kg	37.643,06	0,00
	Air	0,378	liter	0,00	0,00
Jumlah Harga Bahan					2.157,19
C.	Jumlah Harga Tenaga dan Bahan (A+B)				2.805,95

Berdasarkan total perhitungan pada **Tabel 4.13**, harga pembuatan *paving block CRA0* (konvensional) diketahui sebesar Rp. 2.805,95,- per buah. Nilai tersebut mencerminkan akumulasi dari seluruh komponen biaya produksi. Harga ini menjadi acuan penting untuk membandingkan efisiensi biaya dengan variasi *paving block* lainnya yang dimodifikasi menggunakan material *CRA* ramah lingkungan. Untuk melihat perbandingannya secara lebih rinci, diperlukan analisis biaya pada masing-masing variasi.

Analisis biaya pembuatan *paving block CRA10* dapat dilihat berdasarkan **Tabel 4.14** dibawah:

Tabel 4. 14 Analisis Biaya CRA10

No.	Uraian	Kebutuhan	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
A.	Tenaga Kerja				
	Pekerja	1	per <i>paving block</i>	Rp. 648,76	Rp. 648,76
Jumlah Harga Tenaga Kerja					Rp. 648,76
B.	Bahan				
	Semen <i>PCC I</i>	1,2004	kg	Rp. 1.390,30	Rp. 1.668,92
	Pasir Muntilan	2,016	kg	Rp. 201,10	Rp. 405,41
	<i>CRA</i>	0,0596	kg	Rp. 37.643,06	Rp. 2.243,53
	Air	0,36012	liter	Rp. 0,00	Rp. 0,00
Jumlah Harga Bahan					Rp. 4.317,85
C.	Jumlah Harga Tenaga dan Bahan (A+B)				Rp. 4.966,61

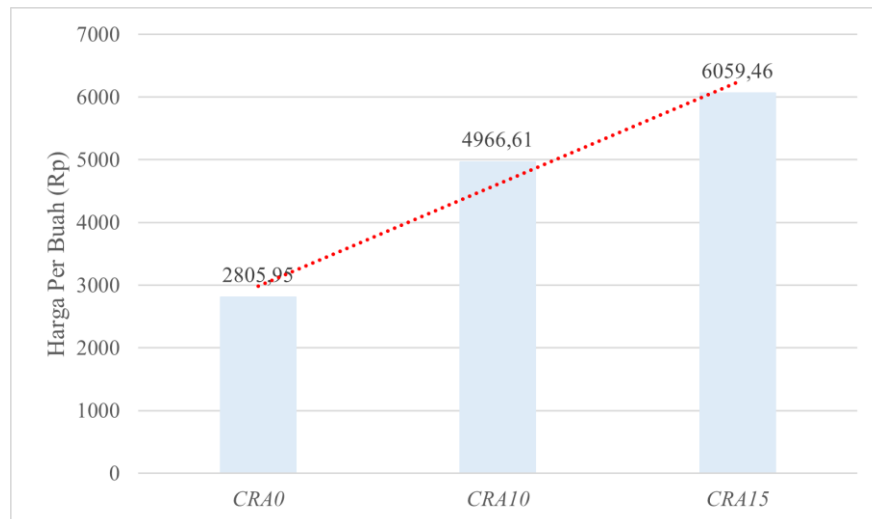
Berdasarkan total perhitungan pada **Tabel 4.14**, harga pembuatan *paving block CRA10* diketahui sebesar Rp. 4.966,61,- per buah. Harga tersebut mengalami kenaikan sebesar 77,04% dari *paving block CRA0* (konvensional).

Analisis biaya pembuatan *paving block CRA15* dapat dilihat berdasarkan **Tabel 4.15** dibawah:

Tabel 4. 15 Analisis Biaya CRA15

No.	Uraian	Kebutuhan	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
A.	Tenaga Kerja				
	Pekerja	1	per <i>paving block</i>	Rp. 648,76	Rp. 648,76
Jumlah Harga Tenaga Kerja					Rp. 648,76
B.	Bahan				
	Semen <i>PCC I</i>	1,1796	kg	Rp. 1.390,30	Rp. 1.640,00
	Pasir Muntilan	2,016	kg	Rp. 201,10	Rp. 405,41
	<i>CRA</i>	0,0894	kg	Rp. 37.643,06	Rp. 3.365,29
	Air	0,35118	liter	Rp. 0,00	Rp. 0,00
Jumlah Harga Bahan					Rp. 5.410,70
C.	Jumlah Harga Tenaga dan Bahan (A+B)				Rp. 6.059,46

Berdasarkan total perhitungan pada **Tabel 4.15**, harga pembuatan *paving block CRA15* diketahui sebesar Rp 6.059,46 per buah. Harga tersebut mengalami kenaikan sebesar 115,93% dari *paving block CRA0* (konvensional) dan kenaikan sebesar 22,00% dari *paving block CRA10*.



Grafik 4.5 Hasil Analisis Biaya Produksi Paving Block CRA Per Buah

Berdasarkan **Grafik 4.5**, hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi peningkatan biaya produksi per buah *paving block CRA*. Meskipun biaya produksi lebih tinggi, *paving block CRA* memiliki keunggulan signifikan dari aspek ekologis, yaitu kemampuannya dalam mengadsorpsi emisi gas buang CO₂ serta potensinya sebagai bahan substitusi semen untuk menekan emisi CO₂ dari industri semen. Inovasi ini sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan dan berkontribusi dalam pengembangan *green infrastructure*.

Oleh karena itu, peningkatan biaya produksi *paving block* berbasis *CRA* dapat dipandang sebagai investasi lingkungan jangka panjang yang memberikan manfaat ekologis dan sosial. Hal ini penting, mengingat sektor transportasi dan konstruksi merupakan penyumbang utama emisi karbon. Kendaraan bermotor menghasilkan CO₂ sebagai polutan utama (Sandri et al., 2018), sementara produksi semen telah meningkatkan konsentrasi CO₂ atmosfer dari 280 menjadi 410 ppmv sejak 1750 hingga 2023, berpotensi menaikkan suhu global hingga 5,8 °C (Kaptan et al., 2023). Meskipun berbagai strategi mitigasi telah diterapkan, tingginya laju produksi menjadikan emisi karbon dari sektor ini tetap menjadi tantangan serius.

Dalam konteks inilah, *paving block CRA* dapat menjadi solusi inovatif yang tidak hanya membantu mengurangi polusi dari sektor transportasi melalui adsorpsi CO₂, tetapi juga berkontribusi dalam mengurangi ketergantungan terhadap semen, sehingga mendukung upaya penurunan emisi karbon secara lebih holistik dan berkelanjutan.

4.4 Analisis Hasil Keseluruhan Penelitian

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, diperoleh hasil yang menunjukkan potensi aplikatif *CRA* dari tempurung kelapa dalam modifikasi *paving block* ramah lingkungan. Proses dimulai dengan aktivasi karbon menggunakan metode kimia berbasis asam fosfat (H₃PO₄) pada suhu 400°C, menghasilkan material karbon berwarna hitam pekat dengan struktur yang tampak berpori. Meskipun demikian, karakteristik karbon yang dihasilkan belum sepenuhnya memenuhi spesifikasi arang aktif teknis menurut SNI 06-3730-1995, sehingga dalam penelitian ini dikategorikan sebagai *CRA*. Penggunaan suhu 400°C sendiri berada dalam kisaran yang umum diterapkan dalam aktivasi kimia dengan H₃PO₄, karena dinilai cukup efektif dalam mengembangkan pori karbon tanpa memicu over-dekomposisi yang lazim terjadi pada suhu di atas 500°C. Beberapa studi juga menunjukkan bahwa aktivasi pada suhu ini dapat menghasilkan karbon dengan struktur pori yang baik dan meminimalkan pelepasan emisi CO₂, selama proses pemanasan dikendalikan secara tepat (Ioannidou & Zabaniotou, 2007; Lua & Yang, 2004). Oleh karena itu, suhu 400°C dapat dianggap sebagai titik kompromi yang rasional antara efektivitas aktivasi dan pertimbangan lingkungan. Selanjutnya, *CRA* digunakan sebagai bahan substitusi parsial terhadap semen dalam pembuatan *paving block* dengan variasi komposisi 0%, 5%, 10%, dan 15%. Hasil seluruh pengujian untuk setiap variasi tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.16** pada halaman selanjutnya.

Tabel 4. 16 Rekapitulasi Hasil Penelitian

No	Variasi	Daya Serap Air Rata-Rata (%)		Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)			Rata-Rata Daya Serap CO ₂ (%)		Analisis Biaya (Rp)
		7 Hari	14 Hari	7 Hari	14 Hari	28 Hari	Terpapar	Tidak Terpapar	
1.	<i>CRA0</i>	3,891	7,801	34,90	36,73	36,57	0,007	0,007	2.805,95
2.	<i>CRA5</i>	3,014	6,949	29,63	33,67	32,80	0,015	0,014	-
3.	<i>CRA10</i>	2,962	3,385	29,10	28,97	34,47	0,019	0,015	4.966,61
4.	<i>CRA15</i>	2,319	3,279	33,97	35,80	35,03	0,022	0,015	6.059,46

Berdasarkan **Tabel 4.16** pada halaman sebelumnya, yang memuat rekapitulasi hasil penelitian, uji daya serap air menunjukkan bahwa penambahan *CRA* dapat menurunkan porositas *paving block*. Variasi *CRA15* menghasilkan nilai daya serap air terendah, yakni 2,319% pada umur 7 hari dan 3,279% pada umur 14 hari. Kedua nilai tersebut berada jauh di bawah batas maksimum yang ditetapkan dalam SNI 03-0691-1996 untuk kategori *paving block* mutu B, yaitu sebesar 6%. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur material menjadi lebih rapat seiring meningkatnya kadar *CRA*. Variasi *CRA15* dipilih sebagai komposisi optimum karena memiliki daya serap air terendah, yang menunjukkan kinerja struktural dan durabilitas *paving block* lebih baik. Penurunan daya serap air berkorelasi dengan peningkatan kuat tekan ($R^2 = 0,93$) dan menurunnya pori serta permeabilitas, sehingga memperlambat penetrasi ion agresif yang merusak beton (Herki et al., 2024; Zhang et al., 2022). Meski SNI hanya menetapkan batas maksimum, daya serap air mendekati batas terendah tetap menjadi indikator kualitas dan durabilitas yang unggul.

Dari segi kuat tekan, seluruh variasi *paving block*, termasuk dengan penambahan *CRA* hingga 15%, masih menunjukkan nilai yang melebihi standar minimum SNI 03-0691-1996 untuk kategori mutu B, yaitu sebesar 20 MPa. Variasi *CRA0* mencatat kuat tekan tertinggi sebesar 34,90 MPa pada umur 7 hari, sedangkan *CRA15* mencapai 33,97 MPa. Pada umur 14 hari, terjadi peningkatan kuat tekan menjadi 36,73 MPa untuk *CRA0* dan 35,80 MPa untuk *CRA15*. Namun, pada umur 28 hari, kedua variasi tersebut mengalami penurunan nilai

kuat tekan secara berturut-turut menjadi 36,57 MPa (*CRA0*) dan 35,03 MPa (*CRA15*).

Pada umur 7 dan 14 hari, *paving block* dengan penambahan *CRA* sebesar 5%, 10%, hingga 15% belum menunjukkan pola grafik kuat tekan yang konsisten atau teratur. Pada umur 7 hari, nilai kuat tekan berturut-turut adalah 29,63 MPa (*CRA5*), 29,10 MPa (*CRA10*), dan 33,97 MPa (*CRA15*). Sementara itu, pada umur 14 hari, terjadi fluktuasi dengan nilai 33,67 MPa (*CRA5*), 28,97 MPa (*CRA10*), dan 35,80 MPa (*CRA15*). Namun, pada umur 28 hari, grafik kuat tekan menunjukkan tren yang lebih stabil dan meningkat secara bertahap, yaitu 32,80 MPa (*CRA5*), 34,47 MPa (*CRA10*), dan 35,03 MPa (*CRA15*), yang mencerminkan perkembangan kekuatan yang lebih baik pada tahap pematangan akhir. Hal ini sejalan dengan beberapa studi menyatakan bahwa nilai kuat tekan beton maupun *paving block* umumnya mencapai kestabilan dan performa optimal pada umur 28 hari. Penelitian oleh Rashad (2019) menunjukkan bahwa perkembangan kuat tekan beton berlangsung signifikan hingga usia 28 hari, dan setelah itu cenderung stabil. Selain itu, studi oleh Pradana et al. (2020) menegaskan bahwa umur 28 hari merupakan fase kritis di mana kuat tekan mencapai nilai maksimal dan fluktuasi mulai menurun.

Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *CRA* sebesar 15% hanya menyebabkan penurunan kuat tekan sebesar 4,21% dibandingkan variasi kontrol (*CRA0*) pada umur 28 hari, yang tergolong sangat kecil dan tidak signifikan secara struktural. Dengan demikian, *CRA* tetap layak digunakan sebagai bahan substitusi parsial semen, karena mampu mempertahankan kekuatan *paving block* di atas ambang batas SNI, sekaligus memberikan nilai tambah dari sisi pemanfaatan limbah dan potensi adsorpsi gas CO₂.

Daya serap air merupakan salah satu parameter penting yang berhubungan langsung dengan kuat tekan *paving block*. Semakin tinggi daya serap air, maka semakin besar pula porositas material, sehingga luas bidang padat yang mampu menahan beban berkurang dan kekuatan tekan menurun. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan porositas akibat penyerapan air berlebih dapat mempercepat kerusakan serta menurunkan durabilitas *paving block* dalam jangka panjang

(Anwar & Amrullah, 2018; Fitriani & Santosa, 2019). Sebaliknya, pengendalian kadar air melalui optimasi komposisi campuran maupun penambahan bahan pozzolan terbukti mampu menurunkan daya serap sekaligus meningkatkan densitas, yang pada akhirnya berdampak positif terhadap peningkatan kuat tekan (Hidayat & Nurhayati, 2020; Wijaya & Putra, 2021). Dengan demikian, keterkaitan antara daya serap air dan kuat tekan menjadi aspek krusial yang perlu dipertimbangkan dalam perancangan dan produksi *paving block* agar memenuhi standar mutu yang dipersyaratkan.

Penurunan porositas dan variasi kuat tekan pada beton dapat terjadi akibat perbedaan berat jenis antara *CRA* dan semen portland. Berat jenis *CRA* yang lebih rendah dibanding semen menyebabkan perubahan distribusi partikel dalam campuran beton, sehingga memengaruhi kepadatan mikrostruktur dan mengurangi jumlah pori. Kondisi ini berpotensi meningkatkan densitas lokal material, memperbaiki ikatan antarpartikel, dan pada akhirnya memengaruhi kuat tekan serta durabilitas beton secara keseluruhan. Selain itu, metode pembuatan *paving block* yang dilakukan secara cetak manual, sebagaimana dibatasi dalam penelitian ini, turut memengaruhi homogenitas campuran dan kepadatan material, sehingga berdampak pada sifat mekanik dan porositas *paving block*.

Pada uji penyerapan CO_2 , hasil menunjukkan bahwa peningkatan kadar *CRA* secara umum mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi CO_2 . Pada kondisi terpapar CO_2 , variasi *CRA15* mencatat nilai serapan tertinggi sebesar 0,022%, yang merupakan peningkatan sebesar 214,29% dibandingkan kontrol (*CRA0*) yang hanya sebesar 0,007%. Sementara itu, dalam kondisi tidak terpapar CO_2 , nilai tertinggi dicapai oleh *CRA10* dan *CRA15* sebesar 0,015%, atau meningkat 114,29% dibandingkan nilai terendah pada *CRA0* (0,007%). Temuan ini menegaskan bahwa penambahan *CRA* secara signifikan meningkatkan kemampuan *paving block* dalam menyerap CO_2 , bahkan dalam kondisi lingkungan normal, sehingga menunjukkan potensi *CRA* sebagai bahan fungsional untuk aplikasi bangunan ramah lingkungan. Tren ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, seperti yang dilaporkan oleh Wang et al. (2020), bahwa penambahan *biochar* dan *fly ash* pada beton dapat meningkatkan penyerapan CO_2 tanpa

mengorbankan kekuatan tekan, serta memperbaiki kualitas fisik material. Li et al. (2024) juga menyatakan bahwa karbon aktif seperti *biochar* mampu meningkatkan kapasitas penangkapan CO₂ melalui struktur mikropori dan reaksi dengan Ca(OH)₂ dalam matriks semen. Selaras dengan itu, Nor Adilla Rashidi et al. (2014) menunjukkan bahwa karbon aktif dari tempurung kelapa memiliki kapasitas adsorpsi CO₂ yang tinggi karena dominasi pori mikro dan luas permukaan yang besar. Meskipun produk *CRA* dalam penelitian ini belum sepenuhnya memenuhi standar SNI untuk arang aktif teknis, *CRA* memiliki keunggulan karena tidak menghasilkan tambahan emisi CO₂ dan telah terbukti mampu menyerap CO₂ secara efektif.

Dari segi analisis biaya, penggunaan *CRA* juga menunjukkan efisiensi yang cukup signifikan. Harga produksi *paving block CRA0* (konvensional) sebesar Rp.2.805,95,- menjadi titik acuan. Pada variasi *CRA10*, biaya meningkat menjadi Rp.4.966,61,- atau mengalami kenaikan sebesar 77,04% dari *CRA0*. Adapun pada *CRA15*, harga produksi tercatat sebesar Rp.6.059,46,- meningkat sebesar 115,93% dari *CRA0* dan 38,50% dari *CRA10*. Kenaikan ini mencerminkan adanya tambahan biaya dari *CRA*, namun dapat dipertimbangkan sebagai investasi sebanding dengan peningkatan fungsi adsorpsi CO₂ dan kontribusi terhadap produk ramah lingkungan.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *CRA* berpotensi besar dikembangkan lebih lanjut sebagai material alternatif dalam pembuatan *paving block* atau bahan substitusi semen pada penerapan material konstruksi lainnya dengan fungsi tambahan sebagai penyerap emisi CO₂. Dari segi daya serap air, penambahan *CRA* mampu menurunkan porositas material hingga berada jauh di bawah ambang batas SNI 03-0691-1996 pada kategori mutu B, menunjukkan struktur yang lebih rapat dan tahan terhadap penetrasi air. Dari sisi kuat tekan, seluruh variasi *paving block* dengan *CRA* tetap memenuhi standar mutu SNI 03-0691-1996 pada kategori mutu B, bahkan menunjukkan kekuatan yang kompetitif hingga umur 28 hari. Selain itu, berdasarkan analisis biaya, penggunaan *CRA* memang belum dapat dikatakan lebih ekonomis dibandingkan dengan *paving block* konvensional, karena proses aktivasi dan penggunaan bahan tambahan

menambah total biaya produksi. Namun, mengingat *CRA* berasal dari limbah tempurung kelapa yang melimpah dan bersifat terbarukan, penggunaannya tetap menawarkan nilai tambah dari sisi keberlanjutan dan fungsi lingkungan, khususnya sebagai material penyerap CO₂ dalam aplikasi bangunan ramah lingkungan.