

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Paving Block*

Menurut SII 0819-88, *paving block* (**Gambar 2.1**) merupakan produk beton pracetak yang tersusun atas campuran agregat, semen portland, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan, selama tidak menurunkan mutu produk. Komponen utama *paving block* terdiri dari agregat halus seperti pasir sebagai pengisi, semen portland sebagai pengikat hidrolik, serta air yang mendukung proses hidrasi dan memengaruhi kelecakan (*workability*) campuran. Dalam aplikasinya, bahan aditif seperti *fly ash*, serat, atau zat kimia tertentu sering ditambahkan untuk meningkatkan karakteristik spesifik, seperti kekuatan tekan, ketahanan aus, dan daya serap air. Kualitas dan proporsi masing-masing bahan sangat memengaruhi kinerja akhir *paving block*, baik secara mekanik maupun visual. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Ihfansyah & Teguh (2024) yang melaporkan bahwa substitusi 9,5% abu tempurung kelapa (*CSA*) mampu menghasilkan kuat tekan sebesar 40,45 MPa dan daya serap air 2,35%. Masrur (2023) juga menunjukkan bahwa kombinasi *CSA* dan zeolit secara signifikan meningkatkan performa *paving block* hingga memenuhi standar SNI.

Paving block juga banyak digunakan di area luar bangunan seperti jalan, trotoar, dan parkir karena mudah dipasang, dirawat, serta mampu meresapkan air ke dalam tanah. Sebagai perkerasan semi-lentur, *paving block* atau bata beton berfungsi menggantikan permukaan tanah agar lebih stabil dan kuat menahan beban (Meileni Devi et al., 2021; Rahmi Aulia Siti et al., 2022).



Gambar 2. 1 *Paving Block*

2.1.1 Syarat Mutu *Paving Block*

Menurut SNI 03-0691-1996, *paving block* memiliki klaim mutu yang mencakup beberapa aspek penting untuk menjamin kualitas dan ketahanannya. Standar ini menetapkan bahwa *paving block* harus memenuhi persyaratan tertentu, seperti kuat tekan minimum, batas daya serap air, dimensi yang seragam, serta ketahanan terhadap aus dan beban lalu lintas sebagai berikut :

- Sifat Tampak : teruntuk lantai diharuskan memiliki bentuk sempurna dibagian sudut dan rusuk, tidak terdapat retak serta tak dapat dirapikan dengan goresan jari tangan.
- Bentuk dan Ukuran : setiap pembuat biasanya akan memberikan leaflet secara tertulis berupa penjelasan tentang karakteristik seperti bentuk dan ukuran serta daya dukung beserta cara pemasangannya. Teruntuk penyimpangan memilih tebal yang diperkenankan sebesar $h \pm 8\%$.
- Berikut pada **Tabel 2.1** terdapat sifat fisis *paving block*:

Tabel 2. 1 Sifat Fisis *Paving Block*

Mutu	Kuat Tekan (MPa)		Ketahanan Aus (mm/menit)		Penyerapan air, rata-rata maks (%)
	Rata-Rata	Minimum	Rata-Rata	Minimum	
A	40	35	0,09	0,103	3
B	20	17	0,13	0,149	6
C	15	12,5	0,16	0,184	8
D	10	8,5	0,219	0,251	10

Sumber : SNI-03-0691-1996

Berdasarkan **Tabel 2.1** yang merujuk pada SNI 03-0691-1996, sifat fisis *paving block* diklasifikasikan ke dalam empat mutu, yaitu A, B, C, dan D berdasarkan nilai kuat tekan, ketahanan aus, serta daya serap air. Terdapat perbedaan nilai rata-rata dan minimum disetiap mutunya. Perbedaan nilai tersebut mencerminkan klasifikasi kualitas *paving block* yang digunakan untuk berbagai kebutuhan konstruksi, di mana mutu A direkomendasikan untuk area dengan beban lalu lintas berat dan mutu D keperluan ringan.

2.1.2 Klasifikasi *Paving Block*

Menurut SNI 03-0691-1996, klasifikasi *paving block* dibedakan dalam penggunaannya (**Tabel 2.2**) yaitu:

Tabel 2. 2 *Klasifikasi Paving Block*

Mutu	Penggunaan
A	Jalan
B	Lahan Parkir
C	Trotoar Pejalan Kaki
D	Taman dan lainnya

Sumber : SNI-03-0691-1996

Berdasarkan SNI 03-0691-1996, *paving block* diklasifikasikan ke dalam empat mutu, yaitu A, B, C, dan D, yang masing-masing disesuaikan dengan peruntukannya sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 2.2**. Setiap mutu memiliki persyaratan kuat tekan tertentu yang menentukan kelayakannya untuk digunakan pada jenis beban dan lokasi tertentu. Adapun uraian masing-masing mutu dijelaskan sebagai berikut:

a. Mutu A

Paving block mutu A mempunyai kuat tekan minimal diangka 35 MPa/K-350 (350kg/cm) dengan kisaran rata-rata 40 MPa/K-400 (400kg/cm). Bila dibandingkan mutu lain, *paving block* mutu A memiliki kuat tekan tertinggi, sehingga dapat digunakan sebagai bagian non struktural maupun bagian struktural konstruksi yang biasanya dimanfaatkan untuk menahan beban berat, seperti jalanan dengan kepadatan lalu lintas tinggi yang menjadi jalur bagi kendaraan besar.

b. Mutu B

Paving block mutu B mempunyai kuat tekan minimal diangka 17 MPa/K- 170 (170kg/cm) dengan kisaran rata-rata 20 MPa/K- 200 (200kg/cm). *Paving block* tipe ini bisa diperuntukkan sebagai bagian dari konstruksi struktural, dengan beban lalu lintas condong ringan hingga sedang. Karena itu, *paving block* mutu ini kerap difungsikan sebagai jalanan komplek perumahan, lahan parkir, maupun garasi mobil. Sehubungan dengan hal tersebut, penelitian ini diharapkan

menghasilkan *paving block* dengan *CRA* sebagai substitusi parsial semen yang mampu mencapai kategori mutu B sesuai standar, sehingga tetap layak digunakan pada peruntukan tersebut.

c. Mutu C

Paving block mutu C mempunyai kuat tekan minimal 12,5 MPa/K-125 (125kg/cm) dengan kisaran rata-rata 15 MPa/K-150 (150kg/cm). Dikarenakan daya tahan yang cenderung rendah, jenis ini dipergunakan sebagai bagian konstruksi non struktural, yang artinya tidak dipergunakan untuk menahan beban. Sebab itu, *paving block* mutu ini kerap difungsikan untuk area jalan dengan lalu lintas ringan seperti jalan setapak, pejalan kaki, ataupun trotoar.

d. Mutu D

Paving block mutu D mempunyai nilai kuat tekan minimal diangka 8,5 MPa/K-85 (85kg/cm) dengan kisaran rata-rata sekitar 10 MPa/K-100 (100kg/cm). Dikarenakan *paving block* ini memiliki kuat tekan yang paling rendah, penggunaannya pun lebih diperuntukan untuk area jalan yang lalu lintasnya sangat rendah, seperti aplikasi luar ruang di antaranya adalah taman, halaman rumah, perkerasan lingkungan, dan sebagainya.

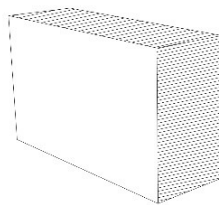
2.1.3 Bentuk *Paving Block*

Menurut SNI 03-0691-1996, bentuk *paving block* dibedakan menjadi dua, yaitu *paving block* berbentuk segi empat dan *paving block* berbentuk segi banyak yang terdiri dari hexagon (segi enam), cacing, *grass block* (untuk rumput), kanstin, topi uskup, antic dan trihek. Diantara banyaknya penutup permukaan tanah, *paving block* mempunyai banyak kelebihan dan yang paling mencolok yaitu dari tekstur permukaan, corak, ukuran, warna dan bentuk (Mudiyono Rachmat et al., 2019).

a. *Paving Block* Segi Empat (Bata)

Paving block segi empat merupakan jenis *paving block* yang banyak digunakan oleh masyarakat (S Sebayang et al., 2011 dalam NKU Nilawati et al., 2021). Biaya produksi *paving block* segi empat lebih rendah dibandingkan dengan bentuk

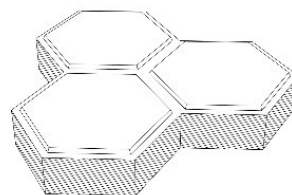
lain tetapi dalam sistem kuncian (*interlocking*) antar *paving block* segi empat kurang stabil (Syakir et al., 2024). Bentuk segi empat memiliki keunggulan lain yaitu dalam proses penggantian dan perawatan karena setiap unit blok dapat dilepas dan dipasang kembali dengan mudah (Lukito & Dewi, 2022). Secara keseluruhan, bentuk segi empat tetap menjadi pilihan yang efisien, fleksibel, dan ekonomis, terutama untuk penggunaan skala besar yang menuntut proses instalasi cepat dan perawatan sederhana. Bentuk ini merupakan bentuk yang akan dipakai dalam penelitian ini. *Paving block* bentuk segi empat atau bata dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2. 2 *Paving Block Segi Empat*

b. *Paving Block Hexagon* (Hexagon)

Paving block hexagon (**Gambar 2.3**) dapat dinilai sebagai bentuk *paving block* yang optimum ditinjau dari kuncian (*interlocking*), proses pemasangan yang stabil, memiliki hasil *moment* deformasi yang lebih kecil dibanding bentuk lain dan mengunci lebih baik di permukaan (Setyanto et al., 2016).

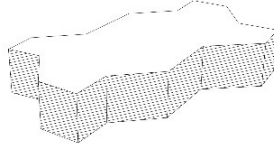


Gambar 2. 3 *Paving Block Hexagon*

c. *Paving Block Cacing*

Paving block cacing juga dikenal sebagai *paving block unipave* memiliki empat gerigi (*four dented*) yang memberikan kuncian (*interlocking*) yang baik, *paving*

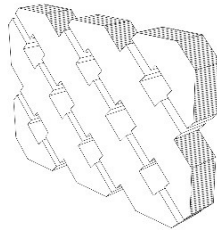
jenis ini memiliki lendutan yang kecil tergantung pada pola pemasangan (Mudiyono et al., 2019). *Paving block cacing* dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2. 4 *Paving Block Cacing*

d. *Paving Block Grassblock* (untuk rumput)

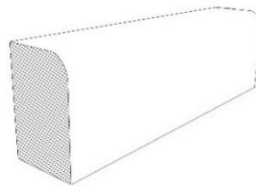
Paving block grassblock merupakan *paving block* yang memiliki ruang untuk pertumbuhan rumput dan sekaligus resapan air (R Siregar et al., 2020). *Paving block grassblock* untuk rumput dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2. 5 *Paving Block Grassblock*

e. *Paving Block Kanstin*

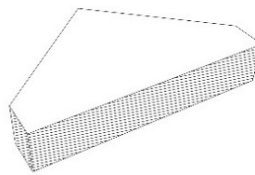
Kanstin merupakan bagian perkerasan *paving block* yang difungsikan untuk menahan dan menghimpit lapisannya agar saling mengunci sehingga ketika menerima beban tidak terjadi pergeseran (G Nugroho et al., 2023). *Paving block kanstin* dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2. 6 *Paving Block Kanstin*

f. *Paving Block* Topi Uskup

Paving block topi uskup adalah *paving block* yang tidak mengunci antara satu sama lain. Ketepatan ukuran dan keseragaman *paving block* adalah hal yang harus diperhatikan supaya memiliki kekuatan penguncian (Arfiane., 2017 dalam R Mudiyo., 2019). Ilustrasi *paving block* tipe topi uskup disajikan pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2. 7 *Paving Block Topi Uskup*

2.1.4 Keuntungan *Paving Block*

Keuntungan yang dimiliki *paving block* yaitu :

1. Mudah dibuat dan diproduksi secara massal tanpa alat berat, karena proses pencetakan dapat dilakukan secara manual maupun semi-otomatis sehingga efisien dalam skala industri kecil hingga besar (Kasim et al., 2020).
2. Dapat dibongkar dan dipasang kembali, menjadikan *paving block* sebagai sistem perkerasan yang fleksibel dan mudah dalam pemeliharaan (Marjaya et al., 2021).
3. Tahan terhadap beban statis, dinamis, dan kejut, karena bentuk *interlocking* pada *paving block* mampu menyalurkan gaya secara merata, sehingga cocok untuk area dengan lalu lintas sedang hingga berat (Widodo & Nugroho, 2017).
4. Tahan terhadap tumpahan pelumas dan panas kendaraan, serta memiliki permukaan permeabel yang memungkinkan infiltrasi air dan biodegradasi zat hidrokarbon (Scholz & Grabowiecki, 2007; Thorpe & Zhuge, 2010).

2.2 Semen Portland

Semen portland (**Gambar 2.8**) dibuat dari klinker yang dihaluskan dengan silikat kalsium hidrolis dan gipsum sebagai bahan tambahan (Ardhiansyah, M.,2018). Semen portland merupakan semen hidrolis yang dibuat dengan menggiling terak semen portland, terutama yang terdiri dari kalsium silikat hidrolis, bersama dengan bahan tambahan yang terdiri dari satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat, dan dapat ditambahkan dengan bahan tambahan lain (SNI 15-2049-2004).



Gambar 2. 8 Semen Portland

Adapun jenis dan penggunaan semen portland yang disesuaikan dengan SNI 15-2049-2004 dapat dilihat pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2. 3 Jenis dan Penggunaan Semen Portland

No	Tipe	Penggunaan
1.	Jenis I	Penggunaan umum yang biasanya untuk bangunan yang tidak memerlukan persyaratan khusus.
2.	Jenis II	Penggunaan yang memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi yang sedang.
3.	Jenis III	Penggunaan yang memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
4.	Jenis IV	Penggunaan yang memerlukan kalor hidrasi rendah.
5.	Jenis V	Penggunaan yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

Sumber : SNI 15-2049-2004

Tabel 2.3 menunjukkan lima tipe semen portland sesuai SNI 15-2049-2004. Jenis I digunakan untuk konstruksi umum, Jenis II untuk ketahanan sedang terhadap sulfat, Jenis III untuk kekuatan awal tinggi, Jenis IV untuk kalor hidrasi rendah, dan Jenis V untuk ketahanan tinggi terhadap sulfat.

2.2.1 Komposisi Senyawa Oksida Semen Portland

Menurut Tjokrodimuljo (1996, dalam Wahyu, 2017) terdapat komposisi senyawa semen yaitu komposisi senyawa penyusun semen terdiri dari beberapa komponen utama dengan kadar tertentu berdasarkan persen berat.

Komponen terbesar dalam semen adalah kapur (CaO) yang berkisar antara 60–65%, berfungsi sebagai bahan utama pembentuk senyawa kalsium silikat yang menentukan kekuatan semen. Silika (SiO_2) hadir dalam jumlah 17–25% dan berperan penting dalam pembentukan senyawa silikat yang memberikan kekuatan jangka panjang. Alumina (Al_2O_3) berkadar antara 3–8%, berfungsi untuk mempercepat reaksi pengerasan awal.

Komponen lainnya yaitu besi oksida (Fe_2O_3) dengan kadar 0,5–6%, yang berperan dalam memberi warna serta berkontribusi dalam pembentukan mineral semen. Magnesia (MgO) terdapat dalam kadar 0,5–4% dan perlu dikontrol karena kadar berlebih dapat menyebabkan retak. Sedangkan sulfur oksida (SO_3) sebanyak 1–2% berfungsi untuk mengontrol waktu pengikatan semen dengan membantu pembentukan etringit. Seluruh komponen ini saling berperan dalam menentukan sifat fisik dan kimia dari semen (Tjokrodimuljo., 1996, dalam Wahyu, 2017).

2.3 Karbon Aktif

Karbon aktif adalah benda padat berpori yang biasanya terbentuk dari hasil pembakaran suatu bahan yang mengandung 85-95% unsur karbon selama proses pirolisis dan biasanya digunakan sebagai adsorben gas berbahaya atau senyawa kimia yang dihasilkan oleh kendaraan (Setiyono, R dkk., 2018).

Karbon aktif merupakan material yang banyak dimanfaatkan dalam pengolahan limbah pencemar lingkungan karena memiliki daya serap yang tinggi, sehingga efektif digunakan sebagai adsorben. Satu gram karbon aktif mampu mengadsorpsi hingga 500 m^2 permukaan, berdasarkan pengukuran menggunakan gas nitrogen (Nitsae et al., 2020).

Karbon aktif mempunyai kemampuan daya serap tinggi terhadap anion, kaiton dan molekul yang berbentuk senyawa organik, baik itu gas ataupun larutan. Karbon aktif dalam kehidupan terbilang sangat berguna karena salah satu

fungsinya dapat menyerap emisi gas buang kendaraan bermotor (Wangsa Hari, et al., 2019).

Karbon aktif atau kerap juga disebut arang aktif merupakan suatu bahan yang menyerupai karbon *amorf* yang mempunyai luas permukaan sangat besar 200 hingga 20000 m²/g. Karbon aktif merupakan salah satu adsorben yang kerap dipakai pada proses adsorpsi karena mempunyai daya adsorpsi dan luas permukaan lebih baik dari pada adsorben lainnya. Permukaan yang luas ini disebabkan oleh pori-pori sehingga karbon aktif mempunyai kemampuan untuk menyerap (Wangsa Hari, et al., 2019).

Karbon aktif adalah senyawa karbon yang adsorpsinya ditingkatkan melalui tahapan karbonisasi dan aktivasi biasanya difungsikan sebagai adsorben emisi gas CO, NO, dan NO_x yang tersedia melimpah serta harganya terjangkau. Secara teoritis adsorben kimia (berupa karbon aktif/arang aktif) dapat digunakan untuk mereduksi pencemaran udara (Gunawan, S et al., 2020).

Karbon aktif atau arang aktif dibuat dengan dua tahapan yaitu karbonisasi dan aktivasi. Proses karbonisasi merupakan pembentukan karbon dari bahan baku dan sempurna pada suhu 400 – 600°C. Sedangkan aktivasi merupakan pengubahan karbon dari daya serap rendah menjadi karbon yang memiliki daya serap tinggi. Untuk meningkatkan luas permukaan dan memperoleh karbon yang berpori, karbon diaktivasi dengan uap panas, gas karbon dioksida menggunakan suhu antara 700- 1100 °C, atau menambahkan bahan-bahan mineral yang berfungsi sebagai aktivator (Sembiring, dan Sinaga, 2003 dalam R Dewi et al., 2020). Massa arang aktif bergantung pada suhu aktivasi, jika suhu aktivasi semakin tinggi maka massa arang aktif akan semakin berkurang. Selain itu, suhu aktivasi yang tinggi akan mempengaruhi kualitas arang aktif karena akan semakin banyak kadar air yang menguap (Darmawan, 2009 dalam R Dewi et al., 2020). Bentuk dari karbon aktif penyerap udara ini biasanya memiliki tipe pori yang lebih halus serta berbentuk granular ataupun *pellet* yang sangat keras. Karbon aktif ini difungsikan untuk proses yang berhubungan dengan gas contohnya pemisahan dan pemurnian gas.

Menurut ASTM C.125-1995:61 “*Standard Definition of Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*” dan ACI SP-19 “*Cement and*

Concrete Terminology”, *admixture* diartikan sebagai material selain semen hidrolis, air, dan agregat yang ditambahkan ke dalam campuran beton atau mortar sebelum atau selama proses pengadukan. Tujuannya adalah untuk memodifikasi sifat dan karakteristik beton. Sejalan dengan definisi tersebut, penelitian ini memanfaatkan karbon aktif sebagai bahan tambah sekaligus substitusi parsial semen dalam pembuatan *paving block*.

Karbon aktif dipilih karena memiliki sifat adsorpsi yang baik, sehingga berpotensi menambah nilai fungsional *paving block*, khususnya dalam menyerap polutan gas seperti CO₂. Adsorpsi sendiri merupakan metode pemisahan yang ekonomis, efisien, terjangkau, dan ramah lingkungan. Adsorben yang umum digunakan adalah arang aktif, yaitu produk turunan dari tempurung kelapa yang memiliki nilai ekonomi tinggi sekitar 10 kali lipat dari bahan mentahnya. Aktivasi karbon dapat dilakukan secara fisik melalui distilasi kering atau secara kimiawi dengan menambahkan zat aktivator tertentu (Pakiding et al., 2014 dalam AN Batdjedelik, 2024). Selain itu, efektivitas daya serap karbon aktif dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti sifat permukaan adsorben, jenis zat yang diserap, suhu, dan pH lingkungan (Scientific, 2012 dalam AN Batdjedelik, 2024). Karbon aktif dapat dilihat pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.9 Karbon Aktif

2.4 Arang Tempurung Kelapa (ATK)

Tempurung kelapa seringkali hanya dianggap sebagai limbah dari industri pengolahan kelapa. Meskipun jumlahnya melimpah dan kerap dipandang sebagai masalah lingkungan, sebenarnya tempurung kelapa merupakan sumber daya yang dapat diperbarui (*renewable*) dan berbiaya rendah. Padahal, arang dari tempurung kelapa ini masih memiliki potensi untuk dikembangkan menjadi produk bernilai ekonomi tinggi, seperti karbon aktif atau arang aktif (Dhidan dalam Pambuyan et al., 2013: 116). Potensi ini tidak terlepas dari karakteristik dasar arang yang dihasilkan dari bahan-bahan organik seperti tempurung kelapa, yang menunjukkan struktur dan komposisi kimia yang mendukung.

Arang merupakan bahan padat berpori yang dihasilkan dari proses pengarangan bahan organik yang mengandung karbon. Proses ini mengubah limbah seperti tempurung kelapa menjadi material yang lebih berguna, meskipun sebagian besar pori-porinya masih tertutup oleh senyawa seperti tar dan hidrokarbon. Komponen utama dari arang meliputi karbon tetap, abu, kelembapan, serta unsur-unsur seperti nitrogen dan sulfur (Tripathi et al., 2002). Kandungan karbon dalam arang umumnya sangat tinggi, bahkan dapat melebihi 90% pada basis bebas abu, sementara kandungan oksigen dan hidrogen relatif rendah, masing-masing di bawah 6% dan sekitar 1% (Wang et al., 2023).

Karakteristik ini menjadi semakin unggul ketika bahan baku yang digunakan adalah tempurung kelapa, yang memiliki struktur keras dan tidak mudah hancur, sehingga menghasilkan arang berkualitas tinggi. Arang dari tempurung kelapa dikenal memiliki kekerasan dan densitas tinggi, kadar abu yang rendah, serta kandungan karbon tetap yang besar, menjadikannya sangat potensial sebagai bahan baku arang aktif maupun briket ramah lingkungan (Rampe et al., 2015). Selain itu, arang yang dihasilkan dari tempurung kelapa berpotensi menjadi bahan bakar ramah lingkungan karena memiliki nilai kalor yang tinggi dan menghasilkan asap dalam jumlah rendah (Razin et al., 2024). Saksono et al. (2022) juga menambahkan bahwa briket arang berbahan dasar tempurung kelapa dapat membantu mengurangi pencemaran lingkungan.

Dari segi ekonomi, arang ini dapat diolah menjadi briket dengan bahan baku yang mudah diperoleh, tahan lama, berbiaya rendah, namun tetap memiliki kualitas yang baik dalam pengelolaan limbah (Razin et al., 2024). Salah satu bentuk pemanfaatan limbah tersebut adalah dengan mengolah tempurung kelapa menjadi briket arang, yang tidak hanya memiliki nilai guna tinggi, tetapi juga mendukung upaya daur ulang limbah organik secara berkelanjutan (Saksono et al., 2022). Selain potensinya sebagai briket, tempurung kelapa juga dianggap sebagai salah satu bahan baku terbaik untuk menghasilkan karbon aktif karena struktur mikroporinya yang padat dan kandungan karbon tetap yang tinggi, sehingga menghasilkan produk yang efisien dalam proses adsorpsi (Ismadji & Bhatia, 2008).

Karbon aktif yang berasal dari tempurung kelapa banyak dimanfaatkan dalam berbagai industri, mulai dari pemurnian air, pengolahan limbah cair, industri makanan dan minuman, hingga sektor farmasi dan katalitik, karena kemampuannya dalam mengadsorpsi zat-zat berbahaya dan bau (Setyawan et al., 2017). Proses pembuatan karbon aktif dari tempurung kelapa sendiri melibatkan dua tahapan penting, yaitu tahap pengarangan menggunakan reaktor tertutup (karbonisasi), diikuti dengan proses aktivasi fisik maupun kimia untuk membuka pori-pori dan meningkatkan luas permukaan adsorptif dari karbon (Halim & Rante, 2023). ATK dapat dilihat pada **Gambar 2.10**.



Gambar 2. 10 *Arang Tempurung Kelapa*

2.4.1 Komposisi Senyawa Kimia ATK dan KATK

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Verayana et al. (2018), komposisi senyawa oksida pada arang tempurung kelapa tanpa aktivasi dan arang aktif dengan aktivasi menggunakan asam fosfat (H_3PO_4) menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam kandungan kimianya.

Arang tempurung kelapa (ATK) ialah arang berbahan dasar tempurung kelapa tanpa proses aktivasi ini menunjukkan kandungan senyawa oksida anorganik yang cukup beragam, dengan tiga komponen utama yang mendominasi, yaitu natrium oksida (Na_2O) sebesar 58,300%, magnesium oksida (MgO) sebesar 15,000%, dan besi oksida (Fe_2O_3) sebesar 8,780%. Kandungan unsur-unsur tersebut membentuk bagian terbesar dari komposisi kimia arang, yang turut menentukan sifat dasar materialnya. Selain unsur dominan tersebut, arang ini juga mengandung sejumlah oksida logam lainnya seperti kalium oksida (K_2O) sebesar 9,040%, kalsium oksida (CaO) sebesar 5,600%, dan telurium dioksida (TeO_2) sebesar 1,610%, yang meskipun persentasenya lebih rendah, tetap memberikan kontribusi terhadap karakteristik fungsional arang. Keberadaan unsur jejak seperti stronsium oksida (SrO) sebesar 0,390% dan ion klorida (Cl^-) sebesar 0,180% juga mencerminkan keragaman unsur kimia yang terdapat dalam struktur arang tempurung kelapa.

Untuk karbon aktif tempurung kelapa (KATK) ialah ATK yang diaktivasi dengan menggunakan asam fosfat (H_3PO_4) ini menghasilkan perubahan signifikan dalam komposisi senyawa oksida yang terkandung di dalamnya. Komponen senyawa dominan yang terdeteksi adalah natrium oksida (Na_2O) dengan konsentrasi sebesar 60,200%, menjadikannya unsur paling melimpah dalam sampel hasil aktivasi. Selain itu, terjadi peningkatan kandungan besi oksida (Fe_2O_3) hingga mencapai 19,450%, yang jauh lebih tinggi dibandingkan arang tanpa aktivasi. Kandungan magnesium oksida (MgO) juga tercatat sebesar 14,200%, menandakan bahwa unsur logam tersebut tetap stabil meskipun telah mengalami proses aktivasi kimia. Beberapa unsur logam lain turut teridentifikasi dengan kadar yang lebih rendah namun tetap signifikan, seperti kalium oksida (K_2O) sebesar 3,430%, kalsium oksida (CaO) sebesar 1,440%, serta stronsium oksida (SrO) sebesar 1,660%. Unsur mikro lainnya seperti mangan oksida (MnO),

seng oksida (ZnO), dan tembaga oksida (CuO) masing-masing terdeteksi dalam jumlah kecil, yaitu 0,340%, 0,210%, dan 0,450%. Keberadaan klorida (Cl^-) tidak terindikasi dibandingkan ATK tanpa aktivasi.

Secara keseluruhan, aktivasi dengan H_3PO_4 tidak hanya meningkatkan kadar logam berat seperti Fe_2O_3 . Hal ini menunjukkan bahwa metode aktivasi dengan H_3PO_4 mampu memodifikasi struktur kimia permukaan arang secara signifikan, yang pada gilirannya dapat meningkatkan karakteristik adsorpsi, luas permukaan, dan efisiensi arang aktif dalam berbagai aplikasi lingkungan seperti penyerap logam berat atau gas rumah kaca.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan dari penelitian yang dilakukan Verayana et al. (2018), pada komposisi senyawa kimia pada ATK dan KATK menunjukkan bahwa keduanya memiliki kandungan senyawa anorganik yang beragam. Terdapat beberapa senyawa baru yang muncul akibat aktivasi yang dilakukan.

2.5 Komparasi Senyawa Oksida Semen Portland, ATK, dan KATK

Tabel 2.4 memberikan gambaran komparatif mengenai kandungan senyawa oksida pada tiga jenis material, meliputi semen portland, ATK, serta KATK.

Tabel 2. 4 *Komparasi Komposisi Senyawa Kimia Semen Portland dan KATK*

No	Senyawa Oksida	Semen Portland (% berat)	ATK (% berat)	KATK (% berat)
1.	CaO (Kalsium oksida)	60–65	5,600	1,440
2.	SiO_2 (Silika)	17–25	–	–
3.	Al_2O_3 (Alumina)	3–8	–	–
4.	Fe_2O_3 (Besi oksida)	0,5–6	8,780	19,450
5.	MgO (Magnesia)	0,5–4	15,000	14,200
6.	SO_3 (Sulfur oksida)	1–2	–	–
7.	Na_2O (Natrium oksida)	–	58,300	60,200
8.	K_2O (Kalium oksida)	–	9,040	3,430
9.	SrO (Stronsium oksida)	–	0,390	1,660
10.	TeO_2 (Telurium dioksida)	–	1,610	–
11.	MnO (Mangan oksida)	–	–	0,340
12.	ZnO (Seng oksida)	–	–	0,210
13.	CuO (Tembaga oksida)	–	–	0,450
14.	Cl^- (Klorida)	–	0,180	-

Berdasarkan **Tabel 2.4** pada halaman sebelumnya, komparasi senyawa oksida dalam semen Portland, ATK, dan KATK menunjukkan perbedaan dominasi komposisi yang cukup signifikan. Semen Portland didominasi oleh kalsium oksida (CaO) sebesar 60–65%, diikuti silika (SiO_2) sebesar 17–25%, serta alumina (Al_2O_3) sebesar 3–8%, yang secara sinergis berperan penting dalam pembentukan kekuatan mekanis dan mempercepat ikatan awal pada produk berbasis semen (Tjokrodinuljo, 1996 dalam Wahyu, 2017). Sementara itu, ATK didominasi natrium oksida (Na_2O) sebesar 58,3% dan magnesium oksida (MgO) sebesar 15%, dengan kandungan CaO yang relatif rendah, yaitu hanya 5,6%, sehingga sifatnya belum sebanding dengan semen dalam konteks rekayasa bahan bangunan (Verayana et al., 2018).

Tren perubahan semakin terlihat pada KATK, di mana aktivasi kimia menggunakan asam fosfat (H_3PO_4) meningkatkan kandungan besi oksida (Fe_2O_3) dari 8,78% menjadi 19,45% dan memunculkan unsur mikro seperti mangan oksida (MnO), seng oksida (ZnO), serta tembaga oksida (CuO). Aktivasi ini juga menurunkan kandungan CaO menjadi hanya 1,44%, sekaligus membuka kemungkinan terbentuknya senyawa fosfat (P_2O_5), meskipun tidak tercantum secara eksplisit dalam data (Verayana et al., 2018).

Dalam semen Portland, keberadaan CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 sangat penting dalam proses hidrasi dan pembentukan senyawa pengikat. CaO dan SiO_2 bereaksi menghasilkan C–S–H (*Calcium Silicate Hydrate*) sebagai fase utama pengikat dan penentu kekuatan beton, sedangkan Al_2O_3 bereaksi dengan kalsium membentuk C–A–H (*Calcium Aluminate Hydrate*) yang meningkatkan stabilitas struktural. Selain itu, Fe_2O_3 bersama Al_2O_3 berperan dalam pembentukan fase tambahan yang memperkuat sifat mekanik dan ketahanan material. Senyawa-senyawa hidrasi tersebut menjadikan semen portland efektif membentuk struktur padat dan kuat sehingga memenuhi persyaratan teknis beton maupun *paving block* (Neville & Brooks, 2010; Taylor, 1997; Zhang et al., 2025).

Rendahnya kadar CaO dalam KATK membuatnya tidak mampu menggantikan fungsi utama semen sebagai pengikat hidrolis. Namun, tingginya kandungan Fe_2O_3 dan keberagaman oksida logam lainnya membuka peluang pemanfaatannya sebagai aditif fungsional dalam campuran semen. Dengan demikian, KATK lebih tepat dimanfaatkan sebagai material modifikasi dalam produk konstruksi ramah lingkungan, bukan sebagai pengganti penuh semen.

Meskipun terdapat perbedaan dominasi komposisi, baik ATK maupun KATK tetap memiliki kesamaan kandungan oksida dengan semen portland, yaitu CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , dan K_2O . Kesamaan ini menjadi dasar pendekatan bagi pemanfaatannya *CRA* yang merupakan memiliki kesamaan pada bahan dasar dan metode aktivasi yang digunakan dengan KATK sebagai substitusi parsial semen pada *paving block*. Kemungkinan *CRA* juga memiliki potensi yang sama dengan untuk mendukung sebagian fungsi semen portland melalui reaksi pozzolanik sekunder yang menghasilkan C-S-H tambahan. Pemanfaatan karbon aktif termodifikasi, seperti pada *coconut shell activated carbon (CSAC)* yang mengandung Fe_2O_3 , juga terbukti efektif dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap polutan seperti zat pewarna industri dan gas CO_2 melalui penambahan titik aktif pada permukaan karbon (Amelia & Mufrodi, 2022). Selain itu, sifat khas karbon aktif dengan peningkatan kapasitas adsorpsi berhubungan erat dengan luas permukaan yang tinggi.

2.6 Batasan Penggunaan Istilah dan Spesifikasi Karbon Aktif

Berdasarkan sejumlah penelitian, karbon aktif hasil aktivasi biomassa seperti tempurung kelapa belum sepenuhnya memenuhi persyaratan mutu sesuai SNI 06-3730-1995 tentang arang aktif teknis. Kendala yang sering muncul antara lain tingginya kadar abu, kadar air yang melebihi batas maksimum, serta daya serap iodin yang rendah. Lutfi et al. (2021) melaporkan bahwa karbon aktif hasil aktivasi dengan asam fosfat hanya memiliki daya serap iodin sebesar 248,6 mg/g, jauh di bawah standar minimal 750 mg/g. Hasil serupa ditemukan oleh Yuliusman et al. (2020), yang melaporkan iodine number sebesar 706 mg/g pada karbon aktif sabut kelapa, masih di bawah ambang batas. Selain itu, Mufandi et al. (2020) menemukan kadar abu yang melampaui standar meskipun kadar airnya masih

wajar. Temuan-temuan ini mengindikasikan bahwa memproduksi karbon aktif sesuai spesifikasi SNI bukanlah hal sederhana, terutama dalam skala laboratorium atau semi-industri. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan istilah ***Carbon Raw-Activated (CRA)*** untuk merujuk pada karbon aktif hasil aktivasi yang masih bersifat eksperimental dan belum sepenuhnya memenuhi kriteria mutu. Penggunaan istilah ini bertujuan agar material yang digunakan tidak secara implisit disamakan dengan karbon aktif teknis komersial yang sudah tersertifikasi.

Lebih lanjut, *CRA* melalui pendekatan literatur komparasi sebelumnya (baik ATK maupun KATK) memiliki kandungan oksida seperti CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , dan K_2O yang serupa dengan semen portland, sehingga dapat dijadikan dasar ilmiah pemanfaatannya sebagai substitusi parsial semen pada *paving block*. Kesamaan ini memungkinkan terjadinya reaksi pozzolanik sekunder yang menghasilkan C–S–H tambahan, meskipun kadar CaO pada KATK relatif rendah. Selain itu, sifat khas karbon aktif dengan luas permukaan tinggi mendukung *filler effect* yang memperbaiki mikrostruktur, sehingga *paving block* berpotensi memenuhi mutu mekanik yang dipersyaratkan sekaligus memperoleh fungsi tambahan berupa kemampuan adsorpsi polutan.

Melalui pendekatan ini, penelitian tidak hanya menilai aspek fisik material seperti kemampuan serap air dan kekuatan tekan, tetapi juga mengeksplorasi potensinya dalam menekan emisi gas buang CO_2 serta mengurangi ketergantungan terhadap semen konvensional. Dengan demikian, inovasi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap pengurangan emisi karbon dan pencemaran lingkungan, sekaligus menghadirkan alternatif material ramah lingkungan berbasis limbah biomassa untuk mendukung konstruksi berkelanjutan.

2.7 Daya Serap Air

Daya serap air merupakan kemampuan beton normal untuk menyerap air hingga mencapai massa jenuh tertentu, atau ketika beton tersebut tidak dapat menyerap air lagi. Hal tersebut biasanya dipengaruhi oleh rongga atau pori yang ada di dalamnya (Ardiansyah, 2018).

Berdasarkan SNI 03-0691-1996, kemampuan *paving block* menyerap air dapat dihitung menggunakan rumus (2.1) sebagai berikut :

$$\text{Penyerapan Air} = \frac{A-B}{B} \times 100\% \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan :

A = berat bata beton basah

B = berat bata beton kering

2.8 Kuat Tekan

Kuat tekan merupakan beban besar dengan persatuan luas yang dimana saat mendapat beban gaya tekan tertentu oleh mesin tekan, menyebabkan benda uji beton hancur. Faktor-faktor berikut termasuk, selain tingkat kepadatan beton dan perbandingan faktor air semen, kualitas semen dan jenisnya; jenis, bentuk, dan jenis permukaan agregat; efisiensi peralatan; faktor umum dan kualitas agregat; dan tingkat tekan beton. (Ardiansyah, 2018).

Permasalahan yang kerap dijumpai pada kualitas material beton yaitu ketidaksesuaian dengan spesifikasi produk yang ditargetkan. Ketidaksesuaian tersebut mencakup nilai kuat tekan beton yang spesifikasi mutunya tidak sesuai (ES Rahayu, et al., 2022). Ketika melakukan produksi *paving block* sering kali dijumpai produk yang cacat seperti pecah, oleh sebab itu pengujian kuat tekan berfungsi untuk mendapatkan kualitas *paving block* yang berkualitas baik dan tinggi. Komposisi campuran *paving block* yang meningkat sangat berpengaruh karena *paving block* memiliki kaitan negatif dengan komposisi yang membuat kuat tekan menurun (AC Sembiring, 2017). Melakukan pengujian kuat tekan hingga beton hancur bertujuan untuk mengetahui campuran beton tersebut sudah sesuai dengan spesifikasi mutu yang diinginkan (MDJ Sumajouw, 2014).

Berdasarkan SNI 03-0691-1996, kuat tekan *paving block* dapat dihitung dengan rumus (2.2) sebagai berikut :

$$\text{Kuat Tekan} = \frac{P}{L} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

P = beban tekan, N

L = luas bidang tekan, mm²

2.9 Emisi Gas Buang CO₂

Emisi gas buang CO₂ merupakan salah satu penyebab utama pemanasan global dan sebagian besar berasal dari konsumsi energi, terutama gas buang kendaraan bermotor (Samiaji, 2009). Diperkirakan sekitar 70% polusi udara disumbang oleh emisi kendaraan, yang terdiri dari 70–89% hidrokarbon (HC), 100% karbon monoksida (CO), 100% timbal (Pb), serta 34–73% nitrogen oksida (NO_x). Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, keempat zat tersebut termasuk dalam parameter pencemar udara yang digunakan sebagai dasar penetapan baku mutu udara ambien (Haruna et al., 2019 dalam Nurmaya et al., 2024).

Timbel organik dan hidrokarbon merupakan bahan bakar tertentu yang dikeluarkan dari kendaraan dikarenakan penguapan sistem bahan bakar. Lalu lintas kendaraan bermotor, juga menyebabkan peningkatan kadar partikular debu yang berasal dari komponen ban, permukaan jalan dan rem. Pada saat di udara, sebagian senyawa yang dimuat dalam gas buang kendaraan bermotor dapat mengalami perubahan karena suatu reaksi, misalnya melalui pengaruh uap air dan sinar matahari atau karena interaksi antara senyawa-senyawa tersebut. Sebagian proses reaksi berjalan dengan lambat dan sebagian reaksi lainnya terjadi seketika di lingkungan jalan raya (Heriadi et al., 2015; Inayah, 2016 dalam Haruna et al., 2019).

Emisi gas buang kendaraan bermotor dapat memengaruhi kondisi air dan tanah menjadi asam. Praktik di negara maju menunjukkan bahwa kondisi ini dapat memicu pelepasan sedimen yang mengandung mineral atau logam dari ikatan tanah, sehingga logam-logam tersebut mencemari lingkungan (Haruna et al., 2019). Peningkatan emisi ini sangat erat kaitannya dengan tren pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor yang terus meningkat dari tahun ke tahun. Data dari Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa pada tahun 2013, jumlah kendaraan di Indonesia telah mencapai 104.118.969 unit, dengan sepeda motor mendominasi sebesar 84.732.652 unit. Bertambahnya jumlah kendaraan bermotor tentu menyebabkan peningkatan volume gas buang, yang berdampak langsung pada naiknya tingkat polusi udara. Emisi gas buang ini merupakan sisa pembakaran dari mesin kendaraan bermotor (Syahruji & Ghofur, 2019).

Di tingkat daerah, Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Tengah pada tahun 2021 mencatat bahwa Kota Semarang memiliki sekitar 1.875.781 unit kendaraan bermotor, menjadikannya kota dengan jumlah kendaraan terbanyak di provinsi tersebut. Jumlah ini tentu berkontribusi signifikan terhadap peningkatan emisi polutan yang berdampak buruk bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Kendaraan bermotor umumnya menghasilkan berbagai senyawa kimia berbahaya, dengan karbon dioksida (CO_2) tercatat sebagai polutan utama yang paling banyak diemisikan (Sengkey, et al., 2018). Transportasi memang merupakan kebutuhan pokok masyarakat, namun di sisi lain juga menjadi salah satu penyumbang utama emisi gas CO_2 (Permatasari et al., 2021 dalam S. Sudarti et al., 2022).

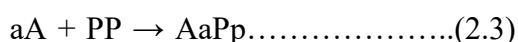
Peningkatan jumlah kendaraan bermotor menyebabkan tingginya konsentrasi emisi gas CO_2 di udara, yang memperparah kondisi pencemaran udara di wilayah perkotaan. Situasi ini menjadi semakin mengkhawatirkan karena polusi udara tidak hanya merusak kualitas lingkungan, tetapi juga berdampak langsung pada kesehatan masyarakat. Dampak yang paling umum dirasakan adalah meningkatnya kasus Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA), serta munculnya gejala penuaan dini akibat paparan polutan udara secara terus-menerus (Pinontoan et al., 2019 dalam S. Sudarti et al., 2022).

Berbeda dengan gas buang industri yang dilepaskan melalui cerobong tinggi dan menyebar di atmosfer, gas buang kendaraan bermotor langsung mencemari lingkungan di sekitar jalan raya wilayah yang padat aktivitas manusia. Hal ini menyebabkan kelompok masyarakat yang beraktivitas di area tersebut seperti pejalan kaki, pengendara sepeda motor, pedagang kaki lima, hingga petugas lalu lintas berada dalam risiko tinggi terpapar polusi kendaraan secara langsung (Busrah et al., 2019 dalam Haruna et al., 2019). Tingkat paparan ini sangat bergantung pada intensitas lalu lintas di lokasi dan waktu tertentu (Haruna et al., 2019).

Lebih jauh lagi, kelebihan konsentrasi CO₂ tidak hanya berdampak pada kesehatan manusia, tetapi juga berkontribusi pada pemanasan global. Gas-gas rumah kaca seperti CO₂ dalam jumlah tinggi menyebabkan panas matahari yang dipantulkan permukaan bumi terjebak di atmosfer, sehingga suhu global meningkat secara signifikan. Jika dibiarkan tanpa pengendalian, akumulasi panas ini dapat memperparah perubahan iklim secara global (Cahyono, 2017 dalam S. Sudarti et al., 2022).

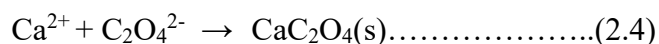
2.10 Gravimetri

Gravimetri merupakan metode analisis kimia kuantitatif klasik yang didasarkan pada prinsip stoikiometri reaksi pengendapan, di mana zat yang dianalisis diubah menjadi senyawa dalam bentuk endapan yang sukar larut agar dapat dipisahkan dari larutan, kemudian ditentukan massanya secara akurat setelah melalui proses pencucian dan pengeringan sebagai dasar penentuan kadarnya (Sugiarto & Setyowati, 2006; Harris, 2010). Secara umum, reaksi pengendapan dalam analisis gravimetri (2.3) dapat dituliskan sebagai berikut:

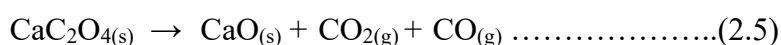


Dalam persamaan tersebut, a adalah koefisien reaktan analit (A) dan p adalah koefisien reaktan pengendap (P), yang bereaksi membentuk senyawa padat A_aP_p . Penambahan reaktan pengendap umumnya dilakukan dalam jumlah berlebih untuk memastikan reaksi berjalan sempurna dan seluruh analit mengendap (Gennaro & Salvatore, 2003). Sebagai contoh, pengendapan ion Ca^{2+} dengan reaktan pengendap berupa ion oksalat $C_2O_4^{2-}$ dapat dijelaskan melalui persamaan reaksi (2.4) dan reaksi (2.5) berikut :

- Reaksi yang menyertai pengendapan :



- Reaksi yang menyertai pengeringan :



Pengendapan ion kalsium (Ca^{2+}) menggunakan ion oksalat ($C_2O_4^{2-}$) membentuk endapan kalsium oksalat (CaC_2O_4), yang kemudian dapat dikeringkan melalui proses dekomposisi termal menjadi kalsium oksida (CaO), karbon dioksida (CO_2), dan karbon monoksida (CO).

Oleh karena itu, agar penetapan kuantitas analit dalam metode gravimetri menghasilkan nilai yang mendekati kebenaran, terdapat dua kriteria utama yang harus dipenuhi. Pertama, proses pemisahan atau pengendapan analit dari komponen lain dalam larutan harus berlangsung secara sempurna sehingga analit benar-benar terendapkan dan tidak tertinggal dalam larutan (Ibnu, 2004). Kedua,

endapan analit yang terbentuk harus memiliki komposisi yang diketahui secara tepat serta tingkat kemurnian yang tinggi, tanpa terkontaminasi oleh zat pengotor atau mengalami kopresipitasi (Universitas Negeri Gorontalo, 2021).

Secara umum, gravimetri dapat dilakukan melalui tiga metode utama:

1. Gravimetri metode penguapan, digunakan untuk penentuan kadar air baik dari air kristal maupun air yang terkandung dalam senyawa (Sugiarto & Setyowati, 2006; Universitas Negeri Gorontalo, 2021).
2. Gravimetri metode elektrolisis, yaitu dengan menempatkan zat analit di dalam sel elektrolisis; setelah proses elektrolisis berlangsung, logam yang mengendap pada katoda dipisahkan dan ditimbang (Sugiarto & Setyowati, 2006; Universitas Negeri Gorontalo, 2021).
3. Gravimetri metode pengendapan, dilakukan dengan menambahkan pereaksi yang membentuk endapan bersama analit sehingga endapan dapat dipisahkan melalui penyaringan dan kemudian ditimbang setelah pencucian dan pengeringan (Sugiarto & Setyowati, 2006; Universitas Negeri Gorontalo, 2021).

Gravimetri metode pengendapan dapat diterapkan untuk analisis kadar kalsium (Ca^{2+}) dengan membentuk senyawa kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai endapan yang sukar larut. Dalam penelitian Saraswati et al. (2023), CaCO_3 dari cangkang *Anadara granosa* diaplikasikan sebagai material perbaikan dentin. Meskipun karakterisasi dilakukan dengan XRD, FTIR, SEM, dan TGA, mekanisme terbentuknya endapan CaCO_3 pada penelitian tersebut sejalan dengan prinsip gravimetri pengendapan, yaitu reaksi ion Ca^{2+} dengan ion karbonat yang menghasilkan senyawa CaCO_3 sukar larut, yang secara teoritis dapat dianalisis secara kuantitatif melalui proses penyaringan, pengeringan, dan penimbangan. Temuan ini menegaskan bahwa limbah cangkang *Anadara granosa* tidak hanya berpotensi sebagai sumber kalsium ramah lingkungan, tetapi juga dapat dimanfaatkan untuk aplikasi fungsional bernilai tinggi. Hal ini sejalan dengan berbagai studi terkait adsorpsi ion kalsium dan pembentukan endapan CaCO_3 melalui reaksi dengan ion karbonat, yang menjadi dasar dalam analisis kapasitas penyerapan maupun pemanfaatan limbah berbasis biomaterial.

Dalam konteks gravimetri, hasil penimbangan endapan CaCO_3 dapat digunakan untuk menghitung kadar kalsium dalam sampel dengan memanfaatkan faktor gravimetri. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa metode gravimetri pengendapan berbasis perendaman dapat digunakan secara efektif untuk analisis kuantitatif kalsium pada limbah cair, dengan ketelitian tinggi apabila syarat-syarat dasar gravimetri seperti kelarutan rendah, pemisahan sempurna, dan kemurnian endapan dapat terpenuhi.

Komponen yang ditentukan dapat dihitung dari berat endapan dengan menggunakan faktor gravimetri atau faktor kimia. kemampuan *paving block* menyerap air dapat dihitung menggunakan rumus (2.6) sebagai berikut :

$$\%A = \frac{\text{Berat } A}{\text{Berat Sampel}} \times 100 \dots \dots \dots (2.6)$$

Karena berat analit A = berat endapan P x faktor gravimetri, maka digunakan rumus (2.7) sebagai berikut :

$$\%A = \frac{\text{Berat endapan } P \times \text{Faktor Gravimetri}}{\text{Berat Sampel}} \times 100 \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan:

A = analit

P = endapan

Dimana faktor gravimetri didefinisikan sebagai perbandingan antara berat atom relatif (A_r) atau massa molekul relatif (M_r) dari analit dengan endapan yang ditimbang, sehingga digunakan rumus (2.8) :

$$\frac{A_r \text{ atau } M_r \text{ yang dicari}}{M_r \text{ endapan yang ditimbang}} \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan:

A_r = massa atom relatif

M_r = massa molekul relatif

Faktor gravimetri menyatakan berapa gram analit yang terkandung dalam 1 gram endapan, sehingga formula di atas valid untuk menghitung kadar analit dari berat endapan (Underwood, 1999).

2.11 *Literature Review*

Berikut merupakan rangkuman dari beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan metode aktivasi kimia dengan aktivator asam fosfat (H_3PO_4) dalam proses pembuatan karbon aktif. Penelitian-penelitian ini umumnya bertujuan untuk menghasilkan karbon aktif dengan karakteristik yang memenuhi standar kualitas berdasarkan SNI 06-3730-1995, yang mencakup parameter seperti kadar air, kadar abu, daya serap terhadap yodium, dan luas permukaan.

Data dalam **Tabel 2.5** pada halaman selanjutnya menunjukkan perbandingan antara berbagai bahan baku, konsentrasi aktivator, serta hasil karakteristik karbon aktif yang dihasilkan, sehingga dapat memberikan gambaran mengenai efektivitas aktivasi kimia menggunakan H_3PO_4 dalam memenuhi standar mutu karbon aktif.

Tabel 2. 5 Penelitian Terdahulu Aktivasi Karbon Aktif

Sitasi	Material	Konsentrasi Aktivator	Suhu Karbonisasi	Waktu Perendaman	Hasil	Pengujian
Esterlita, M. O., et al. (2015).	Pelepah Aren	1M	500°C	24 Jam	n/a	Rendemen Arang, Bilangan Iodin, Kadar Air
Lestari, R. S. D., et al. (2016).	Tempurung Kelapa	2%; 4%; 6%; 8%	400°C	24 Jam	Memenuhi	<i>Volatile Matter</i> , Kadar Air, Kadar Abu, Kadar Karbon Terikat
Meilianti, M. (2017).	Cangkang Buah Karet	8%; 8,5%; 9%; 9,5%; 10%	750°C	24 Jam	Memenuhi	Kadar Air, Kadar Abu, Kadar Zat Terbang, Uji Daya dengan Iodium, Uji Daya Serap Metilen Biru
Manurung, M., et al. (2019).	Bambu Apus	5%; 10%; 15%; 20; 25%	600°C	24 Jam	Memenuhi	<i>Volatile Matter</i> , Kadar Air, Kadar Abu, Kadar Karbon Terikat, Daya Serap Iodin, Daya Serap Metilen Biru, Analisis Gugus Fungsi
Amna, S., et al. (2024).	Batang Kelapa Sawit	5%; 10%; 15%	400°C	24 Jam	n/a	<i>Volatile Matter</i> , Kadar Air, Kadar Abu, Kadar Karbon Terikat

Berdasarkan data dari **Tabel 2.5** pada halaman sebelumnya, beberapa penelitian terdahulu mengenai aktivasi kimia karbon aktif menggunakan aktivator H_3PO_4 , dapat disimpulkan bahwa metode ini efektif dalam menghasilkan karbon aktif yang memenuhi standar SNI 06-3730-1995 mengenai arang aktif teknis. Seluruh penelitian menggunakan variasi konsentrasi H_3PO_4 , dengan kisaran antara 1% hingga 25%, suhu karbonisasi antara $400^\circ C$ hingga $750^\circ C$, dan waktu perendaman selama 24 jam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sebagian besar karbon aktif yang dihasilkan memenuhi parameter standar, seperti kadar air, kadar abu, zat terbang (*volatile matter*), kadar karbon terikat, serta daya serap terhadap iodin dan metilen biru. Hal ini membuktikan bahwa aktivasi menggunakan H_3PO_4 mampu meningkatkan kualitas karbon aktif dari berbagai jenis bahan baku, seperti pelepah aren, tempurung kelapa, cangkang buah karet, bambu apus, dan batang kelapa sawit.

Sejalan dengan upaya peningkatan kualitas material, dalam bidang konstruksi juga dilakukan berbagai penelitian yang menitikberatkan pada uji daya serap dan uji kuat tekan, khususnya dalam evaluasi kualitas *paving block* atau bahan bangunan lainnya. Penelitian-penelitian ini umumnya bertujuan untuk mengetahui sejauh mana komposisi bahan, perlakuan awal, atau metode pencetakan memengaruhi kekuatan mekanik produk yang dihasilkan.

Berikut ini merupakan ringkasan dari beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan metode uji daya serap air dan kuat tekan untuk mengevaluasi kualitas *paving block*. Secara umum, penelitian-penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh komposisi bahan, perlakuan awal, maupun metode pencetakan terhadap kekuatan mekanik produk yang dihasilkan. Pengujian daya serap air dan kuat tekan mengacu pada ketentuan dalam SNI 03-0691-1996 tentang *paving block*. Data dalam **Tabel 2.6** (pada halaman selanjutnya) membandingkan jenis bahan baku, variasi komposisi, nilai daya serap air, serta kuat tekan yang dihasilkan. Informasi ini memberikan gambaran mengenai efektivitas formulasi dan teknik produksi dalam upaya memenuhi standar mutu *paving block*. Tabel tersebut juga menjadi acuan dasar dalam perancangan penelitian ini.

Tabel 2. 6 Penelitian Terdahulu Bahan Tambah Tempurung Kelapa

Sitasi	Material	Prosentase	Hasil	Pengujian
I A Sycahyo, H R Agustapraja, B Damara., 2020	Arang tempurung kelapa	5%, 10%, 15%, 20%	5%, Kuat tekan 16,70 Mpa, penyerapan air 4,52%, mutu B	Kuat tekan dan resapan air umur 7 hari dikonversi ke umur 28 hari
M I Mustaqim, J Marliansyah, A Rahmi., 2017	Abu tempurung kelapa	5%, 10%, 15%, 20%	5%, Kuat tekan 113 kg/cm ² , mutu D	Sifat Tampak, bentuk & ukuran, kuat tekan
S U Dewi, F H Utama, M Sarkowi, A Setiawan	Abu tempurung kelapa	2,5%, 4%, 6,5%	6,5%, Kuat tekan 31,49 Mpa, mutu B	Kuat tekan umur 7 hari
W Saputra., 2017	Abu tempurung kelapa	5%, 6%, 7%, 8%	6%, Kuat tekan 37,68 Mpa, penyerapan air 3%, mutu A	Sifat tampak, ukuran & berat, penyerapan air, kuat tekan
Arman A, Mulyati, S Wardi, A Roza, D S Putra., 2023	Abu tempurung kelapa	2,5%, 5%, 7,5%	7,5%, Kuat tekan 14,5 Mpa, penyerapan air 4,89%, mutu C	Kuat tekan dan penyerapan air

Berdasarkan **Tabel 2.6**, dapat disimpulkan beberapa penelitian mengenai pemanfaatan arang atau abu tempurung kelapa sebagai bahan tambahan dalam pembuatan *paving block* bahwa variasi prosentase bahan berpengaruh signifikan terhadap nilai kuat tekan dan daya serap air *paving block*. Penambahan arang tempurung kelapa sebanyak 5% menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 16,70 MPa dan penyerapan air 4,52%, yang masuk dalam kategori mutu B.

Sementara itu, penggunaan abu tempurung kelapa menunjukkan variasi hasil, dengan kuat tekan tertinggi sebesar 37,68 MPa dan penyerapan air 3% pada persentase 6%, yang masuk kategori mutu A. Namun, ada juga hasil kuat tekan yang rendah (misalnya 14,5 MPa pada 7,5%) yang diklasifikasikan dalam mutu C.

Secara umum, penggunaan abu tempurung kelapa dalam kisaran 5–7% cenderung memberikan hasil yang optimal, baik dari segi kekuatan maupun penyerapan air, sehingga dapat meningkatkan kualitas *paving block* sesuai standar mutu. Tempurung kelapa dalam kisaran 5–7% cenderung memberikan hasil yang optimal, baik dari segi kekuatan maupun penyerapan air, sehingga dapat meningkatkan kualitas *paving block* sesuai standar mutu.

Selain itu, untuk mendukung analisis performa material *CRA* dalam aplikasi lingkungan, dilakukan pula pengujian serapan CO_2 menggunakan metode gravimetri. Metode ini bertujuan untuk mengukur kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap gas karbon dioksida secara kuantitatif. **Tabel 2.7** berikut menyajikan rangkuman beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan pengujian tersebut.

Tabel 2. 7 Penelitian Terdahulu Gravimetri

No	Sitasi	Deskripsi Metode	Temuan Utama
1	Paswan, D., Broom, D. P., & Webb, C. J. (2020).	Gravimetri – densimetri dan gravimetri Van Ness menggunakan timbangan mikro dan koreksi densitas gas untuk mengukur massa adsorpsi CO_2 secara langsung	Menegaskan metode gravimetri sebagai teknik paling langsung untuk data kesetimbangan adsorpsi, dengan akurasi tinggi di kondisi tekanan tinggi
2	Akter et al. (2023).	Penelitian memanfaatkan CaO dari limbah cangkang telur yang dikonversi menjadi Ca(OH)_2 untuk menyerap CO_2 , menghasilkan endapan CaCO_3 yang kemudian dianalisis dengan XRD, FTIR, SEM, dan TGA. Proses ini sejalan dengan prinsip gravimetri pengendapan, karena ion Ca^{2+} bereaksi dengan CO_2 membentuk endapan padat yang secara teoritis dapat disaring, dikeringkan, dan ditimbang untuk menghitung kapasitas penyerapan. Hasilnya menunjukkan efisiensi	Kondisi optimal tercapai pada suspensi Ca(OH)_2 10 %, 600 rpm, 20 menit, dengan efisiensi penyerapan CO_2 98,71 %. Hasil analisis menunjukkan terbentuknya CaCO_3 sebagai produk utama, sehingga metode ini efektif, murah, dan ramah lingkungan.

No	Sitasi	Deskripsi Metode	Temuan Utama
		tinggi dalam penyerapan CO ₂ sekaligus pemanfaatan limbah menjadi material fungsional ramah lingkungan.	
3	Susanti, A. (2016).	Pengukuran kapasitas adsorpsi CO ₂ oleh karbon bertemplat zeolit-Y ditentukan dengan gravimetri sederhana (menimbang sebelum dan sesudah interaksi gas dalam wadah tertutup).	Kapasitas adsorpsi meningkat dari 1,07% (wt) sebelum aktivasi menjadi 2,72% (wt) setelah KOH aktivasi

Berdasarkan **Tabel 2.7**, ketiga studi yang ditampilkan, dapat disimpulkan bahwa metode gravimetri, baik dalam bentuk densimetri, pengendapan, maupun penimbangan langsung, merupakan teknik yang relevan dan efektif untuk mengukur kapasitas adsorpsi CO₂. Metode ini mampu memberikan hasil kuantitatif yang akurat, baik dalam kondisi tekanan tinggi (Paswan et al., 2020), pembentukan senyawa endapan CaCO₃ (Akter et al., 2023), maupun dalam penimbangan langsung pada karbon aktif (Susanti, 2016). Variasi metode gravimetri ini menunjukkan fleksibilitas penggunaannya dalam menganalisis kemampuan material penyerap CO₂ dari berbagai sumber dan kondisi eksperimental.

Berdasarkan kesimpulan tersebut, peneliti merumuskan gagasan berjudul ***“Analisis Pengaruh Paving Block Termodifikasi CRA (Carbon Raw-Activated) terhadap Kinerja Fungsional dan Kapasitas Adsorpsi CO₂”***. Gagasan ini didasarkan pada temuan dari penelitian-penelitian sebelumnya yang masih memiliki keterbatasan, khususnya dalam hal variasi bahan berbasis limbah yang diolah menjadi CRA serta belum banyaknya studi yang mengkaji kemampuan *paving block* dalam menyerap emisi gas buang CO₂. Melalui penelitian ini, peneliti berharap dapat menghadirkan inovasi dalam pengembangan *paving block* ramah lingkungan yang tidak hanya memiliki mutu mekanis yang tinggi, tetapi juga berkontribusi dalam mengurangi emisi karbon dari kendaraan bermotor.