

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Jhon Asik, Paulus Ala, Ayustiara S. Ali, dan Muhammad Khajaratul Azwad (2023) berjudul "*Studi Pemanfaatan Abu Terbang dan Abu Dasar (FABA) dalam Pembuatan Batu Paving Berpori*", diungkapkan bahwa limbah FABA (Fly Ash dan Bottom Ash) memiliki potensi yang signifikan sebagai material alternatif dalam pembuatan *paving block* berpori. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana penambahan abu terbang dapat memengaruhi kekuatan tekan, porositas, dan permeabilitas *paving block* yang dihasilkan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan 10% abu terbang dalam campuran *paving block* mampu menghasilkan nilai kuat tekan optimal sebesar 13,2 MPa. Nilai ini termasuk dalam kategori mutu C, yang sesuai dengan standar SNI 03-0691-1996, di mana standar untuk trotoar pejalan kaki berada dalam kisaran 12,5 MPa hingga 15 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa *paving block* dengan campuran abu terbang memiliki kekuatan yang memadai untuk menahan beban pejalan kaki dan aktivitas ringan lainnya.

Selain memiliki kekuatan tekan yang memadai, *paving block* dengan campuran abu terbang juga menunjukkan tingkat porositas yang berada pada rentang 15% hingga 25%. Porositas ini memungkinkan air untuk meresap dengan baik melalui struktur *paving block*, sehingga dapat membantu mengurangi genangan air di permukaan dan mendukung sistem drainase yang lebih efektif. Lebih lanjut, nilai permeabilitas *paving block* yang dihasilkan berada dalam kisaran 0,22 hingga 0,25 cm/dtk, yang sesuai dengan standar ACI 522R-10 untuk material berpori. Standar ini menetapkan bahwa material paving berpori harus memiliki kemampuan yang baik dalam mengalirkan air untuk memastikan fungsi optimal pada area dengan intensitas curah hujan yang tinggi.

Penelitian ini memberikan gambaran yang jelas mengenai potensi besar FABA sebagai material alternatif yang ramah lingkungan dalam produksi *paving block*, khususnya untuk aplikasi di area pejalan kaki. Dengan karakteristik mekanis yang memenuhi standar kekuatan, serta kemampuan permeabilitas dan porositas yang baik, *paving block* berbasis abu terbang dapat menjadi solusi inovatif untuk mengatasi masalah limbah industri batu bara sambil mendukung praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Anggi Harystama, M. Agus Salim Al Fathoni, dan Amris Azizi (2020) berjudul "*Pengaruh Penambahan fly ash Terhadap Kuat Tekan paving block*", para peneliti mengevaluasi dampak dari penambahan *fly ash* dengan berbagai variasi proporsi terhadap kekuatan tekan *paving block*. Penelitian ini menggunakan campuran dengan rasio 1 kg semen: 4 kg pasir, kemudian ditambahkan *fly ash* dalam proporsi 5%, 10%, 15%, dan 20%. Hasil pengujian menunjukkan adanya variasi yang signifikan dalam kuat tekan yang dihasilkan. Pada komposisi dengan 5% *fly ash*, nilai kuat tekan rata-rata mencapai 7,22 MPa. Sementara itu, pada campuran dengan 10% *fly ash*, kuat tekan meningkat menjadi 8,1 MPa. Namun, ketika proporsi *fly ash* dinaikkan menjadi 15%, terjadi penurunan kuat tekan menjadi 4,22 MPa, yang mengindikasikan bahwa kelebihan *fly ash* dapat berdampak negatif pada performa mekanis *paving block*. Menariknya, pada proporsi 20% *fly ash*, kuat tekan kembali meningkat secara signifikan hingga mencapai 9,34 MPa, yang memenuhi standar mutu D berdasarkan SNI 03-0691-1996 untuk *paving block* yang digunakan pada area dengan beban ringan.

Penelitian ini menyimpulkan bahwa penambahan *fly ash* dalam proporsi yang tepat dapat meningkatkan kuat tekan *paving block*. Namun, terdapat batas optimal dalam penggunaan *fly ash*, di mana penambahan yang berlebihan justru dapat menurunkan kinerja mekanis *paving*

block. Oleh karena itu, penting untuk memperhatikan proporsi optimal *fly ash* dalam campuran *paving block* agar hasil yang diperoleh dapat memenuhi standar kualitas yang ditetapkan serta mempertahankan performa struktural yang diinginkan.

Miguel R. Chandra, Isri R. Manganca, dan Reki S. Winda (2024) dalam penelitian mereka yang berjudul “Pemanfaatan Abu Terbang PLTU-3 di Sulawesi” menyoroti pengelolaan limbah abu terbang dan upaya pengurangan emisi karbon dioksida (CO₂) melalui pemanfaatannya dalam produksi *paving stone*. Penelitian ini menemukan bahwa komposisi optimal abu terbang untuk campuran *paving stone* adalah sebesar 10%. Meskipun terdapat sedikit penurunan kuat tekan sebesar 4,05% setelah 7 hari dan 2,65% setelah 28 hari dibandingkan dengan campuran tanpa abu terbang, nilai kuat tekan rata-rata masih mencapai 30,75 MPa, yang memenuhi standar mutu M-30 untuk aplikasi non-transportasi. Namun, peningkatan proporsi abu terbang di atas 20% menyebabkan penurunan kuat tekan yang signifikan, berkisar antara 48% hingga 80%, sehingga tidak memenuhi spesifikasi yang ditetapkan. Lebih lanjut, penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan abu terbang pada kadar optimal dapat berkontribusi pada pengurangan emisi CO₂ sebesar 0,235 ton/hari serta pendauran ulang limbah abu terbang sebesar 0,279 ton/hari untuk produksi 5.000 unit *paving stone* per hari.

Sementara itu, Hadi Winarno, Damris Muhammad, Rayandra Ashyar, dan Yudha Gusti Wibowo (2019) dalam penelitian berjudul “Pemanfaatan Limbah *fly ash* dan Bottom Ash PLTU Sumsel-5 sebagai Bahan Utama Pembuatan *paving block*” mengeksplorasi kombinasi *fly ash* dan bottom ash sebagai bahan baku utama dalam produksi *paving block*. Komposisi optimal dengan rasio campuran 1:2:2 (semen: *fly ash*: bottom ash) berhasil menghasilkan nilai kuat tekan yang mencapai 50,52 MPa, termasuk dalam kelas A sesuai standar SNI 03-0691-1996. Selain itu, campuran ini memiliki daya serap air sebesar 5,06%, yang memenuhi kategori kelas B. Penelitian ini menegaskan bahwa limbah PLTU dapat dimanfaatkan secara optimal dalam produksi *paving block* berkualitas tinggi, dengan karakteristik yang sesuai untuk mendukung pembangunan infrastruktur berkelanjutan.

Di sisi lain, Enda Kanti Pangestuti, Prabha Bagaskara, dan Fadila Rizkina Heryanto (2023) dalam penelitian mereka yang berjudul “Pengaruh *fly ash* dan Bottom Ash (FABA) PLTU sebagai Campuran Perkerasan Jalan Beton Bertulang Ditinjau dari Kuat Tekan dan Daya Serap Air” menemukan bahwa berat jenis campuran *fly ash* dan bottom ash berkisar antara 2,25 g/cm³ hingga 3,3 g/cm³, sesuai dengan standar SNI-03-1970-2008. Namun, mereka juga mencatat bahwa kandungan lumpur terak yang mencapai 15,33% melebihi batas maksimum 5% sesuai SNI-03-4142-1996, yang berpotensi memengaruhi kemampuan penyerapan air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa komposisi campuran S1:B3 (kelas B) memiliki nilai kuat tekan tertinggi sebesar 18,73 MPa, yang dianggap layak sebagai material perkerasan jalan. Meskipun demikian, peningkatan kandungan *fly ash* dalam campuran cenderung menyebabkan penurunan kuat tekan, sedangkan bottom ash, yang memiliki kepadatan lebih rendah dibanding pasir, juga memengaruhi daya serap air dan kuat tekan *paving block* yang dihasilkan. Penelitian ini merekomendasikan proporsi yang seimbang antara *fly ash* dan bottom ash untuk memastikan hasil optimal dalam aplikasi konstruksi jalan.

Secara keseluruhan, berbagai penelitian di atas menunjukkan bahwa abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (bottom ash) memiliki potensi besar sebagai bahan campuran alternatif dalam produksi *paving block* dan material perkerasan jalan. Optimalisasi proporsi dan pengendalian kualitas material menjadi kunci penting untuk memastikan performa yang sesuai dengan standar yang berlaku.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengertian *fly ash*

Fly ash atau yang lebih dikenal dengan istilah *fly ash*, merupakan partikel halus sisa hasil pembakaran batu bara yang sering dimanfaatkan sebagai material tambahan dalam berbagai aplikasi industri, namun juga berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan jika tidak dikelola dengan benar (Nursilawati, 2018). Menurut standar ASTM C618, *fly ash* didefinisikan sebagai residu berwujud partikel halus yang dihasilkan dari pembakaran batu bara, terutama jenis batu bara bitumen. Material ini dikenal sebagai salah satu bahan tambahan mineral yang berperan penting dalam meningkatkan kualitas beton dan konstruksi jalan raya. Di era modern ini, *fly ash* menjadi salah satu komponen utama dalam industri konstruksi karena mampu meningkatkan kepadatan beton, kualitas paving stone, serta karakteristik semen agar memiliki kinerja yang lebih optimal.

Secara kimiawi, *fly ash* sebagian besar tersusun atas senyawa silikat dalam bentuk amorf atau gelas, termasuk silikon oksida (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3), dan kalsium oksida (CaO). Selain itu, kandungan unsur lain seperti magnesium (Mg), sulfur (S), natrium (Na), kalium (K), fosfor (P), dan karbon (C) juga ditemukan dalam jumlah yang bervariasi. Meski demikian, perhatian khusus perlu diberikan pada keberadaan elemen beracun seperti arsenik, berilium, boron, kadmium, kromium, kobalt, timbal, mangan, merkuri, selenium, stronsium, talium, dan vanadium. Selain elemen tersebut, *fly ash* juga mengandung senyawa berbahaya seperti dioksin dan hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH), yang jika tidak dikelola dengan baik, dapat menimbulkan risiko serius bagi kesehatan manusia serta merusak ekosistem di sekitarnya. Struktur fisik partikel *fly ash* umumnya berbentuk bulat padat, meskipun sebagian memiliki rongga di dalamnya dan memiliki ukuran yang bervariasi (Physics et al., 2014).

Ukuran partikel *fly ash* cukup bervariasi, mulai dari kurang dari 1 mikrometer hingga lebih dari 100 mikrometer, dan dalam beberapa kasus dapat mencapai rentang antara 0,5 mikrometer hingga 300 mikrometer. Sebagian besar partikel berukuran di bawah 20 mikrometer, dengan 10-30% partikel berukuran lebih dari 50 mikrometer. Luas permukaan spesifik *fly ash* berkisar antara 300 m^2/kg hingga 500 m^2/kg , meskipun dalam kondisi tertentu dapat berkisar antara 200 m^2/kg hingga 700 m^2/kg . Berat jenis *fly ash* bervariasi antara 1,6 hingga 3,1, tetapi sebagian besar berada pada rentang 1,9 hingga 2,2. Dalam kondisi lepas, berat jenis *fly ash* berkisar antara 540-860 kg/m^3 , sementara dalam kondisi padat akibat pemadatan dapat mencapai 1.120-1.500 kg/m^3 (Bayu, 2017).

Dengan karakteristik fisik dan kimia yang dimilikinya, *fly ash* memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam campuran beton. Selain meningkatkan kekuatan struktural beton, *fly ash* juga berperan dalam meningkatkan durabilitas beton terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Lebih dari itu, penggunaan *fly ash* juga dapat membantu mengurangi jumlah limbah industri yang dibuang ke lingkungan. Namun, penting untuk memastikan pengelolaan yang baik agar kandungan beracun dalam *fly ash* tidak mencemari lingkungan atau membahayakan kesehatan manusia.

Fly ash tidak hanya bermanfaat dalam beton, tetapi juga dapat digunakan sebagai filler dalam campuran aspal untuk konstruksi jalan. Penambahan *fly ash* ke dalam campuran aspal diketahui dapat meningkatkan stabilitas struktural jalan serta ketahanannya terhadap beban berat dan perubahan cuaca yang ekstrem. Dengan memanfaatkan *fly ash* sebagai filler, kebutuhan akan agregat alam dapat dikurangi, yang pada akhirnya membantu melestarikan sumber daya alam. Dalam konteks lingkungan, *fly ash* juga memiliki potensi untuk digunakan dalam pengolahan limbah cair yang bersifat asam. Kandungan kalsium oksida (CaO) di dalamnya dapat membantu menetralkan pH limbah cair dan mengurangi dampak pencemaran.

Selain itu, *fly ash* juga dapat dimanfaatkan sebagai media remediasi tanah yang tercemar logam berat, berkat sifat adsorpsinya yang mampu mengikat partikel logam beracun.

Namun, terdapat beberapa tantangan dalam pemanfaatan *fly ash*, salah satunya adalah variasi kualitas yang dipengaruhi oleh jenis batu bara dan kondisi pembakaran yang digunakan. Oleh karena itu, diperlukan standar kualitas yang konsisten agar *fly ash* dapat dimanfaatkan secara optimal di berbagai aplikasi industri. Selain itu, pelatihan dan edukasi terkait penanganan serta pengelolaan *fly ash* bagi pekerja juga sangat penting untuk meminimalisir risiko kesehatan dan dampak lingkungan yang mungkin timbul. Penelitian lebih lanjut mengenai *fly ash* terus dilakukan untuk mengeksplorasi potensi penerapannya di berbagai sektor industri. Studi mengenai metode pengelolaan yang lebih efisien dan teknologi pemrosesan yang ramah lingkungan menjadi fokus utama untuk meningkatkan manfaat *fly ash*.

Selain itu, kolaborasi antara pemerintah, industri, dan lembaga penelitian sangat penting dalam menyusun regulasi yang jelas dan ketat terkait penggunaan *fly ash*. Regulasi yang baik akan memastikan bahwa *fly ash* dimanfaatkan dengan cara yang paling aman dan efisien, sambil meminimalisir potensi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Secara keseluruhan, *fly ash* memiliki potensi besar sebagai material yang mendukung pembangunan berkelanjutan. Dengan pengelolaan yang bijaksana, *fly ash* dapat menjadi solusi dalam mengurangi limbah industri, mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam, dan meningkatkan kualitas material konstruksi. Ke depan, penerapan *fly ash* yang lebih luas diharapkan dapat memberikan kontribusi positif tidak hanya dalam aspek teknis dan ekonomi, tetapi juga dalam menjaga keberlanjutan lingkungan bagi generasi mendatang.

Fly Ash merupakan partikel halus yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara, yang kemudian dimanfaatkan namun juga berpotensi menjadi limbah yang berdampak negatif terhadap lingkungan (Nursilawati, 2018). Berdasarkan standar ASTM C618, abu terbang didefinisikan sebagai residu berbentuk partikel yang dihasilkan dari pembakaran batu bara, khususnya batu bara jenis bitumen. Material ini dikategorikan sebagai bahan tambahan mineral yang memiliki fungsi utama untuk meningkatkan efektivitas beton dan konstruksi perkerasan jalan. Saat ini, *fly ash* banyak diaplikasikan dalam industri konstruksi untuk meningkatkan kualitas pemadatan beton, paving stone, serta untuk mencapai karakteristik semen dengan performa yang lebih optimal.

Secara kimia, *fly ash* sebagian besar terdiri dari senyawa silikat berbentuk gelas yang meliputi silikon oksida (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3), dan kalsium oksida (CaO). Selain itu, terdapat pula unsur tambahan seperti magnesium (Mg), sulfur (S), natrium (Na), kalium (K), fosfor (P), dan karbon (C). Namun, yang perlu diperhatikan adalah kandungan unsur-unsur beracun dalam abu terbang, seperti arsenik, berilium, boron, kadmium, kromium, kobalt, timbal, mangan, merkuri, selenium, stronsium, talium, dan vanadium. Tak hanya itu, *fly ash* juga mengandung senyawa berbahaya seperti dioksin dan polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) yang dapat berdampak serius pada kesehatan manusia dan ekosistem jika tidak dikelola dengan baik. Struktur fisik partikel abu terbang umumnya berbentuk bola padat, dengan beberapa partikel memiliki rongga di dalamnya dan sebagian lainnya memiliki ukuran yang sangat kecil (Physics et al., 2014).

Ukuran partikel *fly ash* sangat bervariasi, berkisar antara kurang dari 1 μm hingga lebih dari 100 μm , meskipun beberapa sumber menyatakan ukuran partikel dapat berada di rentang 0,5 μm hingga 300 μm . Sebagian besar partikel abu terbang berukuran lebih kecil dari 20 μm , dengan sekitar 10-30% partikel berukuran lebih dari 50 μm . Luas permukaan spesifik *fly ash* umumnya berada di kisaran 300 m^2/kg hingga 500 m^2/kg , dengan batas bawah di 200 m^2/kg dan batas atas mencapai 700 m^2/kg . Sementara itu, berat jenis (G_s) *fly ash* bervariasi antara 1,6 hingga 3,1, namun sebagian besar memiliki kisaran antara 1,9 hingga 2,2. Berat jenis dalam

keadaan lepas berkisar antara 540-860 kg/m³, sedangkan dalam kondisi padat akibat pengisian getaran dapat mencapai 1.120-1.500 kg/m³ (Bayu, 2017).

Melihat karakteristik kimia dan fisika yang dimiliki *fly ash*, material ini memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai bahan substitusi dalam industri konstruksi, terutama dalam campuran beton dan material berbasis semen. Penggunaannya tidak hanya meningkatkan kekuatan dan durabilitas struktur, tetapi juga memberikan kontribusi positif terhadap upaya pengurangan limbah industri. Namun, pemanfaatannya harus diimbangi dengan pengelolaan yang tepat untuk meminimalisir risiko dari kandungan beracun yang terdapat di dalamnya. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut dan regulasi yang ketat mengenai penggunaan *fly ash* sangat diperlukan untuk memastikan manfaat optimal dengan risiko lingkungan yang minimal.

Selain dimanfaatkan dalam campuran beton, *fly ash* juga dapat digunakan sebagai bahan pengisi (filler) dalam pembuatan aspal untuk konstruksi jalan raya. Penambahan *fly ash* pada campuran aspal dapat meningkatkan stabilitas struktural dan daya tahan jalan terhadap beban berat serta kondisi cuaca ekstrem. Penggunaan *fly ash* sebagai filler juga dapat mengurangi penggunaan agregat alam, yang pada akhirnya berkontribusi pada pelestarian sumber daya alam. Dalam bidang lingkungan, *fly ash* memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan penetralisir limbah cair yang bersifat asam. Kandungan kalsium oksida (CaO) pada *fly ash* dapat membantu menetralkan pH limbah dan mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan oleh limbah industri. Selain itu, *fly ash* juga dapat dimanfaatkan sebagai media untuk remediasi tanah tercemar logam berat, dengan memanfaatkan sifat adsorpsi dari partikel *fly ash*.

Namun, pemanfaatan *fly ash* tidak terlepas dari tantangan, termasuk fluktuasi kualitas material akibat variasi sumber batu bara dan kondisi pembakaran. Oleh karena itu, standarisasi kualitas *fly ash* sangat penting agar material ini dapat digunakan secara konsisten dalam berbagai aplikasi industri. Selain itu, edukasi dan pelatihan terkait penanganan serta pengelolaan *fly ash* perlu ditingkatkan untuk memastikan keselamatan pekerja dan perlindungan lingkungan. Secara keseluruhan, *fly ash* menawarkan banyak manfaat potensial di berbagai sektor, mulai dari konstruksi hingga pengelolaan lingkungan. Dengan pendekatan yang tepat, material ini dapat menjadi solusi berkelanjutan untuk mengurangi dampak negatif limbah industri sekaligus meningkatkan efisiensi dalam berbagai aplikasi teknis.

Tabel 2.1 Perbandingan Sifat Fisik *fly ash* dan Semen Portland

Variabel Pemanding	<i>Fly Ash</i>	Semen Portland
Kehalusan butir	Lolos saringan No. 325	Lolos ayakan No. 200
Berat jenis	2,15 – 2.8 g/cm ³	3,15 g/cm ³
Waktu pengikat awal	423 menit	60 – 120 menit
Specific gravity	2,15 – 2,6	3,15
Suhu pengikat	24 – 27° C	35° C

Sumber : (Setiawati, 2018)

2.2.1.1 Klasifikasi dan Sifat-Sifat *fly ash*

Menurut Komite ACI 226, abu terbang atau *fly ash* adalah material yang terbentuk dari partikel-partikel berukuran sangat halus. Sekitar 5 hingga 27% dari partikel ini mampu melewati saringan No. 325 dengan ukuran bukaan 45 mikron. *fly ash* memiliki berat jenis yang berkisar antara 2,15 hingga 2,8, dengan warna dominan abu-abu kehitaman. Material ini dikenal memiliki sifat pozzolan yang mirip dengan bahan pozzolan alami lainnya, sehingga sering dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi konstruksi beton. ASTM C.618 (ASTM, 1995:304) menjelaskan bahwa *fly ash* merupakan residu dalam bentuk partikel halus yang dihasilkan dari pembakaran batu bara atau debu batu bara pada proses di pembangkit listrik tenaga uap. Dalam ACI Manual of Concrete Practice 1993 Part 1 226.3R-3, *fly ash* diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama, yaitu kelas

C, kelas F, dan kelas N. Setiap kelas memiliki karakteristik kimia dan fisik yang khas, yang memengaruhi cara penggunaannya dalam campuran beton. Kelas C umumnya memiliki kandungan kalsium oksida yang lebih tinggi, sedangkan kelas F memiliki kandungan silika yang dominan. Sementara itu, kelas N lebih jarang digunakan dan biasanya berasal dari sumber alami atau material yang mengalami proses tertentu. Pemilihan jenis *fly ash* yang tepat sangat bergantung pada kebutuhan spesifik dari proyek konstruksi yang sedang dijalankan. Berikut merupakan kelas dari sifat *fly ash*

1. **Kelas C *fly ash*** kelas C umumnya dihasilkan dari pembakaran batu bara lignit atau sub-bituminus dan memiliki kandungan kalsium oksida (CaO) yang cukup tinggi, yaitu sekitar 18% atau lebih. Selain itu, *fly ash* kelas ini juga mengandung komponen kimia lain seperti SiO₂ (30-50%), Al₂O₃ (17-20%), serta sejumlah kecil Fe₂O₃, MgO, Na₂O, dan K₂O. Berat jenisnya berkisar antara 2,31 hingga 2,86. Keunggulan utama *fly ash* kelas C terletak pada sifatnya yang bersifat pozzolan serta kemampuannya untuk bereaksi langsung dengan air tanpa memerlukan aktivator tambahan. Reaksi ini membentuk senyawa penting seperti CSH (CaO.SiO₂.2H₂O), kalsium hidroksida, dan ettringit, yang secara signifikan meningkatkan kekuatan mekanis dan daya tahan beton terhadap lingkungan yang agresif. Karena karakteristiknya yang unggul, *fly ash* kelas C sering dimanfaatkan dalam pembuatan beton struktural, terutama pada proyek-proyek yang membutuhkan kekuatan tinggi serta ketahanan lingkungan yang baik..
2. **Kelas F *fly ash*** kelas F dihasilkan dari proses pembakaran batu bara keras, seperti antrasit. Kandungan CaO pada *fly ash* kelas ini lebih rendah dibandingkan kelas C, yakni di bawah 18%. Selain itu, komposisi kimia lainnya mencakup SiO₂ (30-50%), Al₂O₃ (45-60%), MgO, K₂O, dan sedikit Na₂O. Berat jenis *fly ash* kelas F berkisar antara 2,15 hingga 2,45. Berbeda dengan *fly ash* kelas C, *fly ash* kelas F tidak dapat bereaksi langsung dengan air karena kandungan CaO yang rendah. Oleh karena itu, material ini memerlukan aktivator tambahan, seperti semen Portland, agar dapat bereaksi secara optimal dalam campuran beton. Meskipun memiliki keterbatasan dalam reaksi mandiri, *fly ash* kelas F sangat efektif dalam mengurangi panas hidrasi selama proses pengikatan beton serta meningkatkan ketahanan terhadap serangan sulfat. Oleh karena itu, *fly ash* kelas F sering digunakan dalam proyek konstruksi yang memerlukan stabilitas termal dan ketahanan terhadap lingkungan korosif.
3. **Kelas N *fly ash*** kelas N berasal dari sumber pozzolan alami atau melalui proses pembakaran material alami seperti tanah diatom, opaline, batu tulis, tufa, dan abu vulkanik. Material ini dapat digunakan dalam bentuk alami atau setelah melalui proses pembakaran untuk meningkatkan reaktivitasnya. *fly ash* kelas N memiliki sifat pozzolan yang sangat baik, yang memungkinkannya untuk berkontribusi secara signifikan dalam meningkatkan kekuatan jangka panjang beton, mengurangi porositas, serta meningkatkan ketahanan terhadap serangan kimia agresif. Karena sifat unggulnya tersebut, *fly ash* kelas N sering digunakan dalam proyek konstruksi berskala besar, terutama pada struktur yang membutuhkan ketahanan ekstrem terhadap kondisi lingkungan yang agresif dan umur layanan yang panjang..

Secara keseluruhan, setiap kelas *fly ash* memiliki karakteristik yang berbeda yang memengaruhi penggunaannya dalam campuran beton. Perbedaan ini mencakup aspek seperti komposisi kimia, sifat pozzolanik, tingkat reaktivitas, serta pengaruhnya terhadap kekuatan dan daya tahan beton. Misalnya, *fly ash* kelas F dikenal memiliki kandungan silika yang tinggi, yang menjadikannya sangat efektif dalam meningkatkan kekuatan beton pada jangka panjang serta meningkatkan daya tahannya terhadap serangan kimia. Di sisi lain, *fly ash* kelas C cenderung mengandung kalsium oksida (CaO) dalam jumlah yang lebih tinggi, yang membuatnya mampu bereaksi lebih cepat selama proses hidrasi semen dan menghasilkan ikatan yang kuat dalam waktu yang lebih singkat.

Pemilihan jenis *fly ash* yang tepat sangat penting untuk memastikan kinerja struktural beton, durabilitas jangka panjang, serta efisiensi ekonomi dari proyek konstruksi yang dihasilkan. Penggunaan *fly ash* yang sesuai tidak hanya dapat mengurangi risiko retak akibat panas hidrasi, tetapi juga meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat dan zat kimia agresif lainnya. Selain itu, sifat pozzolanik dari *fly ash* juga efektif dalam meminimalkan porositas beton, sehingga struktur yang dihasilkan memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Penggantian sebagian semen dengan *fly ash* juga memberikan manfaat lingkungan, seperti mengurangi emisi karbon yang dihasilkan dari proses produksi semen dan mendukung praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan.

Dengan pemahaman yang baik mengenai karakteristik setiap kelas *fly ash*, para insinyur dan praktisi konstruksi dapat memaksimalkan potensi material ini dalam berbagai aplikasi beton modern. Penggunaannya mencakup proyek konstruksi bangunan bertingkat tinggi, infrastruktur jalan, bendungan, serta struktur yang membutuhkan ketahanan ekstra terhadap lingkungan agresif. Oleh karena itu, penelitian dan inovasi dalam pemanfaatan *fly ash* terus dikembangkan untuk memastikan konstruksi masa depan yang lebih kuat, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

Untuk mengetahui klasifikasi kelas situs *fly ash* dapat dilihat juga pada persyaratan ASTM C618-19 pada tabel 2.2 berikut ini

Tabel 2. 2 Persyaratan Klasifikasi Kelas *fly ash*

	N	F	C
Silicon dioxide (SiO ₂) plus aluminum oxide (Al ₂ O ₃) plus iron oxide (Fe ₂ O ₃), min %	70.0	50.0	50.0
Calcium oxide (CaO), %	report only	18.0 max.	>18.0
Sulfur trioxide (SO ₃), max, %	4.0	5.0	5.0
Moisture content, max, %	3.0	3.0	3.0
Loss on ignition, max, %	10.0	6.0 ^A	6.0

(Sumber : ASTM C618-19)

Fly ash memiliki sifat kimia dan fisik yang spesifik, yang memengaruhi kinerjanya sebagai bahan tambahan dalam campuran beton. Setiap sifat memiliki standar persyaratan dan batas kandungan tertentu yang harus dipenuhi agar material ini dapat digunakan secara optimal. Sifat kimia *fly ash* biasanya meliputi kandungan senyawa seperti SiO₂ (Silikon Dioksida), Al₂O₃ (Aluminium Oksida), Fe₂O₃ (Besi Oksida), dan CaO (Kalsium Oksida), yang menentukan reaktivitas pozzolaniknya. Sementara itu, sifat fisik mencakup ukuran partikel, bentuk butiran, berat jenis, dan luas permukaan spesifik, yang memengaruhi kemampuan *fly ash* untuk berintegrasi dengan semen dan membentuk struktur beton yang kuat. Standar persyaratan untuk sifat kimia dan fisik *fly ash* biasanya diatur dalam berbagai pedoman teknis, seperti ASTM C618 atau standar nasional terkait. Rincian lengkap mengenai sifat-sifat ini, beserta batas kandungan yang disyaratkan, dapat dilihat pada tabel yang disediakan di bawah ini:

a. Sifat Kimia *fly ash*

Tabel 2.3 Persyaratan Kandungan Kimia *fly ash*

Senyawa	Kelas Campuran Mineral		
	F (%)	N (%)	C (%)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70	70	50
SO_3	4	5	5
Moisture content	3	3	3
Loss of Ignition	10	6	6
Alkali Na_2O	1,5	1,5	1,5

Sumber : (ASTM C 618-96 volume 04.02)

b. Sifat Fisik *fly ash*

Tabel 2.4 Susunan Sifat Fisik *fly ash*

No.	Uraian	Kelas F (%)	Kelas C (%)
1.	Kehalusan sisa di atas ayakan 45 μm	34.0	34.0
2.	Indeks keaktifan pozzolan dengan PC (kelas 1) pada umur 28 hari	75.0	75.0
3.	Air	105.0	105.0
4.	Pengembangan dengan Autoclave	0.8	0.8

Sumber : (ASTM C 681 – 91)

Tabel 2.5 Persyaratan Fisik *fly ash*

No.	Persyaratan Fisika	Kelas Campuran Mineral		
		F (%)	N (%)	C (%)
1.	Jumlah yang tertahan ayakan 45 μm (ro.325)	34	34	34
2.	Indeks aktivitas kekuatan :			
	Dengan semen umur 7 hari	75	75	75
	Dengan semen umur 28 hari	75	75	75
3.	Kebutuhan air	115	115	115
4.	Autoclave ekspansi atau contraction	0.8	0.8	0.8
5.	Density	5	5	5
6.	% tertahan ayakan 45 μm	5	5	5

Sumber : (ASTM C618 – 96 volume 04.02)

2.2.2 Pengertian *paving block*

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-0691-1996, paving stone atau batako adalah elemen konstruksi yang dihasilkan dari campuran berbagai material bangunan, seperti semen portland atau perekat hidrolis lainnya, air, agregat, serta bahan tambahan tertentu. Campuran ini dapat diproses dengan atau tanpa penambahan bahan khusus yang berfungsi untuk meningkatkan kualitas dan kekuatan beton. Paving stone, yang sering disebut juga sebagai balok beton atau beton antar blok, dirancang secara khusus untuk menjadi solusi efektif dalam menutup dan memperkuat permukaan tanah. *paving block* atau dikenal juga sebagai konblok merupakan material konstruksi yang terbuat dari campuran semen, pasir, agregat, dan air yang dicetak dengan tekanan tinggi untuk menghasilkan material padat dan kokoh.

Penggunaannya banyak ditemui pada permukaan jalan, trotoar, area parkir, halaman rumah, dan taman karena kepraktisan serta nilai estetika yang dimilikinya. Selain fungsional sebagai pelapis permukaan, *paving block* juga dapat memberikan tampilan yang menarik dengan berbagai variasi bentuk, warna, dan pola.

Terdapat beberapa jenis *paving block* yang umum digunakan, antara lain *paving block* bata, yang memiliki bentuk persegi panjang dan paling banyak digunakan, *paving block* hexagon dengan bentuk segi enam yang memberikan kesan estetis, serta *paving block* grass block yang memiliki rongga untuk memungkinkan pertumbuhan rumput, menjadikannya ramah lingkungan. Setiap jenis *paving block* memiliki keunggulan dan karakteristik tersendiri, yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan proyek konstruksi. Proses pembuatan *paving block* melibatkan tahapan penting, dimulai dari persiapan bahan baku seperti semen, pasir, agregat, dan air dengan komposisi yang tepat. Selanjutnya, campuran tersebut diolah hingga homogen dan dicetak menggunakan mesin press hidrolik untuk menghasilkan tekanan tinggi. Setelah itu, *paving block* dikeringkan selama beberapa hari untuk memastikan kekuatan optimal sebelum melalui tahap pengujian kualitas yang mencakup uji kuat tekan, daya serap air, dan ketahanan abrasi.

Penggunaan *paving block* menawarkan berbagai keunggulan, seperti kemudahan dalam pemasangan dan perawatan, daya tahan terhadap beban kendaraan ringan hingga sedang, serta kemampuan untuk mendukung resapan air ke dalam tanah. Selain itu, *paving block* memiliki nilai estetika yang tinggi dengan berbagai pilihan pola pemasangan yang dapat disesuaikan dengan desain area yang diinginkan. Namun, kualitas *paving block* sangat bergantung pada bahan baku dan teknik pembuatannya. Aplikasi *paving block* sangat luas, mulai dari area parkir, jalan lingkungan, trotoar, halaman rumah, hingga lapangan olahraga. Dalam praktiknya, *paving block* juga banyak digunakan pada kawasan perumahan dan ruang terbuka hijau karena kemampuannya menjaga stabilitas permukaan tanah dan mengurangi risiko genangan air. Selain itu, jenis *paving block* seperti grass block menjadi pilihan populer untuk proyek yang mengedepankan konsep ramah lingkungan dan keberlanjutan. Meski demikian, terdapat beberapa tantangan dalam penggunaannya, seperti kualitas bahan baku yang tidak konsisten, pemasangan yang tidak presisi, serta sistem drainase yang kurang baik yang dapat menyebabkan genangan air di permukaan *paving block*. Oleh karena itu, penting untuk memastikan penggunaan material berkualitas, teknik pemasangan yang tepat, dan perencanaan yang matang agar performa *paving block* dapat bertahan dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, *paving block* merupakan solusi konstruksi yang efisien dan estetis untuk berbagai kebutuhan infrastruktur. Dengan pemilihan jenis yang tepat, perencanaan yang baik, serta pemeliharaan yang rutin, *paving block* dapat memberikan manfaat yang optimal baik dari segi fungsional, estetika, maupun keberlanjutan lingkungan. Inovasi dalam pemanfaatan material ramah lingkungan seperti penggunaan *fly ash* dan teknik produksi yang lebih efisien diharapkan dapat semakin meningkatkan kualitas dan daya tahan *paving block* di masa depan.

Produk ini memiliki sejumlah keunggulan yang membuatnya banyak digunakan, baik untuk tujuan estetika maupun fungsional. Paving stone kerap diaplikasikan pada area seperti trotoar, halaman rumah, taman, hingga jalan di lingkungan kompleks perumahan. Selain memiliki daya tahan yang tinggi terhadap beban berat dan pengaruh cuaca ekstrem, produk ini juga menawarkan fleksibilitas tinggi dalam hal desain dan pola pemasangan. Hal ini memungkinkan paving stone untuk disesuaikan dengan kebutuhan arsitektural dan estetika lingkungan sekitar.

Tidak hanya sebagai elemen struktural, paving stone juga memiliki peran penting dalam meningkatkan nilai estetika dengan berbagai variasi bentuk, warna, dan tekstur yang menarik.

Secara umum, paving stone memiliki sifat fisik yang meliputi kekuatan tekan yang optimal, daya serap air yang rendah, stabilitas dimensi yang baik, serta ketahanan terhadap perubahan suhu yang ekstrem. Dengan kombinasi karakteristik tersebut, paving stone menjadi

pilihan material yang andal dan ekonomis untuk berbagai jenis proyek konstruksi serta penataan lanskap. Selain itu, penggunaan paving stone juga memberikan dampak positif dalam aspek keberlanjutan lingkungan. Sistem pemasangan yang memungkinkan air meresap ke dalam tanah membantu mengurangi risiko genangan air dan meningkatkan penyerapan air tanah. Hal ini menjadikan paving stone sebagai salah satu solusi ramah lingkungan yang mendukung konsep pembangunan berkelanjutan. Dengan perawatan yang tepat, paving stone memiliki umur pakai yang panjang dan tetap dapat mempertahankan estetika serta fungsionalitasnya seiring waktu.

Dalam perkembangannya, inovasi dalam pembuatan paving stone terus berkembang. Penggunaan teknologi modern dalam proses produksi memungkinkan terciptanya produk dengan kualitas lebih baik, efisiensi yang lebih tinggi, serta biaya yang lebih terjangkau. Berbagai penelitian dan pengembangan juga terus dilakukan untuk meningkatkan daya tahan, kekuatan, dan fleksibilitas produk paving stone agar semakin sesuai dengan tuntutan proyek konstruksi modern yang kompleks dan dinamis. Dengan segala keunggulannya, paving stone terus menjadi pilihan utama dalam berbagai proyek infrastruktur dan estetika lanskap di berbagai wilayah. Sifat fisik batu paving adalah sebagai berikut:

Tabel 2.6 Sifat-sifat Fisik *paving block*

Mutu	Kuat Tekan (Mpa)		Ketahanan aus (mm/menit)		Penyerapan air rata-rata maksimum
	Rata-rata	minimum	Rata-rata	minimum	%
A	40	35	0,090	0,103	3
B	20	17,0	0,130	0,149	6
C	15	12,5	0,160	0,184	8
D	10	8,5	0,219	0,251	10

Sumber: SNI 03-0691-1996

Keterangan :

- Paving block dengan mutu A: Digunakan untuk keperluan jalan raya.
- Paving block dengan mutu B: Cocok untuk area pelataran parkir.
- Paving block dengan mutu C: Digunakan untuk jalur pejalan kaki.
- Paving block dengan mutu D: Dipakai di area taman atau penggunaan lainnya.

Penggunaan tebal *paving block* harus disesuaikan juga berdasarkan pemanfaatannya, untuk syarat dan ketentuan mengenai tebal *paving block* secara umum :

- 6 cm, digunakan sebagai beban lalu lintas ringan dengan frekuensi terbatas, misalnya sepeda motor, pejalan kaki.
- 8 cm, digunakan sebagai beban lalu lintas sedang atau berat dan padat frekuensinya, misalnya : mobil, pick up, truk, bus.
- 10 cm, digunakan sebagai beban lalu lintas super berat, misalnya : tronton, loader.

2.2.3 Kelebihan dan Kelemahan Pasangan *paving block*

Paving block merupakan salah satu material konstruksi yang semakin populer dalam pembangunan infrastruktur jalan, taman, halaman, dan berbagai fasilitas umum lainnya. Material ini terbuat dari campuran semen, pasir, agregat, dan air yang dicetak menjadi balok dengan berbagai bentuk dan ukuran. Salah satu keunggulan utama *paving block* adalah daya serap air yang tinggi, yang memungkinkannya untuk membantu proses resapan air hujan ke dalam tanah. Dengan demikian, penggunaan *paving block* dapat membantu mengurangi risiko genangan air dan banjir di daerah perkotaan yang memiliki sistem drainase terbatas. Fitur ini

menjadi salah satu keunggulan yang tidak dimiliki oleh material penutup tanah lainnya seperti aspal atau beton cor.

Selain itu, *paving block* memiliki kelebihan dari segi kemudahan pemasangan dan perawatan. Proses instalasi *paving block* relatif cepat dan tidak memerlukan peralatan khusus. Jika terjadi kerusakan pada bagian tertentu, perbaikannya pun dapat dilakukan dengan mudah tanpa harus mengganti seluruh area yang tertutup oleh *paving block*. Hal ini membuat *paving block* lebih ekonomis dan praktis dalam jangka panjang. Selain itu, desainnya yang modular memberikan fleksibilitas dalam membentuk pola-pola artistik yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan estetika pada berbagai proyek pembangunan, seperti trotoar, taman kota, atau halaman rumah.

Dari segi ketahanan, *paving block* memiliki keunggulan berupa daya tahan yang baik terhadap berbagai jenis beban, baik beban statis seperti kendaraan yang terparkir, maupun beban dinamis seperti lalu lintas kendaraan yang bergerak. Material ini juga mampu menahan suhu ekstrem dari mesin kendaraan atau tumpahan oli dan pelumas, yang sering kali merusak permukaan jalan beraspal. Dengan struktur yang kuat dan kokoh, *paving block* dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama dengan tingkat kerusakan yang relatif rendah. Selain itu, jika terjadi perubahan kondisi permukaan tanah, *paving block* lebih fleksibel dan tidak mudah retak seperti material beton cor.

Namun, di balik berbagai keunggulannya, *paving block* juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu dipertimbangkan. Salah satu kelemahan utamanya adalah kemungkinan perubahan bentuk jika pemasangan alas atau fondasinya tidak dilakukan dengan baik. Tanah dasar yang tidak stabil atau tidak dipadatkan dengan benar dapat menyebabkan *paving block* bergeser, miring, atau tenggelam di beberapa titik. Kondisi ini tidak hanya mengurangi estetika permukaan, tetapi juga dapat membahayakan pejalan kaki dan mengganggu kenyamanan kendaraan yang melintas di atasnya. Oleh karena itu, perencanaan pondasi yang matang dan pemasangan yang benar menjadi faktor kunci dalam menjaga kualitas *paving block*.

Selain itu, *paving block* tidak ideal untuk digunakan pada jalur dengan kecepatan kendaraan yang tinggi. Permukaan yang memiliki banyak celah antar balok dapat mengurangi kenyamanan berkendara dan meningkatkan risiko licin saat hujan. Selain itu, jika terjadi tekanan berlebihan dari kendaraan berat yang melintas dengan kecepatan tinggi, *paving block* dapat mengalami pergeseran yang menyebabkan permukaan menjadi tidak rata. Hal ini membuat material ini lebih cocok digunakan untuk area dengan kecepatan kendaraan yang rendah, seperti jalan lingkungan, trotoar, area parkir, atau halaman perumahan.

Kesimpulannya, *paving block* memiliki kombinasi antara fungsi estetika dan struktural yang baik, menjadikannya pilihan yang ideal untuk berbagai kebutuhan konstruksi dan lanskap. Namun, kelemahan-kelemahan seperti ketergantungan pada fondasi yang kokoh dan keterbatasan dalam menahan lalu lintas cepat harus dipertimbangkan dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek. Dengan pemasangan yang tepat, perawatan yang rutin, serta pemilihan jenis *paving block* yang sesuai dengan kebutuhan, material ini dapat menjadi solusi efektif dan estetis untuk berbagai kebutuhan pembangunan infrastruktur modern.

2.2.4 Material Penyusun *paving block*

2.2.4.1 Semen Portland

Semen Portland merupakan salah satu bahan bangunan paling penting dalam industri konstruksi modern. Sebagai jenis semen hidrolik, semen ini memiliki kemampuan mengeras ketika bereaksi dengan air dan tetap mempertahankan kekuatannya meskipun terendam air. Dinamakan "Portland" karena kemiripannya dengan batuan alami dari Pulau Portland di Inggris, semen ini banyak digunakan dalam pembuatan beton, mortar, plesteran, dan elemen struktural lainnya. Kekuatan, daya tahan, dan fleksibilitasnya menjadikannya pilihan utama

dalam berbagai jenis proyek konstruksi, mulai dari bangunan bertingkat tinggi hingga infrastruktur besar seperti jembatan, bendungan, dan jalan raya. Secara umum, semen Portland terbagi menjadi beberapa jenis berdasarkan karakteristik dan fungsinya. Tipe I digunakan untuk konstruksi umum yang tidak memerlukan ketahanan khusus, sedangkan Tipe II cocok untuk daerah dengan kandungan sulfat sedang. Tipe III memiliki kekuatan awal tinggi dan ideal untuk proyek yang memerlukan pengerasan cepat, seperti perbaikan jalan. Tipe IV digunakan untuk konstruksi besar seperti bendungan, di mana panas hidrasi rendah diperlukan untuk mencegah retak akibat panas berlebih. Sementara itu, Tipe V dirancang khusus untuk lingkungan dengan kandungan sulfat tinggi, seperti dermaga dan struktur bawah tanah.

Proses pembuatan semen Portland melibatkan tahapan yang kompleks, dimulai dari penggilingan bahan baku seperti batu kapur dan tanah liat, pembakaran campuran dalam kiln pada suhu tinggi hingga menghasilkan klinker, pendinginan klinker, penggilingan bersama gypsum untuk mengatur waktu pengerasan, dan akhirnya pengemasan produk jadi. Setiap tahap dalam proses ini memengaruhi kualitas semen yang dihasilkan, termasuk daya rekat, kekuatan tekan, dan waktu pengerasan. Oleh karena itu, pengendalian kualitas yang ketat sangat penting untuk memastikan semen yang diproduksi memenuhi standar industri. Dalam aplikasinya, semen Portland memiliki peran penting dalam berbagai aspek konstruksi. Selain digunakan untuk beton struktural dalam bangunan bertingkat tinggi, semen ini juga diaplikasikan pada proyek infrastruktur besar seperti bendungan, jembatan, dan jalan raya. Selain itu, semen Portland juga digunakan dalam pembuatan elemen beton pracetak, plesteran dinding, dan pekerjaan fondasi bawah tanah. Fleksibilitas aplikasinya membuat semen ini menjadi bahan yang tak tergantikan dalam pembangunan modern.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, penggunaan **semen Portland** juga menghadapi beberapa tantangan. Salah satunya adalah panas hidrasi yang dihasilkan selama proses pengerasan, yang dapat menyebabkan retakan pada struktur besar jika tidak diatur dengan baik. Selain itu, produksi semen juga menghasilkan emisi karbon yang signifikan, sehingga berdampak pada lingkungan. Ketergantungan pada bahan baku alami seperti batu kapur dan tanah liat juga menjadi perhatian dalam jangka panjang. Seiring dengan perkembangan teknologi, inovasi dalam penggunaan semen Portland terus dilakukan untuk mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan efisiensi penggunaannya. Penggunaan bahan tambahan seperti *fly ash*, slag semen, dan silica fume telah terbukti meningkatkan performa beton dan mengurangi jumlah semen yang dibutuhkan. Selain itu, teknologi produksi ramah lingkungan, seperti pengurangan emisi karbon selama proses pembakaran klinker, semakin menjadi fokus dalam industri semen.

Secara keseluruhan, semen Portland tetap menjadi bahan utama dalam industri konstruksi global berkat kekuatan, daya tahan, dan fleksibilitasnya. Pemilihan jenis semen yang tepat, perencanaan yang baik, serta penerapan teknologi modern akan memastikan konstruksi yang dihasilkan tidak hanya kokoh dan tahan lama, tetapi juga lebih ramah lingkungan. Dengan inovasi yang berkelanjutan, semen Portland diharapkan dapat terus mendukung pembangunan infrastruktur yang lebih berkelanjutan di masa depan. Semen Portland adalah jenis semen hidrolik yang paling umum digunakan dalam industri konstruksi modern. Semen ini diproduksi melalui proses penghancuran dan penggilingan klinker, yaitu hasil pembakaran bahan mentah seperti batu kapur dan tanah liat pada suhu tinggi di dalam kiln. Klinker mengandung komponen utama berupa kalsium silikat (Ca_2SiO_4 dan Ca_3SiO_5) yang bersifat hidrolik, artinya akan bereaksi dengan air untuk membentuk senyawa yang keras dan tahan terhadap air.

Sifat hidrolik ini menjadikan semen Portland sebagai perekat hidrolik yang sangat efektif, di mana reaksinya akan berlangsung ketika semen dicampur dengan air. Proses hidrasi ini menghasilkan produk akhir berupa pasta yang mengeras dan membentuk struktur yang kuat serta tahan lama. Kekuatan dan daya tahan ini membuat semen Portland ideal untuk berbagai

jenis konstruksi, termasuk bangunan bertingkat, jembatan, jalan, dan infrastruktur skala besar lainnya. Selain itu, semen Portland memiliki kemampuan adhesi yang baik, sehingga mampu merekatkan berbagai jenis material bangunan seperti batu bata, beton, dan batu alam dengan kuat dan stabil. Material ini juga memiliki daya tahan yang baik terhadap lingkungan yang lembap atau basah, sehingga sangat cocok untuk digunakan dalam proyek-proyek yang memerlukan ketahanan terhadap air, seperti fondasi bangunan, saluran irigasi, dan konstruksi bawah tanah. Semen Portland tersedia dalam beberapa jenis, di antaranya Semen Portland Tipe I, II, III, IV, dan V, yang masing-masing memiliki karakteristik dan kegunaan khusus. Misalnya, Semen Portland Tipe I digunakan untuk konstruksi umum, sedangkan Tipe V lebih tahan terhadap serangan sulfat dan cocok untuk konstruksi di lingkungan dengan kandungan sulfat tinggi.

Dalam penggunaannya, perbandingan campuran antara semen, agregat, dan air harus diperhatikan dengan baik untuk memastikan kualitas dan kekuatan hasil akhir yang optimal. Kesalahan dalam perhitungan komposisi dapat menyebabkan retak dini, kelemahan struktural, atau bahkan kegagalan konstruksi. Oleh karena itu, pemahaman yang baik tentang sifat dan karakteristik semen Portland sangat penting bagi para insinyur, arsitek, dan pekerja konstruksi. Secara keseluruhan, semen Portland memiliki peran yang sangat penting dalam industri konstruksi global. Dengan sifat hidroliknya yang unik dan kekuatannya yang luar biasa, material ini terus menjadi pilihan utama dalam menciptakan struktur bangunan yang kokoh, tahan lama, dan aman. Namun, penggunaannya juga harus memperhatikan faktor lingkungan, mengingat produksi semen Portland berkontribusi terhadap emisi karbon dioksida yang signifikan. Upaya untuk mengurangi dampak lingkungan, seperti penggunaan semen ramah lingkungan atau teknologi produksi yang lebih efisien, menjadi perhatian penting dalam industri ini.

Tabel 2.7 Perbandingan Sifat Kimia *fly ash* dan Semen Portland

Komponen Pembanding	% Rata-Rata Untuk Semen Portland	% Rata-Rata Untuk <i>fly ash</i>
Kapur (CaO)	60 – 65	6,70
Silika (SiO ₂)	17 – 25	49,05
Alumina (Al ₂ O ₃)	3 – 8	17,30
Besi (Fe ₂ O ₃)	0,5 – 6	15,64
Magnesia (MgO)	0,5 – 5	2,70
Sulfur (SO ₃)	1 – 2	2,72
Potash (Na ₂ O + K ₂ O)	0,5 – 1	0,52 – 1,27

Sumber : (Data Penulis)

Berdasarkan penggunaannya, semen portland di Indonesia dibagi menjadi 5 jenis berdasarkan ASTM C-150, yaitu :

- Tipe I adalah semen portland untuk tujuan umum. tipe ini terbanyak diproduksi, karena familiar pada semua jenis konstruksi.
- Tipe II adalah semen portland modifikasi, adalah tipe yang sifatnya setengah tipe IV dan setengah tipe V (moderat).
- Tipe III adalah semen portland dengan kekuatan awal tinggi. Kekuatan 28 hari umumnya dapat dicapai dalam 1 minggu. Semen jenis ini digunakan pada bangunan yang akan segera dibongkar dan di gunakan secepatnya.
- Tipe IV adalah semen Portland dengan panas hidrasi rendah untuk kondisi di mana laju dan jumlah panas yang dihasilkan harus minimal. Misalnya, dalam struktur masif seperti bendungan gravitasi besar.

- e. Tipe V adalah semen Portland tahan sulfat yang dirancang untuk menahan efek keras sulfat. Umumnya digunakan di daerah dengan kandungan sulfat tinggi di tanah atau air.

2.2.4.2 Agregat Halus

Berdasarkan SNI 1970:2008, agregat halus didefinisikan sebagai pasir alam yang terbentuk dari proses pelapukan alami batuan atau pasir yang dihasilkan melalui proses pemaparan batu secara industri. Agregat halus memiliki ukuran partikel maksimum 4,75 mm atau lolos pada saringan No. 4. Material ini merupakan salah satu komponen penting dalam pembuatan beton, termasuk dalam produksi batu paving (paving block), karena berperan penting dalam menentukan kemampuan kerja, kekuatan, dan ketahanan produk akhir. Kemampuan kerja atau workability dari adukan beton dipengaruhi langsung oleh karakteristik agregat halus yang digunakan. Pasir dengan butiran yang sangat halus memiliki lebih banyak permukaan yang harus dilapisi oleh semen dan air, sehingga memerlukan jumlah semen yang lebih banyak untuk mengisi celah antar butiran pasir dan memastikan adukan memiliki kemampuan kerja yang baik. Jika jumlah semen tidak mencukupi, adukan akan sulit diolah dan berpotensi menghasilkan produk yang kurang kuat serta mudah retak.

Di sisi lain, penggunaan pasir dengan butiran yang terlalu besar juga dapat menurunkan kualitas *paving block*. Rongga yang terbentuk di antara butiran pasir yang besar akan lebih sulit diisi oleh pasta semen, sehingga struktur beton menjadi lebih berpori dan berpotensi melemahkan daya tahan serta kekuatan perkerasan. Kondisi ini dapat menyebabkan batu paving lebih mudah retak, pecah, atau mengalami deformasi ketika mendapatkan beban yang berat. Selain ukuran butiran, kebersihan agregat halus juga menjadi faktor penting dalam kualitas beton paving. Pasir yang mengandung lumpur, tanah liat, atau material organik lainnya dalam jumlah berlebihan dapat menghambat proses ikatan antara semen dan agregat. Oleh karena itu, agregat halus harus melalui proses pencucian dan penyaringan yang memadai sebelum digunakan dalam campuran beton untuk memastikan bebas dari material pengotor. Dalam praktiknya, pemilihan agregat halus harus memperhitungkan keseragaman ukuran partikel (gradasi). Gradasi yang baik memungkinkan partikel kecil mengisi rongga di antara partikel yang lebih besar, menciptakan struktur yang lebih padat dan kokoh. Dengan demikian, adukan beton akan memiliki kekuatan optimal, durabilitas yang baik, dan daya tahan terhadap beban dinamis serta perubahan cuaca ekstrem.

Secara keseluruhan, agregat halus memegang peranan penting dalam menentukan kualitas *paving block*. Keseimbangan antara ukuran butiran, kebersihan material, dan proporsi campuran harus diperhatikan dengan seksama. Penggunaan agregat halus yang tepat tidak hanya akan meningkatkan kemampuan kerja campuran beton, tetapi juga memastikan daya tahan, kekuatan, dan stabilitas struktur *paving block* dalam jangka waktu yang panjang. Persyaratan agregat halus meliputi:

- a. Partikelnya harus tajam dan keras, dengan indeks kekerasan ≤ 2 .
- b. Harus tahan lama, tidak terpengaruh oleh cuaca. Saat dilakukan pengujian natrium sulfat, persentase kerusakan maksimum adalah 12%. Ini meningkat menjadi 18% saat diuji dengan magnesium sulfat.
- c. Harus mengandung kurang dari 5% lumpur (partikel halus yang lolos saringan 0,06 mm).
- d. Harus bebas dari bahan organik berlebih, divalidasi dengan percobaan warna menggunakan larutan NaOH 3%. Warna larutan tidak boleh lebih gelap dari warna standar.
- e. Modulus elastisitas partikel berkisar antara 1,50 hingga 3,80, dan terdapat variasi partikel tergantung pada standar gradasi.

- f. Agregat halus yang berasal dari laut atau pantai diperbolehkan berdasarkan rekomendasi perusahaan penguji material.

2.2.4.3 Air

Air memegang peran yang sangat penting dalam proses pembuatan *paving block*, terutama dalam menghidrasi semen dan memfasilitasi pencampuran agregat dengan lebih efektif. Proses hidrasi adalah reaksi kimia antara semen dan air yang menghasilkan pasta yang mengeras dan merekatkan agregat menjadi struktur yang kuat. Selain itu, air juga membantu meredam partikel agregat, sehingga proses pencampuran material menjadi lebih mudah dan merata. Dengan distribusi air yang tepat, setiap butir semen akan bereaksi sempurna dengan air, menghasilkan struktur beton yang lebih padat dan kokoh. Tidak hanya dalam tahap pencampuran, air juga memainkan peran penting dalam tahap penyembuhan (*curing*). Proses ini dilakukan dengan merendam atau menyiram *paving block* yang sudah dicetak secara berkala untuk memastikan hidrasi semen berjalan secara optimal dan terus berlanjut setelah proses pencetakan selesai. Penyembuhan yang baik akan membantu mengurangi risiko retak dini, meningkatkan kekuatan tekan, serta memastikan daya tahan yang baik terhadap pengaruh lingkungan seperti suhu ekstrem atau kelembapan tinggi.

Dalam pembuatan *paving block*, rasio air-semen (*water-cement ratio*) merupakan faktor krusial yang harus diperhatikan dengan cermat. Rasio ini menggambarkan perbandingan antara jumlah air dan semen yang digunakan dalam campuran beton. Rasio yang ideal akan menghasilkan campuran beton yang memiliki kekuatan, daya tahan, dan kemampuan kerja yang optimal. Jika jumlah air yang digunakan terlalu banyak, maka akan terbentuk gelembung udara di dalam struktur *paving block*. Gelembung ini akan menciptakan rongga-rongga kecil yang dapat mengurangi kekuatan produk akhir dan meningkatkan risiko keretakan saat menerima beban berat. Sebaliknya, jika jumlah air terlalu sedikit, proses hidrasi tidak akan berjalan dengan sempurna. Akibatnya, sebagian semen tidak akan bereaksi dengan air dan menyebabkan campuran beton menjadi kering dan sulit dicetak. Kelemahan ini akan berdampak pada penurunan kekuatan tekan *paving block*, serta meningkatkan risiko keretakan dini dan kerusakan struktural dalam jangka panjang. Oleh karena itu, keseimbangan yang tepat dalam rasio air-semen sangat penting untuk memastikan kualitas *paving block* yang optimal.

Selain itu, kualitas air yang digunakan juga memengaruhi hasil akhir *paving block*. Air yang digunakan harus bersih dan bebas dari zat-zat berbahaya seperti minyak, garam, atau bahan organik yang dapat mengganggu proses hidrasi. Air yang terkontaminasi dapat menghambat reaksi kimia antara semen dan air, sehingga mengurangi daya rekat serta kekuatan struktural *paving block*. Secara keseluruhan, air bukan hanya sekadar bahan tambahan dalam pembuatan *paving block*, tetapi merupakan elemen penting yang memengaruhi setiap tahapan produksi, mulai dari pencampuran, pembentukan, hingga penyembuhan. Dengan pengelolaan rasio air-semen yang tepat dan penggunaan air berkualitas, *paving block* yang dihasilkan akan memiliki kekuatan, daya tahan, dan stabilitas yang sesuai dengan standar mutu yang diharapkan.

2.2.5 Perencanaan Campuran *paving block*

Saat ini belum ada peraturan yang mengatur secara spesifik desain campuran *paving block*. Oleh karena itu, desain campuran *paving block* biasanya memanfaatkan rasio semen terhadap agregat untuk mencapai kualitas yang diinginkan. Pendekatan ini biasa digunakan dalam praktik desain campuran beton, termasuk *paving block*. Komposisi campuran *paving block* yang diperlukan dapat diamati dengan menggunakan persamaan di bawah ini:

Kebutuhan pasir 1 :

$$\text{Paving block} = \frac{6}{7} \times \text{berat isi pasir} \times V \text{ paving block} \times 1,3 \dots\dots\dots(2.1)$$

Kebutuhan semen 1 :

$$Paving\ block = \frac{\text{kebutuhan pasir}}{6} \dots\dots\dots(2.2)$$

Kebutuhan abu terbang :

$$(fly\ ash)\ a\% = b\% \times \text{Total kebutuhan semen} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

$V\ paving\ block = \text{Volume paving block (cm}^3\text{)}$

1,3 = Faktor pemadatan mesin hidrolis

$a\% = \text{Variasi persentase abu terbang atau fly ash (\%)}$

$b\% = \text{Jumlah persentase abu terbang atau fly ash (\%)}$

2.2.6 Pengujian *paving block*

2.2.6.1 Uji Kuat Tekan

Kuat tekan *paving stone* didefinisikan sebagai kemampuan material untuk menahan beban per satuan luas hingga mencapai titik keruntuhan akibat gaya tekan tertentu. Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan kompresor digital, yang memastikan pengukuran lebih akurat dan konsisten. Kekuatan tekan *paving stone* umumnya meningkat seiring dengan kualitas bahan baku, proporsi campuran yang tepat, dan proses produksi yang optimal. Prosedur pengujian ini dilakukan pada benda uji berbentuk balok atau menyerupai batu bata, sesuai dengan standar yang ditetapkan. Nilai kuat tekan *paving stone* dapat dihitung menggunakan persamaan yang diacu dari SNI 03-0691-1996, yang menetapkan metode pengujian dan kriteria yang harus dipenuhi untuk memastikan *paving stone* memenuhi standar mutu yang diharapkan. Berikut rumus kuat *paving block*:

$$\text{Kuat Tekan paving block} = \frac{P}{L} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

P = Beban tekan (N)

L = Luas bidang tekan (mm²)

2.2.6.2 Uji Keausan *paving block*

Daya tahan *paving block* terhadap aus dapat dihitung menggunakan rumus yang tercantum dalam SK-SNI-03-0028-1987:

$$\text{Ketahanan aus} = \frac{A \times 10}{B.J. \times I \times w} \text{ mm/menit} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

A = Perbedaan berat benda uji sebelum dan sesudah mengalami pengausan (gram)

B.J. = Rata-rata berat jenis pada lapisan permukaan atas

I = Luas permukaan area yang mengalami aus (cm²)

w = Durasi proses pengausan (menit)

2.2.7 Sifat Fisik *paving block*

Absorpsi merupakan persentase berat air yang mampu diserap oleh suatu material jika direndam dalam air. Pengujian penyerapan air (absorpsi) mengacu pada standar SNI 03-0691-1996.

$$\text{Absorpsi} = \frac{A-B}{B} \times 100\% \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

A = berat pada *paving block* kondisi basah (gr)

B = berat pada *paving block* kondisi kering (gr)