

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dunia saat ini sedang menghadapi krisis lingkungan yang serius akibat akumulasi limbah plastik yang terus meningkat dari tahun ke tahun. Plastik telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan manusia moderen karena sifatnya yang ringan, murah, dan tahan lama. Namun, keunggulan ini juga menjadi penyebab utama permasalahan lingkungan, karena sebagian besar plastik sangat sulit terurai secara alami, bahkan bisa membutuhkan waktu ratusan tahun untuk terdegradasi di lingkungan terbuka. Menurut laporan *The Plastic Waste Makers Index 2023*, setiap tahun dihasilkan lebih dari 139 juta ton sampah plastik secara global, namun hanya sekitar 9% yang berhasil didaur ulang secara efektif. Sisanya dibuang ke tempat pembuangan akhir (TPA), dibakar, atau mencemari lingkungan sekitar. Bahkan, antara 8 hingga 11 juta ton sampah plastik diperkirakan mencemari lautan setiap tahunnya, mengancam ekosistem laut dan memasuki rantai makanan manusia (UNEP, 2023).

Indonesia sebagai negara kepulauan dengan populasi besar, menjadi salah satu kontributor utama dalam krisis ini. Berdasarkan data *World Bank* (2021), Indonesia menghasilkan sekitar 3,2 juta ton sampah plastik per tahun, dan 1,29 juta ton di antaranya berakhir di laut. Selain itu, data terbaru dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2024) menunjukkan bahwa dari 56,63 juta ton timbunan sampah domestik, terdapat 11,3 juta ton yang tidak terkelola, termasuk di antaranya limbah plastik yang sulit terurai. Masalah ini semakin rumit karena Indonesia juga masih menjadi tujuan impor limbah plastik dari negara maju. Pada tahun 2023 saja, Indonesia mengimpor lebih dari 22.000 ton limbah plastik dari Australia, meningkat hampir 28% dibanding tahun sebelumnya (Mongabay, 2024).

Di sisi lain, sektor konstruksi yang menjadi pilar pembangunan infrastruktur juga menghadapi tantangan tersendiri. Untuk mendukung pembangunan gedung, perumahan, hingga jalan raya, dibutuhkan material utama seperti pasir, kerikil, dan batu pecah dalam jumlah besar. Menurut *Global Resource Outlook 2019* dari *United Nations Environment Programme (UNEP)*, sektor konstruksi menyumbang lebih dari 50% ekstraksi material global setiap tahun, dengan penggunaan agregat kasar dan halus mencapai lebih dari 40 miliar ton per tahun secara global.

Kondisi serupa terjadi di Indonesia. Pesatnya pertumbuhan penduduk dan tingginya permintaan bahan bangunan terus meningkat. Data dari Kementerian Pertambangan mencatat bahwa konsumsi bahan galian industri seperti pasir mencapai sekitar 8–10% per tahun. Tingginya ketergantungan terhadap bahan tambang memicu dampak lingkungan serius, mulai dari penggundulan bukit, pencemaran sungai akibat penambangan pasir ilegal, hingga konflik sosial di tingkat lokal.



Kedua permasalahan tersebut, yaitu penumpukan limbah plastik yang terus meningkat dan eksploitasi besar-besaran terhadap sumber daya agregat alam, memerlukan solusi yang inovatif, berkelanjutan, dan terpadu. Dalam konteks pembangunan yang semakin masif, sangat penting untuk mulai mengembangkan pendekatan yang tidak hanya mengandalkan bahan baku konvensional, tetapi juga mengintegrasikan limbah sebagai sumber daya alternatif. Salah satu arah solusi yang kini banyak dikaji adalah pemanfaatan limbah plastik dalam sektor konstruksi, baik sebagai bahan tambahan, bahan pengganti, maupun bahan pendukung untuk infrastruktur.

Pendekatan ini dinilai potensial karena mampu menjawab dua tantangan sekaligus yaitu mengurangi akumulasi sampah plastik serta menekan ketergantungan terhadap material alam yang tidak terbarukan. Jika dikelola dengan tepat, strategi semacam ini dapat berkontribusi terhadap pengembangan sistem konstruksi yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, dan selaras dengan prinsip ekonomi sirkular di mana limbah dianggap sebagai sumber daya baru yang dapat digunakan kembali. Pendekatan ini sangat relevan dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan, yaitu pembangunan yang mampu menyeimbangkan kebutuhan pertumbuhan fisik dengan pelestarian lingkungan hidup.

1.2. Kajian Teori

1.2.1 Beton

Beton adalah material konstruksi yang sangat umum digunakan di seluruh dunia, terutama untuk bangunan, jembatan, dan infrastruktur. Secara umum, beton adalah campuran dari bahan-bahan seperti semen, air, agregat kasar, dan agregat halus yang ketika dicampur bersama akan membentuk material padat setelah proses pengerasan (curing). Beton memiliki karakteristik yang kuat, tahan lama, dan dapat dibentuk sesuai kebutuhan, menjadikannya bahan utama dalam berbagai jenis konstruksi.

Beton adalah material komposit yang terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu semen (sebagai bahan pengikat), air, dan agregat kasar dan agregat halus. Campuran ini akan bereaksi melalui proses kimia yang disebut hidrasi, yang membuat beton mengeras dan menjadi kuat. Kekuatan dan kualitas beton dipengaruhi oleh proporsi dan kualitas bahan-bahan yang digunakan serta proses pembuatan dan curing yang diterapkan.

Menurut Neville (1996), "beton adalah material konstruksi yang dibuat dengan mencampurkan semen portland, air, agregat halus (pasir), dan agregat kasar (batu dalam proporsi tertentu." Setelah pencampuran, beton akan mengeras dan menjadi bahan yang kuat serta tahan lama.

(2004), beton didefinisikan sebagai "material yang terbentuk dari semen, agregat kasar, agregat halus, air, dan bahan tambah tertentu yang mengeras setelah melalui proses hidrasi, sehingga beton tertentu dalam menahan beban".



1. Komposisi Utama Beton.

a. Semen.

Semen merupakan bahan pengikat hidrolik yang ketika dicampur dengan air akan mengalami reaksi kimia (disebut reaksi hidrasi) dan membentuk pasta yang mengeras menjadi struktur yang kokoh dan stabil. Dalam campuran beton, semen berperan sebagai bahan pengikat utama yang menyatukan agregat kasar dan halus, serta memberikan kekuatan dan daya tahan terhadap beban setelah proses pengerasan selesai.

Jenis semen yang paling umum digunakan dalam konstruksi adalah semen portland, khususnya semen portland tipe I, karena sifatnya yang serbaguna dan cocok untuk berbagai aplikasi bangunan. Komponen utama dalam semen ini adalah senyawa trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S), yang sangat berperan dalam perkembangan kekuatan awal dan akhir beton.

Menurut Iskandar (2013), "Semen berfungsi sebagai perekat yang mengikat agregat dalam suatu campuran beton, dan kekuatan beton sangat dipengaruhi oleh kualitas semen serta rasio antara semen dengan air *dalam* campuran." Selain kualitas bahan, perbandingan air terhadap semen (water-cement ratio) juga merupakan faktor penentu dalam mencapai kekuatan beton yang diinginkan. Rasio air-semen yang terlalu tinggi akan menyebabkan beton menjadi rapuh dan mudah retak, sementara rasio yang terlalu rendah dapat menghambat reaksi hidrasi dan membuat beton sulit diproses.

Berdasarkan SNI 2049:2015, terdapat beberapa tipe semen portland yang digunakan sesuai kebutuhan teknis dan kondisi lingkungan tertentu. Masing-masing tipe memiliki karakteristik khusus yang perlu disesuaikan dengan jenis konstruksi yang direncanakan.

Tabel I.1 Jenis-Jenis Semen Portland

Tipe Semen	Karakteristik	Kegunaan
Tipe I	Umum, tanpa sifat khusus	Bangunan umum seperti rumah, gedung, jalan, dan jembatan
Tipe II	Tahan sedang terhadap sulfat dan panas hidrasi	Konstruksi di daerah rawa, pelabuhan, atau tanah berkadar sulfat sedang
Tipe III	Kekuatan awal tinggi (cepat keras)	Proyek cepat seperti perbaikan jalan atau pekerjaan malam hari
	Panas hidrasi rendah	Struktur masif seperti bendungan besar untuk mencegah retak termal
	Tahan tinggi terhadap sulfat	Daerah dengan air tanah atau lingkungan tinggi kandungan



Sumber: SNI 2049:2015 tentang Semen Portland.

Komposisi kimia dalam semen portland sangat menentukan sifat fisik dan mekanis dari beton yang dihasilkan. Setiap senyawa memiliki peran tersendiri dalam proses hidrasi dan perkembangan kekuatan beton, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Berikut ini adalah komposisi kimia utama yang umumnya terdapat dalam semen portland berdasarkan literatur teknik material:

b. Agregat Kasar

Agregat kasar adalah salah satu komponen utama dalam campuran beton yang memiliki ukuran butiran lebih dari 5 mm. Material ini umumnya berasal dari batu pecah, kerikil alami, atau material hasil daur ulang. Dalam struktur beton, agregat kasar memegang peranan penting karena mengisi volume terbesar, yaitu sekitar 60–75% dari total volume beton, dan memberikan kontribusi utama terhadap kekuatan mekanis, khususnya kekuatan tekan.

Fungsi utama agregat kasar adalah sebagai rangka atau kerangka struktural yang membantu menahan dan menyalurkan beban tekan. Selain itu, agregat kasar berfungsi untuk mengurangi penyusutan dan perubahan bentuk beton akibat pengaruh suhu maupun kelembaban. Karakteristik agregat kasar seperti ukuran, bentuk, dan tekstur permukaan memiliki pengaruh langsung terhadap kualitas dan performa beton. Agregat dengan gradasi yang baik akan menghasilkan beton yang lebih padat dan sedikit rongga, sehingga lebih kuat dan tahan lama. Bentuk agregat yang bersudut dan bertekstur kasar akan memberikan daya lekat yang lebih baik terhadap pasta semen, dibandingkan dengan agregat bulat yang cenderung lebih licin dan memiliki daya ikat rendah.

Menurut Wijaya (2016), agregat kasar dalam campuran beton berfungsi sebagai bahan pengisi utama yang memberikan ketahanan terhadap beban tekan serta memengaruhi stabilitas beton. Oleh karena itu, sifat fisik agregat seperti kekasaran permukaan, kekuatan batuan asal, dan kebersihan dari bahan pengotor menjadi faktor penting yang menentukan performa beton secara keseluruhan.

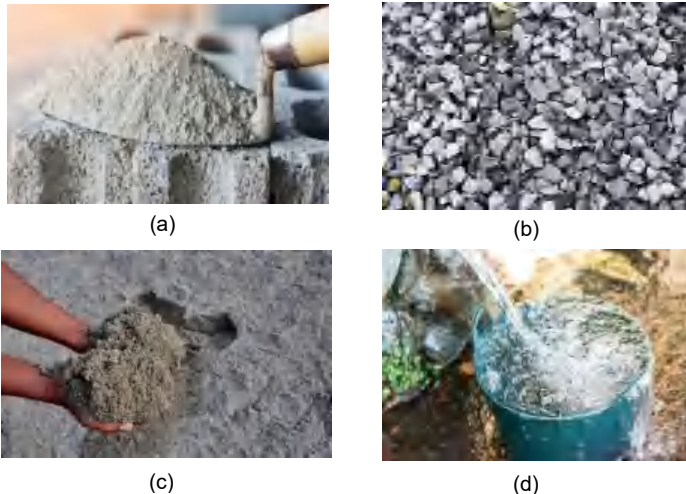
c. Agregat Halus

Agregat halus adalah material berukuran lebih kecil dari 5 mm, yang umumnya berupa pasir alami atau pasir buatan yang dihasilkan dari pemecahan batu. Dalam campuran beton, agregat halus berfungsi mengisi butiran agregat kasar dan membantu mencapai kepadatan alitas agregat halus sangat mempengaruhi workability pengerjaan) dan kepadatan beton. Dalam penelitian Sutrisno at halus didefinisikan sebagai "material dengan ukuran partikel membantu mengisi rongga antara agregat kasar dan memberikan pada beton"



d. Air

Air adalah komponen penting dalam campuran beton yang berperan dalam proses hidrasi semen, yaitu reaksi kimia antara air dan senyawa-senyawa semen yang menyebabkan beton mengeras dan memperoleh kekuatan. Kualitas dan kuantitas air yang digunakan sangat penting; jumlah air yang terlalu banyak atau terlalu sedikit dapat mempengaruhi kekuatan dan workability dari beton. Menurut Purwanto (2015), air dalam campuran beton "berperan dalam proses hidrasi yang menentukan pembentukan struktur beton dan mempengaruhi kuat tekan akhir beton"



Gambar 1.1 Komposisi Utama Beton

Sumber: google.com

2. Proses Pembuatan Beton

a. Pencampuran

Proses pembuatan beton dimulai dengan mencampur semua bahan secara proporsional sesuai dengan desain campuran. Pencampuran dapat dilakukan secara manual atau menggunakan alat pencampur (mixer). Tujuan dari pencampuran adalah untuk memastikan distribusi bahan yang merata dan tercampurnya air dengan semen secara sempurna sehingga hidrasi dapat berlangsung dengan optimal.

b. Pengecoran

Setelah pencampuran selesai, beton segar dituangkan ke dalam cetakan atau bekisting sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Beton harus dituangkan dengan hati-hati untuk menghindari pembentukan rongga (Void). Beton segar harus dipadatkan untuk mengeluarkan udara yang terperangkap dan memastikan bahwa beton mencapai sudut bekisting. Pematatan dapat dilakukan dengan menggunakan vibrator atau alat manual.



c. Pengerasan (Curing)

Proses curing sangat penting untuk menjaga kelembaban beton selama periode awal setelah pengecoran, sehingga proses hidrasi dapat berlangsung secara sempurna. Curing yang tidak memadai dapat menyebabkan retak dan mengurangi kekuatan beton. Metode curing yang umum termasuk menjaga beton tetap basah atau menutupinya dengan bahan penahan air selama beberapa hari.

3. Karakteristik Beton

a. Kuat Tekan

Kuat tekan beton adalah kemampuan material untuk menahan beban tekan tanpa mengalami kerusakan. Parameter ini sangat krusial dalam desain struktural, karena menentukan seberapa banyak beban yang dapat ditanggung oleh elemen beton tanpa mengalami retakan atau runtuh. Kuat tekan biasanya diukur dalam satuan megapascal (MPa) melalui pengujian standar yang dilakukan pada sampel beton yang telah disimpan selama 28 hari. Beberapa faktor yang mempengaruhi kuat tekan antara lain komposisi bahan, proporsi semen, agregat, dan air, serta proses pembuatan dan curing yang diterapkan. Penelitian menunjukkan bahwa proporsi air yang tepat dalam campuran beton dapat meningkatkan kuat tekan secara signifikan.

Misalnya, beton dengan mutu 25 MPa berarti bahwa beton tersebut mampu menahan tekanan sebesar 25 Megapascal sebelum mengalami keretakan atau kerusakan. Angka ini dihasilkan dari uji kuat tekan di laboratorium, di mana sampel beton berbentuk kubus atau silinder ditekan menggunakan mesin khusus hingga beton tersebut hancur. Hasil dari uji ini kemudian memberikan angka kekuatan yang disebut sebagai mutu beton.

Tabel I.2 Umur Beton dan Persentase Kekuatan Beton

Umur Beton	Perkiraan Kekuatan (%)	Keterangan
1 hari	16–20%	Awal pengikatan dan hidrasi semen
3 hari	30–40%	Cepat naik di fase awal
7 hari	60–70%	Umum digunakan untuk pengujian awal
14 hari	80–90%	Sebagian besar kekuatan tercapai
28 hari	100%	Acuan standar kuat tekan beton
56 hari	105–110%	Beton terus menguat perlahan
90 hari	110–120%	Umumnya digunakan



		untuk struktur berat
>180 hari	120–130%	Tergantung tipe semen dan curing

Sumber: SNI 03-2834-2000 tentang Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal.

Uji tekan beton adalah salah satu metode pengujian kekuatan beton dengan tujuan untuk mengetahui kuat tekan beton (f'_c) setelah mencapai umur tertentu. Pengujian dilakukan dengan menghancurkan benda uji berbentuk silinder di laboratorium menggunakan mesin uji tekan. Standar yang digunakan untuk uji tekan beton di Indonesia adalah SNI 1974:2011 tentang "Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder".

Mesin uji tekan digunakan untuk memberikan beban secara bertahap pada benda uji hingga hancur. Beban maksimum yang diterima benda uji disebut sebagai beban pecah (P). Rumus yang digunakan untuk menghitung kuat tekan beton adalah sebagai berikut:

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

Dimana:

f'_c = kuat tekan beton (MPa atau kg/cm^2)

P = beban maksimum yang diterima benda uji (N atau kg)

A = luas penampang benda uji (m^2 atau cm^2)

Untuk benda uji silinder, luas penampang A adalah:

$$A = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

Dimana d adalah diameter benda uji.

b. Durabilitas

Durabilitas beton mengacu pada kemampuannya untuk bertahan dalam berbagai kondisi lingkungan yang agresif tanpa mengalami kerusakan atau degradasi. Beton yang memiliki durabilitas tinggi dapat menahan penetrasi air, serangan bahan kimia, dan perubahan suhu yang ekstrem. Kualitas durabilitas sangat dipengaruhi oleh komposisi campuran beton, termasuk jenis semen, agregat, dan bahan tambahan seperti fly ash atau slag. Beton yang baik harus memiliki permeabilitas rendah untuk menghindari kerusakan akibat air dan bahan kimia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan



ahan dapat meningkatkan durabilitas beton dan mengurangi
akibat faktor lingkungan

Desain

lesain beton adalah salah satu keunggulan yang membuatnya
er dalam konstruksi. Beton dapat dibentuk menjadi berbagai
entuk, memberikan kebebasan bagi arsitek dan insinyur dalam
struktur yang inovatif dan estetis. Proses pencetakan beton

memungkinkan untuk menciptakan elemen struktural yang kompleks, termasuk lengkungan dan bentuk bebas lainnya, yang sulit dicapai dengan material lain. Selain itu, beton dapat dikombinasikan dengan bahan lain, seperti kayu atau kaca, untuk menghasilkan elemen arsitektur yang menarik. Penelitian menunjukkan bahwa kombinasi material ini tidak hanya meningkatkan aspek estetika tetapi juga kinerja struktural secara keseluruhan

d. Daya Tahan Api

Daya tahan api beton merupakan salah satu karakteristik penting yang menjadikannya pilihan utama dalam konstruksi bangunan. Beton memiliki titik leleh yang sangat tinggi dan tidak mudah terbakar, sehingga memberikan perlindungan yang baik terhadap api. Selain itu, sifat non-kombustibel beton mengurangi risiko penyebaran api dan asap berbahaya, yang dapat membahayakan keselamatan penghuni. Dalam pengujian daya tahan api, beton menunjukkan kemampuan untuk mempertahankan integritas struktural pada suhu tinggi, menjadikannya material yang aman untuk digunakan dalam desain bangunan komersial dan residensial. Penelitian menunjukkan bahwa ketebalan dan komposisi beton sangat mempengaruhi daya tahan api, dan penggunaan campuran khusus dapat meningkatkan kinerjanya dalam kondisi ekstrem.

4. Mutu Beton

Mutu beton adalah ukuran kemampuan beton dalam menahan beban atau tekanan, yang dinyatakan dalam satuan megapascal (MPa) atau kilogram per sentimeter persegi (kg/cm^2). Penentuan mutu beton dilakukan melalui pengujian kuat tekan pada benda uji silinder atau kubus setelah beton menjalani proses pematangan (curing) selama 28 hari, yang dianggap sebagai standar untuk mencapai kekuatan optimalnya. Proses curing sendiri sangat penting karena menjaga kelembapan beton agar reaksi hidrasi antara semen dan air dapat berlangsung secara maksimal, sehingga beton bisa mengeras dengan baik dan mencapai mutu yang dirancang sejak awal.

a. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Mutu Beton

Mutu beton sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, mulai dari bahan yang digunakan hingga proses pembuatannya. Berikut adalah faktor-faktor utama yang menentukan mutu beton:

- Komposisi Bahan

Beton terdiri dari campuran semen, air, agregat halus (pasir), dan agregat kasar (*kerabil* atau batu pecah). Perbandingan antara bahan-bahan ini harus memastikan beton memiliki kekuatan yang diinginkan. Semakin baik bahan dan komposisi campurannya, semakin baik pula mutu yang dihasilkan.

Agregat halus dan kasar harus bersih, bebas dari lumpur, tanah, atau bahan lain yang dapat mempengaruhi kekuatan beton. Ukuran dan



distribusi agregat juga mempengaruhi mutu, di mana agregat yang baik membantu membentuk struktur beton yang padat dan kuat.

- Kualitas Semen

Semen sebagai bahan pengikat harus berkualitas tinggi dan sesuai standar, seperti semen Portland yang sering digunakan. Jenis semen juga harus sesuai dengan kebutuhan konstruksi, misalnya semen dengan ketahanan terhadap sulfat jika beton digunakan di lingkungan yang korosif.

- Air yang Digunakan

Air yang digunakan dalam campuran beton harus bersih, bebas dari bahan kimia yang bisa merusak proses kimia hidrasi semen. Air yang kotor atau mengandung garam dapat mengurangi kekuatan dan daya tahan beton.

- Proses Pencampuran

Proses pencampuran bahan harus dilakukan secara merata. Pencampuran yang tidak merata dapat menyebabkan beton memiliki kekuatan yang tidak seragam di seluruh bagiannya, yang berisiko pada retakan atau kerusakan struktural.

- Proses Curing (Pematangan)

Setelah dicetak, beton harus dijaga dalam kondisi lembap selama beberapa hari untuk memastikan reaksi hidrasi berlangsung sempurna. Curing yang kurang baik dapat mengakibatkan beton kering terlalu cepat sehingga kekuatan maksimalnya tidak tercapai.

b. Mutu Beton dalam Konstruksi

Mutu beton sangat mempengaruhi kekuatan dan stabilitas bangunan atau infrastruktur. Jika mutu beton yang digunakan terlalu rendah untuk beban atau kondisi lingkungan yang ada, risiko kegagalan struktur bisa meningkat. Bangunan mungkin mengalami keretakan, deformasi, atau bahkan runtuh jika mutu beton tidak sesuai dengan spesifikasi desain.

Sebaliknya, menggunakan mutu beton yang terlalu tinggi untuk proyek yang sederhana juga bisa meningkatkan biaya konstruksi tanpa memberikan manfaat yang signifikan. Oleh karena itu, pemilihan mutu beton harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dari setiap proyek konstruksi.

Dalam dunia konstruksi, pemilihan mutu beton merupakan aspek krusial yang menentukan kekuatan, durabilitas, dan fungsi dari elemen struktural yang dibangun. Mutu beton umumnya diklasifikasikan berdasarkan nilai kuat tekan karakteristiknya pada umur 28 hari, yang dinyatakan dalam satuan MPa (Meganewton per meter persegi). Di Indonesia, klasifikasi mutu beton mengacu pada standar yang satuannya adalah SNI 2847 dan SNI 7394.



Setiap mutu beton memiliki kegunaan dan karakteristik tersendiri, dan ada jenis struktur yang direncanakan. Berikut ini disajikan tabel mutu beton beserta aplikasi umum dan keterangan teknisnya yang akan membantu dalam menentukan mutu beton yang sesuai dengan struktur.

Tabel 1.3 Klasifikasi Mutu Beton berdasarkan Kuat Tekan Karakteristiknya

Mutu Beton (K)	Kuat Tekan Karakteristik (Mpa)	Jenis Beton	Aplikasi Umum
K-100	10	Beton Non-Struktural	Pondasi batu kali, lantai kerja, jalan lingkungan
K-175	17.5	Beton Non-Struktural	Lantai kerja, trotoar, pelat substruktur
K-225	22.5	Beton Struktural Riangan	Sloof rumah 1 lantai, kolom ringan, dak tipis
K-250	25	Beton Struktural	Balok dan kolom bangunan 1–2 lantai, jalan lokal
K300	30	Beton Struktural	Kolom, balok utama bangunan bertingkat, lantai parkir
K-350	35	Beton Struktural Khusus	Gedung 3 lantai ke atas, pelat jembatan ringan
K-400	40	Beton Struktural Khusus	Flyover, underpass, jembatan, struktur tahan gempa
K-500	50	Beton Kekuatan Tinggi	Gedung pencakar langit, struktur infrastruktur berat

Sumber: SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung

1.2.2 Plastik

Secara umum, plastik adalah material polimer sintesis atau semi-sintesis yang dapat dibentuk dalam berbagai bentuk dan ukuran melalui proses pemanasan dan pencetakan. Plastik terbentuk dari rantai panjang molekul polimer, yang sebagian besar berasal dari senyawa karbon dan hidrogen hasil olahan bahan baku fosil seperti minyak bumi dan gas alam. Plastik merupakan material sintesis berbasis polimer yang tersusun dari rantai panjang molekul karbon dan hidrogen. Material ini pertama kali dikembangkan secara massal pada awal abad ke-20 dan sejak saat itu



menjadi bagian integral dari berbagai aspek kehidupan manusia. Plastik memiliki sejumlah sifat likannya sangat fungsional dalam berbagai aplikasi, seperti tahan terhadap banyak bahan kimia, mudah dibentuk, serta biaya produksinya rendah. Berkat sifat-sifat ini, plastik telah menjadi bahan pokok dalam berbagai industri, mulai dari kemasan makanan dan minuman, hingga konstruksi bangunan.

Sebagian besar plastik yang digunakan secara komersial diproduksi dari sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui, seperti minyak bumi dan gas alam. Proses sintesis plastik dari bahan baku fosil ini menciptakan berbagai jenis plastik dengan karakteristik fisik dan kimia yang berbeda, seperti Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), Polyvinyl Chloride (PVC), dan Polystyrene (PS). Di sisi lain, muncul pula inovasi plastik berbasis bahan nabati yang biodegradable, namun masih terbatas penggunaannya karena keterbatasan skala produksi dan biaya yang relatif tinggi.

1. Jenis-Jenis Plastik

Plastik merupakan material polimer sintesis yang terbentuk dari proses polimerisasi monomer organik, dengan karakteristik utama ringan, tahan korosi, mudah dibentuk, serta memiliki variasi sifat mekanik dan termal yang luas. Berkat fleksibilitas tersebut, plastik banyak digunakan dalam berbagai sektor industri, mulai dari kemasan, otomotif, konstruksi, hingga elektronik. Secara umum, plastik dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori besar, yaitu termoplastik dan termoset, yang masing-masing memiliki jenis-jenis spesifik dengan karakteristik dan aplikasi berbeda. Berikut ini adalah beberapa jenis plastik yang paling umum ditemukan beserta sifat dan kegunaannya.

a. Polyethylene Terephthalate (PET atau PETE)

PET adalah jenis plastik yang paling umum digunakan untuk kemasan minuman seperti botol air mineral dan botol minuman bersoda. Plastik ini bening, ringan, kuat, dan tahan terhadap serangan mikroorganisme. PET juga memiliki stabilitas kimia yang baik dan cukup mudah untuk didaur ulang. Meskipun demikian, PET memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi yang rendah, sehingga tidak disarankan untuk dipanaskan berulang kali.

b. *High-Density Polyethylene* (HDPE)

HDPE adalah plastik berdensitas tinggi yang kuat, keras, dan tahan terhadap benturan maupun tekanan mekanis. Sifat kekakuannya jauh lebih tinggi dibandingkan LDPE (plastik berdensitas rendah). HDPE tahan terhadap bahan kimia, tidak mudah menyerap air, dan tahan terhadap sinar UV, menjadikannya ideal untuk produk-produk seperti galon air, botol detergen, pipa plastik, dan kontainer industri. Karakteristik teknisnya mencakup kekuatan tekan (compressive strength) yang baik dan struktur molekul yang rapat, membuatnya unggul dalam menahan beban dan tekanan luar—sehingga sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan daya tahan struktural tinggi.

c. Polyvinyl Chloride (PVC atau V)



kan salah satu jenis plastik yang paling tahan terhadap bahan unakan secara luas dalam sistem perpipaan, pelapis kabel, atap ya bahan bangunan. Tersedia dalam dua bentuk: rigid (keras) lentur). Meskipun tahan lama, PVC memiliki kandungan klorin sehingga menimbulkan potensi racun jika dibakar sembarangan.

d. Low-Density Polyethylene (LDPE)

LDPE memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan HDPE, membuatnya lebih lentur dan fleksibel. Umumnya digunakan untuk kantong belanja plastik, bungkus makanan, dan botol yang bisa diremas. LDPE memiliki ketahanan terhadap air dan bahan kimia, namun kekuatan mekaniknya rendah, terutama jika dibandingkan dengan HDPE.

e. Polypropylene (PP)

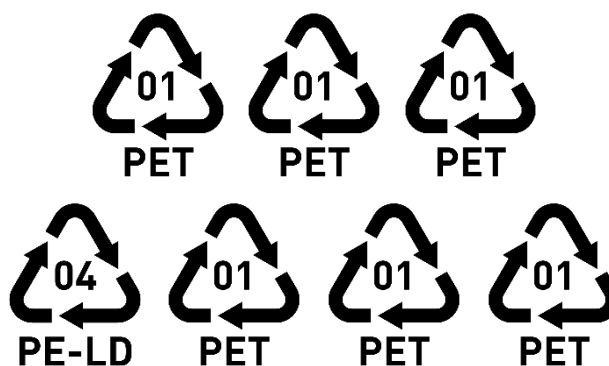
PP adalah jenis plastik yang ringan dan tahan panas, sehingga banyak digunakan untuk wadah makanan, tutup botol, alat-alat laboratorium, dan komponen otomotif. Keunggulan utama PP adalah ketahanannya terhadap suhu tinggi, kelembaban, dan bahan kimia. Plastik ini juga memiliki sifat elastis yang cukup baik meskipun lebih kaku dibanding LDPE.

f. Polystyrene (PS)

PS adalah plastik ringan dan mudah dibentuk, banyak digunakan pada wadah makanan sekali pakai, styrofoam, dan perlengkapan elektronik. Namun, PS mudah rapuh, kurang tahan panas, dan bersifat inflamabel (mudah terbakar). Beberapa jenis PS juga mengandung zat stirena yang bersifat toksik jika terpapar panas tinggi atau digunakan berulang.

g. Other atau Lainnya (O)

Kategori ini mencakup plastik yang tidak masuk dalam enam kelompok sebelumnya, seperti polycarbonate (PC), acrylic, nylon, dan bioplastik. Karena sifatnya yang sangat beragam, kelompok ini memiliki karakteristik fisik dan kimia yang berbeda-beda. Beberapa di antaranya sulit untuk didaur ulang dan dapat mengandung bahan kimia berisiko tinggi, seperti BPA (Bisphenol A).



Gambar 1.2 Kode Daur Ulang Jenis-Jenis Plastik

Sumber: wikipedia 'kode-kode daur ulang'



nis plastik memiliki peran penting dalam berbagai aspek dari kemasan makanan hingga infrastruktur, namun penggunaannya memerlukan perhatian khusus, terutama dalam hal daur ulang yang mengurangi dampak lingkungan. Setiap jenis plastik memiliki sifat yang memengaruhi kegunaannya di berbagai sektor industri, serta

perilakunya dalam proses daur ulang maupun saat menjadi limbah. Tabel berikut menyajikan karakteristik fisik dan kimia dari beberapa jenis plastik yang paling umum digunakan:

Tabel I.4 Karakteristik Fisik dan Kimia Berbagai Jenis Plastik

Jenis Plastik	Karakteristik Fisik	Karakteristik Kimia
Polyethylene Terephthalate (PET)	Transparan, ringan, kuat, tahan air	Stabil terhadap oksigen, mudah terurai oleh basa kuat, rentan degradasi termal
High-Density Polyethylene (HDPE)	Buram, keras, tahan benturan, tidak mudah retak	Tahan terhadap pelarut kimia, tidak larut dalam air, stabil terhadap oksidasi ringan
Polyvinyl Chloride (PVC)	Kaku atau fleksibel, tahan aus, isolator listrik	Tahan terhadap asam dan basa, mengandung klorin → dapat menghasilkan gas beracun saat dibakar
Low-Density Polyethylene (LDPE)	Lentur, ringan, permukaan licin, mudah disobek	Tahan terhadap kelembaban dan banyak bahan kimia, tidak tahan panas tinggi
Polypropylene (PP)	Kaku tapi fleksibel, ringan, tahan patah	Tahan terhadap pelarut kimia, asam dan basa kuat, tidak menyerap kelembaban
Polystyrene (PS)	Ringan, getas, mudah pecah, transparan atau berbusa	Rentan terhadap pelarut organik, mudah terbakar, dapat melepaskan stirena
Other (PC, Nylon, Acrylic, dll.)	Bervariasi (ada yang keras, elastis, transparan)	Sifat kimia tergantung bahan; contoh: PC tahan panas tapi bisa mengandung BPA

Sumber: Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009).

2. Masalah limbah plastik

Meskipun plastik memberikan banyak keuntungan dalam hal fungsionalitas dan efisiensi, masalah besar muncul dari sifat dasarnya yang sulit terurai secara alami. Plastik dapat bertahan di lingkungan selama puluhan hingga ratusan tahun, tergantung jenis dan kondisi lingkungannya. Hal ini menyebabkan plastik menjadi salah satu penyumbang terbesar terhadap pencemaran lingkungan, dan tempat pembuangan akhir. Menurut Andrady & Neal (2009), 1 plastik telah menjadi persoalan global karena rendahnya biaya dan tingginya volume konsumsi plastik sekali pakai. Limbah plastik mencemari tanah dan air, tetapi juga mengancam ekosistem dan kesehatan manusia.



Hopewell et al. (2009) menekankan bahwa tantangan utama dalam pengelolaan plastik bukan hanya pada tingginya konsumsi, tetapi juga pada minimnya upaya daur ulang dan ketahanan plastik terhadap degradasi lingkungan. Dalam jangka panjang, ketergantungan terhadap plastik konvensional tanpa solusi pengelolaan yang berkelanjutan akan memperburuk krisis lingkungan dan mempercepat eksploitasi sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui.

Tabel 1.5 Negara Penghasil Limbah Plastik Terbesar

Negara	Limbah plastik per tahun (juta ton)	Didaur ulang	Dibakar (dengan pemulihan energi)	Dibuang ke TPA
Tiongkok	59,08	-	-	-
Amerika Serikat	37,83	8%	14%	78%
Jerman	14,48	33%	65%	2%
Jepang	7,99	27%	49%	24%
Nigeria	5,96	12%	0%	88%
Rusia	5,84	6%	0%	94%
Turki	5,60	5%	0%	95%
Indonesia	5,05	19%	0%	81%
Inggris	4,93	23%	8%	69%
Spanyol	4,71	23%	17%	60%
Prancis	4,56	18%	40%	42%
India	4,49	42%	18%	40%
Total	245,00	16%	22%	62%

Sumber: wikipedia 'produksi limbah plastik'

Produksi plastik global kini mencapai lebih dari 430 juta ton per tahun, dengan 65–85% digunakan untuk produk sekali pakai. Namun, sifat tahan lama ini juga menyebabkan plastik menjadi pencemar lingkungan yang serius, karena membutuhkan waktu ratusan hingga ribuan tahun untuk terurai. Salah satu dampak terparahnya adalah pencemaran laut. Sekitar 11 juta ton plastik masuk ke laut tiap tahun, dan jumlah itu diprediksi meningkat tajam jika tidak ada langkah serius. Mikroplastik kini ditemukan dalam tubuh manusia dan menimbulkan risiko kesehatan jangka panjang. Sayangnya, tingkat daur ulang masih sangat rendah, hanya sekitar 9%, sementara sisanya, atau mencemari lingkungan.



Tabel I.6 Komposisi Limbah Plastik Global

Jenis Plastik	Tonnase (Mt)	% dari Total Limbah Plastik
HDPE (<i>High-Density Polyethylene</i>)	64	19.8%
LDPE (<i>Low-Density Polyethylene</i>)	45	13.9%
PP (<i>Polypropylene</i>)	62	19.1%
PS (<i>Polystyrene</i>)	19	5.9%
PVC (<i>Polyvinyl Chloride</i>)	17	5.3%
PET (<i>Polyethylene Terephthalate</i>)	35	10.8%
PUR (<i>Polyurethane</i>)	18	5.6%
PP (<i>Polypropylene</i>)	51	15.7%
Lain-lain (ABS, dll.)	12	3.7%

Sumber: Wikipedia 'plastic pollution', 2018

Di Indonesia, yang merupakan negara dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia, tantangan limbah plastik sangat besar. Dari sekitar 7,8 juta ton limbah plastik per tahun, 4,9 juta ton tidak terkelola dengan baik. Indonesia bahkan menjadi penyumbang sampah plastik laut terbesar kedua setelah Tiongkok. Sungai-sungai besar menjadi jalur utama masuknya plastik ke laut akibat minimnya infrastruktur pengelolaan sampah, rendahnya kesadaran masyarakat, dan lemahnya penegakan regulasi lingkungan.

Tabel I.7 Komposisi Limbah Plastik di Indonesia

Jenis Plastik	Persentase (%)	Contoh Produk di Indonesia (Keterangan)
HDPE	±28%	Kantong plastik model kresek tebal (putih susu/hitam), botol susu, galon, jerigen
LDPE	±18%	Kantong belanja bening tipis, plastik wrapping, plastik snack
PP	±16%	Wadah makanan, sedotan, karung beras, tutup botol
PS	±16%	Styrofoam, cup mie instan, tray makanan cepat saji
PVC	±7%	Pipa, selang air, pelapis kabel, plafon rumah
	±5%	Botol air mineral, botol teh kemasan, serat tekstil (polyester)
	±10%	Campuran plastik elektronik, mainan, dan casing



tulistiyoso, E. et al. (2014).

1.2.3 High-Density Polyethylene

High-Density Polyethylene (HDPE) adalah salah satu jenis plastik termoplastik yang paling umum digunakan di seluruh dunia. HDPE termasuk dalam kelompok poliolefin, yaitu jenis polimer yang tersusun dari monomer etilena (C_2H_4) melalui proses polimerisasi adisi. Dibandingkan dengan jenis polyethylene lain seperti LDPE (Low-Density Polyethylene), HDPE memiliki tingkat kristalinitas dan kerapatan molekul yang lebih tinggi, yang secara langsung memengaruhi kekuatan, kekakuan, dan ketahanan material terhadap pengaruh eksternal.

Secara visual, HDPE biasanya tampak berwarna putih susu dalam bentuk padat, namun dapat menjadi semi-transparan bila diproses dalam lapisan tipis. Plastik ini dikenal karena kombinasi unik antara ringan, kuat, tahan lama, dan tahan terhadap bahan kimia maupun kelembapan. Dalam industri, HDPE digunakan dalam berbagai aplikasi mulai dari botol minuman, pipa air, wadah bahan kimia, hingga sebagai bahan pelapis geomembran dan konstruksi.



Gambar 1.3 Kantong Plastik HDPE

Sumber: pinterest.com 'kantong plastik HDPE'

Salah satu alasan utama HDPE dianggap sebagai material yang potensial untuk dikembangkan lebih lanjut, khususnya dari limbah plastik adalah karena stabilitas sifat fisik, kimia, dan mekaniknya yang konsisten walaupun telah mengalami daur ulang. Karakter ini menjadikannya kandidat ideal untuk pemanfaatan kembali dalam aplikasi konstruksi, seperti bahan substitusi agregat dalam campuran beton. Untuk memahami secara lebih teknis keunggulan material ini, berikut adalah klasifikasi sifat HDPE berdasarkan tiga aspek utama: fisik, kimia, dan mekanik.

1. Sifat-sifat Fisik dan Kimia HDPE

a. Sifat Fisik

- Kepadatan tinggi dan kekuatan tarik besar

HDPE memiliki kepadatan sekitar $0.941\text{--}0.965\text{ g/cm}^3$, menjadikannya kuat dan tahan lama dibandingkan jenis polyethylene lainnya.

HDPE tahan terhadap suhu tinggi dan rendah

HDPE dapat menahan suhu mulai dari $-100\text{ }^\circ\text{C}$ hingga $120\text{ }^\circ\text{C}$ tanpa mengalami perubahan sifat yang berarti, membuatnya cocok untuk aplikasi luar ruangan.

HDPE tahan terhadap kelembaban dan benturan

HDPE padat HDPE membuatnya hampir tidak tembus air dan tahan



terhadap retak akibat tekanan lingkungan.

- Permukaan yang keras namun lentur
HDPE tidak mudah pecah dan memiliki fleksibilitas yang cukup untuk dibentuk menjadi berbagai produk industri.

b. Sifat Kimia

- Inert secara kimia
HDPE tahan terhadap sebagian besar pelarut kimia, termasuk asam dan basa kuat, membuatnya ideal untuk wadah bahan kimia berbahaya.
- Tahan terhadap degradasi oksidatif ringan
Meski tahan lama, HDPE dapat terdegradasi perlahan oleh paparan sinar UV dalam jangka waktu panjang, kecuali jika ditambahkan stabilisator UV.
- Mudah didaur ulang
HDPE memiliki kode daur ulang nomor 2 dan sangat umum dalam program daur ulang karena dapat diolah kembali menjadi produk baru seperti pipa, botol, dan bahan bangunan.

2. Penggunaan Umum HDPE dalam Kehidupan Sehari-hari

HDPE adalah plastik serbaguna yang digunakan dalam berbagai aspek kehidupan sehari-hari karena sifatnya yang ringan, kuat, dan tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan.

- Kemasan makanan dan minuman, HDPE digunakan untuk botol susu, galon air, dan kemasan produk rumah tangga karena tidak bereaksi dengan makanan serta aman untuk penggunaan jangka panjang.
- Pipa dan saluran air, HDPE sering digunakan dalam pembuatan pipa bawah tanah untuk sistem distribusi air karena ketahanannya terhadap korosi, tekanan, dan suhu ekstrem.
- Peralatan rumah tangga, Tempat sampah, ember, mainan anak, serta kontainer penyimpanan banyak yang dibuat dari HDPE karena ringan, tahan lama, dan mudah dibentuk.
- Industri otomotif dan konstruksi, Digunakan dalam bagian interior kendaraan, lapisan pelindung kabel, dan panel bangunan karena sifatnya yang kuat dan isolatif.
- Tekstil dan pertanian, HDPE juga diubah menjadi serat sintetis untuk jaring, terpal, dan plastik pertanian tahan cuaca.

3. Dampak Lingkungan dari Sampah HDPE



memiliki banyak manfaat industri dan rumah tangga, dampak tap menjadi perhatian serius. HDPE adalah jenis plastik yang terhadap degradasi alami, yang berarti membutuhkan waktu untuk terurai sepenuhnya di lingkungan. Ketika dibuang HDPE dapat menyebabkan penyumbatan saluran air, h, serta membahayakan hewan jika tertelan atau terperangkap.

Mikroplastik yang dihasilkan dari degradasi HDPE oleh panas, gesekan, atau sinar UV dapat mencemari ekosistem perairan. Partikel ini dapat masuk ke rantai makanan manusia melalui ikan dan hewan laut lainnya, memicu kekhawatiran akan kesehatan jangka panjang. Karena sifatnya yang ringan, HDPE mudah terbawa angin dan menyebar ke berbagai lingkungan alami. Oleh karena itu, pengelolaan limbah plastik HDPE yang efektif sangat penting untuk mengurangi dampak jangka panjang terhadap planet ini.

1.2.4 Water Quenching

Quenching adalah suatu proses termal yang digunakan untuk mendinginkan material secara cepat setelah sebelumnya dipanaskan hingga mencapai suhu tinggi, umumnya pada kisaran suhu transformasi struktural. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk mengubah struktur internal material secara permanen guna memperoleh sifat-sifat mekanik yang lebih unggul, seperti peningkatan kekerasan, kekuatan tarik, serta ketahanan terhadap keausan. Transformasi ini terjadi karena pendinginan cepat menghentikan pergeseran atom-atom dalam struktur kristal, sehingga memungkinkan terbentuknya fase metastabil seperti martensit yang “terkunci” dalam material (Totten & Howes, 1997).

Water quenching adalah proses pendinginan cepat pada material yang telah dipanaskan, menggunakan media air. Dalam prosesnya, material dipanaskan hingga titik leleh atau suhu tertentu, kemudian dicelupkan langsung ke dalam air dingin. Pendinginan drastis ini menyebabkan ikatan internal material membeku dengan cepat, sehingga struktur yang terbentuk menjadi lebih rapat dan padat.

1. Tahapan *Water Quenching*

Untuk mencapai hasil pendinginan yang optimal, proses *water quenching* dilakukan melalui beberapa tahapan berurutan. Setiap tahap memiliki peran penting dalam menentukan perubahan struktur dan sifat akhir material yang didinginkan. Tahapan-tahapan tersebut dijelaskan sebagai berikut.

a. Pemanasan

Material pertama-tama dipanaskan hingga mencapai suhu tertentu yang sesuai dengan karakteristiknya.

- Pada logam, biasanya dipanaskan hingga mencapai *fase austenit* (sekitar 800–950°C tergantung jenis logam), di mana struktur kristalnya menjadi homogen.
- Pada plastik termoplastik, pemanasan dilakukan hingga mencapai titik leleh, yaitu sekitar 130–137°C. Pada suhu ini, plastik berubah dari menjadi lelehan kental yang siap dibentuk.

Cepat

capai suhu target, material segera dicelupkan ke dalam air untuk mendadak. Ini menciptakan perubahan suhu ekstrem yang transformasi struktur material. Pendinginan ini terbagi dalam tiga bagian sebagai berikut.



- **Film Boiling**
Ketika material panas pertama kali masuk air, suhu permukaannya sangat tinggi sehingga air langsung berubah menjadi lapisan uap. Lapisan ini bersifat isolator, menyebabkan perpindahan panas masih relatif lambat. Tahap ini disebut *Leidenfrost Effect*.
- **Nucleate Boiling**
Saat suhu material turun, lapisan uap mulai menghilang dan air mulai kontak langsung dengan permukaan material. Di tahap ini, terjadi perpindahan panas paling cepat dan efisien, ditandai dengan terbentuknya gelembung air mendidih di permukaan. Tahap ini sangat penting karena menentukan kekuatan dan kepadatan akhir material.
- **Convective Cooling**
Ketika suhu material mendekati suhu air, mendidih berhenti, dan pendinginan dilanjutkan oleh konveksi alami dari air dingin ke material. Laju pendinginan mulai melambat, tetapi masih cukup signifikan untuk membekukan struktur material secara stabil.

c. **Stabilisasi**

Setelah keluar dari air, material telah mengalami transformasi struktur akibat perubahan suhu drastis.

- Pada logam: terbentuk struktur martensit (pada baja), meningkatkan kekerasan.
- Pada plastik (seperti HDPE), material membeku dalam bentuk padat dengan struktur yang lebih rapat dan homogen.

2. Tujuan *Water Quenching*

Dalam proses perlakuan panas, *water quenching* dipilih sebagai metode pendinginan yang bertujuan untuk menghasilkan perubahan sifat material secara spesifik. Proses ini bukan sekadar prosedur teknis, melainkan bagian penting dari pengendalian kualitas material agar memenuhi standar performa tertentu. Tujuan dari *water quenching* mencakup berbagai aspek, mulai dari peningkatan sifat mekanik hingga stabilitas struktural material setelah pemanasan. Dengan memahami tujuan-tujuan ini, proses quenching tidak hanya dipandang sebagai tahapan akhir, tetapi juga sebagai strategi penting dalam rekayasa material. Adapun tujuan utama dari proses *water quenching* adalah sebagai berikut:

a. Meningkatkan Kekerasan Material

Quenching secara drastis mengubah struktur mikro di dalam material, dengan membentuk fasa martensit atau struktur metastabil lain yang lebih keras dibandingkan bentuk aslinya. Dengan pendinginan yang cepat, atom-atom di dalam material tidak sempat tersusun dalam bentuk yang lebih lunak, sehingga tercipta struktur yang kaku dan kuat. Hal ini membuat material menjadi sangat keras dan mampu menahan gaya gesek atau penetrasi yang tinggi, yang sangat dibutuhkan untuk komponen-komponen seperti pisau, roda gigi, atau bantalan.



b. Mengatur Kekuatan dan Ketangguhan secara Seimbang

Tidak semua aplikasi memerlukan material yang sekadar keras, dalam beberapa kasus dibutuhkan juga ketangguhan atau kemampuan untuk menyerap energi tanpa patah. Dengan memilih metode quenching yang tepat, seperti quenching bertahap atau menggunakan media pendingin yang lebih lambat seperti minyak atau udara, insinyur dapat menciptakan struktur internal yang kuat namun tetap cukup ulet. Ini penting untuk komponen yang mengalami beban dinamis, tekanan berulang, atau benturan mendadak, seperti poros engkol atau komponen suspensi kendaraan.

c. Meminimalkan Deformasi

Quenching membantu menjaga kestabilan bentuk material ketika digunakan dalam kondisi ekstrem. Pendinginan cepat membuat struktur mikro menjadi lebih tahan terhadap perubahan bentuk akibat panas, tekanan, atau beban kerja yang berlangsung lama. Material yang tidak distabilkan dengan baik berpotensi mengalami creep (deformasi akibat beban terus-menerus) atau distorsi termal, yang sangat merugikan dalam sistem mekanik presisi. Dengan struktur yang sudah dikunci melalui quenching, dimensi material bisa tetap stabil dalam jangka waktu panjang.

d. Meningkatkan Ketahanan terhadap Gesekan dan Aus

Material yang telah melalui proses quenching umumnya memiliki permukaan dengan ketahanan aus yang jauh lebih tinggi. Kekerasan yang tercapai membuatnya mampu bertahan dari keausan akibat gesekan terus-menerus dengan benda lain. Hal ini sangat berguna dalam komponen-komponen yang mengalami kontak langsung, seperti permukaan rel, roda gigi, mata bor, atau cetakan industri. Proses ini pada akhirnya memperpanjang umur pakai material dan mengurangi kebutuhan perawatan atau penggantian.

1.2.5 Metode Perawatan Beton

Metode perawatan beton, atau sering disebut curing, adalah suatu proses perlakuan yang diberikan kepada beton segar setelah proses pengecoran selesai, dengan tujuan untuk menjaga kondisi kelembaban dan suhu beton agar proses hidrasi semen berlangsung secara maksimal. Proses ini merupakan tahap yang sangat penting dalam rangkaian pengerjaan beton, karena secara langsung mempengaruhi kekuatan, durabilitas (ketahanan), dan keawetan jangka panjang dari struktur beton yang dihasilkan.

Menurut Tjokrodimuljo (2007), beton yang tidak dirawat dengan baik atau mengalami pengeringan dini akan mengalami gangguan dalam proses hidrasi.



Reaksi kimia antara semen dan air yang menghasilkan senyawa seperti C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) yang menjadi tulang beton. Apabila kelembaban beton tidak terjaga dalam periode dibutuhkan untuk hidrasi akan menguap sebelum reaksi selesai, menjadi tidak sempurna, yang pada akhirnya menurunkan kuat sar porositas beton.

Dalam bukunya, Tjokrodimuljo menjelaskan bahwa tahap perawatan beton harus dimulai segera setelah beton selesai dicetak dan permukaannya mulai mengeras (set awal). Lama waktu perawatan sangat tergantung pada jenis semen yang digunakan, kondisi cuaca (khususnya suhu dan kelembaban udara), dan jenis struktur beton. Umumnya, perawatan dilakukan minimal selama 7 hari untuk campuran dengan semen Portland biasa (OPC), dan bisa lebih lama bila menggunakan semen dengan laju hidrasi lambat, seperti semen pozolan.

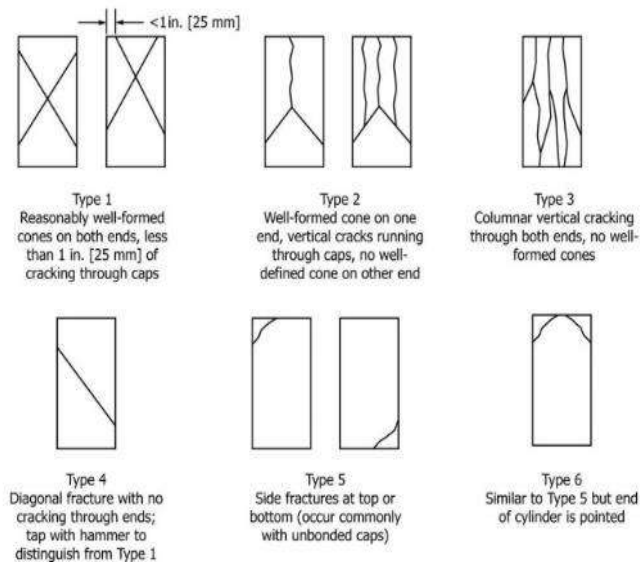
Curing tidak hanya penting untuk mencegah penguapan air dari permukaan beton, tetapi juga untuk menghindari fluktuasi suhu yang ekstrem. Beton yang mengalami perubahan suhu mendadak di awal umur bisa mengalami tegangan termal internal, yang menyebabkan retak-retak halus (cracks) dan menurunkannya keutuhan struktural.

1.2.6 Pola Retak Beton

Berdasarkan standar ASTM C39/C39M, pengujian kuat tekan beton tidak hanya bertujuan untuk memperoleh nilai kekuatan tekan maksimum, tetapi juga untuk mengamati pola retak (failure pattern) yang terjadi pada benda uji silinder. Pola retak tersebut memberikan informasi penting mengenai kualitas spesimen, kesesuaian prosedur pengujian, serta karakteristik perilaku beton terhadap beban tekan.

1. Pola retak kerucut (*cone*).
2. Pola retak kerucut dan belah (*cone and split*).
3. Pola retak memanjang (*columnar*).
4. Pola retak geser (*diagonal*).
5. Pola retak sisi atas dan bawah (*side fractures at top or bottom*).
6. Pola retak sama tipe 5 tetapi dengan retak sisi atas pada titik tengah (*similiar to type 5 but end of cylinder is pointed*).





Gambar I.4 Pola Retak Beton

Sumber: ASTM C39/C39M "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens"

1.3. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh penggunaan agregat kasar HDPE sebagai substitusi sebagian agregat kasar terhadap kuat tekan, kuat tarik belah, dan absorpsi beton?
2. Seberapa besar persentase optimal penggunaan lelehan HDPE yang dapat menggantikan agregat kasar dalam campuran beton?

1.4. Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh penggunaan agregat kasar HDPE sebagai substitusi sebagian agregat kasar terhadap kuat tekan, kuat tarik belah, dan durabilitas beton.
2. Mengetahui seberapa besar persentase optimal penggunaan lelehan HDPE yang dapat menggantikan agregat kasar dalam campuran beton.

1.5. Manfaat Penelitian



Jemik

ikan kontribusi ilmu pengetahuan di bidang teknologi beton dan a material alternatif yang ramah lingkungan.

acuan bagi penelitian lanjutan terkait penggunaan limbah sebagai material substitusi dalam konstruksi.

tis

- a. Memberikan solusi pengelolaan limbah plastik HDPE melalui pemanfaatannya dalam industri konstruksi.
 - b. Menawarkan alternatif material yang berpotensi mengurangi penggunaan agregat alam sehingga membantu konservasi sumber daya alam.
 - c. Menunjukkan potensi metode quenching dalam memodifikasi sifat material daur ulang untuk aplikasi struktural.
3. Manfaat Lingkungan
- a. Mengurangi limbah plastik dengan memanfaatkan HDPE sebagai material beton, sehingga membantu mengurangi pencemaran lingkungan.
 - b. Menghemat sumber daya alam dengan menurunkan penggunaan agregat kasar dari tambang.
 - c. Mendukung daur ulang dan konsep circular economy di sektor konstruksi.



1.6. Keaslian Penelitian

Berdasarkan pengamatan yang telah dilakukan, penulis menemukan 3 judul penelitian tentang penggunaan material yang berkaitan dengan plastik HDPE sebagai bahan pembuatan beton. Tabel perbandingan dengan penelitian terdahulu sebagai berikut.

Tabel 1.8 Penelitian Terkait

Peneliti	Fitri Junarti	Mohd Mustafa Al Bakri, G. Che Mohd Ruzaidi, M.N. Norazian, H. Kamarudin & S. Mohammad Tarmizi	Marabathina Maheswara Rao, Ramakrishna Gangadhar Ravula
Tahun	2023	2021	2018
Judul Penelitian	Pengaruh Substitusi Limbah Kantong Plastik (HDPE) terhadap Kuat Tekan Beton dengan Metode Dry Curing	<i>Effects of HDPE Plastic Waste Aggregate on the Properties of Concrete</i>	<i>Investigation on Properties of PET and HDPE Waste Plastic Concrete</i>
Variabel	Substitusi: 0%, 0.5%, 0.7%, 0.9% Perlakuan: dilelehkan dan dikeringkan dalam bentuk bongkahan pada suhu ruangan, kemudian dihancurkan hingga berukuran agregat halus	Substitusi: 0:100, 15:85, 30:70, 45:55, dan 60:40 Perlakuan: plastik dibuat dalam bentuk lingkaran dengan diameter 25mm-30mm kemudian dipanaskan pada suhu 160°C - 200°C. setelah dipanaskan agregat plastik mengalami penyusutan hingga 14mm-20mm.	Substitusi: Mengganti gregat kasar dengan limbah plastik HDPE dan mengganti agregat halus dengan limbah PET dengan persentase yang sama yaitu 0%, 5%, 10% dan 15% Perlakuan: HDPE dicacah menjadi ukuran partikel besar menyerupai agregat kasar (sekitar 12–20 mm). Tidak ada proses peleburan atau pemanasan dalam penelitian ini. Plastik digunakan dalam bentuk shredded atau potongan langsung.



BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian eksperimen kuantitatif yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh perlakuan tertentu terhadap karakteristik material, khususnya beton. Fokus utama penelitian ini adalah substitusi sebagian agregat kasar dengan limbah plastik jenis *High-Density Polyethylene* (HDPE) yang telah dilelehkan dan mengalami proses pendinginan cepat menggunakan metode *water quenching*. Perlakuan ini dimaksudkan untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan pengganti dalam beton, serta menilai sejauh mana perlakuan tersebut memengaruhi sifat mekanik, terutama kuat tekan beton.

Rangkaian penelitian dilakukan secara sistematis dan terukur, dimulai dari proses persiapan material, peleburan HDPE, quenching, hingga tahap pencampuran beton dengan variasi persentase HDPE. Setelah beton dicetak dan mengalami proses curing, dilakukan pengujian kuat tekan pada umur tertentu untuk memperoleh data kuantitatif terkait performa masing-masing variasi campuran. Data yang dihasilkan dianalisis menggunakan metode statistik untuk mendapatkan kesimpulan yang objektif mengenai pengaruh perlakuan terhadap kualitas beton yang dihasilkan.

Penelitian ini tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga eksperimental dan komparatif, karena melibatkan pemberian perlakuan langsung terhadap objek penelitian dalam kondisi terkontrol dan membandingkan hasil antar perlakuan. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai potensi pemanfaatan limbah plastik HDPE sebagai bahan alternatif yang mendukung pengembangan material yang lebih efisien, inovatif, dan ramah lingkungan. Hasilnya dapat menjadi pijakan untuk eksplorasi lanjutan dalam bidang pengelolaan limbah dan pengembangan material berkelanjutan.

2.2 Objek dan Lokasi Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah campuran beton yang disusun dengan substitusi sebagian agregat kasar menggunakan lelehan limbah plastik jenis HDPE (*High-Density Polyethylene*), yang kemudian diproses menggunakan metode quenching. Lokasi penelitian ini dilakukan di Laboratorium Material, Struktur dan Konstruksi Bangunan, Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

2.3 Variabel Penelitian



Penelitian eksperimen kuantitatif, identifikasi dan penjelasan variabel penelitian merupakan aspek penting yang menentukan validitas analisis data. Variabel penelitian adalah unsur yang dimanipulasi dalam rangka menjawab pertanyaan atau penelitian. Dalam konteks penelitian ini, variabel digunakan untuk pengaruh dari perlakuan tertentu terhadap karakteristik beton, yaitu substitusi sebagian agregat kasar dengan limbah plastik HDPE dan

penerapan metode *water quenching*. Masing-masing variabel memiliki peran yang spesifik dan saling berinteraksi dalam menjelaskan fenomena yang diteliti.

Secara umum, variabel dalam penelitian ini terbagi menjadi tiga kategori utama, yaitu variabel bebas (independen), variabel terikat (dependen), dan variabel kontrol. Variabel bebas merupakan perlakuan atau kondisi yang dimanipulasi oleh peneliti untuk mengetahui dampaknya terhadap variabel lain, dalam hal ini adalah persentase substitusi HDPE dan metode pendinginan (*quenching*). Sementara itu, variabel terikat adalah variabel yang diamati atau diukur sebagai respons terhadap perlakuan, yaitu kuat tekan beton. Adapun variabel kontrol adalah faktor-faktor lain yang dijaga tetap konstan agar tidak memengaruhi hasil penelitian, seperti jenis semen, rasio air terhadap semen (*w/c ratio*), ukuran agregat, dan metode curing.

Untuk memperjelas cakupan serta peran masing-masing variabel dalam penelitian ini, berikut disajikan sebuah tabel yang memuat jenis variabel, deskripsi variabel, cara perlakuan terhadap variabel, serta metode pengukuran atau pengujiannya. Tabel ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang sistematis mengenai struktur eksperimen yang dilakukan, sekaligus membantu pembaca memahami keterkaitan antarvariabel dalam proses analisis dan pengambilan kesimpulan akhir dari penelitian.

Tabel II.1 Variabel Penelitian

Jenis Variabel	Deskripsi
Variabel Terikat	Kuat tekan beton, kuat tarik belah dan absopsi beton
Variabel Bebas	Persentase substitusi sebagian agregat kasar dalam campuran beton (0.50%, 0.70%, 0.90%) dan Umur 7, 14, 21, dan 28 hari.
Variabel Kontrol	Jenis dan komposisi material, rasio air-semen (<i>w/c ratio</i>), metode curing, metode pencampuran dan pengujian, serta ukuran benda uji.

Tabel II.2 Jumlah Kebutuhan Benda Uji Silinder Beton

Variasi Substitusi	Uji Kuat Tekan				Uji Kuat Tarik Belah				Uji Durabilitas	Analisis Penampang	Jumlah
	Umur (Hari)				Umur (Hari)				Umur (Hari)	Umur (Hari)	
	7	14	21	28	7	14	21	28	28	28	
0.00%	3	3	3	3	3	3	3	3	6	8	38
0.50%	3	3	3	3	3	3	3	3	6	8	38
0.70%	3	3	3	3	3	3	3	3	6	8	38
0.90%	3	3	3	3	3	3	3	3	6	8	38
	12	12	12	12	12	12	12	12	24	32	152



Berdasarkan tabel jumlah kebutuhan benda uji beton diatas maka diperlukan kode atau tanda yang diberikan pada benda uji untuk memudahkan dalam mengidentifikasi yang dan memastikan setiap sampel dapat dilacak, diorganisir, dan dianalisis dengan akurat sepanjang proses penelitian. Tanpa sistem kode yang terstruktur, risiko kesalahan identifikasi, pencatatan, dan analisis data akan sangat tinggi, yang pada akhirnya dapat mengancam validitas dan reliabilitas hasil penelitian secara keseluruhan. Oleh karena itu, penerapan kode benda uji sangat diperlukan untuk menjamin integritas data dan memfasilitasi proses pengujian yang sistematis, terukur. Berikut adalah format kode yang digunakan dalam pengkodean benda uji.

[Jenis Pengujian] – [Variasi Substitusi] – [Umur] – [Nomor]

Keterangan:

- Jenis Pengujian
 - CS = *Compressive Strength* (Kuat Tekan)
 - STS = *Split Tensile Strength* (Kuat Tarik Belah)
 - DT = *Durability Test* (Uji Durabilitas)
 - CSA = *Cross-Sectional Analysis* (Analisis Penampang)
- Variasi Substitusi
 - 0.00 = Substitusi 0.00% Agregat Kasar HDPE
 - 0.50 = Substitusi 0.50% Agregat Kasar HDPE
 - 0.70 = Substitusi 0.70% Agregat Kasar HDPE
 - 0.90 = Substitusi 0.90% Agregat Kasar HDPE
- Umur
 - 7 = Pengujian umur 7 hari
 - 14 = Pengujian umur 14 hari
 - 21 = Pengujian umur 21 hari
 - 28 = Pengujian umur 28 hari
- Nomor
 - 01 = Benda Uji 1
 - 02 = Benda Uji 2
 - 03 = Benda Uji 3

2.4 Alat dan Bahan

2.4.1 Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan komponen penting yang menunjang kelancaran proses pengujian dan pelaksanaan eksperimen secara keseluruhan. Pemilihan peralatan didasarkan pada standar yang relevan dan telah disesuaikan dengan kebutuhan teknis dalam rangka mencapai hasil yang akurat dan menjawab. Adapun daftar peralatan yang digunakan dapat berikut



ingsi untuk mengukur massa material yang akan digunakan
encampuran beton, meliputi semen, agregat halus, agregat

kasar, serta limbah HDPE. Ketelitian timbangan sangat penting untuk menjaga proporsi campuran beton agar sesuai dengan desain campuran yang telah direncanakan, sehingga dapat menghasilkan mutu beton yang konsisten dan dapat direplikasi.

2. Saringan atau Ayakan

Ayakan digunakan untuk melakukan analisis gradasi agregat, baik agregat halus maupun agregat kasar. Hasil pengayakan digunakan untuk menentukan modulus kehalusan (FM) agregat, yang merupakan salah satu parameter dalam merancang campuran beton. Gradasi yang tepat akan memengaruhi kepadatan beton, kebutuhan air, serta efisiensi penggunaan semen sebagai bahan perekat.

3. Concrete Mixer

Concrete mixer digunakan untuk mencampur semua komponen beton yakni semen, air, agregat, dan limbah HDPE—secara homogen. Penggunaan molen ini memastikan bahwa seluruh bahan tercampur merata, sehingga sifat-sifat beton yang dihasilkan dapat terdistribusi secara seragam di seluruh volume campuran.

4. Gelas Ukur

Gelas ukur digunakan untuk mengukur volume air pencampur beton secara tepat. Takaran air yang akurat sangat penting dalam menjaga rasio air-semen (*w/c ratio*), yang secara langsung memengaruhi kekuatan, *workability*, dan durabilitas beton.

5. Kerucut Abrams

Kerucut Abrams digunakan untuk melakukan pengujian slump (*Slump Test*), yaitu pengujian untuk mengukur tingkat kelecakan (*workability*) dari beton segar. Nilai slump memberikan gambaran mengenai konsistensi campuran dan kemudahan pengerjaannya di lapangan.

6. Oven

Oven digunakan untuk melakukan pengujian karakteristik material dengan menghilangkan kadar airnya, dan untuk pengujian durabilitas absorpsi beton.

7. Meja Vibrator

Digunakan untuk memadatkan beton segar dengan getaran, sehingga rongga udara dalam adukan hilang dan kepadatan beton meningkat secara merata.



berbentuk silinder berfungsi untuk membentuk benda uji yang digunakan untuk pengujian kuat tekan beton. Ukuran standar cetakan yang digunakan memiliki diameter 10 cm dan tinggi 20 cm, sesuai dengan SNI untuk pengujian beton.

9. Mesin Uji Tekan Beton

Alat ini digunakan untuk mengukur kekuatan tekan beton setelah mengalami proses curing. Pengujian dilakukan pada benda uji silinder untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan beban tekan, yang menjadi salah satu parameter utama dalam menentukan kualitas beton.

10. Torch

Digunakan untuk melelehkan plastik HDPE dengan memanaskannya hingga mencapai titik leleh.

11. Tungku pembakaran

Tungku pembakaran digunakan untuk tempat melelehkan plastik HDPE karena mampu memfokuskan panas sehingga panas yang dihasilkan dari torch dapat dimanfaatkan secara maksimal.

12. Wadah Penampungan

Wadah ini berfungsi untuk menampung air yang digunakan dalam proses *water quenching*, yaitu proses pendinginan cepat limbah HDPE cair agar membentuk struktur padat yang menyerupai agregat kasar. Media ini penting untuk memastikan transformasi fisik limbah plastik berlangsung optimal.

13. Palu

Palu digunakan untuk menghancurkan hasil quenching dari limbah HDPE yang telah membeku menjadi bentuk padat. Proses penghancuran ini bertujuan agar limbah HDPE menyerupai bentuk dan ukuran agregat kasar, sehingga dapat digunakan sebagai substitusi parsial dalam campuran beton.

2.4.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini dipilih berdasarkan spesifikasi teknis yang sesuai dengan kebutuhan eksperimen serta mengacu pada standar mutu yang berlaku. Pemilihan dan penggunaan bahan dilakukan secara cermat guna memastikan validitas hasil pengujian dan ketercapaian tujuan penelitian. Berikut ini adalah rincian bahan yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian

1. Semen Portland
2. Agregat Kasar
3. Agregat Halus



DPE

2.5 Tahapan Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dibagi ke dalam empat tahap utama yang dirancang secara sistematis untuk mencapai tujuan penelitian. Setiap tahap memiliki peran penting dalam memastikan keakuratan data, kesesuaian prosedur, serta ketercapaian hasil yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Adapun tahapan-tahapan dalam penelitian ini dijelaskan sebagai berikut.

2.5.1 Tahap Persiapan Awal

Tahap ini dimulai dengan studi literatur dan kajian pustaka terkait penggunaan limbah plastik sebagai material substitusi dalam beton, khususnya jenis High Density Polyethylene (HDPE). Kajian dilakukan untuk memperkuat landasan teoritis dan mendalami hasil-hasil penelitian sebelumnya yang relevan.

Selanjutnya dilakukan pengumpulan bahan berupa semen, agregat halus, agregat kasar, serta limbah HDPE. Limbah HDPE dikumpulkan dari sumber tertentu, kemudian dibersihkan dari kotoran, dikeringkan, dan disortir untuk memisahkan bagian yang sesuai untuk dilelehkan. Di sisi lain, alat-alat yang akan digunakan seperti oven, timbangan, concrete mixer, cetakan beton, kerucut Abrams, mesin uji tekan, dan peralatan pengujian lainnya diperiksa kondisinya serta dikalibrasi bila diperlukan untuk menjamin keakuratan pengukuran. Tujuan tahap ini adalah untuk menyiapkan seluruh kebutuhan penelitian baik bahan, alat, maupun rancangan secara matang dan sistematis, sehingga tahapan eksperimen selanjutnya dapat berjalan sesuai prosedur dan menghasilkan data yang akurat.

2.5.2 Tahap Pembuatan Agregat Kasar Plastik HDPE (*Water Quenching*)

Tahap ini merupakan inti dari proses rekayasa material substitusi. Adapun langkah-langkah untuk membuat agregat kasar dari limbah kantong plastik HDPE.

1. Limbah kantong plastik dibersihkan hingga tidak ada lagi kotoran yang menempel
2. Plastik yang telah dicuci dikeringkan dibawah terik matahari langsung hingga kering sempurna.
3. Membakar kantong plastik menggunakan torch hingga mencapai titik lelehnya pada suhu sekitar 130-140°C, lelehan kantong plastik tersebut kemudian ditampung pada wadah besi (tahan panas tinggi).
4. Lelehan plastik pada wadah tersebut kemudian didiamkan selama ± 5 menit, suhu leleh HDPE diperkirakan menurun ke kisaran 70-90 °C, sehingga laju pendinginan saat *water quenching* menjadi lebih terkendali.



kemudian dituangkan langsung pada air hingga dengan suhu ± 70 hingga berbentuk gumpalan berukuran ± 5 cm dan dibiarkan nit untuk memastikan bongkahan plastik sudah dingin

6. Bongkahan plastik yang telah mengeras kemudian diangkat dari wadah penampungan air dan dihancurkan menggunakan palu hingga berbentuk kira-kira ukuran agregat kasar.
7. Bongkahan agregat kasar HDPE kemudian dikeringkan dibawah sinar matahari langsung hingga kering sempurna.
8. Hasil bongkahan yang telah dihancurkan dan kering kemudian disaring sesuai kebutuhan ukuran agregat kasar pada rancangan campuran (mix design) yaitu 10mm-20mm.
9. Agregat kasar HDPE siap digunakan sebagai substitusi agregat kasar alami pada beton.

Tujuan dari tahap ini adalah untuk mengolah limbah HDPE menjadi bentuk yang menyerupai agregat kasar secara fisik melalui proses thermal (pemanasan) dan pendinginan cepat (quenching), sehingga dapat digunakan sebagai substitusi parsial dalam campuran beton tanpa perlu proses kimia yang kompleks.

2.5.3 Tahap Pemeriksaan Bahan

Dalam sebuah penelitian beton yang bersifat eksperimental, tahapan awal yang sangat krusial dan tidak dapat diabaikan adalah pemeriksaan menyeluruh terhadap bahan-bahan penyusun beton. Tahapan ini memiliki peran fundamental dalam memastikan bahwa seluruh material yang digunakan benar-benar memenuhi standar kualitas, konsistensi, dan karakteristik teknis yang diperlukan untuk menghasilkan campuran beton yang andal dan layak uji. Tanpa adanya pemeriksaan awal yang cermat, risiko ketidaksesuaian material dapat berdampak serius terhadap validitas data penelitian serta kualitas beton yang dihasilkan.

Pemeriksaan bahan dilakukan bukan hanya untuk sekadar mencocokkan spesifikasi teknis, tetapi juga untuk mengidentifikasi potensi variabel tak terkendali (uncontrolled variables) yang bisa memengaruhi hasil eksperimen. Oleh karena itu, setiap komponen baik itu semen, agregat halus, agregat kasar, air pencampur, maupun bahan substitusi seperti limbah plastik HDPE harus melalui serangkaian pengujian dan pengamatan awal sebelum digunakan dalam proses pencampuran beton. Pemeriksaan ini juga menjadi dasar dalam penyusunan mix design yang presisi dan dalam penentuan proporsi bahan yang optimal sesuai tujuan penelitian.

Seluruh proses pemeriksaan bahan dalam penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada beberapa Standar Nasional Indonesia (SNI) yang berlaku, untuk memastikan bahwa metode yang digunakan memiliki acuan yang kredibel dan diakui secara internasional. Dengan demikian, penerapan standar ini penting agar hasil penelitian dapat dilakukan secara ilmiah, baik dari sisi prosedur maupun kualitas data. Tahapan ini merupakan pondasi awal dalam menjamin bahwa penelitian tidak hanya berjalan sesuai metodologi ilmiah, tetapi juga dapat direplikasi pada kondisi lain.



1. Pemeriksaan Berat Volume dan Rongga Udara dalam Agregat Halus/Pasir (SNI 03-4804-1998)

a. Tujuan

Untuk menentukan berat isi dalam kondisi padat atau gembur dan rongga udara dalam agregat halus/pasir

b. Bahan dan Alat

- Agregat halus/pasir
- Mould/alat penakar
- Timbangan dengan ketelitian 0,1 gram
- Tongkat pemadat dari baja, diameter 16 mm dan panjang 610 mm

c. Benda Uji

Pasir 5 kg kondisi kering oven

d. Prosedur Pengujian

- Mould ditimbang dalam keadaan kosong
- Pasir dimasukkan ke dalam mould dalam dua keadaan, yakni:
 - dipadatkan
 - lepas (tanpa dipadatkan)
- Untuk pasir yang dipadatkan, mould diisi masing-masing tiga lapis dengan setiap lapisnya dilakukan penumbukan dengan tongkat pemadat sebanyak 25 kali tumbukan.
- Bagian mould yang kurang rata diratakan dengan tongkat, dan setelah itu mould yang telah berisi pasir lalu ditimbang dan dicatat hasilnya.
- Untuk pasir dalam keadaan lepas, masukkan agregat ke dalam mould dengan hati-hati, maksimum 5 cm dari atas permukaan mould dengan menggunakan sendok/skop sampai penuh. Ratakan permukaan mould dengan alat perata.

e. Perhitungan

Berat isi agregat sebagai berikut:

- Agregat dalam keadaan kering oven

$$M = \frac{G - T}{V}$$

- Agregat dalam keadaan kering permukaan

$$M_{SSD} = M [1 + (A/100)]$$

M = Berat isi agregat dalam kondisi kering oven, (kg/m³)

G = Berat agregat + mould, kg

T = Berat mould, kg

V = Volume mould, m³

A = Berat isi agregat dalam kondisi kering permukaan, kg/m³

% = Absorpsi dalam %



$$\text{Rongga Udara} = \frac{[(s \cdot w) - M]}{(s \cdot w)} \times 100\%$$

- M = Berat isi agregat dalam kondisi kering oven, (kg/m³)
 s = berat je nis agregat dalam kering oven
 w = kerapatan air, 998 kg/m³

2. Pemeriksaan Kadar Air Agregat Halus (SNI 03-1971-1990)

a. Tujuan

Untuk menentukan kadar air agregat halus dengan cara pengeringan. Kadar air agregat adalah perbandingan antara air yang dikandung agregat dengan agregat dalam keadaan kering.

b. Bahan dan Alat

- Pasir ± 500 gram
- Timbangan
- Talam
- Oven

c. Prosedur Pengujian

- Timbang talam (W₁)
- Timbang pasir + talam (kondisi lapang), W₂
- Hitung berat benda uji (W₃ = W₂ - W₁)
- Setelah itu dioven selama ± 24 jam dengan suhu 110°C
- Lalu ditimbang kembali dan diperoleh berat kering, W₄
- Hitung berat benda uji kering (W₅ - W₁)

d. Perhitungan

$$\text{Kadar air agregat halus} = \frac{W_3 - W_5}{W_5} + 100\%$$

W₃ = Berat benda uji semula (gr)

W₅ = Berat benda uji kering (gr)

3. Pemeriksaan Kadar Lumpur Agregat Halus Lolos Saringan No.200 (0,075 Mm) (SNI 03-4142-1996)

a. Tujuan

Untuk menentukan jumlah bahan dalam agregat yang lolos saringan No. 200 dengan cara pencucian.

b. Bahan dan Alat



500 gram

dan

;

h No. 200

c. Prosedur Pengujian

- Pasir kering sebanyak ± 500 gr ditimbang lalu dicuci dengan prosedur sebagai berikut:
Masukkan pasir kedalam saringan No. 16 dan dibawahnya saringan No. 200 kemudian diberi air pencuci secukupnya sehingga benda uji terendam. Guncang- guncangkan saringan tadi ± 5 menit dan ulangi prosedur sebelumnya hingga air cucian menjadi jernih (lumpur hilang). Semua bahan yang tertahan disaringan dikumpulkan.
- Keringkan kembali dengan oven selama ± 24 jam dengan suhu 110°C .
- Setelah dioven, timbang kembali (berat kering) dan catat beratnya.

d. Perhitungan

Berat kering benda uji awal $W_3 = W_1 - W_2$

Berat kering benda uji sesudah pencucian $W_5 = W_4 - W_2$

$$\text{Kadar Lumpur} = \frac{W_3 - W_5}{W_5} \times 100\%$$

W_1 = berat kering benda uji + talam (gr)

W_2 = berat talam (gr)

W_3 = berat kering benda uji awal (gr)

W_4 = berat kering benda uji sesudah pencucian + talam (gr)

W_5 = berat kering benda uji sesudah pencucian (gr)

4. Pemeriksaan Kadar Organik Agregat Halus (SNI 03-2816-1992)

a. Tujuan

Untuk menentukan kadar bahan organik di dalam agregat halus yang akan digunakan dalam adukan beton. Bahan organik yang tercampur pada pasir akan berpengaruh pada kekuatan beton.

b. Bahan dan Alat

- Pasir secukupnya
- Botol bening
- Larutan NaOH 3%
- Tabel warna (organic plate)

c. Prosedur Pengujian

- Botol bening tersebut diisi pasir 1/3 bagian dan NaOH 3% bagian juga.
- Setelah itu botol tersebut dikocok selama ± 30 menit.
- Setelah dikocok, didiamkan selama ± 24 jam, lalu diamati perubahan ang



tersebut dibandingkan dengan tabel STANDAR WARNA dan Abrama Herder)

erat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus (SNI 03-1970-

a. Tujuan

- Untuk menentukan berat jenis curah, berat jenis permukaan jenuh, berat jenis semu dan penyerapan air pada agregat halus.
- Berat jenis curah adalah perbandingan antara berat agregat kering dan berat air suling yang isinya = isi agregat dalam keadaan jenuh pada suhu 25 °C.
- Berat jenis jenuh kering permukaan adalah perbandingan antara berat agregat kering permukaan jenuh dan berat air suling yang isinya = isi agregat dalam keadaan jenuh pada suhu 25 °C.
- Berat jenis semu adalah perbandingan antara berat agregat kering dan berat air suling yang isinya = isi agregat dalam keadaan kering pada suhu 25 °C.
- Penyerapan adalah perbandingan berat air yang diserap pori terhadap berat agregat kering (%).

b. Bahan dan Alat

- Pasir ± 1000 gr
- Timbangan
- Piknometer
- Talam
- Oven
- Cetakan kerucut pasir (conical mould)
- Tongkat pemadat
- Pompa hampa udara.

c. Prosedur Pengujian

- Keringkan benda uji dalam oven sampai beratnya tetap, timbang sesuai kebutuhan. Kemudian rendam air selama ± 24 jam.
- Setelah itu keringkan sampai kering permukaan (SSD) dengan jalan sbb: Sebagian pasir yang telah direndam diangin-anginkan, masukkan ke dalam metal sand conical mould, lalu padatkan dengan tongkat pemadat sampai 25 kali tumbukan dan dibagi tiga lapisan:
 - Lapis pertama ditumbuk 8 kali.
 - Lapis kedua ditumbuk 8 kali.
 - Lapis ketiga ditumbuk 9 kali.

Kondisi SSD (Surface Dry Condition) diperoleh jika cetakan (conical mould) diangkat, maka pasir akan runtuh tetapi masih dalam keadaan



berat piknometer + air (B)

contoh pasir menjadi 2 bagian (kering SSD) masing-masing berat 500 gram.

contoh pasir ke dalam picnometer.

di isi lagi dengan air, gunakan pompa vakum untuk arkan udara yang terdapat dalam agregat.

- Timbang piknometer berisi air + contoh pasir (B_t)
 - Keluarkan pasir dari piknometer lalu oven selama 24 jam i. Timbang dalam keadaan kering (B_k).
- d. Perhitungan

$$\text{Berat jenis curah} = \frac{B_k}{B + 500 - B_t}$$

$$\text{Berat jenis kering permukaan} = \frac{500}{B + 500 - B_t}$$

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{B_k}{B + B_k - B_t}$$

$$\text{Penyerapan} = \frac{500 - B_k}{B_k} \times 100\%$$

B_k = berat contoh pasir kering oven, gram

B = berat piknometer + air, gram

B_t = berat piknometer + contoh pasir + air, gram

6. Analisa Saringan Agregat Halus/Pasir (SNI 03-1968-1990)

a. Tujuan

Untuk memperoleh distribusi besaran atau jumlah persentase butiran agregat halus yang lolos dari satu set saringan.

Modulus kehalusan adalah jumlah persen kumulatif yang tertahan pada saringan seri standar, dibagi 100. Seri standar terdiri dari saringan yang masing-masing mempunyai 2x ukuran saeingan sebelumnya. (No. 100, 50, 30, 16, 8 dan 4).

b. Bahan dan Alat

- Pasir terdiri dari:
 - Ukuran maks 4,76 (No. 4) berat min 500 gram
 - Ukuran maks 2,38 (No. 8) berat min 100 gram
- Satu set saringan (No. 4 s/d No. 200)
- Timbangan
- Oven
- Mesin pengguncangan saringan
- Talam

c. Prosedur Pengujian

- Pasir dikeringkan dalam oven selama 24 jam.



Timbang saringan dalam keadaan kosong, yaitu saringan No. 4, 8, 50, 100 dan No. 200.

Pasir yang telah di oven di masukkan ke dalam saringan dengan saringan paling besar ditempatkan paling atas.

Saringan diguncangkan dengan tangan atau mesin pengguncang selama

10 menit. Timbang kembali masing-masing saringan beserta isinya dan

catat hasil penimbangan.

7. Pemeriksaan Berat Volume dan Rongga Udara dalam Agregat Kasar (SNI 03-4804-1998)

a. Tujuan

Untuk menentukan berat isi dalam kondisi padat atau gembur dan rongga udara dalam agregat kasar/kerikil.

b. Bahan dan Alat

- Agregat kasar/kerikil
- Mould/alat penakar
- Timbangan dengan ketelitian 1 gram kapasitas 20 kg
- Tongkat Pematat dari baja, diameter 16 mm dan panjang 610 mm

Tabel II.3 Kapasitas Penakar untuk Berbagai Ukuran Agregat

Ukuran Agregat (mm)	Kapasitas Maks Penakar (liter)
12.5	2.8
25	9.3
37.5	14
75	28
112	70
150	100

c. Benda Uji

Agregat kasar 10 kg kondisi kering oven

d. Prosedur Pengujian

- Mould ditimbang dalam keadaan kosong
- Kerikil dimasukkan ke dalam mould dalam dua keadaan, yakni:
 - dipadatkan
 - lepas (keadaan biasa)
- Untuk kerikil yang dipadatkan, mould diisi masing-masing tiga lapis dengan setiap lapisnya dilakukan penumbukan dengan tongkat pematat sebanyak 25 kali tumbukan.
- Bagian mould yang kurang rata diratakan dengan tongkat dan setelah itu mould yang telah berisi kerikil lalu ditimbang dan dicatat hasilnya.

e. Perhitungan



berat sebagai berikut:

dalam keadaan kering oven

$$M = \frac{G - T}{V}$$

dalam keadaan kering permukaan

$$M_{SSD} = M [1 + (A/100)]$$

- M = Berat isi agregat dalam kondisi kering oven, (kg/m^3)
 G = Berat agregat + mould, kg
 T = Berat mould, kg
 V = Volume mould, m^3
 M_{SSD} = berat isi agregat dalam kondisi kering permukaan, kg/m^3
 A = absorpsi dalam %

$$\text{Rongga Udara} = \frac{[(s \cdot w) - M]}{(s \cdot w)} \times 100\%$$

- M = Berat isi agregat dalam kondisi kering oven, (kg/m^3)
 s = berat jenis agregat dalam kering oven
 w = kerapatan air, $998 \text{ kg}/\text{m}^3$

8. Pemeriksaan Kadar Air Agregat Kasar (SNI 03-1971-1990)

a. Tujuan

Untuk menentukan kadar air agregat kasar dengan cara pengeringan. Kadar air agregat adalah perbandingan antara berat air yang dikandung agregat dengan agregat dalam keadaan kering.

b. Bahan dan Alat

- Kerikil ± 1500 gram
- Timbangan
- Talam
- Oven

c. Benda Uji

Tabel II.4 Berat Minimum Benda Uji

Ukuran butir maksimum		Berat (W) agregat minimum (kg)
Mm	Inchi	
6,3	1/4	0,5
9,5	3/8	1,5
12,7	1/2	2,0
19,1	3/4	3,0
25,4	1	4,0
38,1	1 1/2	6,0
50,8	2	8,0
63,5	2 1/2	10,0
76,2	3	13,0
88,9	3 1/2	16,0
101,6	4	25
152,4	6	50



d. Prosedur Pengujian

- Timbang talam (W_1)
- Timbang kerikil + talam (kondisi lapangan), W_2
- Hitung berat benda uji ($W_3 = W_2 - W_1$)
- Setelah itu dioven selama ± 24 jam dengan suhu 110°C
- Lalu ditimbang kembali dan diperoleh berat kering, W_4
- Hitung berat benda uji kering ($W_5 = W_4 - W_1$)

e. Perhitungan

$$\text{Kadar air agregat kasar} = \frac{W_3 - W_5}{W_5} \times 100\%$$

W_3 = Berat benda uji semula (gr)

W_5 = Berat benda uji kering (gr)

9. Pemeriksaan Kadar Lumpur Agregat Kasar Lolos Saringan No. 200 (0,075 Mm) (SNI 03-4142-1996)

a. Tujuan

Untuk menentukan jumlah bahan dalam agregat kasar yang lolos saringan No. 200 dengan cara pencucian.

b. Bahan dan Alat

- Kerikil $\pm 2,5$ kg
- Talam
- Oven
- Timbangan
- Aquades
- Saringan No. 200 dan No. 16

c. Benda Uji

Benda uji adalah agregat dalam kondisi kering oven dengan berat tergantung pada ukuran maksimum agregat sesuai tabel berikut.

Tabel II.5 Berat Kering Minimum Benda Uji

Ukuran maksimum agregat		Berat kering minimum benda uji
Ukuran saringan	mm	Gram
No. 8	2,36	100
No. 4	4,75	500
3/8	9,50	1000
3/4	19,0	2500
$\geq 1/2$	$\geq 38,1$	5000



ngujian

kering sebanyak ± 1500 gr ditimbang lalu dicuci dengan

prosedur sebagai berikut:

- Masukkan kerikil kedalam saringan No. 16 dan dibawahnya saringan No. 200 kemudian diberi air pencuci secukupnya sehingga benda uji terendam.
 - Guncang-guncangkan saringan tadi ± 5 menit dan ulangi prosedur sebelumnya hingga air cucian menjadi jernih (lumpur hilang). Semua bahan yang tertahan disaringan dikumpulkan.
 - Keringkan kembali dengan oven selama ± 24 jam dengan suhu 110°C .
 - Setelah dioven, timbang kembali (berat kering) dan catat beratnya.
- e. Perhitungan

Berat kering benda uji awal $W_3 = W_1 - W_2$

Berat kering benda uji sesudah pencucian $W_5 = W_4 - W_2$

$$\text{Kadar Lumpur} = \frac{W_3 - W_5}{W_5} \times 100\%$$

W_1 = berat kering benda uji + talam (gr)

W_2 = berat talam (gr)

W_3 = berat kering benda uji awal (gr)

W_4 = berat kering benda uji sesudah pencucian + talam (gr)

W_5 = berat kering benda uji sesudah pencucian (gr)

10. Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar (SNI 03-1969-1990)

a. Tujuan

Untuk menentukan berat jenis curah, berat jenis permukaan jenuh, berat jenis semu dan penyerapan air pada agregat halus.

b. Bahan dan Alat

- Kerikil ± 5 kg (tertahan saringan No. 4)
- Timbangan
- Saringan No. 4
- Keranjang kawat No. 6 atau No. 8 kapasitas 5 kg
- Oven

c. Prosedur Pengujian

- Cuci dan keringkan benda uji dalam oven sampai beratnya tetap, timbang sesuai kebutuhan.
- Dinginkan benda uji pada suhu kamar kemudian timbang (B_k). c. dalam air selama ± 24 jam. in benda uji dari air, lap dengan kain sampai kering an (SSD) dan timbang (B_j). 1 benda uji dalam keranjang, tentukan beratnya dalam air (B_a)



d. Perhitungan

$$\text{Berat jenis curah} = \frac{B_k}{B_j - B_a}$$

$$\text{Berat jenis kering permukaan} = \frac{B_j}{B_j - B_a}$$

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{B_k}{B_k - B_a}$$

$$\text{Penyerapan} = \frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100\%$$

B_k = berat contoh pasir kering oven, gram

B_j = berat kerikil kering permukaan, gram

B_t = berat kerikil kering permukaan jenuh di dalam air, gram

11. Analisa Saringan Agregat Kasar/Kerikil (SNI 03-1968-1990)

a. Tujuan

Untuk memperoleh distribusi besaran atau jumlah persentase butiran agregat kasar yang lolos dari satu set saringan.

b. Bahan dan Alat

- Kerikil
- Satu set saringan (No. 200 s/d No. 4)
- Timbangan
- Oven
- Mesin pengguncangan saringan
- Talam

Tabel II.6 Berat Benda Uji

Ukuran maks agregat	Benda min benda uji (kg)
3,5"	35
3"	30
2,5"	25
2"	20
1,5"	15
1"	10
3/4"	5
1/2"	2,5
3/8"	1



ngujian

keringkan dalam oven selama 24 jam.

saringan dalam keadaan kosong

ang telah di oven di masukkan ke dalam saringan dengan

saringan paling besar ditempatkan paling atas.

- Saringan diguncangkan dengan tangan atau mesin pengguncang selama 15 menit.
- Timbang kembali masing-masing saringan beserta isinya dan catat hasil penimbangan.

d. Perhitungan

Hitung persentase berat benda uji yang tertahan di atas masing-masing saringan terhadap berat total benda uji setelah disaring.

Tabel II.7 Gradasi Kerikil

Saringan (mm)	Persen berat butir yang lewat ayakan, Besar butir maksimum		
	40 mm	20 mm	10 mm
40	95-100	100	
20	37-70	95-100	100
10	10-40	30-60	50-85
4,8	0-5	0-10	0-10

12. Pemeriksaan Keausan Agregat Kasar dengan Mesin Abrasi Los Angeles (SNI 03-2417 1991)

a. Tujuan

Untuk menentukan ketahanan agregat kasar/kerikil terhadap keausan dengan menggunakan mesin Los Angeles. Keausan dinyatakan dengan perbandingan antara berat bahan aus lolos saringan No. 12 (1,7 mm) terhadap berat semula, dalam persen.

b. Bahan dan Alat

- Kerikil kering oven \pm 5 kg
- Mesin Abrasi Los Angeles
- Saringan No. 12 dan saringan-saringan lainnya
- Timbangan
- Bola-bola baja
- Oven

c. Prosedur Pengujian

Pengujian keausan dilakukan dengan salah satu gradasi berikut;

- Kerikil dan bola baja dimasukkan ke dalam mesin Abrasi Los Angeles.
- Putar mesin dengan kecepatan 30 s/d 33 rpm. Jumlah putaran sesuai



pemutaran, keluarkan kerikil dari mesin kemudian saring saringan No. 12 (1,7 mm). Butir yang tertahan dicuci bersih lalu ditimbang.

d. Perhitungan

$$\text{Keausan} = \frac{a - b}{a} \times 100\%$$

a = berat benda uji semula, gram

b = berat benda uji tertahan saringan No. 12, gram

2.5.4 Tahap Perhitungan Mix Design

1. Menentukan Mutu Beton rencana, $f'c$ (mutu beton rencana uji silinder)
2. Penetapan target Standard Deviasi Sr (kg/cm^2)

Standar deviasi (tingkat kualitas pekerjaan pembeconan), dapat ditetapkan dari Tabel

Tabel II.8 Daftar Standar Deviasi

Isi pekerjaan	Deviasi Standard Sr (kg/cm^2)		
	Baik sekali	Baik	Dapat diterima
Satuan jumlah Beton (m^3)			
Kecil < 1000	$45 < Sr < 55$	$55 < Sr < 65$	$65 < Sr < 85$
Sedang 1000-3000	$35 < Sr < 45$	$45 < Sr < 55$	$65 < Sr < 75$
Besar > 3000	$25 < Sr < 35$	$35 < Sr < 45$	$45 < Sr < 65$

3. Menghitung Besarnya Margin M

Dimaksudkan dengan menghitung margin disini adalah nilai yang harus ditambahkan pada kuat tekan karakteristik beton:

$$M = 1,64 \times Sr \text{ jika } Sr < 4\text{MPa}$$

$$M = 2,64 \times Sr \text{ jika } Sr > 4\text{MPa}$$

4. Menghitung Kuat Tekan Rata-Rata (f_{cr}) Uji Silinder Umur 28 Hari.

Kuat tekan rata – rata yang ditergetkan (f_{cr}), dihitung sebagai berikut :

$$F_{cr} = f_c + M$$

dimana Margin min = 12 jika jumlah sampel < 15.

5. Penetapan Tipe Semen

Type semen yang dipakai harus dinyatakan dalam desain campuran beton.

adalah perbandingan berat air bebas dan semen pada suatu (disingkat = f_{as})

Agregat:

ng mix-design beton, perlu dinyatakan tipe agregat yang dipakai m atau agregat batu pecah, karena hal ini mempengaruhi kadar mana pada Tabel Tipe Agregat Dan Perkiraan Kadar Air Bebas



Tabel II.9 Tipe Agregat dan Perkiraan Kadar Air Bebas

Slump (mm)		0 - 10	10 - 30	30 - 60	60 - 180
V.B. (det)		12	6 - 12	3 - 6	0 - 3
Ukuran maks. Agregat (mm)	Jenis agregat	Kadar Air Bebas dalam kg/m ³			
10	Alami	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20	Alami	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40	Alami	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

7. Penetapan Faktor Air Semen

Faktor air semen adalah perbandingan antara berat air bebas dan berat semen dalam pembuatan campuran beton. Kadar air bebas adalah berat air yang dibutuhkan jika agregatnya jenuh kering muka (SSD).

8. Faktor Air Semen Maksimum Berdasarkan Lingkungan

Untuk berbagai kondisi lingkungan dimana beton yang dirancang campurannya akan dikonstruksikan, disyaratkan suatu factor air semen maksimum yaitu fas yang tidak boleh dilewati, hal ini sudah ditetapkan oleh beberapa pedoman-pedoman beton.

Tabel II.10 Faktor Air Semen Maksimum pada Pembetonan yang Umum

Jenis Pembetonan	Semen Minimum (kg/m ³) beton	Faktor air semen maksimum
I. Beton dalam Ruang Bangunan		
I.1. Keadaan lingkungan non -korosif	275	0,60
I.2. Keadaan lingkungan korosif disebabkan oleh uap – uap korosif	325	0,52
II. Beton diluar ruang bangunan		
II.1. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325	0,60
II.2. Terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	275	0,60
III. Beton yang masuk dalam tanah.		
III.1. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti.	325	0,55
apat pengaruh sulfat alkali	375	0,52



Slump

an nilai slump memerlukan pengalaman pelaksanaan beton, ang-ancang slump dapat dijadikan patokan seperti pada Tabel i slump sangat tergantung dari :

- Cara pengangkutan (belt conveyer, pompa, manual, gerobak, dll)
- Cara pengecoran / penuangan pada acuan
- Cara pemadatan / penggetaran (alat getar / triller, hand vibrator)
- Jenis / tujuan struktur

10. Penetapan Kadar Air Bebas

Penetapan besar kadar air bebas (air yang diluar air jenuh) ditetapkan berdasarkan nilai slump yang dipilih, ukuran maksimum agregat, dan tipe agregat. Dapat digunakan Tabel 2 dan 7.

11. Penetapan Kadar Semen (kg/m^3) beton

Penetapan kadar semen perlu per m^3 beton (kg/m^3) digunakan rumus senagai berikut:

$$\text{Kadar Semen} = \frac{\text{Kadar Air Bebas}}{\text{Faktor Air Semen}}$$

12. Penetapan Perkiraan Berat Jenis Spesifik Gabungan

Perkiraan berat jenis gabungan agregat kasar dan agregat halus, dapat dihitung berdasarkan rumus berikut:

Berat jenis Spesifik Gabungan

$$= [a\% \times \text{B. J spesifik pasir}] + [b\% \times \text{B. J spesifik kerikil}]$$

Dimana :

a% = persentase penggabungan agregat halus terbaik (Penggabungan)

b% = persentase penggabungan agregat kasar terbaik (Penggabungan)

13. Perkiraan Berat Volume Beton Segar (basah)

Untuk memperkirakan berat volume basah beton digunakan Grafik 1 yaitu grafik hubungan antara berat volume basah beton, kadar air bebas dan berat jenis gabungan SSD.

14. Penetapan Porsi Agregat.

Berat agregat halus $\rightarrow A = a\% \times (D - W_s - W_a)$

Berat agregat kasar $\rightarrow A = b\% \times (D - W_s - W_a)$

dimana :

a% = Persentase penggabungan agregat halus (pasir)

b% = Persentase penggabungan agregat kasar (kerikil)

D = Berat volume beton basah (kg/m^3)

adar semen (kg/m^3) beton

adar air bebas (kg/m^3) beton

erat agregat halus kondisi SSD (kg/m^3) beton

erat agregat kasar kondisi SSD (kg/m^3) beton



15. Hasil Rancangan Campuran Beton (Bahan Kondisi SSD)

Campuran beton teoritis adalah porsi campuran dimana agregat masih dalam kondisi SSD (masih sulit untuk pelaksanaan dilapangan) yaitu :

Air = W_a (kg/m^3) beton

Semen = W_s (kg/m^3) beton

Pasir = A (kg/m^3) beton

Kerikil = B (kg/m^3) beton

Berat komponen beton teoritis adalah berat kondisi SSD (agregat kondisi jenuh air/kering permukaan), jadi masih perlu diperbaiki (dikoreksi) terhadap kondisi agregat lapangan saat akan dilaksanakan pengecoran (lihat pembahasan koreksi campuran beton poin 15)

16. Koreksi Campuran Beton

Untuk penyesuaian takaran berat agregat sesuai kondisinya pada saat akan dicampur, maka perlu dikoreksi agar pengambilan agregat untuk dicampur dapat langsung diambil. Dimaksudkan koreksi tersebut adalah koreksi terhadap kadar air sesaat agregat (kondisi agregat tidak selamanya SSD seperti pada hasil campuran teoritis dari poin n tersebut diatas. Koreksi campuran beton ada dua macam, yaitu :

a. Koreksi secara Eksak (rasional)

Uraian rumus :

BK = Berat kering mutlak (oven)

BL = Berat lapangan (sesuai kondisi agregat)

W% = Kadar air agregat sesuai kondisi agregat.

R% = Resapan agregat (terhadap berat kering)

Uraian rumus koreksi cara eksak (berdasarkan definisi % resapan air dan % kadar air):

$$BL = BK + W\% \times BL \rightarrow BL - (W\% \times BL) = BK$$

$$(1 - W\%) \times BL = BK$$

$$BL = \frac{BK}{1 - W\%} \dots \dots \dots (a)$$

$$BK = SSD - R\% \times BK \rightarrow BK + (R\% \times BK) = BSSD$$

$$(1 + R\%) \times BK = BSSD$$

$$BK = \frac{BSSD}{(1 + R\%)} \dots \dots \dots (b)$$



gunakan persamaan (a) dan (b) diperoleh :

$$BL = \frac{BSSD}{(1 + R\%) \times (1 - W\%)}$$

Dengan memakai index p untuk pasir dan index k untuk kerikil maka diperoleh rumusan koreksi secara eksak:

Berat koreksi pasir (p)

$$BLp = \frac{BSSD}{(1 + Rp\%) \times (1 - Wp\%)} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \text{ beton}$$

Berat koreksi kerikil (k)

$$BLk = k \frac{BSSD}{(1 + Rk\%) \times (1 - Wk\%)} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \text{ beton}$$

Sehingga berat komponen beton setelah dikoreksi (kg/m^3) adalah :

Semen = W_s

Pasir = BLp

Kerikil = BLk

Air = Kadar air bebas + $(A - BLp) + (B - BLk)$

Berat komponen diatas merupakan takaran berat, untuk pelaksanaan dilapangan dibagi dengan masing-masing berat volumenya akan diperoleh takaran volume.

b. Koreksi cara pendekatan (estimate)

Koreksi ini berdasarkan nilai pendekatan (estimate), karena pengertian defenisi resapan dan kadar air berorientasi berat lapangan. Koreksi tersebut adalah dalam (kg/m^3) beton:

Semen = W_s

Pasir = $BLp = A - (Rp\% - Wp\%) \times A/100$

Kerikil = $BLk = B - (Rk\% - Wk\%) \times B/100$

Air = Kadar air bebas + $(A - BLp) + (B - BLk)$

A dan B masing merupakan berat SSD dari pasir dan kerikil.

2.5.5 Tahap Pembuatan Beton Segar (Benda Uji)

Berikut ini merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam proses pembuatan benda uji. Seluruh proses dilakukan secara sistematis perhitungan mix design yang telah ditetapkan sebelumnya.
 1. persiapan alat, penimbangan bahan, proses pencampuran bahan, hingga pengujian awal seperti slump test sebelum beton akan benda uji. Setiap langkah dilakukan dengan hati-hati guna menghasilkan benda uji yang homogenitas campuran, serta validitas hasil uji kuat tekan



1. Alat dan perlengkapan yang akan digunakan dalam proses pembuatan beton segar harus dipastikan dalam kondisi bersih sebelum digunakan. Pembersihan dilakukan terhadap seluruh alat seperti wadah pengaduk, ember, skop, timbangan, saringan, loyang, cetok besi, dan sendok cekung agar tidak ada kotoran atau sisa material sebelumnya yang bisa memengaruhi hasil pencampuran beton.
2. Seluruh bahan yang akan digunakan ditimbang sesuai proporsi yang telah ditentukan dalam hasil perancangan mix design. Pada tahap ini juga dilakukan proses substitusi sebagian agregat kasar konvensional (kerikil) dengan bahan HDPE dari limbah kantong plastik, sesuai variasi persentase yang sudah ditetapkan dalam rancangan campuran.
3. Wadah yang akan digunakan untuk proses pencampuran dibasahi terlebih dahulu. Proses ini bertujuan untuk mencegah penyerapan air pencampuran oleh permukaan dinding wadah, sehingga volume air yang masuk ke dalam campuran beton tidak berkurang. Dengan demikian, rasio air terhadap semen (w/c ratio) tetap sesuai dengan yang direncanakan.
4. Proses pencampuran dilakukan sebanyak empat kali untuk masing-masing variasi campuran, yaitu beton normal tanpa HDPE (0.00%) dan beton dengan penambahan HDPE sebanyak 0.50%, 0.70%, dan 0.90% dari berat total agregat halus. Setiap variasi dibuat secara terpisah agar hasil uji bisa dibandingkan
5. Langkah pencampuran dimulai dengan memasukkan batu pecah ke dalam wadah hand mixer dalam kondisi menyala atau berputar. Setelah itu, pasir dan semen dimasukkan secara perlahan sambil mixer terus beroperasi. Pencampuran dilakukan selama beberapa menit untuk memastikan semua bahan kering seperti batu pecah, pasir, dan semen dapat tercampur secara merata sebelum ditambahkan bahan lainnya.
6. Setelah bahan-bahan kering tercampur dengan baik, air ditambahkan sedikit demi sedikit ke dalam campuran. Air yang telah ditentukan volumenya sebelumnya dibagi menjadi dua bagian, yaitu sepertiga bagian pertama dan dua pertiga bagian berikutnya. Campuran kemudian diaduk kembali menggunakan hand mixer selama minimal 3 menit, hingga campuran menjadi homogen dan tidak ada bagian yang menggumpal atau belum tercampur sempurna.
7. Campuran beton yang sudah homogen kemudian dikeluarkan dari hand mixer ke dalam wadah lain. Sebelum dilakukan pencetakan benda uji, campuran dahulu diuji menggunakan alat slump untuk mengetahui tingkat (ability) dari beton segar tersebut.



an Slump

on merupakan salah satu metode untuk mengukur kelecakan an beton segar, yang mencerminkan kemampuan beton untuk si cetakan tanpa mengalami segregasi. Pengujian ini penting

dilakukan untuk memastikan bahwa beton yang dihasilkan memiliki workability sesuai dengan kebutuhan pelaksanaan di lapangan. Dalam penelitian ini, pengujian slump dilakukan berdasarkan standar SNI 03-1972-1990 dengan prosedur dan alat uji yang telah ditetapkan secara sistematis. Hasil dari pengujian ini akan menjadi acuan awal dalam menilai kualitas beton segar sebelum dilakukan proses pencetakan benda uji.

1. Tujuan

Untuk memperoleh angka slump beton. Slump beton adalah besaran kekentalan (viscosity) /plastisitas dan kohesif dari beton segar.

2. Peralatan

- Cetakan dari logam dengan tebal 1,2 mm berupa kerucut terpancung (cone) dengan diameter bagian bawah 203 mm, bagian atas 102 mm, dan tinggi 305 mm, bagian bawah dan atas cetakan terbuka.
- Tongkat pemadat dengan diameter 16 mm, panjang 600 mm
- Pelat logam dengan permukaan yang kokoh, rata dan kedap air
- Sendok cekung
- Mistar ukur

3. Benda Uji

Pengambilan benda uji harus dari contoh beton segar yang mewakili campuran beton.

4. Prosedur Pengujian

- Basahi cetakan dan pelat dengan kain basah
- Letakkan cetakan diatas pelat dengan kokoh
- Isilah cetakan sampai penuh dengan beton segar dalam 3 lapis. Tiap lapis berisi $\pm 1/3$ isi cetakan; setiap lapis ditusuk dengan tongkat pemadat sebanyak 25 tusukan secara merata.
- Ratakan permukaan benda uji dengan tongkat dan semua sisa benda uji yang jatuh disekitar cetakan harus disingkirkan. Kemudian cetakan diangkat perlahan-lahan tegak lurus ke atas.
- Balikkan cetakan dan letakkan perlahan-lahan disamping benda uji, ukurlah slump dengan menentukan perbedaan tinggi cetakan dengan tinggi rata-rata benda uji.

2.5.7 Tahap Pencetakan Benda Uji



Setelah selesai dipersiapkan dan diuji nilai slump-nya, langkah proses pencetakan benda uji menggunakan cetakan silinder bertujuan untuk membentuk spesimen beton yang akan diujikan kuat tekan pada umur tertentu. Setiap tahapan dilakukan secara terstruktur agar sampel yang dihasilkan memiliki bentuk, ukuran, dan sifat yang sesuai standar pengujian. Berikut ini adalah tahapan-

tahapan pencetakan benda uji beton yang dilakukan dalam penelitian ini:

1. Menyiapkan cetakan silinder dengan ukuran standar, yaitu diameter bagian dalam sekitar 10 cm dan tinggi 20 cm. Cetakan harus dalam kondisi bersih dan kokoh agar tidak terjadi kebocoran atau deformasi selama proses pengecoran.
2. Melumasi permukaan bagian dalam cetakan menggunakan oli atau bahan pelumas khusus. Tujuan pelumasan ini adalah untuk mempermudah pelepasan benda uji setelah beton mengeras, serta mencegah kerusakan permukaan sampel saat dikeluarkan dari cetakan.
3. Setelah dilakukan pengujian slump, beton segar langsung dituangkan ke dalam cetakan secara bertahap sebanyak dua lapisan. Setiap lapisan diisi setengah volume cetakan.
4. Masing-masing lapisan dipadatkan menggunakan tongkat pemadat dengan cara ditusuk sebanyak 15 kali secara merata. Pemadatan dilakukan untuk menghilangkan udara terjebak dan memastikan beton mengisi seluruh volume cetakan secara sempurna.
5. Setelah lapisan kedua terisi dan dipadatkan, permukaan atas beton diratakan menggunakan alat perata agar sejajar dengan bibir cetakan dan memiliki permukaan yang halus.
6. Cetakan kemudian digetarkan menggunakan alat vibrator atau dengan cara mengetuk-ngetuk sisi luar cetakan secara perlahan untuk meningkatkan kerapatan beton dan mengurangi porositas.
7. Setelah selesai, cetakan yang telah terisi beton dibiarkan di tempat yang terlindung dari panas matahari langsung dan getaran selama kurang lebih 48 jam untuk proses pengerasan awal.
8. Setelah beton dibiarkan selama kurang lebih 48 jam, sampel dikeluarkan dari cetakan dengan hati-hati, lalu dilanjutkan ke tahap perawatan benda uji.

2.5.8 Tahap Perawatan Benda Uji

Pada tahap ini dilakukan perawatan benda uji menggunakan metode perawatan basah (*wet curing*) untuk menjaga kelembaban beton selama proses hidrasi berlangsung. Perawatan ini bertujuan agar beton mencapai kekuatan optimum dengan mencegah penguapan air yang terlalu cepat dari dalam campuran beton. Langkah-langkah perawatan benda uji dengan metode *wet curing* adalah sebagai berikut:



Sebelum dikeluarkan dari cetakan selama ± 24 jam, benda uji dikeluarkan dari cetakan untuk menghindari kerusakan fisik pada

Setelah dikeluarkan kemudian segera direndam dalam tangki atau bakul yang berisi air bersih dengan suhu ruang. Air harus dalam jumlah

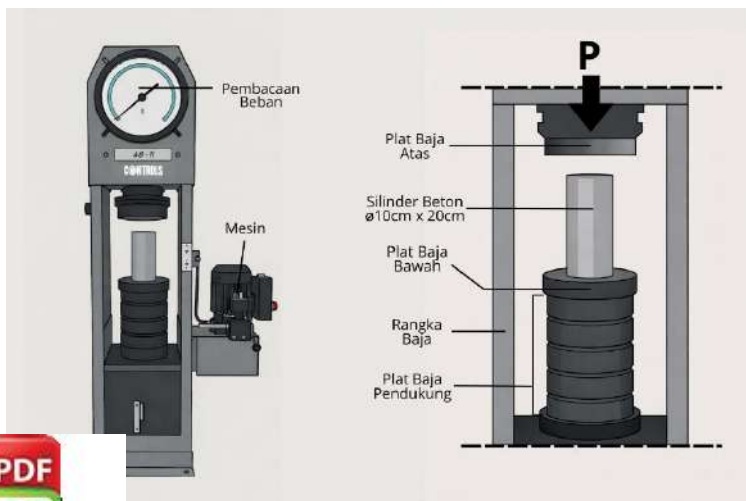
cukup untuk merendam seluruh permukaan benda uji.

3. Benda uji direndam selama periode yang telah ditentukan sesuai umur pengujian, yaitu pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari. Setiap benda uji dikeluarkan dari perendaman hanya pada saat akan dilakukan pengujian kuat tekan.
4. Selama proses perendaman, pastikan suhu air stabil dan tidak terkena sinar matahari langsung agar kondisi curing tetap optimal dan air dalam tangki perawatan dicek secara berkala untuk memastikan benda uji tetap terendam sepenuhnya.

2.5.9 Tahap Pengujian Benda Uji

Pengujian kuat tekan beton dilakukan untuk menentukan kemampuan beton dalam menahan gaya tekan hingga mengalami keruntuhan. Nilai kuat tekan menjadi parameter utama dalam menilai mutu campuran beton. Pengujian dilakukan pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari menggunakan Universal Testing Machine (UTM) kapasitas 1000 kN, mengacu pada SNI 03-1974-1990. Tahapannya sebagai berikut:

1. Benda uji yang telah menjalani perawatan basah (wet curing) dikeluarkan dari tangki perendaman, kemudian dikeringkan menggunakan lap bersih hingga tidak ada air bebas pada permukaannya. Setelah itu benda uji didiamkan pada suhu ruang untuk menstabilkan kondisi permukaan sehingga tidak memengaruhi hasil pengujian.
2. Silinder beton diletakkan secara **vertikal** di tengah pelat tekan mesin (posisi sentris). Penempatan tidak sentris dapat menyebabkan distribusi beban tidak merata sehingga hasil pengujian menjadi tidak akurat atau tidak valid.



Gambar II.1 Mekanisme Pengujian Kuat Tekan Beton

kan dengan memberikan beban tekan secara bertahap dan mbebanan mengikuti standar sesuai konfigurasi mesin. Beban hingga benda uji mencapai titik keruntuhan.



4. Pada saat beton hancur, mesin secara otomatis mencatat nilai beban maksimum yang ditahan. Nilai ini merupakan dasar dalam menghitung kuat tekan beton menggunakan rumus luas penampang benda uji. Kuat tekan dihitung menggunakan persamaan:

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

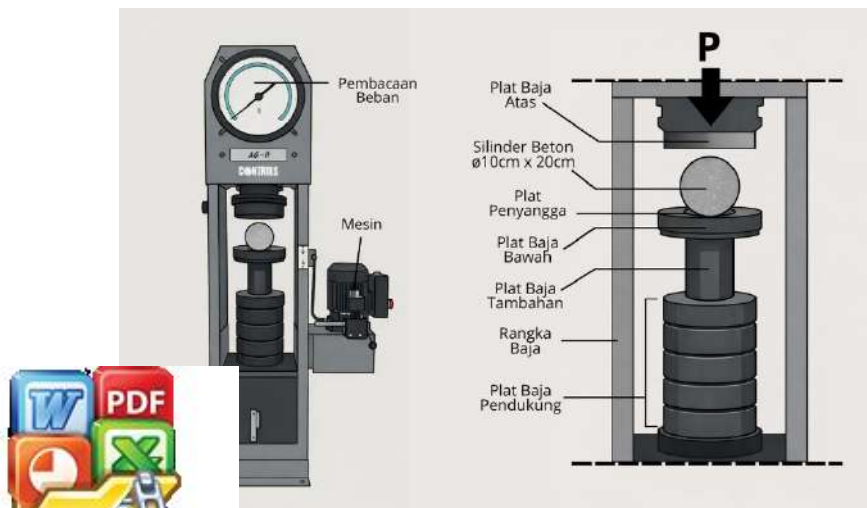
Di mana:

P = beban maksimum (N)

A = luas penampang benda uji (mm²)

Pengujian kuat tarik belah bertujuan untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan gaya tarik tidak langsung. Beban diberikan secara horizontal pada sisi samping silinder sehingga menghasilkan tegangan tarik di bidang vertikal beton. Pengujian dilakukan pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari menggunakan Universal Testing Machine (UTM) dengan kapasitas 1000 kN. Proses pengujiannya mengacu pada SNI 03-2491-2002 dengan tahapan sebagai berikut:

1. Benda uji yang telah menjalani perawatan basah (wet curing) dikeluarkan dari tangki perendaman dan dikeringkan menggunakan lap bersih. Setelah itu, benda uji didiamkan beberapa saat pada suhu ruang hingga kondisi permukaan stabil untuk menghindari pengaruh air bebas terhadap hasil uji.
2. Silinder beton diletakkan dalam posisi **horizontal** di antara dua pelat penyangga (bearing strips). Kedua strip ini berfungsi mendistribusikan beban agar tidak terjadi konsentrasi tegangan di titik tertentu. Posisi benda uji harus benar-benar berada di tengah (sentris) agar tegangan tarik terbentuk merata sepanjang garis vertikal benda uji.



gambar II.2 Mekanisme Pengujian Kuat Tarik Belah Beton



- Mesin UTM dijalankan dengan menambahkan beban secara bertahap dan konstan. Laju pembebanan mengikuti standar sesuai konfigurasi mesin. Beban diberikan terus-menerus sampai benda uji mengalami retak di sepanjang bidang vertikalnya—tanda bahwa beton tidak lagi mampu menahan tegangan tarik.
- Ketika benda uji retak atau hancur, mesin mencatat nilai beban maksimum yang diterima. Nilai ini kemudian digunakan untuk menghitung kuat tarik belah beton dengan rumus:

$$f_t = \frac{2P}{\pi L D}$$

Di mana:

- P = beban maksimum (N)
 L = panjang benda uji (mm)
 D = diameter benda uji (mm)

Pengujian absorpsi beton bertujuan untuk menentukan kemampuan beton dalam menyerap air melalui pori-pori internalnya. Nilai absorpsi digunakan untuk menilai kualitas kerapatan beton, tingkat porositas, serta pengaruh variasi campuran, termasuk substitusi agregat HDPE. Prosedur pengujian mengacu pada ASTM C642 atau standar sejenis dengan tahapan sebagai berikut:

- Benda uji beton yang telah mengeras dikeringkan di dalam oven pada suhu $\pm 105^\circ\text{C}$ hingga mencapai massa konstan. Massa konstan dicapai ketika selisih dua kali penimbangan berturut-turut tidak lebih dari 0,5 gram. Setelah selesai, benda uji dikeluarkan dari oven dan didinginkan dalam desikator hingga mencapai suhu ruang untuk menghindari penyerapan uap air yang tidak terkontrol.
- Setelah dingin, benda uji ditimbang untuk mendapatkan massa kering (dry weight). Nilai ini menjadi dasar perhitungan absorpsi karena mewakili kondisi beton dengan pori-pori yang sepenuhnya kosong dari air.
- Benda uji kemudian direndam seluruhnya dalam air bersih selama 24 jam. Perendaman dilakukan tanpa gelembung udara yang terperangkap agar proses penyerapan air berlangsung maksimal dan merata.
- Setelah masa perendaman selesai, benda uji diangkat dan permukaannya dikeringkan secara cepat menggunakan kain lembut sampai mencapai kondisi SSD (Saturated Surface Dry), yaitu jenuh air tetapi tidak ada air bebas yang menetes. Pada kondisi ini benda uji langsung ditimbang untuk mendapatkan nilai absorpsi beton dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Absorpsi (\%)} = \frac{W_{ssd} - W_d}{W_d} \times 100\%$$

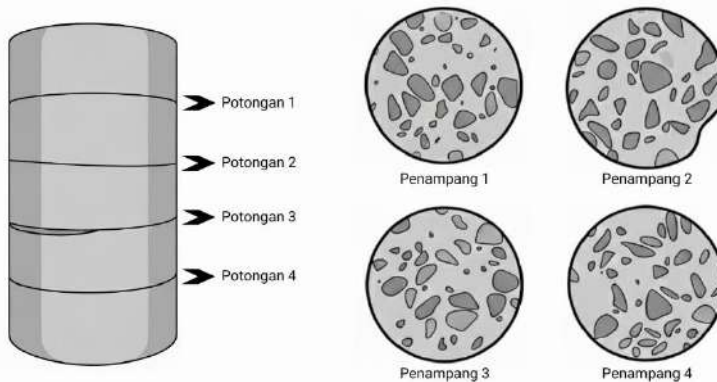
ring (dry weight)

juh air (SSD)



Analisis penampang beton dilakukan untuk memberikan gambaran visual mengenai kondisi struktur internal beton setelah proses pengerasan. Pengamatan penampang dimaksudkan untuk menilai konsistensi struktur beton sepanjang tinggi benda uji. Perbedaan distribusi agregat dan pola rongga antar penampang dapat menunjukkan adanya variasi proses pemadatan, perbedaan aliran pasta semen, atau kecenderungan segregasi selama pengecoran. Hal ini menjadi penting terutama pada beton dengan substitusi agregat HDPE, yang memiliki karakteristik fisik berbeda dibandingkan agregat konvensional. Adapun tahapan analisis penampang adalah sebagai berikut.

1. Benda uji yang telah menjalani perawatan basah (wet curing) dikeluarkan dari tangki perendaman dan dikeringkan menggunakan lap bersih. Setelah itu, benda uji didiamkan beberapa saat pada suhu ruang hingga kondisi permukaan stabil.
2. Benda uji diberi tanda alur pemotongan dengan jarak 4cm untuk setiap tanda, artinya pada benda uji dengan tinggi 20cm menghasilkan 4 potongan.



Gambar II.3 Mekanisme Potongan Analisis Penampang

3. Benda uji kemudian dipotong sesuai dengan tanda yang telah dibuat.
4. Potongan benda uji kemudian dicuci bersih untuk menghilangkan debu bekas potongan dan kemudian dikeringkan.
5. Dilakukan pengamatan pada hasil potongan benda uji untuk mengetahui karakteristik ketersebaran agregat kasar HDPE pada masing-masing variasi.

2.5.10 Tahap Analisis Data

Tahap ini bertujuan untuk mengolah dan mengevaluasi hasil pengujian kuat tekan dari benda uji beton yang telah dibuat dengan variasi substitusi HDPE. Data yang diuji kuat tekan pada umur 28 hari dianalisis untuk mengetahui pengaruh substitusi HDPE terhadap nilai tersebut.



Analisis dilakukan sebagai berikut:

Menentukan kuat tekan dan kuat tarik belah maksimum (MPa) untuk setiap masing-masing variasi (0,00%, 0,50%, 0,70%, dan 0,90% HDPE) berdasarkan hasil pembacaan mesin UTM.

2. Untuk setiap variasi dan umur uji, dihitung nilai rata-rata dari tiga benda uji silinder untuk mendapatkan hasil yang lebih representatif.
3. Hasil rata-rata kuat tekan untuk tiap variasi HDPE dibandingkan dengan beton normal (0% HDPE) untuk mengetahui pengaruh substitusi HDPE terhadap kekuatan beton.
4. Data hasil uji disajikan dalam bentuk grafik batang atau garis untuk memperlihatkan tren kekuatan beton berdasarkan persentase HDPE dan umur pengujian. Hal ini memudahkan pembaca melihat hubungan antar variabel secara visual.
5. Dari hasil perbandingan dan grafik, dilakukan analisis apakah penggunaan HDPE memperkuat atau justru menurunkan kuat tekan beton, dan pada persentase berapa pengaruh paling signifikan terjadi.

2.5.11 Kesimpulan Penelitian

Setelah seluruh data dianalisis, tahap ini digunakan untuk menarik kesimpulan berdasarkan hasil yang diperoleh selama penelitian. Kesimpulan difokuskan pada pencapaian tujuan penelitian, yaitu untuk mengetahui sejauh mana pengaruh substitusi agregat kasar dengan limbah HDPE terhadap sifat mekanik (kuat tekan) beton.

Kesimpulan meliputi poin-poin berikut:

1. Pengaruh Substitusi HDPE

Berdasarkan hasil uji kuat tekan, terlihat bahwa substitusi HDPE pada agregat kasar memberikan pengaruh terhadap nilai kekuatan beton pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari.

2. Persentase Substitusi Optimal

Dapat disimpulkan bahwa terdapat batas optimal substitusi HDPE, di mana pada persentase tertentu beton masih mampu mempertahankan atau bahkan sedikit meningkatkan kekuatan tekan begitupun sebaliknya



2.6 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian ini disusun untuk menggambarkan alur berpikir secara sistematis dalam menjawab rumusan masalah serta mencapai tujuan penelitian, mulai dari tahap awal hingga diperolehnya kesimpulan akhir berdasarkan hasil analisis data.

