

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2. 1 Landasan Teori

2. 1. 1 Pengertian Beton

Beton ialah campuran dari kerikil, pasir, batu pecah, atau agregat lainnya yang disatukan oleh pasta dari semen dan air, membentuk massa yang menyerupai batu. Meski terlihat sederhana, beton sebenarnya material yang kompleks. Pembuatan beton dapat dilakukan dengan mudah, bahkan oleh orang yang tidak memiliki pemahaman terkait teknologi beton. Namun, anggapan yang salah tentang kemudahan ini sering kali menyebabkan masalah pada kualitas produk, dan berkontribusi pada reputasi buruk beton sebagai bahan konstruksi. Beton yang telah mengeras bisa disebut sebagai batuan buatan, di mana celah-celah di antara butiran besar (agregat kasar atau batu pecah) diisi butiran kecil (agregat halus atau pasir), sedangkan pori-pori di antara agregat halus diisi campuran semen dan air (pasta semen). (Naim dkk., 2018). Kualitas beton sangat dipengaruhi oleh kualitas masing-masing bahan penyusunnya, karena beton merupakan material komposit (Sidharta & Sasongko, 2024).

Pada jenis beton tertentu, bahan tambahan atau *admixture* sering kali ditambahkan untuk memperbaiki atau mengubah sifat-sifat beton, seperti mempercepat atau memperlambat waktu pengikatan, meningkatkan kekuatan, ketahanan terhadap cuaca ekstrem, atau menurunkan jumlah air yang diperlukan. Setiap elemen di campuran beton memengaruhi signifikan sifat akhir dari beton tersebut. Misalnya, kualitas semen yang digunakan akan sangat mempengaruhi kekuatan beton, sementara proporsi agregat halus dan kasar akan menentukan tingkat kepadatan dan porositas (Mulyadi dkk., 2021).

Berdasarkan SNI 03-2834-2000 Istilah-istilah tersebut didefinisikan sebagai berikut:

1. Beton adalah campuran semen Portland atau semen hidraulik lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambah, yang membentuk massa padat.

2. Beton normal merupakan beton dengan berat isi sekitar 2200–2500 kg/m³ yang menggunakan agregat alam atau batu pecah.
3. Agregat halus adalah pasir alami atau hasil pemecahan batu dengan ukuran butir maksimum 5 mm.
4. Agregat kasar berupa kerikil atau batu pecah dengan ukuran butir antara 5 mm hingga 40 mm.
5. Kuat tekan beton yang disyaratkan (f'_c) adalah nilai kuat tekan yang ditentukan perencana berdasarkan benda uji silinder (30 x 15 cm) dan kuat lentur berdasarkan benda uji balok (15 x 15 x 60 cm).
6. Kuat tekan target (f_{cr}) adalah kuat tekan rata-rata yang diharapkan tercapai dan lebih besar dari f'_c .
7. Kadar air bebas adalah jumlah air yang ditambahkan untuk mencapai konsistensi tertentu, tidak termasuk yang terserap agregat.
8. Faktor air semen adalah perbandingan berat air bebas terhadap berat semen.
9. *Slump* adalah ukuran kelecakan beton (mm) yang ditentukan dengan kerucut Abrams.
10. Pozolan adalah bahan yang mengandung silika amorf yang dapat bereaksi dengan kapur dan air membentuk senyawa keras.
11. Semen Portland pozzolan adalah campuran semen Portland dengan bahan pozzolan sebesar 15–40% dengan kandungan oksida tertentu minimal 70%.
12. Semen Portland tipe I digunakan untuk keperluan umum.
13. Semen Portland tipe II memiliki ketahanan sulfat dan panas hidrasi sedang.
14. Semen Portland tipe III digunakan untuk kekuatan awal tinggi.
15. Semen Portland tipe V digunakan untuk kondisi dengan ketahanan sulfat tinggi.
16. Bahan tambah adalah material selain bahan utama yang ditambahkan untuk memodifikasi sifat beton untuk tujuan tertentu.

2. 1. 2 Komponen Penyusun

Menurut (Piusaputri dkk., 2023) beton terdapat beberapa kandungan yang tersusun untuk bisa membentuk suatu beton normal, diantaranya:

1. Semen

- a) Berdasarkan SNI 2049:2015, *Ordinary Portland Cement* (OPC) Tipe I merupakan semen hidraulis murni yang dihasilkan dari penggilingan klinker dan gipsum tanpa bahan anorganik tambahan. Dalam praktik teknik sipil, jenis semen ini dikenal memiliki laju hidrasi yang cepat sehingga menghasilkan kenaikan kuat tekan awal (*early strength*) yang sangat tinggi. Karakteristik ini membuat OPC sangat ideal digunakan pada pekerjaan struktur utama yang membutuhkan proses pelepasan bekisting secara cepat atau struktur yang dirancang untuk menerima beban kerja sejak dini, seperti pada konstruksi gedung bertingkat, jembatan, dan jalan raya. Standar SNI mensyaratkan nilai kuat tekan minimum untuk semen OPC sebesar 28,0 MPa pada umur pengujian 28 hari dengan kehalusan gilingan (*Blaine*) minimal 280 m²/kg.
- b) Semen Portland *Pozzolan* (PPC) menurut SNI 0302:2014 didefinisikan sebagai semen hidraulis hasil campuran homogen antara klinker portland dan bahan pozzolan halus (seperti *fly ash* atau abu vulkanik) dengan proporsi 15% hingga 40% dari total massa semen. Dilihat dari kacamata perilaku struktur dan bahan beton, keberadaan bahan pozzolan ini menyebabkan kenaikan kuat tekan awal beton (umur 3 sampai 7 hari) relatif lebih lambat dibandingkan OPC. Namun, dalam jangka panjang (umur 28 hari ke atas), semen ini menghasilkan porositas beton yang jauh lebih kecil dan struktur pori yang lebih rapat. Efek positifnya, beton menjadi lebih kedap air, memiliki reaksi panas hidrasi yang rendah untuk mencegah retak termal, serta lebih tahan terhadap serangan lingkungan agresif seperti air laut dan sulfat. Oleh karena itu, PPC sangat direkomendasikan untuk pekerjaan beton massa (*mass concrete*), pondasi dalam, serta struktur perairan dan dermaga.
- c) Merujuk pada SNI 7064:2014, Semen *Portland Composite* (PCC) merupakan semen serbaguna yang dibuat dengan menggiling klinker

portland bersama bahan anorganik tambahan—seperti batu kapur (*limestone*), pozzolan, atau *slag* dengan kadar total 6% hingga 35%. Dari sudut pandang teknologi beton, butiran halus bahan pengisi (*micro-filler*) dalam PCC berfungsi mengisi rongga-rongga mikro di antara agregat. Hal ini secara signifikan meningkatkan tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*), membuat adukan beton segar tidak mudah terpisah (*bleeding* atau segregasi), serta mengurangi risiko retak akibat penyusutan (*shrinkage*) saat beton mengering. Dengan syarat kuat tekan minimum SNI sebesar 28,0 MPa pada umur 28 hari, semen PCC menjadi pilihan yang sangat efisien dan populer untuk konstruksi umum, perumahan, pekerjaan pemasangan, hingga pembuatan elemen beton pracetak (*precast*).

2. Agregat Halus

Merupakan komponen penting dalam campuran beton, yang umumnya terdiri dari pasir alam. Pasir ini terbentuk melalui proses disintegrasi alami batuan yang terjadi selama ribuan tahun akibat pengaruh cuaca, air, dan faktor-faktor lingkungan lainnya. Ukuran butir agregat halus biasanya lebih kecil dari 3/16 inci atau sekitar 5 mm, yang berarti bahwa agregat ini lolos dari saringan nomor 4. Ukuran butir yang halus ini penting karena memberikan beberapa manfaat dalam campuran beton. Agregat halus membantu mengisi ruang kosong antara butiran agregat kasar, sehingga meningkatkan kepadatan campuran beton. Hal ini berkontribusi terhadap pengurangan porositas dan meningkatkan daya tahan beton terhadap penetrasi air dan bahan kimia.

3. Agregat Kasar

Merupakan komponen kunci pada pembuatan beton yang biasanya terdiri dari kerikil. Kerikil ini dapat diperoleh melalui proses disintegrasi alami batuan yang terjadi seiring waktu, di mana berbagai faktor lingkungan seperti cuaca, air, dan tekanan mekanis menyebabkan batuan besar mengalami pelapukan dan pembentukan butiran yang lebih kecil. Selain kerikil yang berasal dari proses alami, agregat kasar juga bisa dihasilkan melalui pemecahan batu (*stone crushing*), di mana batuan besar dihancurkan menjadi butiran-butiran yang sesuai untuk digunakan dalam campuran beton. Ukuran butir agregat kasar bervariasi, namun umumnya berada dalam rentang antara 5 mm hingga 40 mm,

dan biasanya tertahan pada saringan nomor 4. Rentang ukuran ini sangat penting karena berpengaruh terhadap karakteristik fisik beton yang dihasilkan.

4. *Admixture*

Merupakan bahan tambahan yang dipergunakan di campuran beton guna mencapai sifat tertentu yang diinginkan, seperti meningkatkan kekuatan, daya tahan, serta kemampuan kerja beton. Di konteks konstruksi, *admixture* memainkan peran penting dalam meningkatkan performa dan kualitas beton, memungkinkan insinyur dan praktisi untuk menyesuaikan karakteristik beton sesuai dengan kebutuhan spesifik proyek. Salah satu jenis *admixture* yang sangat penting adalah *superplasticizer*. *Superplasticizer* adalah bahan tambahan yang dicampurkan ke dalam beton segar dengan tujuan untuk meningkatkan nilai *slump*, yang merupakan ukuran konsistensi atau kemampuan aliran beton.

2. 1. 3 Kuat Tekan Beton

Kuat tekan merupakan kemampuan suatu material untuk menahan beban hingga mencapai kondisi retak atau mengalami kerusakan. Parameter ini menjadi salah satu indikator utama dalam menilai kualitas material, terutama beton, karena sangat berkaitan dengan kinerja dan ketahanan struktur. Dalam perencanaan dan perhitungan struktur, nilai kuat tekan harus diperhatikan secara teliti agar struktur yang dirancang mampu menahan beban sesuai dengan yang direncanakan (Puja dkk., 2020). Nilai kuat tekan umumnya dinyatakan dalam satuan Mega Pascal (MPa) dan diperoleh melalui proses pengujian menggunakan mesin uji tekan di laboratorium. Pengujian ini dilakukan dengan prosedur dan peralatan yang telah memenuhi standar yang ditetapkan, sehingga hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan. Data hasil pengujian tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam evaluasi mutu beton, dengan mengacu pada ketentuan yang berlaku seperti SNI 03-0349-1989 (Sultan dkk., 2023).

Kuat tekan dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya sebagai berikut:

- a. Komposisi bahan penyusun. Perbandingan campuran antara semen, air, dan agregat memiliki pengaruh langsung terhadap nilai kuat tekan yang dihasilkan.
- b. Tingkat kepadatan material. Proses pencampuran serta pencetakan yang dilakukan dengan baik akan meningkatkan kepadatan dan meminimalkan

adanya rongga, retak, atau cacat, sehingga kuat tekan material menjadi lebih tinggi.

- c. Proses curing. Perawatan yang tidak optimal selama proses curing dapat menyebabkan timbulnya retakan pada benda uji dan berpotensi menurunkan kekuatannya.
- d. Umur benda uji. Semakin lama waktu pengerasan maka akan semakin tinggi kuat tekan yang dicapai, pengujian kuat tekan sering dilakukan pada umur 7,14 dan 28 hari untuk mengetahui perkembangan kekuatan material.

2. 1. 4 Kuat Lentur Beton

Kuat lentur adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya tegak lurus sumbu benda uji hingga patah, dinyatakan dalam satuan tegangan (MPa). Secara mekanik, kuat lentur merupakan tegangan tarik yang dihasilkan dari momen lentur dibagi momen tahanan penampang balok uji. Berdasarkan SNI 4431-2011, pengujian kuat lentur menggunakan metode *Third-Point Loading* (tiga titik pembebanan) dengan beban diberikan pada jarak sepertiga dari masing-masing tumpuan, sehingga terbentuk daerah momen maksimum konstan di sepertiga bentang tengah balok. Keunggulan metode dua titik beban dibanding satu titik terpusat adalah memastikan patahan terjadi pada titik terlemah dalam area momen maksimum, menghasilkan pengujian yang lebih akurat dan representatif terhadap kekuatan murni beton tanpa dominasi pengaruh gaya geser.

Performa kuat lentur dalam penelitian ini secara teoritis sangat dipengaruhi oleh kualitas ikatan antara pasta semen dan agregat kasar pada zona transisi antarmuka. Penggunaan limbah keramik sebagai substitusi agregat kasar memberikan keunggulan mekanis melalui tekstur permukaan yang kasar dan bersudut (*angular*), yang memicu efek *interlocking* lebih kuat dibandingkan agregat alami yang cenderung bulat (Wicaksono & Sudjati, 2012).

2. 1. 5 Limbah Keramik

Keramik merupakan kategori produk yang sebagian besar terbuat dari tanah liat. Tanah liat dibentuk dan dibakar pada suhu mulai dari 600° Celsius hingga lebih dari 1300° Celsius untuk meningkatkan kekuatannya. Keramik awalnya diproduksi semata-mata untuk keperluan pembuatan peralatan rumah tangga dan tembikar. Meskipun demikian, pemanfaatan keramik menjadi lebih umum karena adanya

campuran logam paduan yang mengandung unsur logam dan non-logam. Saat ini, keramik banyak digunakan sebagai bahan Baku untuk peralatan cetak, isolator listrik, dan busi. Keramik mampu beroperasi pada suhu tinggi. Keramik industri dan keramik tradisional merupakan dua kategori keramik yang berbeda. (Moropoulou dkk., 1995).

Menurut SNI 06-0252-1996, keramik didefinisikan sebagai bahan bangunan yang dihasilkan dari tanah liat yang diproses serta dibakar di suhu tinggi. Keramik memiliki berbagai jenis, termasuk keramik struktural, keramik non-struktural, dan keramik teknis, yang digunakan sesuai dengan fungsinya masing-masing.

Limbah keramik merupakan material sisa dari industri bahan bangunan atau puing bongkaran konstruksi yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan kembali sebagai substitusi agregat kasar dalam campuran beton. Secara fisik, limbah keramik memiliki karakteristik yang sangat berbeda dibandingkan dengan agregat alam seperti kerikil. Pecahan keramik umumnya memiliki bentuk yang lebih bersudut (angular) dengan tekstur permukaan yang kasar (Setiawan dkk., 2023).

Tingginya nilai porositas dan kapasitas absorpsi air pada pecahan keramik ini menuntut ketelitian khusus dalam tahap perencanaan proporsi campuran (*mix design*). Jika agregat keramik digunakan dalam kondisi kering udara tanpa perlakuan awal, material tersebut akan menyerap air semen yang seharusnya berfungsi untuk memicu reaksi hidrasi senyawa kalsium silikat. Dampak langsung dari fenomena ini adalah percepatan waktu ikat awal (*initial setting time*) pasta semen secara tidak terencana, yang pada akhirnya menurunkan densitas matriks mortar dan menciptakan rongga-rongga udara mikro di sekeliling agregat. Untuk mengantisipasi degradasi mutu tersebut, beberapa metode rekayasa pengondisian dapat diterapkan, seperti perendaman agregat selama 24 jam sebelum pencampuran hingga mencapai kondisi SSD, atau dengan menambahkan dosis air bebas secara terukur (*effective water-cement ratio adjustment*) serta pemanfaatan bahan tambah kimiawi berupa *superplasticizer* untuk mempertahankan nilai *slump* tanpa harus merusak rasio air-semen nominal beton (Medina dkk., 2012). Ditinjau dari karakteristik berat isi atau densitasnya, penggunaan limbah keramik sebagai pengganti agregat kasar secara linier akan mereduksi berat sendiri (*self-weight*) dari

struktur beton itu sendiri. Berat jenis spesifik (*specific gravity*) dari pecahan keramik umumnya berkisar antara 2,2 hingga 2,4, nilai yang terhitung lebih rendah jika dibandingkan dengan berat jenis batu pecah alami atau basal yang berada pada rentang 2,6 hingga 2,8 (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010).

Dari perspektif performa jangka panjang (*durability*), beton yang mengintegrasikan limbah keramik menunjukkan resistansi yang sangat baik terhadap paparan suhu tinggi dan serangan kimia lingkungan. Material keramik yang secara natural telah melalui proses kalsinasi dan pembakaran suhu tinggi di pabrik asal memiliki kestabilan termal yang superior, sehingga beton jenis ini tidak mudah mengalami keretakan akibat pemuaian termal (*thermal spalling*) ketika diuji pada suhu ekstrem hingga mencapai 400°C (Setiawan dkk., 2023). Selain itu, karena struktur kimia keramik didominasi oleh senyawa silika dan alumina yang stabil, laju penetrasi ion klorida dan sulfat ke dalam matriks beton dapat dihambat dengan lebih baik, asalkan retak susut di fase awal pengerasan dapat dieliminasi secara sempurna. Penggunaan limbah ini tidak hanya menyelesaikan problem keterbatasan lahan akibat penumpukan sampah piring, ubin, dan saniter di TPA, tetapi juga mendukung program *Green Infrastructure* melalui pengurangan eksploitasi quari batu alam secara masif (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010).

2. 1. 6 Biochar Ampas Kopi

Ampas kopi ialah limbah organik yang dihasilkan dari proses penyeduhan kopi, terdiri atas partikel kopi yang tidak larut dalam air. Limbah ini umumnya mencakup kulit biji kopi, serat, dan komponen lainnya yang tertinggal setelah air panas digunakan untuk mengekstrak rasa dan aroma dari biji kopi. Meskipun sering dianggap sebagai sampah, ampas kopi memiliki banyak potensi untuk dimanfaatkan, seperti dijadikan pupuk organik, bahan Baku untuk produk biogas, atau sebagai substitusi dalam konstruksi, misalnya menjadi material substitusi agregat halus di campuran beton (Mussatto dkk., 2011). Ampas kopi termasuk salah satu jenis limbah organik yang menyumbang proporsi signifikan dari total limbah organik yang berakhir di tempat pembuangan akhir, sehingga diperlukan solusi daur ulang untuk mengubah limbah ini menjadi sumber daya yang bernilai. Apabila digunakan langsung dalam campuran beton tanpa perlakuan awal, senyawa organik yang terkandung dalam ampas kopi akan merembes keluar dan menghambat reaksi

hidrasi semen, sehingga berpotensi menurunkan kuat tekan beton (Jie dkk., 2025). Untuk mengatasi hal tersebut, ampas kopi dapat dikonversi menjadi *biochar* melalui proses pirolisis, yaitu pemanasan pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen. Teknik ini menggunakan proses berenergi rendah pada suhu 350°C tanpa oksigen untuk mengubah ampas kopi menjadi *biochar* yang kompatibel dengan campuran beton. (Roychand dkk., 2023)

Biochar ampas kopi hasil pirolisis pada suhu 350°C dapat digunakan sebagai substitusi parsial pasir dalam campuran beton. Struktur mikro berpori pada *biochar* mampu menyerap dan menyimpan air, kemudian melepaskannya secara bertahap ke dalam matriks beton sehingga membantu proses hidrasi semen. Selain berperan sebagai media *internal curing*, ukuran partikel halus *biochar* juga dapat membantu mengisi rongga mikro dalam beton. Penggunaan *biochar* tersebut terbukti meningkatkan sifat material beton. Dengan demikian, pemanfaatan limbah organik ini tidak hanya bermanfaat dari segi teknis, tetapi juga memberikan dampak positif terhadap lingkungan, sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan (Lakshika dkk., 2024).

Ketika diintegrasikan ke dalam matriks beton sebagai material pengisi (*filler*) atau substitusi parsial agregat halus, *biochar* ampas kopi bekerja melalui dua mekanisme utama, yaitu efek pengisi mikro (*micro-filler effect*) dan agen perawatan internal (*internal curing agent*). Ukuran partikel *biochar* yang sangat halus mampu mengisi rongga-rongga kapiler dan pori makro di dalam pasta semen, sehingga meningkatkan kepadatan dan kekompakan struktur pasta beton secara keseluruhan (Jie dkk., 2025). Di saat yang sama, struktur mikropori pada *biochar* ampas kopi memiliki kapasitas retensi air yang tinggi, *biochar* akan menyerap air bebas pada saat pencampuran adonan, kemudian melepaskannya kembali secara bertahap saat kelembapan internal beton menurun selama fase pengerasan (Lakshika dkk., 2024). Mekanisme *internal curing* ini memastikan proses hidrasi semen berlangsung lebih sempurna, menyeimbangkan rasio air-semen efektif, serta memitigasi risiko retak akibat susut mandiri (*autogenous shrinkage*).

Efektivitas penambahan *biochar* ampas kopi ini sangat bergantung pada kadar persentase yang digunakan dalam campuran. Penggunaan pada kadar optimum antara 10% hingga 15% terbukti mampu mempertahankan stabilitas kekuatan

mekanis, bahkan rekayasa pirolisis pada suhu 350°C mampu mendongkrak kuat tekan beton struktural hingga mencapai 29,3% (Roychand dkk., 2023). Sebaliknya, penggunaan dosis di atas 5% cenderung memicu penurunan kuat tekan akibat penyerapan air campuran yang berlebihan, meninggalkan rongga kosong jika air bebas tidak terdistribusi dengan baik dalam jangka panjang (Jie dkk., 2025). Selain perbaikan pada aspek mekanis, pemanfaatan *biochar* ampas kopi memberikan nilai tambah pada aspek keberlanjutan lingkungan melalui kapasitas sekuestrasi karbon (*carbon sequestration*), di mana gas karbon dioksida (CO₂) terjebak secara permanen di dalam elemen struktur bangunan selama masa layannya (Jie dkk., 2025).

2. 1. 7 Pirolisis

Pirolisis merupakan salah satu metode pengolahan bahan organik secara termal yang dapat menghasilkan produk padat, cair, dan gas. Proses pirolisis dipengaruhi oleh kondisi operasi yang digunakan, sehingga karakteristik produk yang dihasilkan dapat berbeda.

1) Pengertian

Secara etimologi, pirolisis berasal dari kata *pyro* (panas) dan *lysis* (penguraian), yang bermakna dekomposisi material akibat perlakuan panas. Secara teknis, pirolisis didefinisikan sebagai dekomposisi termokimia senyawa organik pada temperatur tinggi (umumnya > 300 °C) dalam kondisi tanpa atau dengan keberadaan oksigen yang sangat terbatas (*anoxic/inert*) (Speight, 1994; Bridgwater, 2000; Demirbas, 2004).

2) Jenis-Jenis Pirolisis

Berdasarkan kondisi operasi, khususnya temperatur, laju pemanasan, dan waktu tinggal bahan di dalam reaktor, pirolisis dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu *slow pyrolysis*, *fast pyrolysis*, dan *flash pyrolysis*. Menurut Safdari dkk., (2019) dan Acharya dkk., (2022), jenis-jenis pirolisis dapat dibedakan menjadi, sebagai berikut:

a. Pirolisis Lambat (*Slow Pyrolysis*)

Beroperasi pada temperatur 300 – 500 °C dengan laju pemanasan rendah (0,1 – 1 °C/s) dan waktu tinggal lebih dari 30 menit. Kondisi ini memberikan

waktu karbonisasi yang optimal untuk menghasilkan *biochar* dengan rendemen tinggi dan struktur yang relatif stabil.

b. Pirolisis Cepat (*Fast Pyrolysis*)

Beroperasi pada temperatur 500 – 900 °C dengan laju pemanasan 1 – 100 °C/s dan waktu tinggal uap singkat (10 – 20 detik). Proses ini mengondensasikan uap organik menjadi *bio-oil* dengan rendemen mencapai 60 – 75% massa.

c. Pirolisis Sangat Cepat (*Flash Pyrolysis*)

Menggunakan laju pemanasan sangat tinggi (> 1.000 °C/s) dan waktu tinggal < 1 detik. Proses ini membutuhkan pendinginan cepat (*quenching*) untuk mencegah dekomposisi sekunder, dengan target utama penyerapan *bio-oil* hingga 75 – 80% massa.

3) Peralatan dan Reaktor Pirolisis

Konfigurasi alat pirolisis bervariasi tergantung kapasitas, metode pemanasan, dan jenis produk yang ditargetkan. Berikut adalah alat pirolisis yang dapat digunakan.

a. *Furnace*

Furnace merupakan peralatan pemanas yang digunakan untuk menghasilkan dan mempertahankan temperatur tinggi secara terkontrol. Pada skala laboratorium, *furnace* dapat digunakan sebagai sumber panas dalam proses pirolisis *biomassa*, dengan bahan ditempatkan dalam wadah atau reaktor yang berada di dalam ruang pemanas. Penggunaan *furnace* tidak secara otomatis menghasilkan proses pirolisis karena kontak bahan dengan oksigen tetap harus dibatasi. Oleh karena itu, *furnace* umumnya dikombinasikan dengan wadah tertutup, reaktor, atau sistem gas *inert* untuk mencegah pembakaran selama pemanasan.

b. *Tubular Furnace*

Tubular furnace merupakan *furnace* dengan ruang pemanas berbentuk tabung yang memungkinkan bahan ditempatkan di dalam tabung reaktor. Sistem ini dapat dilengkapi dengan aliran gas *inert*, seperti nitrogen (N₂), untuk mengurangi keberadaan oksigen di dalam reaktor. Penggunaan gas nitrogen memungkinkan kondisi atmosfer selama proses lebih mudah dikontrol

sehingga risiko pembakaran bahan dapat dikurangi. Tubular furnace banyak digunakan dalam penelitian skala laboratorium karena temperatur, waktu pemanasan, dan kondisi atmosfer dapat dikendalikan secara relatif baik.

c. *Fixed-Bed Reactor*

Fixed-bed reactor merupakan reaktor yang menempatkan bahan baku dalam posisi relatif tetap selama proses pirolisis berlangsung. Pemanasan diberikan melalui dinding reaktor atau sistem pemanas eksternal, sedangkan suplai oksigen ke dalam reaktor dibatasi. Reaktor jenis ini memiliki konstruksi yang relatif sederhana sehingga banyak digunakan untuk penelitian pirolisis *biomassa* skala laboratorium. Namun, distribusi temperatur perlu diperhatikan karena pemanasan bahan dalam jumlah besar dapat menghasilkan perbedaan temperatur antara bagian luar dan bagian dalam bahan.

d. *Rotary Kiln*

Rotary kiln merupakan reaktor berbentuk silinder yang berputar selama proses berlangsung. Pergerakan tersebut menyebabkan bahan mengalami pencampuran sehingga kontak dengan panas dapat berlangsung lebih merata. Rotary kiln dapat digunakan pada proses dengan kapasitas yang lebih besar dan memiliki keunggulan dalam proses pencampuran bahan selama pemanasan. Namun, konstruksinya lebih kompleks dibandingkan sistem reaktor tetap.

e. *Fluidized-Bed Reactor*

Fluidized-bed reactor merupakan reaktor yang menggunakan aliran gas untuk membuat partikel bahan berada dalam kondisi terfluidisasi. Kondisi tersebut meningkatkan kontak antara partikel dengan media pemanas sehingga perpindahan panas dapat berlangsung secara cepat dan merata.

Reaktor jenis ini umumnya digunakan untuk proses pirolisis dengan laju pemanasan tinggi, terutama pada aplikasi yang membutuhkan perpindahan panas dan pencampuran bahan secara intensif.

4) Sumber Panas pada Proses Pirolisis

Proses pirolisis membutuhkan energi panas untuk mencapai temperatur yang memungkinkan terjadinya dekomposisi termokimia. Sumber panas dapat berasal

dari energi listrik, bahan bakar gas seperti LPG, bahan bakar padat, atau pemanasan eksternal, yang pemilihannya disesuaikan dengan jenis reaktor, skala proses, temperatur, dan sistem pengendalian yang digunakan.

a. Pemanasan Listrik

Memanfaatkan elemen pemanas (*heating element*) yang menawarkan kemudahan kontrol temperatur, kestabilan suhu, serta kebersihan proses pada skala laboratorium.

b. Pemanasan Menggunakan LPG (*Liquefied Petroleum Gas*)

Menggunakan pembakaran gas LPG di luar dinding reaktor untuk mentransfer panas secara konduksi ke dalam ruang reaksi.

c. Pemanasan Eksternal

Pemberian panas dari luar dinding reaktor yang didistribusikan ke bahan baku melalui kombinasi konduksi, konveksi, dan radiasi.

5) Faktor yang Memengaruhi Proses Pirolisis

Menurut Tomczyk dkk., (2020) karakteristik *biochar* yang dihasilkan dari proses pirolisis dipengaruhi oleh beberapa parameter, yaitu:

a. Temperatur Pirolisis

Temperatur yang lebih tinggi meningkatkan dekomposisi bahan organik dan derajat karbonisasi, namun menurunkan rendemen *biochar* karena meningkatnya porsi produk gas dan cair.

b. Waktu Tinggal

Waktu tinggal merupakan durasi bahan atau produk hasil dekomposisi berada pada kondisi temperatur pirolisis. Waktu tinggal yang lebih lama dapat meningkatkan tingkat dekomposisi bahan organik. Namun, pengaruhnya bergantung pada temperatur dan jenis *biomassa* yang digunakan.

c. Laju Pemanasan

Laju pemanasan menunjukkan kecepatan peningkatan temperatur bahan selama proses pirolisis. Laju pemanasan yang berbeda dapat menghasilkan karakteristik produk yang berbeda karena memengaruhi mekanisme dekomposisi komponen organik.

d. Ukuran Partikel

Ukuran partikel bahan baku dapat memengaruhi distribusi panas selama proses pirolisis. Partikel yang lebih kecil umumnya lebih mudah menerima panas secara merata sehingga proses dekomposisi dapat berlangsung lebih seragam.

e. Jenis Bahan Baku

Komposisi kimia *biomassa*, seperti kandungan selulosa, hemiselulosa, lignin, protein, mineral, dan kadar air, berpengaruh terhadap karakteristik produk pirolisis. Oleh karena itu, *biochar* yang berasal dari bahan baku yang berbeda dapat memiliki sifat fisik dan kimia yang berbeda meskipun diproses pada kondisi temperatur yang sama.

f. Kadar Air

Kadar air bahan baku memengaruhi kebutuhan energi selama proses pirolisis. Kandungan air yang tinggi membutuhkan energi lebih besar untuk proses penguapan sebelum dekomposisi termal berlangsung. Oleh karena itu, bahan baku umumnya dikeringkan terlebih dahulu untuk memperoleh proses pemanasan yang lebih efektif.

6) Produk Hasil Pirolisis

Menurut Ohliger, dkk, (2013) Proses pirolisis *biomassa* menghasilkan tiga kelompok produk utama, yaitu produk padat, cair, dan gas.

a. *Biochar*

Biochar merupakan produk padat kaya karbon yang terbentuk dari dekomposisi termal *biomassa*. Karakteristiknya dipengaruhi oleh jenis bahan baku dan kondisi pirolisis.

b. *Bio oil*

Bio oil merupakan produk cair yang terbentuk dari kondensasi uap organik hasil dekomposisi termal *biomassa*. Produk ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar atau bahan baku kimia.

c. Gas Pirolisis

Gas pirolisis merupakan fraksi gas yang tidak terkondensasi, yang dapat mengandung CO, CO₂, H₂, CH₄, dan hidrokarbon ringan. Komposisinya dipengaruhi oleh jenis bahan baku dan kondisi operasi.

2. 1. 8 Faktor Penentu Proporsi Campuran

Berikut adalah faktor yang menentukan campuran agar tercapainya suatu mutu beton tertentu (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia (BPSDM, 2017)

1. Kekuatan yang diharapkan

Proporsi campuran beton sangat dipengaruhi oleh kekuatan yang ingin dicapai di usia tertentu. Kekuatan beton biasanya dinyatakan dengan satuan seperti K225, K350 dan sebagainya, yang menunjukkan kekuatan tekan minimum dalam kilogram per sentimeter persegi. Oleh karena itu, campuran harus disesuaikan untuk mencapai target kekuatan tersebut.

2. Jenis dan ukuran agregat

Jenis serta ukuran agregat yang dipergunakan di campuran beton merupakan faktor penting lainnya. Agregat halus dan kasar berfungsi mengisi ruang dalam campuran, sehingga proporsi keduanya perlu seimbang. Agregat dengan ukuran yang lebih besar dapat mengurangi jumlah semen yang diperlukan, namun perlu diperhatikan agar *workability* beton tetap terjaga, sehingga mudah untuk dikerjakan.

3. Jumlah Air

Jumlah air yang dipergunakan di campuran sangat memberi pengaruh pada proses hidrasi semen. Terlalu banyak air dapat menurunkan kekuatan beton, sementara kekurangan air dapat menghambat proses pengerasan. Oleh karena itu, rasio air terhadap semen (Faktor Air Semen) harus ditentukan dengan tepat agar kualitas beton yang diinginkan dapat tercapai.

4. Penggunaan Aditif

Aditif atau bahan tambahan dapat digunakan guna meningkatkan sifat tertentu dari beton, seperti kemudahan pengolahan, waktu pengerasan, dan daya tahan. Penggunaan aditif harus disesuaikan dengan proporsi campuran agar tidak mengganggu proses hidrasi dan kekuatan akhir beton.

5. Kondisi Lingkungan

Lingkungan tempat beton akan digunakan juga mempengaruhi proporsi campuran. Misalnya, jika beton akan diaplikasikan di area yang sangat korosif

dan berisiko mengalami pembekuan, maka proporsi campuran harus disesuaikan untuk meningkatkan daya tahan beton terhadap kondisi tersebut.

6. Standar dan Peraturan yang berlaku

Kementrian Pekerjaan Umum (PU) menekankan pentingnya mematuhi standar dan regulasi yang ada saat menentukan proporsi campuran beton. Standar ini memberikan panduan teknis yang harus diikuti untuk memastikan keamanan dan kualitas beton dalam setiap proyek konstruksi.

Menurut SNI 03-2834-2000, perencanaan campuran beton harus memenuhi beberapa ketentuan, yaitu perhitungan *mix design* didasarkan pada data sifat material yang digunakan, serta komposisi campuran yang dihasilkan harus diverifikasi melalui uji coba untuk memastikan memenuhi kuat tekan yang disyaratkan. Pada aspek pelaksanaan, identitas petugas yang menyusun, mengawasi, dan bertanggung jawab terhadap rencana campuran beton harus dicantumkan secara jelas, disertai tanda tangan atau paraf serta tanggal pelaksanaan. Secara teknis, pemilihan proporsi campuran dilakukan berdasarkan hubungan antara kuat tekan dan faktor air semen. Untuk beton dengan kuat tekan lebih dari 20 MPa, penentuan dan produksi campuran harus menggunakan perbandingan berat bahan, sedangkan untuk beton dengan kuat tekan hingga 20 MPa dapat menggunakan perbandingan volume, yang sebelumnya dikonversi dari perhitungan berat berdasarkan berat isi rata-rata masing-masing material.

2. 1. 9 Job Mix Design

Perencanaan campuran beton (*job mix design*) dalam penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada SNI 7656-2012 tentang Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat, dan Beton Massa. Standar tersebut digunakan sebagai acuan dalam menentukan proporsi material penyusun beton berdasarkan karakteristik bahan yang digunakan serta mutu beton yang direncanakan. Dalam penelitian ini, mutu beton yang ditargetkan adalah beton dengan kuat tekan rencana (f'_c) sebesar 30 MPa.

Tahapan perencanaan campuran berdasarkan SNI 7656-2012 meliputi penentuan kuat tekan rencana, pemilihan nilai *slump*, penentuan ukuran nominal maksimum agregat, estimasi kebutuhan air pencampur, penentuan faktor air-semen (FAS), perhitungan kebutuhan semen, serta penentuan proporsi agregat halus dan

agregat kasar. Perhitungan tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik material hasil pengujian, meliputi berat jenis, penyerapan air, kadar air, dan gradasi agregat. Selanjutnya, proporsi campuran yang diperoleh disesuaikan dengan kondisi aktual material yang digunakan dalam penelitian, termasuk penggunaan limbah keramik dan *biochar* ampas kopi sebagai bahan substitusi.

Dengan demikian, perencanaan campuran beton dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan prosedur SNI 7656-2012 dan selanjutnya diterapkan pada pembuatan benda uji di laboratorium. Hasil pengujian kuat tekan dan kuat lentur digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian kinerja campuran terhadap mutu beton yang direncanakan serta untuk menganalisis pengaruh penggunaan limbah keramik dan *biochar* ampas kopi terhadap karakteristik beton.

2. 2 Penelitian Terdahulu

Pemanfaatan material limbah seperti ampas kopi dan limbah keramik sebagai substitusi sebagian agregat dalam beton merupakan salah satu bentuk inovasi dalam bidang konstruksi yang mengarah pada prinsip keberlanjutan. Sejumlah penelitian sebelumnya telah membahas topik serupa dengan berbagai pendekatan dan hasil yang beragam. Oleh karena itu, melalui kajian ini, peneliti berupaya untuk memahami temuan-temuan yang telah ada, menganalisis keterbatasan dari penelitian sebelumnya, serta menempatkan posisi penelitian ini agar dapat memberikan kontribusi ilmiah yang lebih spesifik, terutama dalam konteks beton mutu $F'c$ 30 MPa.

Pacheco-Torgal & Jalali, (2010) melakukan penelitian mengenai pemanfaatan limbah keramik dalam campuran beton, baik sebagai pengganti sebagian agregat kasar dalam bentuk serbuk keramik maupun sebagai pengganti agregat konvensional dalam bentuk agregat keramik. Penelitian ini terbagi menjadi dua fase, yaitu Fase A yang mengkaji substitusi semen sebesar 20% dengan serbuk keramik dari empat jenis limbah keramik berbeda, dan Fase B yang mengkaji penggantian agregat halus dengan pasir keramik (MCS) serta penggantian agregat kasar dengan agregat keramik kasar (MCCA). Pengujian yang dilakukan mencakup kuat tekan pada umur 7, 14, 28, 56, dan 90 hari, absorpsi air vakum, absorpsi air kapiler, permeabilitas oksigen, permeabilitas air, difusi ion klorida, serta uji

accelerated aging. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada Fase A, beton dengan substitusi agregat kasar 20% menggunakan serbuk limbah bata keramik (CB) memiliki reaktivitas pozzolan tertinggi di antara keempat jenis limbah keramik yang diuji, meskipun mengalami penurunan kuat tekan minor dibandingkan beton kontrol namun menunjukkan peningkatan performa durabilitas secara keseluruhan. Pada Fase B, beton dengan agregat kasar keramik (MCCA) menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibanding beton kontrol pada umur 28 hari, serta koefisien absorpsi kapiler yang jauh lebih rendah, yakni 0,00804 kg/m²·⁵ dibanding beton kontrol sebesar 0,01819 kg/m², yang mengindikasikan performa durabilitas yang lebih unggul.

Selain itu, Adelin (2025) melakukan penelitian dengan menggunakan metode eksperimen dengan acuan SNI 03-2834-2000 pada beton mutu rencana 25 MPa, dengan variasi substitusi keramik sebesar 0% - 30% dari berat agregat kasar dan benda uji silinder 300 x 150 mm dan balok 150 x 150 x 600 mm yang diuji pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi limbah keramik dapat meningkatkan sifat mekanik dan menurunkan harga pokok produksi (HPP) beton hingga kadar optimum 20% dengan kuat tekan mencapai 30,17 MPa, kuat tarik belah 2,963 MPa, dan HPP sebesar Rp. 1.289.598,43 per m³. namun, pada kadar substitusi yang lebih tinggi, sifat mekanik beton menurun meskipun biaya produksi semakin rendah karena limbah keramik diperoleh tanpa biaya.

Setiawan dkk. (2023) melakukan penelitian menggunakan metode yang mengacu pada SNI 03-2834-2000 dengan mutu rencana F'c 20MPa dan benda uji kubus berukuran 150 x 150 x 150 mm. Variasi substitusi limbah keramik terdiri dari 0%, 20%, 22%, 23%, dan 26% dari agregat kasar. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan limbah keramik meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik belah hingga kadar optimum 20%, dengan nilai masing-masing sebesar 30,1 MPa dan 3,02 MPa. Namun, peningkatan kadar substitusi selanjutnya menyebabkan penurunan sifat mekanik, meskipun nilai absorpsi optimal terjadi pada variasi 26% sebesar 3,674%. Dengan demikian, semakin besar proporsi limbah keramik, maka kecenderungan kuat tekan dan kuat tarik belah beton menurun.

Roychand dkk. (2023) melakukan penelitian mengenai pemanfaatan ampas kopi (*spent coffee grounds/SCG*) dalam bentuk *biochar* sebagai substitusi agregat

halus pada campuran beton, dengan tujuan mengidentifikasi suhu pirolisis dan kadar substitusi optimal yang mampu meningkatkan sifat fisikokimia dan mekanis beton. Proses pirolisis dilakukan pada dua variasi suhu, yaitu 350°C dan 500°C, menggunakan metode pemanasan tanpa oksigen selama 2 jam dengan laju pemanasan 10°C/menit. Kombinasi campuran yang digunakan dalam penelitian ini meliputi SCG mentah serta *biochar* pada kedua suhu pirolisis tersebut, masing-masing disubstitusikan sebagai pengganti agregat halus pada kadar 5%, 10%, 15%, dan 20% secara volumetrik. Pengujian yang dilakukan mencakup uji kuat tekan pada umur 7 dan 28 hari, analisis XRD, XRF, CHNS, distribusi ukuran partikel, serta pengamatan mikrostruktur menggunakan SEM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran dengan *biochar* yang dipirolisis pada suhu 350°C dan kadar substitusi 15% volume agregat halus (350CBC15) menghasilkan performa terbaik, yakni peningkatan kuat tekan sebesar 29,3% dibandingkan beton kontrol pada umur 28 hari, dengan nilai kuat tekan mencapai 29,6 MPa.

Penelitian mengenai integrasi *biochar* ke dalam sistem agregat saat ini menjadi terobosan penting dalam pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan. Murali & Kravchenko, (2026) dalam studinya menyoroti bahwa *biochar*, yang merupakan hasil pirolisis limbah organik, memiliki keunggulan fungsional yang sangat besar berkat struktur pori dan luas permukaannya yang unik. Mereka menemukan bahwa penambahan *biochar* pada dosis yang tepat terutama pada rentang 1% hingga 10% dari berat agregat halus terbukti efektif dalam memperbaiki karakteristik mikrostruktur beton. Partikel *biochar* ini bekerja sebagai agen pengisi (*filler*) yang mengisi celah-celah mikro pada matriks semen, sehingga mampu meningkatkan kepadatan struktur dan memberikan kontribusi positif terhadap kekuatan tekan beton.

Selain kemampuannya dalam meningkatkan performa mekanis, *biochar* juga menawarkan fungsi inovatif berupa kemampuan penyembuhan mandiri (*self-healing*) pada beton, yang dapat memperpanjang masa layanan struktur. Studi tersebut juga mengidentifikasi bahwa suhu pirolisis merupakan faktor krusial dalam menghasilkan *biochar* berkualitas tinggi, suhu antara 350°C hingga 700°C dinilai sebagai kondisi ideal untuk memaksimalkan potensi penyerapan karbon di dalam beton. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa penggunaan *biochar*

bukan hanya sekadar upaya daur ulang limbah, melainkan sebuah strategi cerdas untuk meningkatkan kualitas material konstruksi sekaligus mendukung target keberlanjutan global.

Melangkah lebih jauh dari pengujian skala material, penelitian yang dilakukan oleh Hepautwa dkk., (2026) memberikan pandangan yang lebih luas mengenai penerapan *biochar* ampas kopi pada elemen struktur yang lebih kompleks, yaitu balok beton kinerja tinggi. Pada studi ini, *biochar* ampas kopi digunakan untuk menggantikan sebagian pasir (agregat halus) yang kemudian dipadukan dengan bahan tambahan seperti metakaolin dan montmorillonit kalsinasi, serta diperkuat dengan serat hibrida. Hasil pengujiannya menunjukkan hasil yang sangat positif, di mana integrasi *biochar* dalam campuran beton terbukti mampu memperbaiki struktur mikro secara signifikan, yang secara langsung berdampak pada meningkatnya kapasitas beban lentur dan daktilitas balok.

Selain itu, penggunaan *biochar* dalam penelitian ini terlihat sangat efektif dalam mendukung penguatan dari dalam tubuh beton itu sendiri. Dari hasil pengamatan struktur mikronya, terlihat bahwa partikel *biochar* berperan aktif dalam menciptakan massa beton yang lebih padat karena kemampuannya mengisi pori-pori dengan sangat baik. Kombinasi antara karakter kimiawi *biochar* dan kekuatan mekanis dari serat hibrida ini menghasilkan beton yang tidak hanya lebih hijau bagi lingkungan, tapi juga punya ketahanan struktur yang tangguh terhadap beban luar. Temuan ini semakin mempertegas bahwa limbah ampas kopi yang diolah menjadi *biochar* memiliki nilai guna yang besar sebagai material alternatif untuk konstruksi modern yang mengejar kekuatan sekaligus keberlanjutan.

Berdasarkan kajian penelitian terdahulu, pemanfaatan limbah keramik sebagai substitusi agregat kasar maupun *biochar* ampas kopi sebagai substitusi agregat halus terbukti mampu meningkatkan sifat mekanis beton pada kadar substitusi optimum, terutama kuat tekan dan kuat lentur. Namun, peningkatan kadar substitusi yang terlalu tinggi cenderung menyebabkan penurunan performa beton akibat meningkatnya porositas, penyerapan air, serta terganggunya proses hidrasi semen. Secara teknis, limbah keramik sebagai agregat kasar mampu meningkatkan kekuatan dan durabilitas beton melalui tekstur permukaan yang lebih kasar dan kemampuan *interlocking* antar partikel yang lebih baik, sehingga menghasilkan

kuat tekan lebih tinggi dibanding beton normal serta nilai absorpsi kapiler yang lebih rendah Pacheco-Torgal & Jalali, (2010). Di sisi lain, *biochar* ampas kopi hasil pirolisis suhu 350°C memiliki struktur mikro berpori yang berfungsi sebagai media *internal curing*, yaitu menyerap dan melepaskan air secara bertahap untuk mendukung proses hidrasi semen serta membantu pembentukan mikrostruktur beton yang lebih padat. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan kuat tekan beton hingga 29,3% pada kadar substitusi optimum 15% volume agregat halus (Roychand dkk., 2023)

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih mengkaji limbah keramik dan *biochar* ampas kopi secara terpisah. Penelitian limbah keramik umumnya berfokus pada pengaruhnya sebagai substitusi agregat atau bahan pozzolanik secara individual, sedangkan penelitian *biochar* ampas kopi lebih banyak meninjau perannya sebagai substitusi agregat halus tanpa dikombinasikan dengan material limbah lainnya. Padahal, kedua material tersebut memiliki mekanisme peningkatan performa beton yang berbeda namun berpotensi saling melengkapi, di mana limbah keramik berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan durabilitas melalui sifat fisik agregat, sementara *biochar* ampas kopi membantu optimalisasi hidrasi dan densifikasi mikrostruktur beton. Oleh karena itu, penelitian mengenai penggunaan kedua material secara bersamaan dalam satu campuran beton, khususnya pada beton struktural mutu $F'c$ 30 MPa, masih perlu dikaji lebih lanjut untuk mengetahui potensi sinergi keduanya terhadap peningkatan kuat tekan dan kuat lentur beton sekaligus mendukung pengembangan material konstruksi berkelanjutan.

2.3 Analisis Gap

Sebagai acuan dalam penyusunan Tugas Akhir, diperlukan perbandingan antara penelitian terdahulu dan penelitian yang dilakukan saat ini, yang selanjutnya disajikan dalam **Tabel 2.1.** berikut ini.

Tabel 2.1 Rekapitulasi Penelitian Beton Variasi Limbah Keramik

No	Peneliti	Variabel Penelitian	Mutu Rencana	Persentase substitusi	Kadar optimum	Pengaruh
1	(Pacheco-Torgal & Jalali, 2010a)	Limbah keramik	25 MPa	20% Agregat halus, 20% Agregat kasar, 20% Semen	20% Agregat halus	kuat tekan naik 11% durabilitas naik 22%
2	(Adelin, 2025)	Limbah keramik	25 MPa	0%, 10%, 15%, 20%, 30%	20%	Kuat tekan naik 11,6% Kuat tarik naik 12,8%
3	(Setiawan dkk., 2023)	Limbah Keramik	30 MPa	0%, 20%, 22%, 24%, 26%	20%	Kuat tekan naik 2,2% Kuat tarik naik 3,4%
4	(Darmayasa, 2023)	Limbah Keramik	K225	0%, 10%, 20%, 30%	40%	Kuat tekan naik 3,4%
5	(Pangestu, 2025)	Limbah Keramik	25 MPa	0%, 14%, 18%, 22%, 26%, 30%, 34%	14%	Kuat tekan naik 1,5% Kuat tarik naik 3,0%
6	(Wicaksono & Sudjati, 2012)	Limbah Keramik	25 MPa	0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, 100%	30%	Kuat tekan naik 10,9% Kuat tarik naik 34,2%

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pemanfaatan limbah keramik sebagai material substitusi dalam campuran beton dengan hasil yang bervariasi. (Adelin, 2025) dan (Setiawan dkk., 2023) menemukan bahwa penggunaan limbah keramik sebagai substitusi tunggal pada kadar 20% dapat meningkatkan kuat tekan beton masing-masing sebesar 11,61% dan 2,24% pada mutu rencana 25 dan 30 MPa, penambahan keramik melebihi 20% biasanya mulai menurunkan *workability* secara signifikan. Bentuk keramik yang cenderung pipih/runcing menciptakan banyak rongga jika terlalu banyak, sehingga kekuatan turun setelah melewati titik 20%. Pada penelitian (Darmayasa, 2023), penelitian ini menggunakan mutu K225 (setara dengan 18-19 MPa). Pada beton mutu rendah, rongga yang dihasilkan oleh

agregat keramik masih dapat ditoleransi oleh pasta semen yang lebih banyak (relatif terhadap kekuatan yang diminta), sehingga memungkinkan penggunaan limbah dalam jumlah besar sebelum mencapai titik jenuh kekuatan. (Pangestu, 2025) kadar optimum yang paling rendah (14%) kemungkinan disebabkan oleh variasi rentang persentase substitusi yang digunakan peneliti (0%, 14%, 18%, dst). Selain itu, kemungkinan keramik yang digunakan memiliki tingkat penyerapan air (*water absorption*) yang tinggi, sehingga pada kadar kecil saja sudah sangat memengaruhi kekuatan beton. Terakhir, penelitian (Wicaksono & Sudjati, 2012), kenaikan kuat tarik yang sangat tinggi (34,23%) pada penelitian ini menunjukkan bahwa limbah keramik yang digunakan memiliki lekatan yang sangat baik dengan pasta semen. Hal ini memungkinkan substitusi hingga 30% karena kekasaran permukaan keramik membantu mengunci struktur beton lebih baik dibanding keramik pada penelitian lainnya.

Namun demikian, fokus penelitian-penelitian tersebut mayoritas masih terbatas pada penggunaan substitusi tunggal (*single substitution*) dan target mutu beton normal di bawah 30 MPa. Terdapat celah penelitian (*research gap*) di mana pengaruh penggunaan limbah keramik pada mutu beton yang lebih tinggi (f'_c 30 MPa) serta dikombinasikan dengan material pozzolanik lain belum banyak dieksplorasi secara mendalam. Oleh karena itu, penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan menerapkan metode substitusi ganda (*double substitution*), yaitu menggunakan limbah keramik tetap sebesar 20% sebagai substitusi agregat kasar, yang dipadukan dengan *biochar* ampas kopi (0%, 10%, dan 15%) sebagai substitusi agregat halus. Keterbaruan penelitian ini terletak pada analisis pengaruh sinergis antara kedua limbah tersebut terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton mutu tinggi, guna mengetahui efektivitasnya untuk diaplikasikan pada konstruksi perkerasan kaku.

Tabel 2.2 Rekapitulasi Penelitian Beton Variasi *Biochar* Ampas Kopi

No	Peneliti	Variabel Penelitian	Mutu Rencana	Persentase substitusi	Kadar optimum	Pengaruh
1	(Roychand dkk., 2023)	<i>Biochar</i> (<i>Coffee Grounds</i>) dengan suhu 350	22,9 MPa	5%, 15%, 10%, 20% (350°) dan 5%, 10%, 15% (500°)	15%	Kuat tekan naik 29,3%
2	(Şenol, 2025)	<i>Biochar</i> (<i>Coffee Grounds</i>)	60,33 MPa	5%, 10%, 15%	5%	Kuat tekan naik 16,3%
3	(Hepautwa dkk., 2026)	<i>Biochar</i> (<i>Coffee Grounds</i>) dan <i>Hybrid Fiber</i> dengan suhu 350°C	35 MPa	15%	15%	Kombinasi PCG (Pirolisis Ampas Kopi) memperbaiki mikrostruktur beton menjadi padat (<i>refinement</i>)
4	(Jie dkk., 2025)	<i>Biochar</i> (<i>Coffee Grounds</i>)	30 – 40 MPa	1%, 3%, dan 5%	3%	Membantu hidrasi semen jangka panjang yang lebih merata
5	(Andreola dkk., 2019)	Ampas Kopi	25 MPa	2%, 5%, 10% dan 15%	10%	Menaikkan kuat tekan 5,1%

Eksplorasi mengenai pemanfaatan limbah organik dalam teknologi beton telah berkembang pesat, namun masih ditemukan beberapa titik krusial yang belum teruji sepenuhnya. Merujuk pada temuan Roychand dkk., (2023), penggunaan *biochar* ampas kopi hasil pirolisis pada suhu 350°C terbukti efektif meningkatkan kuat tekan beton hingga 29,3% pada kadar substitusi pasir 5%. Walaupun memberikan landasan yang kuat, studi tersebut masih membatasi ruang lingkupnya pada pengujian material beton dasar. Di sisi lain, penelitian Hepautwa dkk., (2026) telah melangkah lebih jauh dengan menguji elemen struktural berupa balok beton bertulang yang diperkuat serat hibrida. Namun, karena penggunaan *biochar* pada

penelitian tersebut dikombinasikan dengan mineral tambahan seperti metakaolin dan montmorillonit kalsinasi, pengaruh murni dari *biochar* ampas kopi terhadap perilaku mekanis beton khususnya pada variasi dosis yang berbeda menjadi sulit untuk diisolasi secara tunggal.

Kesenjangan lain muncul dari ulasan Murali & Kravchenko, (2026) yang menyoroti adanya risiko penurunan performa mekanis apabila kadar *biochar* melampaui ambang batas 10% akibat peningkatan porositas. Sejauh ini, literatur yang tersedia lebih banyak mendalami aspek kimiawi dan optimasi suhu pembakaran, sementara korelasi langsung antara variasi substitusi agregat halus oleh *biochar* terhadap keseimbangan antara kuat tekan dan kuat lentur pada beton mutu tinggi masih memerlukan pendalaman lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk menutup celah tersebut dengan mengevaluasi performa mekanis beton pada rentang substitusi pasir yang lebih spesifik.