



Analisis Workabilitas dan Kuat Tekan Beton dengan Campuran Limbah Keramik sebagai Material Alternatif

Sudarso^{1*}

¹ Teknik Sipil, Universitas Sunan Giri Surabaya, Indonesia

*Penulis Korespondensi: sudarsokaira@gmail.com

Abstract. The rapid expansion of construction activities has led to increased concrete consumption, resulting in excessive exploitation of natural aggregate resources and growing environmental concerns. To mitigate this issue, ceramic waste has been investigated as an alternative material in concrete production. This study examines the effect of ceramic waste powder used as a filler on the workability and compressive strength of concrete. Ceramic waste powder was applied as a partial replacement for fine aggregate at proportions of 0%, 15%, 25%, 35%, and 45%. The concrete mixtures were produced using Ordinary Portland Cement Type I, natural sand, crushed stone as coarse aggregate, and potable water, all conforming to Indonesian National Standards (SNI). Workability was assessed through slump tests in accordance with SNI 1972:2008, while compressive strength tests were performed on cylindrical specimens at 28 days following SNI 1974:2011. The compressive strength for each mixture was determined from the average of three specimens. The results show that increasing ceramic waste content slightly reduced slump values, from 17.20 cm in the control mix to 16.60 cm at 45% replacement, although all mixtures met the required workability standards. A gradual decrease in compressive strength was also observed, from 17.79 MPa to 16.65 MPa at the highest replacement level. However, this reduction was not significant, indicating that ceramic waste powder can be used in normal-strength concrete without substantially affecting performance. The utilization of ceramic waste therefore represents a sustainable alternative to reduce natural aggregate consumption while maintaining acceptable concrete properties.

Keywords: Ceramic Waste; Compressive Strength; Concrete; Sustainable construction; Workability.

Abstrak. Pesatnya perkembangan kegiatan konstruksi telah meningkatkan konsumsi beton, yang berdampak pada eksploitasi sumber daya agregat alam secara berlebihan serta meningkatnya permasalahan lingkungan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, limbah keramik telah diteliti sebagai material alternatif dalam produksi beton. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penggunaan serbuk limbah keramik sebagai bahan pengisi (filler) terhadap kelecanan (workability) dan kuat tekan beton. Serbuk limbah keramik digunakan sebagai pengganti sebagian agregat halus dengan variasi proporsi sebesar 0%, 15%, 25%, 35%, dan 45%. Campuran beton dibuat menggunakan Semen Portland Tipe I, pasir alam, batu pecah sebagai agregat kasar, serta air bersih yang seluruhnya memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI). Pengujian kelecanan dilakukan melalui uji slump sesuai SNI 1972:2008, sedangkan pengujian kuat tekan dilakukan pada benda uji silinder pada umur 28 hari berdasarkan SNI 1974:2011. Nilai kuat tekan setiap campuran ditentukan berdasarkan rata-rata dari tiga benda uji. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar limbah keramik menyebabkan sedikit penurunan nilai slump, dari 17,20 cm pada campuran kontrol menjadi 16,60 cm pada substitusi 45%, namun seluruh campuran masih memenuhi persyaratan kelecanan. Penurunan bertahap juga terjadi pada kuat tekan beton, dari 17,79 MPa menjadi 16,65 MPa pada kadar tertinggi. Meskipun demikian, penurunan tersebut tidak signifikan, sehingga serbuk limbah keramik dapat digunakan pada beton mutu normal tanpa mengurangi kinerja secara berarti. Pemanfaatan limbah keramik ini merupakan alternatif berkelanjutan untuk mengurangi penggunaan agregat alam dengan tetap mempertahankan sifat beton yang memadai.

Kata Kunci: Beton; Konstruksi berkelanjutan; Kuat Tekan; Limbah Keramik; Workabilitas.

1. LATAR BELAKANG

Beton menjadi material utama dalam bidang konstruksi karena memiliki kemampuan menahan beban tekan yang tinggi, mudah diperoleh, serta memiliki biaya pembuatan yang relatif ekonomis untuk berbagai aplikasi struktur bangunan (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014). Material ini terbentuk dari kombinasi agregat halus dan kasar, semen, serta air yang dicampur dengan proporsi tertentu sehingga menghasilkan struktur yang kokoh dan memiliki

ketahanan yang baik terhadap degradasi dalam jangka waktu yang panjang (Mindess et al., 2003).

Seiring dengan pesatnya pembangunan infrastruktur, kebutuhan akan beton terus meningkat dan berdampak pada intensitas pengambilan agregat alam yang semakin besar. Kondisi tersebut memicu berbagai permasalahan lingkungan, antara lain kerusakan area tambang, meningkatnya potensi erosi, serta terganggunya keseimbangan ekosistem alami (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010). Oleh karena itu, sejumlah kajian mulai mengembangkan pemanfaatan material alternatif sebagai substitusi parsial agregat alam dalam beton. Salah satu material yang berpotensi digunakan adalah limbah keramik, baik yang berasal dari proses produksi industri keramik maupun dari sisa kegiatan konstruksi, yang jumlahnya terus bertambah dan belum dimanfaatkan secara optimal (Zimbili et al., 2014).

Limbah keramik memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai substitusi agregat halus atau agregat kasar dalam beton karena kandungan mineralnya yang stabil serta karakter mekaniknya yang cukup baik untuk diaplikasikan dalam campuran beton (Senthamarai & Manoharan, 2005; Medina, Sánchez de Rojas, & Frías, 2012). Pemanfaatan limbah keramik juga berkontribusi pada pengurangan limbah padat dan tekanan terhadap penambangan agregat alam, sehingga mendukung konsep green concrete dan pembangunan berkelanjutan.

Namun, penggunaan limbah keramik dalam campuran beton dapat mempengaruhi workabilitas beton, yaitu kemampuan campuran beton untuk dicampur, ditempatkan, dipadatkan, dan diselesaikan dengan baik tanpa segregasi dan *bleeding* (Neville, 2011). Beberapa penelitian awal menemukan bahwa meningkatnya kandungan limbah keramik cenderung menurunkan nilai slump karena ukuran partikel yang tidak seragam serta sifat penyerapan air yang lebih tinggi dibanding agregat pasir konvensional (Binici, 2007; Rashid et al., 2017).

Di sisi lain, sifat hardened concrete seperti kuat tekan beton juga perlu diteliti secara mendalam bila limbah keramik dimasukkan dalam campuran. Beberapa penelitian melaporkan bahwa substitusi limbah keramik dapat berpengaruh terhadap kuat tekan beton, tergantung pada persentase penggantian, ukuran partikel, dan karakteristik material asal limbah tersebut. Dalam penelitian lain, variasi penambahan limbah keramik pada beton menghasilkan perubahan kuat tekan yang berbeda dibanding beton konvensional, sehingga penting untuk menentukan komposisi optimum guna menjaga sifat mekanik beton tetap memenuhi standar desain.

Berbagai hasil kajian eksperimental mengungkapkan bahwa pemanfaatan limbah keramik dalam campuran beton tidak hanya berpengaruh terhadap nilai workabilitas dan kuat

tekan, tetapi juga turut memengaruhi karakteristik fisik dan struktural beton, seperti massa jenis, tingkat penyerapan air, serta kestabilan mikrostrukturnya (Medina et al., 2014; Rashid et al., 2017). Temuan tersebut mengindikasikan bahwa perilaku beton yang mengandung limbah keramik perlu ditinjau secara menyeluruh, baik pada kondisi beton segar maupun setelah mengalami proses pengerasan.

Dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengkajian sifat workabilitas dan kuat tekan beton yang menggunakan limbah keramik sebagai bahan alternatif. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menilai batas optimal penggunaan limbah keramik dalam campuran beton agar kinerja beton yang dihasilkan tetap memenuhi persyaratan teknis dan standar mutu yang berlaku.

2. KAJIAN TEORITIS

Secara umum, keramik merupakan material anorganik non-logam yang dibentuk melalui proses pembakaran pada temperatur tinggi. Dalam bidang teknik sipil dan konstruksi, keramik banyak digunakan sebagai material finishing maupun elemen bangunan, dan limbahnya berpotensi dimanfaatkan kembali sebagai bahan alternatif dalam campuran beton (Kingery et al., 1976). Beton sebagai material konstruksi merupakan material komposit yang terdiri dari semen, agregat halus dan kasar serta air. Beton memiliki karakter mekanik yang ditentukan oleh komposisi dan interaksi antar komponennya, terutama berpengaruh pada workabilitas dan kuat tekan. Beton umumnya kuat terhadap gaya tekan tetapi lemah terhadap gaya tarik sehingga memerlukan perancangan campuran yang tepat untuk memastikan performa struktural yang diinginkan (Murdock et al., 1991 dalam Revisdah & Utari, 2018).

Workabilitas beton merupakan sifat beton segar yang menunjukkan kemudahan dalam proses pencampuran, pengangkutan, pengecoran, pemadatan, dan penyelesaian akhir tanpa mengalami segregasi atau bleeding. Tingkat workabilitas sangat dipengaruhi oleh rasio air-semen, gradasi dan bentuk agregat, kandungan bahan halus, serta penggunaan bahan tambahan. Beton dengan workabilitas yang baik akan lebih mudah dikerjakan di lapangan dan menghasilkan beton keras yang lebih homogen serta memiliki kualitas struktural yang lebih baik (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

Penggunaan material alternatif seperti limbah keramik sebagai pengganti sebagian agregat halus dapat memengaruhi workabilitas beton secara signifikan. Partikel limbah keramik umumnya bersifat angular dan memiliki daya serap air yang lebih tinggi dibandingkan agregat alami, sehingga dapat menurunkan nilai slump seiring meningkatnya kadar substitusi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penambahan limbah keramik dalam proporsi tertentu

masih menghasilkan workabilitas yang memenuhi persyaratan standar, meskipun terjadi penurunan nilai slump secara bertahap akibat meningkatnya kebutuhan air pencampur (Binici, 2007; Ismail & Al-Hashmi, 2009).

Kuat tekan beton merupakan parameter utama yang digunakan untuk menilai mutu dan kinerja beton dalam menahan beban tekan. Nilai kuat tekan sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti rasio air-semen, kualitas dan gradasi agregat, jenis semen, serta proses pencampuran dan perawatan beton. Semakin rendah rasio air-semen, umumnya semakin tinggi kuat tekan beton yang dihasilkan, karena struktur beton menjadi lebih padat dan porositasnya berkurang (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

Pemanfaatan material alternatif, seperti limbah keramik, sebagai substitusi sebagian agregat atau bahan pengisi dapat memengaruhi kuat tekan beton. Partikel limbah keramik yang bersifat keras dan memiliki tekstur permukaan kasar berpotensi meningkatkan ikatan mekanis dengan pasta semen. Namun, pada kadar substitusi yang tinggi, kuat tekan beton cenderung menurun akibat meningkatnya porositas dan berkurangnya efektivitas pasta semen dalam mengikat agregat. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan limbah keramik pada proporsi tertentu masih menghasilkan kuat tekan beton yang memenuhi persyaratan beton mutu normal (Binici, 2007; Ismail & Al-Hashmi, 2009).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang sebagai eksperimen laboratorium yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh pemanfaatan limbah keramik sebagai bahan pengisi (*filler*) terhadap sifat workabilitas dan kuat tekan beton. Pendekatan penelitian dilakukan dengan membandingkan beton acuan tanpa penambahan filler limbah keramik dengan beton yang mengandung filler limbah keramik pada beberapa tingkat variasi persentase. Evaluasi kinerja beton dilakukan melalui pengamatan terhadap perubahan karakteristik beton akibat penambahan material alternatif tersebut.

Material penyusun beton yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas beberapa komponen utama. Semen yang digunakan adalah Semen Portland Tipe I yang telah memenuhi ketentuan SNI 2049:2015 tentang Semen Portland. Jenis semen ini merupakan semen hidraulis untuk keperluan umum yang banyak diaplikasikan pada konstruksi beton normal dan tidak memerlukan persyaratan khusus, seperti ketahanan tinggi terhadap sulfat atau panas hidrasi rendah, sehingga dinilai sesuai untuk penelitian beton mutu normal dengan kuat tekan rencana sebesar $f'c$ 20 MPa.

Agregat halus yang digunakan berupa pasir alami yang memenuhi persyaratan SNI 2461:2014 tentang Spesifikasi Agregat untuk Beton. Pasir tersebut memiliki sebagian besar butiran yang lolos ayakan No. 4 (4,75 mm), bergradasi baik, serta bebas dari kandungan lumpur, tanah liat, dan bahan organik. Dalam campuran beton, agregat halus berperan sebagai pengisi celah antar agregat kasar dan berkontribusi terhadap peningkatan kemudahan pengerjaan serta kepadatan beton.

Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah yang juga memenuhi ketentuan SNI 2461:2014. Agregat ini merupakan material yang tertahan pada ayakan No. 4 (4,75 mm), memiliki sifat keras dan kuat, tahan terhadap keausan, serta tidak mengandung zat berbahaya maupun bahan organik. Agregat kasar berfungsi sebagai elemen rangka utama dalam beton yang memberikan kontribusi signifikan terhadap kekuatan dan stabilitas struktur beton.

Air pencampur yang digunakan merupakan air bersih yang memenuhi persyaratan SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Air tersebut harus bebas dari minyak, asam, alkali, garam, serta bahan organik yang dapat mengganggu proses hidrasi semen. Secara umum, air yang layak untuk konsumsi juga dapat digunakan sebagai air pencampur beton.

Limbah keramik yang dimanfaatkan sebagai filler diperoleh dari sisa material keramik bangunan yang telah dihancurkan dan disaring hingga lolos ayakan No. 200 ($\leq 75 \mu\text{m}$). Limbah keramik dengan ukuran sangat halus ini berfungsi sebagai bahan pengisi rongga mikro dalam beton, yang berpotensi memengaruhi tingkat workabilitas dan kuat tekan beton. Proporsi limbah keramik ditentukan berdasarkan persentase berat filler total dalam campuran beton dan digunakan sebagai substitusi parsial filler dengan beberapa variasi persentase tertentu.

Tabel 1. Presentase Filler Limbah Keramik.

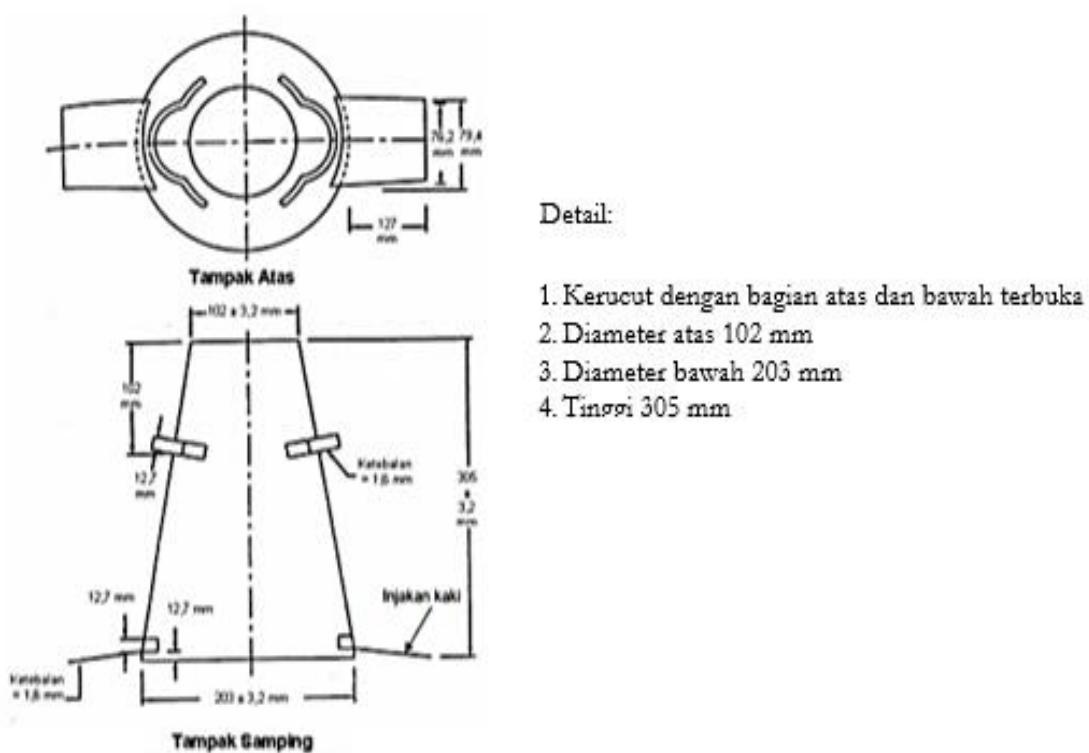
Kode Campuran	Presentase Filler Limbah Keramik	Jumlah Sample
BK0	0% (beton normal)	3
BK15	10%	3
BK25	25%	3
BK35	35%	3
BK45	45%	3

Perancangan campuran beton dilakukan menggunakan metode mix design sesuai standar SNI untuk beton normal. Campuran beton dirancang untuk mencapai mutu rencana tertentu yaitu f'_c 20 MPa. Variasi filler limbah keramik dilakukan tanpa mengubah faktor air semen (FAS) agar pengaruh filler dapat diamati secara jelas.

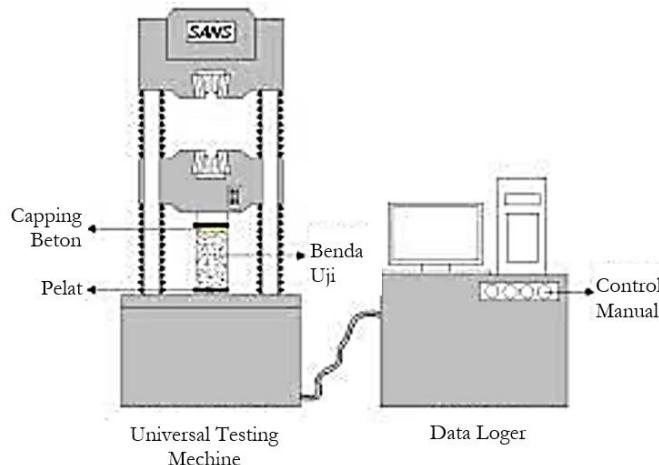
Benda uji beton dibuat dalam bentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Setiap variasi campuran dibuat minimal 3 benda uji untuk pengujian kuat tekan, sehingga hasil yang diperoleh bersifat representatif. Tahapan pembuatan benda uji meliputi:

- Penimbangan seluruh material sesuai komposisi campuran.
- Pencampuran material kering (agregat, semen, dan filler limbah keramik).
- Penambahan air secara bertahap hingga campuran homogen.
- Pengujian workabilitas beton segar.
- Pengecoran beton ke dalam cetakan dan pemasakan.
- Perawatan (*curing*) benda uji dengan perendaman air hingga umur pengujian.

Evaluasi workabilitas beton pada kondisi segar dilakukan melalui pengujian slump. Besaran nilai slump dicatat pada setiap komposisi campuran untuk mengidentifikasi pengaruh penggunaan filler limbah keramik terhadap tingkat kemudahan pengolahan beton. Sementara itu, pengujian kuat tekan dilaksanakan ketika beton mencapai umur 28 hari dengan menggunakan alat uji tekan. Selama pengujian, benda uji ditempatkan secara tepat di tengah alat uji, kemudian dikenai pembebanan tekan secara bertahap hingga terjadi kegagalan. Nilai kuat tekan beton selanjutnya ditentukan berdasarkan besarnya beban maksimum yang mampu ditahan oleh benda uji sebelum mengalami keruntuhan.

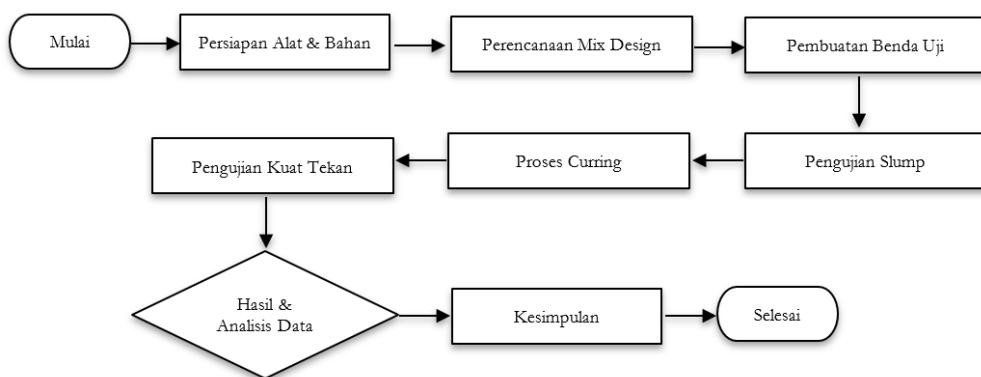


Gambar 1. Kerucut Abrams Untuk Slump Test.



Gambar 2. Compression Testing Machine (CTM) Untuk Uji Tekan.

Data yang diperoleh dari pengujian workabilitas dan kuat tekan beton diolah menggunakan pendekatan analisis deskriptif dan perbandingan. Proses analisis dilakukan dengan membandingkan karakteristik beton acuan tanpa penambahan filler dengan beton yang mengandung limbah keramik pada berbagai tingkat substitusi. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi: (a) pengaruh variasi kadar filler limbah keramik terhadap tingkat kemudahan penggerjaan beton; (b) dampak penggunaan filler limbah keramik terhadap nilai kuat tekan beton; serta (c) proporsi filler limbah keramik yang paling optimal dalam menghasilkan performa beton yang terbaik. Rangkaian tahapan penelitian secara sistematis disajikan dalam diagram alir penelitian pada gambar berikut.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian.

Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan dengan pendekatan deskriptif kuantitatif yang mengacu pada hasil pengujian workabilitas dan kuat tekan beton. Nilai workabilitas diperoleh dari pelaksanaan uji slump pada beton dalam kondisi segar, yang dilakukan sesuai dengan ketentuan SNI 1972:2008 / ASTM C143. Indikator utama yang dianalisis pada pengujian ini adalah besarnya penurunan tinggi campuran beton setelah cetakan dilepas. Sementara itu, data kuat tekan beton diperoleh melalui pengujian benda uji berbentuk silinder

setelah mencapai umur perawatan 28 hari, dengan prosedur pengujian yang mengacu pada SNI 1974:2011 / ASTM C39. Besaran kuat tekan beton kemudian ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$fc' = P/A$$

di mana:

fc' = adalah kuat tekan beton (MPa)

P = beban maksimum yang diterima benda uji (N)

A = luas penampang benda uji (mm^2).

Nilai kuat tekan beton yang digunakan sebagai dasar analisis ditetapkan berdasarkan nilai rata-rata dari minimal tiga benda uji pada setiap komposisi campuran. Tahap selanjutnya adalah melakukan evaluasi perbandingan antara beton acuan tanpa penambahan material substitusi dan beton yang mengandung limbah genteng pada berbagai tingkat penggantian. Analisis ini bertujuan untuk menilai dampak penggunaan limbah genteng terhadap karakteristik workabilitas serta kekuatan tekan beton. Variasi nilai slump dan kuat tekan ditelaah secara komparatif untuk mengidentifikasi pola perubahan kinerja beton, baik berupa peningkatan maupun penurunan, sebagai akibat dari penambahan limbah genteng ke dalam campuran beton.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini memaparkan hasil pengujian dan analisis terhadap sifat beton yang memanfaatkan limbah keramik sebagai bahan alternatif dalam komposisi campuran. Aspek yang dikaji mencakup tingkat workabilitas beton pada kondisi segar yang dievaluasi melalui uji slump, serta nilai kuat tekan beton setelah mencapai umur 28 hari. Data hasil pengujian kemudian diolah menggunakan pendekatan deskriptif dan perbandingan untuk menilai dampak variasi kadar limbah keramik terhadap performa beton. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan beton yang mengandung limbah keramik dengan beton konvensional sebagai campuran kontrol. Selanjutnya, hasil analisis dibahas dengan mengaitkannya pada konsep teoritis, ketentuan standar yang berlaku, serta hasil-hasil penelitian sebelumnya, sehingga diperoleh gambaran yang menyeluruh mengenai karakteristik dan perilaku beton dengan penambahan limbah keramik.

Hasil Pengujian Slump

Berdasarkan hasil uji slump, tingkat workabilitas beton menunjukkan kecenderungan berubah seiring dengan bertambahnya kadar limbah keramik yang digunakan sebagai filler dalam campuran. Beton tanpa penambahan limbah keramik (0%) menghasilkan nilai slump

tertinggi, yang mengindikasikan bahwa beton segar memiliki kelebihan yang lebih baik serta lebih mudah dalam proses pencampuran dan pelaksanaan pengecoran.

Penurunan nilai slump mulai teramat pada campuran beton yang mengandung limbah keramik dengan variasi mulai dari 15% hingga 45%. Seiring dengan meningkatnya persentase limbah keramik, nilai slump yang diperoleh cenderung mengalami penurunan secara bertahap. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan limbah keramik dalam campuran memberikan pengaruh terhadap menurunnya tingkat kemudahan penggerjaan beton segar. Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa material berbasis keramik memiliki tekstur permukaan yang lebih kasar serta bentuk partikel yang tidak seragam jika dibandingkan dengan agregat alami, sehingga meningkatkan gesekan antarpartikel dan mengurangi kelebihan campuran beton (Medina et al., 2012).

Selain karakteristik permukaan, limbah keramik juga umumnya memiliki kemampuan menyerap air yang lebih tinggi dibandingkan agregat halus alami. Kondisi ini menyebabkan sebagian air pencampur terserap oleh partikel limbah keramik, sehingga jumlah air bebas dalam campuran berkurang dan berdampak pada menurunnya nilai slump (Senthamarai & Manoharan, 2005). Beberapa penelitian juga melaporkan bahwa penggunaan material daur ulang berbasis keramik sebagai filler atau substitusi agregat dapat menurunkan workabilitas beton apabila tidak disertai dengan penyesuaian kadar air atau pemanfaatan bahan tambahan kimia.

Meskipun terjadi penurunan nilai slump, seluruh variasi campuran beton masih berada dalam batas kelebihan yang diperkenankan untuk pekerjaan beton struktural sesuai dengan ketentuan standar yang berlaku. Dengan demikian, beton tetap dapat dikerjakan tanpa menimbulkan masalah segregasi maupun bleeding yang berlebihan. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah keramik sebagai filler perlu diimbangi dengan pengaturan proporsi campuran yang tepat agar workabilitas beton tetap memenuhi persyaratan teknis (Neville, 2011). Rekapitulasi hasil pengujian slump disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2. Hasil Uji Slump.

No	Variasi Campuran	Tinggi kerucut Abrams (cm)	Limbah Keramik (% dari agregat halus)	Nilai slump (cm)
1	BK0	30	0%	17,20
2	BK15	30	15%	17,15
3	BK25	30	25%	17,00
4	BK35	30	35%	16,86
5	BK45	30	45%	16,60

Berdasarkan ketentuan SNI 1972:2008 tentang Cara Uji Slump Beton, nilai slump digunakan sebagai indikator tingkat workabilitas beton segar yang berkaitan dengan kemudahan pencampuran, pengangkutan, pengecoran, dan pemasatan beton. Untuk beton struktural normal yang dicor secara manual maupun menggunakan alat bantu sederhana, nilai slump yang direkomendasikan umumnya berada pada kisaran 7,5 – 18 cm, tergantung pada jenis pekerjaan dan metode pelaksanaan di lapangan.

Hasil pengujian slump yang disajikan pada tabel, diperoleh bahwa seluruh variasi campuran beton memiliki nilai slump yang relatif tinggi dan masih berada dalam rentang workabilitas yang baik. Beton normal tanpa penambahan limbah keramik (BK0) menunjukkan nilai slump sebesar 17,20 cm, yang menandakan bahwa campuran beton segar memiliki tingkat kelecanan yang sangat baik dan mudah dikerjakan.

Pada variasi campuran dengan penambahan limbah keramik sebesar 15% (BK15), nilai slump sedikit menurun menjadi 17,15 cm. Penurunan ini relatif kecil, sehingga secara praktis tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap kemudahan penggerjaan beton dibandingkan beton normal. Selanjutnya, pada campuran BK25 dengan substitusi limbah keramik sebesar 25%, nilai slump tercatat sebesar 17,00 cm, yang menunjukkan kecenderungan penurunan workabilitas seiring bertambahnya persentase limbah keramik dalam campuran beton.

Penurunan nilai slump semakin terlihat pada variasi BK35 dan BK45. Pada campuran BK35, nilai slump menurun menjadi 16,86 cm, sedangkan pada campuran dengan persentase limbah keramik tertinggi, yaitu BK45, nilai slump mencapai 16,60 cm. Meskipun terjadi penurunan secara bertahap, nilai slump tersebut masih tergolong tinggi dan memenuhi persyaratan workabilitas untuk beton struktural, sehingga beton masih dapat dicampur, ditempatkan, dan dipadatkan dengan baik tanpa mengalami segregasi yang berlebihan.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa peningkatan persentase limbah keramik sebagai substitusi agregat halus menyebabkan penurunan nilai slump beton. Hal ini disebabkan oleh karakteristik limbah keramik yang memiliki permukaan lebih kasar dan bentuk butiran yang tidak beraturan, serta daya serap air yang cenderung lebih tinggi dibandingkan pasir alami. Kondisi tersebut meningkatkan gesekan antarpartikel dan mengurangi jumlah air bebas dalam campuran beton, sehingga workabilitas beton segar menurun.

Namun demikian, penurunan nilai slump yang terjadi masih dalam batas yang dapat diterima, sehingga penggunaan limbah keramik hingga 45% sebagai filler atau substitusi agregat halus masih memungkinkan tanpa mengorbankan workabilitas beton secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa limbah keramik berpotensi digunakan sebagai material alternatif ramah lingkungan dalam campuran beton dengan pengendalian proporsi yang tepat.

Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton merupakan indikator utama dalam penilaian mutu beton struktural, karena parameter ini menggambarkan kemampuan beton dalam menerima dan menahan beban tekan yang bekerja. Dalam perencanaan elemen beton bertulang, mutu beton dinyatakan melalui nilai kuat tekan karakteristik (f'_c), yang menjadi dasar dalam penentuan dimensi serta kapasitas daya dukung struktur.

Pada penelitian ini, beton dirancang dengan mutu K-225 yang memiliki nilai kuat tekan karakteristik setara dengan f'_c sebesar 20 MPa pada umur 28 hari. Oleh sebab itu, pengujian kuat tekan dilakukan untuk menilai sejauh mana penambahan limbah keramik sebagai bahan alternatif dalam campuran beton memengaruhi pencapaian kuat tekan yang direncanakan. Pengujian dilaksanakan pada benda uji berbentuk silinder setelah beton mencapai umur 28 hari, dengan prosedur yang mengacu pada standar pengujian yang berlaku. Nilai kuat tekan yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan target f'_c sebesar 20 MPa guna mengevaluasi dampak variasi kadar limbah keramik terhadap kinerja beton. Ringkasan hasil pengujian kuat tekan disajikan pada tabel berikut.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan.

Variasi Campuran	Ukuran Benda Uji		Luas Penampang	Beban Maksimum	Kuat Tekan Aktual	Rata-Rata Kuat Tekan
	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	(cm ²)	(kn)	(Mpa)	(Mpa)
BK0	14,75	30,10	170,79	303,83	17,79	17,79
	14,58	30,14	166,87	292,69	17,54	
	15,00	30,15	176,63	318,81	18,05	
BK15	14,97	30,25	175,92	309,27	17,58	17,48
	15,00	30,25	176,63	316,16	17,90	
	14,87	30,00	173,58	294,21	16,95	
BK25	14,95	30,28	175,45	297,74	16,97	16,84
	14,95	30,18	175,45	294,05	16,76	
	14,98	30,10	176,15	295,59	16,78	
BK35	14,78	30,00	171,48	288,95	16,85	16,78
	15,00	30,26	176,63	295,85	16,75	
	14,90	30,18	174,28	291,92	16,75	
BK45	15,00	30,00	176,63	294,96	16,70	16,65
	15,00	30,32	176,63	293,90	16,64	
	14,95	30,30	175,45	291,60	16,62	

Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran menghasilkan nilai kuat tekan aktual yang relatif seragam pada setiap benda uji. Konsistensi hasil tersebut mengindikasikan bahwa tahapan pencampuran material, proses pencetakan, serta perawatan beton telah dilaksanakan dengan baik, sehingga perbedaan nilai antar sampel masih berada dalam rentang toleransi yang dapat diterima.

Pada campuran beton acuan tanpa penambahan limbah keramik (BK0), nilai kuat tekan aktual berada pada kisaran 17,54 MPa hingga 18,05 MPa, dengan nilai rata-rata sebesar 17,79

MPa. Nilai ini digunakan sebagai pembanding utama untuk mengevaluasi pengaruh penambahan limbah keramik pada variasi campuran selanjutnya. Untuk campuran BK15, yaitu beton dengan penggantian limbah keramik sebesar 15% terhadap agregat halus, diperoleh nilai kuat tekan rata-rata sebesar 17,48 MPa. Terjadi penurunan yang relatif kecil dibandingkan beton normal, yang menunjukkan bahwa penggunaan limbah keramik pada kadar rendah belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan kekuatan tekan beton.

Pada variasi BK25, nilai rata-rata kuat tekan tercatat sebesar 16,84 MPa. Penurunan kuat tekan pada variasi ini mulai terlihat lebih nyata jika dibandingkan dengan BK0 dan BK15. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan proporsi limbah keramik sebagai filler atau pengganti agregat halus mulai memengaruhi kemampuan beton dalam menahan beban tekan. Selanjutnya, pada variasi BK35 diperoleh nilai kuat tekan rata-rata sebesar 16,78 MPa, sedangkan variasi BK45 menghasilkan nilai terendah dengan rata-rata sebesar 16,65 MPa. Pola penurunan ini memperlihatkan kecenderungan bahwa semakin besar persentase limbah keramik yang digunakan dalam campuran, semakin rendah kuat tekan beton yang dihasilkan. Kondisi ini diduga berkaitan dengan sifat limbah keramik yang memiliki tekstur permukaan lebih kasar serta ikatan yang kurang optimal dengan pasta semen dibandingkan agregat halus alami.

Jika dibandingkan dengan mutu beton rencana K-225 yang setara dengan kuat tekan karakteristik $f'c = 20$ MPa, seluruh variasi campuran dalam penelitian ini menghasilkan nilai kuat tekan rata-rata yang masih berada di bawah target tersebut. Meskipun demikian, penurunan kuat tekan yang terjadi menunjukkan kecenderungan yang relatif bertahap. Oleh karena itu, penggunaan limbah keramik pada kisaran 15% hingga 25% masih menunjukkan performa beton yang mendekati beton normal dan berpotensi untuk ditingkatkan melalui optimalisasi desain campuran, seperti pengaturan faktor air-semen atau penambahan bahan tambah. Secara umum, hasil pengujian mengonfirmasi bahwa pemanfaatan limbah keramik sebagai material alternatif dalam beton berpengaruh terhadap penurunan kuat tekan, di mana peningkatan persentase limbah keramik berbanding lurus dengan besarnya penurunan kekuatan tekan. Dengan demikian, diperlukan penentuan kadar penggunaan limbah keramik yang paling optimal agar beton yang dihasilkan tetap memenuhi persyaratan teknis kuat tekan yang direncanakan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Pemanfaatan limbah keramik sebagai bahan pengisi dalam campuran beton menunjukkan kecenderungan penurunan pada tingkat workabilitas dan kuat tekan seiring dengan bertambahnya proporsi material tersebut. Hasil pengujian slump memperlihatkan penurunan nilai dari 17,20 cm pada beton acuan (BK0) menjadi 16,60 cm pada campuran dengan kadar limbah keramik tertinggi (BK45), atau mengalami penurunan sebesar 3,49%. Meskipun demikian, seluruh variasi campuran masih berada dalam batas kelecakan yang disyaratkan untuk beton struktural berdasarkan ketentuan SNI.

Penurunan yang serupa juga terjadi pada parameter kuat tekan beton pada umur 28 hari. Nilai kuat tekan rata-rata berkurang dari 17,79 MPa pada beton normal menjadi 16,65 MPa pada variasi BK45, dengan persentase penurunan maksimum sekitar 6,41%. Meskipun seluruh campuran beton yang diuji belum mencapai mutu rencana $f'c = 20$ MPa (K-225), penggunaan limbah keramik pada kisaran 15% hingga 25% masih menghasilkan performa beton yang mendekati beton normal. Kondisi ini menunjukkan bahwa limbah keramik berpotensi untuk dimanfaatkan lebih lanjut sebagai material alternatif dalam beton melalui upaya penyempurnaan desain campuran, seperti pengaturan faktor air-semen atau penggunaan bahan tambahan yang sesuai.

DAFTAR REFERENSI

- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 1972:2008: Metode uji slump beton (Padanan ASTM C143)*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 1974:2011: Metode uji kuat tekan beton (Padanan ASTM C39)*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). *SNI 2461:2014: Spesifikasi agregat untuk beton*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). *SNI 2049:2015: Semen Portland*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019: Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*. Badan Standardisasi Nasional.
- Binici, H. (2007). Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1191–1197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.002>
- De Brito, J., & Saikia, N. (2013). *Recycled aggregate in concrete: Use of industrial, construction and demolition waste*. Springer.

- Hansen, T. C. (1992). *Recycling of demolished concrete and masonry*. E & FN Spon.
- Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, E. A. (2009). Recycling of waste ceramic tiles as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(9), 2876–2883. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.039>
- Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to ceramics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Medina, C., Sánchez de Rojas, M. I., & Frías, M. (2012). Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.08.015>
- Medina, C., Zhu, W., Howind, T., Sánchez de Rojas, M. I., & Frías, M. (2014). Influence of mixed recycled aggregate on the physical–mechanical properties of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, 68, 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.002>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Murdock, L. J., Brook, K. M., & Dewar, J. D. (1991). *Concrete: Materials and practice* (6th ed.). Edward Arnold.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 832–838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>
- Rashid, K., Razzaq, A., Ahmad, M., Rashid, T., & Tariq, S. (2017). Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate. *Construction and Building Materials*, 154, 829–840. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.219>
- Senthamarai, R. M., & Devadas Manoharan, P. (2005). Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 27(9–10), 910–913. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.04.003>
- Zimbili, O., Salim, W., & Ndambuki, J. (2014). A review on the usage of ceramic wastes in concrete production. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 8(1), 91–95.