

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, industri konstruksi menghadapi tekanan yang semakin besar untuk mengadopsi praktik berkelanjutan sebagai respons terhadap meningkatnya dampak lingkungan dari material konvensional dan menumpuknya limbah konstruksi dan pembongkaran (CDW). Mortar, sebagai komponen dasar dalam konstruksi, memainkan peran penting dalam mengikat elemen pasangan bata, mentransfer beban, serta meningkatkan daya tahan struktural dan aspek estetika. Mortar konvensional yang tersusun dari campuran semen, pasir, dan air memiliki peran krusial dalam aplikasi struktural maupun non-struktural berkat fleksibilitas dan kinerja mekaniknya (Evangelista et al., 2015; Zeng et al., 2022). Mengingat produksi semen merupakan salah satu penyumbang emisi CO₂ terbesar, upaya untuk mengganti sebagian semen dengan alternatif yang lebih berkelanjutan tidak hanya bijak secara lingkungan, tetapi juga krusial dalam mendukung target dekarbonisasi global. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah pemanfaatan Recycled Concrete Powder (RCP), yaitu produk sampingan dari proses penghancuran dan pemrosesan limbah beton, yang telah menunjukkan potensi sebagai bahan pengisi dan material semen tambahan (SCM) (Shi et al., 2016).

RCP umumnya diperoleh melalui proses penghancuran limbah beton dan penyaringan hingga ukuran partikel halus, khususnya yang lolos ayakan No. 200 dan No. 360. Partikel halus ini mengandung sisa pasta semen dan klinker yang belum terhidrasi, sehingga bersifat reaktif dan mampu berpartisipasi dalam reaksi pozzolanik ketika dimasukkan kembali ke dalam campuran semen baru (G. Liu et al., 2019; Tang et al., 2022). Luas permukaan, morfologi partikel, dan komposisi kimia RCP sangat memengaruhi kinetika hidrasi dan performa mekanik produk akhir. Ketika digunakan sebagai filler dalam mortar, RCP dapat meningkatkan kerapatan, memperbaiki mikrostruktur, dan memperkuat kekuatan, selama rasio penggantian dioptimalkan. Namun, sifat halus RCP juga berdampak pada kemudahan kerja (*workability*), karena sering kali meningkatkan kebutuhan air dalam campuran segar (Señas et al., 2016; Z. Zhao et al., 2015). Meskipun demikian, reaktivitas kimia RCP memberikan jalur potensial untuk menurunkan kadar klinker dalam produksi mortar, yang pada akhirnya mengurangi emisi karbon sambil mempertahankan, bahkan meningkatkan, kinerja mekanik (Wu & Ye, 2017).



Optimized using
trial version
www.balesio.com

sebagai parameter utama dalam menilai kelayakan struktural sebagai kemampuan material dalam menahan beban aksial dan torsi pada benda uji kubus atau silinder. Parameter ini menentukan kapasitas dukung dan sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan pengikat dan agregat (Liu et al., 2015; Rozière et al., 2015). Sebagai pelengkap, kuat tekan diukur melalui pengujian tekan diametral pada silinder, dan meskipun

tegangan tarik dalam mortar jarang dominan, keberadaannya dapat memicu retak dini dan kegagalan. Oleh karena itu, evaluasi terhadap kapasitas tarik sangat penting untuk memahami daktilitas dan ketahanan retak mortar (Ince et al., 2021; Li & Li, 2015). Selain itu, *Strength Activity Index* (SAI) merupakan indikator standar dalam mengevaluasi reaktivitas material pozzolan. Indeks ini dihitung melalui perbandingan kuat tekan mortar dengan substitusi sebagian semen terhadap campuran kontrol. Nilai SAI yang tinggi menunjukkan kontribusi pozzolan yang efektif, yang memperbaiki efisiensi bahan pengikat dan pengembangan kekuatan jangka panjang (Almeida Filho et al., 2010; Gholhaki et al., 2018; Nwankwo et al., 2020).

Di luar atribut mekanik, performa lingkungan dari material berbasis semen kini semakin banyak dinilai melalui sejumlah kategori dampak. *Abiotic Depletion Potential* (ADP) mencerminkan konsumsi sumber daya tidak terbarukan, sedangkan *Global Warming Potential* (GWP) mengukur emisi gas rumah kaca dalam cakupan waktu 100 tahun (Feiz et al., 2015). *Ozone Depletion Potential* (ODP) mengevaluasi kontribusi terhadap penipisan lapisan ozon stratosfer, dan *Photochemical Ozone Creation Potential* (POCP) mencerminkan pembentukan ozon troposferik yang erat kaitannya dengan kabut asap perkotaan (Ayati et al., 2022). Indikator lainnya termasuk *Acidification Potential* (AP), yang terkait dengan pembentukan hujan asam, dan *Eutrophication Potential* (EP), yang menandai risiko pelimpahan unsur hara pada ekosistem perairan (Ayati et al., 2022; Feiz et al., 2015). Kerangka *Life Cycle Assessment* (LCA) yang mengintegrasikan parameter-parameter ini memungkinkan evaluasi menyeluruh terhadap beban lingkungan dari penggunaan material daur ulang dalam mortar, serta menunjukkan bahwa pemanfaatan RCP secara signifikan dapat mengurangi jejak ekologi melalui pengurangan kebutuhan material murni (Kamali & Ghahremaninezhad, 2015).

Analisis mikrostruktur menyediakan wawasan penting terhadap arsitektur internal dan perkembangan fase dalam mortar yang mengandung RCP. *Scanning Electron Microscopy* (SEM) memungkinkan pencitraan matriks beresolusi tinggi untuk mengidentifikasi ikatan antarfasi, distribusi pori, dan interaksi antarpartikel yang semuanya memengaruhi kekuatan dan ketahanan (Luo et al., 2018; Thomas et al., 2018). Sementara itu, *X-Ray Diffraction* (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi fase kristalin seperti portlandit, ettringit, dan kalsium silikat hidrat, yang krusial dalam menafsirkan progres hidrasi dan aktivitas pozzolan (Saillio et al., 2019). Penilaian mikrostruktur ini sangat penting dalam mengaitkan performa makroskopik dengan fenomena mikroskopik, serta untuk mengoptimalkan strategi desain campuran dengan penggunaan bahan pengisi daur ulang.



apat berbagai kemajuan, praktik penggunaan material daur ulang seperti RCP yang lolos ayakan No. 200 dan No. 360 masih terdapat dalam kaitannya terhadap pengaruhnya yang berbeda-beda, baik yang segar maupun keras. Studi awal menunjukkan bahwa fraksi pozzolan yang lebih tinggi dan dapat meningkatkan ketahanan jangka panjang bila digunakan secara tepat (Pineda et

al., 2022; H. Zhang et al., 2018). Namun, manfaat tersebut sangat bergantung pada keseimbangan antara kebutuhan air, pemadatan partikel, dan reaktivitas kimia. Selain itu, variabilitas kualitas material sumber dan teknik pemrosesan dapat menghasilkan performa yang tidak konsisten. Daya tahan jangka panjang terhadap paparan lingkungan agresif dan kompatibilitas dengan bahan tambah konvensional juga masih menjadi perhatian yang belum dikaji secara sistematis. Isu-isu tersebut membentuk kesenjangan penelitian yang signifikan dan menghambat adopsi RCP berukuran sangat halus dalam formulasi mortar komersial (Šaviĳa et al., 2020).

Permasalahan utama yang diangkat dalam penelitian ini berkaitan dengan ketidakefisienan lingkungan dan performa pada formulasi mortar konvensional. Ketergantungan terhadap bahan baku murni seperti semen Portland dan pasir sungai mempercepat deplesi sumber daya dan meningkatkan emisi karbon, sementara limbah beton yang tidak dimanfaatkan menambah beban lingkungan. Solusi yang umum diterapkan adalah mengganti sebagian semen dengan material pozzolan atau filler seperti abu terbang, slag, dan silika fume. Namun, ketersediaan, konsistensi, dan biaya material alternatif tersebut sering kali membatasi penerapannya secara luas. Di sisi lain, meskipun agregat daur ulang telah banyak digunakan, aplikasinya lebih terfokus pada fraksi kasar dan halus untuk beton, sehingga potensi fraksi ultra halus seperti RCP belum dimanfaatkan secara optimal.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, sejumlah studi telah mengeksplorasi penggunaan RCP sebagai substituen semen atau filler dalam mortar, dengan hasil yang beragam. Penelitian menunjukkan bahwa bila digunakan dalam proporsi sedang, RCP dapat meningkatkan kuat tekan berkat aktivitas hidraulik laten dan efek pengisi, khususnya ketika partikel cukup halus untuk mengisi mikrovoid dan mendorong hidrasi sekunder (Jaturapitakkul et al., 2011; Tang et al., 2022). Selain itu, eksperimen oleh Señas et al. (2016) menunjukkan bahwa mortar dengan kandungan RCP hingga 15% tetap mempertahankan workability yang baik dan bahkan menunjukkan kekuatan awal yang lebih tinggi dibandingkan campuran kontrol. Temuan ini menunjukkan bahwa RCP memiliki potensi untuk menggantikan sebagian semen tanpa mengorbankan performa, terutama jika reaktivitas pozzolannya dimanfaatkan secara optimal.

Penelitian lanjutan oleh Zhang et al. (2018) dan Pineda et al. (2022) menyoroti pengaruh ukuran partikel RCP terhadap kinetika hidrasi, waktu ikat, dan kekuatan jangka panjang. Partikel yang lebih halus seperti yang lolos ayakan No. 360 cenderung memiliki reaktivitas yang lebih tinggi, menghasilkan mikrostruktur yang lebih padat dan reaktivitas yang lebih rendah. Namun, partikel tersebut juga meningkatkan kebutuhan air dan dapat menurunkan kemudahan kerja jika tidak digunakan dengan tepat. Trade-off ini menekankan perlunya pengembangan formulasi yang dioptimalkan, yang mampu memanfaatkan reaktivitas RCP untuk mitigasi kekurangannya. Beberapa studi menyarankan penggunaan plasticizer atau modifikasi rasio air terhadap semen sebagai solusi. Pendekatan ini memerlukan kalibrasi yang cermat.



Kendati demikian, studi komprehensif yang mengkaji baik aspek mekanik maupun lingkungan dari penggunaan RCP terutama yang berasal dari ayakan No. 200 dan No. 360 masih terbatas. Literatur yang ada cenderung hanya fokus pada performa kekuatan atau aspek lingkungan secara terpisah, jarang mengintegrasikan keduanya dalam satu kerangka eksperimen. Selain itu, hanya sedikit studi yang memanfaatkan karakterisasi mikrostruktur untuk mendukung pemahaman atas perilaku makroskopik yang diamati. Akibatnya, pemahaman yang jelas mengenai pengaruh RCP berukuran sangat halus terhadap durabilitas dan dampak ekologis pada berbagai dimensi performa masih belum tersedia. Keterbatasan ini menghambat pengambilan keputusan berbasis bukti bagi para insinyur dan pembuat kebijakan yang ingin mengarusutamakan penggunaan bahan pengisi daur ulang dalam mortar.

Penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan tersebut dengan mengevaluasi secara komprehensif sifat segar, kekuatan mekanik, dampak lingkungan, dan karakteristik mikrostruktur dari mortar yang mengandung Recycled Concrete Powder hasil limbah beton yang telah diayak hingga lolos ayakan No. 200 dan No. 360. Kebaruan dari studi ini terletak pada pendekatan terintegrasinya menganalisis tidak hanya kuat tekan dan kuat tarik belah, tetapi juga *Strength Activity Index* (SAI), indikator lingkungan (ADP, GWP, ODP, POCP, AP, dan EP), serta karakterisasi mikrostruktur melalui SEM dan XRD. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperjelas kelayakan substitusi semen dengan RCP dari limbah konstruksi, sambil mempertahankan performa mekanik dan lingkungan yang dapat diterima. Secara keseluruhan, studi ini mendukung transisi menuju praktik konstruksi sirkular dengan memanfaatkan aliran limbah yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal, sehingga berkontribusi terhadap inovasi material sekaligus keberlanjutan lingkungan.

Berdasarkan latar belakang dan berbagai penelitian terdahulu di atas, maka dapat disimpulkan bahwa penggunaan mortar dan penggunaan Bubuk beton daur ulang bisa menjadi solusi untuk terus menjaga lingkungan hidup. Sehingga penulis membuat penelitian dengan judul **“Sifat Segar, Mekanis dan dampak Lingkungan dari Mortar yang Menggunakan Bubuk Beton Daur Ulang”**

1.1.1 Rumusan Masalah

rumusan masalah yang dapat diidentifikasi dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



engaruh penggunaan bubuk beton daur ulang terhadap sifat

engaruh penggunaan bubuk beton daur ulang terhadap sifat r?

nurunan dampak lingkungan yang dihasilkan dari penggunaan daur ulang dalam pembuatan mortar?

1.1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi penggunaan bubuk beton daur ulang dalam pembuatan mortar, dengan fokus pada tiga aspek utama, yaitu sifat segar, sifat mekanik, dan dampak lingkungan.

1. Menganalisis pengaruh penggunaan bubuk beton daur ulang terhadap sifat segar mortar?
2. Menganalisis pengaruh penggunaan bubuk beton daur ulang terhadap sifat mekanis mortar?
3. Mengevaluasi penurunan dampak lingkungan yang dihasilkan dari penggunaan bubuk beton daur ulang dalam pembuatan mortar?

1.1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat yang signifikan, baik dalam aspek teknis, lingkungan, maupun ekonomi.

1. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah beton daur ulang, sehingga mendukung upaya pengurangan limbah konstruksi dan pemanfaatan sumber daya secara berkelanjutan.
2. Penelitian ini dapat menjadi dasar ilmiah untuk memahami bagaimana penggunaan bubuk beton daur ulang memengaruhi sifat segar dan mekanis mortar, yang dapat membantu meningkatkan efisiensi penggunaan material dalam industri konstruksi.
3. Dengan mengevaluasi potensi penurunan dampak lingkungan dari penggunaan bubuk beton daur ulang, penelitian ini dapat mendorong adopsi praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan, sekaligus menginspirasi inovasi lebih lanjut dalam penggunaan bahan daur ulang.

1.1.4 Batasan Penelitian

Agar penelitian ini dapat fokus dan terarah, perlu ditetapkan batasan masalah yang jelas.

1. Penelitian ini hanya fokus pada bubuk beton daur ulang yang dihasilkan dari penghancuran dan penggilingan beton daur ulang.
2. Bubuk beton daur ulang diperoleh dari limbah beton di laboratorium dengan mutu beton 20-40 Mpa di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.



Penelitian ini dibatasi pada presentasi 0%-5% dari total berat semen.

Dalam penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium volume campuran dengan jumlah sampel terbatas, dan tidak dalam skala besar atau aplikasi langsung pada proyek

1.2 Landasan Teori

1.2.1 Mortar

Mortar terdiri dari semen, pasir, air, dan bahan tambah, dimana kesemua material dasar tersebut ini bekerja melalui reaksi hidrasi antara semen dan air yang menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang memberikan kekuatan dan stabilitas. Sifat utama mortar meliputi kekuatan tekan, kohesi, kemudahan aplikasi (workability), serta durabilitas terhadap kondisi lingkungan. Perbandingan antara semen, pasir, dan air memengaruhi karakteristik mortar, di mana campuran dengan lebih banyak semen menghasilkan kekuatan lebih tinggi tetapi mungkin kurang mudah diaplikasikan. Mortar dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi konstruksi, seperti pembuatan tembok, plesteran, dan grouting, serta membantu mengatasi masalah seperti retak atau penurunan kekuatan pada struktur.

Salah satu aspek penting dari mortar melibatkan analisis sifat mekanisnya, khususnya deformabilitas dan kekuatannya. Cerqueira dkk. membahas penerapan teori elastis linier dan nonlinier untuk menilai modulus deformabilitas mortar yang digunakan dalam pasangan bata struktural (Cerqueira et al., 2020). Temuan mereka menunjukkan bahwa meskipun elastisitas linier tradisional memberikan pemahaman mendasar, kompleksitas perilaku mortar di bawah beban memerlukan pertimbangan model elastis nonlinier. Hal ini khususnya relevan saat mengevaluasi kinerja struktur pasangan bata, di mana interaksi antara mortar dan unit pasangan bata dapat secara signifikan memengaruhi integritas struktural keseluruhan.

Lebih spesifiknya, zona transisi antarmuka (ZTA) antara mortar dan agregat memainkan peran penting dalam menentukan sifat mekanis mortar. Yang & Weng menyoroti pentingnya pemodelan ZTA untuk memprediksi secara akurat koefisien migrasi klorida yang efektif dalam material berbasis semen (C. C. Yang & Weng, 2013). ZTA dicirikan oleh struktur mikro yang berbeda yang sering kali menunjukkan sifat yang berbeda dibandingkan dengan mortar massal, yang memengaruhi kekuatan dan permeabilitas. Pemahaman ini penting untuk mengembangkan mortar yang dapat menahan tantangan lingkungan, seperti masuknya klorida, yang penting untuk ketahanan.

Aspek terpenting dari mortar adalah fenomena yang dikenal sebagai creep, yang mengacu pada deformasi material yang bergantung pada waktu di bawah beban berkelanjutan. Secara khusus Wang dkk. menegaskan bahwa aliran air, khususnya 'air gel', merupakan kontributor signifikan terhadap creep dalam mortar



Aspek perilaku mortar dalam kasus ini sangat penting untuk mengisi beban jangka panjang diharapkan, hal ini karena dapat masi dan potensi kegagalan struktural jika tidak diperhitungkan desain.

untuk mempertimbangkan karakteristik kelembapan mortar, kasi pasangan bata. Ince dkk. memanfaatkan teori Sharp Front

untuk menganalisis proses pengeringan mortar sambungan yang baru dicampur (Ince et al., 2010). Penelitian mereka menunjukkan bahwa laju penyerapan air dari sambungan mortar dipengaruhi oleh ketebalan sambungan dan daya serap substrat. Hubungan ini penting untuk memastikan pengerasan dan kinerja mortar yang tepat dalam konstruksi pasangan bata, karena pengendalian kelembapan yang tidak memadai dapat menyebabkan berkurangnya kekuatan dan daya tahan.

Selain itu, analisis mikrostruktur mortar dapat memberikan wawasan tentang kinerjanya. Zhang et al. membahas kecenderungan retakan untuk menjalar di sepanjang antarmuka yang lebih lemah, seperti antara mortar dan batu, karena perbedaan inheren dalam sifat material (S. Zhang et al., 2018). Pemahaman ini dapat menginformasikan desain formulasi mortar yang meningkatkan ikatan dan mengurangi kemungkinan terbentuknya retakan, sehingga meningkatkan umur panjang struktur pasangan bata.

Singkatnya, mortar mencakup pemahaman multifaset tentang sifat mekanisnya, perilaku mikrostruktur, dan interaksinya dengan material lain. Dengan mengintegrasikan wawasan dari elastisitas nonlinier, pemodelan zona transisi antarmuka, perilaku merayap, dinamika perpindahan kelembapan, dan analisis mikrostruktur, para peneliti dan praktisi dapat mengembangkan formulasi mortar yang lebih efektif yang meningkatkan kinerja dan daya tahan struktur pasangan bata dan beton.

1.2.2 Daur Ulang Agregat Beton (DUAB)

Pelaksanaan daur ulang agregat beton didasarkan pada prinsip konstruksi berkelanjutan dan efisiensi sumber daya alam. Karena industri konstruksi menghadapi tekanan yang semakin meningkat untuk meminimalkan limbah dan mengurangi dampak lingkungan, penggunaan agregat daur ulang telah muncul sebagai solusi yang layak. Daur ulang agregat beton mencakup sifat, kinerja, dan implikasi penggunaan daur ulang agregat beton (DUAB) dalam formulasi beton baru, yang menyoroti manfaat dan tantangan yang terkait dengan praktik ini.

Salah satu manfaat utama penggunaan DUAB adalah potensinya untuk mengurangi penggunaan agregat alami. Namun banyak penelitian yang menunjukkan perlunya perhatian khusus pada penggunaan DUAB karena memberikan dampak negatif pada kinerja mortar dan beton. Wan dkk. menekankan bahwa variabilitas agregat daur ulang dapat secara signifikan memengaruhi sifat beton, terutama dalam hal ketahanan beku-cair dan daya tahan keseluruhan (Wan et al., 2012). Keberadaan



t pada agregat daur ulang merupakan faktor penting yang a beton, karena dapat menyebabkan retakan mikro dan i mekanis (Manzi et al., 2013). Zhao dkk. menunjukkan bahwa halus daur ulang dalam mortar campuran dapat menghasilkan layak, meskipun kekuatan ini mungkin lebih rendah daripada agregat alami (W. Zhao et al., 2011). Sifat mekanis beton yang at daur ulang sering kali lebih rendah dari pada yang dibuat

dengan agregat alami. Selain itu, Liu dan Peng membahas ketahanan beku beton daur ulang, dengan mencatat bahwa kandungan mortar yang melekat tinggi dapat membahayakan sifat mekanis dibandingkan dengan beton konvensional (Y. Liu & Peng, 2019). Masalah-masalah ini menggarisbawahi perlunya penelitian berkelanjutan untuk meningkatkan pemrosesan dan penanganan agregat daur ulang guna meningkatkan kinerjanya dalam aplikasi beton. Variabilitas ini memerlukan pertimbangan yang cermat selama proses desain campuran untuk memastikan bahwa beton yang dihasilkan memenuhi standar kinerja yang disyaratkan.

Selain itu, penggabungan DUAB memberikan dampak positif berupa pengurangan jejak karbon pada produksi beton. Qureshi dkk., mencatat bahwa meskipun kekuatan tarik dan lentur beton dapat menurun saat menggunakan DUAB, manfaat lingkungan dari daur ulang limbah konstruksi lebih besar dari pada penurunan karakteristik mekanik (Qureshi et al., 2016). Kemampuan untuk menggunakan kembali bahan limbah tidak hanya menghemat sumber daya alam tetapi juga berkontribusi pada pengurangan limbah di tempat pembuangan akhir.

1.2.3 Bubuk Beton Daur Ulang (BBDU)

Bubuk beton daur ulang (BBDU) berkisar pada pembuatannya, sifat-sifatnya, dan potensi aplikasinya dalam konstruksi, khususnya sebagai bahan semen tambahan (BST). BBDU diproduksi selama daur ulang beton, di mana proses penghancuran dan penggilingan menghasilkan partikel-partikel halus yang dapat digunakan kembali dalam formulasi beton baru. Metode ini dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan yang ditimbulkan oleh limbah beton dan meningkatkan keberlanjutan produksi beton.

Salah satu keuntungan utama dari pemanfaatan bubuk beton daur ulang adalah potensinya untuk meningkatkan sifat mekanis beton. Penelitian menunjukkan bahwa BBDU dapat meningkatkan kekuatan tekan bila digunakan sebagai pengganti sebagian semen. Dalam penelitian Kępniak et al. menunjukkan bahwa penggabungan serbuk batu kapur limbah, yang memiliki karakteristik serupa dengan BBDU, menghasilkan peningkatan kekuatan tekan yang signifikan karena peningkatan zona transisi antarmuka (ZTA) antara agregat dan matriks semen (Kępniak et al., 2021). Peningkatan ini disebabkan oleh ukuran partikel serbuk limbah yang lebih halus, yang meningkatkan luas permukaan yang tersedia untuk reaksi hidrasi, sehingga berkontribusi pada struktur mikro yang lebih padat.

Selain itu, aktivitas pozolanik dari bubuk beton daur ulang merupakan salah satu faktor yang meningkatkan efektivitasnya sebagai BST. Penelitian Wang menyorotkan sifat pozolanik yang dapat meningkatkan kinerja beton dengan meningkatkan ketahanannya terhadap korosi sulfat dan klorida secara keseluruhan (Wang, et al., 2023). Hal ini sejalan dengan penelitian Dacić et al., yaitu bahwa penggunaan serbuk beton daur ulang sebagai bahan tambahan yang tidak hanya menggantikan semen portland tetapi juga berkontribusi pada karakteristik mekanis dan daya tahan beton (Dacić et



al., 2023). Ketika air ditambahkan ke BBDU, dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida untuk menciptakan lebih banyak hidrat kalsium silikat; hidrat inilah yang memberi kekuatan pada material tersebut.

Manfaat lingkungan dari penggunaan bubuk beton daur ulang juga signifikan. Dengan menggunakan kembali bahan limbah, industri konstruksi dapat mengurangi ketergantungannya pada bahan baru, sehingga meminimalkan jejak karbon yang terkait dengan produksi beton. Pavlů et al. menekankan bahwa penggunaan bubuk semen daur ulang dari beton limbah dapat menghasilkan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan dengan produksi semen tradisional, yang boros energi dan berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca (Pavlů et al., 2016). Hal ini sejalan dengan tujuan yang lebih luas dari praktik konstruksi berkelanjutan, yang bertujuan untuk mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi sumber daya.

Menambahkan bubuk beton daur ulang ke campuran beton baru juga dapat mengubah karakteristik reologi dan kemampuan pengerjaannya. Lin et al. menunjukkan bahwa penggunaan BBDU dapat meningkatkan fluiditas mortar self-leveling, sehingga lebih mudah dikerjakan selama aplikasi (Lin et al., 2020). Sifat ini penting untuk memastikan bahwa beton dapat ditempatkan dan diselesaikan secara efektif, terutama dalam bentuk yang rumit atau ruang yang sempit.

Untuk memahami sepenuhnya bagaimana kinerja beton dengan menggunakan BBDU, harus mempertimbangkan tidak hanya sifat mekanisnya, tetapi juga mikrostrukturnya. Penelitian oleh Ali et al. menunjukkan bahwa penggabungan BBDU dapat menghasilkan karakteristik ketahanan yang lebih baik, seperti permeabilitas yang berkurang dan peningkatan ketahanan terhadap serangan kimia (Ali et al., 2021). Atribut-atribut ini sangat penting untuk memastikan keawetan struktur beton, terutama dalam kondisi lingkungan yang keras.

1.2.4 Flow

Flow pada pembuatan mortar adalah parameter yang mengukur kemampuan campuran mortar untuk menyebar atau mengalir di bawah pengaruh gaya tertentu. Pengujian flow penting untuk menentukan konsistensi dan workability mortar, yang memengaruhi kemudahan aplikasi serta hasil akhirnya. Berdasarkan SNI 6882:2014, pengujian flow dilakukan menggunakan alat uji flow table, di mana campuran mortar dimasukkan ke dalam cetakan berbentuk kerucut terpotong, lalu diangkat dan diuji dengan menjatuhkan meja flow sebanyak 15 kali.



3-6825-2002, pengujian kuat tekan mortar dilakukan untuk bahan material terhadap beban tekan aksial yang bekerja secara tekanan benda uji berbentuk kubus. Benda uji standar memiliki 50 mm × 50 mm, dan pengujian dilakukan setelah mortar perawatan (curing) selama periode 7, 28 dan 90, guna pangan kekuatan seiring waktu. Nilai kuat tekan ditentukan

dengan membagi beban maksimum yang diterima spesimen hingga mengalami keruntuhan terhadap luas penampang bidang tekan. Pengujian ini bertujuan menilai kualitas campuran mortar serta pengaruh bahan penyusun, seperti jenis semen, agregat halus, air, dan bahan tambahan lainnya. Kekuatan tekan mortar sangat dipengaruhi oleh faktor rasio air-semen, tingkat kerapatan dan homogenitas pencampuran, serta kondisi perawatan yang memengaruhi hidrasi semen. Oleh karena itu, metode ini menjadi parameter utama dalam penilaian performa struktural mortar dalam pekerjaan konstruksi bangunan dan infrastruktur.

1.2.6 Kuat Tarik Belah

Berdasarkan ASTM C496/C496M, pengujian tarik belah tidak langsung (split tensile strength) pada mortar dilakukan menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan dimensi standar 50 mm diameter dan 100 mm tinggi, untuk mengevaluasi kemampuan material dalam menahan gaya tarik yang bekerja secara tidak langsung. Dalam metode ini, beban diterapkan secara diametral melalui dua garis kontak sejajar di sepanjang panjang silinder, sehingga menghasilkan tegangan tarik maksimum di bidang vertikal tengah spesimen. Gaya tarik ini menyebabkan retakan membelah secara vertikal, dan kuat tarik belah dihitung berdasarkan besar beban maksimum yang menyebabkan keruntuhan, dengan mempertimbangkan dimensi geometrik silinder. Uji ini penting karena memberikan gambaran tentang karakteristik tarik mortar, yang tidak dapat dicapai melalui uji tekan konvensional, mengingat mortar cenderung lemah terhadap gaya tarik langsung. Nilai kuat tarik belah yang diperoleh merepresentasikan ketahanan ikatan antar partikel dan potensi retak akibat tegangan tarik yang timbul dalam kondisi beban nyata di lapangan, terutama dalam elemen struktural seperti pasangan bata, render, dan struktur campuran lainnya.

1.2.7 Parameter Eco-beneficial

Parameter eco-beneficial dievaluasi untuk mengkaji keuntungan dari penggunaan mortar yang menggunakan limbah beton daur ulang dalam campuran mortar. Penelitian ini menilai parameter lingkungan ini dengan beberapa dampak kerusakan lingkungan, antara lain ADP (*Abiotic Depletion Potential*), GWP (*Global Warming Potential*), AP (*Acidification Potential*), EP (*Eutrophication Potential*), dan ODP (*Ozone Depletion Potential*).

ADP pada konteks Life Cycle Assessment (LCA) merujuk pada Abiotic Depletion Potential atau Potensi Deplesi Abiotik. Ini adalah salah satu indikator yang digunakan dalam LCA untuk mengukur dampak dari penipisan sumber daya alam seperti mineral dan bahan bakar fosil, yang disebabkan oleh indikator ADP membantu menentukan sejauh mana penggunaan terbatas dapat mempengaruhi keberlanjutan lingkungan, dengan pengurangan cadangan sumber daya alam di masa depan.



rgan dengan semua jenis gas rumah kaca, terutama emisi CO₂ berpotensi menaikkan suhu global dan mengakibatkan dampak

negatif terhadap ekosistem, kesehatan manusia, dan keberlanjutan bahan. Secara umum, perubahan iklim mencerminkan variabilitas suhu global. CO₂ yang dihasilkan oleh aktivitas manusia menetap di atmosfer bumi, menghalangi kehilangan panas yang telah diterima dari matahari. Kenaikan suhu global ini berpotensi memicu perubahan iklim, penggurunan, naiknya permukaan laut, dan penyebaran penyakit. Berdasarkan konsensus ilmiah, peningkatan emisi gas rumah kaca berdampak besar terhadap perubahan iklim.

Dampak AP terlihat dari deposisi polutan asam, seperti sulfur dan nitrogen, yang berakibat pada tanah, air, organisme, ekosistem, dan bahan lainnya. Gas asam, seperti sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x), yang terlepas saat pembakaran bahan bakar fosil, bereaksi dengan air baik di tanah atau di atmosfer, menciptakan fenomena "hujan asam." Zat asam ini menghasilkan ion hidrogen (H⁺), yang sangat reaktif dan bisa mengubah komposisi serta sifat fisik bahan lain. Akibatnya, deposisi asam ini merusak ekosistem dan menyebabkan korosi pada bermacam-macam bahan.

Kategori EP mencakup dampak tingginya kadar nutrisi makro seperti fosfor dan nitrogen yang menyebabkan produksi biomassa yang berlebihan di ekosistem akuatik dan terestrial. Misalnya, kehadiran polutan udara dan limbah cair dapat meningkatkan kadar nitrat dan fosfat dalam air, yang mendorong eutrofikasi (kondisi berlebihnya nutrisi), merangsang pertumbuhan alga berlebih, menurunkan oksigen di air, dan merusak ekosistem.

Ozone Depletion Potential (ODP) dalam konteks Life Cycle Assessment (LCA) adalah indikator yang digunakan untuk mengukur potensi suatu bahan kimia dalam merusak lapisan ozon di atmosfer stratosfer. Lapisan ozon berfungsi sebagai pelindung bumi dari radiasi ultraviolet (UV) berbahaya yang dipancarkan oleh matahari. Bahan kimia seperti chlorofluorocarbons (CFCs), halons, dan beberapa senyawa lain yang mengandung klorin dan bromin diketahui dapat menyebabkan kerusakan pada lapisan ozon. ODP dinyatakan sebagai perbandingan antara potensi perusakan ozon dari suatu zat dibandingkan dengan CFC-11, yang dijadikan sebagai referensi standar dengan nilai ODP 1.0. Semakin tinggi nilai ODP suatu bahan, semakin besar dampaknya terhadap penipisan ozon.

Penelitian sebelumnya telah memperhatikan kuat tekan beton serta emisi CO₂ secara simultan (Vembu & Ammasi, 2024; Jenrisari et al, 2024). Penelitian tersebut juga mengevaluasi beberapa faktor sekaligus, termasuk kuat tekan dengan mempertimbangkan parameter lingkungan seperti ADP, GWP, AP, EP, dan ODP, dalam Persamaan 1.



.....(1)

dampak lingkungan parameter i yang diperoleh dari mix

design yang digunakan dibagi kuat tekan

i_{mix} = total dampak lingkungan parameter i yang diperoleh dari mix design yang digunakan

$f'c$ = kuat tekan (Mpa)

Inventarisasi parameter lingkungan ADP, GWP, ODP, POCP, AP, dan EP dilakukan dengan mengkaji literatur saintifik yang terpercaya. Tabel 1 memperlihatkan nilai-nilai ADP, GWP, ODP, POCP, AP dan EP untuk material semen, limbah beton daur ulang, pasir, dan air yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan data dari penelitian terdahulu.

Tabel 1. Data dampak lingkungan dari produksi mortar

Dampak Lingkungan	Material			
	OPC (Ohemeng & Naghizadeh, 2023)	RCP (Kancheva & Zaharieva, 2020)	SAND (Ohemeng & Naghizadeh, 2023)	WATER (Ohemeng & Naghizadeh, 2023)
ADP (kgSbeq)	3.99 E-03	2.47 E-08	3.37 E-10	1.57 E-11
GWP (kgCO ₂ eq)	9.51 E-01	8.69 E-03	9.87 E-03	1.33 E-04
ODP (kgCFC-11 eq)	1.09 E-07	2.47 E-10	1.71 E-11	5.93 E-12
POCP (kgC ₂ H ₄ eq)	8.31 E-05	6.06 E-07	2.80 E-06	4.99 E-08
AP (kgSO ₂ eq)	2.76 E-03	1.67 E-05	4.58 E-05	3.87 E-08
EP (kgPO ₄ eq)	3.60 E-04	2.32 E-06	1.08 E-05	9.70 E-07

1.2 Tinjauan Pustaka

1.2.1 Studi terdahulu terkait pengaruhu RCA terhadap karakteristik mortar

Penelitian yang dilakukan oleh (Z. Zhao et al., 2015) menjelaskan bahwa Agregat beton daur ulang halus (FRCA) juga disebut pasir daur ulang, yang memiliki ukuran partikel lebih kecil dari 5 mm, pada dasarnya terdiri dari mortar dan pasta semen yang mengeras. Oleh karena itu, agregat ini membutuhkan banyak air yang membuatnya sulit didaur ulang menjadi mortar dan beton. Dalam makalah ini, sifat-



yang mengandung FRCA telah dipelajari, termasuk sifat segar, sifat ruktur zona transisi antarmuka (ITZ). Pengaruh keadaan jenuh (ruh) pada sifat-sifat mortar dengan komposisi yang identik telah ulu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemerosotan mortar RCA kering selalu lebih besar daripada kemerosotan mortar RCA jenuh. Memang, dalam kasus FRCA kering, jumlah teoritis

air yang diserap ditambahkan pada awal pencampuran yang menyebabkan peningkatan sementara rasio W/C awal yang efisien dan volume pasta, yang menghasilkan kemampuan kerja yang lebih baik sebelum diserap ke dalam FRCA. Sebaliknya, air yang diserap dalam FRCA jenuh tidak tersedia dengan mudah dan dengan demikian tidak dapat berkontribusi untuk meningkatkan rasio W/C awal yang efisien. Selain itu, kekuatan tekan mortar yang mengandung FRCA kering selalu lebih besar daripada mortar yang dibuat dengan FRCA jenuh, yang dikaitkan dengan zona transisi antarmuka yang lebih tipis yang meningkatkan sifat mekanisnya. Pengaruh fraksi pasir daur ulang dan kelas granular pasir daur ulang pada sifat mekanis mortar kemudian dipelajari dengan FRCA jenuh. Kekuatan tekan mortar menurun secara kuasi linier saat persentase penggantian pasir daur ulang meningkat. Selain itu, ditunjukkan bahwa fraksi pasir daur ulang yang lebih halus (0/0,63 mm) memiliki efek yang lebih buruk pada sifat mekanis mortar.

(Singh et al., 2023) mengatakan bahwa Kekurangan sumber daya pasir dan kerikil telah menjadi masalah global. Mengolah limbah konstruksi dan pembongkaran (CDW) menjadi bahan daur ulang dan menggunakannya untuk menyiapkan beton baru kondusif bagi pembangunan berkelanjutan industri konstruksi. Dalam hal agregat kasar daur ulang (RCA), akumulasi teknis dan industrialisasi yang relatif matang telah terbentuk, tetapi teknologi pemanfaatan fraksi halus daur ulang (RF), yang mencakup lebih dari 40%, masih langka. Dalam studi ini, penggunaan RF yang layak, termasuk agregat halus daur ulang (RFA) dan bubuk daur ulang (RP), dalam beton daur ulang dipelajari dari perspektif sifat segar (empiris dan reologi). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengurangan kemerosotan lebih menonjol pada Seri dengan RFA daripada RP. Pengurangan tertinggi diamati sekitar 31,71% (30% RP) pada Seri I pada 30 menit; dan 60,98% (50% RFA) dalam Seri II dalam campuran dengan 50% RFA, yang disebabkan oleh gesekan yang lebih tinggi dan perilaku saling mengunci yang lebih tinggi karena permukaannya yang kasar dan jumlah mortar yang lebih tinggi. Campuran dengan RP menunjukkan peningkatan paling signifikan dalam viskositas statis sebesar 271% pada 30% RP dan 149% dengan penggantian RFA 100% pada interval waktu 30 menit. Tegangan luluh statis meningkat lebih besar dengan RP, yang mungkin telah menyebabkan ekspansi slump menurun seiring waktu. Gesekan dari tekstur permukaan kasar RFA dan kandungan SP dan air tambahan campuran meningkatkan tegangan luluh dinamis dan menurunkan viskositas. Studi tersebut menemukan bahwa penggabungan RP dan FA dalam campuran menghasilkan pengurangan emisi karbon yang signifikan dibandingkan dengan campuran kontrol. Secara khusus, RPC2 dan RPC3

nan masing-masing sebesar 24,35% dan 25,00%. Terlihat juga material halus yang didaur ulang dapat menghasilkan beton jah karbon untuk menuju industri konstruksi otomatis yang



ng dilakukan oleh (Evangelista et al., 2015) ini mengkaji ia, dan mineralogi agregat daur ulang halus yang diperoleh dari

limbah beton yang dihancurkan, membandingkannya dengan dua jenis agregat halus alami dari asal yang berbeda.

Beton komersial dihancurkan dengan rahang, dan efek ukuran lubang yang berbeda pada distribusi ukuran partikel agregat yang dihasilkan dievaluasi. Kepadatan dan penyerapan air dari agregat daur ulang ditentukan dan model untuk memprediksi penyerapan air dari waktu ke waktu diusulkan. Baik agregat alami maupun daur ulang dikarakterisasi mengenai kepadatan massal dan kandungan halus. Agregat daur ulang juga dikarakterisasi oleh XRD, SEM/EDS dan DTA/TG dari fraksi ukuran individu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa agregat halus alami dan daur ulang memiliki karakteristik yang sangat berbeda. Hal ini harus dipertimbangkan dalam aplikasi potensial, baik dalam hal batasan jumlah penggantian maupun aturan dan kriteria desain produk yang diproduksi.

Penelitian yang dilakukan oleh (Ohemeng et al., 2022) Penelitian tentang kelayakan penggunaan bubuk beton daur ulang (RCP) sebagai pengganti semen dalam produksi mortar tersedia dalam literatur. Akan tetapi, penelitian terkait RCP-mortar difokuskan pada karakterisasi material dan kinerja mortar. Untuk tujuan keberlanjutan, mortar harus memberikan kekuatan yang dibutuhkan serta manfaat ekonomi dan lingkungan. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi sifat-sifat mortar pasangan bata yang mengandung RCP, beserta keuntungan ekonomi dan lingkungannya. Dalam penelitian eksperimental, mortar disiapkan dengan mengganti semen Portland biasa (OPC) dengan RCP dalam berbagai fraksi 0%, 15%, 30%, 40%, 60%, 75%, dan 100% berdasarkan massa. Pengaruh RCP terhadap sifat mortar segar dan keras diperiksa. Ditemukan bahwa kekuatan mortar pasangan bata berkurang secara signifikan seiring dengan peningkatan kuantitas RCP, namun campuran mortar yang mengandung 40–75% RCP memenuhi kriteria kekuatan untuk mortar pasangan bata. Selain itu, penggunaan RCP menghasilkan pengurangan yang sangat besar dalam biaya dan faktor lingkungan dari mortar. Sebagai kesimpulan, mortar tersebut memberikan persyaratan kekuatan yang ditentukan untuk pekerjaan pasangan batu bata serta keuntungan ekonomi dan lingkungan, sehingga membuatnya berkelanjutan.

Penelitian yang dilakukan oleh (Ohemeng & Naghizadeh, 2023) Studi eksperimental yang melibatkan penggunaan bubuk beton limbah (RCP) atau abu terbang (FA) sebagai pengganti semen dalam produksi mortar tersedia dalam literatur. Namun, studi tentang efek gabungan RCP dan FA dalam mortar semen, bersama dengan dampak lingkungan (EI) dan analisis biaya, belum ditemukan dalam



itu, studi saat ini bertujuan untuk mencapai tujuan ini. Studi tahap. Mortar dibuat menggunakan rasio binder terhadap pasir diganti dengan RCP pada tingkat 0%, 15%, 40%, 60% dan Berdasarkan hasil sifat kekuatan yang diperoleh pada Tahap I, ng dibuat dengan 40% semen dan 60% RCP dipilih untuk studi okan dengan mengganti semen dengan FA pada 0%, 5%, 10%, %. Ditemukan bahwa kinerja mortar ditingkatkan ketika FA

digunakan. Misalnya, kekuatan tekan 28 hari dari mortar kontrol meningkat dari 15,8 MPa menjadi 17,3 MPa ketika 10% semen diganti dengan FA. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa mortar yang dihasilkan dapat digunakan untuk pekerjaan pasangan batu. Selain itu, analisis biaya dan EI mortar juga dilakukan. Diamati bahwa penggabungan FA dalam mortar semen RCP menghasilkan pengurangan biaya dan EI mortar. Oleh karena itu, mortar yang dihasilkan memenuhi persyaratan kekuatan untuk pekerjaan pasangan batu serta memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan.

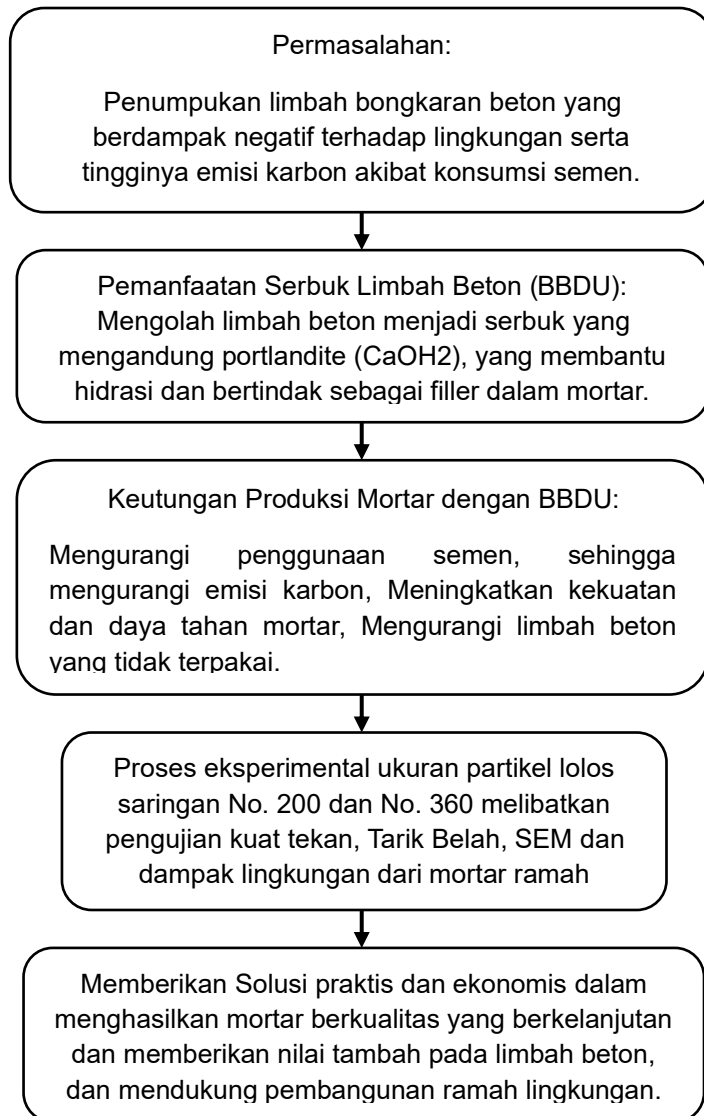
1.3 Desain Konseptual

Kerangka konseptual yang disusun dalam penelitian ini fokus membahas dampak negatif pada lingkungan terkait penumpukan limbah bongkaran beton di tempat pengelolaannya serta potensi pemanfaatannya sebagai bahan baku dalam pembuatan mortar. Bubuk beton daur ulang, sebagai hasil daur ulang bongkahan beton memiliki portlandite (CaOH_2) yang masih bisa membantu proses hidrasi, serta bereaksi secara mekanik melalui efek filler untuk meningkatkan kinerja mekanik mortar. Penggunaan BBDU dalam produksi mortar memberikan solusi terhadap masalah lingkungan, serta membuka kesempatan untuk mengaplikasikan limbah beton menjadi produk konstruksi yang memiliki nilai tambah dan lebih berkelanjutan.

Terdapat sejumlah manfaat yang diperoleh dalam industri konstruksi dengan menggunakan serbuk limbah beton dalam produksi mortar. Pertama-tama, penggunaan serbuk limbah beton berpotensi untuk mengurangi konsumsi semen, yang merupakan salah satu komponen utama yang berkontribusi terhadap emisi karbon. Dengan demikian, pemanfaatan bubuk beton daur ulang merupakan kontribusi terhadap upaya yang sedang dilakukan untuk mengurangi perubahan iklim. Kedua, kandungan portlandite yang ada pada serbuk beton limbah memiliki potensi untuk memberikan kekuatan dan daya tahan beton, yang menghasilkan mortar yang berkualitas. Ketiga, penggunaan BBDU sebagai bahan baku, berpotensi untuk mengurangi jumlah limbah beton, sehingga menghasilkan pengurangan dampak buruk yang ditimbulkan terhadap lingkungan.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kadar BBDU dalam campuran mortar berkisar antara 0%-30%, dengan ukuran partikel yang lolos saringan No. 200 dan No. 360. Hal ini menunjukkan bahwa optimalisasi pemanfaatan serbuk limbah beton perlu mempertimbangkan persentase dan distribusi ukuran partikel agar mortar yang optimal. Oleh karena itu, penelitian ini akan lanjut potensi BBDU dalam meningkatkan kualitas mortar serta aspek keberlanjutan dalam industri konstruksi.





Gambar 1. Desain Konseptual



BAB II METEDOLOGI PENELITIAN

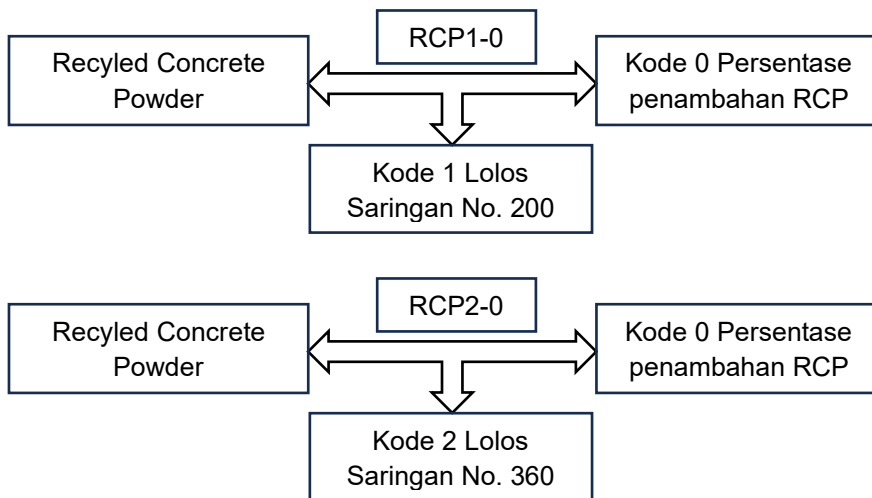
2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin Makassar. Penelitian ini mulai dilaksanakan pada bulan November 2024.

2.2 Desain Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk kubus 5cm x 5cm x 5 cm, dan berbentuk silinder 5cm x 10cm.

Dilakukan pembuatan benda uji meliputi mortar normal dan mortar sebagai pengganti semen menggunakan BBDU dengan ukuran partikel lolos saringan No. 200 dan No. 360 dengan variasi campuran 0%, 10%, 20%, dan 30%. Masing-masing benda uji terdapat 21 sampel benda uji berbentuk kubus dan 6 sampel benda uji berbentuk silinder. Kode benda uji dapat dilihat pada Gambar 2.

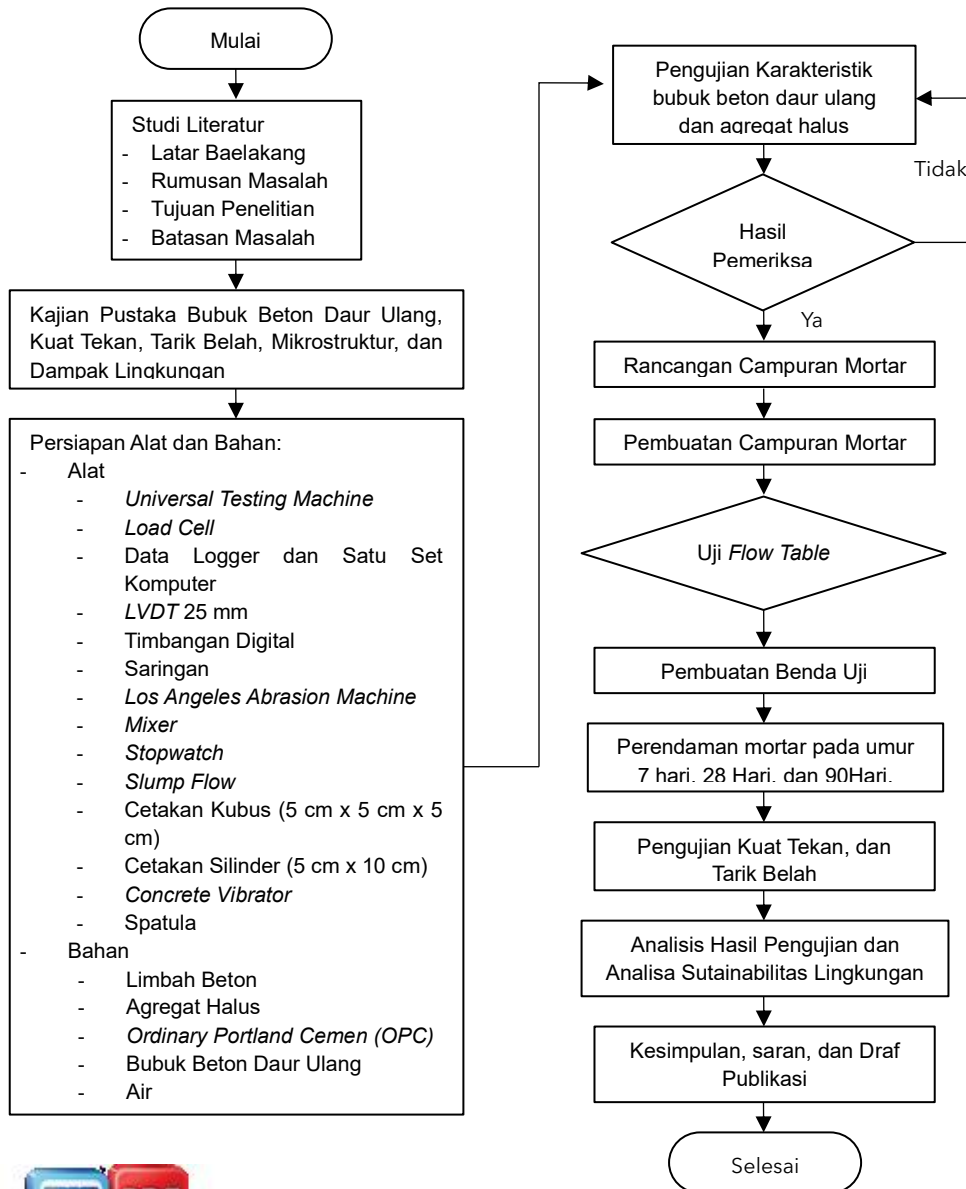


Gambar 2. Kode Benda Uji



2.3 Metode Penelitian

Tahap penelitian ini dapat dilihat secara sistematis dalam bentuk diagram alir pada Gambar 2 sebagai berikut:



Gambar 3. Diagram Alur Penelitian



2.4 Analisis Rancangan Campuran (Mix Design)

Komposisi campuran mortar dimana, pembuatan benda uji meliputi mortar normal dan mortar sebagai pengganti semen menggunakan bubuk beton daur ulang lolos saringan No. 200 dan lolos saringan No. 360. Analisis Rancangan Campuran dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Analisis Rancangan Campuran (MIX I)

Mix ID	Water (kg/m ³)	OPC (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	RCP (kg/m ³)
Control	263.72	544.87	1498.40	0.00
RCD1-10	263.00	489.05	1494.31	54.34
RCD1-20	262.28	433.53	1490.25	108.38
RCD1-30	261.57	378.30	1486.20	162.13

Tabel 3. Analisis Rancangan Campuran (MIX II)

Mix ID	Water (kg/m ³)	OPC (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	RCP (kg/m ³)
Control	263.719	544.871	1498.395	0.000
RCP2-10	262.628	488.357	1492.197	54.260
RCP2-20	261.546	432.308	1486.049	108.074
RCP2-30	260.472	376.712	1479.951	161.452

2.5 Pembuatan Benda Uji

Pembuatan dan pengujian ini dirancang untuk mengetahui pengaruh kinerja mortar dengan bubuk beton daur ulang sebagai pengganti semen pada umur 7, 28, dan 90 hari dengan ukuran sampel 5cm x 5cm x 5cm dan 5cm x 10cm. Metode pencampuran yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Menyiapkan material dengan komposisi campuran yang telah ditentukan;
2. Bubuk beton daur ulang, semen dan air dimasukkan ke dalam mixer;
3. Mengaduk material menggunakan mixer selama 30 detik;
4. Masukkan pasir ke dalam mixer;
5. Mengaduk selama 2 menit dengan kecepatan normal;
6. Selanjutnya mengaduk selama 1 menit dengan kecepatan tinggi;
7. Pengujian flow dilakukan sebanyak 15 kali putaran
8. Hasil campuran dimasukkan kedalam cetakan sebanyak ½ dari cetakan, benda uji kemudian diratakan sebanyak 7 kali tumbukan, lalu campuran nballi sampai cetakan full, kemudian diratakan sebanyak 7 kali benda uji divibrator selam 10 detik dan pada cetakan yang telah terisi lalu diamkan selama ± 24 jam dan dip permukaan mortar dengan plastik



11. Setelah \pm 24 jam, keluarkan benda uji dari *mould* lalu curing selama 7, 28, dan 90 hari.



Gambar 4. Pembuatan Benda Uji



a Uji

kan untuk mengevaluasi konsistensi aliran mortar segar sesuai M C270. Konsistensi tersebut diukur melalui parameter flow mortar yang menunjukkan kemampuan alirnya dalam kondisi pengujian ini, mortar segar dicetak menggunakan kerucut

mortar terpotong (truncated cone) dan diletakkan di atas meja flow. Selanjutnya, meja flow dinaikkan secara mekanis setinggi 12,7 mm (1/2 inci) dan dijatuhkan sebanyak 25 kali dalam kurun waktu 15 detik. Selama proses ini, peningkatan diameter dasar mortar dicatat untuk menentukan persentase perubahan terhadap diameter awal. Nilai tersebut merepresentasikan tingkat flow atau kemampuan alir mortar yang berkaitan erat dengan kemudahan pengerjaan (workability) material. Ilustrasi prosedur pengujian flow ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Aliran Mortar Segar

2.6.2 Kuat Tekan Mortar

Gambar 6 menunjukkan pengujian kuat tekan mortar yang dilakukan sesuai dengan metode dalam SNI 03-6825-2002 dengan menggunakan benda uji berbentuk kubus berukuran 5 cm × 5 cm × 5 cm. Setelah dirawat selama jangka waktu tertentu yaitu 7, 28, dan 90 hari, benda uji dikeluarkan dari rendaman, dikeringkan permukaannya, kemudian dilakukan pengujian dengan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) berkapasitas 2000 kN yang dilengkapi dengan load cell dan data logger untuk mencatat gaya maksimum yang diberikan. Benda uji diletakkan di tengah-tengah antara pelat penekan, kemudian gaya tekan diberikan secara merata hingga benda uji kolaps. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mendapatkan nilai kuat tekan rata-rata pada setiap umur pengujian. Nilai kuat tekan dihitung dengan menggunakan persamaan 2.

$$f_c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana:

f_c = Kuat tekan mortar MPa

P = Beban Maksimum yang diterima specimen sebelum hancur (N)

A = Luas penampang specimen (mm²)





Gambar 6. Pengujian Kuat Tekan

2.6.3 Pengujian Kuat Belah

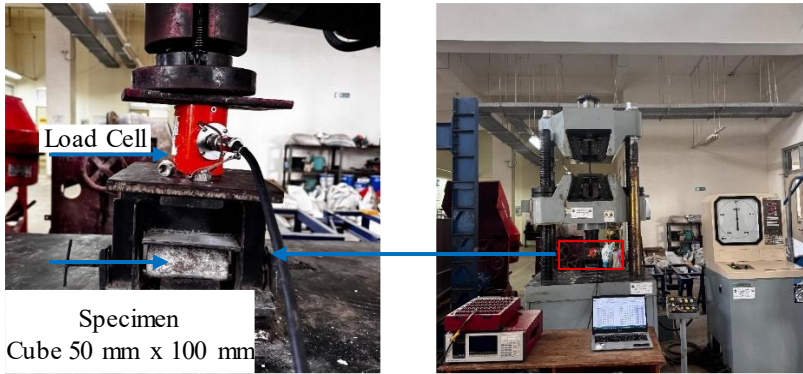
Gambar 7 menunjukkan pengujian kuat tarik belah mortar yang dilakukan berdasarkan metode ASTM C496/C496M [24] dengan menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan diameter 50 mm dan panjang 100 mm. Setelah dirawat selama jangka waktu tertentu yaitu 28 dan 90 hari, benda uji dikeluarkan dari rendaman, permukaannya dikeringkan, benda uji diletakkan mendatar pada Universal Testing Machine (UTM) berkapasitas 2000 kN yang dilengkapi dengan load cell dan data logger untuk mencatat gaya maksimum. Gaya tekan diberikan secara bertahap dan merata sepanjang garis diametral benda uji. Data hasil uji kemudian dianalisis untuk memperoleh nilai kuat tekan rata-rata pada setiap umur uji. Nilai kuat tekan dihitung dengan menggunakan persamaan 3.

$$T = \frac{2P}{\pi.L.D} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

- T = Kuat tarik belah (MPa)
- P = Beban yang diterapkan saat kegagalan (N)
- L = Panjang benda uji (mm)
- D = Diameter benda uji (mm)





Gambar 7. Pengujian Kuat Belah

2.6.4 Environment Performance dari Mortar

Sebuah analisis efek insertasi Serbuk *Recycled Concrete Powder* (RCP) pada konsumsi energi yang dibutuhkan untuk membuat mortar serta *global warming potential* (GWP), *abiotic depletion potential* (ADP), *Ozone Depletion Potential* (ODP), *Photochemical Ozone Generation Potential* (POCP), *acidification potensial* (AP), dan *eutrophication potensial* (EP) dilakukan. Referensi untuk nilai parameter dibuat ke sumber yang relevan. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengevaluasi keaslian insertasi RCP dengan mempertimbangkan dua aspek sekaligus daripada mengandalkan hanya satu, seperti jumlah RCP dan kuat tekan. Untuk memprediksi kriteria penerimaan RCP sebagai pengganti untuk semen, nilai parameter dampak lingkungan kemudian dibandingkan di bawah tekanan intensif.

Beberapa penelitian yang memperhatikan secara simultan kuat tekan dan emisi CO₂. Penelitian ini mengadopsi efisiensi kekuatan beton terhadap lingkungan (Vembu & Ammasi, 2023) (Ozturk et al., 2022) menjadi analisa performa kekuatan mortar terhadap parameter lingkungan. Nilai total dampak lingkungan dihitung dengan persamaan 4. Parameter eco-beneficial lingkungan ADP, GWP, ODP, POCP, AP, dan EP akan dihitung berdasarkan Persamaan 5-10.

$$i_{mix} = \sum_{i=1}^n (W_i \times EI_i) \dots\dots\dots (4)$$

$$EP_{ADP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{ADP_{mix}} \dots\dots\dots (5)$$

$$EP_{GWP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{GWP_{mix}} \dots\dots\dots (6)$$



..... (7)

..... (8)

..... (9)

$$EP_{EP/f'cn} = \frac{f'cn}{EP_{mixt}} \dots\dots\dots (10)$$

Dimana:

- i_{mix} = total dampak lingkungan parameter i yang diperoleh dari mix design yang digunakan dalam 1 fungsional unit (kg/m³)
- W_i = berat masing-masing material dalam 1 fungsional unit untuk setiap campuran (kg/m³)
- E_i = nilai dampak lingkungan untuk masing-masing parameter (kg)
- $EP_{ADP/f'cn}$ = total ADP_{mix} nilai yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kekuatan tekan (MPa/kgSb)
- ADP_{mix} = total dampak lingkungan parameter ADP yang diperoleh dari mix design yang digunakan (kgSb-eq)
- $EP_{GWP/f'cn}$ = nilai total GWP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgCO₂)
- GWP_{mix} = total dampak lingkungan parameter ADP yang diperoleh dari mix design yang digunakan (kgCO₂-eq)
- $EP_{ODP/f'cn}$ = nilai total ODP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kekuatan tekan (MPa/kgCFC-11)
- ODP_{mix} = total dampak lingkungan parameter ODP yang diperoleh dari mix design yang digunakan (kgCFC-11-eq)
- $EP_{POCP/f'cn}$ = nilai total POCP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgC₂H₄)
- POCP_{mix} = total dampak lingkungan parameter POCP yang diperoleh dari mix design yang digunakan (kgC₂H₄-eq)
- $EP_{AP/f'cn}$ = total nilai AP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSO₂)
- AP_{mix} = total dampak lingkungan parameter AP yang diperoleh dari mix design yang digunakan (kgSO₂-eq)
- $EP_{EP/f'cn}$ = total nilai EP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgPO₄)
- EP_{mix} = total dampak lingkungan parameter AP yang diperoleh dari mix design yang digunakan (kgPO₂-eq)
- f'_c = kekuatan tekan (MPa)
- n = usia 28 hari

2.6.6 Mikrostruktur/ SEM



rostruktur pada mortar berdasarkan ASTM C1723 dilakukan an mikroskop elektron pemindai atau Scanning Electron jualan utama pengujian ini adalah untuk mengamati karakteristik seperti porositas, distribusi partikel, dan interaksi antar fase edur dimulai dengan menyiapkan spesimen mortar yang telah dipotong menjadi ukuran kecil dan permukaannya dihaluskan s hingga rata. Setelah itu, spesimen dilapisi dengan lapisan

konduktif (biasanya emas atau karbon) untuk mencegah pengisian muatan listrik selama proses scanning.

Spesimen kemudian ditempatkan di dalam ruang vakum SEM, dan permukaannya dipindai menggunakan berkas elektron. Data yang diperoleh diolah untuk menghasilkan citra resolusi tinggi yang menunjukkan struktur internal mortar. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi fitur-fitur penting seperti keberadaan retak mikro, pori-pori, dan distribusi produk hidrasi seperti kalsium silikat hidrat (C-S-H). Hasil pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi kualitas mortar dan memahami pengaruh komposisi material terhadap kinerjanya. Pengujian SEM dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Pengujian SEM

