

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bubuk beton daur ulang (recycled concrete powder, RCP) merupakan salah satu hasil dari pengolahan limbah beton. RCP dihasilkan melalui proses penghancuran dan penggilingan limbah beton hingga menjadi partikel halus. Material ini memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen atau sebagai filler dalam pembuatan mortar. Penggunaan RCP diharapkan dapat mengurangi kebutuhan bahan baku primer, menurunkan emisi karbon, dan mengurangi limbah konstruksi. Namun, penerapan RCP menghadapi tantangan signifikan.

Penelitian menunjukkan bahwa variabilitas agregat daur ulang secara signifikan memengaruhi durabilitas beton dan mortar. Wan et al. (2012)(2012) menyoroti bahwa tingginya variabilitas agregat kasar daur ulang dapat menyebabkan rendahnya ketahanan terhadap siklus pembekuan-pencairan pada beton daur ulang, terutama karena keberadaan pasta semen dan mortar yang mengeras yang menempel pada agregat. Hal ini menghasilkan mikroretakan yang mengurangi integritas struktural. Temuan ini sangat penting karena menunjukkan bahwa kualitas dan proses pengolahan material daur ulang secara langsung memengaruhi kinerja mortar yang dihasilkan.

Selain itu, sifat mekanis bubuk beton daur ulang (recycled concrete powder, RCP) terbukti meningkat dengan ukuran partikel yang lebih halus. Topič dan Prošek (2017) membahas bagaimana evolusi panas hidrasi pada pasta semen dengan RCP dipengaruhi oleh distribusi ukuran butir, menunjukkan bahwa RCP yang lebih halus dapat meningkatkan reaktivitas matriks semen, sehingga memperbaiki sifat mekanis seperti kekuatan tekan. Hal ini didukung oleh Zhang et al. (2021)(Y. Zhang et al., 2021) yang menemukan bahwa RCP dapat memberikan kontribusi positif terhadap kekuatan mortar semen, terutama jika digunakan dalam proporsi yang terkendali.

Namun, penggunaan RCP juga memiliki kelemahan. Studi Xu (2022) mengungkapkan bahwa meskipun RCP dapat meningkatkan kekuatan tekan, penggunaannya dapat berdampak negatif pada kekuatan mortar selama 28 hari pertama. Hal ini menunjukkan bahwa pertimbangan yang cermat terhadap waktu dan proporsi RCP diperlukan untuk mengoptimalkan kinerjanya. Selain itu, kandungan mortar yang melekat pada agregat daur ulang diidentifikasi sebagai faktor kritis yang memengaruhi durabilitas dan sifat mekanis beton agregat daur ulang (recycled aggregate concrete, RAC) secara keseluruhan (Feng et al., 2023). Tingginya kandungan mortar yang melekat dapat meningkatkan porositas dan penyerapan air, yang merugikan mortar.



CP terhadap sifat susut juga penting untuk diperhatikan. Yuan et al. (2023) bahwa penambahan serbuk bata daur ulang, yang memiliki karakteristik an RCP, dapat mengurangi susut pengeringan pada material berbasis

semen. Pengurangan susut ini bermanfaat untuk mempertahankan stabilitas dimensi mortar dari waktu ke waktu, yang merupakan aspek penting dari durabilitas.

Lebih lanjut, kinerja jangka panjang mortar yang mengandung RCP dapat ditingkatkan melalui penggunaan bahan tambahan. Sebagai contoh, kombinasi RCP dengan material pozzolan lainnya telah terbukti meningkatkan sifat mekanis dan durabilitas mortar yang dihasilkan, seperti yang diindikasikan oleh temuan (Morón et al., 2021). Efek sinergis ini menyoroti potensi pengembangan mortar yang ramah lingkungan dengan memanfaatkan manfaat material daur ulang sekaligus mengatasi keterbatasannya.

Berdasarkan latar belakang dan berbagai penelitian terdahulu di atas, maka dapat disimpulkan bahwa sifat durabilitas mortar yang mengandung serbuk beton daur ulang dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kualitas agregat daur ulang, kehalusan RCP, dan keberadaan bahan tambahan. Meskipun RCP dapat meningkatkan beberapa sifat mekanis, pengelolaan yang hati-hati terhadap penggunaannya diperlukan untuk mengatasi potensi masalah durabilitas. Sehingga penulis membuat penelitian dengan judul **“Durabilitas Mortar Yang Mengandung Bubuk Beton Daur Ulang”**.

1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana pengaruh penggunaan bubuk beton daur ulang sebagai pengganti semen terhadap durabilitas mortar?

1.1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian ini adalah menganalisis dan mengevaluasi pengaruh penggunaan bubuk beton daur ulang sebagai pengganti semen terhadap durabilitas mortar.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian diharapkan mampu memberikan informasi ilmiah tentang pengaruh penggunaan bubuk beton daur ulang terhadap durabilitas mortar. Serta mendorong pengembangan bahan konstruksi alternatif yang lebih ramah lingkungan melalui pemanfaatan limbah beton.

1.1.4 Batasan Penelitian

Penelitian terkait bubuk beton daur ulang sangat luas, sehingga perlu untuk membatasi masalah penelitian ini agar dapat lebih terarah.

1. Penelitian yang dilakukan berbentuk eksperimental di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin untuk mengetahui pengaruh penggunaan 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. Jenis bubuk beton daur ulang yang digunakan memiliki ukuran butiran tertentu (lolos saringan No.200 dan No.360).



4. Substitusi semen dengan bubuk beton daur ulang dibatasi pada persentase 0%-35% dengan kelipatan 5% dari total berat semen.
5. Penelitian menggunakan benda uji berbentuk kubus 5 cm x 5 cm.
6. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 dan 90 hari.
7. Pengujian durabilitas yaitu penyerapan air, porositas, sorptivity, dan cantabro loss

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. 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. 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 da deformasi material yang bergantung pada waktu di bawah beban

1. Secara khusus menegaskan bahwa aliran air, khususnya 'air gel', contributor signifikan terhadap creep dalam mortar (Wang et al., 2019). ku mortar dalam kasus ini sangat penting untuk aplikasi di mana kondisi a panjang diharapkan, hal ini karena dapat menyebabkan deformasi dan gagan struktural jika tidak diperhitungkan dengan benar dalam desain.



Penting juga untuk mempertimbangkan karakteristik kelembapan mortar, khususnya dalam aplikasi pasangan bata. 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. 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 Recycled Concrete Aggregates (RCA)

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 mortar yang melekat pada agregat daur ulang merupakan faktor penting yang memengaruhi kinerja beton, karena dapat menyebabkan retakan mikro dan mengurangi kekuatan tekan (Manzi et al., 2013). Zhao dkk. menunjukkan bahwa penggunaan agregat halus dalam mortar campuran dapat menghasilkan kekuatan tekan yang layak, kekuatan ini mungkin lebih rendah daripada yang dicapai dengan agregat alami (Luo et al., 2011). Sifat mekanis beton yang dibuat dengan agregat daur ulang lebih rendah dari pada yang dibuat dengan agregat alami. Selain itu, Liu dan Wang mencatat bahwa ketahanan beku beton daur ulang, dengan mencatat bahwa kandungan



mortar yang melekat tinggi dapat membahayakan sifat mekanis dibandingkan dengan beton konvensional (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 Material Penyusun Mortar

1.2.3.1 Agregat Halus

Agregat halus merupakan komponen penting dalam campuran beton dan mortar yang berfungsi sebagai pengisi ruang di antara butiran agregat kasar serta berperan dalam meningkatkan kepadatan, workability, dan kekuatan akhir material. Agregat halus umumnya berupa pasir alami atau hasil pemrosesan material seperti pasir buatan maupun limbah konstruksi yang telah dihancurkan dan diayak. Salah satu parameter utama untuk menilai kualitas agregat halus adalah gradasi, yaitu distribusi ukuran butir yang menentukan sejauh mana partikel agregat tersebar dari ukuran besar ke kecil. Gradasi agregat halus ditentukan melalui pengujian ayakan menggunakan saringan standar dengan ukuran bertingkat, dan hasilnya kemudian dibandingkan dengan standar gradasi seperti yang tercantum dalam SNI 03-2834-2000 atau ASTM C33.

Berdasarkan standar tersebut, gradasi agregat halus dibagi ke dalam empat zona, yaitu Zona 1 hingga Zona 4. Zona 1 mencerminkan agregat halus dengan ukuran butir yang relatif kasar dan cocok untuk beton dengan slump rendah. Zona 2 adalah gradasi menengah yang paling umum digunakan untuk berbagai jenis beton. Zona 3 mewakili agregat halus yang lebih halus dan sesuai untuk pekerjaan yang memerlukan pemadatan tinggi. Sementara itu, Zona 4 menunjukkan gradasi yang sangat halus dan biasanya digunakan untuk plesteran atau beton dengan kebutuhan slump tinggi, namun harus digunakan dengan hati-hati karena dapat meningkatkan kebutuhan air dalam campuran. Penentuan zona dilakukan dengan membandingkan hasil persentase kumulatif lolos ayakan (seperti No. 4, 8, 16, 30, 50, dan 100) terhadap rentang nilai pada masing-masing zona. Zona yang paling mendekati sebagian besar data hasil uji menjadi klasifikasi akhir dari agregat halus tersebut. Pemilihan zona gradasi yang tepat sangat penting karena dapat menjamin kualitas, efisiensi pemakaian bahan, dan kinerja struktural beton yang dihasilkan.



1.2.3.2 Semen

Semen merupakan bahan pengikat hidraulik yang memiliki kemampuan untuk mengeras dan mengikat material lain ketika bercampur dengan air, sehingga menjadi komponen esensial dalam pembuatan beton dan mortar. Secara teknis, semen tersusun atas senyawa-senyawa kimia utama seperti trikalsium silikat (C_3S), dikalsium silikat (C_2S), trikalsium aluminat (C_3A), dan tetrakalsium aluminoferrit (C_4AF), yang masing-masing berkontribusi terhadap kecepatan pengerasan, kekuatan awal, dan ketahanan jangka panjang. Ketika dicampur dengan air, reaksi hidrasi semen menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang membentuk matriks padat dan berperan sebagai elemen utama dalam pengembangan kekuatan mekanik. Sifat fisik dan kimia dari semen, seperti kehalusan, waktu ikat, konsistensi normal, panas hidrasi, dan kadar alkali, sangat memengaruhi performa campuran semen dalam kondisi segar maupun setelah pengerasan. Dalam praktik konstruksi, jenis semen yang paling umum digunakan adalah semen Portland, khususnya tipe I dan tipe lainnya sesuai kebutuhan khusus, seperti tahan sulfat atau panas hidrasi rendah. Selain itu, perkembangan material konstruksi berkelanjutan telah mendorong penggunaan bahan tambahan semen (cementitious materials) seperti abu terbang, slag, dan bubuk beton daur ulang (recycled concrete powder) untuk mengurangi konsumsi semen konvensional dan dampak lingkungannya. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik dan mekanisme kerja semen sangat penting untuk menjamin kualitas, durabilitas, dan keberlanjutan konstruksi beton modern.

1.2.3.3 Recycled Concrete Powder (RCP)

Bubuk beton daur ulang (RCP) berkisar pada pembuatannya, sifat-sifatnya, dan potensi aplikasinya dalam konstruksi, khususnya sebagai bahan semen tambahan (BST). RCP 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 RCP 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 RCP, 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 lebih padat.



itu, aktivitas pozolanik dari bubuk beton daur ulang merupakan komponen yang meningkatkan efektivitasnya sebagai BST. Penelitian Wang menyoroti bahwa RCP memiliki sifat pozolanik yang dapat meningkatkan kinerja beton jangka panjang dan meningkatkan ketahanannya terhadap korosi sulfat dan meningkatkan daya

tahan secara keseluruhan (Wang, et al., 2023). Hal ini sejalan dengan temuan dari Dacić et al., yaitu bahwa penggunaan serbuk beton daur ulang dapat berfungsi sebagai bahan tambahan yang tidak hanya menggantikan semen tetapi juga berkontribusi pada karakteristik mekanis dan daya tahan beton (Dacić et al., 2023). Ketika air ditambahkan ke RCP, 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 RCP 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 RCP, harus mempertimbangkan tidak hanya sifat mekanisnya, tetapi juga mikrostrukturnya. Penelitian oleh Ali et al. menunjukkan bahwa penggabungan RCP 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.

1.2.3.4 Air

Air merupakan komponen penting dalam campuran beton dan mortar karena berperan sebagai agen hidrasi yang memicu reaksi kimia antara semen dan air, serta sebagai pelumas yang mempengaruhi workability dan kemudahan pengerjaan campuran pada kondisi segar. Dalam proses hidrasi, air bereaksi dengan senyawa-senyawa aktif dalam semen, terutama trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S), membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang bertanggung jawab terhadap perkembangan kekuatan dan struktur internal beton. Kualitas air yang digunakan sangat berpengaruh terhadap hasil akhir campuran; air yang mengandung zat organik, garam, minyak, atau ia agresif dapat mengganggu proses hidrasi, menurunkan kekuatan, dan meningkatkan risiko korosi pada tulangan. Oleh karena itu, standar seperti SNI 03-2834 C1602 merekomendasikan penggunaan air yang memenuhi syarat kelarutan tertentu, idealnya setara dengan kualitas air minum. Selain itu, rasio air dan semen (w/c ratio) menjadi faktor krusial dalam menentukan kekuatan



tekan, durabilitas, serta porositas beton; rasio yang terlalu tinggi dapat meningkatkan pori-pori dan penyerapan air, sedangkan rasio yang terlalu rendah dapat menghambat proses pencampuran dan pengerjaan. Seiring berkembangnya teknologi material, peran air juga semakin diperhatikan dalam konteks efisiensi pemakaian dan pengendalian retak susut, khususnya pada beton dengan performa tinggi atau beton ramah lingkungan. Dengan demikian, pengendalian kualitas dan kuantitas air dalam campuran menjadi aspek fundamental dalam menjamin keberhasilan dan keandalan konstruksi berbasis semen.

1.2.4 Durabilitas

Durabilitas mortar adalah konsep multidimensional yang mencakup berbagai sifat, termasuk ketahanan terhadap degradasi lingkungan, kekuatan mekanis, dan kinerja jangka panjang. Memahami faktor-faktor yang memengaruhi sifat-sifat ini sangat penting untuk mengembangkan mortar berkinerja tinggi yang sesuai untuk berbagai aplikasi konstruksi.

Salah satu aspek utama dari durabilitas mortar adalah permeabilitasnya, yang secara signifikan memengaruhi ketahanannya terhadap penetrasi air dan serangan kimia. Öz et al. menunjukkan bahwa penambahan serbuk kaca daur ulang (*recycled glass powder*, RGP) ke dalam mortar berkinerja tinggi meningkatkan ketahanannya terhadap permeabilitas. Reaktivitas pozzolan dari RGP menghasilkan produk hidrasi tambahan, sehingga menciptakan mikrostruktur yang lebih padat di zona transisi antarmuka, yang penting untuk meningkatkan durabilitas (Öz et al., 2019). Temuan ini menyoroti pentingnya penggunaan material dengan sifat pozzolan untuk meningkatkan durabilitas mortar.

Selain itu, penggunaan zeolit alami sebagai bahan tambahan telah terbukti meningkatkan kinerja fisik dan durabilitas mortar semen. Yoon dan Lee melaporkan bahwa campuran zeolit alami yang tahan air dengan mortar semen secara signifikan mengurangi penyerapan air, sehingga meningkatkan durabilitas terhadap faktor lingkungan (Yoon & Lee, 2020). Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan bahan tambahan memainkan peran penting dalam menentukan karakteristik durabilitas mortar.

Penggunaan material daur ulang, seperti serbuk daur ulang dari limbah konstruksi, juga memengaruhi durabilitas mortar. Zeng et al. menemukan bahwa meskipun modulus elastisitas dan kekuatan tekan bahan adobe tidak terlalu terpengaruh oleh penambahan serbuk bata daur ulang, durabilitas keseluruhan meningkat. Penelitian mereka menunjukkan bahwa peningkatan jumlah serbuk daur ulang mengurangi permeabilitas dan meningkatkan ketahanan aus, meskipun melemahkan ketahanan terhadap karbonasi (Zeng et al., 2023). Hal ini menunjukkan perlunya mengembangkan secara hati-hati kandungan material daur ulang untuk meningkatkan kinerja dan durabilitas.

Penambahan penghasil udara (*air-entraining admixtures*) juga merupakan alternatif yang efektif untuk meningkatkan durabilitas mortar, khususnya dalam hal ketahanan terhadap pembekuan. Kropyvnytska et al. mencatat bahwa bahan tambahan ini dapat meningkatkan ketahanan mortar terhadap pembekuan tanpa menyebabkan



efflorescence garam, sehingga memperpanjang umur struktur masonry (Kropyvnytska et al., 2017). Komposisi mortar yang tepat, termasuk penggunaan bahan penghasil udara, sangat penting untuk memastikan durabilitas di bawah kondisi lingkungan yang bervariasi.

Mortar yang dimodifikasi dengan polimer telah menarik perhatian karena sifat durabilitasnya yang unggul. Wang dan Zhang menyoroti bahwa mortar ini memiliki kekuatan tinggi dan sifat ikatan yang sangat baik, sehingga cocok untuk aplikasi perbaikan. Penambahan polimer secara signifikan meningkatkan durabilitas mortar, memberikan ketahanan terhadap tekanan lingkungan (Wang & Zhang, 2015). Hal ini sangat relevan untuk struktur yang terpapar kondisi keras, di mana mortar tradisional mungkin gagal.

Selain itu, sifat mikrostruktur mortar, yang dipengaruhi oleh jenis dan kualitas agregat yang digunakan, sangat penting untuk durabilitas. Penelitian oleh Sadrmomtazi dan Fasihi menunjukkan bahwa penambahan nano-silika dapat meningkatkan sifat mekanis dan durabilitas mortar dengan memperbaiki mikrostruktur dan mengurangi porositas (Sadrmomtazi & Fasihi, 2011). Temuan ini menekankan pentingnya optimalisasi mikrostruktur untuk meningkatkan durabilitas.

Sebagai kesimpulan, sifat durabilitas mortar dipengaruhi oleh kombinasi faktor, termasuk penggunaan material pozzolan, bahan tambahan alami, material daur ulang, dan modifikasi polimer. Memahami interaksi faktor-faktor ini sangat penting untuk mengembangkan mortar yang mampu menghadapi tantangan lingkungan dan mempertahankan kinerjanya dalam jangka Panjang.

1.2.5 Kuat Tekan

Kuat tekan merupakan salah satu parameter mekanik paling fundamental dalam evaluasi performa beton atau mortar, yang didefinisikan sebagai kemampuan material dalam menahan beban tekan maksimum per satuan luas sebelum mengalami kerusakan atau runtuh. Nilai kuat tekan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis dan proporsi bahan penyusun (semen, agregat, air, dan bahan tambahan), rasio air terhadap semen (w/c ratio), tingkat pemadatan, waktu dan kondisi curing, serta umur pengujian. Secara umum, peningkatan kualitas ikatan antar partikel dan densitas mikrostruktur akan berbanding lurus dengan kenaikan kuat tekan. Proses perkembangan kekuatan diawali dari reaksi hidrasi semen yang membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan kalsium hidroksida (CH), yang mengisi pori-pori dan membentuk matriks padat dan kaku. Nilai kuat tekan biasanya diukur menggunakan uji tekan silinder atau kubus beton pada umur 7, 14, 28 dan 90 hari, sesuai dengan standar pengujian seperti SNI 03-6825-2002. Hasil pengujian ini tidak hanya merefleksikan kemampuan struktural material, tetapi juga menjadi indikator untuk evaluasi mutu dan kelayakan produk beton untuk digunakan dalam pengembangan material baru seperti beton ramah lingkungan, beton atau mortar berbahan pengganti semen, kuat tekan menjadi indikator kunci dipertahankan agar substitusi material tidak mengorbankan performanya. Oleh karena itu, pemahaman menyeluruh terhadap faktor-faktor yang



memengaruhi dan mekanisme pembentukan kuat tekan sangat penting dalam desain campuran dan pengendalian mutu material berbasis semen.

1.2.6 Penyerapan Air

Penyerapan air merupakan salah satu parameter penting dalam menilai sifat porositas dan durabilitas material berbasis semen seperti beton dan mortar, yang menunjukkan sejauh mana material mampu menyerap air ke dalam pori-porinya dalam kondisi jenuh. Secara teoritis, tingginya nilai penyerapan air mengindikasikan keberadaan pori-pori kapiler yang saling terhubung, yang dapat memfasilitasi pergerakan air dan ion agresif seperti klorida atau sulfat ke dalam struktur, sehingga mempercepat proses degradasi seperti korosi tulangan atau reaksi kimia merusak lainnya. Faktor-faktor utama yang memengaruhi tingkat penyerapan air antara lain komposisi campuran, rasio air terhadap semen (w/c), ukuran dan distribusi pori, tingkat kepadatan, serta kualitas curing. Material dengan w/c ratio tinggi cenderung memiliki mikrostruktur yang lebih terbuka dan kurang padat, sehingga meningkatkan volume pori dan daya serap air. Pengujian penyerapan air biasanya dilakukan dengan metode perendaman dan pengukuran kenaikan massa pada kondisi kering oven dan jenuh, sesuai dengan standar seperti ASTM C642 atau SNI 03-6425-2000. Nilai ini tidak hanya berfungsi sebagai indikator ketahanan material terhadap lingkungan lembap, tetapi juga memiliki korelasi erat dengan parameter lain seperti kuat tekan, permeabilitas, dan umur layan struktur. Dalam konteks pengembangan material alternatif atau ramah lingkungan, seperti pemanfaatan agregat daur ulang atau substitusi semen dengan bahan pozolanik, pengujian penyerapan air menjadi krusial untuk memastikan bahwa inovasi material tidak mengorbankan aspek ketahanan terhadap kelembapan dan serangan lingkungan. Dengan demikian, pemahaman menyeluruh tentang mekanisme penyerapan air dan faktor-faktor yang memengaruhinya sangat diperlukan dalam desain dan evaluasi performa jangka panjang material konstruksi berbasis semen.

1.2.7 Porositas

Porositas merupakan karakteristik mikrostruktur yang menggambarkan persentase volume ruang kosong (pori) terhadap total volume material, dan menjadi salah satu indikator utama dalam menilai kualitas serta durabilitas beton atau mortar. Secara fisik, porositas terbagi menjadi pori terbuka dan pori tertutup; pori terbuka memungkinkan pergerakan fluida dan gas ke dalam material, sedangkan pori tertutup bersifat terisolasi dan tidak berkontribusi terhadap permeabilitas. Tingkat porositas dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti rasio air terhadap semen (w/c), distribusi ukuran partikel, tingkat pemadatan, serta proses curing. Material dengan w/c ratio tinggi cenderung memiliki porositas yang lebih besar akibat terbentuknya sistem pori kapiler yang tidak sepenuhnya terisi oleh hasil hidrasi semen. Porositas yang tinggi berdampak pada performa mekanik dan ketahanan lingkungan karena meningkatkan absorpsi air, ion agresif, dan gas korosif, yang dapat mempercepat kerusakan dan memperpendek umur layanan. Pengukuran porositas dapat dilakukan dengan metode gravimetri, pengukuran densitas semu dan nyata, atau teknik lanjutan seperti μ CT, uji intrusion porosimetry (MIP) dan citra mikroskopis (SEM). Dalam pengembangan material inovatif seperti beton atau mortar berbahan daur ulang, kontrol



terhadap porositas menjadi aspek esensial untuk menjamin bahwa substitusi material tidak menurunkan kepadatan dan integritas mikrostruktur. Dengan demikian, pemahaman mendalam mengenai jenis, distribusi, dan pengaruh porositas terhadap kinerja jangka panjang sangat penting dalam optimalisasi desain campuran dan penjaminan mutu material berbasis semen dalam konstruksi modern.

1.2.8 Sorptivity

Sorptivity merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kemampuan material berbasis semen, seperti beton dan mortar, untuk menyerap dan mengalirkan air melalui aksi kapiler dalam kondisi tidak jenuh, dan sangat berkaitan erat dengan porositas, konektivitas pori, serta karakteristik permukaan internal material. Proses sorpsi terjadi akibat gaya adhesi antara molekul air dan dinding pori, serta gaya kohesi antar molekul air itu sendiri, yang mendorong air untuk meresap ke dalam sistem pori melalui mekanisme difusi dan aksi kapiler. Sorptivity dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk rasio air terhadap semen (w/c), derajat hidrasi, tingkat pemadatan, dan kualitas curing; di mana peningkatan porositas dan ukuran pori cenderung meningkatkan laju sorpsi karena memperbesar jalur kapiler. Nilai sorptivity biasanya diukur berdasarkan laju kenaikan massa air yang diserap per satuan luas terhadap akar waktu, dan dinyatakan dalam satuan $\text{mm}/\sqrt{\text{menit}}$ atau $\text{mm}/\text{s}^{0.5}$, dengan acuan standar seperti ASTM C1585. Nilai ini penting karena memberikan indikasi kecepatan penetrasi air ke dalam struktur, yang pada jangka panjang dapat membawa ion-ion agresif seperti klorida dan sulfat, serta mempercepat proses korosi tulangan atau kerusakan akibat reaksi kimia internal. Dalam konteks penggunaan material alternatif atau daur ulang, peningkatan nilai sorptivity sering menjadi perhatian karena dapat menurunkan ketahanan lingkungan dan umur layan material. Oleh karena itu, pengendalian sorptivity melalui desain campuran, pemilihan bahan, dan pengolahan pasca-produksi menjadi sangat penting dalam menjamin keberlanjutan dan kinerja struktural beton dan mortar secara jangka panjang.

1.2.9 Cantabro loss

Cantabro loss merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi ketahanan abrasi atau ketahanan aus campuran beraspal maupun material sempadan seperti mortar atau beton porous terhadap gaya mekanis yang terjadi akibat gesekan dan benturan, baik selama proses konstruksi maupun sepanjang umur layan struktur. Uji Cantabro pada prinsipnya mengukur persentase kehilangan massa spesimen silindris setelah diputar dalam mesin Los Angeles Abrasion tanpa bola baja selama sejumlah putaran tertentu, dan hasilnya dinyatakan sebagai persentase kehilangan berat awal (loss of mass). Nilai Cantabro loss yang tinggi mengindikasikan rendahnya kohesi internal dan kekuatan ikatan antar partikel agregat serta matriks pengikat, yang berpotensi menyebabkan pelepasan butiran (raveling) dan penurunan kinerja struktural,



la perkerasan berpori atau material ringan yang rentan terhadap kerusakan. Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil Cantabro loss meliputi jenis dan kadar aspal atau pengikat, derajat pemadatan, serta distribusi pori ur material. Dalam konteks penelitian material berkelanjutan, seperti agregat daur ulang atau substitusi pengikat dengan bahan alternatif, cantabro menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa inovasi material

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 menunjukkan penurunan masing-masing sebesar 24,35% dan 25,00%. Terlihat juga bahwa penggunaan material halus yang didaur ulang dapat menghasilkan beton yang stabil dan rendah karbon untuk menuju industri konstruksi otomatis yang berkelanjutan.

Penelitian yang dilakukan oleh (Evangelista et al., 2015) ini mengkaji karakteristik fisik, kimia, 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 (WCP) sebagai pengganti semen dalam produksi mortar tersedia dalam literatur. Akan tetapi, penelitian terkait WCP-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 WCP, beserta keuntungan ekonomi dan lingkungannya. Dalam penelitian eksperimental, mortar disiapkan dengan mengganti semen Portland biasa (OPC) dengan WCP dalam berbagai fraksi 0%, 15%, 30%, 40%, 60%, 75%, dan 100% berdasarkan massa. Pengaruh WCP terhadap sifat mortar segar dan keras diperiksa. Ditemukan bahwa kekuatan mortar pasangan bata berkurang secara signifikan seiring dengan peningkatan kuantitas WCP, namun campuran mortar mengandung 40–75% WCP memenuhi kriteria kekuatan untuk mortar pasangan bata. Oleh karena itu, penggunaan WCP menghasilkan pengurangan yang sangat besar dalam faktor lingkungan dari mortar. Sebagai kesimpulan, mortar tersebut memenuhi persyaratan kekuatan yang ditentukan untuk pekerjaan pasangan batu bata yang aman, ekonomis, dan berkelanjutan, sehingga membuatnya berkelanjutan.



Penelitian yang dilakukan oleh (Ohemeng & Naghizadeh, 2023) Studi eksperimental yang melibatkan penggunaan bubuk beton limbah (WCP) atau abu terbang (FA) sebagai pengganti semen dalam produksi mortar tersedia dalam literatur. Namun, studi tentang efek gabungan WCP dan FA dalam mortar semen, bersama dengan dampak lingkungan (EI) dan analisis biaya, belum ditemukan dalam literatur. Oleh karena itu, studi saat ini bertujuan untuk mencapai tujuan ini. Studi dilakukan dalam dua tahap. Mortar dibuat menggunakan rasio binder terhadap pasir sebesar 1:3. Semen diganti dengan WCP pada tingkat 0%, 15%, 40%, 60% dan 100% pada Tahap I. Berdasarkan hasil sifat kekuatan yang diperoleh pada Tahap I, campuran mortar yang dibuat dengan 40% semen dan 60% WCP dipilih untuk studi Tahap II. Mortar disiapkan dengan mengganti semen dengan FA pada 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. 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 pemasangan batu. Selain itu, analisis biaya dan EI mortar juga dilakukan. Diamati bahwa penggabungan FA dalam mortar semen WCP menghasilkan pengurangan biaya dan EI mortar. Oleh karena itu, mortar yang dihasilkan memenuhi persyaratan kekuatan untuk pekerjaan pemasangan batu serta memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan.

1.4 Desain Konseptual

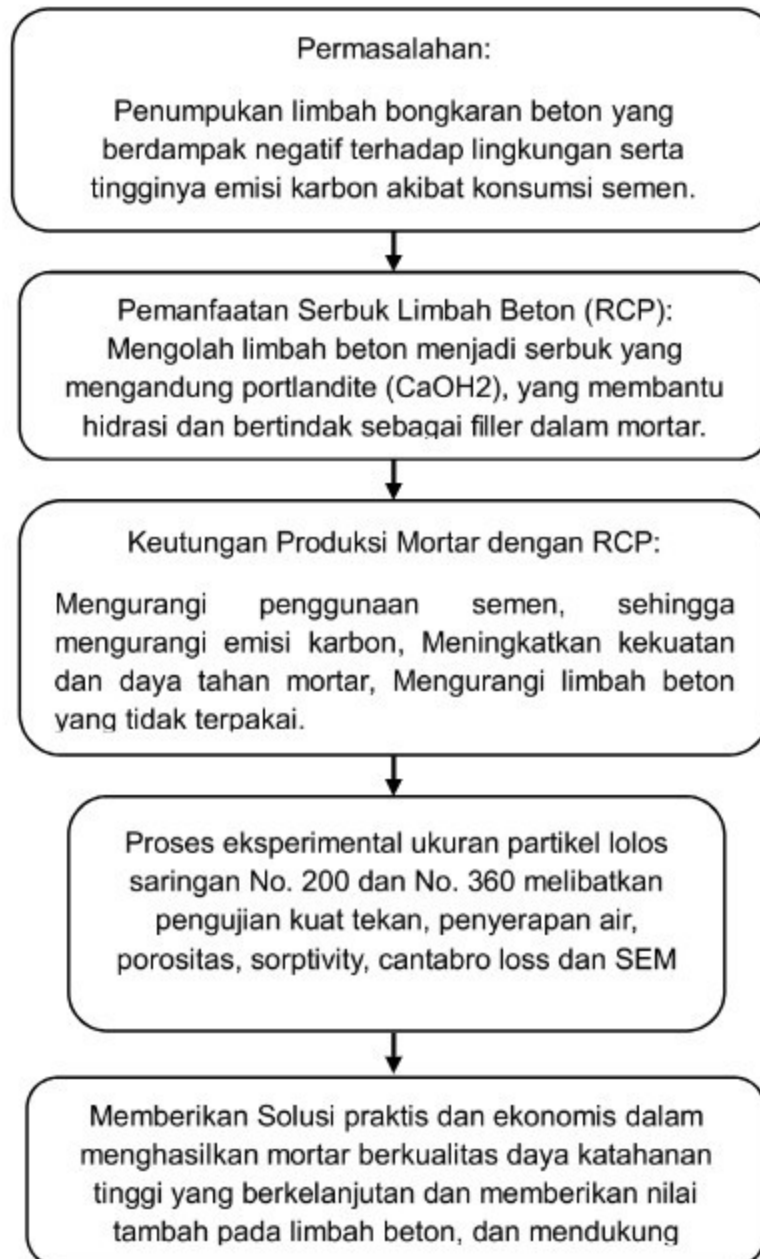
Kerangka konseptual dalam penelitian ini berfokus pada pemanfaatan serbuk limbah beton sebagai bahan baku dalam produksi mortar, dengan tujuan utama mengatasi permasalahan lingkungan akibat penumpukan limbah bongkaran beton serta meningkatkan keberlanjutan industri konstruksi. Serbuk beton daur ulang (RCP) memiliki kandungan portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) yang masih dapat berkontribusi dalam proses hidrasi serta berperan sebagai filler mekanis, sehingga dapat meningkatkan performa mortar. Dengan demikian, pemanfaatan RCP tidak hanya menawarkan solusi terhadap permasalahan limbah beton, tetapi juga membuka peluang untuk menciptakan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan dan bernilai tambah.

Beberapa manfaat utama dari penggunaan serbuk limbah beton dalam produksi mortar mencakup aspek lingkungan, ekonomi, dan teknis. Dari segi lingkungan, penggunaan RCP dapat mengurangi ketergantungan terhadap semen, yang merupakan salah satu penyumbang utama emisi karbon dalam industri konstruksi. Hal ini selaras dengan upaya global dalam mengurangi dampak perubahan iklim. Dari aspek teknis, kandungan portlandite dalam serbuk limbah beton berpotensi meningkatkan kekuatan dan daya tahan mortar, sehingga menghasilkan material berkualitas tinggi. Selain itu, secara ekonomi, pemanfaatan limbah beton sebagai bahan baku dapat mengurangi biaya produksi sekaligus menekan jumlah limbah yang berakhir di tempat pembuangan



penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kadar RCP dalam campuran mortar antara 0%-30%, dengan ukuran partikel yang lolos saringan No. 200 dan No. 40 menunjukkan bahwa optimalisasi pemanfaatan serbuk limbah beton perlu mempertimbangkan persentase dan distribusi ukuran partikel agar diperoleh performa

mortar yang optimal. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengeksplorasi lebih lanjut potensi RCP dalam meningkatkan kualitas mortar serta dampaknya terhadap 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 April 2025.

2.2 Desain Benda Uji dan Komposisi Campuran

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk kubus 5cm x 5cm x 5 cm.

Dilakukan pembuatan benda uji meliputi mortar normal dan mortar sebagai pengganti semen menggunakan RCP dengan ukuran partikel lolos saringan No. 200 (RCP1) dan No. 360 (RCP2) dengan persentase penambahan RCP 0%, 15%, 20% dan 25% terhadap berat semen. Masing-masing benda uji terdapat 21 sampel benda uji berbentuk kubus. Untuk memudahkan dalam penelitian maka benda uji kubus diberikan kode tertentu, kode tersebut terdiri dari beberapa variasi disubstitusi RCP yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kode benda uji

<i>Persentase penambahan RCP</i>	<i>Lolos saringan 200</i>	<i>Lolos saringan 360</i>
Control	RCP1-0	RCP2-0
15%	RCP1-15	RCP2-15
20%	RCP1-20	RCP2-20
25%	RCP1-25	RCP2-25

Pada penelitian ini komposisi campuran mortar normal dan mortar sebagai pengganti semen menggunakan RCP sebanyak 0%, 15%, 20%, 25% terhadap berat semen. Komposisi dapat dilihat pada Tabel 2.

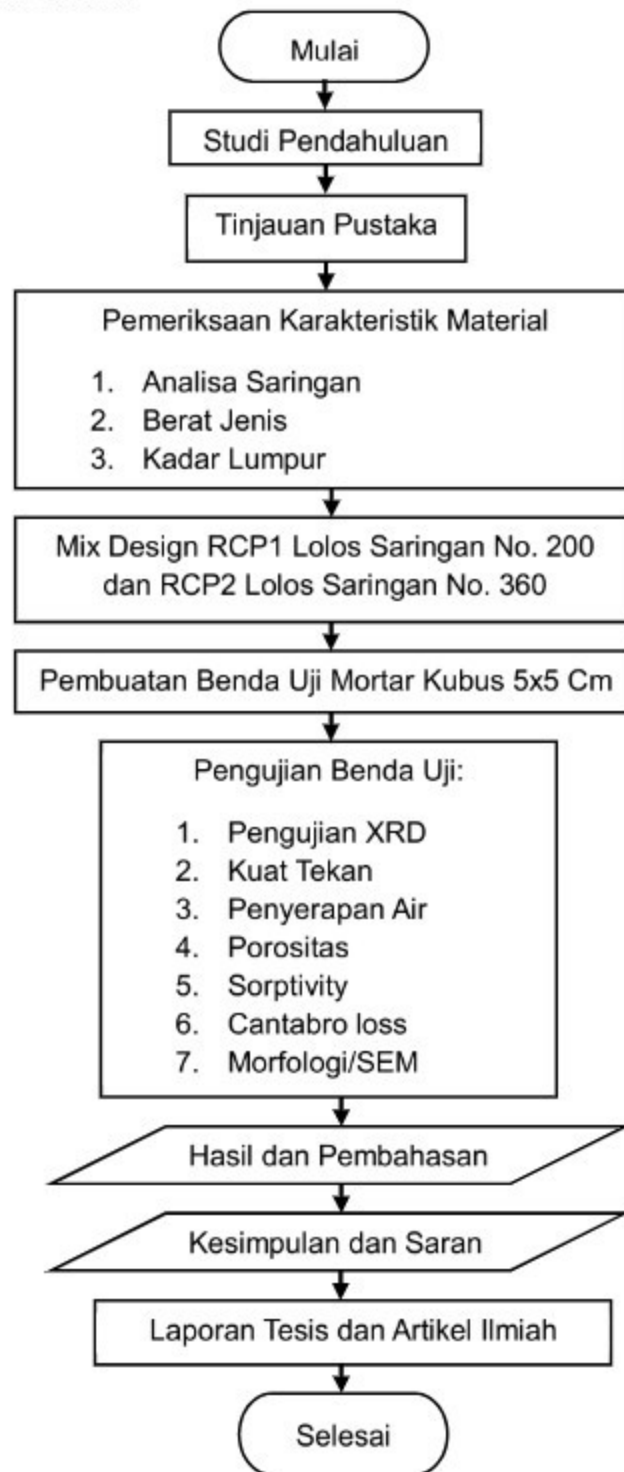
Tabel 2. Mix design

<i>Mix ID</i>	<i>Air (kg/m³)</i>	<i>OPC (kg/m³)</i>	<i>RCP1 (kg/m³)</i>	<i>RCP2 (kg/m³)</i>	<i>Pasir (kg/m³)</i>
RCP1-0	263.72	544.87	0.000	-	1498.40
RCP1-15	263.72	463.14	81.73	-	1498.40
RCP1-20	263.72	435.90	108.97	-	1498.40
RCP1-25	263.72	408.65	136.22	-	1498.40
RCP2-0	263.72	544.87	-	0.000	1498.40
RCP2-15	263.72	463.14	-	81.73	1498.40
RCP2-20	263.72	435.90	-	108.97	1498.40
RCP2-25	263.72	408.65	-	136.22	1498.40



2.3 Metode Penelitian

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



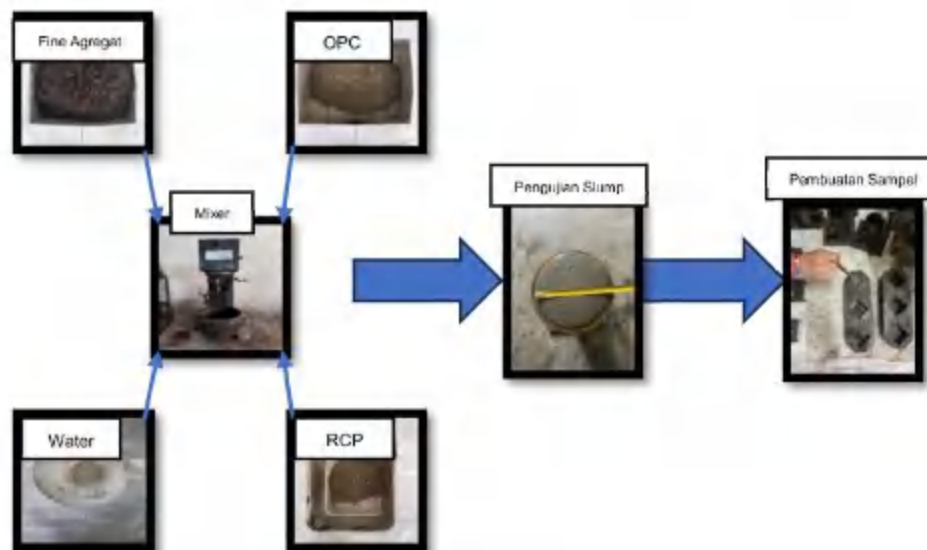
Gambar 2. Diagram Alir



2.4 Pembuatan Benda Uji

Pembuatan dan pengujian ini dirancang untuk mengetahui pengaruh kinerja mortar dengan bubuk beton daur ulang sebagai pengganti semen pada umur 28 dan 90 hari dengan ukuran sampel 5cm x 5cm x 5cm. 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. Masukan 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 $\frac{1}{2}$ dari cetakan, benda uji kemudian diratakan sebanyak 7 kali tumbukan, lalu campuran dimasukkan kembali sampai cetakan full, kemudian diratakan sebanyak 7 kali tumbukan
9. Selanjutnya benda uji divibrator selama 10 detik
10. Berikan penanda pada cetakan yang telah terisi lalu di amkan selama ± 24 jam dengan menutup permukaan mortar dengan plastik
11. Setelah ± 24 jam, keluarkan benda uji dari *mould* lalu curing selama 28 dan 90 hari.



Gambar 3. Proses Pembuatan Sampel Mortar



2.5 Pengujian Benda Uji

2.5.1 Kuat Tekan Mortar

Pengujian kuat tekan (*Compressive Strength*) berdasarkan SNI 03-1974-1990 adalah untuk mengetahui beban tekan setinggi mungkin yang dapat ditahan oleh mortar. Alat uji yang digunakan adalah *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 1000 kN. Dalam pengujian ini, benda uji akan di press dan diproduksi dengan menggunakan metode secara press hidrolis dan vibrator. Benda uji dipres hingga hancur kemudian dihitung kuat tekannya.

Sesuai SNI 03-1974-1990, kuat tekan (f_c) substansial menyinggung beberapa besar beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji meledak ketika terkena daya tekan tertentu yang dihasil oleh mesin tekan.

Pengujian kuat tekan dilakukan pada mortar dengan ukuran 5 cm x 5 cm x 5 cm. dimana pengujian dilakukan saat mortar berumur 7, 28 dan 90 hari. Kuat tekan mortar dapat dilihat pada persamaan 4

$$f_c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (4)$$

Dimana:

f_c = Kuat tekan mortar Mpa

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

A = Luas penampang specimen (mm^2)



Gambar 4. Pengujian Kuat Tekan



apan Air

jian penyerapan air pada mortar dilakukan berdasarkan ASTM C642 untuk kemampuan mortar dalam menyerap air. Langkah pertama adalah sampel mortar berbentuk kubus, yang telah melalui proses curing standar

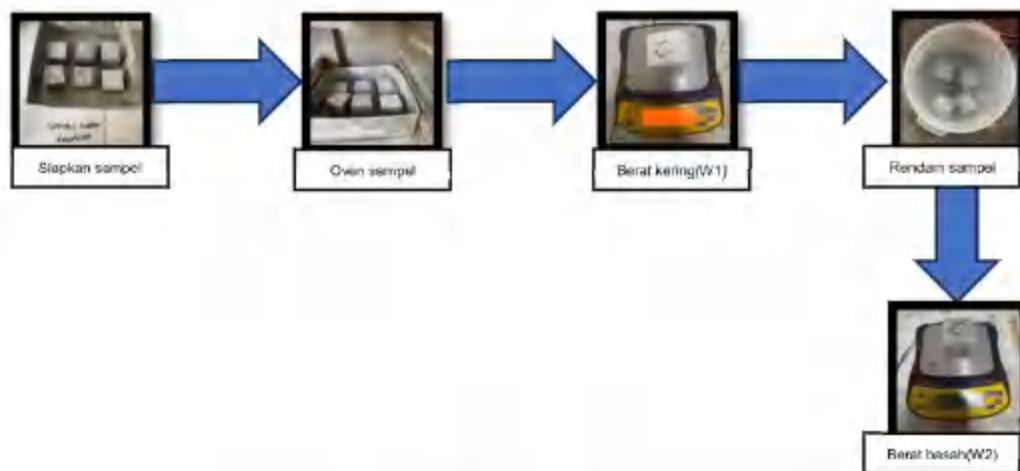
selama 28 hari. Timbang sampel dalam kondisi kering, kemudian keringkan di dalam oven pada suhu 100–110°C selama 24 jam hingga beratnya stabil (selisih dua pengukuran berturut-turut kurang dari 0,5%). Catat berat ini sebagai massa kering oven (W_1). Selanjutnya, rendam sampel dalam air bersih pada suhu 21°C selama 48 jam, keringkan permukaannya dengan kain, dan timbang untuk mendapatkan massa jenuh setelah perendaman (W_2).

$$\text{Penyerapan Air (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \dots\dots\dots (5)$$

Dimana:

W_1 = Berat kering oven (gr)

W_2 = Berat basah setelah di rendam (gr)



Gambar 5. Pengujian Penyerapan Air

2.5.3 Porositas

Pengujian porositas pada mortar dilakukan berdasarkan ASTM C642 untuk menentukan persentase volume rongga dalam mortar. Langkah pertama adalah menyiapkan sampel mortar berbentuk kubus, yang telah melalui proses curing standar selama 28 hari. Timbang sampel dalam kondisi kering, kemudian keringkan di dalam oven pada suhu 100–110°C selama 24 jam hingga beratnya stabil (selisih dua pengukuran berturut-turut kurang dari 0,5%). Catat berat ini sebagai massa kering oven (W_1). Selanjutnya, rendam sampel dalam air bersih pada suhu 21°C selama 48 jam, keringkan permukaannya dengan kain, dan timbang untuk mendapatkan massa jenuh setelah perendaman (W_2). Setelah itu, rebus sampel dalam air selama 5 jam, biarkan



secara alami selama 14 jam, keringkan permukaannya, dan timbang untuk mendapatkan massa jenuh setelah perebusan (W_3). Terakhir, gantung spesimen dalam air dengan kawat dan timbang untuk mendapatkan massa tampak saat terendam (W_4).

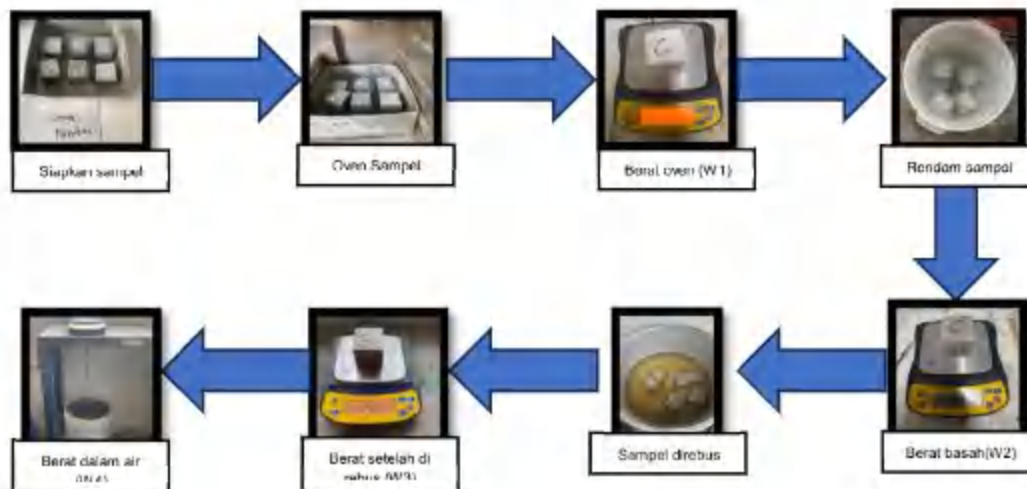
$$\text{Porositas (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_4} \times 100 \dots\dots\dots (6)$$

Dimana:

W_1 = Berat kering oven (gr)

W_3 = Berat setelah direbus (gr)

W_4 = Berat dalam air (gr)



Gambar 6. Pengujian Porositas

2.5.4 Sorptivity

Pengujian sorptivitas pada mortar berdasarkan ASTM C1585 bertujuan untuk mengukur laju penyerapan air melalui kapilaritas. Langkah pertama adalah menyiapkan spesimen mortar berbentuk silinder atau balok dengan dimensi standar yang telah menjalani curing selama 28 hari. Setelah proses curing, spesimen dikeringkan di dalam oven pada suhu 50°C hingga beratnya stabil (selisih dua pengukuran berturut-turut kurang dari $0,1\%$). Kemudian, spesimen didinginkan pada suhu ruang selama 15 hari dalam lingkungan dengan kelembapan relatif $50 \pm 5\%$. Setelah itu, semua sisi spesimen, kecuali permukaan yang akan diuji, dilapisi bahan kedap air seperti lak atau lilin untuk memastikan air hanya dapat masuk melalui satu permukaan tertentu.

Pengujian dilakukan dengan meletakkan spesimen di atas air setinggi 1–3 mm, sehingga hanya permukaan yang tidak terlapsi yang bersentuhan dengan air. Timbang spesimen sebelum kontak dengan air untuk mendapatkan massa awal kering (M_0). Setelah itu, spesimen dibiarkan menyerap air selama interval waktu tertentu, seperti 1, 5, 10, hingga 60 menit. Setelah setiap interval waktu, spesimen diangkat, permukaannya dikeringkan dengan kain untuk menghilangkan air berlebih, dan kemudian ditimbang patkan massa pada waktu tertentu (M_t). Langkah ini diulangi hingga waktu lesai.



.....(7)

S = Sorptivity ($\text{mm/s}^{0.5}$)

M_t = Perubahan berat spesimen pada waktu (gr)

A = Luas penampang yang terkena air (mm^2)

t = Perubahan waktu (s)



Gambar 7. Pengujian Sorptivity

2.5.5 Cantabro Loss (ketahanan abrasi)

Ketahanan abrasi diukur dengan pengujian cantabro loss. Dimana pengujian cantabro mengukur ketahanan abrasi atau kehilangan massa pada mortar akibat benturan dan gesekan. Metode ini umumnya digunakan pada campuran aspal, tetapi juga dapat diterapkan pada mortar untuk menilai ketahanannya terhadap keausan. Proses pengujian dimulai dengan menyiapkan spesimen mortar berbentuk silinder atau kubus yang telah dikeringkan dan mencapai kekuatan akhir, biasanya setelah 28 hari perawatan (*curing*).

Selanjutnya, spesimen dimasukkan ke dalam Los Angeles Abrasion Machine, yang merupakan drum berputar dengan diameter tertentu. Dalam metode ini, spesimen diuji tanpa bola baja agar hanya mengalami benturan antar spesimen dan dinding drum. Drum berputar dengan jumlah putaran tertentu, biasanya sekitar 300 hingga 500 dengan kecepatan yang telah ditetapkan. Setelah pengujian selesai, spesimen ditimbang dan sisa massa yang utuh ditimbang untuk menentukan kehilangan massa.



Cantabro Loss dihitung dalam persen, dengan rumus:

$$\text{Cantabro loss (\%)} = \frac{A-B}{A} \times 100\% \dots \dots \dots (8)$$

Dimana:

CL = Cantabro loss, %

A = Berat awal benda uji (gr)

B = Berat akhir benda uji (gr)



Gambar 8. Los Angeles Abrasion Machine

2.5.6 Morpologi

Morpologi atau pengujian mikrostruktur pada mortar berdasarkan ASTM C1723 dilakukan dengan menggunakan mikroskop elektron pemindai atau Scanning Electron Microscope (SEM). Tujuan utama pengujian ini adalah untuk mengamati karakteristik mikrostruktur mortar, seperti porositas, distribusi partikel, dan interaksi antar fase dalam material. Prosedur dimulai dengan menyiapkan spesimen mortar yang telah mengeras. Spesimen dipotong menjadi ukuran kecil dan permukaannya dihaluskan menggunakan palet abrasif. Setelah itu, spesimen dilapisi dengan lapisan konduktif (biasanya karbon) untuk mencegah pengisian muatan listrik selama proses scanning.



Spesimen kemudian ditempatkan di dalam ruang vakum SEM, dan permukaannya digunakan berkas elektron. Data yang diperoleh diolah untuk menghasilkan citra 3D 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.



Gambar 9. Pengujian SEM

2.5.7 Pengujian XRD

Pengujian X-Ray Diffraction (XRD) merupakan metode karakterisasi yang digunakan untuk mengidentifikasi fase kristalin dan struktur mineral dalam suatu material berdasarkan pola difraksi sinar-X yang dihasilkan dari interaksi radiasi dengan bidang kisi kristal. Prinsip kerja XRD didasarkan pada Hukum Bragg ($n\lambda = 2d \sin\theta$), di mana setiap fase kristalin menghasilkan puncak difraksi pada sudut 2θ dan intensitas tertentu yang bersifat khas sehingga dapat digunakan sebagai identitas mineral. Dalam praktiknya, sampel dikeringkan dan digerus hingga berukuran halus untuk memperoleh orientasi partikel yang acak, kemudian dipindai pada rentang sudut tertentu, umumnya $5-70^\circ 2\theta$, dengan interval langkah kecil. Pola difraksi yang dihasilkan dianalisis dengan membandingkannya terhadap basis data standar (ICDD/JCPDS) untuk menentukan jenis fase yang terkandung di dalam material.



m konteks material berbasis semen dan mortar, pengujian XRD berperan (mengidentifikasi produk hidrasi dan mengevaluasi reaksi pozzolanik. Fase erti portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], ettringite, kalsit (CaCO_3), dan kuarsa dapat elalui puncak-puncak difraksi yang jelas, sedangkan fase kalsium silikat) umumnya muncul sebagai gundukan atau halo karena sifatnya yang semi-

amorf. Perubahan intensitas puncak portlandite sering digunakan sebagai indikator konsumsi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ akibat reaksi pozzolanik pada sistem yang mengandung bahan tambahan seperti POFA atau RCP. Meskipun XRD sangat efektif untuk identifikasi fase, metode ini memiliki keterbatasan dalam kuantifikasi absolut fase amorf, sehingga analisis kuantitatif yang lebih akurat memerlukan pendekatan lanjutan seperti Rietveld refinement atau kombinasi dengan teknik karakterisasi lainnya.



Gambar 10. Pengujian XRD

