

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Mortar memainkan peran mendasar dalam industri konstruksi, berfungsi sebagai bahan pengikat penting yang secara signifikan memengaruhi integritas dan keawetan struktur pasangan bata. Komposisinya biasanya melibatkan campuran semen, air, dan agregat halus seperti pasir mengatur atribut mekanis dan daya tahan utama, termasuk kekuatan tekan dan kemampuan kerja (Paiva et al., 2015). Dalam beberapa tahun terakhir, pencarian keberlanjutan dalam konstruksi telah mengintensifkan pencarian bahan alternatif yang tidak hanya melestarikan sumber daya alam tetapi juga mengurangi beban lingkungan. Di antara alternatif ini, penggunaan kembali limbah konstruksi dan pembongkaran, khususnya dalam bentuk bubuk beton daur ulang (RCP) dan agregat beton daur ulang halus (FRCA), telah muncul sebagai solusi yang menjanjikan. Integrasi bahan daur ulang ini ke dalam formulasi mortar semakin dipandang tidak hanya sebagai sarana untuk mengurangi dampak ekologis tetapi juga sebagai peluang untuk meningkatkan karakteristik kinerja material dalam kondisi tertentu.

Limbah beton, yang muncul dari kegiatan konstruksi, renovasi, dan pembongkaran, merupakan bagian penting dari aliran limbah padat global. Ketika limbah ini diproses, ia menghasilkan berbagai produk sampingan, termasuk RCP dan FRCA. RCP biasanya dihasilkan dengan menggiling halus limbah beton untuk menghasilkan bubuk yang dapat bertindak sebagai bahan semen tambahan (SCM). Sifat pozzolannya memungkinkannya untuk bereaksi dengan kalsium hidroksida  $[Ca(OH)_2]$ , membentuk gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan, yang meningkatkan kekuatan dan daya tahan komposit berbasis semen secara keseluruhan (Aquino Rocha & Toledo Filho, 2023; S. Li et al., 2021). Di sisi lain, FRCA diperoleh dengan menghancurkan dan memproses limbah beton menjadi partikel halus yang dapat menggantikan agregat halus alami. Meskipun FRCA secara umum menunjukkan porositas yang lebih tinggi dan kekuatan mekanis yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan alami, desain campuran yang cermat dapat mengimbangi kekurangan ini dan menjadikannya alternatif yang layak dalam produksi mortar berkelanjutan (J. Li et al., 2024; Revilla-Cuesta et al., 2022; Tamayo et al., 2023; L. Wang et al., 2022).

Kekuatan tekan tetap menjadi indikator kinerja penting untuk mortar, yang mencerminkan kemampuannya untuk menahan beban aksial tanpa kegagalan. Penyertaan RCP dan FRCA telah terbukti memengaruhi sifat ini dalam berbagai cara, dengan beberapa penelitian menunjukkan penurunan kekuatan karena zona transisi antarmuka (ITZ) yang lebih lemah atau peningkatan porositas. Namun, penelitian lain menunjukkan bahwa dengan proporsi dan teknik pemrosesan yang optimal, mortar yang menggabungkan bahan daur ulang ini dapat mencapai kekuatan tekan yang sebanding dengan, atau bahkan melebihi, yang dibuat dengan bahan konvensional (Le et al., 2016; Tošić, N., Marinković, S., Pecić, N., Ignjatović, I., Dragaš, 2018). Penyerapan air dan porositas juga penting untuk menilai daya tahan, karena keduanya menentukan kerentanan material terhadap masuknya kelembapan dan degradasi akibatnya. Uji penyerapan kapiler dan metode permeabilitas air umumnya digunakan untuk mengevaluasi karakteristik ini, dengan hasil yang menghubungkan porositas yang lebih tinggi dengan kerentanan yang lebih besar terhadap serangan fisik dan kimia (Phung et al., 2013; Sakai, 2019; Z. Zhang & Scherer, 2018).

Sorptivity, yang didefinisikan sebagai kapasitas material untuk menyerap dan menyalurkan air melalui kapilaritas, berfungsi sebagai indikator penting lainnya dari ketahanan. Tingkat sorptivitas yang tinggi biasanya menunjukkan peningkatan porositas dan permeabilitas, yang keduanya membahayakan integritas struktural dan masa pakai mortar yang terpapar lingkungan yang keras. Oleh karena itu, nilai sorptivitas yang lebih rendah diinginkan, karena menyiratkan berkurangnya masuknya air dan struktur material yang signifikan. Serangan asam dapat menyebabkan pembubaran produk hidrasi, oksida dan C-S-H, sehingga melemahkan matriks material. Mortar yang mengandung RCP menunjukkan ketahanan yang berbeda terhadap lingkungan asam, dengan peningkatan porositas dan struktur mikro yang kurang baik (El et al., 2023). Demikian pula, paparan terhadap agen agresif seperti asam sulfat dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan. Serangan asam dapat menyebabkan pembubaran produk hidrasi, oksida dan C-S-H, sehingga melemahkan matriks material. Mortar yang mengandung RCP menunjukkan ketahanan yang berbeda terhadap lingkungan asam, dengan peningkatan porositas dan struktur mikro yang kurang baik (El et al., 2021; Tamayo et al., 2023).



Ketahanan abrasi merupakan parameter ketahanan penting lainnya, terutama untuk mortar yang digunakan dalam aplikasi terbuka. Properti ini mencerminkan kemampuan permukaan mortar untuk menahan keausan dan degradasi akibat gesekan mekanis. Uji standar seperti uji abrasi Los Angeles dan metode abrasi mikro membantu menilai properti ini, memberikan wawasan berharga tentang kinerja jangka panjang material dalam pengaturan dunia nyata (Velay-Lizancos et al., 2018). Analisis mikrostruktur, menggunakan alat seperti Scanning Electron Microscopy (SEM) dan X-ray Diffraction (XRD), mengungkap bagaimana penggabungan RCP dan FRCA memengaruhi morfologi internal mortar. Perubahan struktur pori, produk hidrasi, dan ITZ dapat secara signifikan memengaruhi kinerja mekanis dan ketahanan terhadap agen eksternal (Evangelista et al., 2015; W. Li et al., 2012; Phung et al., 2013; Sakai, 2019; Ulsen et al., 2022).

Tantangan utama yang dibahas dalam studi ini adalah kinerja daya tahan terbatas yang sering dikaitkan dengan mortar yang menggunakan bahan daur ulang, terutama saat terkena kondisi lingkungan yang agresif. Meskipun manfaat penggunaan RCP dan FRCA terdokumentasi dengan baik dalam hal keberlanjutan dan efektivitas biaya, porositasnya yang tinggi dan komposisi yang bervariasi menimbulkan ketidakpastian dalam kinerja. Mortar konvensional biasanya mengandalkan bahan yang sudah mapan dengan perilaku yang dapat diprediksi, tetapi bahan daur ulang memerlukan pendekatan baru untuk desain campuran dan evaluasi kinerja. Dengan demikian, masalah utamanya terletak pada pengoptimalan formulasi mortar yang mengandung RCP dan FRCA untuk mencapai daya tahan dan kinerja mekanis yang setara dengan campuran konvensional.

Solusi umum untuk masalah ini adalah mengeksplorasi sinergi antara RCP dan FRCA dalam formulasi mortar, yang bertujuan untuk memanfaatkan aktivitas pozolan RCP dan struktur granular FRCA. Dengan menyesuaikan tingkat penggantian dan proporsi campuran, para peneliti telah berupaya mengimbangi efek buruk yang terkait dengan setiap komponen saat digunakan secara terpisah. Pendekatan holistik ini, yang menggabungkan pengisi dan agregat daur ulang, memiliki potensi untuk mengembangkan solusi mortar yang tahan lama dan berkelanjutan yang disesuaikan untuk aplikasi tertentu.

Solusi khusus dari studi terkini telah menunjukkan kelayakan peningkatan kinerja mortar melalui integrasi RCP dan FRCA yang cermat. Misalnya, (Aquino Rocha & Toledo Filho, 2023) dan (S. Li et al., 2021) menyoroti bahwa RCP dapat meningkatkan kepadatan dan kekuatan matriks secara signifikan dengan berkontribusi pada pembentukan gel C-S-H tambahan. Sementara itu, (L. Wang et al., 2022) dan (J. Li et al., 2024) menyelidiki kinerja struktural mortar yang menggabungkan FRCA, menyimpulkan bahwa material tersebut mempertahankan sifat mekanis yang dapat diterima saat diproses dan dicampur dengan tepat. Studi lain, seperti yang dilakukan oleh (Tošić, N., Marinković, S., Pecić, N., Ignjatović, I., Dragaš, 2018) (Paiva et al., 2015), menunjukkan bahwa menggabungkan bubuk daur ulang dan agregat dapat menghasilkan sinergi kinerja, mengimbangi kekurangan masing-masing, dan menghasilkan formulasi mortar yang lebih seimbang.

Literatur tambahan telah mengeksplorasi evolusi mikrostruktur mortar yang mengandung bahan daur ulang. (Z. Zhao et al., 2015) dan (Evangelista et al., 2015) mendokumentasikan bagaimana teknik SEM dan XRD mengungkap perubahan struktural pada tingkat mikroskopis, termasuk variasi porositas dan produk hidrasi yang secara langsung berkorelasi dengan hasil kekuatan dan daya tahan. (Ulsen et al., 2022) dan (Paiva et al., 2015) mengonfirmasi bahwa ITZ yang terbentuk antara agregat daur ulang dan pasta semen sangat penting untuk kinerja mekanis, dan optimalisasinya sangat penting untuk pengembangan mortar berkualitas tinggi yang menggabungkan komponen daur ulang. Secara kolektif, studi-studi ini menggarisbawahi pentingnya pendekatan komprehensif yang menggabungkan karakterisasi material, penelitian kinerja, dan analisis mikrostruktur untuk meningkatkan kualitas mortar daur ulang.



kemajuan yang dicapai dalam memahami perilaku mortar dengan konten daur ulang, kemajuan penelitian yang signifikan. Khususnya, hanya sedikit penelitian yang secara signifikan menggunakan gabungan RCP dan FRCA dalam formulasi mortar di bawah berbagai kondisi, termasuk serangan asam dan abrasi. Selain itu, terdapat konsensus terbatas mengenai campuran optimal yang menyeimbangkan kekuatan mekanis, penyerapan air, dan daya tahan. Ada kecenderungan berfokus pada sifat mekanis atau aspek daya tahan, jarang

mengintegrasikan keduanya ke dalam investigasi terpadu. Fragmentasi ini menggarisbawahi perlunya penelitian komprehensif yang secara holistik mengevaluasi kinerja mortar yang menggabungkan RCP dan FRCA.

Studi ini bertujuan untuk mengatasi kesenjangan ini dengan menyelidiki ketahanan campuran mortar yang menggabungkan bubuk beton daur ulang dan agregat beton daur ulang halus yang berasal dari limbah konstruksi dan pembongkaran. Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi sistematisnya terhadap beberapa parameter kinerja kekuatan tekan, penyerapan air, porositas, daya serap, ketahanan terhadap asam sulfat, ketahanan abrasi, dan karakteristik mikrostruktur dalam kerangka eksperimental yang terpadu. Hipotesis utamanya adalah bahwa melalui desain campuran yang dioptimalkan, adalah mungkin untuk mengembangkan formulasi mortar yang mengandung RCP dan FRCA yang menunjukkan kinerja yang kompetitif relatif terhadap bahan tradisional. Cakupan studi mencakup sifat mekanis dan ketahanan, yang menawarkan penilaian komprehensif yang berkontribusi pada tujuan yang lebih luas untuk mempromosikan praktik berkelanjutan dalam rekayasa bahan konstruksi.

Berdasarkan latar belakang dan berbagai penelitian terdahulu di atas, maka dapat disimpulkan bahwa sifat durabilitas mortar yang mengandung agregat halus dan bubuk 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 Agregat Halus dan Bubuk Beton Daur Ulang”**.

#### 1.1.1 Rumusan Masalah

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

#### 1.1.2 Tujuan Penelitian

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

#### 1.1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian diharapkan mampu memberikan informasi ilmiah tentang pengaruh penggunaan agregat halus dan 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 beton ringan geopolimer 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
2. Agregat halus dan 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.
3. Agregat Halus beton daur ulang yang digunakan adalah agregat yang lolos daringan No.4 dan saringan No.8, No.16, No.30, No.50, No.100 dan No.200.
  - daur ulang yang digunakan memiliki ukuran butiran tertentu (lolos saringan No.200).
  - rian adalah pada mortarnya yaitu campuran antara air, semen, pasir, agregat halus dan bubuk beton daur ulang dengan proporsi campuran yang digunakan 0%, 15%, 30% dan 30%+10%, 60%+10%, 30%+20%, 60%+20.
  - menggunakan benda uji berbentuk silinder 5 cm x 10 cm dan kubus 5 cm x 5 cm.
  - at tekan dilakukan pada umur 7,28 dan 90 hari



## 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 (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 (Y. Wang et al., 2019). Aspek perilaku mortar dalam kasus ini sangat penting untuk aplikasi di mana kondisi beban jangka panjang diharapkan, hal ini karena dapat menyebabkan deformasi dan potensi kegagalan struktural jika tidak diperhitungkan dengan benar dalam desain.

Penting juga untuk mempertimbangkan karakteristik kelembapan mortar, khususnya dalam aplikasi 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



mortar mencakup pemahaman multifaset tentang sifat mekanisnya, perilaku reaksinya dengan material lain. Dengan mengintegrasikan wawasan dari elastisitas zona transisi antarmuka, perilaku merayap, dinamika perpindahan kelembapan, dan para peneliti dan praktisi dapat mengembangkan formulasi mortar yang lebih efektif inerja 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. Daurlang 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 mekanis (Manzi et al., 2013). Zhao dkk. menunjukkan bahwa penggunaan agregat halus daur ulang dalam mortar campuran dapat menghasilkan kekuatan tekan yang layak, meskipun kekuatan ini mungkin lebih rendah daripada yang dicapai dengan agregat alami (W. Zhao et al., 2011). Sifat mekanis beton yang dibuat dengan agregat 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 (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 salah satu komponen esensial dalam campuran beton maupun mortar yang berperan sebagai pengisi celah di antara butiran agregat kasar, sehingga meningkatkan kepadatan, kemudahan pengerjaan (*workability*), dan kekuatan akhir material. Secara umum, agregat halus dapat berasal dari pasir alami, hasil pemrosesan batuan menjadi pasir buatan, atau limbah konstruksi yang telah dihancurkan dan disaring. Kualitas agregat halus salah satunya ditentukan oleh parameter gradasi, yakni distribusi ukuran partikel yang menggambarkan proporsi butiran dari ukuran terbesar hingga terkecil.

Pengujian gradasi dilakukan melalui analisis saringan bertingkat menggunakan standar ayakan tertentu, kemudian hasil persentase kumulatif butiran yang lolos dibandingkan dengan kriteria gradasi yang diatur, misalnya dalam SNI 03-2834-2000 atau ASTM C33. Berdasarkan standar tersebut, gradasi agregat halus diklasifikasikan ke dalam empat zona: Zona 1 menunjukkan gradasi relatif kasar, umumnya sesuai untuk beton dengan nilai slump rendah; Zona 2 mewakili gradasi menengah yang paling sering digunakan untuk berbagai aplikasi beton; Zona 3 memiliki butiran lebih halus dan cocok untuk pekerjaan yang tan tinggi; sedangkan Zona 4 tergolong sangat halus, lazim digunakan untuk plesteran kebutuhan slump tinggi, namun penggunaannya perlu dikontrol karena berpotensi han air dalam campuran.

Pengujian gradasi dilakukan dengan mencocokkan hasil persentase kumulatif lolos ayakan (misalnya dan 100) dengan rentang nilai masing-masing zona. Zona yang memiliki kesesuaian ta hasil uji ditetapkan sebagai klasifikasi akhir agregat halus. Pemilihan zona gradasi



yang tepat menjadi faktor penting dalam menjamin kualitas campuran, efisiensi pemakaian material, serta kinerja struktural beton atau mortar yang dihasilkan.

### 1.2.3.2 Fine Recycled Concrete Aggregate (FRCA)

Agregat halus daur ulang adalah material yang dihasilkan dari proses pengolahan kembali limbah konstruksi dan pembongkaran bangunan, seperti beton bekas, bata, atau material bangunan lainnya. Proses ini melibatkan penghancuran material menjadi ukuran partikel yang lebih kecil, menyerupai agregat halus alami seperti pasir. Agregat halus daur ulang banyak digunakan dalam aplikasi konstruksi berkelanjutan untuk menggantikan atau mengurangi penggunaan agregat alami yang semakin terbatas.

Salah satu keunggulan utama agregat halus daur ulang adalah sifatnya yang ramah lingkungan. Penggunaannya dapat membantu mengurangi limbah konstruksi yang dibuang ke tempat pembuangan akhir, sekaligus mengurangi dampak eksploitasi terhadap sumber daya pasir alami. Selain itu, agregat halus daur ulang juga memberikan manfaat ekonomi karena material ini biasanya lebih murah dan mudah diakses, terutama di lokasi dengan volume limbah konstruksi yang tinggi. Dengan pemrosesan yang tepat, kualitas agregat halus daur ulang dapat memenuhi standar yang dibutuhkan untuk aplikasi tertentu, termasuk dalam beton dan mortar.

Namun, kualitas AFDR dapat dipengaruhi oleh sifat asal material dan proses daur ulang yang dilakukan. Kontaminasi seperti debu, residu organik, dan partikel lain dapat menurunkan kualitasnya jika tidak diolah dengan baik. Selain itu, sifat fisik dan mekanis AFDR, seperti porositas yang lebih tinggi dan daya serap air yang besar, memerlukan perhatian khusus dalam desain campuran beton. Oleh karena itu, kombinasi penggunaan AFDR dengan bahan tambahan seperti fly ash atau semen pozzolan sering digunakan untuk mengoptimalkan performanya.

Penggunaan agregat halus daur ulang memberikan manfaat signifikan bagi lingkungan, terutama dalam mendukung prinsip keberlanjutan dalam industri konstruksi. Dengan memanfaatkan limbah konstruksi sebagai bahan baku, penggunaan agregat halus daur ulang dapat mengurangi jumlah sampah yang berakhir di tempat pembuangan akhir, sehingga membantu mengatasi masalah penumpukan limbah dan degradasi lahan. Selain itu, pengurangan eksploitasi agregat alami seperti pasir dapat mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem, seperti erosi tanah, kerusakan habitat, dan penurunan kualitas air akibat aktivitas penambangan. Secara keseluruhan, penggunaan agregat halus daur ulang berkontribusi pada pengurangan jejak karbon dan konservasi sumber daya alam, menjadikannya solusi yang lebih ramah lingkungan untuk kebutuhan konstruksi modern.

### 1.2.3.3 Semen

Semen merupakan bahan pengikat hidraulik yang mampu mengeras dan mengikat partikel material lain ketika bereaksi dengan air, sehingga menjadi komponen fundamental dalam pembuatan beton dan mortar. Secara kimia, semen terutama tersusun atas trikalsium silikat ( $C_3S$ ), dikalsium silikat ( $C_2S$ ), trikalsium aluminat ( $C_3A$ ), dan tetrakalsium aluminoferrit ( $C_4AF$ ), yang masing-masing berperan dalam mengatur laju pengerasan, perkembangan kekuatan awal, serta ketahanan jangka panjang. Proses pencampuran semen dengan air memicu reaksi hidrasi yang menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H), membentuk matriks padat yang menjadi elemen utama penentu kekuatan mekanik.

Sifat fisik dan kimia semen, meliputi tingkat kehalusan, waktu ikat, konsistensi normal, panas hidrasi, dan kadar alkali, secara signifikan memengaruhi performa campuran baik pada kondisi segar maupun setelah pengerasan. Dalam praktik konstruksi, semen Portland merupakan jenis yang paling banyak digunakan, khususnya tipe I untuk aplikasi umum, disertai varian lain yang dirancang untuk kebutuhan khusus, seperti ketahanan terhadap sulfat atau panas hidrasi rendah.



gkatnya tuntutan keberlanjutan, bahan tambahan pengganti sebagian semen (substituted materials) seperti abu terbang, slag, dan bubuk beton daur ulang (recycled concrete aggregate) mulai banyak dimanfaatkan untuk mengurangi ketergantungan pada semen. Hal ini membantu mengurangi dampak lingkungan. Dengan demikian, pemahaman yang mendalam tentang sifat fisik dan mekanisme kerja semen menjadi faktor krusial dalam menjamin kualitas dan keberlanjutan konstruksi beton modern.

#### 1.2.3.4 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 mikro yang lebih padat.

Selain itu, aktivitas pozolanik dari bubuk beton daur ulang merupakan komponen penting dalam efektivitasnya sebagai BST. Penelitian Wang menyoroti bahwa RCP menunjukkan sifat pozolanik yang dapat meningkatkan kinerja beton jangka panjang dengan 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 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.

#### 1.2.3.5 Air



Air esensial dalam campuran beton dan mortar karena berfungsi sebagai agen hidrasi kimia antara semen dan air, sekaligus bertindak sebagai pelumas yang menentukan pengerjaan (*workability*) pada kondisi segar. Selama proses hidrasi, air bereaksi terutama dalam semen, khususnya trikalsium silikat ( $C_3S$ ) dan dikalsium silikat ( $C_2S$ ), silikat hidrat (C-S-H) yang menjadi komponen utama dalam pengembangan kekuatan struktur internal beton.

Kualitas air yang digunakan memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja akhir campuran. Kehadiran zat organik, garam terlarut, minyak, atau senyawa kimia agresif dapat mengganggu reaksi hidrasi, mengurangi kekuatan, dan mempercepat korosi tulangan. Oleh karena itu, standar seperti SNI 03-2834 dan ASTM C1602 merekomendasikan penggunaan air dengan tingkat kebersihan dan kelarutan yang memenuhi persyaratan teknis, idealnya setara dengan kualitas air minum.

Selain kualitas, proporsi air terhadap semen (water to cement ratio/w/c ratio) merupakan parameter kunci yang menentukan kekuatan tekan, durabilitas, dan porositas beton. Rasio w/c yang terlalu tinggi meningkatkan jumlah pori dan penyerapan air, sementara rasio yang terlalu rendah dapat menghambat homogenitas pencampuran dan mengurangi workability. Seiring kemajuan teknologi material, peran air semakin diperhatikan dalam aspek efisiensi pemakaian dan pengendalian retak susut, terutama pada beton berkinerja tinggi dan beton ramah lingkungan. Dengan demikian, pengendalian mutu dan kuantitas air merupakan langkah fundamental untuk memastikan kualitas, keandalan, dan keberlanjutan 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 mempertimbangkan secara hati-hati kandungan material daur ulang untuk menyeimbangkan kinerja dan durabilitas.

Bahan tambahan penghasil udara (*air-entraining admixtures*) juga merupakan metode 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.



dimodifikasi dengan polimer telah menarik perhatian karena sifat durabilitasnya yang ang menyoroti bahwa mortar ini memiliki kekuatan tinggi dan sifat ikatan yang sangat < untuk aplikasi perbaikan. Penambahan polimer secara signifikan meningkatkan æmberikan ketahanan terhadap tekanan lingkungan (Wang & Zhang, 2015). Hal ini 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 parameter mekanik utama yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja beton maupun mortar, didefinisikan sebagai kemampuan material menahan beban tekan maksimum per satuan luas hingga terjadinya kerusakan atau kehancuran. Besarnya nilai kuat tekan dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain jenis dan proporsi bahan penyusun (semen, agregat, air, dan bahan tambahan), rasio air terhadap semen (water to cement ratio/w/c ratio), tingkat pemadatan, prosedur dan lama perawatan (curing), serta umur pengujian. Secara prinsip, semakin baik ikatan antarpartikel dan semakin tinggi kerapatan mikrostruktur, semakin besar pula nilai kuat tekan yang dihasilkan.

Perkembangan kekuatan material berawal dari proses hidrasi semen, di mana senyawa trikalsium silikat ( $C_3S$ ) dan dikalsium silikat ( $C_2S$ ) bereaksi dengan air membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan kalsium hidroksida (CH). Senyawa-senyawa ini mengisi rongga pori dan membentuk matriks padat serta kaku yang menjadi penentu utama kekuatan mekanis. Pengujian kuat tekan umumnya dilakukan menggunakan benda uji berbentuk silinder atau kubus pada umur 7, 14, 28, hingga 90 hari, sesuai dengan prosedur standar seperti SNI 03-6825-2002.

Hasil uji kuat tekan tidak hanya merepresentasikan kapasitas struktural material, tetapi juga menjadi acuan untuk menilai mutu dan kelayakan beton dalam aplikasi konstruksi. Dalam pengembangan material inovatif, seperti beton ramah lingkungan, beton dengan agregat daur ulang, atau mortar yang menggunakan bahan pengganti semen, parameter ini tetap menjadi tolok ukur utama yang harus dipertahankan agar modifikasi material tidak mengorbankan kinerja mekanis. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap faktor-faktor yang memengaruhi dan mekanisme pembentukan kuat tekan menjadi aspek krusial dalam perancangan campuran serta pengendalian mutu material berbasis semen.

### 1.2.6 Penyerapan Air

Penyerapan air merupakan parameter penting dalam evaluasi porositas dan durabilitas material berbasis semen, seperti beton dan mortar, yang menggambarkan kemampuan material untuk menyerap air ke dalam pori-porinya hingga mencapai kondisi jenuh. Secara teoretis, tingginya nilai penyerapan air menunjukkan keberadaan pori-pori kapiler yang saling terhubung, sehingga memudahkan pergerakan air maupun ion agresif, seperti klorida dan sulfat, ke dalam struktur. Kondisi ini dapat mempercepat terjadinya degradasi, termasuk korosi tulangan atau reaksi kimia yang merusak.

Tingkat penyerapan air dipengaruhi oleh sejumlah faktor, antara lain komposisi campuran, rasio air terhadap semen (water to cement ratio/w/c), ukuran dan distribusi pori, tingkat kepadatan, serta kualitas proses curing. Umumnya, w/c ratio yang tinggi menghasilkan mikrostruktur yang lebih terbuka dan kurang padat, sehingga meningkatkan volume pori dan kapasitas penyerapan air. Pengujian penyerapan air dilakukan dengan metode perendaman dan pengukuran kenaikan massa dari kondisi kering oven hingga jenuh, sesuai dengan prosedur standar seperti ASTM C642 atau SNI 03-6425-2000.



Penyerapan air tidak hanya menjadi indikator ketahanan material terhadap lingkungan lembap, tetapi juga berkaitan erat dengan parameter lain, seperti kuat tekan, permeabilitas, dan umur pakai. Dalam pengembangan material alternatif atau ramah lingkungan misalnya penggunaan agregat daur ulang atau substitusi semen dengan bahan pozolanik, pengujian ini menjadi aspek krusial yang harus diperhatikan. Optimalisasi material tetap mempertahankan ketahanan terhadap kelembapan dan serangan

lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai mekanisme penyerapan air beserta faktor-faktor yang memengaruhinya merupakan langkah mendasar dalam perancangan dan evaluasi kinerja jangka panjang material konstruksi berbasis semen.

### 1.2.7 Porositas

Porositas merupakan sifat mikrostruktur yang menunjukkan persentase volume ruang kosong (pori) terhadap total volume material, dan menjadi salah satu parameter utama dalam menilai kualitas serta durabilitas beton maupun mortar. Secara umum, porositas dibedakan menjadi pori terbuka dan pori tertutup; pori terbuka memungkinkan pergerakan fluida dan gas ke dalam material, sedangkan pori tertutup bersifat terisolasi sehingga tidak berkontribusi terhadap permeabilitas. Tingkat porositas dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk rasio air terhadap semen (water to cement ratio/w/c), distribusi ukuran partikel, derajat pemadatan, dan kualitas proses curing. Umumnya, material dengan w/c ratio tinggi memiliki porositas lebih besar akibat terbentuknya sistem pori kapiler yang tidak sepenuhnya terisi oleh produk hidrasi semen.

Porositas yang tinggi dapat menurunkan performa mekanik dan ketahanan lingkungan karena mempermudah penetrasi air, ion agresif, dan gas korosif ke dalam struktur, sehingga mempercepat proses degradasi dan mengurangi umur layan. Pengukuran porositas dapat dilakukan dengan metode gravimetri, perhitungan densitas semu dan densitas nyata, atau melalui teknik lanjutan seperti *mercury intrusion porosimetry* (MIP) dan analisis citra mikroskopis (*scanning electron microscopy/SEM*).

Dalam konteks pengembangan material inovatif, termasuk beton atau mortar berbahan daur ulang, pengendalian porositas menjadi aspek kritis untuk memastikan bahwa substitusi material tidak mengurangi kepadatan serta integritas mikrostruktur. Oleh karena itu, pemahaman komprehensif mengenai jenis, distribusi, dan dampak porositas terhadap kinerja jangka panjang sangat diperlukan untuk mengoptimalkan desain campuran dan menjamin mutu material berbasis semen pada konstruksi modern.

### 1.2.8 Sorptivity

Sorptivity merupakan parameter kunci dalam menilai kemampuan material berbasis semen, seperti beton dan mortar, untuk menyerap serta mengalirkan air melalui mekanisme kapiler pada kondisi tidak jenuh. Karakteristik ini memiliki keterkaitan erat dengan porositas, konektivitas pori, dan sifat permukaan internal material. Proses sorpsi terjadi akibat kombinasi gaya adhesi antara molekul air dan dinding pori, serta gaya kohesi antar molekul air, yang mendorong peresapan air ke dalam jaringan pori melalui mekanisme difusi dan aksi kapiler.

Nilai sorptivity dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk rasio air terhadap semen (water to cement ratio/w/c), tingkat hidrasi, derajat pemadatan, dan kualitas curing. Peningkatan porositas maupun ukuran pori umumnya akan mempercepat laju sorpsi karena memperbesar jalur kapiler. Pengukuran sorptivity dilakukan dengan menentukan laju kenaikan massa air yang diserap per satuan luas terhadap akar waktu, dan dinyatakan dalam satuan  $\text{mm}/\sqrt{\text{menit}}$  atau  $\text{mm}/\text{s}^{0,5}$ , mengacu pada standar seperti ASTM C1585. Parameter ini penting karena memberikan gambaran kecepatan penetrasi air ke dalam material, yang dalam jangka panjang dapat membawa ion-ion agresif seperti klorida dan sulfat, sehingga memicu korosi tulangan atau kerusakan akibat reaksi kimia internal.

Dalam konteks penerapan material alternatif atau daur ulang, sorptivity sering menjadi perhatian karena peningkatannya dapat menurunkan ketahanan terhadap lingkungan dan mengurangi umur layan struktur. Oleh sebab itu, pengendalian sorptivity melalui perancangan campuran yang tepat, pemilihan bahan yang sesuai, serta perlakuan pasca-produksi yang memadai merupakan langkah penting untuk melanjutkan dan kinerja struktural beton maupun mortar dalam jangka panjang.



#### (Ketahanan Abrasi)

merupakan parameter yang digunakan untuk menilai ketahanan abrasi atau campuran beraspal maupun material sejenis, seperti mortar dan beton berpori, nis yang timbul akibat gesekan dan benturan, baik selama tahap konstruksi maupun n struktur. Pengujian ini pada prinsipnya mengukur persentase kehilangan massa

spesimen berbentuk silinder setelah diputar dalam mesin *Los Angeles Abrasion* tanpa bola baja selama jumlah putaran tertentu, dengan hasil dinyatakan sebagai persentase kehilangan berat awal (*loss of mass*). Nilai Cantabro loss yang tinggi menunjukkan rendahnya kohesi internal serta lemahnya ikatan antarpartikel agregat dan matriks pengikat, yang dapat memicu pelepasan butiran (*raveling*) dan penurunan kinerja struktural, khususnya pada perkerasan berpori atau material ringan yang rentan terhadap kerusakan permukaan.

Hasil Cantabro loss dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis dan gradasi agregat, kadar aspal atau bahan pengikat, tingkat pemadatan, serta distribusi pori dalam struktur material. Dalam konteks pengembangan material berkelanjutan, termasuk penggunaan agregat daur ulang atau substitusi bahan pengikat dengan material alternatif, uji Cantabro menjadi instrumen penting untuk memastikan bahwa inovasi material tidak mengurangi ketahanan abrasi dan integritas struktural. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai mekanisme kehilangan massa akibat abrasi, serta keterkaitan antara mikrostruktur material dan ketahanan mekanisnya, sangat diperlukan untuk mengoptimalkan desain campuran yang mampu bertahan terhadap beban dinamis dan kondisi lingkungan yang agresif.

### 1.3 Tinjauan Pustaka

#### 1.3.1 Studi terdahulu terkait pengaruh RCA terhadap karakteristik mortar

Penelitian yang dilakukan oleh (Sosa et al., 2023) menjelaskan pengaruh agregat halus beton daur ulang (*fine recycled concrete aggregate/FRCA*) terhadap zona transisi antar muka (*interfacial transition zone/ITZ*) dan porositas mortar. Literatur mengenai pengaruh FRCA menunjukkan hasil yang tidak konsisten, sering kali mengindikasikan dampak negatif terhadap kelecakan, kekuatan tekan, susut kering, serta sifat transportasi lainnya, namun di sisi lain juga terkadang menunjukkan hasil sebaliknya. Ketidakkonsistenan ini kemungkinan berasal dari kombinasi efek porositas tinggi FRCA dan penambahan air tambahan yang kadang dilakukan untuk mengimbangi daya serap FRCA. Pasta semen yang menempel pada FRCA menyebabkan porositas FRCA lebih tinggi dibandingkan dengan agregat halus alami. Hal ini menambah kompleksitas dalam desain campuran karena sulitnya menentukan rasio penyerapan air FRCA secara akurat, yang seringkali mengakibatkan koreksi air yang tidak tepat. Kelebihan estimasi air tambahan ini dapat meningkatkan porositas matriks semen. Oleh karena itu, efek keseluruhan dari penggunaan FRCA bergantung pada efek mana yang lebih dominan. Pengaruh penyerapan air oleh FRCA dianalisis dengan menguji campuran yang mengandung berbagai persentase FRCA dalam kondisi setengah kering (*air-dry*). Mortar referensi yang digunakan mengandung 45% volume pasir buatan (*manufactured sand*) terhadap total volume pasir dengan rasio air terhadap semen (*w/c*) sebesar 0,40, kemudian dibandingkan dengan mortar yang mengandung FRCA sebanyak 15%, 30%, dan 45% volume sebagai pengganti pasir buatan. Tidak dilakukan kompensasi air akibat kapasitas penyerapan FRCA selama proses produksi mortar. Pengukuran dilakukan pada kondisi segar dan mengeras, dengan pengujian kelecakan (0 dan 30 menit setelah pencampuran), *bleeding*, densitas, kapasitas penyerapan air, porositas, dan kekuatan tekan. Selain itu, analisis mikrostruktur menggunakan pencitraan SEM pada sampel tipis yang dipoles menunjukkan pengaruh penambahan FRCA terhadap porositas keseluruhan dan perubahan pada zona transisi antar muka (*ITZ*). Perubahan yang mencolok pada *ITZ* dikaitkan dengan keberadaan FRCA dan perpindahan air antara matriks segar dan partikel FRCA. Kapasitas penyerapan air FRCA secara signifikan memengaruhi performa mortar, tergantung pada sifat yang dianalisis.

(Z. Zhao et al., 2015) mengatakan bahwa Agregat halus beton daur ulang (*fine recycled concrete aggregates/FRCA*), yang juga disebut pasir daur ulang, memiliki ukuran partikel lebih kecil dari 5 mm dan pada dasarnya terdiri dari mortar dan pasta semen yang telah mengeras. Oleh karena itu, FRCA memiliki kebutuhan air yang tinggi sehingga sulit untuk didaur ulang ke dalam mortar dan beton. Dalam makalah yang mengandung FRCA telah dipelajari, termasuk sifat segar, sifat mekanik, dan an sisi antar muka (*interfacial transition zone/ITZ*). Pengaruh kondisi jenuh FRCA terhadap sifat-sifat mortar dengan komposisi identik pertama-tama telah diteliti. an bahwa kelecakan mortar yang mengandung FRCA kering selalu lebih besar yang mengandung FRCA jenuh. Hal ini terjadi karena pada FRCA kering, jumlah 1 diserap ditambahkan pada awal pencampuran, yang menyebabkan peningkatan terhadap semen (*W/C*) yang efektif dan volume pasta, sehingga meningkatkan



keleccakan sebelum air tersebut terserap ke dalam FRCA. Sebaliknya, air yang terserap pada FRCA jenuh tidak langsung tersedia dan karena itu tidak dapat meningkatkan rasio W/C efektif awal. Selain itu, kekuatan tekan mortar yang mengandung FRCA kering selalu lebih tinggi dibandingkan dengan mortar yang dibuat dengan FRCA jenuh. Hal ini dikaitkan dengan terbentuknya zona transisi antar muka (ITZ) yang lebih tipis sehingga meningkatkan sifat mekanik mortar. Pengaruh fraksi pasir daur ulang dan ukuran butiran pasir daur ulang terhadap sifat mekanik mortar kemudian dipelajari menggunakan FRCA jenuh. Kekuatan tekan mortar menurun secara hampir linear seiring meningkatnya persentase penggantian pasir dengan pasir daur ulang. Selain itu, ditunjukkan bahwa fraksi pasir daur ulang yang lebih halus (ukuran 0–0,63 mm) memberikan dampak paling buruk terhadap sifat mekanik mortar.

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 & 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.

(Nedeljković et al., 2021) membahas perkembangan terkini (state-of-the-art) mengenai agregat halus beton daur ulang (fine recycled concrete aggregates/fRCA), dengan fokus pada sifat fisik dan kimia, sifat rekayasa, serta durabilitas beton yang mengandung fRCA. Berdasarkan tinjauan sistematis terhadap literatur yang telah dipublikasikan, belum memungkinkan untuk menyusun pedoman dan alat guna mendorong penerapan luas fRCA dalam beton baru tanpa adanya penelitian lebih lanjut, khususnya dengan tetap mempertahankan atau bahkan menurunkan kandungan semen. Yang masih kurang adalah pengetahuan mengenai sifat fisikokimia kunci dan hubungannya dengan kualitas campuran beton serta kinerja beton. Makalah ini meletakkan dasar untuk pemahaman yang lebih baik mengenai kualitas fRCA, baik yang diperoleh dari beton induk yang diproduksi secara khusus di laboratorium dengan proses



pengayakan yang terkendali, maupun dari struktur di lapangan. Dengan sifat fRCA dengan agregat halus alami, beberapa sifat pembatas utama dari fRCA itu tingginya daya serap air fRCA, kondisi kelembapan fRCA, penggumpalan partikel, ekat pada permukaan agregat. Oleh karena itu, kualitas fRCA yang konsisten sulit komposisi kimianya mungkin lebih stabil. Diperlukan teknik karakterisasi lanjutan dan yang lebih canggih untuk mengakomodasi sifat-sifat pembatas fRCA dalam desain

Penelitian yang dilakukan oleh (Garg & Shrivastava, 2023) dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) yang ditetapkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa, studi ini menyelidiki alternatif ramah lingkungan yang dapat digunakan dalam berbagai kegiatan konstruksi. Penelitian ini mengeksplorasi potensi penggunaan agregat halus beton daur ulang (Recycled Concrete Fine Aggregates/RCFA) dan agregat halus isolator keramik (Ceramic Insulator Fine Aggregates/CIFA) sebagai pengganti penuh pasir alam sungai dalam aplikasi mortar plester, dengan mengkaji secara menyeluruh sifat mekanik dan durabilitasnya. Hasil awal menunjukkan bahwa campuran mortar dengan 50% penggantian pasir sungai menggunakan RCFA menghasilkan kekuatan tekan yang sebanding dengan campuran kontrol yang hanya mengandung pasir sungai. Namun, hasil pengujian terhadap susut dan durabilitas menunjukkan dampak negatif dari penggunaan RCFA dalam mortar, dengan nilai susut hampir dua kali lipat dibandingkan campuran kontrol. Untuk meningkatkan kinerja mortar, CIFA ditambahkan bersamaan dengan 50% RCFA. Penambahan 50% CIFA bersama 50% RCFA menghasilkan kinerja keseluruhan yang lebih baik, dengan peningkatan sekitar 25% pada kekuatan tekan dan 10% pada kekuatan adhesi. Selain itu, mortar yang mengandung limbah juga menunjukkan performa yang lebih unggul dalam uji durabilitas yang melibatkan paparan larutan HCl 5% dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> selama 180 hari. Hasilnya menunjukkan penurunan massa dan kekuatan tekan sebesar 2–3% lebih rendah dibandingkan campuran kontrol, yang mengindikasikan peningkatan kinerja mekanik dan durabilitas dari campuran mortar tersebut. Analisis struktur mikro menggunakan teknik SEM dan XRD juga dilakukan untuk memvalidasi temuan mekanik dan durabilitas tersebut. Untuk menilai keberlanjutan campuran mortar, dilakukan penilaian daur hidup (Life Cycle Assessment/LCA) dengan batasan “cradle to gate”. Selain itu, metode Analytical Hierarchy Process (AHP) digunakan untuk mengevaluasi dan memberi peringkat pada berbagai campuran mortar berdasarkan sifat mekanik, fungsional (susut dan kekuatan adhesi), dan durabilitas, serta indikator keberlanjutan. Hasil AHP menunjukkan bahwa campuran mortar dengan 100% bahan limbah menempati peringkat pertama di antara semua alternatif lainnya, menegaskan potensinya sebagai pilihan mortar plester yang efektif dan berkelanjutan dibandingkan dengan mortar konvensional.

#### 1.4 Desain Konseptual

Penelitian ini dirancang dengan pendekatan eksperimental yang terkontrol untuk mengevaluasi durabilitas mortar yang mengandung *fine recycled concrete aggregate* (FRCA) sebagai pengganti parsial agregat halus alami dan *recycled concrete powder* (RCP) sebagai pengganti parsial semen. Fokus utama diarahkan pada hubungan antara komposisi material daur ulang dan ketahanan mortar terhadap degradasi jangka panjang, yang diukur melalui parameter mekanis, fisik, dan lingkungan.

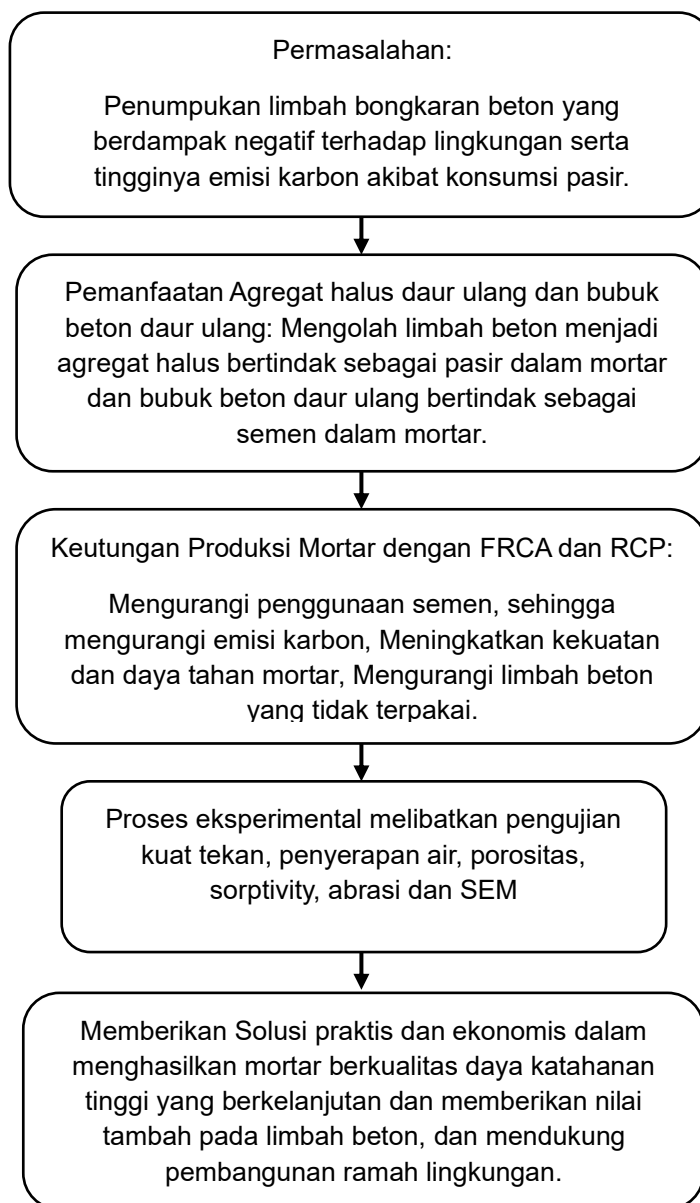
Variabel bebas terdiri atas persentase substitusi FRCA (0%, 15%, 30%, 45%, 60%) dan kadar penambahan RCP (0%, 10%, 20%). Variabel terikat mencakup indikator durabilitas yang meliputi penyerapan air, porositas, sorptivitas, ketahanan terhadap serangan kimia (asam sulfat), ketahanan abrasi, serta kuat tekan sisa setelah paparan kondisi degradasi. Sementara itu, variabel kontrol meliputi rasio campuran dasar, faktor air-semen, metode curing, serta prosedur pengujian yang sesuai dengan standar (ASTM, SNI).

Tahapan penelitian dimulai dengan karakterisasi material, mencakup analisis gradasi, densitas, penyerapan air, dan komposisi kimia FRCA serta RCP. Selanjutnya dilakukan pembuatan benda uji mortar berdasarkan variasi komposisi yang telah ditentukan, termasuk campuran kontrol. Uji sifat awal dilakukan untuk mengukur *workability* (ASTM C1437), diikuti uji kuat tekan (SNI 03-6825-2002) pada umur 28 dan 90 hari. Evaluasi durabilitas meliputi pengukuran porositas total, penyerapan air (ASTM C642), sorptivitas (ASTM C1585), ketahanan abrasi (ASTM C944), serta ketahanan terhadap larutan asam sulfat (ASTM C267).



kaan dan sifat higroskopis FRCA dapat memengaruhi pembentukan *interfacial* ) sehingga berdampak pada porositas dan ketahanan mortar. Sementara itu, silika reaktif dalam RCP berpotensi memicu reaksi pozzolan sekunder yang struktur pasta semen dan mengurangi jalur migrasi ion berbahaya. Dengan demikian, nya berkontribusi pada pengembangan pengetahuan ilmiah terkait durabilitas mortar

berbahan daur ulang, tetapi juga menyediakan landasan teknis untuk penerapan material tersebut dalam konstruksi yang berorientasi pada keberlanjutan.



**Gambar 1.** Desain Konseptual





Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)