

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Timbulnya limbah konstruksi dan pembongkaran (C&D), khususnya puing beton, telah menjadi perhatian global yang meningkat karena implikasinya yang merugikan lingkungan. Beton, yang merupakan komponen dominan limbah C&D, berkontribusi besar terhadap jenuhnya TPA dan degradasi lanskap alam. Penumpukan puing beton yang luas tidak hanya menyebabkan penggunaan lahan yang tidak efisien tetapi juga memperburuk tantangan lingkungan seperti emisi gas rumah kaca dan penipisan sumber daya (Bamigboye et al., 2021; Vieira et al., 2020). Menanggapi masalah ini, daur ulang limbah beton menjadi bahan yang dapat digunakan kembali—seperti agregat daur ulang dan bubuk beton daur ulang—telah muncul sebagai solusi berkelanjutan, yang sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan tujuan konstruksi hijau (Makul, 2020; Silva et al., 2016). Meskipun demikian, kendala signifikan tetap ada, khususnya yang menyangkut variabilitas dan kontaminasi bahan daur ulang, yang dapat menghambat kinerja mekanis dan lingkungannya (Ajayi et al., 2017; Silva et al., 2017).

Mortar merupakan material konstruksi penting yang umumnya terdiri dari bahan pengikat (biasanya semen), agregat halus (seperti pasir), dan air. Mortar banyak digunakan untuk aplikasi pasangan bata, plesteran, dan perbaikan karena sifat perekat dan penyalur bebannya. Dalam penelitian konstruksi berkelanjutan, penggunaan komponen daur ulang dalam mortar semakin mendapat perhatian. Agregat beton daur ulang halus (FRCA), yang berasal dari penghancuran limbah beton, berfungsi sebagai pengganti sebagian pasir alam. Penggantian ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada sumber daya pasir murni tetapi juga memfasilitasi peningkatan nilai bahan limbah. Namun, FRCA dicirikan oleh porositas dan penyerapan air yang lebih tinggi dibandingkan dengan pasir alam, yang dapat berdampak negatif pada kemampuan kerja mortar dan integritas mekanis (Le et al., 2019; Z. Zhao et al., 2015). Untuk mengatasi keterbatasan ini, berbagai strategi telah diusulkan, termasuk mengoptimalkan desain campuran dan menggabungkan bahan semen tambahan (SCM) untuk meningkatkan kinerja keseluruhan.

Selain FRCA, material daur ulang lain yang menjanjikan adalah serbuk beton daur ulang (RCP), produk sampingan yang digiling halus yang diperoleh dari penghancuran dan penyaringan sekunder limbah beton. RCP memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi dan potensi hidrolik atau pozzolan laten. Sebagai isi mikro, RCP berkontribusi pada peningkatan kepadatan pengepakan sempurna pori dalam matriks mortar. Meskipun umumnya tidak memiliki men intrinsik yang cukup untuk berfungsi sebagai pengikat mandiri, RCP dengan komponen lain dapat secara signifikan memengaruhi daya lekat terkait kelembaban (Z. Zhao et al., 2015). Pemanfaatan RCP sebagai



bahan pengisi telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam berbagai studi eksperimental, terutama bila digunakan bersama dengan aditif peningkat kinerja lainnya, yang mendukung perannya sebagai alternatif yang berkelanjutan dan fungsional untuk material pengisi tradisional.

Di antara indikator kinerja utama mortar adalah sifat-sifatnya yang masih segar dan mengeras, termasuk kemampuan mengalir, kekuatan tekan, daya tahan, dan ketahanan terhadap tekanan lingkungan. Sifat-sifat yang masih segar, khususnya kemampuan kerja dan kohesi, sangat penting untuk aplikasi praktis dan kemampuan konstruksi. Mortar yang menggabungkan FRCA biasanya menunjukkan kemampuan kerja yang berkurang karena bentuk sudut dan tekstur permukaan kasar dari agregat daur ulang, yang membutuhkan lebih banyak air untuk pencampuran dan penempatan yang tepat (Z. Zhao et al., 2015). Peningkatan kebutuhan air ini dapat mengurangi kekuatan tekan dan menyebabkan porositas yang lebih tinggi dalam keadaan mengeras. Namun, efek buruk ini dapat dikurangi melalui penggunaan campuran pengurang air atau superplasticizer. Mengenai sifat mekanis, campuran mortar konvensional sering menunjukkan kekuatan tekan melebihi 60 MPa, sedangkan mortar yang menggabungkan FRCA dan RCP dapat menghasilkan kekuatan tekan dalam kisaran 30–55 MPa (Barrios et al., 2021). Pengurangan kekuatan disebabkan oleh zona antarmuka yang lemah dan sisa pasta semen lama yang melekat pada agregat daur ulang (Evangelista et al., 2015), tetapi kinerja dapat dipulihkan atau bahkan ditingkatkan dengan menambahkan SCM seperti silika fume atau abu terbang.

Dari sudut pandang lingkungan, produksi semen Portland tetap menjadi salah satu sumber industri terbesar emisi CO₂ antropogenik, yang melepaskan hampir satu ton CO₂ per ton semen yang diproduksi (Barrios et al., 2021; Chandra Paul et al., 2018). Penggabungan bahan daur ulang dalam mortar menawarkan peluang signifikan untuk mengurangi jejak karbon yang terkandung dalam aktivitas konstruksi. Dengan mengganti sebagian semen dan pasir alam dengan RCP dan FRCA, permintaan untuk bahan input energi tinggi diturunkan, yang menghasilkan pengurangan emisi CO₂ yang cukup besar. Lebih jauh, pengalihan limbah beton dari tempat pembuangan akhir berkontribusi pada pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan mendorong konservasi sumber daya yang tidak terbarukan (Berredjem et al., 2020; Kurda et al., 2018). Keunggulan lingkungan ini telah mendorong meningkatnya dukungan untuk bahan daur ulang dalam sistem sertifikasi keberlanjutan internasional, termasuk LEED dan BREEAM (Nuaklong et al., 2019; Revilla-Cuesta et al., 2022).



ipun manfaatnya jelas, beberapa tantangan teknis membatasi penerapan pengisi daur ulang yang lebih luas dalam mortar. Salah satu masalah kualitas bahan daur ulang yang tidak konsisten karena sumber dan proses yang bervariasi. Selain itu, struktur mikro dan ikatan antarmuka menggabungkan FRCA dan RCP biasanya lebih rendah daripada konvensional, yang dapat membahayakan daya tahan jangka panjang dan

keandalan struktural. Strategi mitigasi standar, seperti perawatan permukaan agregat dan gradasi partikel yang disempurnakan, telah diusulkan, tetapi solusi yang diterima secara universal masih sulit dipahami (Duan et al., 2020; Jiang et al., 2022). Dengan demikian, pengembangan desain campuran yang kuat dan eksplorasi efek sinergis di antara berbagai komponen daur ulang sangat penting untuk memajukan kelayakan rekayasa mortar tersebut.

Kemajuan ilmiah dalam dekade terakhir telah menggarisbawahi potensi penggabungan FRCA dan RCP dalam campuran mortar. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan agregat daur ulang kasar atau halus secara bersamaan dengan bubuk beton yang digiling halus dapat menghasilkan peningkatan kepadatan pengepakan dan ikatan antarmuka, yang sangat penting untuk kekuatan mekanis dan ketahanan permeabilitas (Duan et al., 2020; Ouyang et al., 2020). Penggabungan ganda dari konstituen daur ulang ini tidak hanya mengimbangi keterbatasan penggunaan salah satu material saja tetapi juga mendorong pendekatan yang seimbang untuk mencapai tingkat kinerja yang diinginkan. Namun, penyelidikan empiris terhadap pendekatan sinergis ini masih terbatas, dan penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menentukan proporsi, teknik pemrosesan, dan hasil kinerja yang optimal dalam berbagai kondisi lingkungan (Tang et al., 2023).

Literatur hingga saat ini menunjukkan bahwa penggunaan FRCA atau RCP secara independen dapat memberikan manfaat lingkungan dan fungsional ketika dimasukkan ke dalam mortar. Namun, terdapat kesenjangan penting dalam studi komprehensif yang mengeksplorasi aplikasi gabungan keduanya. Sebagian besar studi sebelumnya berfokus pada penggantian agregat atau penggantian pengisi secara terpisah, dan sangat sedikit yang secara sistematis meneliti efek integrasi keduanya pada sifat mortar segar dan yang sudah mengeras. Selain itu, mekanisme interaksi antara kedua bahan daur ulang ini, seperti perilaku pengemasan partikel, reaktivitas pozzolan, dan pengaruhnya terhadap struktur pori, masih belum dieksplorasi (Letelier et al., 2021; Sauerwein et al., 2019). Kesenjangan pengetahuan ini memberikan peluang untuk mengembangkan formulasi mortar baru yang memaksimalkan kinerja sekaligus meminimalkan dampak lingkungan.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki sifat segar, mekanis, dan lingkungan dari mortar yang menggabungkan agregat beton daur ulang halus (FRCA) dan bubuk beton daur ulang (RCP). Dengan mengevaluasi strategi substitusi ganda ini, penelitian ini berupaya untuk menilai apakah kombinasi tersebut dapat memenuhi atau melampaui kinerja mortar konvensional sambil memberikan manfaat ekologis yang substansial. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan baru untuk mengeksplorasi efek sinergis FRCA dan RCP, yang sebelumnya jarang secara terpisah tetapi tidak secara komprehensif sebagai sistem. Melalui pengujian eksperimental terperinci dan penilaian lingkungan siklus hidup, penelitian ini berupaya untuk memberikan solusi yang secara ilmiah dan layak secara praktis untuk meningkatkan keberlanjutan



mortar, mengurangi ketergantungan pada bahan baru, dan mengatasi beban lingkungan yang ditimbulkan oleh limbah konstruksi dan pembongkaran.

1.1.1 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana pengaruh penggunaan Agregat halus daur ulang dan bubuk beton daur ulang terhadap sifat segar mortar?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan Agregat halus daur ulang dan bubuk beton daur ulang terhadap sifat mekanis mortar?
3. Bagaimana penurunan dampak lingkungan yang dihasilkan dari penggunaan agregat halus daur ulang dan bubuk beton daur ulang dalam pembuatan mortar?

1.1.2 Tujuan Penelitian

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

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

1.1.3 Manfaat Penelitian

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

1. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam mengembangkan alternatif material konstruksi yang ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah konstruksi, seperti agregat halus dan bubuk beton daur ulang, sehingga dapat mengurangi penumpukan limbah dan dampak negatifnya terhadap lingkungan.
2. Penelitian ini dapat menjadi acuan bagi industri konstruksi dalam mengoptimalkan penggunaan material daur ulang, sehingga meningkatkan efisiensi produksi mortar dengan sifat segar dan mekanis yang tetap memenuhi standar. Penelitian ini dapat mendorong kesadaran akan pentingnya pendekatan lanjutan dalam industri konstruksi, terutama dalam meminimalkan jejak karbon melalui penerapan material daur ulang.



1.1.4 Batasan Penelitian

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

1. Penelitian ini hanya menggunakan agregat halus daur ulang yang diperoleh dari penghacuran limbah beton di laboratorium universitas hasanuddin, tidak akan dibahas penggunaan bahan daur ulang lainnya selain agregat halus daur ulang dalam campuran mortar.
2. Fokus penelitian adalah pada mortarnya yaitu campuran antara air, semen, pasir, agregat halus daur ulang dan bubuk beton daur ulang dengan proporsi campuran yang digunakan 0%, 15%, 30%, 45%, 60% dan 0%, 30%+10%, 60%+10%, 30%+20%, 60%+20.
3. Parameter yang diukur:
 - a. Sifat segar mortar, termasuk *Setting time* (waktu pengikatan), *Flow* (kemampuan campuran).
 - b. Sifat mekanis mortar, termasuk kekuatan tekan, kekuatan Belah, *Strength Index*, *Structural Efficiency*.
 - c. Dampak lingkungan, dengan fokus pada pengurangan limbah beton dan emisi karbon yang terkait dengan penggunaan agregat halus daur ulang.
4. Penelitian ini tidak mencakup pengujian penggunaan metode atau teknologi produksi mortar yang sangat baru atau eksperimental.
5. Pengujian dalam penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan volume campuran dengan jumlah sampel terbatas, dan tidak mencakup uji dalam skala besar atau aplikasi langsung pada proyek konstruksi.

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 seperti retak atau penurunan kekuatan pada struktur.



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 (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 (Zhang et al., 2018). Pemahaman ini dapat menginformasikan desain formulasi mortar yang meningkatkan ikatan dan

kemungkinan terbentuknya retakan, sehingga meningkatkan umur struktur pasangan bata.

atnya, mortar mencakup pemahaman multifaset tentang sifat, perilaku mikrostruktur, dan interaksinya dengan material lain. Dengan asikan 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 Aggregate (RCA)

Pelaksanaan agregat daur ulang 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 beton telah muncul sebagai solusi yang layak. Agregat daur ulang beton mencakup sifat, kinerja, dan implikasi penggunaan agregat daur ulang beton dalam formulasi beton baru, yang menyoroti manfaat dan tantangan yang terkait dengan praktik ini.

Salah satu manfaat utama penggunaan agregat daur ulang beton adalah potensinya untuk mengurangi penggunaan agregat alami. Namun banyak penelitian yang menunjukkan perlunya perhatian khusus pada penggunaan agregat daur ulang beton 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 agregat daur ulang beton memberikan dampak positif berupa pengurangan jejak karbon pada produksi beton. Qureshi dkk., bahwa meskipun kekuatan tarik dan lentur beton dapat menurun saat an agregat daur ulang beton, manfaat lingkungan dari daur ulang limbah ebih besar dari pada penurunan karakteristik mekanik (Qureshi et al., ampunan untuk menggunakan kembali bahan limbah tidak hanya



menghemat sumber daya alam tetapi juga berkontribusi pada pengurangan limbah di tempat pembuangan akhir.

1.2.3 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, nya solusi yang lebih ramah lingkungan untuk kebutuhan konstruksi



Recycled Concrete Powder (RCP)

Recycled Concrete Powder berkisar pada pembuatannya, sifat-sifatnya, dan kualitasnya 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 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 (Maja, 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. Tereza 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 (Tereza 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 meningkatkan karakteristik reologi dan kemampuan pengerjaannya. Lin et al. menunjukkan bahwa penggunaan RCP dapat meningkatkan fluiditas mortar self-compacting sehingga lebih mudah dikerjakan selama aplikasi (Lin & Zhang, 2020). Sifat ini penting untuk memastikan bahwa beton dapat ditempatkan dan diselesaikan dengan baik, 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.

1.2.5 Flow

Flow merupakan salah satu parameter utama dalam menilai workability mortar, yaitu kemampuan campuran untuk mengalir dan mengisi cetakan atau rongga tanpa segregasi atau kehilangan homogenitas. Pengujian flow dilakukan untuk mengevaluasi konsistensi dan kemudahan pengerjaan mortar segar, yang secara langsung berpengaruh terhadap kualitas pelaksanaan di lapangan serta hasil akhir struktur. Berdasarkan ASTM C1611, metode pengujian flow menggunakan alat uji flow table, di mana mortar segar dimasukkan ke dalam cetakan berbentuk kerucut terpotong, diangkat, kemudian meja dijatuhkan sebanyak 15 kali untuk mengukur seberapa jauh penyebaran mortar. Dalam penelitian yang melibatkan material daur ulang seperti FRCA dan RCP, parameter flow menjadi sangat penting karena sifat fisik dan kimia material substitusi tersebut berbeda signifikan dibandingkan bahan konvensional. FRCA umumnya memiliki tekstur permukaan yang lebih kasar dan porositas tinggi, sehingga menyerap air lebih banyak dan menurunkan kemampuan alir mortar (Kondelis et al., 2019). Sementara itu, RCP sebagai pengganti sebagian semen mengandung senyawa pozzolanik dengan ukuran partikel sangat halus yang dapat meningkatkan viskositas dan mempengaruhi rheologi campuran (Silva et al., 2014). Oleh karena itu, pengukuran flow tidak hanya menjadi indikator awal terhadap kualitas mortar segar, tetapi juga berfungsi untuk memprediksi interaksi antara material daur ulang dengan air dan bahan pengikat, yang pada akhirnya memengaruhi performa mekanik dan durabilitas mortar.

1.2.7 Kuat Tekan

Kuat tekan merupakan parameter mekanik utama dalam mengevaluasi performa mortar, yang menunjukkan sejauh mana material mampu menahan beban tekan sebelum mengalami kerusakan atau keruntuhan. Nilai kuat tekan sangat penting untuk memastikan bahwa mortar memenuhi standar kekuatan minimum sesuai spesifikasi teknis, sekaligus menjamin ketahanan dan keamanan struktur dalam jangka panjang. Menurut SNI 03-6825-2002, pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan benda uji berbentuk kubus berukuran 50 mm yang dibuat dari homogen semen, pasir, dan air. Proses pencetakan dilakukan secara hati-hati untuk memastikan kepadatan dan keseragaman spesimen, yang kemudian disimpan dalam media perendaman air hingga mencapai umur pengujian tertentu, yaitu 7, 28, dan 90 hari. Pengujian dilakukan dengan mesin uji tekan untuk mengetahui nilai beban maksimum yang dapat ditahan oleh spesimen sebelum



mengalami kegagalan. Dalam konteks penggunaan material daur ulang seperti Recycled Fine Concrete Aggregate (FRCA) dan Recycled Concrete Powder (RCP), pengujian kuat tekan menjadi krusial karena karakteristik bahan substitusi tersebut dapat memengaruhi ikatan antar partikel dan kekompakan mikrostruktur mortar. Sejumlah studi menunjukkan bahwa pemanfaatan FRCA dapat menurunkan kuat tekan akibat porositas yang lebih tinggi, sementara RCP dengan aktivitas pozzolaniknya berpotensi memperbaiki kekuatan jangka panjang jika digunakan dalam proporsi yang tepat (Silva et al., 2014; Poon & Chan, 2006). Oleh karena itu, evaluasi kuat tekan tidak hanya menjadi indikator performa awal, tetapi juga dasar untuk mengkaji kelayakan teknis aplikasi mortar berbahan daur ulang.

1.2.8 Parameter Eco-beneficial

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

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

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

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



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

Penelitian sebelumnya telah memperhatikan kuat tekan beton serta emisi CO₂ secara simultan (Vembu & Ammasi, 2024; Jenrisari et al, 2024). Penelitian tersebut juga mengevaluasi beberapa faktor sekaligus, termasuk kuat tekan dengan mempertimbangkan parameter lingkungan seperti GWP, AP, EP, dan ODP, sebagaimana tercantum dalam Persamaan 3.

$$E - BP_{i-f'c} = \frac{i_{mix}}{f'c} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

$E - BP_{i-f'c}$ = nilai total dampak lingkungan parameter i yang diperoleh dari mix design yang digunakan dibagi kuat tekan

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

$f'c$ = kuat tekan (Mpa)

Inventarisasi parameter lingkungan GWP, ODP, AP, dan EP dilakukan dengan mengkaji literatur sains yang terpercaya. Tabel 1 memperlihatkan nilai-nilai GWP, ODP, AP, dan EP untuk material OPC, pasir, air, dan FRCA, RCP yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari literatur.

Table 1. Data dampak lingkungan dari produksi mortar

Dampak Lingkungan	Material				
	OPC (Ohemeng & Naghizadeh, 2023)	RCP (Kancheva & Zaharieva, 2020)	FRCA (Hossain et al 2016)	PASIR (Hossain et al 2016)	WATER (Ohemeng & Naghizadeh, 2023)
q)	9.51E-01	8.69E-03	1.20E-02	2.30.E-02	1.33E-04
	1.09E-07	2.47E-10	4.43E-10	8.99E-10	5.93E-12
	2.76E-03	1.67E-05	1.30E-04	1.40E-04	3.87E-08
	3.60E-04	2.32E-06	3.00E-07	6.00E-07	9.70E-07



1.2 Tinjauan Pustaka

1.2.1 Studi terdahulu terkait pengaruh RCA terhadap karakteristik mortar

Penelitian yang dilakukan oleh (Z. Zhao et al., 2015) menjelaskan bahwa Agregat beton daur ulang halus (FRCA) juga disebut pasir daur ulang, yang memiliki ukuran partikel lebih kecil dari 5 mm, pada dasarnya terdiri dari mortar dan pasta semen yang mengeras. Oleh karena itu, agregat ini membutuhkan banyak air yang membuatnya sulit didaur ulang menjadi mortar dan beton. Dalam makalah ini, sifat-sifat mortar yang mengandung FRCA telah dipelajari, termasuk sifat segar, sifat mekanis, dan mikrostruktur zona transisi antarmuka (ITZ). Pengaruh keadaan jenuh FRCA (kering atau jenuh) pada sifat-sifat mortar dengan komposisi yang identik telah dipelajari terlebih dahulu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemerosotan mortar yang mengandung FRCA kering selalu lebih besar daripada kemerosotan mortar yang mengandung FRCA jenuh. Memang, dalam kasus FRCA kering, jumlah teoritis air yang diserap ditambahkan pada awal pencampuran yang menyebabkan peningkatan sementara rasio W/C awal yang efisien dan volume pasta, yang menghasilkan kemampuan kerja yang lebih baik sebelum diserap ke dalam FRCA. Sebaliknya, air yang diserap dalam FRCA jenuh tidak tersedia dengan mudah dan dengan demikian tidak dapat berkontribusi untuk meningkatkan rasio W/C awal yang efisien. Selain itu, kekuatan tekan mortar yang mengandung FRCA kering selalu lebih besar daripada mortar yang dibuat dengan FRCA jenuh, yang dikaitkan dengan zona transisi antarmuka yang lebih tipis yang meningkatkan sifat mekanisnya. Pengaruh fraksi pasir daur ulang dan kelas granular pasir daur ulang pada sifat mekanis mortar kemudian dipelajari dengan FRCA jenuh. Kekuatan tekan mortar menurun secara kuasi linier saat persentase penggantian pasir daur ulang meningkat. Selain itu, ditunjukkan bahwa fraksi pasir daur ulang yang lebih halus (0/0,63 mm) memiliki efek yang lebih buruk pada sifat mekanis mortar.

(Singh et al., 2023) mengatakan bahwa Kekurangan sumber daya pasir dan kerikil telah menjadi masalah global. Mengolah limbah konstruksi dan pembongkaran (CDW) menjadi bahan daur ulang dan menggunakannya untuk menyiapkan beton baru kondusif bagi pembangunan berkelanjutan industri konstruksi. Dalam hal agregat kasar daur ulang (RCA), akumulasi teknis dan industrialisasi yang relatif matang telah terbentuk, tetapi teknologi pemanfaatan fraksi halus daur ulang (RF), yang mencakup lebih dari 40%, masih langka. Dalam studi ini, penggunaan RF yang layak, termasuk agregat halus daur ulang (RFA) dan bubuk daur ulang (RP), dalam ulang dipelajari dari perspektif sifat segar (empiris dan reologi). Hasil menunjukkan bahwa pengurangan kemerosotan lebih menonjol pada Seri I daripada RP. Pengurangan tertinggi diamati sekitar 31,71% (30% RP) pada 30 menit; dan 60,98% (50% RFA) dalam Seri II dalam campuran 1/1 RFA, yang disebabkan oleh gesekan yang lebih tinggi dan perilaku guncung yang lebih tinggi karena permukaannya yang kasar dan jumlah



mortar yang lebih tinggi. Campuran dengan RP menunjukkan peningkatan paling signifikan dalam viskositas statis sebesar 271% pada 30% RP dan 149% dengan penggantian RFA 100% pada interval waktu 30 menit. Tegangan luluh statis meningkat lebih besar dengan RP, yang mungkin telah menyebabkan ekspansi slump menurun seiring waktu. Gesekan dari tekstur permukaan kasar RFA dan kandungan SP dan air tambahan campuran meningkatkan tegangan luluh dinamis dan menurunkan viskositas. Studi tersebut menemukan bahwa penggabungan RP dan FA dalam campuran menghasilkan pengurangan emisi karbon yang signifikan dibandingkan dengan campuran kontrol. Secara khusus, RPC2 dan RPC3 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 fraksi 0%, 15%, 30%, 40%, 60%, 75%, dan 100% berdasarkan massa. WCP terhadap sifat mortar segar dan keras diperiksa. Ditemukan bahwa mortar pasangan bata berkurang secara signifikan seiring dengan peningkatan kuantitas WCP, namun campuran mortar yang mengandung 40–75% memenuhi kriteria kekuatan untuk mortar pasangan bata. Selain itu, WCP menghasilkan pengurangan yang sangat besar dalam biaya dan



faktor lingkungan dari mortar. Sebagai kesimpulan, mortar tersebut memberikan persyaratan kekuatan yang ditentukan untuk pekerjaan pasangan batu bata serta keuntungan ekonomi dan lingkungan, sehingga membuatnya berkelanjutan.

Penelitian yang dilakukan oleh (Ohemeng & Naghizadeh, 2023) Studi eksperimental yang melibatkan penggunaan bubuk beton limbah (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 pasangan 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 pasangan batu serta memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan.

1.3 Desain Konseptual

Pendekatan penelitian ini bersifat eksperimental dengan analisis kuantitatif untuk mengevaluasi sifat segar, mekanis, dan dampak lingkungan dari mortar yang menggunakan agregat halus daur ulang dan bubuk beton daur ulang. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan agregat halus daur ulang dan bubuk beton daur ulang terhadap performa mortar, serta mengidentifikasi potensi keberlanjutan material daur ulang dalam mendukung pembangunan yang ramah lingkungan.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah persentase substitusi agregat halus alami dengan agregat halus daur ulang (0%, 15%, 30%, 45%, dan 60%) serta proporsi penambahan bubuk beton daur ulang dalam campuran (10%, 20%). Variabel terikat meliputi sifat segar mortar, seperti workability (diukur melalui uji slump flow), sifat mekanis seperti kekuatan tekan, tarik belah, serta dampak lingkungan seperti emisi karbon dan efisiensi daur ulang material. Variabel kontrol mencakup campuran lainnya (semen, air,), metode curing, dan prosedur pengujian konstan.



dan penelitian diawali dengan persiapan material, meliputi pengumpulan agregat halus alami, agregat halus daur ulang, dan bubuk beton daur ulang, serta

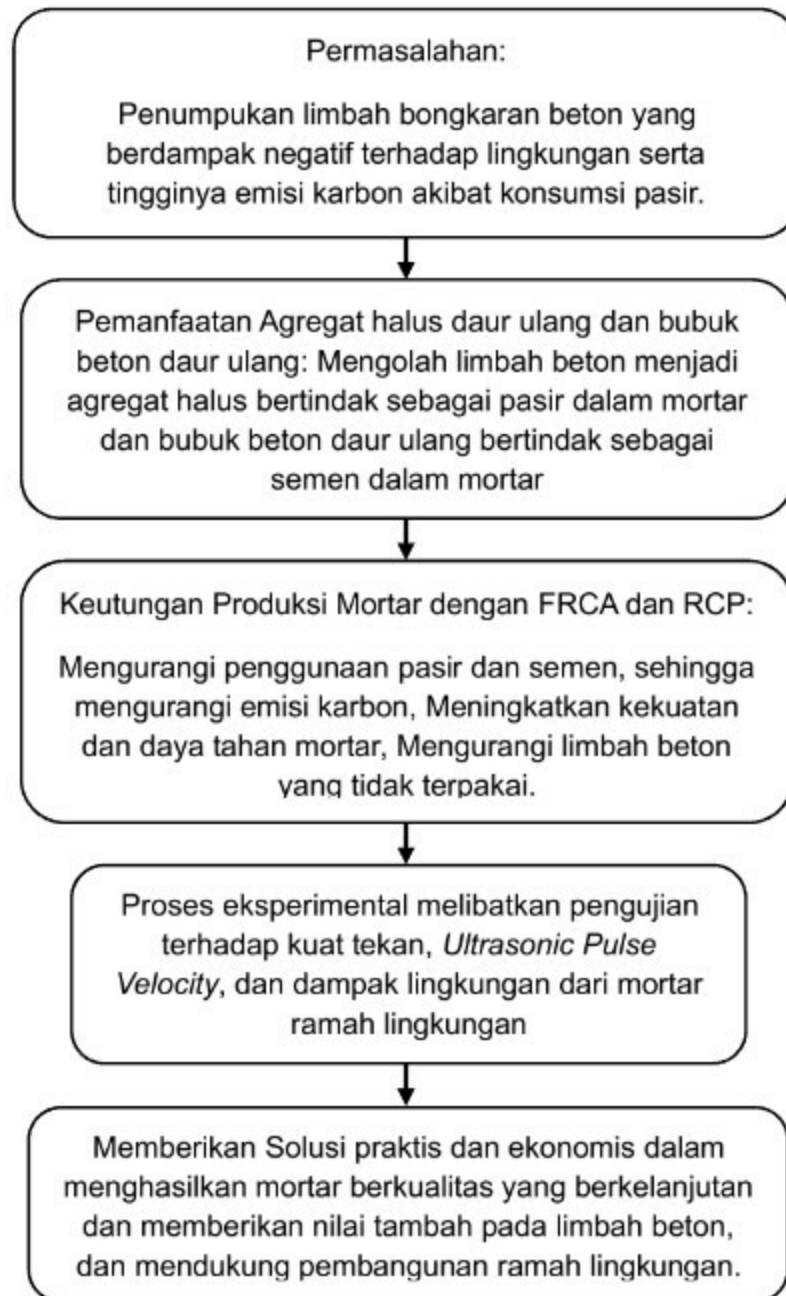
karakteristik material untuk menentukan ukuran partikel, densitas, dan kandungan kimia. Setelah itu, campuran mortar dibuat dengan berbagai variasi proporsi agregat halus daur ulang dan bubuk beton daur ulang, termasuk campuran kontrol sebagai pembanding. Pengujian sifat segar dilakukan dengan mengukur workability menggunakan alat slump flow dan waktu pengendapan awal serta akhir. Selanjutnya, sifat mekanis diuji melalui kekuatan tekan pada umur 7, 28, dan 90 hari, uji tarik belah untuk mengetahui daya tarik material, serta uji modulus elastisitas untuk menentukan kekakuan mortar.

Dampak lingkungan dianalisis menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) untuk menghitung potensi pengurangan emisi karbon akibat penggunaan material daur ulang. Selain itu, efisiensi material daur ulang dievaluasi untuk menentukan sejauh mana penggunaannya dapat menggantikan material alami dalam campuran mortar. Data yang diperoleh dianalisis untuk membandingkan performa sifat segar dan mekanis terhadap campuran kontrol, serta untuk mengevaluasi hubungan antara variasi komposisi dan kinerja mortar.

Kerangka teoretis penelitian ini mencakup pengaruh agregat halus daur ulang yang memiliki kekasaran permukaan lebih tinggi terhadap workability dan kekuatan tekan mortar. Selain itu, kandungan pozzolan dalam bubuk beton daur ulang diperkirakan akan meningkatkan reaksi hidrasi, sehingga memperbaiki mikrostruktur mortar. Dari sudut pandang keberlanjutan, penggunaan material daur ulang dapat mengurangi eksploitasi sumber daya alam dan memanfaatkan limbah konstruksi secara lebih efisien.

Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah ditemukannya kombinasi optimal antara agregat halus daur ulang dan bubuk beton daur ulang yang menghasilkan mortar dengan performa terbaik. Penelitian ini juga diharapkan memberikan data kuantitatif mengenai dampak lingkungan dari penggunaan material daur ulang dan rekomendasi teknis untuk penerapannya dalam pembangunan ramah lingkungan.





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 2024 – Juni 2025.

2.2 Desain Benda Uji

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

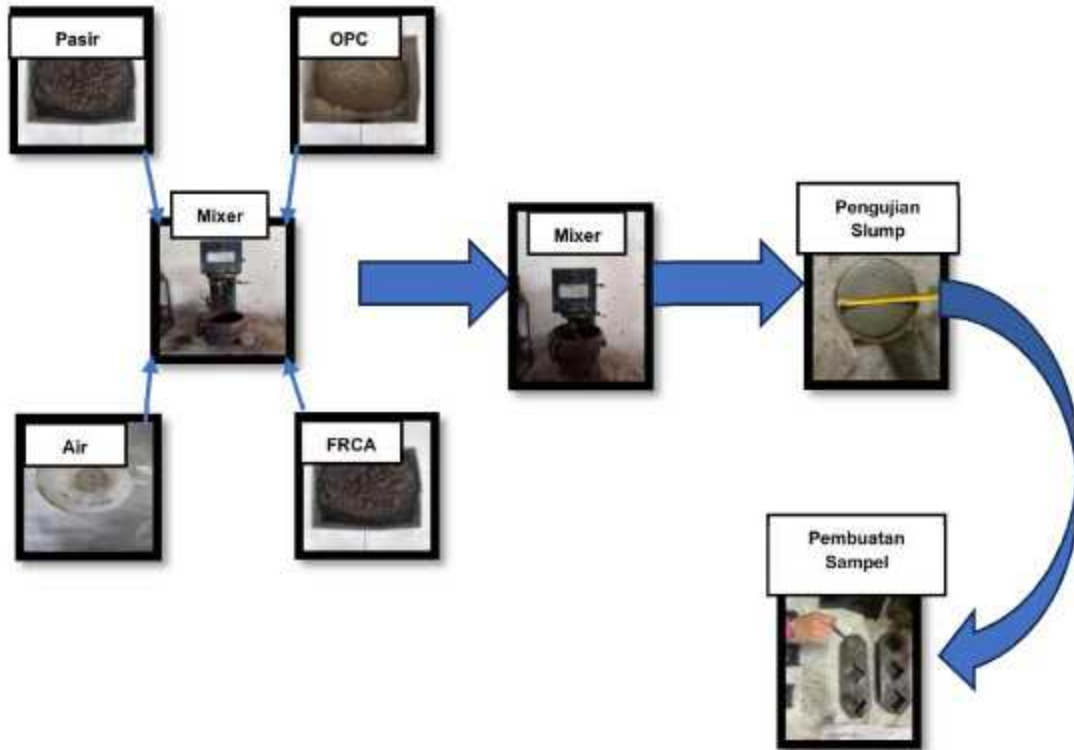
Dilakukan pembuatan benda uji meliputi mortar normal dan mortar sebagai pengganti pasir menggunakan agregat halus daur ulang sebanyak 0%, 15%, 30%, 45%, dan 60% dan bubuk beton daur ulang di kombinasikan dengan agregat halus daur ulang 30%-10%, 60%-10%, 30%-20%, 60%-20%. Masing-masing benda uji terdapat 21 sampel benda uji berbentuk kubus dan 6 sampel benda uji berbentuk silinder. Untuk memudahkan dalam penelitian maka benda uji kubus diberikan kode tertentu.

Berikut adalah Kode benda uji mortar dan pembuatan sampel mortar Group 1 dan Group 2 yang di jelaskan pada Tabel 2 dan pada gambar 2 dan gambar 3.

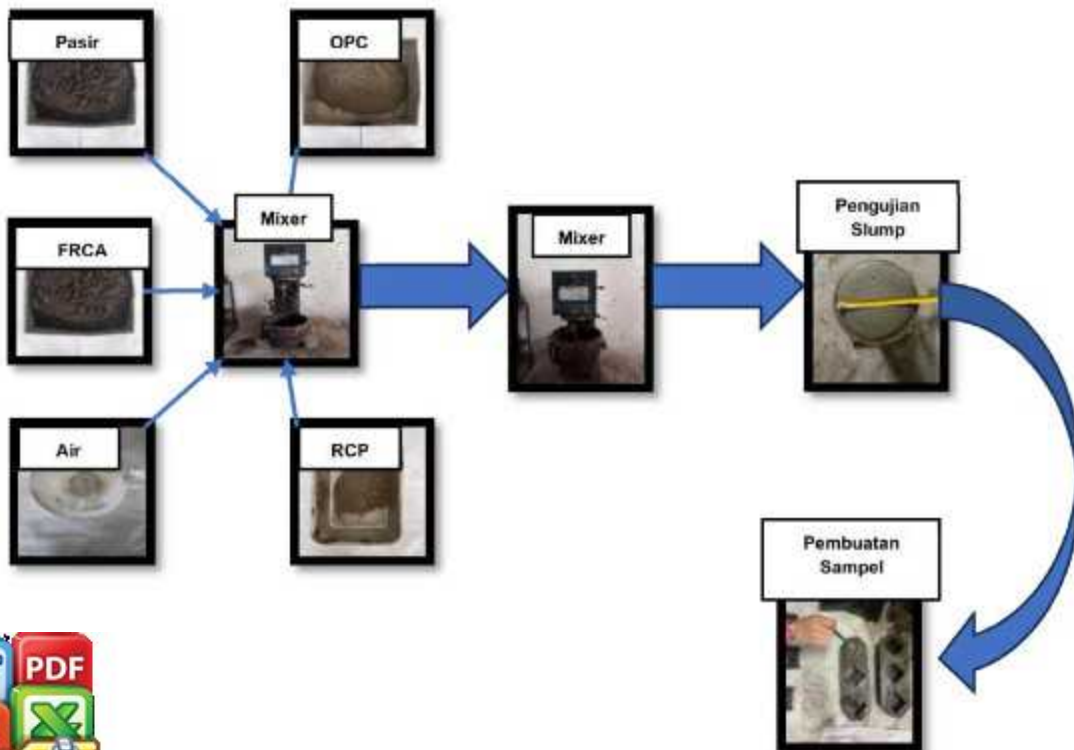
Table 2. Kode Benda Uji Mortar

Nama Sampel Group I	Kode Smpel	Nama Sampel Group II	Kode Smpel
Kontrol-0	1	Kontrol-0	2
FRCA-15	1	FRCA-30+RCP-10	2
FRCA-30	1	FRCA-60+RCP-10	2
FRCA-45	1	FRCA-30+RCP-20	2
FRCA-60	1	FRCA-60+RCP-20	2





Gambar 2. Pembuatan Benda Uji Group 1



Gambar 3. Pembuatan Benda Uji Group 2



2.3 Analisis Rancangan Campuran (Mix Design)

Komposisi campuran mortar dimana, pembuatan benda uji meliputi mortar normal dan mortar sebagai pengganti pasir menggunakan agregat halus daur ulang penambahan sebanyak FRCA 15%, FRCA 30%, FRCA 45%, dan FRCA 60% dan kombinasi agregat halus daur ulang dan bubuk beton daur ulang penambahan sebanyak FRCA 30%- RCP 10%, FRCA 60%- RCP 10%, FRCA 30%- RCP 20%, dan FRCA 60- RCP 20%. Masing-masing variasi benda uji berbentuk kubus dan benda uji berbentuk silinder. Komposisi dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4 sebagai berikut:

Table 3. Mix Design Group 1

Mix ID	Alr (Kg)	OPC (Kg)	Pasir (Kg)	FRCA (Kg)
Kontrol	264.90	547.31	1505.11	0
FRCA-15	288.34	547.31	1279.34	179.76
FRCA-30	311.78	547.31	1053.58	359.52
FRCA-45	335.22	547.31	872.81	539.28
FRCA-60	358.66	547.31	602.04	719.045

Table 4. Mix Design Group 2

Mix ID	Alr (Kg)	OPC (Kg)	Pasir (Kg)	FRCA (Kg)	RCP (Kg)
30%FRCA-10%RCP	311.78	492.58	1053.58	359.52	37.25
60%FRCA-10%RCP	358.66	492.58	602.04	719.04	37.25
30%FRCA-20%RCP	311.78	437.85	1053.58	359.52	74.51
60%FRCA-20%RCP	358.66	437.85	602.04	719.04	74.51

Ukuran partikel dari FRCA yang digunakan dalam penelitian. Ukuran partikel diberikan dalam rentang milimeter (mm), sedangkan presentasinya menunjukkan proporsi masing-masing ukuran dalam total campuran agregat dapat di lihat pada tabel 5 dibawah ini.



Table 5. Gradasi Campuran FRCA

Ukuran Partikel (mm)	Pesentasi (%)
4.75 – 2.36	5
2.36 – 1.18	20
1.18 – 0.6	25
0.6 – 0.3	30
0.3 – 0.15	15
0.15 – 0.075	5

2.4 Pembuatan Benda Uji

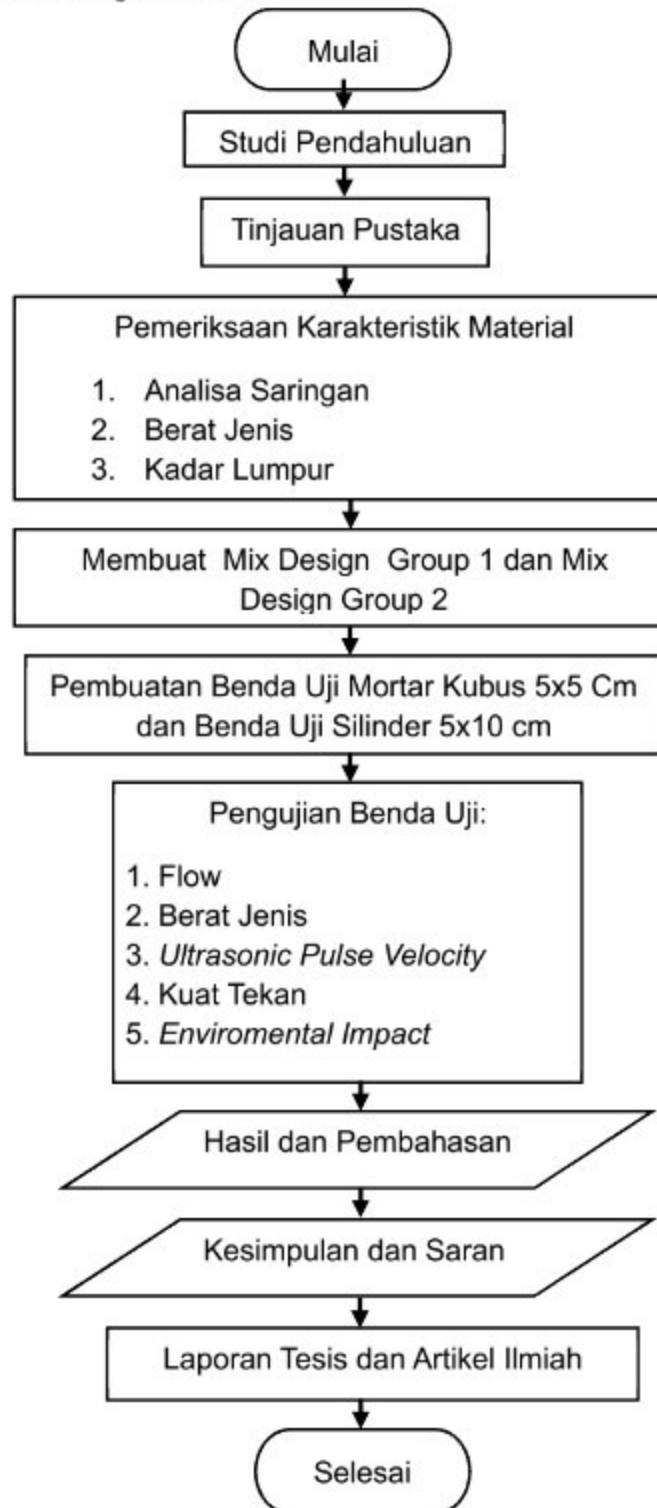
Pembuatan dan pengujian ini dirancang untuk mengetahui pengaruh kinerja mortar dengan agregat halus daur ulang sebagai pengganti semen pada umur 7, 28, dan 90 hari dengan ukuran sampel 5cm x 5cm x 5cm dan 5cm x 10cm. Metode pencampuran yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Menyiapkan material dengan komposisi campuran yang telah ditentukan;
2. Bubuk beton daur ulang, semen dan air dimasukkan ke dalam mixer;
3. Mengaduk material menggunakan mixer selama 30 detik;
4. Masukkan pasir ke dalam mixer;
5. Mengaduk selama 2 menit dengan kecepatan normal;
6. Selanjutnya mengaduk selama 1 menit dengan kecepatan tinggi;
7. Pengujian flow dilakukan sebanyak 15 kali putaran
8. Hasil campuran dimasukkan kedalam cetakan sebanyak $\frac{1}{2}$ 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 selam 10 detik
10. Berikan penanda pada cetakan yang telah terisi lalu diamkan selama ± 24 jam dengan menutup permukaan mortar dengan plastik
11. Setelah ± 24 jam, keluarkan benda uji dari *mould* lalu curing selama 7, 28, dan 90 hari.



2.5 Metode Penelitian

Tahap penelitian ini dapat dilihat secara sistematis dalam bentuk diagram alir pada gambar 4 sebagai berikut.



Gambar 4. Diagram Alir



2.6 Pengujian Benda Uji

2.6.1 Pengecoran dan Perawatan Mortar

Mortar segar disiapkan menggunakan mixer laboratorium dengan menggabungkan FRCA sebagai pengganti parsial pasir alam dan RCP sebagai substitusi parsial semen OPC. Mortar tersebut kemudian dicetak ke dalam cetakan kubus berukuran 50 mm × 50 mm × 50 mm. Proses pengecoran dilakukan dalam dua lapisan, dengan setiap lapisan dipadatkan menggunakan meja getar untuk memastikan kerapatan yang optimal. Setelah pengecoran, cetakan ditutup dengan lembaran plastik dan disimpan pada suhu ruang selama 24 jam. Spesimen kemudian dikeluarkan dari cetakan dan direndam dalam air untuk proses perawatan hingga umur pengujian (7, 28, dan 90 hari). Spesimen berbentuk kubus ini digunakan untuk seluruh pengujian parameter mekanik dan keberlanjutan dalam studi ini.

2.6.2. Pengujian Flow dan Indeks Stabilitas Visual (VSI)

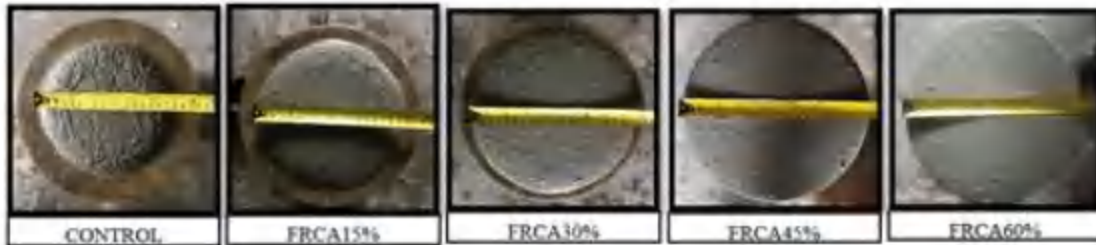
Pengujian flow dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan kerja mortar segar, mengikuti prosedur yang tercantum dalam ASTM C1611. Selain mengukur penyebaran (spread), penampakan visual mortar selama pengujian juga dinilai menggunakan Visual Stability Index (VSI). Indeks ini berfungsi sebagai ukuran kualitatif untuk menentukan stabilitas campuran mortar segar dengan mengidentifikasi tanda-tanda segregasi dan bleeding.

Penilaian VSI didasarkan pada keberadaan dan tingkat dari halo mortar atau tumpukan agregat yang diamati setelah pengujian flow. Klasifikasi berkisar dari 0 (Sangat Stabil), yang menunjukkan tidak ada segregasi visual atau bleeding, hingga 3 (Sangat Tidak Stabil), yang menunjukkan adanya segregasi signifikan dengan halo mortar yang mencolok dan/atau akumulasi agregat besar. Kriteria yang digunakan untuk evaluasi VSI dirangkum dalam Tabel 6.

Table 6 Nilai VSI

Nilai VSI	Kriteria
0 = Sangat Stabil	Tidak terdapat tanda-tanda segregasi atau bleeding secara visual.
1 = Stabil	Tidak terdapat segregasi, dengan sedikit bleeding berupa lapisan tipis di permukaan mortar.
2 = Tidak Stabil	Terdapat halo mortar ringan $\leq 0,5$ inci (≤ 10 mm) dan/atau tumpukan agregat kecil di tengah.
3 = Tidak Stabil	Terdapat segregasi signifikan ditandai dengan halo mortar $\geq 0,5$ inci (≥ 10 mm) dan/atau tumpukan agregat besar di tengah.





Gambar 5 Pengujian Flow Group I



Gambar 6 Pengujian Flow Group II

2.6.2 Pengujian Berat Jenis

Pada umur pengujian yang telah ditentukan (7, 28, dan 90 hari), spesimen mortar dikeluarkan dari media perawatan. Permukaan setiap spesimen dikeringkan menggunakan kain penyerap untuk menghilangkan air bebas tanpa mempengaruhi kandungan air internal. Spesimen kemudian ditimbang menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,01 gram. Volume setiap spesimen dihitung berdasarkan dimensi geometris cetakan (kubus 50 mm), dan nilai berat jenisnya kemudian ditentukan.

2.6.4 Pengujian Kecepatan Pulsa Ultrasonik (UPV)

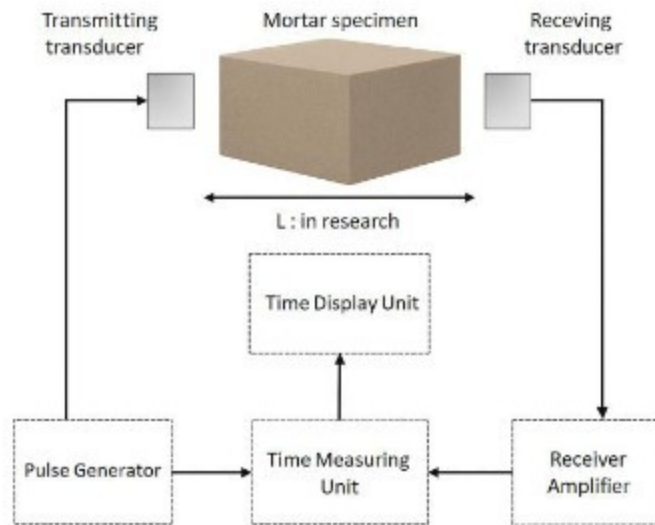
Pengujian UPV dilakukan berdasarkan SNI ASTM C597:2012 tentang Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang Melalui Mortar. Pengujian UPV menggunakan alat Ultrasonic Pulse Velocity Proceq Pundit Lab+. Tujuan dari pengujian ini ialah untuk mengetahui kecepatan rambat gelombang dari mortar. Setiap variasi terdapat 3 sampel yang akan diuji dengan metode direct. Sehingga nilai kecepatan rambat gelombang yang diambil ialah nilai kecepatan rata-rata dari tiap sampel pada setiap variasi.

Berikut Gambar 7 Pengujian UPV mortar dan Prosedur pengujian UPV sebagai berikut:



- Menyiapkan sampel yang akan diuji
- Menyiapkan alat UPV Proceq Pundit Lab+ yang akan digunakan dengan memasang transduser penerima dan penguat (Amplifier)
- Memasang gemuk pada ujung sampel yang akan diletakkan transduser

4. Memulai pembacaan kecepatan rambat gelombang pada alat
5. Mencatat hasil kecepatan rambat gelombang dari alat.



Gambar 7 Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity Mortar

2.6.5 Pengujian Kuat Tekan

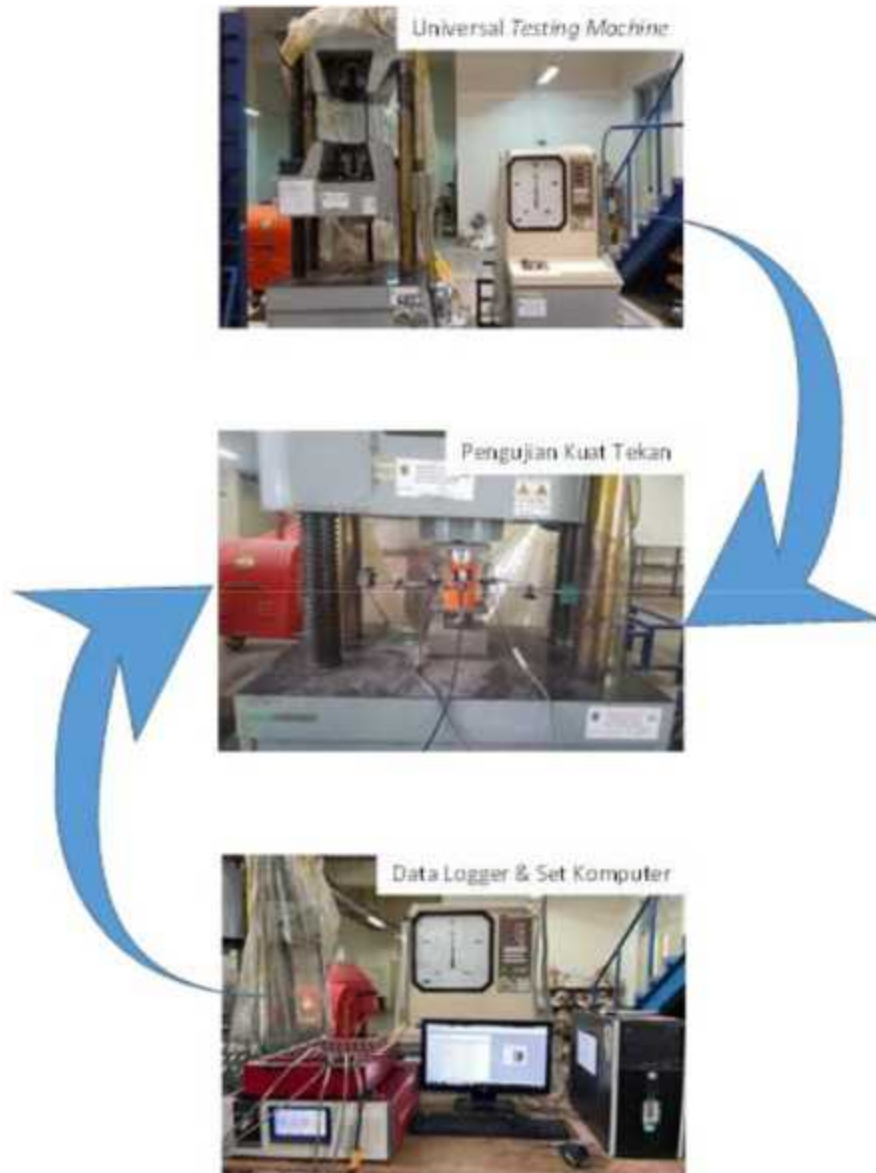
Pengujian kuat tekan dilakukan sesuai dengan SNI 03-6825-2002 menggunakan benda uji berbentuk kubus (50 mm × 50 mm × 50 mm). Setelah mencapai umur pengujian yang ditentukan (7, 28, dan 90 hari), spesimen dikeluarkan dari air perawatan, dikeringkan permukaannya, dan diuji menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kapasitas 2000 kN. Spesimen ditempatkan secara sentral antara pelat tekan dan dikenai beban tekan yang seragam hingga terjadi keruntuhan. Kuat tekan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$f_m = \frac{P_{maks}}{A}$$

Dengan:

- f_m = Kuat tekan mortar (MPa),
- P_{maks} = Gaya maksimum saat spesimen mengalami keruntuhan (N),
- A = Luas penampang spesimen (mm²).





Gambar 8 Pengujian Kuat Tekan Mortar

2.6.6 Penilaian Parameter Lingkungan

Kinerja lingkungan dari campuran mortar yang mengandung FRCA dan RCP dianalisis menggunakan pendekatan yang menghitung total dampak lingkungan (E) berdasarkan faktor normalisasi dan pembobotan untuk setiap kategori dampak lingkungan (kg/m^3). Metode ini memungkinkan evaluasi yang terstandarisasi dan kuantitatif terhadap kontribusi lingkungan dari setiap formulasi mortar.



$$E = \sum_{n=i}^l N_i \cdot W_i$$

2.6.7 Hubungan antara Parameter Lingkungan dan Kuat Tekan

Selain kinerja mekanik, integrasi FRCA dan RCP juga dievaluasi melalui rasio efisiensi antara kekuatan dan dampak lingkungan. Evaluasi ini dilakukan untuk menghubungkan kuat tekan dengan empat parameter lingkungan, yaitu: Potensi Pemanasan Global (GWP), Potensi Penipisan Ozon (ODP), Potensi Pengasaman (AP), dan Potensi Eutrofikasi (EP). Rasio efisiensi lingkungan dirumuskan sebagai berikut:

$$EP_{GWP/f'cn} = \frac{f'cn}{GWP_{mixt}}$$

$$EP_{ODP/f'cn} = \frac{f'cn}{ODP_{mixt}}$$

$$EP_{AP/f'cn} = \frac{f'cn}{AP_{mixt}}$$

$$EP_{EP/f'cn} = \frac{f'cn}{EP_{mixt}}$$

$EP_{GWP/\Gamma_{cn}}$ = Total nilai GWP dari campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgCO₂)

$EP_{ODP/\Gamma_{cn}}$ = Total nilai ODP dari campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgCFC-11)

$EP_{AP/\Gamma_{cn}}$ = Total nilai AP dari campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSO₂)

$EP_{EP/\Gamma_{cn}}$ = Total nilai EP dari campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgPO₄)

f'_c = Kuat tekan (N/mm²)

n = 28 Hari

