



## 1.1 Latar Belakang

# BAB I PENDAHULUAN

Peningkatan volume limbah konstruksi, khususnya limbah beton, telah menjadi tantangan besar bagi sektor infrastruktur modern yang berorientasi pada keberlanjutan. Beton merupakan material konstruksi paling banyak digunakan di dunia, dan proses produksinya berkontribusi besar terhadap konsumsi sumber daya alam serta emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) akibat penggunaan semen Portland (Wang et al., 2022). Penggunaan pasir alam sebagai agregat halus dalam jumlah besar juga menyebabkan degradasi lingkungan, termasuk penurunan ekosistem sungai dan pesisir (Shi et al., 2021). Oleh karena itu, upaya penggantian bahan baku konvensional dengan material daur ulang yang ramah lingkungan menjadi agenda strategis dalam pengembangan teknologi mortar dan beton berkelanjutan.

Salah satu pendekatan yang semakin mendapat perhatian adalah pemanfaatan *Fine Recycled Concrete Aggregate* (FRCA) sebagai pengganti pasir alam, serta *Recycled Concrete Powder* (RCP) sebagai substitusi parsial semen. FRCA merupakan hasil penghancuran limbah beton yang telah diayak hingga berukuran halus dan dapat digunakan kembali sebagai agregat halus alternatif (Silva et al., 2019). RCP, di sisi lain, RCP adalah bubuk halus hasil penggilingan partikel beton daur ulang yang mengandung residu pasta semen terhidrasi dan mineral reaktif seperti kalsium silikat dan aluminat (Ma et al., 2020). Penggunaan kedua material ini secara simultan berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya primer sekaligus menekan emisi karbon dari proses produksi semen baru.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan FRCA dapat meningkatkan aspek keberlanjutan dengan mengurangi eksploitasi pasir alam, namun di sisi lain, material ini cenderung meningkatkan porositas dan menurunkan kekuatan mekanis akibat adanya mortar terlekat pada permukaan agregat (Pedro et al., 2018). Sementara itu, RCP yang sangat halus dapat berperan sebagai pengisi mikro (micro-filler) yang memperbaiki kepadatan struktur mortar dan memperkuat zona transisi antar muka (Interfacial Transition Zone, ITZ) (Kou & Poon, 2016). Kombinasi kedua material tersebut memungkinkan terjadinya efek sinergis yang saling melengkapi: FRCA berfungsi sebagai agregat struktural daur ulang,



RCP memperkuat matriks melalui efek pengisian dan aktivitas pozzolanik kulthai, 2021). Dengan demikian, strategi penggunaan ganda FRCA dan jap lebih menjanjikan dibanding penggunaan tunggal, baik dari sisi performa teknis maupun dampak lingkungan.

Namun demikian, tantangan utama dari pendekatan ini terletak pada keterbatasan reaktivitas RCP dan sifat berpori dari FRCA. Beberapa studi melaporkan bahwa peningkatan kadar FRCA dapat meningkatkan kebutuhan air dan menurunkan densitas mortar, sedangkan substitusi semen berlebihan oleh RCP menyebabkan efek pengenceran binder dan penurunan pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C–S–H), yang merupakan komponen utama pengikat dalam pasta semen (Gao et al., 2022). Oleh karena itu, pengendalian proporsi kedua material tersebut menjadi faktor krusial dalam menjaga keseimbangan antara keberlanjutan material dan performa mekanis mortar.

Dari perspektif mikrostruktur, penggunaan FRCA menyebabkan terbentuknya zona transisi antarmuka yang lebih lemah akibat peningkatan rongga udara dan ketidakteraturan bentuk butiran. Sementara itu, RCP dalam jumlah moderat dapat menurunkan porositas melalui efek pengisian mikro dan pembentukan fase hidrat sekunder yang mengisi pori-pori halus (Li et al., 2021). Akan tetapi, ketika dosis RCP terlalu tinggi, partikel halus justru memperbesar luas permukaan reaktif dan meningkatkan kebutuhan air, sehingga memperburuk konektivitas pori dan meningkatkan penyerapan air (Wang et al., 2020). Interaksi antara dua material ini bersifat non-linear; kombinasi tertentu dapat menghasilkan peningkatan kekuatan dan ketahanan terhadap penetrasi air, sementara kombinasi lain justru menurunkan performa struktural dan durabilitas.

Dalam konteks keberlanjutan, kombinasi FRCA dan RCP menawarkan dua manfaat utama: pertama, mengurangi timbunan limbah beton di lokasi pembuangan akhir; kedua, menurunkan konsumsi semen dan pasir alam yang berimplikasi langsung terhadap jejak karbon konstruksi (Zhao et al., 2020). Pendekatan ini sejalan dengan konsep ekonomi sirkular yang menekankan daur ulang material konstruksi untuk menutup siklus hidup produk (Guo et al., 2018). Selain itu, penggantian sebagian semen oleh RCP juga dapat mengurangi konsumsi energi termal yang tinggi pada produksi klinker, yang menjadi sumber utama emisi karbon dalam industri semen (Scrivener et al., 2018).



lain, beberapa penelitian menekankan bahwa performa mortar berbasis daur ulang tidak hanya ditentukan oleh komposisi, tetapi juga oleh sifat fisik dan kimia bahan bakunya. Misalnya, ukuran partikel RCP, kandungan kalsium aktif, serta kadar mortar terlekat pada FRCA memiliki pengaruh langsung terhadap kekuatan tekan dan permeabilitas (Shi et al., 2021). Aktivasi kimia melalui penggunaan bahan tambahan seperti  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  atau  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  telah dilaporkan dapat meningkatkan reaktivitas RCP dan mempercepat pembentukan C–S–H sekunder (Tan & Li, 2019). Pendekatan ini memperlihatkan potensi besar untuk meningkatkan efisiensi material daur ulang tanpa mengorbankan performa mekanis.

Dari sisi durabilitas, kombinasi FRCA dan RCP juga berpengaruh terhadap karakteristik penyerapan air, porositas, dan ketahanan abrasi. Mortar dengan proporsi FRCA tinggi cenderung memiliki nilai water absorption lebih besar karena peningkatan pori terbuka dan penyerapan internal agregat (Pedro et al., 2018). Namun, pada kadar RCP moderat, peningkatan densitas mikrostruktur mampu menekan tingkat penyerapan tersebut (Xuan et al., 2020). Sebaliknya, jika kadar RCP berlebihan, konektivitas pori membesar dan durabilitas terhadap siklus basah-kering serta keausan mekanis (Cantabro loss) menurun (Gao et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa optimalisasi rasio FRCA dan RCP menjadi kunci keberhasilan penerapan mortar daur ulang di lapangan.

Selain aspek teknis, penerapan FRCA dan RCP secara simultan juga mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan (Sustainable Development Goals, SDGs), terutama pada target 11 (Kota dan Komunitas Berkelanjutan) dan target 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab). Dengan mengubah limbah beton menjadi bahan baku baru, pendekatan ini dapat menekan biaya produksi, mengurangi ketergantungan pada bahan alami, serta memperpanjang umur siklus konstruksi (Tam et al., 2020). Lebih lanjut, pendekatan ini dapat diterapkan secara luas pada proyek infrastruktur perkotaan di mana volume limbah konstruksi relatif tinggi dan akses terhadap material alam mulai terbatas.

Dalam konteks penelitian lanjutan, kajian terhadap pengaruh ganda FRCA dan RCP pada sifat mekanis, porositas, penyerapan air, serta ketahanan terhadap degradasi menjadi sangat penting. Studi-studi terdahulu umumnya meneliti penggunaan FRCA atau RCP secara terpisah, sedangkan kajian simultan terhadap keduanya masih terbatas (Silva et al., 2019; Ma et al., 2020). Oleh karena itu, analisis



mengenai interaksi sinergis antara agregat dan binder daur ulang dapat pemahaman baru mengenai perilaku material komposit berbasis limbah. Pemahaman ini tidak hanya bermanfaat bagi peningkatan kinerja mortar daur ulang, tetapi juga bagi pengembangan pedoman desain material hijau yang lebih komprehensif di masa depan.

Secara keseluruhan, kombinasi FRCA dan RCP dalam pembuatan mortar merepresentasikan paradigma baru dalam rekayasa material berkelanjutan. Pendekatan ini mampu menekan konsumsi sumber daya alam, mengurangi emisi karbon, dan mendukung konsep ekonomi sirkular. Namun, untuk mencapai kinerja optimal, dibutuhkan pemahaman yang mendalam tentang keseimbangan proporsional antara kedua material tersebut, termasuk karakteristik mikrostrukturnya, efek hidrasi lanjutan, serta pengaruhnya terhadap durabilitas jangka panjang. Dengan demikian, penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan pengetahuan tersebut dan memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan mortar ramah lingkungan dengan performa struktural yang kompetitif.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh penggunaan kombinasi *Fined Recycled Concrete Aggregate* (FRCA) sebagai pengganti pasir alam dan *Recycled Concrete Powder* (RCP) sebagai substitusi sebagian semen terhadap sifat mekanik mortar, khususnya kekuatan tekan dan kuat lentur?
2. Sejauh mana kombinasi FRCA dan RCP memengaruhi karakteristik fisik mortar, seperti densitas, porositas, dan daya serap air, dibandingkan dengan mortar konvensional berbasis material alami?
3. Bagaimana Potensi Pemanfaatan FRCA dan RCP secara bersamaan dapat berkontribusi terhadap peningkatan keberlanjutan dan penurunan dampak lingkungan dalam industri konstruksi, khususnya pada aspek pengurangan limbah dan emisi karbon



## n Penelitian

1. rumusan masalah diatas maka tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh kombinasi FRCA dan RCP terhadap kuat tekan mortar pada umur 28 dan 90 hari untuk memperoleh komposisi optimal.
2. Menganalisis pengaruh variasi FRCA dan RCP terhadap perkembangan porositas mortar pada umur 28 dan 90 hari.
3. Menganalisis pengaruh variasi FRCA dan RCP terhadap nilai water absorption mortar pada umur 28 dan 90 hari.
4. Menganalisis pengaruh variasi FRCA dan RCP terhadap nilai Cantabro Loss mortar pada umur 28 dan 90 hari.
5. Menganalisis pengaruh variasi FRCA dan RCP terhadap nilai sorptivitas mortar pada umur 28 dan 90 hari.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material bangunan berkelanjutan dengan memanfaatkan limbah konstruksi sebagai bahan alternatif. Secara praktis, hasil penelitian dapat menjadi referensi teknis bagi industri dalam merancang komposisi mortar yang efisien dan ramah lingkungan. Secara akademis, penelitian ini memperkaya pengetahuan ilmiah mengenai sinergi antara FRCA dan RCP dalam meningkatkan kinerja mortar sekaligus menurunkan jejak karbon pada sektor konstruksi.



## SAN PENELITIAN

elitian difokuskan pada penggunaan FRCA sebagai pengganti sebagian seluruh agregat halus (pasir alam) dan RCP sebagai substitusi sebagian semen dalam pembuatan mortar, tanpa membahas penerapannya pada beton struktural.

2. Analisis dibatasi pada parameter sifat fisik (densitas, porositas, dan penyerapan air) dan sifat mekanik (kekuatan tekan dan lentur) mortar pada umur tertentu (misalnya 7, 14, dan 28 hari).
3. Penelitian tidak mencakup evaluasi mendalam terkait durabilitas jangka panjang, analisis kimia mendetail, maupun pengaruh lingkungan eksternal seperti serangan sulfat atau karbonasi.

### 1.6 Teori

#### 1.6.1 Mortar

Mortar merupakan material bangunan yang berfungsi sebagai perekat antara unit pasangan seperti batu bata, batako, atau blok beton, yang berperan penting dalam menyalurkan beban, menjaga kestabilan struktur, dan memberikan perlindungan terhadap pengaruh lingkungan. Komponen utamanya terdiri atas semen, agregat halus (biasanya pasir), dan air. Proses hidrasi semen menghasilkan senyawa pengikat yang mengisi rongga di antara butiran agregat sehingga terbentuk massa padat yang kuat. Kualitas mortar sangat dipengaruhi oleh proporsi campuran, jenis semen, gradasi pasir, serta rasio air-semen (Neville & Brooks, 2010).

Dalam standar ASTM C270-19a, mortar untuk pasangan unit batu (unit masonry) diklasifikasikan menjadi empat tipe utama, yaitu Type M, Type S, Type N, dan Type O, yang dibedakan berdasarkan kekuatan tekan dan penggunaannya. Tiga tipe yang paling umum digunakan dalam pekerjaan struktural dan non-struktural adalah M, S, dan O.

- Mortar Tipe M memiliki kuat tekan minimum 17,2 MPa (2500 psi). Jenis ini digunakan pada pekerjaan yang memerlukan kekuatan tinggi dan ketahanan terhadap tekanan lateral besar, seperti pondasi, dinding penahan tanah, dan struktur di bawah permukaan tanah. Mortar tipe M bersifat keras dan kaku, memberikan ketahanan terhadap beban berat namun memiliki keuletan rendah. Oleh karena itu, penggunaannya lebih disarankan pada struktur dengan dukungan lateral yang kuat.



tar Tipe S memiliki kuat tekan minimum 12,4 MPa (1800 psi). Mortar ini nakan pada pekerjaan struktural dengan beban sedang seperti dinding bangunan bertingkat rendah, lantai dasar, atau pekerjaan pasangan yang membutuhkan kombinasi antara kekuatan dan fleksibilitas. Mortar tipe S dikenal lebih tangguh terhadap gaya geser dibanding tipe M, sehingga sering digunakan pada dinding dengan ekspos terhadap tekanan angin atau getaran.

- Mortar Tipe O memiliki kuat tekan minimum 5,2 MPa (750 psi) dan digunakan untuk pekerjaan non-struktural seperti pasangan dinding interior, plesteran, atau restorasi bangunan lama. Mortar tipe O lebih lunak dan lentur dibanding tipe lainnya, sehingga mampu menyesuaikan deformasi kecil tanpa menyebabkan retak pada unit pasangan.

Perbedaan kekuatan ini terutama disebabkan oleh perbandingan bahan penyusunnya. Menurut ASTM C270, rasio volume campuran untuk tipe M, S, dan O secara umum adalah:

- Type M: 1 bagian semen : 1/4–1/2 bagian kapur : 2 1/4–3 bagian pasir.
- Type S: 1 bagian semen : 1/2 bagian kapur : 2 1/4–3 bagian pasir.
- Type O: 1 bagian semen : 2 bagian kapur : 9 bagian pasir.

Kandungan kapur yang lebih tinggi pada mortar tipe O meningkatkan keplastisan dan daya lekat, tetapi menurunkan kekuatan tekan. Sebaliknya, kandungan semen tinggi pada tipe M menghasilkan kekuatan besar tetapi menurunkan kemampuan deformasi. Pemilihan tipe mortar harus mempertimbangkan beban kerja, kondisi lingkungan, serta kompatibilitas dengan material pasangan.

Selain itu, karakteristik fisik seperti *workability*, daya rekat, dan ketahanan terhadap cuaca juga penting dalam menentukan performa mortar di lapangan. Mortar tipe S dianggap paling seimbang antara kekuatan dan keuletan, menjadikannya pilihan umum pada aplikasi struktural menengah. Dalam praktiknya, desain mortar sering disesuaikan dengan kebutuhan spesifik proyek melalui pendekatan empiris dan pengujian laboratorium untuk memastikan bahwa nilai kuat tekan aktual memenuhi atau melampaui persyaratan ASTM (ASTM C270, 2019).



Gambar 1 Pekerjaan Batu Menggunakan Mortar

### 1.6.2 Semen OPC dan *Blended Cement*

Semen merupakan material pengikat hidrolis yang memiliki peranan utama dalam konstruksi, khususnya dalam pembuatan beton dan mortar. Dua kategori semen yang paling umum digunakan adalah *Ordinary Portland Cement* (OPC) dan *Blended Cement*. Keduanya memiliki fungsi dasar yang sama sebagai pengikat, namun berbeda dalam komposisi, sifat fisikokimia, serta dampak lingkungan.

*Ordinary Portland Cement* (OPC) adalah jenis semen konvensional yang diproduksi dari klinker semen Portland—campuran utama kalsium silikat (alite, belite), kalsium aluminat, dan kalsium aluminoferrite—dengan tambahan gypsum untuk mengontrol waktu pengerasan. Proses pembuatannya melibatkan pembakaran bahan baku seperti batu kapur dan tanah liat pada suhu sekitar 1450°C. Berdasarkan ASTM C150, OPC diklasifikasikan ke dalam lima tipe, yaitu Type I (umum), Type II (tahan sedang terhadap sulfat), Type III (cepat mengeras), Type IV (panas hidrasi rendah), dan Type V (tahan tinggi terhadap sulfat). Semen OPC dikenal memiliki kekuatan awal yang tinggi dan waktu pengerasan yang relatif cepat, menjadikannya pilihan utama untuk konstruksi struktural.

Namun, proses produksi OPC memiliki jejak karbon yang signifikan akibat emisi CO<sub>2</sub> dari dekomposisi kalsium karbonat dan penggunaan energi tinggi selama pembakaran klinker. Oleh karena itu, dikembangkan *Blended Cement* sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan. *Blended Cement* mengandung campuran klinker Portland dengan bahan tambahan mineral seperti fly ash, slag, silica fume, atau pozzolan alami. Menurut ASTM C595, *blended cement* diklasifikasikan sebagai *Portland Pozzolan Cement* (Type IP atau P) dan *Portland Slag Cement* (Type IS), tergantung pada jenis bahan tambahannya.



*ed cement* memperlihatkan beberapa keunggulan teknis dan lingkungan n OPC. Adanya material pozolan meningkatkan ketahanan terhadap imia, menurunkan panas hidrasi, serta memperbaiki kepadatan mikrostruktur karena reaksi pozzolanik menghasilkan kalsium silikat hidrat (C–S–H) tambahan yang mengurangi porositas. Selain itu, penggunaan material sisa industri seperti fly ash atau slag secara langsung menurunkan konsumsi klinker dan emisi karbon. Namun demikian, blended cement cenderung memiliki kekuatan awal yang lebih rendah dibanding OPC, meskipun pada umur lanjut kekuatannya dapat melebihi OPC.

Dalam konteks keberlanjutan, blended cement memainkan peran penting dalam upaya dekarbonisasi sektor konstruksi. Penggunaannya dapat menghemat energi dan sumber daya alam, sekaligus meningkatkan durabilitas struktur. Oleh karena itu, pemilihan antara OPC dan blended cement perlu disesuaikan dengan tujuan proyek, kondisi lingkungan, serta tuntutan kekuatan dan ketahanan jangka panjang.

**Tabel 1 Ordinary Portland Cement (OPC) dan Blended Cement**

Aspek	Ordinary Portland Cement (OPC)	Blended Cement
Standar	ASTM C150	ASTM C595
Komposisi Utama	95–97% klinker + gypsum	65–95% klinker + bahan tambahan (fly ash, slag, pozzolan)
Waktu Pengerasan	Cepat	Lebih lambat
Kekuatan Awal	Tinggi	Lebih rendah
Kekuatan Jangka Panjang	Stabil hingga 28 hari	Dapat meningkat setelah 28 hari
Ketahanan Kimia	Moderat	Lebih baik terhadap sulfat dan klorida
Panas Hidrasi	Lebih tinggi	Lebih rendah
Dampak Lingkungan	Emisi CO <sub>2</sub> tinggi	Lebih ramah lingkungan



si Umum	Struktur beton konvensional	Beton massa, struktur bawah tanah, konstruksi berkelanjutan
---------	-----------------------------	---

**1.6.3 Pasir Alam sebagai Agregat Halus**

Pasir alam merupakan salah satu bahan utama dalam campuran mortar yang berfungsi sebagai agregat halus untuk mengisi ruang di antara butiran semen dan meningkatkan kinerja mekanik serta durabilitas mortar. Fungsi utama pasir alam tidak hanya sebatas sebagai pengisi volume, tetapi juga sebagai elemen yang mempengaruhi workability, kekuatan, penyusutan, dan stabilitas dimensi mortar secara signifikan. Pemilihan karakteristik pasir yang sesuai dengan standar seperti ASTM C144 menjadi krusial agar campuran mortar mencapai keseimbangan antara kekuatan dan kemudahan pengerjaan.

Secara umum, fungsi pasir alam dalam mortar dapat dikategorikan menjadi empat aspek utama, yaitu fungsi fisik, mekanik, kimia, dan ekonomi. Dari segi fungsi fisik, pasir alam berperan dalam mengurangi retakan akibat penyusutan plastis dan termal karena menurunkan jumlah air yang dibutuhkan dalam pencampuran. Gradasi dan bentuk butir pasir sangat menentukan sifat reologi mortar—pasir dengan gradasi baik dan bentuk butir membulat meningkatkan kemudahan pengerjaan (workability) tanpa meningkatkan kebutuhan air. Pasir dengan tekstur halus juga membantu meningkatkan daya rekat antara pasta semen dan agregat, menghasilkan permukaan akhir yang padat dan halus (Neville & Brooks, 2010).

Dari sisi fungsi mekanik, pasir alam berperan dalam menahan gaya tekan dan geser yang bekerja pada mortar. Agregat halus menjadi rangka utama yang mentransfer beban dari pasta semen ke seluruh massa mortar. Kandungan butiran berukuran seragam akan menurunkan kekuatan akibat terbentuknya rongga udara, sementara distribusi ukuran yang baik (*well-graded*) akan menghasilkan kepadatan tinggi dan kekuatan tekan yang lebih optimal. Selain itu, pasir alam yang keras dan tidak mudah pecah berkontribusi pada peningkatan ketahanan terhadap abrasi dan gaya eksternal (Mehta & Monteiro, 2014).

Dari aspek fungsi kimia, meskipun pasir alam bersifat inert secara kimia, keberadaannya mempengaruhi proses hidrasi semen secara tidak langsung. Dengan mengurangi volume pasta semen yang reaktif, pasir membantu mengontrol panas hidrasi sehingga mengurangi risiko retak termal. Selain itu, pasir yang memiliki kadar



dapat meningkatkan stabilitas kimia dan ketahanan terhadap serangan asam seperti sulfat dan klorida, terutama dalam lingkungan agresif (13).

Dari aspek ekonomi dan keberlanjutan, penggunaan pasir alam memungkinkan pengurangan konsumsi semen, sehingga menurunkan biaya produksi dan emisi karbon terkait produksi klinker. Namun, karena eksploitasi pasir alam dalam jumlah besar dapat berdampak negatif terhadap lingkungan, upaya penggantian sebagian dengan agregat daur ulang seperti recycled concrete powder (RCP) atau fine recycled concrete aggregate (FRCA) kini menjadi tren dalam pendekatan mortar ramah lingkungan.

Dengan demikian, pasir alam memiliki peran esensial dalam menentukan kualitas mortar secara keseluruhan. Keseimbangan antara karakteristik fisik (ukuran dan bentuk butiran), kebersihan (kandungan lumpur rendah), serta kompatibilitas dengan semen merupakan faktor utama dalam menghasilkan mortar yang kuat, tahan lama, dan mudah dikerjakan. Penggunaan pasir alam yang memenuhi spesifikasi teknis akan menghasilkan mortar dengan kinerja mekanik dan durabilitas tinggi, sekaligus memberikan efisiensi dalam penggunaan material pengikat.

#### **1.6.4 Reaksi Pozzolan dan Filler Effect dari RCP**

*Recycled Concrete Powder* (RCP) adalah hasil penggilingan halus dari limbah beton yang masih mengandung sisa hidrasi semen, agregat halus, serta komponen silika dan alumina yang bersifat reaktif. Dalam campuran semen, RCP bekerja melalui dua mekanisme utama: reaksi pozzolanik dan filler effect. Reaksi pozzolanik terjadi ketika silika amorf dalam RCP bereaksi dengan kalsium hidroksida dari hidrasi semen dan menghasilkan gel C-S-H tambahan yang memperkuat dan memadatkan mikrostruktur. Reaksi ini berlangsung lebih lambat dibanding hidrasi awal, tetapi memberikan peningkatan kekuatan pada umur lanjut. Selain itu, partikel halus RCP menyediakan titik-titik nukleasi yang mempercepat pembentukan produk hidrasi baru.

Di sisi lain, filler effect bersifat fisik, yaitu ketika partikel mikro RCP mengisi rongga di antara butiran semen sehingga meningkatkan kerapatan, menurunkan pori kapiler, dan memperbaiki ketahanan terhadap penetrasi zat agresif. Kombinasi kedua mekanisme ini membuat RCP berpotensi meningkatkan kekuatan sekaligus



Keefektifannya sangat dipengaruhi oleh tingkat kehalusan dan proporsi semen, karena kadar terlalu tinggi dapat menurunkan kekuatan awal.

Hasil XRD menunjukkan bahwa penggunaan RCP dapat menurunkan intensitas puncak portlandite, yang menandakan terjadinya konsumsi  $\text{Ca(OH)}_2$  melalui reaksi pozzolanik. Sementara itu, SEM memperlihatkan mikrostruktur yang lebih padat dan homogen akibat pengisian pori oleh partikel RCP serta pembentukan gel C-S-H yang menutupi permukaannya. Melalui kombinasi kedua metode ini dapat dipahami bahwa RCP tidak hanya berperan sebagai pengisi, tetapi juga sebagai material reaktif yang meningkatkan kepadatan mikrostruktur dan kinerja campuran secara keseluruhan, sekaligus mendukung pemanfaatan limbah beton dalam sistem konstruksi berkelanjutan.

### 1.6.5 Karakteristik RCA sebagai pengganti Pasir Alam

*Recycled Concrete Aggregate (RCA)* adalah agregat halus hasil daur ulang beton lama yang diperoleh melalui proses penghancuran dan penyaringan. Dibanding pasir alam, RCA umumnya memiliki permukaan lebih kasar, bentuk partikel kurang seragam, serta porositas lebih tinggi akibat adanya pasta semen lama yang masih menempel. Namun, karakter ini dapat diperbaiki melalui perlakuan seperti mechanical abrasi, perlakuan asam, atau proses termal-mekanis yang mampu menghilangkan sebagian mortar lama dan membuat RCA lebih padat serta stabil.

RCA dapat diolah sehingga memenuhi gradasi standar agregat halus. Ketika ukuran partikel sudah seragam, RCA dapat meningkatkan kerapatan susunan partikel dan memperbaiki workability mortar. Setelah melalui pengeringan dan pembersihan, RCA bahkan dapat mencapai berat jenis dan penyerapan air yang mendekati pasir alam, tergantung tingkat kebersihan dan pengurangan pori internalnya. Secara mekanik, RCA yang dimodifikasi memiliki ketahanan abrasi dan kekuatan butiran yang lebih baik, sehingga membentuk ITZ yang lebih padat dan meningkatkan kekuatan mortar. Kandungan kimianya—terutama silika dan kalsium karbonat—juga serupa dengan mineral pasir alami, sehingga tidak mengganggu reaksi hidrasi.

Secara keseluruhan, RCA dapat berfungsi sebagai pengganti pasir alam apabila melalui tahap pengolahan yang cukup. Perbaikan tekstur, penyerapan air,



memungkinkan RCA digunakan dalam mortar berkelanjutan tanpa inerja yang signifikan, sekaligus mendukung pengurangan limbah beton dan konsep beton sirkular.

### 1.6.6 Penyerapan Air pada Mortar (*Water Absorption*)

Pengujian absorpsi pada mortar merupakan metode penting untuk menilai kemampuan material dalam menyerap air melalui pori-porinya. Parameter ini menjadi indikator utama dari tingkat porositas, permeabilitas, dan kerapatan struktur mortar, yang secara langsung berpengaruh terhadap durabilitas dan kinerja jangka panjang. Pengujian absorpsi biasanya dilakukan berdasarkan standar internasional seperti ASTM C642 atau ASTM C1403, yang mengukur persentase air yang diserap oleh spesimen mortar setelah perendaman pada kondisi tertentu. Nilai absorpsi yang tinggi menunjukkan porositas besar dan potensi penurunan durabilitas akibat mudahnya penetrasi air, ion klorida, atau zat kimia agresif ke dalam struktur mortar.

Secara fisik, penyerapan air menggambarkan kemampuan kapiler mortar dalam menarik air ke dalam jaringan porinya melalui gaya adhesi dan kohesi. Mekanisme ini dipengaruhi oleh ukuran, distribusi, dan konektivitas pori-pori. Mortar dengan distribusi pori mikroskopis yang baik dan struktur padat akan memiliki nilai absorpsi rendah, yang menunjukkan daya tahan yang lebih tinggi terhadap siklus basah-kering dan serangan kimia eksternal. Faktor lain yang memengaruhi nilai absorpsi meliputi rasio air terhadap semen ( $w/c$  ratio), jenis agregat halus, tingkat hidrasi, serta keberadaan bahan tambahan mineral seperti fly ash, slag, atau recycled concrete powder (RCP) yang dapat memperbaiki mikrostruktur dengan efek filler dan pozzolanik (Neville & Brooks, 2010).

Dari sisi evaluasi laboratorium, pengujian absorpsi dilakukan dengan langkah umum berupa pengeringan spesimen mortar hingga massa konstan, penimbangan dalam kondisi kering, perendaman dalam air selama waktu tertentu (biasanya 24 jam), dan kemudian penimbangan kembali setelah jenuh air. Persentase penambahan berat dibandingkan dengan berat kering menunjukkan nilai absorpsi. Dalam beberapa metode lanjutan, laju penyerapan awal (Initial Surface Absorption Test, ISAT) juga digunakan untuk mengukur permeabilitas permukaan, memberikan gambaran tentang resistansi mortar terhadap infiltrasi air pada tahap awal.



a teknis di lapangan, nilai absorpsi berimplikasi langsung terhadap tar pada berbagai aplikasi seperti pasangan bata, plesteran, maupun ruktur beton. Mortar dengan absorpsi rendah menunjukkan kepadatan yang baik dan lebih tahan terhadap rembesan air, sehingga cocok digunakan pada lingkungan lembap atau konstruksi bawah tanah. Sebaliknya, mortar dengan nilai absorpsi tinggi berpotensi mengalami degradasi dini akibat siklus pembekuan-pencairan, serangan sulfat, atau korosi tulangan bila digunakan dalam struktur beton bertulang.

Dalam konteks penerapan teknik konstruksi, nilai absorpsi juga berpengaruh terhadap daya lekat mortar pada unit pasangan. Mortar dengan absorpsi terlalu rendah dapat menghambat penyerapan air oleh bata atau blok, mengurangi daya ikat antar permukaan. Oleh karena itu, keseimbangan antara absorpsi dan retensi air perlu dicapai agar mortar tetap mudah diaplikasikan dan memiliki kekuatan ikatan yang optimal (Mehta & Monteiro, 2014). Selain itu, pemantauan nilai absorpsi di lapangan dapat menjadi alat kendali mutu (quality control) untuk memastikan bahwa proporsi campuran, gradasi pasir, dan kualitas air telah sesuai dengan desain campuran yang diharapkan.

Dengan demikian, pengujian absorpsi tidak hanya penting untuk karakterisasi laboratorium, tetapi juga berfungsi sebagai parameter teknis dalam pengendalian mutu dan penentuan kesesuaian penggunaan mortar di berbagai kondisi lingkungan. Nilai absorpsi yang rendah secara umum diidentifikasi sebagai indikator positif terhadap kinerja durabilitas dan keawetan struktur, sehingga menjadi salah satu tolok ukur penting dalam desain mortar modern yang berorientasi pada keberlanjutan dan ketahanan jangka Panjang.

### **1.6.7 Porositas pada Mortar**

Porositas merupakan parameter fundamental dalam menilai kualitas dan kinerja mortar karena secara langsung berhubungan dengan kepadatan, daya serap air, permeabilitas, serta durabilitas material terhadap pengaruh lingkungan. Secara umum, porositas didefinisikan sebagai rasio volume rongga atau pori terhadap total volume mortar. Nilai ini menunjukkan seberapa besar ruang kosong yang terdapat dalam struktur padat, baik berupa pori terbuka yang berhubungan dengan permukaan maupun pori tertutup yang terperangkap di dalam matriks. Semakin tinggi



sitas, semakin besar kemungkinan air, gas, atau zat kimia agresif lain merusak mikrostruktur mortar (Neville & Brooks, 2010).

Sebaliknya, porositas terbentuk akibat proses hidrasi semen yang tidak sempurna, ketidakseimbangan rasio air terhadap semen, atau distribusi partikel agregat halus yang tidak optimal. Air berlebih dalam campuran mortar meninggalkan rongga setelah penguapan, sedangkan kekurangan air menghambat reaksi hidrasi, sehingga menurunkan kekompakan struktur. Selain itu, penggunaan bahan tambahan seperti abu terbang, slag, atau serbuk beton daur ulang (recycled concrete powder, RCP) dapat memengaruhi porositas melalui dua mekanisme utama: efek filler yang mengisi rongga mikro, dan reaksi pozzolanik yang membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan yang menutup pori (Thomas, 2013).

Metode pengujian porositas umumnya mengacu pada standar seperti ASTM C642 atau BS 1881-122, yang melibatkan pengeringan spesimen hingga massa konstan, penimbangan dalam kondisi kering, perendaman dalam air, dan pengukuran volume air yang diserap. Data yang diperoleh digunakan untuk menghitung total volume pori. Metode lain seperti pengukuran intrusi merkuri (Mercury Intrusion Porosimetry, MIP) atau uji gas helium juga digunakan dalam penelitian untuk memperoleh distribusi ukuran pori dan hubungan antara porositas terbuka dan tertutup. Nilai porositas yang rendah mengindikasikan struktur mortar yang lebih padat dan homogen, yang berarti daya tahan yang lebih baik terhadap serangan kimia, karbonasi, dan penetrasi ion klorida.

Dalam konteks implikasi teknik di lapangan, porositas berperan penting dalam menentukan ketahanan mortar terhadap degradasi lingkungan. Mortar dengan porositas tinggi lebih rentan terhadap serangan sulfat, pembekuan-pencairan, serta kehilangan kekuatan akibat penguapan air internal. Sebaliknya, mortar berpori rendah memiliki permeabilitas rendah dan daya tahan tinggi terhadap korosi tulangan pada struktur beton bertulang. Oleh karena itu, pengendalian porositas menjadi aspek vital dalam desain campuran dan pelaksanaan konstruksi, terutama pada struktur yang terpapar air laut, hujan asam, atau fluktuasi kelembapan tinggi (Mehta & Monteiro, 2014).

Di lapangan, pengujian porositas sering dilakukan sebagai bagian dari kontrol mutu (quality control) untuk menilai keberhasilan proses pencampuran dan pemadatan mortar. Nilai porositas yang terlalu tinggi dapat menunjukkan kesalahan



orsi campuran atau pemadatan yang kurang efektif. Selain itu, data pat digunakan untuk memprediksi nilai absorpsi, kecepatan difusi ion, retak akibat susut plastis. Dalam aplikasi praktis seperti plesteran, pasangan bata, dan mortar perbaikan, pemahaman terhadap porositas sangat membantu dalam menentukan keandalan dan umur layan struktur.

Secara keseluruhan, pengujian porositas bukan hanya prosedur laboratorium, tetapi juga alat analisis diagnostik yang penting untuk menjamin bahwa mortar yang dihasilkan memiliki keseimbangan optimal antara kekuatan mekanik dan ketahanan lingkungan. Dengan pengendalian porositas yang baik melalui desain campuran, pemilihan material, dan prosedur curing yang tepat, kinerja jangka panjang struktur dapat ditingkatkan secara signifikan serta mendukung penerapan prinsip konstruksi berkelanjutan.

### 1.6.8 Ketahanan Abrasi pada Mortar (*Cantabro Loss*)

Uji *Cantabro loss* merupakan metode evaluasi yang digunakan untuk menilai ketahanan material terhadap abrasi dan kehilangan partikel akibat benturan mekanis. Awalnya dikembangkan untuk campuran aspal berpori, metode ini kini juga diadaptasi untuk mengukur *cohesive strength* dan ketahanan aus pada material semen, termasuk mortar yang menggunakan bahan daur ulang. Prinsip dasar pengujian ini adalah mengamati persentase kehilangan massa setelah spesimen diputar dalam *Los Angeles abrasion machine* tanpa bola baja selama jumlah putaran tertentu. Nilai kehilangan massa (*Cantabro loss*) mencerminkan tingkat kelekatan internal dan ketahanan agregat terhadap degradasi mekanis (Kandhal & Cooley, 2003).

Dalam konteks mortar, uji *Cantabro* digunakan untuk menilai integritas struktural dan daya tahan terhadap gaya geser dan benturan berulang yang mungkin terjadi selama masa layan. Mortar dengan nilai *Cantabro loss* rendah menunjukkan struktur yang padat dan ikatan kuat antar partikel, sementara nilai tinggi menandakan lemahnya kohesi internal dan risiko pengelupasan permukaan. Faktor yang memengaruhi hasil pengujian ini meliputi rasio air terhadap semen, kualitas agregat halus, penggunaan bahan pengisi mineral seperti abu terbang, slag, atau *recycled concrete powder* (RCP), serta tingkat kepadatan hasil pemadatan (Tortosa et al., 2021).



isi mekanisme material, kehilangan massa selama uji Cantabro terjadi nya ikatan antara pasta semen dan agregat halus, terutama di daerah *interfacial transition zone*, ITZ). Pada mortar dengan pori tinggi atau distribusi partikel yang tidak seragam, gaya benturan menyebabkan partikel lepas lebih mudah. Sebaliknya, mortar dengan struktur mikro yang rapat dan adanya partikel halus pengisi (filler) memperkuat zona transisi dan meningkatkan resistansi terhadap gaya abrasi. Penggunaan RCP sering terbukti memperbaiki daya tahan mekanis karena partikel mikronya berfungsi sebagai bahan pengisi yang mengurangi ruang kosong dan meningkatkan kerapatan mikrostruktur (Umar et al., 2022).

Secara prosedural, spesimen mortar berbentuk silinder atau kubus dikeringkan terlebih dahulu, kemudian dimasukkan ke dalam drum pengujian dan diputar selama 300 putaran tanpa bola baja. Setelah proses selesai, sampel ditimbang kembali untuk menentukan persentase kehilangan berat. Nilai *Cantabro loss* dihitung dari selisih berat sebelum dan sesudah pengujian terhadap berat awal. Semakin kecil persentasenya, semakin baik ketahanan mortar terhadap disintegrasi mekanis. Dari perspektif penerapan teknik di lapangan, hasil uji Cantabro memiliki makna penting dalam mengevaluasi kinerja mortar terhadap gangguan fisik seperti getaran, beban lalu lintas ringan, dan erosi partikel pada permukaan struktur. Pada pekerjaan pasangan bata, plesteran, maupun perbaikan permukaan beton, mortar dengan nilai kehilangan rendah menunjukkan ketahanan abrasi yang tinggi serta keawetan lebih panjang terhadap gesekan atau benturan alat kerja. Sebaliknya, mortar dengan kehilangan massa tinggi cenderung rapuh dan mudah mengalami pengelupasan, terutama di area dengan aktivitas dinamis atau fluktuasi suhu yang ekstrem.

Selain itu, nilai *Cantabro loss* juga dapat digunakan sebagai parameter indikator keandalan campuran dalam penelitian pengembangan mortar ramah lingkungan yang memanfaatkan bahan daur ulang. Ketika RCP dan RCA digunakan secara bersamaan, pengujian ini membantu mengidentifikasi proporsi optimal agar diperoleh kombinasi kuat tekan dan ketahanan abrasi terbaik. Dengan demikian, uji Cantabro tidak hanya menilai ketahanan fisik, tetapi juga mendukung optimasi formulasi campuran untuk aplikasi konstruksi berkelanjutan.



## vitas pada Mortar

vity merupakan parameter penting yang digunakan untuk rkan kemampuan suatu material berpori, seperti mortar, dalam menyerap air melalui aksi kapiler. Berbeda dengan pengujian absorpsi yang mengukur total volume air yang diserap, uji sorptivity menilai laju penyerapan air ke dalam pori-pori material dalam satuan waktu. Nilai sorptivity yang tinggi menandakan bahwa air dapat bergerak dengan cepat melalui jaringan pori, sehingga material lebih rentan terhadap kerusakan akibat proses degradasi lingkungan seperti karbonasi, korosi, atau serangan ion klorida (Hall, 1989).

Secara prinsip, pengujian sorptivity didasarkan pada konsep aliran kapiler, di mana air bergerak melalui sistem pori akibat gaya adhesi dan kohesi antara molekul air dan dinding pori. Laju penyerapan air bergantung pada ukuran, bentuk, dan kontinuitas pori dalam matriks mortar. Mortar dengan pori mikro yang terdistribusi merata dan tidak saling terhubung akan memiliki nilai sorptivity rendah, sedangkan struktur dengan pori besar dan saling berhubungan akan menunjukkan nilai lebih tinggi. Proses hidrasi semen dan adanya bahan tambahan seperti *recycled concrete powder* (RCP) atau abu terbang dapat memengaruhi hasil uji ini karena partikel halus nya memperbaiki mikrostruktur dan mengurangi jalur kapiler (Martys & Ferraris, 1997).

Metode pengujian sorptivity secara umum mengikuti standar seperti ASTM C1585. Spesimen mortar dikeringkan terlebih dahulu hingga massa konstan, kemudian sebagian permukaannya direndam dalam air dengan ketinggian tertentu (biasanya 1–5 mm) untuk memastikan aliran kapiler dominan. Penambahan berat sampel akibat penyerapan air dicatat pada interval waktu tertentu, kemudian diplot terhadap akar waktu. Gradien dari grafik ini digunakan untuk menentukan koefisien sorptivity (S), yang dinyatakan dalam  $\text{mm}/\sqrt{\text{s}}$  atau  $\text{m}/\text{s}^{1/2}$ . Nilai yang lebih rendah menandakan bahwa struktur mortar memiliki ketahanan tinggi terhadap penetrasi air.

Dari sisi mekanisme mikrostruktur, sorptivity mencerminkan hubungan erat antara distribusi pori, kepadatan pasta semen, dan efektivitas reaksi hidrasi. Pada mortar konvensional, jalur kapiler cenderung lebih terbuka karena air berlebih dalam campuran, sementara pada mortar dengan bahan tambahan pozzolanik, terbentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C–S–H) sekunder yang mempersempit pori. RCP, misalnya, berperan ganda melalui efek pengisian (*filler effect*) dan reaksi pozzolanik



memperbaiki kerapatan matriks. Hasilnya, laju penyerapan air menurun as meningkat (Medeiros-Junior & Helene, 2008).

a praktis di lapangan, nilai *sorptivity* sangat berpengaruh terhadap umur layan struktur. Mortar dengan *sorptivity* tinggi cenderung mengalami kerusakan dini akibat siklus basah-kering, kristalisasi garam, dan infiltrasi zat kimia. Oleh karena itu, pengendalian nilai ini menjadi faktor penting pada pekerjaan seperti plesteran eksterior, pasangan dinding yang terpapar air hujan, serta perbaikan beton yang berada di area lembap. Pengujian *sorptivity* juga berguna sebagai alat kendali mutu untuk memastikan bahwa campuran yang digunakan di lapangan memiliki kerapatan dan permeabilitas sesuai dengan desain yang direncanakan.

Selain itu, parameter ini membantu insinyur dalam memprediksi ketahanan mortar terhadap penetrasi air dan ion agresif dalam kondisi nyata. Nilai *sorptivity* rendah menunjukkan kemampuan mortar untuk membatasi difusi air, yang pada gilirannya mengurangi risiko korosi tulangan dan degradasi struktural. Dengan demikian, pengujian ini tidak hanya penting untuk evaluasi laboratorium, tetapi juga menjadi indikator performa lapangan yang berkontribusi pada desain campuran mortar yang lebih tahan lama dan berkelanjutan.

## 1.7 Penelitian Terdahulu

Produksi semen portland merupakan salah satu kontributor terbesar terhadap emisi karbon dioksida global, dengan estimasi menyumbang sekitar 7–8% dari total emisi antropogenik dunia (Andrew, 2019). Proses kalsinasi klinker dan konsumsi energi tinggi dalam industri semen menjadikan sektor konstruksi sebagai salah satu fokus utama dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Untuk mengurangi dampak lingkungan tersebut, perhatian besar kini diarahkan pada penerapan konsep ekonomi sirkular dalam industri material bangunan, terutama melalui pemanfaatan limbah konstruksi dan pembongkaran (*construction and demolition waste* atau CDW) sebagai bahan baku alternatif (Tam et al., 2021). Salah satu bentuk pemanfaatan limbah tersebut adalah penggunaan *recycled concrete powder* (RCP), yaitu serbuk halus hasil penggilingan limbah beton, sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran mortar atau beton.

RCP terbentuk dari hasil penghancuran dan penggilingan beton bekas hingga mencapai ukuran partikel halus, umumnya lolos ayakan 75  $\mu\text{m}$ . Serbuk ini



g campuran dari pasta semen terhidrasi sebagian, agregat halus, dan wa kalsium silikat hidrat (C–S–H) yang masih berpotensi berpartisipasi i hidrasi sekunder (Shi et al., 2021). Komposisi kimia dan mineraloginya sangat dipengaruhi oleh sumber limbah, proporsi agregat, dan jenis semen yang digunakan pada beton asalnya (Guo et al., 2018). Dalam konteks keberlanjutan, penggunaan RCP menarik karena dapat mengurangi pembuangan limbah beton ke *landfill*, menurunkan kebutuhan semen baru, dan mendukung konservasi sumber daya alam. Namun, tantangan utamanya terletak pada reaktivitas pozzolanik RCP yang cenderung rendah dan teksturnya yang kasar, yang berpotensi meningkatkan kebutuhan air dan menurunkan kekuatan mekanik jika digunakan dalam jumlah besar (Zhao et al., 2020).

Beberapa studi telah mengevaluasi karakteristik fisik dan kimia RCP sebagai bahan pengganti semen. Penelitian oleh Kou dan Poon (2016) menunjukkan bahwa penggunaan RCP hingga 25% dari berat semen pada mortar menghasilkan kekuatan tekan 28 hari sekitar 85% dari mortar kontrol, dengan peningkatan porositas akibat tingginya luas permukaan spesifik RCP. Hasil serupa dilaporkan oleh Li et al. (2019), yang menemukan bahwa penggantian semen dengan 20% RCP menghasilkan kekuatan tekan sebesar 31 MPa dibandingkan 37 MPa pada campuran kontrol, dengan sedikit peningkatan penyerapan air dan penurunan densitas kering. Studi lain oleh Tan dan Duan (2022) mengonfirmasi bahwa penggilingan RCP hingga ukuran di bawah 45  $\mu\text{m}$  dapat meningkatkan aktivitas pozzolaniknya secara signifikan, karena luas permukaan dan energi spesifik yang lebih tinggi mempercepat reaksi hidrasi sekunder antara kalsium hidroksida dan silika amorf dalam RCP.

Selain sebagai pengganti semen, RCP juga telah diteliti sebagai substitusi parsial agregat halus. Chen et al. (2020) melaporkan bahwa penggantian pasir alam dengan RCP hingga 20% pada mortar menghasilkan kekuatan tekan yang relatif sebanding dengan kontrol, berkat efek pengisian (*filler effect*) yang mengurangi rongga besar dalam matriks. Namun, ketika proporsi penggantian meningkat di atas 30%, porositas total meningkat signifikan dan kekuatan tekan menurun tajam. Penelitian oleh Guo dan Zhan (2021) juga mengamati fenomena serupa, di mana mortar dengan 15% RCP menunjukkan keseimbangan antara kepadatan mikrostruktur dan durabilitas, sedangkan pada 40% RCP, terbentuk mikroretakan akibat distribusi ukuran partikel yang tidak homogen.



a kimia, sebagian besar RCP mengandung oksida utama  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ , dengan rasio  $\text{Ca/Si}$  yang lebih rendah dibandingkan semen portland (Li). Kandungan C–S–H residu ini masih dapat berpartisipasi dalam hidrasi sekunder, terutama bila terdapat aktivator seperti  $\text{NaOH}$  atau  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (Wang et al., 2023). Oleh karena itu, pendekatan aktivasi mekanik, termal, dan kimia banyak dieksplorasi untuk meningkatkan reaktivitas RCP. Penggilingan intensif hingga ukuran mikron dilaporkan meningkatkan indeks aktivitas RCP terhadap semen dari 68% menjadi 92% pada umur 28 hari (Tan & Duan, 2022). Sementara itu, perlakuan termal pada suhu  $700\text{ }^\circ\text{C}$  dapat mengubah fase mineral inert menjadi lebih reaktif, meskipun berisiko menyebabkan sintering yang menurunkan luas permukaan spesifik (Xiao et al., 2020).

Performa mortar yang mengandung RCP sangat bergantung pada beberapa variabel, seperti rasio penggantian, ukuran partikel, dan rasio air terhadap pengikat. Zhao et al. (2020) menemukan bahwa ketika RCP digunakan sebesar 15% dengan rasio air-semen 0,45, kekuatan tekan menurun hanya sekitar 8%, sedangkan pada rasio air-semen 0,55, penurunan mencapai 20%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kebutuhan air akibat tekstur RCP yang kasar berpengaruh terhadap porositas dan densifikasi struktur mortar. Selain itu, *filler effect* dari RCP mampu memperbaiki distribusi partikel halus dalam sistem, sehingga meskipun kekuatan awal menurun, perkembangan kekuatan jangka panjang masih berlanjut karena reaksi hidrasi sekunder (Kou & Poon, 2016).

Kajian literatur menunjukkan bahwa mortar dengan pasir alam yang digantikan oleh agregat halus daur ulang dari beton dapat mempertahankan performa mekanik dan durabilitas tertentu apabila rasio pengantiannya berada pada tingkat moderat. Misalnya, dalam penelitian oleh Irshidat dan Kailani (2025) ditemukan bahwa substitusi pasir alam dengan recycled concrete sand hingga rasio tertentu menghasilkan kekuatan tekan usia 28 hari sebesar 40,3 MPa—meskipun lebih rendah dibandingkan kontrol dengan pasir alam—namun masih dalam rentang yang layak untuk aplikasi non-struktur. Penelitian systematic review oleh “Emerging Trends in the Use of Recycled Sand in Mortar” menunjukkan bahwa substitusi hingga sekitar 30% dapat memberikan kekuatan tekan yang setara atau bahkan sedikit lebih tinggi dari mortar konvensional, namun apabila substitusi melebihi kisaran tersebut



ul penurunan signifikan dalam kekuatan, konsistensi, dan durabilitas rends..., 2023).

ediaan pasir alam sebagai agregat halus utama dalam industri mortar semakin menurun akibat eksploitasi yang intensif, sementara limbah konstruksi dan pembongkaran bangunan (construction and demolition waste, CDW) terus meningkat volume dan menimbulkan tantangan pengelolaan. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan dan ekonomi sirkular, pemanfaatan limbah beton bekas sebagai bahan substitusi dalam campuran mortar menjadi pilihan penelitian yang menjanjikan. Sedikit demi sedikit, studi awal memfokuskan pada substitusi pasir alam dengan agregat halus daur ulang dari beton, atau penggunaan serbuk beton hasil penggilingan (recycled concrete powder, RCP) sebagai bahan pengikat tambahan atau pengganti sebagian semen. Namun, penelitian yang menggabungkan kedua substitusi secara simultan—yaitu mengganti sebagian pasir alam dan sekaligus sebagian semen (atau agregat halus + serbuk halus) dalam satu campuran mortar—masih relatif terbatas meskipun secara konsep menawarkan efisiensi sumber daya ganda dan potensi peningkatan keberlanjutan. Dengan mengganti pasir alam sekaligus memanfaatkan RCP, maka dua aliran pemanfaatan limbah yaitu agregat halus daur ulang dan residu padat hasil penggilingan dapat diintegrasikan ke dalam satu solusi material.

Serbuk beton daur ulang (Recycled Concrete Powder/RCP) yang diberi perlakuan karbon dioksida telah menunjukkan peningkatan pada sifat mekanik material berbasis semen. Namun demikian, karena keterbatasan biaya dan teknologi, limbah beton dan bata umumnya didaur ulang secara bersamaan sebagai suatu campuran, sehingga menghasilkan serbuk daur ulang berupa serbuk beton-bata (Recycled Concrete-Brick Powder/RBCBP). Pengaruh serbuk RBCBP yang diberi perlakuan karbon dioksida (CRCBP) terhadap karakteristik mekanik dan durabilitas material berbasis semen masih belum jelas. Penelitian ini mengkaji sifat dan mikrostruktur mortar komposit yang dibuat dengan menggantikan sebagian semen menggunakan CRCBP. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan yang nyata pada sifat mekanik mortar komposit dengan penambahan CRCBP. Hasil uji penyerapan air kapiler menunjukkan penurunan yang signifikan hingga sebesar 22,32% dan 20,07% masing-masing pada koefisien penyerapan kapiler awal dan sekunder, dengan penambahan CRCBP pada mortar komposit. Hal ini menjadikan



ositol dengan tambahan CRCBP memiliki ketahanan yang lebih baik  
sisi klorida dan siklus beku-cair. Mortar dengan CRCBP menghasilkan  
maksimum sebesar 22,8% pada kandungan ion klorida bebas  
dibandingkan dengan mortar kontrol, serta peningkatan kapasitas pengikatan klorida  
sebesar 36,3%. Selain itu, kehilangan kekuatan pasca siklus beku-cair pada mortar  
CRCBP menurun sebesar 29,5%. Dari sudut pandang mikroskopis, peningkatan  
kinerja mortar komposit dengan CRCBP terutama dapat dikaitkan dengan  
kandungan kalsium karbonat yang lebih tinggi dalam CRCBP serta aktivitas pozzolan  
yang lebih baik. (Xiangqing Kong, 2023).

Pemanfaatan kembali serbuk limbah beton yang telah digiling sebagai bahan pengikat ramah lingkungan merupakan pendekatan yang efektif dan bernilai tinggi untuk mengurangi limbah beton. Penelitian ini menggunakan serbuk limbah beton giling yang meliputi serbuk pasta daur ulang dan serbuk beton daur ulang untuk menghasilkan mortar geopolimer berbasis metakaolin yang berkelanjutan. Serbuk limbah beton dengan bentuk partikel yang tidak beraturan terutama mengandung produk hidrasi, kuarsa, dan kalsit. Penggantian metakaolin dengan serbuk limbah beton mengurangi jumlah produk sementisius hasil aktivasi alkali pada pasta geopolimer campuran, namun efek nukleasi dan pengisian dari serbuk limbah beton dapat memperbaiki mikrostruktur pasta. Penambahan serbuk limbah beton meningkatkan susut kering mortar geopolimer; mortar geopolimer campuran serbuk pasta daur ulang memiliki susut kering yang lebih tinggi dibandingkan mortar geopolimer campuran serbuk beton daur ulang, dan susut kering maksimum mortar geopolimer dengan 75% serbuk pasta daur ulang adalah 178,7% lebih tinggi dibandingkan dengan mortar geopolimer dengan 75% serbuk beton daur ulang. Kuat tekan mula-mula meningkat kemudian menurun seiring dengan bertambahnya kadar serbuk limbah beton. Mortar geopolimer campuran serbuk pasta daur ulang memiliki kuat tekan yang lebih baik dibandingkan mortar geopolimer campuran serbuk beton daur ulang, dan kuat tekan umur 28 hari pada mortar geopolimer dengan 75% serbuk pasta daur ulang adalah 34,4% lebih besar dibandingkan mortar geopolimer dengan 75% serbuk beton daur ulang. Penggantian metakaolin dengan serbuk limbah beton hingga 75% menurunkan masuknya air dan klorida ke dalam mortar geopolimer campuran, serta mortar geopolimer campuran serbuk pasta daur ulang memiliki penyerapan air dan migrasi klorida yang lebih rendah dibandingkan mortar



campuran serbuk beton daur ulang. Dengan mengoptimalkan jenis dan kuantitas limbah beton, dapat dihasilkan mortar geopolimer berbasis metakaolin anjutan dengan kekuatan unggul dan sifat transportasi yang rendah.

(Miao Liu, 2023).

Untuk mengoptimalkan desain campuran mortar slag teraktivasi alkali dengan kandungan serbuk beton daur ulang (RCP) volume tinggi (High-Volume Recycled Concrete Powder Alkali-Activated Slag Mortar/HRAASM) serta meningkatkan kinerja mekaniknya, penelitian ini menggunakan metode respons permukaan (Response Surface Method/RSM) berbasis desain Box-Behnken guna mengevaluasi pengaruh ukuran partikel RCP, modulus aktivator (Ms), kadar aktivator (C), dan rasio air terhadap padatan (W/S) terhadap sifat mekanik HRAASM. Pengujian XRD, FTIR, TG-DSC, dan SEM digunakan untuk mengkaji hubungan antara kuat tekan, produk reaksi, proses reaksi, dan mikrostruktur pada berbagai parameter desain campuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada parameter optimum (ukuran RCP: 15,2  $\mu\text{m}$ , Ms: 1,59, C: 7,42 %, W/S: 0,47), kuat tekan mencapai nilai maksimum sebesar 57,5 MPa pada umur 28 hari. Partikel RCP berukuran 15,2  $\mu\text{m}$  mendorong terbentuknya fase amorf (C-S-H/C-A-S-H), sedangkan partikel RCP yang lebih besar terutama berperan sebagai bahan pengisi inert. Ketika Ms sebesar 1,6 dan W/S sebesar 0,46, interaksi antarparameter tersebut mampu mengurangi porositas matriks dan pembentukan retak, sehingga secara sinergis meningkatkan kepadatan matriks. Namun, nilai W/S sebesar 0,5 menurunkan kuat tekan, terutama ketika menggunakan partikel RCP berukuran 33,6  $\mu\text{m}$ . Penelitian ini memberikan wawasan penting mengenai daur ulang serbuk beton yang bernilai tinggi serta menyajikan pendekatan yang layak untuk mengembangkan mortar slag teraktivasi alkali dengan kinerja mekanik yang lebih baik.



## BAB II METODE PENELITIAN

### 2.1 Tempat Pengujian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin Gowa

### 2.2 Material dan Karakteristik Bahan

#### 2.2.1 Material

Penelitian ini memanfaatkan material hasil daur ulang bersama agregat halus dan semen.

**Tabel 2 Karakteristik Fisik Kimia Semen dan Serbuk Halus**

Material	Oxide (%)											Specific gravity	
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>		LOI
OPC	16.8	4.90	3.87	65.8	1.54	0.28	-	0.29	3.06	0.23	0.11	2.82	3.15
RCP	25.8	8.37	5.40	34.9	1.92	0.07	1.2	0.36	1.64	0.17	0.09	19.8	2.76

**Tabel 3 Sifat Fisik Pasir dan FRCA**

Material	Apparent specific gravity	Bulk specific gravity on dry basic	Bulk specific gravity SSD basic	% Water absorption
Sand	2.79	2.58	2.68	2.43
FRCA	2.85	2.17	2.44	13.12

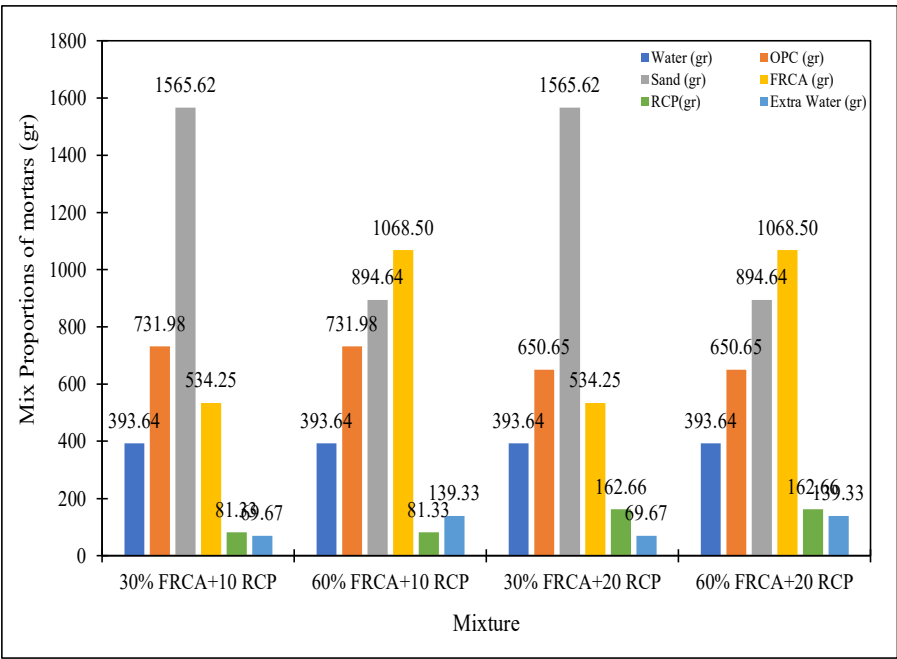
#### 2.2.2 Mix Desain

Kombinasi agregat halus daur ulang dan bubuk beton daur ulang (RCP) dengan variasi: FRCA 30%–RCP 10%, FRCA 60%–RCP 10%, FRCA 30%–RCP 20%, dan FRCA 60%–RCP 20%. Setiap variasi dibuat dalam bentuk benda uji kubus. Rincian komposisi masing-masing campuran ditampilkan pada Gambar 1.

Komposisi pada grafik FRCA–RCP menunjukkan bahwa total binder dijaga konstan (OPC+RCP = 813,31 g) dengan air hidrasi tetap 393,64 g (sehingga w/b ≈ 0,484 pada semua campuran). Pada varian 10% RCP, OPC turun menjadi 731,98 g dan RCP bertambah 81,33 g; sedangkan pada 20% RCP, OPC 650,65 g dan RCP 162,66 g. Penggantian pasir oleh FRCA mengikuti dua level: 30% FRCA memakai



52 g dan FRCA 534,25 g dengan extra water 69,67 g; 60% FRCA sir 894,64 g dan FRCA 1068,50 g dengan extra water 139,33 g. Total i karena itu tetap identik untuk level FRCA yang sama, yakni 3376,49 g (pada 30% FRCA, baik 10% maupun 20% RCP) dan 3309,42 g (pada 60% FRCA untuk kedua kadar RCP). Kenaikan extra water ≈13% dari massa FRCA menegaskan bahwa air tambahan hanya untuk memenuhi penyerapan FRCA (mencapai SSD) sehingga tidak mengubah w/b efektif. Secara numerik, grafik memperlihatkan tiga konsekuensi langsung: (i) penurunan OPC seiring naiknya RCP tanpa mengubah total binder, (ii) penurunan pasir dan kenaikan FRCA yang berpasangan, dan (iii) tambahan air yang naik proporsional dengan FRCA. Kombinasi nilai ini mengindikasikan kepadatan segar cenderung lebih rendah pada 60% FRCA dibanding 30% FRCA, sementara workability dipertahankan melalui koreksi air, dan perbandingan antarmix tetap adil karena w/b konstan pada seluruh varian.



Gambar 2 Sifat Fisik Pasir dan FRCA



## Benda Uji dan Komposisi Campuran

### 1 Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk kubus berukuran 50mm x 50 mm x 50 mm sesuai dengan standar ASTM C109/C109 M. Seluruh benda uji dibuat dari campuran mortar dengan variasi persentase *Fine Recycle Concrete Aggregate* (FRCA) dan *Recycled Concrete Powder* (RCP).

Setiap variasi campuran dibuat sebanyak tiga benda uji (tiga replikasi) untuk masing-masing umur pengujian yaitu 28 hari dan 90 hari. Jumlah replikasi ini bertujuan untuk memastikan data yang diperoleh lebih akurat dan representatif.

Benda uji yang digunakan untuk seluruh rangkaian pengujian yang meliputi kuat tekan, penyerapan air, porositas, cantabro loss, dan sorptivitas.

### 2.3.2 Variasi Campuran

Variasi campuran dalam penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi FRCA dan RCP terhadap sifat mekanik dan durabilitas mortar. Empat variasi campuran yang digunakan ada sebagai berikut:

1. FRCA 30% - RCP 10%
2. FRCA 60% - RCP 10%
3. FRCA 30% - RCP 20%
4. FRCA 60% - RCP 20%

Variasi tersebut mewakili perubahan proporsi substitusi agregat halus dan penggantian sebagian semen oleh RCP.

### 2.3.3 Prosedur Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji dilakukan melalui tahapan berikut:

1. Menyiapkan material dengan komposisi campuran dari setiap variasi, yaitu semen, RCP, pasir alam, FRCA dan air.
2. Memasukkan semen, RCP, dan air ke dalam mixer
3. Mengaduk material tersebut menggunakan mixer selama 30 detik.
4. Menambahkan pasir alam dan FRCA ke dalam mixer.
5. Mengaduk campuran selama 2 menit dengan kecepatan normal.
6. Selanjutnya mengaduk Kembali selama 1 menit dengan kecepatan tinggi
7. Melakukan flow mortar sebanyak 15 kali putaran



ur mortar dimasukkan ke dalam cetakan kubus sebanyak  $\frac{1}{2}$  bagian kan terlebih dahulu, kemudian dipadatkan dengan 7 kali tumbukan. jrutnya sisa mortar dimasukkan hingga cetakan penuh dan Kembali dipadatkan sebanyak 7 kali tumbukan hingga permukaan rata.

9. Setelah proses pemadatan, cetakan ditempatkan pada meja vibrator selama 10 detik untuk menghilangkan gelembung udara.
10. Memberikan penanda pada cetakan dan mendinginkan benda uji selama  $\pm 24$  jam, benda uji dikeluarkan dari mould kemudian dilakukan proses curing dalam air hingga mencapai umur 28 hari dan 90 hari sesuai umur pengujian.

## 2.4 Metode Penelitian

Tahap penelitian ini dapat dilihat secara sistematis dalam bentuk diagram air pada gambar 2 berikut



Gambar 3 Diagram Alir Penelitian



## Pengujian at Tekan

Uji kuat tekan merupakan salah satu parameter mekanis paling penting dalam menilai kualitas mortar, karena menunjukkan kemampuan material menahan gaya tekan sebelum mengalami keruntuhan. Nilai kuat tekan dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya rasio air-semen ( $w/c$ ), kualitas dan jenis agregat halus, tingkat pemadatan, serta keberadaan material tambahan seperti FRCA dan RCP. Agregat halus yang lebih berpori, seperti FRCA, cenderung menghasilkan kuat tekan lebih rendah akibat peningkatan porositas dan lemahnya zona transisi antar muka (ITZ). Sebaliknya, penggunaan RCP dalam kadar moderat dapat meningkatkan kerapatan mikrostruktur melalui efek pengisian (*filler effect*) sehingga berpotensi meningkatkan kuat tekan pada umur lanjut.

Uji kuat tekan mortar dilakukan pada kubus 50 mm sesuai ASTM C109/C109M. Permukaan ditegakkan sejajar bidang tekan; laju pembebanan dikontrol ( $\approx 0,9$  kN/s) hingga runtuh. Kuat tekan dihitung sebagai:

$$f_c = \frac{P_{\max}}{A}$$

dengan  $P_{\max}$  = beban puncak (N) dan  $A$  = luas bidang tekan ( $\text{mm}^2$ ). Untuk setiap variasi, sedikitnya tiga replikasi diuji pada 28 dan 90 hari, kemudian dilaporkan nilai rata-rata.



Gambar 4 Pengujian Kuat Tekan

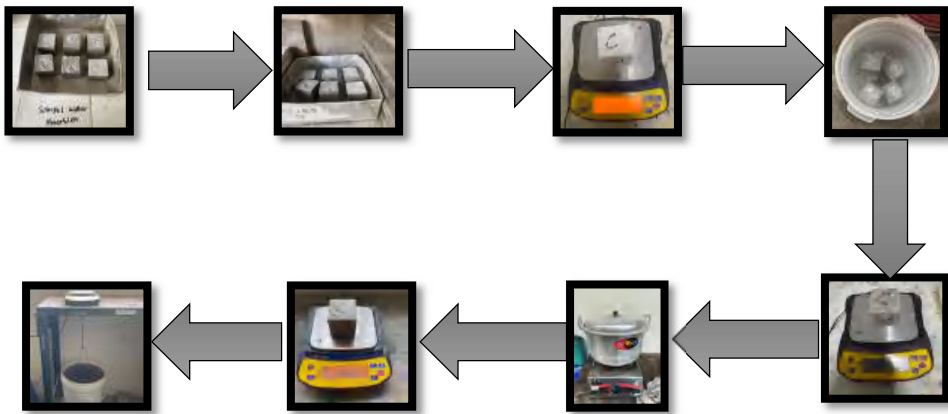


### rapan Air (*Water Absorption*)

rapan air (*Water absorption*) ditentukan mengikuti ASTM C642 pada ng sama/serupa. Tiga kondisi massa dicatat: massa kering oven  $M_{dry}$ , massa jenuh-kering-permukaan (SSD)  $M_{ssd}$ , dan massa terendam  $M_{sub}$ , *Water absorption* (%) dihitung:

$$WA = \frac{M_{ssd} - M_{dry}}{M_{dry}} \times 100\%$$

Sebelum penimbangan SSD, permukaan dikeringkan ringan dengan kain lembap untuk menghindari air bebas.



Gambar 5 Pengujian Penyerapan Air

### 2.5.3 Porositas

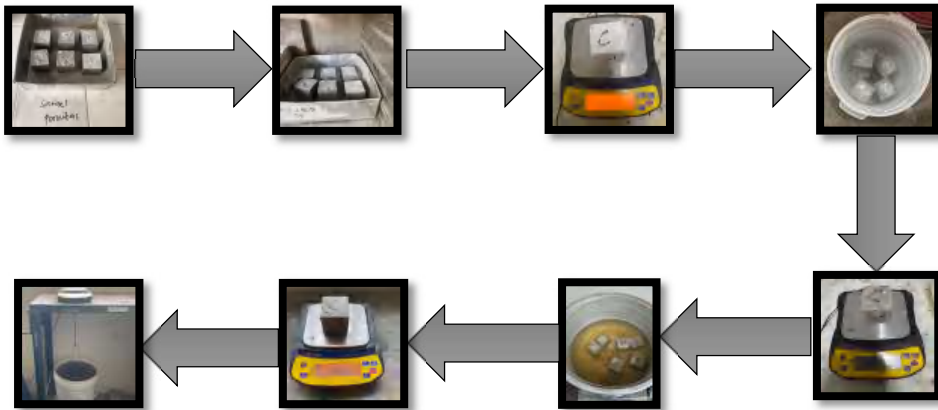
Porositas merupakan salah satu parameter terpenting dalam menilai kualitas mortar karena menentukan kemampuan material dalam menyerap air, permeabilitas, dan ketahanannya terhadap pengaruh lingkungan. Semakin tinggi nilai porositas, semakin besar volume rongga yang terdapat di dalam struktur mortar, yang umumnya berdampak pada penurunan kekuatan mekanis serta durabilitas. Pada mortar berbasis material daur ulang seperti FRCA, porositas cenderung lebih tinggi akibat adanya mortar terlekat (*adhered mortar*) dan mikroretak pada permukaan agregat, sehingga meningkatkan jumlah pori kapiler dan pori terhubung dalam sistem.



itas tampak dihitung dari parameter massa yang sama (ASTM C642)

$$n_{app} = \frac{M_{ssd} - M_{dry}}{M_{ssd} - M_{sub}} \times 100\%$$

Nilai ini merepresentasikan fraksi volume pori yang terhubung terhadap volume semu benda uji.



Gambar 6 Pengujian Porositas

### 2.5.4 Cantabro Loss (Ketahanan Abrasi)

Uji Cantabro Loss digunakan untuk menilai seberapa baik material mortar mampu mempertahankan integritasnya terhadap tumbukan, gesekan, dan abrasi selama proses pemakaian. Metode ini pada awalnya dikembangkan untuk campuran beraspal, namun dalam beberapa penelitian telah diadaptasi untuk mortar dan beton ringan dengan beberapa modifikasi, seperti tanpa penggunaan bola baja agar tingkat gaya tumbuk yang diterima spesimen lebih rendah dan sesuai dengan karakteristik mortar.

Ketahanan fragmentasi terhadap tumbukan/gesekan dinilai menggunakan uji Cantabro yang diadaptasi dari EN 12697-17 (tanpa bola baja). Kubus mortar 50 mm yang telah berumur diuji di mesin Los Angeles (drum) pada  $30 \pm 2$  rpm selama 500 putaran. Setelah uji, benda uji dibersihkan dari debu halus dan ditimbang. Cantabro loss dihitung:



$$CL = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\%$$

in  $M_0$ = massa awal kering (g) dan  $M_1$ = massa setelah pengujian (g).

Prosedur ini menjaga kesetaraan kondisi antar variasi (jumlah spesimen per lari dan waktu istirahat drum dikontrol konstan)



Gambar 7 Pengujian Abrasi

### 2.5.5 Sorptivity

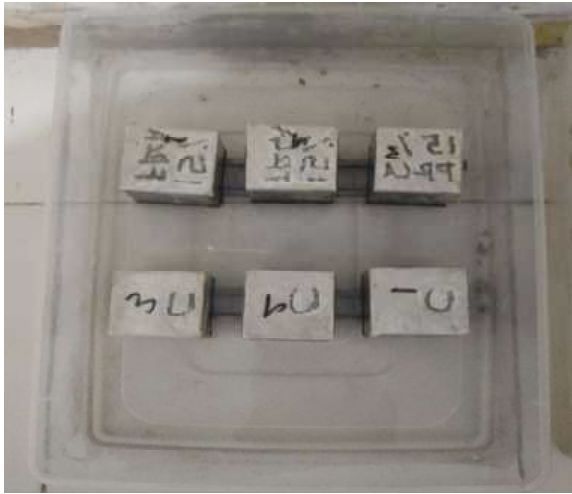
Sorptivity (serapan kapiler) diuji sesuai ASTM C1585. Benda uji dikondisikan (pengeringan terkendali hingga massa stabil), kemudian keempat sisi samping disegel, menyisakan satu bidang alas terbuka (permukaan uji). Permukaan alas kemudian bersentuhan dengan air (kepala air 1–3 mm). Massa dicatat pada waktu  $t = 5, 10, 20, 30, 60$  min, lalu setiap 60 min hingga 6 jam, dan pada interval yang ditetapkan hingga 24 jam. Kumulatif serapan per satuan area dihitung:

$$I(t) = \frac{M_t - M_0}{A \rho_w}$$

dengan  $M_t$ = massa pada waktu  $t$ ,  $M_0$ = massa awal,  $A$ = luas permukaan terendam,  $\rho_w$ = densitas air. Koefisien sorptivity  $S$  diperoleh dari kemiringan regresi linier awal:

$$I(t) = S t^{1/2} + I_0$$

Nilai  $S$  ( $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$  atau  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ ) dilaporkan bersama  $R^2$



Gambar 8 Pengujian Sorptivity