

Pengaruh *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) dan *Recycled Concrete Powder* (RCP) terhadap Karakteristik Mekanis, Durabilitas, dan Ketahanan Korosi Beton Bertulang - *Structured Literature Review*

Nicolas Ramadan^{1*}, Navy Sandra²

^{1,2} Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Kota Padang.

*Email: nicolasramadhan28@gmail.com

Abstrak

Peningkatan produksi limbah beton global mendorong kebutuhan pemanfaatan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) dan *Recycled Concrete Powder* (RCP) sebagai material substitusi yang berkelanjutan. Artikel ini menyajikan tinjauan literatur terstruktur terhadap 20 jurnal penelitian yang mengkaji pengaruh RCA dan RCP terhadap karakteristik mekanis, durabilitas, dan ketahanan korosi beton bertulang. Hasil kajian menunjukkan bahwa RCA menyebabkan penurunan *workability* dan kuat tekan yang proporsional dengan tingkat substitusi akibat porositas mortar lama yang melekat. RCP efektif sebagai filler pada kadar sekitar $\leq 20\%$, dengan potensi aktivasi melalui karbonasi terakselerasi. Kombinasi RCA-RCP mendukung pendekatan *full recycling* namun memerlukan optimasi desain campuran. Dari aspek korosi, peningkatan permeabilitas akibat RCA dan RCP mempercepat penetrasi ion klorida sehingga meningkatkan laju korosi tulangan. Substitusi RCA hingga 50% dan RCP sekitar 10-15% diidentifikasi sebagai rentang yang masih dapat diterima berdasarkan keseluruhan parameter.

Kata Kunci: *Recycled Concrete Aggregate* (RCA); *Recycled Concrete Powder* (RCP); Durabilitas Beton; Korosi Tulangan; *Circular Economy*.

Pernyataan Pendanaan

Penelitian ini tidak memperoleh dukungan dana khusus dari lembaga pendanaan mana pun, baik dari sektor publik, komersial, maupun organisasi nirlaba.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada keluarga besar terkhusus kedua orang tua, teman-teman yang telah memberikan dukungan penuh dan bantuan dari awal penelitian hingga penelitian ini selesai dilakukan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing dan penguji yang telah memberi saran dan arahan sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian.

Etika Publikasi

Penelitian ini dilakukan dengan menjunjung tinggi integritas ilmiah dan kode etik penelitian. Penulis menyatakan bahwa penelitian ini tidak melibatkan manusia maupun hewan sebagai subjek eksperimen, sehingga tidak diperlukan izin dari komite etik terkait Deklarasi Helsinki atau pedoman ARRIVE.

Pernyataan AI

Artikel ini merupakan karya orisinal Penulis yang disusun tanpa menggunakan alat AI, baik untuk penulisan kalimat maupun untuk pembuatan atau pengeditan tabel dan gambar dalam naskah ini.

1. Pendahuluan

Beton merupakan material konstruksi yang paling dominan digunakan secara global. Aktivitas pembongkaran bangunan menghasilkan limbah beton dalam jumlah yang sangat besar, diperkirakan mencapai 35–40% dari total limbah padat industri konstruksi (Irianto, 2022). Secara bersamaan, industri semen menyumbang sekitar 8% dari total emisi CO₂ global akibat proses kalsinasi dan konsumsi energi tinggi (De Brabandere et al., 2023). Kondisi ini mendorong pengembangan material konstruksi alternatif berbasis limbah yang lebih ramah lingkungan.

Recycled Concrete Aggregate (RCA) dan *Recycled Concrete Powder* (RCP) merupakan dua material daur ulang berbasis limbah beton yang paling banyak diteliti. Keduanya dihasilkan dari proses penghancuran mekanis beton bekas secara bersamaan yaitu RCA sebagai fraksi kasar (>4,75 mm) dan RCP sebagai fraksi sangat halus (<75 µm). Zhang et al. (2022) menyebut pendekatan simultan ini sebagai *full recycling approach* yang mendukung prinsip *zero waste construction*. Meskipun menawarkan potensi besar, karakteristik fisik kedua material yang berbeda dari material alami menimbulkan kekhawatiran terhadap performa mekanis, durabilitas, dan ketahanan korosi beton yang dihasilkan. Artikel ini mengkaji secara terstruktur 20 literatur penelitian untuk menjawab pertanyaan tersebut.

2. Metodologi Tinjauan Literatur

2.1 Strategi Pencarian Literatur

Tinjauan literatur dilakukan dengan pendekatan *Structured Literature Review* (SLR) untuk memperoleh, menyeleksi, dan menganalisis artikel ilmiah yang relevan dengan penggunaan RCA dan RCP pada beton. Pencarian literatur dilakukan melalui database Google Scholar, Scopus, dan ScienceDirect. Rentang tahun publikasi dibatasi antara tahun 2011 hingga 2025 agar kajian mencakup perkembangan penelitian terbaru tanpa mengabaikan referensi dasar yang masih relevan.

Kata kunci yang digunakan dalam proses pencarian meliputi “*Recycled Concrete Aggregate*”, “*RCA concrete*”, “*Recycled Concrete Powder*”, “*RCP cement replacement*”, “*recycled concrete durability*”, “*chloride penetration recycled concrete*”, “*corrosion reinforced concrete RCA*”, “*corrosion reinforced concrete RCP*”, dan “*full recycling waste concrete*”.

2.2 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi digunakan untuk memastikan bahwa artikel yang dianalisis sesuai dengan tujuan literatur. Artikel yang dipilih merupakan publikasi yang diterbitkan pada rentang tahun 2011–2025. Artikel tersebut membahas penggunaan RCA, RCP atau kombinasi RCA-RCP dalam beton. Selain itu, artikel harus menyajikan data eksperimental, kajian *review*, atau analisis ilmiah yang relevan. Setiap artikel juga membahas sedikitnya satu parameter penelitian, yaitu sifat mekanis, *workability*,

mikrostruktur, durabilitas, penetrasi klorida, atau korosi tulangan. Seluruh artikel harus tersedia dalam bentuk *full-text* agar dapat dianalisis secara komprehensif.

Kriteria eksklusi digunakan untuk menyaring artikel yang tidak sesuai dengan tujuan penelitian. Artikel yang tidak berhubungan secara langsung dengan beton berbasis RCA atau RCP tidak disertakan dalam kajian ini. Artikel yang hanya membahas pemanfaatan limbah beton sebagai material lapisan jalan atau campuran aspal tanpa keterkaitan dengan beton semen juga dikecualikan. Selain itu, artikel yang tidak menyajikan informasi teknis yang memadai mengenai komposisi material maupun parameter pengujian tidak dipertimbangkan dalam proses analisis. Kajian ini juga mengecualikan artikel yang berupa tulisan populer, laporan non-ilmiah, atau dokumen yang tidak melalui proses penelaahan ilmiah. Di samping itu, artikel dengan topik yang berulang, tetapi hanya menyajikan data yang sangat terbatas dan tidak memberikan informasi baru untuk mendukung sintesis hasil penelitian, juga tidak dimasukkan dalam kajian.

2.3 Proses Seleksi Literatur

Proses seleksi literatur dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu identifikasi, penyaringan, evaluasi kelayakan, dan penetapan artikel akhir. Pada tahap identifikasi, seluruh artikel yang diperoleh dari database dikumpulkan berdasarkan kata kunci yang telah ditentukan. Selanjutnya, artikel yang duplikat dihapus. Pada tahap penyaringan, judul dan abstrak dibaca untuk memastikan kesesuaian dengan fokus kajian. Artikel yang relevan kemudian dibaca secara *full-text* untuk menilai kelayakan isi dan keterkaitan dengan parameter yang dikaji. Dari proses tersebut, sebanyak 20 artikel dipilih sebagai dasar analisis dalam tinjauan literatur ini.

2.4 Ekstraksi dan Klasifikasi Data

Data dari setiap artikel diekstraksi berdasarkan beberapa komponen utama. Komponen tersebut meliputi nama penulis, tahun publikasi, jenis material yang digunakan, persentase substitusi RCA atau RCP, metode pengujian, parameter yang dianalisis, dan temuan utama. Literatur kemudian diklasifikasikan ke dalam empat kelompok utama, yaitu penelitian mengenai karakteristik RCA dan pengaruhnya terhadap beton, penelitian mengenai karakteristik RCP dan pengaruhnya sebagai filler atau pengganti sebagian semen. Selain itu juga terdapat penelitian mengenai kombinasi RCA dan RCP dalam pendekatan *full recycling*, dan penelitian mengenai durabilitas, penetrasi klorida, dan risiko korosi pada beton bertulang.

2.5 Metode Sintesis Literatur

Sintesis literatur dilakukan secara tematik dan komparatif. Analisis tematik digunakan untuk mengelompokkan temuan berdasarkan aspek workability, kuat tekan, struktur mikro, durabilitas, dan korosi. Analisis komparatif digunakan untuk membandingkan perbedaan hasil antar penelitian, terutama terkait variasi persentase substitusi RCA dan RCP, kualitas beton asal, rasio air-semen, metode *curing*, dan jenis pengujian durabilitas. Dengan pendekatan ini, artikel tidak hanya merangkum hasil penelitian terdahulu, tetapi juga mengidentifikasi pola umum, perbedaan temuan, serta kesenjangan penelitian yang masih perlu dikembangkan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Fisik dan Mekanis *Recycled Concrete Aggregate (RCA)* dan *Recycled Concrete Powder (RCP)*

RCA berbeda dari agregat alami karena adanya lapisan mortar lama permukaannya yang bersifat lebih berpori dan lebih lemah dari batuan induk aslinya. Mahardana et al. (2023) melaporkan berat jenis bulk RCA sekitar $2,055 \text{ gr/cm}^3$ dengan penyerapan air 4,60%, jauh di atas agregat alami konvensional (1–2%). Sukaryo dan Widayanti (2025) mencatat bahwa meskipun memiliki karakteristik yang lebih inferior, tekstur permukaan RCA yang lebih kasar meningkatkan daya ikat antar partikel sehingga menguntungkan dari aspek *interlocking*. Sebayang et al. (2021) menegaskan bahwa RCA tetap layak sebagai pengganti agregat alami pada beton struktural dengan optimasi desain campuran yang tepat.

Selain penggunaan RCA sebagai pengganti agregat kasar, penggunaan RCP sebagai pengganti sebagian semen juga menjadi salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan keberlanjutan beton. Material RCP memiliki komposisi yang didominasi produk hidrasi semen (C-S-H, Ca(OH)_2) serta mineral silika dan alumina residual. Kaptan (2024) menyatakan bahwa kandungan klinker aktif dalam RCP sangat rendah karena sebagian besar komponen semen telah bereaksi dalam siklus hidrasi sebelumnya, sehingga membatasi reaktivitas hidraulik RCP. Hamzah et al. (2016) menjelaskan bahwa material sangat halus seperti RCP berfungsi sebagai *filler* yang mengisi rongga mikro antar partikel agregat dan semen.

RCP berkontribusi dalam beton melalui tiga mekanisme *Filler effect*, yaitu pengisian rongga mikro yang meningkatkan packing density matriks beton (Raghav, 2021), Aktivitas pozzolan terbatas, di mana silika amorf residual bereaksi dengan Ca(OH)_2 membentuk gel C-S-H tambahan (Ahmed, 2024), dan Nucleation effect, di mana luas permukaan RCP yang besar menyediakan situs nukleasi tambahan untuk produk hidrasi sehingga mempercepat perkembangan kekuatan awal (Ren, 2024).

Shao dan Sakai (2025) melaporkan inovasi karbonasi terakselerasi pada RCP di mana CO_2 bereaksi dengan produk hidrasi membentuk CaCO_3 yang menyegel pori-pori partikel. Proses ini mampu meningkatkan kekuatan material RCP terkarbonat hingga lebih dari 40 MPa sekaligus menyerap CO_2 secara permanen dalam matriks material. De Brabandere et al. (2023) menambahkan bahwa *fine powder* dari beton daur ulang berkualitas tinggi berpotensi mengurangi kebutuhan semen Portland hingga 8% tanpa mengorbankan kekuatan, khususnya jika mengalami perlakuan aktivasi. Pendekatan ini menjadikan RCP tidak hanya sebagai material rendah karbon tetapi berpotensi sebagai carbon sink aktif.

3.2 Pengaruh Penggunaan RCA dan RCP terhadap *Workability* dan Kuat Tekan Beton

Penggunaan RCA secara konsisten menyebabkan penurunan nilai *slump* beton segar. Penurunan ini terjadi karena mortar lama yang berpori menyerap air bebas dalam adukan sehingga mengurangi air tersedia untuk pelumasan partikel (Sukaryo & Widayanti, 2025). Untuk mempertahankan *workability*, diperlukan penambahan air atau penggunaan superplasticizer tanpa mengorbankan rasio air-semen (Dumyati & Manalu, 2015).

Mahardana et al. (2023) melaporkan temuan menarik di mana beton 100% RCA mencapai kuat tekan 24,65 MPa, melampaui beton normal 17,44 MPa, yang dikaitkan dengan efek *interlocking* permukaan kasar RCA dan kualitas beton asal yang tinggi.

Namun sebagian besar literatur melaporkan penurunan kuat tekan seiring meningkatnya substitusi RCA. Dipohusodo (1994) dan Sebayang et al. (2021) menjelaskan mekanismenya melalui konsep ITZ ganda, beton dengan RCA memiliki dua zona transisi antar muka (antara agregat asli mortar lama dan mortar lama dengan pasta semen baru) yang menciptakan lebih banyak titik lemah untuk propagasi retak di bawah beban.

Martin (2023) menemukan bahwa substitusi RCP hingga 15% masih mempertahankan kuat tekan mendekati beton normal. Rocha et al. (2023) mengkonfirmasi bahwa RCP pada kadar 10–20% menghasilkan kuat tekan yang layak secara teknis. Pesta et al. (2023) menambahkan dimensi lingkungan bahwa setiap 10% substitusi RCP setara dengan pengurangan emisi sekitar 0,8 kg CO₂/kg semen. Ahmad (2025) melaporkan bahwa RCP pada proporsi rendah mampu menurunkan permeabilitas ion klorida melalui efek pengisian yang memampatkan mikrostruktur, namun pada kadar tinggi, porositas inheren RCP justru meningkatkan permeabilitas beton.

Zhang et al. (2022) menegaskan bahwa pemanfaatan simultan RCA dan RCP dari satu sumber limbah beton merupakan strategi paling ideal untuk mewujudkan *zero waste construction*. Kombinasi ini memberikan dampak lingkungan ganda, pengurangan kebutuhan agregat alam (RCA) dan pengurangan kebutuhan semen (RCP). Kaptan (2024) mencatat bahwa kombinasi keduanya berpotensi mengurangi jejak karbon produksi beton secara signifikan. Namun dari sisi *workability*, efek negatif keduanya bersifat aditif yaitu RCA meningkatkan kebutuhan air melalui mortar lama yang berpori, sementara RCP meningkatkan kebutuhan air melalui peningkatan luas permukaan spesifik total. Dumyati dan Manalu (2015) menekankan bahwa pengendalian rasio air-semen secara cermat dan penggunaan *admixture* menjadi kunci dalam desain campuran kombinasi RCA-RCP.

Pengaruh terhadap kuat tekan merupakan *resultante* dari efek negatif RCA (ITZ ganda, peningkatan porositas) dan efek campuran RCP (*filler effect* positif dan dilusi klinker negatif). Raghav (2021) menjelaskan bahwa pada persentase rendah, efek positif *filler* RCP dapat mengimbangi sebagian efek negatif RCA sehingga penurunan kuat tekan lebih moderat. Zhang et al. (2022) menyimpulkan bahwa substitusi RCA di bawah 50% dan RCP di bawah 15–20% masih menghasilkan beton dengan kuat tekan yang dapat diterima untuk konstruksi umum.

3.3 Pengaruh Penggunaan RCA dan RCP terhadap Mikrostruktur dan Durabilitas Beton

Porositas mortar lama RCA meningkatkan volume pori total beton sehingga permeabilitas beton secara keseluruhan meningkat. Zen et al. (2021) menunjukkan bahwa RCA mampu mempertahankan permeabilitas yang dibutuhkan pada beton porous, namun pada beton kedap air, peningkatan permeabilitas ini perlu dikendalikan. Neville (2011) menegaskan bahwa permeabilitas merupakan faktor dominan penentu durabilitas beton karena mengendalikan laju penetrasi agen agresif. Irianto (2022) menambahkan bahwa pemanfaatan RCA secara konsisten berkontribusi pada pengurangan eksploitasi quarry alam dan volume limbah konstruksi, menjadikannya material pilihan dalam konstruksi berkelanjutan.

Neville (2011) menjelaskan bahwa dalam sistem material komposit seperti beton dengan RCA-RCP, faktor yang paling meningkatkan konektivitas pori akan mendominasi perilaku *transport* ion. Ahmad (2025) menemukan bahwa pada persentase substitusi rendah, *filler effect* RCP mampu memampatkan zona ITZ yang merupakan jalur *transport*

ion utama dalam beton, sehingga mengkompensasi sebagian peningkatan porositas dari RCA. De Brabandere et al. (2023) menunjukkan bahwa fine powder dari beton daur ulang efektif memperpadat zona ITZ ini. Ren (2024) menambahkan bahwa efek jangka panjang aktivitas pozzolan RCP terus memperbaiki struktur mikro beton seiring waktu, sehingga evaluasi durabilitas idealnya dilakukan pada umur yang lebih panjang dari 28 hari.

3.4 Mekanisme Risiko Korosi pada Beton Bertulang Berbasis RCA dan RCP

Dipohusodo (1994) menjelaskan bahwa tulangan baja dalam beton terlindungi oleh lapisan pasif oksida besi tipis yang terbentuk dalam lingkungan basa tinggi ($\text{pH} \geq 12,5$) pasta semen. Korosi terinisiasi melalui dua mekanisme utama, yaitu pertama, penetrasi ion klorida (Cl^-) dari lingkungan yang mencapai konsentrasi kritis di permukaan tulangan dan merusak lapisan pasif secara lokal, kedua, karbonasi beton (reaksi CO_2 atmosfer dengan Ca(OH)_2 membentuk CaCO_3) yang menurunkan pH di bawah 9 sehingga lapisan pasif tidak terbentuk dan tulangan menjadi aktif terkorosi. Neville (2011) menegaskan bahwa permeabilitas beton merupakan faktor paling dominan yang menentukan laju penetrasi agen korosif ini, beton dengan permeabilitas rendah memberikan perlindungan jauh lebih baik karena memperlambat difusi ion agresif menuju tulangan.

Material RCA dengan porositasnya yang lebih tinggi meningkatkan permeabilitas beton secara inheren, yang berdampak langsung pada percepatan penetrasi ion klorida menuju tulangan. Mahardana et al. (2023) mencatat bahwa ITZ ganda pada beton dengan RCA tidak hanya melemahkan kekuatan mekanis tetapi juga menciptakan jalur preferensial untuk *transport* ion agresif, mempersingkat waktu inisiasi korosi. Sukaryo dan Widayanti (2025) menambahkan bahwa mortar lama pada RCA menyumbangkan jaringan pori tambahan yang terhubung dengan sistem pori pasta semen baru, sehingga konektivitas pori total meningkat dan jalur difusi ion klorida menjadi lebih singkat dan lebih lebar.

Sebayang et al. (2021) mengingatkan bahwa kualitas beton asal (*source concrete*) sangat menentukan kualitas RCA yang dihasilkan beton asal dengan rasio air-semen rendah menghasilkan RCA dengan mortar lama yang lebih padat sehingga dampak negatif terhadap permeabilitas dan risiko korosi lebih kecil. Irianto (2022) merekomendasikan peningkatan tebal selimut beton sebagai kompensasi atas peningkatan permeabilitas ketika RCA diaplikasikan pada struktur bertulang di lingkungan agresif.

Ahmad (2025) menemukan bahwa pada persentase rendah ($\leq 15\%$), RCP mampu menurunkan permeabilitas ion klorida melalui efek pengisian partikel yang memperpadat mikrostruktur. Pemadatan ini memperpanjang jalur difusi yang harus ditempuh ion klorida menuju tulangan sehingga waktu inisiasi korosi menjadi lebih panjang. Namun pada kadar RCP yang tinggi, porositas inheren RCP mengimbangi bahkan melebihi manfaat *filler effect*, sehingga permeabilitas total meningkat dan risiko korosi turut naik. Ren (2024) menambahkan optimisme bahwa komposit RCP-semen yang dioptimalkan dapat memiliki performa durabilitas sebanding beton normal melalui kombinasi *filler effect* dan *nucleation effect* yang menghasilkan struktur mikro lebih padat.

Shao dan Sakai (2025) memberikan perspektif menarik bahwa partikel RCP yang telah mengalami karbonasi terakselerasi memiliki pori yang tersegel oleh CaCO_3 . Ketika digunakan dalam beton, partikel ini berpotensi mengurangi permeabilitas lokal di

sekitar zona ITZ sehingga memberikan perlindungan tambahan terhadap penetrasi ion korosif dibandingkan RCP tanpa perlakuan.

Pengaruh penggunaan kombinasi RCA-RCP terhadap ketahanan korosi ditentukan oleh interaksi dua jenis efek yang berlawanan. Interaksi antagonis terjadi ketika *filler effect* RCP (yang meningkatkan ketahanan korosi) berjalan bersamaan dengan efek RCA yang meningkatkan porositas dan permeabilitas. Dalam kondisi persentase RCA dominan, efek negatif RCA dapat mengimbangi efek positif RCP sehingga ketahanan korosi menurun secara keseluruhan. Neville (2011) menjelaskan bahwa dalam sistem komposit, faktor yang paling meningkatkan konektivitas pori akan mendominasi perilaku *transport* ion.

Sebaliknya, pada persentase RCA rendah (peningkatan porositas masih normal) dan RCP pada kadar *filler* efektif, interaksi sinergis dapat terjadi, pemadatan zona ITZ oleh partikel halus RCP mengkompensasi sebagian peningkatan porositas RCA. De Brabandere et al. (2023) menunjukkan bahwa *fine powder* dari beton daur ulang efektif memperpadat justru zona ITZ yang merupakan jalur *transport* ion utama dalam beton sehingga perlindungan terhadap korosi dapat dipertahankan. Ahmad (2025) merekomendasikan pengujian *Rapid Chloride Penetration Test* (RCPT) atau migrasi klorida (NT Build 492) untuk evaluasi ketahanan korosi yang lebih sensitif dan akurat dibandingkan pengukuran porositas makro konvensional.

3.5 Rentang Substitusi yang Direkomendasikan

Berdasarkan literatur yang dikaji, penggunaan RCA dalam kadar rendah hingga sedang masih memungkinkan untuk menghasilkan beton dengan performa mekanis dan durabilitas yang dapat diterima. Kadar RCA hingga 50% cenderung lebih aman dibandingkan substitusi penuh, terutama untuk beton bertulang yang memerlukan durabilitas tinggi. Pada kadar yang lebih tinggi, risiko peningkatan porositas, penurunan kuat tekan, dan percepatan penetrasi ion klorida menjadi lebih besar.

Penggunaan RCP dengan kadar substitusi sekitar 10–15% cenderung memberikan keseimbangan yang baik antara efek *filler* dan efek dilusi. Pada rentang ini, RCP dapat membantu memperbaiki *packing density* dan mikrostruktur beton. Namun, penggunaan RCP melebihi 20% perlu dievaluasi secara hati-hati karena berpotensi menurunkan kuat tekan dan meningkatkan permeabilitas.

Berdasarkan hasil literatur tersebut, kombinasi RCA 25–50% dan RCP 10–15% dapat dipertimbangkan sebagai rentang awal yang potensial untuk penelitian eksperimental lanjutan. Namun, rentang ini tidak dapat dianggap sebagai nilai optimum universal karena hasil akhir tetap dipengaruhi oleh kualitas beton asal, jenis semen, rasio air-semen, ukuran partikel RCP, kondisi *curing*, dan metode pengujian.

3.6 Research Gap dan Arah Penelitian Lanjutan

Kajian ini menunjukkan bahwa masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian. Pertama, sebagian besar penelitian masih membahas RCA dan RCP secara terpisah, sedangkan kajian mengenai kombinasi keduanya dalam satu sistem beton masih terbatas. Kedua, penelitian yang secara khusus mengevaluasi ketahanan korosi beton bertulang berbasis RCA-RCP masih belum banyak ditemukan. Ketiga, sebagian besar penelitian durabilitas dilakukan dalam skala laboratorium dan dalam waktu pengujian relatif pendek, sehingga belum sepenuhnya menggambarkan perilaku jangka panjang pada kondisi lingkungan nyata.

Aspek lain yang juga perlu diperhatikan adalah kualitas beton asal sebagai sumber RCA dan RCP belum selalu dikontrol secara konsisten dalam penelitian terdahulu.

Padahal, kualitas beton asal sangat menentukan porositas, penyerapan air, kandungan mortar lama, dan potensi reaktivitas material daur ulang. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu mempertimbangkan variasi kualitas beton asal, perlakuan awal RCA, aktivasi RCP, serta pengujian durabilitas dan korosi secara lebih komprehensif.

Penelitian eksperimental lanjutan yang mengombinasikan RCA dan RCP dengan variasi kadar tertentu, kemudian mengevaluasi kuat tekan, porositas, permeabilitas, penetrasi klorida, dan indikator korosi tulangan, akan memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan beton daur ulang yang lebih aman untuk aplikasi struktural.

3.7 Implikasi terhadap Pengembangan Beton Berkelanjutan

Pemanfaatan RCA dan RCP memiliki implikasi penting terhadap pengembangan beton berkelanjutan. Dari aspek lingkungan, penggunaan kedua material ini dapat mengurangi kebutuhan agregat alam, mengurangi konsumsi semen, serta menurunkan volume limbah beton yang dibuang. Dari aspek teknis, penggunaan RCA dan RCP masih memungkinkan jika desain campuran dilakukan secara tepat dan parameter durabilitas diperhatikan sejak awal.

Meskipun demikian, untuk penerapan pada beton bertulang, aspek korosi harus menjadi perhatian utama. Beton yang memiliki kuat tekan cukup belum tentu memiliki ketahanan durabilitas yang baik jika permeabilitasnya tinggi. Oleh karena itu, evaluasi beton berbasis RCA dan RCP sebaiknya tidak hanya berfokus pada kuat tekan, tetapi juga pada parameter *transport* ion, mikrostruktur, dan korosi tulangan. Strategi mitigasi yang dapat diterapkan meliputi pembatasan kadar substitusi, penggunaan superplasticizer, pengendalian rasio air-semen efektif, peningkatan kualitas curing, aktivasi RCP melalui karbonasi, serta peningkatan tebal selimut beton pada lingkungan agresif.

4. Kesimpulan

Penggunaan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) menyebabkan penurunan *workability* serta peningkatan porositas yang sebanding dengan persentase substitusi akibat keberadaan mortar lama yang bersifat lebih berpori. Kondisi tersebut umumnya diikuti oleh penurunan kuat tekan, meskipun pada tingkat substitusi hingga 50% sifat mekanik beton masih dapat diterima. Di sisi lain, *Recycled Concrete Powder* (RCP) terbukti efektif berfungsi sebagai *filler* dan *supplementary cementitious material* (SCM) pada kadar penggunaan $\leq 15\text{--}20\%$ dari berat semen, sedangkan aktivasi melalui karbonasi terakselerasi mampu meningkatkan performa material secara signifikan dan menjadikan RCP sebagai material rendah karbon yang menjanjikan. Kombinasi penggunaan RCA dan RCP mendukung konsep *full recycling approach*, dengan rentang substitusi optimum RCA sebesar 25–50% dan RCP sebesar 10–15%, sehingga beton yang dihasilkan masih mampu memenuhi persyaratan teknis untuk konstruksi umum. Namun demikian, peningkatan permeabilitas akibat penggunaan kedua material tersebut dapat mempercepat penetrasi ion klorida dan meningkatkan risiko korosi tulangan, di mana perilaku ketahanan korosi akhir dipengaruhi oleh interaksi antagonis yang didominasi oleh RCA serta interaksi sinergis melalui efek pengisian (*filler effect*) dari RCP yang dapat mengompensasi porositas RCA. Oleh karena itu, upaya mitigasi korosi perlu dilakukan melalui pembatasan persentase substitusi pada rentang optimum, aktivasi RCP melalui karbonasi, penggunaan bahan tambah (*admixture*) untuk menurunkan permeabilitas, serta peningkatan tebal selimut beton pada struktur yang berada di lingkungan agresif.

- Ahmad, J. (2025). Durability and microstructure aspects of sustainable concrete containing recycled powder. *Frontiers in Materials*, 12, 1–18.
- Ahmed, F. (2024). Effect of *filler* materials on long-term strength and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 412, 134789.
- De Brabandere, L., Grigorjev, V., Van den Heede, P., Nachtergaele, H., Degezelle, K., & De Belie, N. (2023). Using fines from recycled high-quality concrete as a substitute for cement. *Materials*, 16(4), 1–20.
- Dipohusodo, I. (1994). *Desain beton bertulang jilid 1*. Gramedia Pustaka Utama.
- Dumyati, H., & Manalu, S. P. (2015). Peran air dalam campuran beton dan pengaruhnya terhadap kualitas beton. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Indonesia*, 8(2), 45–56.
- Hamzah, H., Iskandar, R., & Pratama, B. (2016). Karakteristik *filler* mineral dalam campuran beton dan beraspal. *Jurnal Jalan dan Jembatan*, 33(1), 1–12.
- Irianto, A. (2022). *Beton: Jenis dan kegunaannya*. Deepublish.
- Kaptan, K. (2024). A review of the utilization of recycled powder from concrete waste in cement-based materials. *Applied Sciences*, 14(21), 9775.
- Mahardana, Z. B., Pambudi, W. R., Emilia, O. F., Fasyaro, R. F., Aprinia, A. D., Mustafa, D. T., & Induwati, M. (2023). Peningkatan kuat tekan beton dengan menggunakan material recycle concrete aggregate (RCA). *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 11(2), 88–97.
- Martin, C. (2023). Managing *Recycled Concrete Powder* from end-of-life concrete. *Resources, Conservation & Recycling*, 192, 106934.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- Pesta, A., Kowalski, R., & Mróz, K. (2023). Reduction of carbon emissions through the use of *Recycled Concrete Powder* in cement replacement. *Journal of Cleaner Production*, 410, 137278.
- Raghav, M. (2021). Micro-sized supplementary cementitious materials as substitutes for Portland cement. *Cement and Concrete Composites*, 118, 103961.
- Ren, X. (2024). Effect of *Recycled Concrete Powder*–cement composite on microstructure and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 420, 135682.
- Rocha, L., Ferreira, R., & Santos, T. (2023). Compressive strength of concrete with *Recycled Concrete Powder* at low substitution rates. *Journal of Building Engineering*, 68, 106137.
- Sebayang, S., Diana, I. W., Putra, A., & Pratama, D. (2021). Analisis pemanfaatan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) sebagai material konstruksi berkelanjutan. *Rekayasa Sipil*, 15(1), 22–31.
- Shao, Z., & Sakai, Y. (2025). Recycling *Recycled Concrete Powder* into low-carbon construction material through compaction and carbonation. *Resources, Conservation & Recycling*, 222, 108456.
- Sukaryo, B. A. P., & Widayanti, A. (2025). Karakteristik *Recycled Concrete Aggregates* (RCA) pada lapisan asphalt concrete base course (AC-BASE). *MITRANS*, 3(1), 70–77.
- Zen, H., Yanti, G., & Megasari, S. W. (2021). Pemanfaatan *Recycled Concrete Aggregate* pada beton porous. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Lancang Kuning*, 7(2), 85–96.
- Zhang, L., Su, Y., Xu, M., & He, P. (2022). A *full recycling approach* for waste concrete: Simultaneous utilization of RCA and RCP as construction materials. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127453.