

Pengaruh *Recycled Concrete Powder* Sebagai Bahan Substitusi Semen Terhadap Kinerja Beton - *Structured Literature Review*

Yuan Nifer Harada^{1*}, Nevy Sandra²

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

*Email: yuanharada533@gmail.com

Abstrak

Peningkatan limbah konstruksi dan pembongkaran bangunan mendorong pemanfaatan material daur ulang dalam bidang konstruksi, salah satunya melalui penggunaan Recycled Concrete Powder (RCP) sebagai substitusi sebagian semen pada material berbasis semen. RCP merupakan fraksi halus hasil penghancuran limbah beton yang mengandung pasta semen lama, agregat halus, senyawa aktif terbatas, dan komponen inert. Artikel ini menyajikan tinjauan literatur terstruktur terhadap penelitian yang membahas pengaruh RCP terhadap sifat segar, hidrasi, mikrostruktur, kuat tekan, durabilitas, metode aktivasi, serta dampak lingkungan. Hasil kajian menunjukkan bahwa RCP tidak dapat diposisikan setara dengan SCM aktif seperti fly ash atau slag karena reaktivitasnya lebih rendah dan sangat dipengaruhi oleh sumber beton asal, kadar pasta semen lama, kehalusan partikel, dan metode aktivasi. Pada kadar rendah, terutama sekitar 10-20%, RCP berpotensi mempertahankan kinerja material melalui filler effect dan nucleation effect. Namun, pada kadar tinggi, dilution effect, peningkatan kebutuhan air, dan porositas partikel lama dapat menurunkan workability, kuat tekan, dan durabilitas. Metode aktivasi mekanis, termal, kimia, karbonasi, dan sistem alkali-activated dapat meningkatkan nilai guna RCP, tetapi manfaat teknisnya perlu dibandingkan dengan kebutuhan energi, biaya, dan dampak lingkungan. Dengan demikian, RCP berpotensi mendukung circular economy apabila penggunaannya dikontrol melalui karakterisasi awal, pemilihan kadar substitusi yang tepat, dan evaluasi durabilitas jangka panjang.

Kata Kunci: *Recycled Concrete Powder; Waste Concrete Powder; Substitusi Semen; Durabilitas Beton; Beton Berkelanjutan; 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, dosen pembimbing, serta semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam proses penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pihak-pihak yang telah menyediakan referensi ilmiah sehingga kajian literatur ini dapat disusun dengan lebih terarah.

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 salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan karena memiliki kuat tekan yang baik, mudah dikerjakan, dan relatif ekonomis. Namun, tingginya penggunaan beton juga menimbulkan persoalan lingkungan, terutama meningkatnya konsumsi semen dan bertambahnya limbah beton dari kegiatan konstruksi maupun pembongkaran bangunan. Produksi semen Portland berkontribusi besar terhadap emisi CO₂, sedangkan *construction and demolition waste* (CDW) terus meningkat dan sebagian besar berasal dari material mineral seperti beton dan bata (Pavlu, 2018; Kaptan et al., 2024).

Pemanfaatan kembali limbah beton sebagai material penyusun beton baru menjadi salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan. Selama ini, pemanfaatan limbah beton lebih banyak difokuskan pada *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) sebagai pengganti agregat kasar. Akan tetapi, proses penghancuran beton lama juga menghasilkan fraksi halus berupa *Recycled Concrete Powder* (RCP). Fraksi halus ini sering kurang dimanfaatkan karena mengandung pasta semen lama, memiliki porositas tinggi, penyerapan air besar, serta reaktivitas lebih rendah dibandingkan semen portland (Kaptan et al., 2024; Xie et al., 2022).

RCP tetap memiliki potensi sebagai substitusi sebagian semen karena mengandung CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, sisa pasta semen terhidrasi, serta sebagian partikel semen yang belum terhidrasi. Kandungan tersebut memungkinkan RCP bekerja melalui *filler effect*, *nucleation effect*, dan aktivitas pozolanik terbatas. Meskipun demikian, RCP tidak dapat diperlakukan sama seperti SCM aktif penuh karena kontribusi kimiawinya terhadap pembentukan produk hidrasi baru relatif terbatas (Chen et al., 2021; Zhou et al., 2026).

Penggunaan RCP perlu dipahami sebagai keseimbangan antara manfaat dan keterbatasan. Pada kadar rendah, partikel halus RCP dapat mengisi rongga antar partikel dan menjadi pusat nukleasi produk hidrasi. Namun, pada kadar tinggi, pengurangan jumlah semen aktif, peningkatan kebutuhan air, dan porositas partikel lama dapat menurunkan *workability*, memperbesar pori kapiler, serta menurunkan kuat tekan dan durabilitas. Oleh karena itu, kadar optimum RCP tidak bersifat universal, melainkan bergantung pada sumber beton asal, kehalusan RCP, rasio air-binder, metode curing, penggunaan admixture, dan jenis sistem campuran (Chen et al., 2021; Ozkan, 2026).

Berdasarkan kondisi tersebut, artikel ini bertujuan mengkaji secara terstruktur pengaruh penggunaan RCP terhadap kinerja material berbasis semen, khususnya pada aspek sifat segar, hidrasi, mikrostruktur, kuat tekan, durabilitas, metode aktivasi, dan dampak lingkungan. Kajian ini juga menekankan pentingnya karakterisasi awal RCP dan evaluasi durabilitas jangka panjang agar pemanfaatannya sebagai material berkelanjutan tidak mengorbankan kualitas beton.

2. Metodologi Tinjauan Literatur

2.1 Strategi Pencarian Literatur

Tinjauan literatur dilakukan dengan pendekatan Structured Literature Review (SLR). Literatur yang dianalisis mencakup artikel review, artikel eksperimental, dan studi keberlanjutan yang membahas penggunaan *Recycled Concrete Powder* (RCP),

Waste Concrete Powder (WCP), *recycled concrete fines*, dan *recycled powder (RP)* pada pasta semen, mortar, beton normal, beton porous, serta sistem alkali-activated. Kata kunci yang digunakan meliputi *recycled concrete powder*, *waste concrete powder*, *recycled concrete fines*, *cement replacement*, *filler effect*, *hydration*, *durability*, *chloride penetration*, *activation*, dan *circular economy*.

2.2 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi dalam kajian ini adalah artikel yang secara langsung membahas RCP dari limbah beton sebagai material pada campuran berbasis semen, menyajikan data teknis atau kajian mekanisme, serta memuat parameter seperti sifat segar, kuat tekan, mikrostruktur, durabilitas, metode aktivasi, atau dampak lingkungan. Artikel yang hanya membahas limbah konstruksi secara umum tanpa keterkaitan dengan material berbasis semen tidak dijadikan sumber utama. Artikel yang tidak memiliki informasi teknis mengenai komposisi material, kadar substitusi, atau parameter pengujian juga dikeluarkan dari sintesis utama.

2.3 Proses Seleksi Literatur

Proses seleksi literatur dilakukan melalui tahapan identifikasi, penyaringan, evaluasi kelayakan, dan penetapan artikel akhir. Pada tahap identifikasi, artikel dikumpulkan berdasarkan kata kunci dan relevansi topik. Pada tahap penyaringan, judul dan abstrak dibaca untuk memastikan kesesuaian dengan fokus RCP. Artikel yang relevan kemudian ditelaah secara *full-text* untuk menilai kelayakan isi dan keterkaitannya dengan parameter yang dikaji. Berdasarkan proses tersebut, artikel yang paling relevan digunakan sebagai dasar sintesis.

2.4 Ekstraksi dan Klasifikasi Data

Data dari setiap artikel diekstraksi berdasarkan nama penulis, tahun publikasi, jenis material, karakteristik RCP, persentase substitusi, metode pengujian, parameter yang dianalisis, dan temuan utama. Literatur kemudian dikelompokkan ke dalam beberapa tema, yaitu karakteristik RCP, *workability* dan kebutuhan air, hidrasi dan mikrostruktur, kuat tekan, durabilitas, metode aktivasi, serta dampak lingkungan.

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 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 *Recycled Concrete Powder* sebagai Material Substitusi Semen

RCP merupakan fraksi halus yang dihasilkan dari proses penghancuran dan penggilingan limbah beton. Dalam berbagai literatur, material ini disebut sebagai *recycled powder*, *waste concrete powder*, *concrete fines*, *recycled concrete fines*, atau *recycled concrete powder*. RCP umumnya diperoleh sebagai produk sampingan dari proses produksi *recycled aggregate* dan berpotensi digunakan sebagai substitusi sebagian semen. Namun, karakteristik fisik, kimia, mineralogi, dan mikrostrukturnya

perlu diperhatikan karena RCP memiliki sifat yang berbeda dari semen Portland (Kaptan et al., 2024).

Komposisi RCP biasanya terdiri atas sisa pasta semen terhidrasi, partikel agregat halus, kalsium karbonat, silika, alumina, serta sebagian kecil senyawa semen yang belum sepenuhnya bereaksi. Kandungan tersebut membuat RCP tidak sepenuhnya inert, tetapi reaktivitasnya tetap lebih rendah dibandingkan semen Portland. Pada kondisi tanpa aktivasi, kontribusi utama RCP lebih dominan berasal dari filler effect dan peningkatan packing density, sedangkan kontribusi kimia terhadap pembentukan produk hidrasi baru relatif terbatas (Kaptan et al., 2024; Ozkan, 2026).

Salah satu karakter penting RCP adalah adanya pasta semen lama. Pasta lama umumnya lebih berpori dibandingkan semen baru dan dapat membawa mikroretak dari beton asal. Kondisi ini berpotensi meningkatkan penyerapan air dan menurunkan kualitas campuran. Di sisi lain, sebagian pasta lama masih mungkin mengandung butiran semen yang belum terhidrasi atau fase kalsium yang dapat berkontribusi terhadap reaksi lanjutan setelah mengalami aktivasi. Dengan demikian, pasta semen lama dapat menjadi kelemahan sekaligus potensi, tergantung pada proses pengolahan dan aktivasi RCP.

Karakteristik RCP juga sangat dipengaruhi oleh sumber limbah beton. RCP dari beton mutu tinggi, beton yang mengandung SCM, beton lama yang telah mengalami karbonasi, atau beton yang terkontaminasi klorida dan sulfat dapat menghasilkan karakteristik yang berbeda. Kim et al. (2023) menunjukkan bahwa RCP dari daur ulang berulang cenderung menjadi lebih kasar, lebih berpori, dan memiliki densitas lebih rendah seiring bertambahnya siklus daur ulang. Oleh karena itu, RCP dari sumber berbeda tidak boleh langsung dibandingkan tanpa karakterisasi awal.

Sebelum digunakan sebagai substitusi semen, RCP perlu dikarakterisasi melalui pengujian kehalusan, specific gravity, water absorption, loss on ignition (LOI), X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), serta distribusi ukuran partikel. Karakterisasi tersebut penting untuk memprediksi apakah RCP lebih berperan sebagai filler, material reaktif terbatas, atau material inert yang berisiko menurunkan performa campuran.

3.2 RCP sebagai *Cement Replacement* dan *Filler Replacement*

Dalam desain campuran, penggunaan RCP perlu dibedakan antara cement replacement dan filler replacement. Apabila RCP menggantikan semen secara langsung berdasarkan massa, jumlah klinker aktif dalam campuran akan berkurang sehingga dilution effect dapat menurunkan kuat tekan. Sebaliknya, apabila RCP diposisikan sebagai filler tambahan dengan optimasi packing density, material ini dapat memperbaiki distribusi partikel tanpa terlalu mengurangi kandungan semen aktif.

Perbedaan posisi ini penting karena RCP tidak selalu bekerja sebagai bahan pengikat aktif. Pada banyak kasus, RCP lebih dominan memperbaiki susunan partikel dan mengisi rongga mikro dibandingkan membentuk produk hidrasi baru. Oleh karena itu, penilaian RCP sebagai substitusi semen perlu dilakukan secara hati-hati agar manfaat lingkungan dari pengurangan semen tidak diikuti oleh penurunan performa mekanis dan durabilitas.

3.3 Pengaruh RCP terhadap Sifat Segar dan *Workability*

Penggunaan RCP pada campuran semen, mortar, maupun beton umumnya memengaruhi sifat segar, terutama workability dan kebutuhan air. Hal ini disebabkan oleh bentuk partikel RCP yang tidak beraturan, tekstur permukaan kasar, dan porositas

relatif tinggi, sehingga air bebas dalam campuran lebih mudah terserap oleh partikel RCP (Kaptan et al., 2024; Zhou et al., 2026). Semakin tinggi kadar RCP, semakin besar kecenderungan air terserap sehingga air yang tersedia untuk melumasi campuran menjadi berkurang (Yang et al., 2022).

Penurunan workability akibat RCP dapat berdampak langsung terhadap porositas akhir beton. Jika penurunan workability dikompensasi hanya dengan penambahan air, rasio air-binder efektif akan meningkat dan menghasilkan pori kapiler yang lebih besar. Kondisi ini dapat mempercepat penurunan kuat tekan dan durabilitas. Oleh karena itu, penggunaan superplasticizer atau optimasi gradasi partikel lebih disarankan dibandingkan sekadar menaikkan kadar air bebas.

Kaptan et al. (2024) menyebutkan bahwa recycled powder dapat meningkatkan viskositas campuran karena morfologi partikelnya kasar dan tidak beraturan. Doudi et al. (2024) juga menunjukkan bahwa kebutuhan air perlu dikoreksi ketika kadar penggantian semen oleh RCP meningkat, terutama pada kadar sekitar 20% ke atas. Namun, pada sistem alkali-activated slag, Wan et al. (2023) menemukan bahwa RCP dapat meningkatkan fluidity hingga kadar tertentu. Perbedaan ini menunjukkan bahwa pengaruh RCP terhadap sifat segar sangat bergantung pada sistem pengikat, jenis aktivator, rasio air-binder, serta karakteristik fisik RCP.

3.4 Pengaruh RCP terhadap Hidrasi dan Mikrostruktur

Pengaruh RCP terhadap proses hidrasi dapat dipahami sebagai hasil dari dua mekanisme yang saling bersaing. Pada kadar rendah, filler effect dan nucleation effect dapat membantu mempercepat pembentukan produk hidrasi di sekitar partikel halus dan memperbaiki packing density. Namun, pada kadar tinggi, dilution effect menjadi dominan karena jumlah semen aktif berkurang. Ketika efek dilusi lebih besar daripada efek pengisian dan nukleasi, kuat tekan serta durabilitas campuran cenderung menurun.

Chen et al. (2021) melaporkan bahwa peningkatan kadar RCP menyebabkan penurunan laju pelepasan panas hidrasi dan total panas hidrasi. Penggunaan RCP juga dapat meningkatkan jumlah pori berbahaya dan pori sangat berbahaya, sehingga total porositas dan ukuran pori dominan ikut meningkat. Walaupun jenis kristal produk hidrasi tidak berubah, peningkatan kadar RCP tetap berdampak pada penurunan fluidity dan kekuatan mekanis mortar.

Pada sistem alkali-activated, Wan et al. (2023) menemukan bahwa RCP tidak banyak mengubah jenis produk hidrasi, tetapi dapat meningkatkan jumlah produk hidrasi dan membentuk mikrostruktur lebih padat melalui interaksi antara partikel tidak aktif RCP dengan produk hidrasi baru. Kajian Zhou et al. (2026) juga menegaskan bahwa RCP atau recycled micro-powder dapat bekerja melalui kombinasi filler effect, aktivitas pozolanik terbatas, dan perbaikan struktur pori, terutama apabila material mengalami aktivasi yang tepat.

Tabel 1. Model konseptual mekanisme pengaruh RCP terhadap kinerja beton

Kondisi penggunaan RCP	Rantai mekanisme yang dominan
RCP kadar rendah dan halus	Packing density meningkat -> pori antarpartikel berkurang -> sorptivity turun -> kuat tekan dapat dipertahankan

RCP kadar tinggi atau kurang aktif	Semen aktif turun + kebutuhan air naik -> porositas/konektivitas pori meningkat -> kuat tekan dan durabilitas menurun
------------------------------------	---

3.5 Pengaruh RCP terhadap Kuat Tekan dan Sifat Mekanis

Kuat tekan merupakan parameter yang paling banyak digunakan untuk menilai kelayakan RCP sebagai substitusi semen. Secara umum, penggunaan RCP pada kadar rendah masih dapat menghasilkan kuat tekan yang mendekati beton atau mortar normal. Namun, peningkatan kadar RCP yang terlalu tinggi cenderung menurunkan kuat tekan akibat dilution effect, peningkatan porositas, dan rendahnya reaktivitas RCP (Chen et al., 2021; Kaptan et al., 2024).

Pembahasan kuat tekan perlu dikaitkan dengan konsep threshold substitution atau batas ambang substitusi. Pada kadar rendah, RCP masih mampu mengisi rongga dan menjaga kepadatan matriks. Setelah melewati batas ambang tertentu, penurunan kandungan semen aktif dan peningkatan porositas partikel RCP menyebabkan penurunan kekuatan yang lebih nyata. Batas ambang ini tidak tetap, tetapi berubah sesuai kehalusan RCP, mutu beton asal, metode curing, rasio air-binder, dan penggunaan admixture.

Chen et al. (2021) menunjukkan bahwa kadar RCP di bawah 20% hanya memberikan pengaruh kecil terhadap kekuatan mekanis mortar. De Brabandere et al. (2025) menunjukkan bahwa recycled concrete fines pada kadar 10% mampu menghasilkan kuat tekan beton yang sebanding dengan campuran referensi. Ozkan (2026) juga melaporkan bahwa concrete test sample powder hingga 10% menghasilkan kuat tekan yang sebanding dengan campuran referensi dan campuran limestone fines, sedangkan kadar lebih tinggi menyebabkan penurunan kuat tekan signifikan. Berdasarkan pola tersebut, kadar 10-20% dapat dipahami sebagai kecenderungan umum yang relatif aman, bukan sebagai nilai optimum universal.

3.6 Pengaruh RCP terhadap Durabilitas

Durabilitas material berbasis semen dipengaruhi oleh struktur pori, penyerapan air, permeabilitas, transport ion, stabilitas volume, dan ketahanan permukaan. Karena RCP berasal dari beton lama yang mengandung pasta semen terhidrasi dan pori lama, penggunaannya berpotensi meningkatkan porositas apabila tidak dikontrol (Nurfaidah et al., 2026; Kaptan et al., 2024).

Evaluasi RCP tidak cukup hanya berdasarkan kuat tekan. Campuran dengan kuat tekan yang masih mendekati kontrol dapat tetap menunjukkan perubahan pada sorptivity, penetrasi klorida, susut, freeze-thaw, dan abrasi. Oleh karena itu, parameter durabilitas harus diposisikan sebagai kriteria utama dalam menentukan batas substitusi RCP, terutama untuk aplikasi beton bertulang atau beton pada lingkungan agresif.

Tabel 2. Ringkasan pengaruh RCP terhadap parameter durabilitas

Parameter durabilitas	Potensi RCP kadar rendah	Risiko RCP kadar tinggi
Sorptivity	Dapat turun karena packing density membaik	Dapat naik karena pori lama dan kebutuhan air meningkat

Chloride penetration	Dapat terkendali apabila pori lebih rapat	Meningkat jika konektivitas pori dan retak mikro bertambah
Freeze-thaw	Bergantung pada distribusi pori dan tingkat kejenuhan	Risiko meningkat jika pori kapiler besar dan mudah jenuh
Abrasion resistance	Dapat membaik jika matriks permukaan padat	Menurun jika kekuatan permukaan rendah akibat dilution effect
Shrinkage	Perlu dikontrol melalui rasio air-binder dan curing	Dapat meningkat akibat kebutuhan air dan pasta lama yang berpori

Nurfaidah et al. (2026) menunjukkan bahwa kehalusan RCP memiliki pengaruh besar terhadap porositas, penyerapan air, sorptivity, kohesi, dan ketahanan abrasi mortar. Ozkan (2026) menemukan bahwa concrete waste powder pada kadar 10% dapat menurunkan water sorptivity, tetapi kadar substitusi lebih tinggi meningkatkan penetrasi ion klorida. Xie et al. (2022) menunjukkan bahwa pada beton porous, WCP dengan metode paste replacement dapat meningkatkan interconnected porosity, permeabilitas air, kekuatan, dan sekaligus menurunkan konsumsi semen. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pengaruh RCP terhadap durabilitas tidak selalu negatif, tetapi sangat tergantung pada kadar, kehalusan, metode pencampuran, dan jenis beton.

3.7 Metode Aktivasi RCP

Rendahnya reaktivitas RCP menjadi kendala utama dalam pemanfaatannya sebagai substitusi semen. Oleh karena itu, berbagai metode aktivasi dikembangkan untuk meningkatkan kinerja RCP, antara lain aktivasi mekanis, termal, kimia, karbonasi, biomineralisasi, nano activation, dan sistem alkali-activated (Kaptan et al., 2024; Yang et al., 2022; Zhou et al., 2026).

Tabel 3. Perbandingan metode aktivasi RCP

Metode aktivasi	Mekanisme utama	Manfaat	Keterbatasan
Mekanis	Memperhalus partikel dan meningkatkan luas permukaan	Memperbaiki packing density dan setting time	Membutuhkan energi penggilingan
Termal	Mengaktifkan sebagian fase terhidrasi lama	Meningkatkan reaktivitas	Konsumsi energi tinggi
Kimia	Mempercepat pelarutan silika/alumina	Meningkatkan pembentukan C-S-H	Perlu kontrol bahan kimia dan biaya
Karbonasi	Membentuk CaCO_3 sebagai filler dan nucleation site	Memperbaiki mikrostruktur dan potensi penyerapan CO_2	Perlu evaluasi energi, emisi, dan proses
Alkali-activated	Mengaktifkan fase aluminosilikat	Meningkatkan produk hidrasi pada sistem tertentu	Sistem campuran lebih kompleks

Aktivasi tidak selalu otomatis meningkatkan keberlanjutan. Aktivasi mekanis membutuhkan energi penggilingan, aktivasi termal membutuhkan energi pemanasan, sedangkan aktivasi kimia memerlukan bahan tambahan yang dapat meningkatkan biaya dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, peningkatan kuat tekan atau durabilitas akibat

aktivasi perlu dibandingkan dengan konsumsi energi, emisi tambahan, dan biaya proses. Evaluasi ini penting agar pemanfaatan RCP tetap sejalan dengan tujuan circular economy.

3.8 Dampak Lingkungan dan Potensi Circular Economy

Salah satu alasan utama penggunaan RCP adalah untuk mengurangi konsumsi semen dan memanfaatkan limbah beton secara lebih optimal. Pengurangan semen penting karena produksi semen merupakan salah satu penyumbang emisi CO₂ terbesar dalam industri konstruksi (Pavlu, 2018; Kaptan et al., 2024). Pešta et al. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan RCP sebagai substitusi semen pada kadar rendah dapat menurunkan dampak lingkungan, khususnya pada kategori climate change impact. Ozkan (2026) juga melaporkan bahwa penggantian semen dengan concrete test sample powder dapat menurunkan embodied CO₂ hingga sekitar 17% pada kadar substitusi 20%.

Namun, circular economy tidak hanya berarti memasukkan limbah ke dalam beton. Kualitas produk akhir tetap menjadi faktor utama. Jika penggunaan RCP menurunkan durabilitas secara signifikan, umur layanan struktur dapat menjadi lebih pendek dan manfaat lingkungan berpotensi berkurang. Oleh karena itu, evaluasi keberlanjutan perlu mempertimbangkan keseimbangan antara pengurangan emisi awal, performa mekanis, durabilitas, umur layanan, dan kebutuhan perawatan.

Dengan desain campuran yang tepat, RCP dapat mengurangi limbah beton, menghemat penggunaan semen, menurunkan emisi karbon, dan mengurangi eksploitasi sumber daya alam. Akan tetapi, penerapannya harus tetap mempertimbangkan kualitas teknis agar manfaat lingkungan tidak mengorbankan kekuatan dan ketahanan jangka panjang struktur (Kaptan et al., 2024; Zhou et al., 2026).

3.9 Research Gap dan Arah Penelitian Lanjutan

Berdasarkan literatur yang dikaji, terdapat beberapa celah penelitian yang masih perlu dikembangkan. Pertama, kualitas RCP sangat bergantung pada sumber beton asal, tetapi belum semua penelitian mengontrol mutu beton asal secara konsisten. Padahal, sumber beton asal memengaruhi kandungan pasta semen lama, porositas, komposisi kimia, derajat karbonasi, dan reaktivitas RCP (Kim et al., 2023; Kaptan et al., 2024).

Kedua, sebagian besar penelitian masih dilakukan pada skala pasta atau mortar. Penelitian pada beton struktural, beton porous, beton bertulang, atau beton pada lingkungan agresif masih perlu diperluas agar penerapan RCP dapat dinilai lebih realistis terhadap kebutuhan konstruksi di lapangan (Zhou et al., 2026; Nurfaidah et al., 2026).

Ketiga, belum banyak penelitian yang menghubungkan karakterisasi awal RCP, seperti XRF, XRD, LOI, fineness, specific surface area, water absorption, dan SEM, dengan performa kuat tekan serta durabilitas. Padahal, karakterisasi awal sangat penting untuk memprediksi apakah RCP lebih berperan sebagai filler, material reaktif terbatas, atau material inert yang menurunkan performa.

Keempat, metode aktivasi RCP memang mampu meningkatkan performa, tetapi belum semua penelitian membandingkan manfaat teknis dengan kebutuhan energi dan biaya aktivasi. Hal ini penting karena aktivasi yang terlalu boros energi dapat mengurangi manfaat lingkungan dari penggunaan RCP (Kaptan et al., 2024; Zhou et al., 2026).

Kelima, belum terdapat klasifikasi mutu RCP berbasis karakteristik material yang dapat digunakan secara luas. Sebagian besar penelitian langsung menggunakan kadar substitusi sebagai variabel utama, padahal performa RCP lebih tepat diprediksi melalui kombinasi karakteristik fisik dan kimia. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu mengembangkan sistem klasifikasi RCP agar rekomendasi kadar substitusi lebih akurat dan tidak bersifat umum.

4. Kesimpulan

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, Recycled Concrete Powder (RCP) memiliki potensi sebagai material substitusi sebagian semen pada material berbasis semen. Namun, RCP tidak dapat disamakan dengan SCM aktif seperti fly ash atau slag karena reaktivitasnya lebih rendah dan sangat bergantung pada sumber beton asal, kandungan pasta semen lama, kehalusan partikel, dan metode aktivasi. Pada kondisi tanpa aktivasi, kontribusi RCP lebih dominan berasal dari filler effect dan nucleation effect, sedangkan kontribusi kimia terhadap produk hidrasi baru relatif terbatas.

Pengaruh RCP terhadap kinerja beton merupakan hasil dari keseimbangan antara efek positif dan negatif. Pada kadar rendah, terutama sekitar 10-20%, RCP dapat membantu memperbaiki packing density, menjadi pusat nukleasi, dan mempertahankan kuat tekan pada tingkat tertentu. Namun, rentang tersebut tidak bersifat universal karena dipengaruhi oleh karakteristik RCP, mutu beton asal, rasio air-binder, metode curing, jenis campuran, serta penggunaan admixture. Pada kadar tinggi, dilution effect, peningkatan kebutuhan air, dan porositas partikel lama dapat menyebabkan penurunan workability, kuat tekan, serta kualitas mikrostruktur.

Durabilitas menjadi aspek penting yang harus diperhatikan dalam penggunaan RCP. Kuat tekan yang masih mendekati campuran kontrol belum tentu menjamin ketahanan jangka panjang terhadap sorptivity, penetrasi klorida, freeze-thaw, susut, abrasi, atau karbonasi. Oleh karena itu, penentuan batas substitusi RCP sebaiknya tidak hanya didasarkan pada kuat tekan, tetapi juga pada kombinasi parameter transport air, transport ion, stabilitas volume, dan ketahanan permukaan.

Metode aktivasi seperti penggilingan mekanis, aktivasi termal, aktivasi kimia, karbonasi, dan sistem alkali-activated dapat meningkatkan nilai guna RCP melalui peningkatan kehalusan, pembukaan fase aktif, pembentukan C-S-H tambahan, dan perbaikan mikrostruktur. Namun, efektivitas aktivasi tetap perlu dievaluasi berdasarkan konsumsi energi, biaya, dan dampak lingkungan agar tujuan keberlanjutan tetap tercapai.

Dari aspek lingkungan, RCP mendukung circular economy karena dapat mengurangi limbah beton, menurunkan kebutuhan semen, mengurangi emisi CO₂, dan menghemat sumber daya alam. Akan tetapi, manfaat lingkungan tersebut hanya dapat dicapai apabila performa mekanis dan durabilitas beton tetap memadai. Dengan demikian, pengembangan RCP ke depan perlu diarahkan pada karakterisasi awal yang lebih lengkap, standardisasi mutu RCP, optimasi kadar substitusi, dan pengujian durabilitas jangka panjang.

Referensi

- Ahmad, J. (2025). Durability and microstructure aspects of sustainable concrete containing recycled powder. *Frontiers in Materials*, 12, 1-18.
- Chen, X., Li, Y., Bai, H., & Ma, L. (2021). Utilization of recycled concrete powder in cement composite: Strength, microstructure and hydration characteristics. *Journal of Renewable Materials*. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.015394>
- De Brabandere, L., Grigorjev, V., Van den Heede, P., Nachtergaele, H., Degezelle, K., & De Belie, N. (2025). Using fines from recycled high-quality concrete as a substitute for cement. *Sustainability*, 17(4), 1506. <https://doi.org/10.3390/su17041506>

- Doudidi, O., Taфраoui, A., Makani, A., & Serna Ros, P. (2024). The use of recycled concrete powder as supplementary cementitious materials for manufacturing concrete. *Communications*, 26(2), D27-D37. <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.019>
- Kaptan, K., Cunha, S., & Aguiar, J. (2024). A review of the utilization of recycled powder from concrete waste as a cement partial replacement in cement-based materials: Fundamental properties and activation methods. *Applied Sciences*, 14(21), 9775. <https://doi.org/10.3390/app14219775>
- Kim, J., Nciri, N., Sicakova, A., & Kim, N. (2023). Characteristics of waste concrete powders from multi-recycled coarse aggregate concrete and their effects as cement replacements. *Construction and Building Materials*, 398, 132525. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132525>
- Martin, C. (2023). Managing recycled concrete powder from end-of-life concrete. *Resources, Conservation & Recycling*, 192, 106934.
- Nurfaidah, S., Caronge, M. A., & Irmawaty, R. (2026). Assessing mortar durability with recycled concrete powder: Toward circular use of construction materials. *Journal of Engineering and Applied Science*, 73, 36. <https://doi.org/10.1186/s44147-026-00899-7>
- Ozkan, H. (2026). Valorization of waste concrete powder as a sustainable substitute for limestone fines in conventional concrete: A case study from Portugal. *Scientific Reports*, 16, 15701. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-46343-x>
- Pavlu, T. (2018). The utilization of recycled materials for concrete and cement production: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 442, 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/442/1/012014>
- Pesta, A., Kowalski, R., & Mroz, K. (2023). Reduction of carbon emissions through the use of recycled concrete powder in cement replacement. *Journal of Cleaner Production*, 410, 137278.
- Pešta, J., Zeníšek, M., Kocí, V., & Pavlu, T. (2021). Environmental perspectives of recycled concrete powder as cement replacement. *AIP Conference Proceedings*, 2322, 020013. <https://doi.org/10.1063/5.0042093>
- 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.
- Shao, Z., & Sakai, Y. (2025). Recycling recycled concrete powder into low-carbon construction material through compaction and carbonation. *Resources, Conservation & Recycling*, 222, 108456.
- Szabo, R., Barany, P. T., Nemeth, N., Ambrus, M., & Mucsi, G. (2025). Effect of mechanically activated recycled concrete powder on the properties of cement paste. *Recycling and Sustainable Development*, 18, 11-19. <https://doi.org/10.5937/ror2501011S>
- Wan, X., Li, H., Che, X., Xu, P., Li, C., & Yu, Q. (2023). A study on the application of recycled concrete powder in an alkali-activated cementitious system. *Processes*, 11(1), 203. <https://doi.org/10.3390/pr11010203>
- Xie, H. Z., Li, L. G., Liu, F., & Kwan, A. K. H. (2022). Recycling old concrete as waste concrete powder for use in pervious concrete: Effects on permeability, strength and eco-friendliness. *Buildings*, 12(12), 2172. <https://doi.org/10.3390/buildings12122172>
- Yang, Y., Kang, Z., Zhan, B., Gao, P., Yu, Q., Wang, J., Zhao, W., Zhang, Y., Bi, W., Yang, C., et al. (2022). Short review on the application of recycled powder in cement-based materials:

- Preparation, performance and activity excitation. *Buildings*, 12(10), 1568. <https://doi.org/10.3390/buildings12101568>
- Zhou, C., Wang, D., Zhan, P., Tao, H., Li, M., & Wang, J. (2026). A review of recycled micro-powder concrete: Material treatment, performance and mechanism. *Developments in the Built Environment*, 25, 100861. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2026.100861>