

Structured Literature Review (SLR): Karakteristik Mekanis dan Durabilitas Beton RCA–RCP pada Paparan Natrium Sulfat

Femas Adetya Laudry^{1*}, Nevy Sandra²

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

*Email: femasadetyalaudry08092004@gmail.com

Abstrak

Pemanfaatan Recycled Concrete Aggregate (RCA) dan Recycled Concrete Powder (RCP) menjadi salah satu alternatif untuk mengurangi limbah konstruksi sekaligus mendukung penggunaan material beton yang lebih berkelanjutan. Artikel ini bertujuan mengkaji pengaruh penggunaan RCA dan RCP terhadap karakteristik mekanis dan durabilitas beton pada paparan natrium sulfat. Kajian dilakukan terhadap 20 artikel jurnal internasional yang diperoleh dari beberapa basis data ilmiah melalui proses seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi pada rentang publikasi 2010–2026. Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan RCA cenderung meningkatkan porositas sehingga menurunkan kuat tekan dan ketahanan beton terhadap serangan sulfat, sedangkan RCP pada kadar optimum mampu memperbaiki kepadatan mikrostruktur, mengurangi porositas, serta meningkatkan ketahanan beton. Selain itu, nilai Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) menunjukkan korelasi dengan kuat tekan beton, sedangkan Scanning Electron Microscopy (SEM) mampu menjelaskan perubahan mikrostruktur akibat penggunaan material daur ulang dan paparan sulfat. Kajian ini menunjukkan bahwa kombinasi RCA dan RCP berpotensi menghasilkan beton yang lebih berkelanjutan, namun masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan komposisi optimum serta mengevaluasi hubungan antara karakteristik mekanis, UPV, dan mikrostruktur beton pada lingkungan natrium sulfat.

Kata Kunci: *Recycled Concrete Aggregate (RCA); Recycled Concrete Powder (RCP); Sulfate Attack; Sodium Sulfate; Concrete Durability; Compressive Strength; Ultrasonic Pulse Velocity (UPV); Scanning Electron Microscopy (SEM).*

Pernyataan Pendanaan

Penelitian ini tidak menerima hibah khusus dari lembaga pendanaan mana pun di sektor publik, komersial, maupun nirlaba.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan bimbingan selama proses penyusunan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan baik secara akademik maupun teknis sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Etika Publikasi

Penelitian ini tidak melibatkan manusia sebagai subjek penelitian. Penulis telah memastikan bahwa seluruh sumber data dan referensi yang digunakan dalam penelitian ini dikutip dan dicantumkan secara benar sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah yang berlaku.

Pernyataan AI

Struktur tata bahasa artikel ini diperbaiki dengan menggunakan ChatGPT, dan penulis telah memeriksa kembali keakuratan dan kebenaran kalimat yang dihasilkan sesuai dengan topik penelitian. Penggunaan bahasa dalam artikel ini telah diverifikasi dan divalidasi secara mandiri oleh penulis. Tidak ada kalimat yang dihasilkan AI yang digunakan tanpa proses pemeriksaan ulang oleh penulis.

1. Pendahuluan

Peningkatan aktivitas pembangunan infrastruktur dan pembongkaran bangunan telah menyebabkan meningkatnya jumlah limbah beton yang dihasilkan setiap tahunnya. Limbah beton yang tidak dikelola dengan baik dapat menimbulkan permasalahan lingkungan serta meningkatkan kebutuhan lahan pembuangan akhir. Oleh karena itu, pemanfaatan kembali limbah beton sebagai material konstruksi menjadi salah satu strategi yang mendukung konsep pembangunan berkelanjutan dan ekonomi sirkular. Penggunaan material daur ulang dalam campuran beton tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan limbah konstruksi, tetapi juga mampu mengurangi eksploitasi sumber daya alam yang digunakan sebagai bahan baku beton konvensional (Malesev et al., 2010; McNeil & Kang, 2013).

Salah satu bentuk pemanfaatan limbah beton adalah melalui penggunaan RCA sebagai pengganti agregat kasar alami dan RCP sebagai bahan pengisi (*filler*) atau substitusi parsial semen. RCA diperoleh dari hasil penghancuran beton bekas yang masih mengandung mortar lama pada permukaannya, sehingga umumnya memiliki porositas dan daya serap air yang lebih tinggi dibandingkan agregat alami. Kondisi tersebut dapat memengaruhi karakteristik mekanis beton, terutama kuat tekan dan modulus elastisitas (Malesev et al., 2010). Di sisi lain, RCP memiliki ukuran partikel yang sangat halus sehingga mampu mengisi rongga-rongga dalam pasta semen dan meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton. Beberapa penelitian melaporkan bahwa penggunaan RCP pada kadar tertentu dapat memperbaiki kualitas matriks semen dan mempertahankan performa mekanis beton (Wan et al., 2023; McNeil & Kang, 2013).

Selain karakteristik mekanis, aspek durabilitas beton juga menjadi perhatian penting, khususnya pada lingkungan yang mengandung sulfat. Paparan natrium sulfat (Na_2SO_4) dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia antara ion sulfat dan produk hidrasi semen yang menghasilkan *ettringite* dan *gypsum*. Pembentukan kedua senyawa tersebut dapat memicu ekspansi, retak mikro, pengelupasan permukaan, hingga penurunan kuat tekan beton seiring bertambahnya waktu paparan (Zhang et al., 2024; Ikumi et al., 2016). Pada beton yang menggunakan RCA, tingginya porositas dapat mempercepat penetrasi ion sulfat ke dalam struktur beton sehingga meningkatkan risiko kerusakan. Sebaliknya, penggunaan material halus seperti RCP berpotensi memperbaiki struktur pori beton dan meningkatkan ketahanannya terhadap serangan sulfat (Wan et al., 2023; Shawnim & Mohammad, 2019).

Berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh RCA maupun RCP terhadap karakteristik beton, namun sebagian besar masih membahas kedua material tersebut secara terpisah. Penelitian yang mengevaluasi kombinasi RCA dan RCP pada beton yang terpapar natrium sulfat masih relatif terbatas. Selain itu, kajian yang menghubungkan karakteristik mekanis beton dengan hasil pengujian UPV dan analisis mikrostruktur menggunakan SEM belum banyak dilakukan secara terpadu. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk meninjau pengaruh penggunaan RCA dan RCP terhadap karakteristik mekanis dan durabilitas beton pada paparan natrium sulfat, serta mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang dapat menjadi dasar bagi pengembangan penelitian selanjutnya.

2. Metodologi Tinjauan Literatur

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Structured Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penggunaan RCA dan RCP pada beton yang terpapar natrium sulfat. Metode SLR dipilih karena mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan penelitian, temuan utama, serta kesenjangan penelitian yang masih perlu dikaji lebih lanjut. Melalui pendekatan ini, berbagai hasil penelitian yang relevan dikumpulkan dan dianalisis secara sistematis sehingga diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh RCA dan RCP terhadap karakteristik mekanis, durabilitas, kualitas beton berdasarkan pengujian UPV, serta perubahan mikrostruktur berdasarkan pengujian SEM.

2.2 Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan pada beberapa basis data ilmiah internasional yang banyak digunakan dalam bidang teknik sipil dan material konstruksi, yaitu Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, MDPI, dan Taylor & Francis Online. Artikel yang dicari difokuskan pada publikasi yang membahas penggunaan RCA, RCP, karakteristik mekanis beton, durabilitas beton, serangan sulfat, UPV, dan SEM. Untuk menjaga relevansi dan kebaruan informasi, rentang tahun publikasi dibatasi pada periode 2010–2026.

Proses pencarian dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci seperti "*Recycled Concrete Aggregate*", "*Recycled Concrete Powder*", "*Sulfate Attack*", "*Sodium Sulfate*", "*Concrete Durability*", "*Compressive Strength*", "*Ultrasonic Pulse Velocity*", dan "*Scanning Electron Microscopy*". Dari hasil pencarian tersebut diperoleh sejumlah artikel yang kemudian diseleksi berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan.

2.3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi digunakan untuk menentukan artikel yang layak dianalisis dalam penelitian ini. Artikel yang dipilih merupakan jurnal internasional bereputasi yang diterbitkan dalam bahasa Inggris pada rentang tahun 2010–2026. Selain itu, artikel harus membahas penggunaan RCA dan/atau RCP pada beton serta memuat hasil penelitian yang berkaitan dengan karakteristik mekanis, durabilitas terhadap serangan sulfat, pengujian UPV, maupun analisis mikrostruktur menggunakan SEM. Artikel yang dipilih juga harus menyediakan data eksperimen atau hasil analisis yang dapat digunakan dalam proses sintesis literatur.

Sebaliknya, artikel dikeluarkan dari proses analisis apabila berupa prosiding, skripsi, tesis, disertasi, atau publikasi non-jurnal. Artikel yang tidak berkaitan langsung dengan beton daur ulang, tidak membahas paparan sulfat, maupun tidak menyediakan data penelitian yang memadai juga tidak dimasukkan dalam kajian. Penerapan kriteria inklusi dan eksklusi ini bertujuan untuk memastikan bahwa literatur yang digunakan memiliki kualitas ilmiah yang baik serta relevan dengan tujuan penelitian.

2.4 Proses Seleksi Literatur

Proses seleksi literatur dilakukan secara bertahap dimulai dari identifikasi artikel berdasarkan kata kunci yang telah ditentukan pada berbagai basis data. Selanjutnya dilakukan penyaringan awal melalui peninjauan judul dan abstrak untuk menghilangkan artikel yang tidak relevan dengan topik penelitian. Artikel yang lolos tahap awal kemudian dievaluasi secara menyeluruh melalui pembacaan naskah lengkap (*full-text review*).

Berdasarkan proses tersebut, diperoleh 20 jurnal internasional yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan digunakan sebagai sumber utama dalam kajian literatur ini.

2.5 Teknik Analisis Data

Data dari setiap artikel yang terpilih diekstraksi dan disusun dalam bentuk matriks literatur yang memuat informasi mengenai penulis, tahun publikasi, metode penelitian, variabel yang diteliti, serta hasil utama penelitian. Selanjutnya dilakukan analisis deskriptif-komparatif dengan membandingkan temuan dari berbagai penelitian untuk mengidentifikasi pola, persamaan, perbedaan, dan kecenderungan hasil penelitian terkait penggunaan RCA dan RCP pada beton yang terpapar natrium sulfat. Hasil analisis kemudian disintesis untuk menjelaskan pengaruh material daur ulang terhadap karakteristik mekanis, durabilitas, nilai UPV, serta perubahan mikrostruktur beton, sekaligus mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang masih perlu dikembangkan pada penelitian selanjutnya.

3. Sintesis Literatur dan Pembahasan

3.1 Karakteristik RCA dan RCP pada Beton

Recycled Concrete Aggregate (RCA) merupakan agregat hasil penghancuran limbah beton yang masih mengandung mortar lama pada permukaannya. Keberadaan mortar lama menyebabkan RCA memiliki porositas dan daya serap air yang lebih tinggi dibandingkan agregat alami sehingga berpengaruh terhadap kualitas beton yang dihasilkan (Malesev et al., 2010). Beberapa penelitian melaporkan bahwa peningkatan kadar RCA cenderung meningkatkan porositas beton dan menurunkan densitas campuran. Namun, tingkat penurunan sifat beton sangat bergantung pada kualitas RCA, metode pengolahan, serta mutu beton asal. Pada penggunaan RCA hingga 25%, perubahan sifat fisik beton umumnya masih relatif kecil dan belum menunjukkan penurunan performa yang signifikan. Sementara itu, pada tingkat substitusi 50%–100%, peningkatan porositas dan penyerapan air menjadi lebih nyata sehingga berpotensi memengaruhi karakteristik mekanis dan durabilitas beton (Diosa-Arenas et al., 2026).

Perbedaan hasil antar penelitian menunjukkan bahwa tidak semua RCA memberikan pengaruh negatif yang sama. RCA yang berasal dari beton mutu tinggi dan melalui proses pengolahan yang baik dapat menghasilkan karakteristik yang mendekati agregat alami. Beberapa studi bahkan melaporkan bahwa penggunaan RCA hingga 40%–50% masih mampu menghasilkan beton dengan performa yang memenuhi persyaratan struktural apabila didukung oleh desain campuran yang tepat (Diosa-Arenas et al., 2026). Oleh karena itu, karakteristik RCA tidak hanya ditentukan oleh persentase penggantian agregat, tetapi juga oleh kualitas material asal, kadar mortar yang melekat, dan kondisi pengolahan agregat daur ulang.

Berbeda dengan RCA, *Recycled Concrete Powder* (RCP) merupakan material berbentuk serbuk halus yang dihasilkan dari proses penghancuran dan penggilingan limbah beton. Dalam campuran beton, RCP umumnya digunakan sebagai bahan pengisi (*filler*) maupun pengganti sebagian semen. Dibandingkan sebagai pengganti semen dalam jumlah besar, RCP lebih efektif berperan sebagai *filler* karena ukuran partikelnya yang halus mampu mengisi rongga-rongga mikro pada pasta semen dan meningkatkan kepadatan matriks beton. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RCP pada kadar rendah hingga sedang, umumnya berkisar antara 5–15%, dapat mempertahankan bahkan meningkatkan kuat tekan beton akibat efek pengisian pori (*filler effect*) dan peningkatan kekompakan struktur internal beton (Wan et al., 2023; McNeil & Kang, 2013). Selain itu,

partikel halus RCP juga berperan sebagai pusat pembentukan produk hidrasi sehingga membantu memperbaiki mikrostruktur beton.

Meskipun demikian, pengaruh RCP sangat bergantung pada kadar penggunaannya. Pada kadar optimum, RCP dapat mengurangi porositas dan menghasilkan mikrostruktur yang lebih padat sehingga meningkatkan kualitas beton secara keseluruhan. Namun, ketika kadar RCP melebihi nilai optimum, kuat tekan beton cenderung menurun akibat berkurangnya jumlah semen aktif yang berpartisipasi dalam proses hidrasi. Kondisi tersebut juga dapat menyebabkan peningkatan porositas dan terbentuknya zona yang kurang padat dalam matriks semen (Wan et al., 2023). Dari aspek durabilitas, mikrostruktur yang lebih rapat akibat penggunaan RCP pada kadar optimum mampu menghambat penetrasi ion sulfat sehingga berpotensi meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan natrium sulfat. Sebaliknya, penggunaan RCP yang terlalu tinggi dapat memperbesar risiko degradasi akibat berkurangnya produk hidrasi dan meningkatnya jalur penetrasi ion agresif ke dalam beton (Shawnim & Mohammad, 2019).

3.2 Pengaruh RCA dan RCP terhadap Karakteristik Mekanis Beton

Karakteristik mekanis beton, khususnya kuat tekan, sangat dipengaruhi oleh penggunaan material daur ulang seperti RCA dan RCP. Berdasarkan hasil kajian literatur, penggunaan RCA cenderung memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap penurunan kuat tekan dibandingkan penggunaan RCP. Hal ini disebabkan oleh keberadaan mortar lama yang melekat pada RCA sehingga meningkatkan porositas dan menurunkan kualitas zona transisi antar muka (*Interfacial Transition Zone*) antara agregat dan pasta semen (Malesev et al., 2010). Beberapa penelitian melaporkan bahwa penggunaan RCA hingga 25% umumnya masih menghasilkan kuat tekan yang mendekati beton normal, sedangkan pada tingkat substitusi 50% mulai terlihat penurunan yang lebih nyata. Pada penggunaan RCA 100%, penurunan kuat tekan menjadi lebih signifikan akibat meningkatnya porositas dan daya serap air agregat daur ulang (Diosa-Arenas et al., 2026). Meskipun demikian, hasil yang diperoleh antar penelitian tidak selalu sama. Beberapa studi menunjukkan bahwa RCA yang berasal dari beton mutu tinggi dan melalui proses pengolahan yang baik masih dapat menghasilkan beton dengan performa mekanis yang memadai bahkan pada tingkat substitusi yang relatif tinggi (Diosa-Arenas et al., 2026). Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kualitas RCA, metode pengolahan, serta mutu beton asal menjadi faktor penting yang memengaruhi hasil penelitian.

Berbeda dengan RCA, penggunaan RCP dalam jumlah tertentu justru berpotensi meningkatkan karakteristik mekanis beton. Sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RCP pada kisaran 5–15% sebagai pengganti semen mampu mempertahankan atau meningkatkan kuat tekan beton melalui efek *filler* dan peningkatan kepadatan mikrostruktur (Wan et al., 2023; McNeil & Kang, 2013). Pada kadar tersebut, partikel halus RCP mengisi rongga-rongga mikro dalam pasta semen sehingga menghasilkan beton yang lebih kompak. Namun, ketika kadar RCP melebihi nilai optimum, kuat tekan beton cenderung menurun akibat berkurangnya jumlah semen aktif yang berperan dalam proses hidrasi (Wan et al., 2023). Jika dibandingkan secara langsung, RCA lebih banyak memengaruhi fase agregat dan kualitas ITZ, sedangkan RCP lebih berpengaruh pada fase pasta semen dan struktur pori beton. Oleh karena itu, kombinasi RCA dan RCP berpotensi menghasilkan efek yang saling melengkapi, di mana penurunan kualitas akibat penggunaan RCA dapat dikompensasi oleh peningkatan kepadatan mikrostruktur yang diberikan oleh RCP. Temuan ini menunjukkan bahwa optimasi

proporsi kedua material menjadi faktor penting dalam menghasilkan beton daur ulang dengan karakteristik mekanis yang tetap memenuhi persyaratan struktural.

3.3 Pengaruh Paparan Natrium Sulfat terhadap Durabilitas Beton

Paparan natrium sulfat (Na_2SO_4) merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan penurunan durabilitas beton pada lingkungan agresif. Pada beton normal, ion sulfat yang masuk ke dalam pori-pori beton akan bereaksi dengan produk hidrasi semen, terutama kalsium aluminat hidrat dan kalsium hidroksida, sehingga membentuk *ettringite* dan *gypsum*. Kedua produk reaksi tersebut bersifat ekspansif dan menyebabkan peningkatan volume internal beton yang dapat memicu retak mikro, pengelupasan permukaan (*spalling*), kehilangan massa, serta penurunan kuat tekan seiring bertambahnya waktu paparan (Zhang et al., 2024; Ikumi et al., 2016). Pada tahap awal, pembentukan produk sulfat dapat mengisi sebagian rongga beton sehingga struktur tampak lebih padat, namun pada paparan yang lebih lama tekanan internal akibat ekspansi akan mendominasi dan mempercepat proses kerusakan.

Pada beton yang menggunakan RCA, dampak serangan sulfat umumnya lebih besar dibandingkan beton normal. Hal ini disebabkan oleh tingginya porositas dan daya serap air RCA yang mempercepat penetrasi ion sulfat ke dalam beton. Beberapa penelitian melaporkan bahwa peningkatan kadar RCA menyebabkan kerusakan akibat sulfat menjadi lebih signifikan, yang ditunjukkan oleh meningkatnya kehilangan massa, perkembangan retak mikro yang lebih cepat, serta penurunan kuat tekan yang lebih besar dibandingkan beton dengan agregat alami (Shawnim & Mohammad, 2019; Colman et al., 2020). Meskipun demikian, tingkat kerusakan tidak selalu sama pada setiap penelitian karena dipengaruhi oleh kualitas RCA, kadar penggantian agregat, rasio air-semen, serta mutu beton asal. Pada kadar RCA rendah hingga sedang, ketahanan terhadap sulfat masih dapat dipertahankan pada tingkat yang dapat diterima, sedangkan pada kadar RCA yang tinggi kerusakan akibat ekspansi dan retak internal menjadi lebih dominan.

Berbeda dengan RCA, penggunaan RCP pada kadar optimum cenderung memberikan pengaruh positif terhadap ketahanan beton terhadap serangan sulfat. Partikel halus RCP mampu memperbaiki distribusi ukuran pori dan meningkatkan kepadatan matriks semen sehingga menghambat penetrasi ion sulfat ke dalam beton (Wan et al., 2023; Shawnim & Mohammad, 2019). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa beton yang mengandung RCP mengalami perkembangan retak yang lebih lambat dan kehilangan kuat tekan yang lebih kecil dibandingkan beton tanpa RCP. Namun, manfaat tersebut hanya terjadi pada kadar penggunaan tertentu. Apabila kadar RCP terlalu tinggi, jumlah semen aktif akan berkurang sehingga produk hidrasi yang terbentuk menjadi lebih sedikit dan struktur beton menjadi lebih rentan terhadap penetrasi ion agresif (Wan et al., 2023). Dengan demikian, pengaruh RCP terhadap durabilitas beton sangat bergantung pada proporsi penggunaannya.

Secara umum, kerusakan beton akibat natrium sulfat terjadi melalui beberapa mekanisme yang saling berkaitan, yaitu pembentukan produk ekspansif, munculnya retak mikro, kehilangan massa, dan penurunan kuat tekan. Pada beton normal, kerusakan didominasi oleh pembentukan *ettringite* dan *gypsum* yang berkembang secara bertahap. Pada beton RCA, kerusakan cenderung lebih cepat karena jalur penetrasi ion sulfat lebih banyak akibat porositas yang tinggi. Sementara itu, penggunaan RCP pada kadar optimum dapat membantu memperlambat proses degradasi melalui perbaikan mikrostruktur beton. Oleh karena itu, kombinasi RCA dan RCP menjadi menarik untuk diteliti lebih lanjut

karena berpotensi menghasilkan keseimbangan antara pemanfaatan material daur ulang dan peningkatan ketahanan beton terhadap lingkungan sulfat.

3.4 Evaluasi Kerusakan Beton Menggunakan UPV

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) merupakan metode pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Testing*) yang banyak digunakan untuk mengevaluasi kualitas internal beton berdasarkan kecepatan rambat gelombang ultrasonik. Semakin padat dan homogen struktur beton, semakin tinggi nilai UPV yang diperoleh. Sebaliknya, keberadaan pori, retak mikro, dan cacat internal akan memperlambat perambatan gelombang sehingga menurunkan nilai UPV. Oleh karena itu, UPV sering digunakan sebagai indikator awal untuk menilai tingkat kerusakan beton tanpa merusak benda uji. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa nilai UPV memiliki korelasi yang kuat dengan kuat tekan beton, sehingga dapat digunakan untuk memprediksi kualitas beton secara tidak langsung (Tang et al., 2019). Hubungan ini menjadi penting terutama pada penelitian beton daur ulang karena perubahan mikrostruktur yang terjadi akibat penggunaan RCA dan RCP dapat tercermin melalui perubahan nilai UPV.

Pada beton yang menggunakan RCA, nilai UPV umumnya lebih rendah dibandingkan beton normal akibat tingginya porositas dan keberadaan mortar lama yang masih melekat pada agregat. Struktur yang kurang homogen menyebabkan gelombang ultrasonik mengalami hambatan saat merambat melalui beton. Beberapa penelitian melaporkan bahwa peningkatan kadar RCA diikuti dengan penurunan nilai UPV yang sejalan dengan penurunan kuat tekan beton (Diosa-Arenas et al., 2026; Malesev et al., 2010). Namun demikian, penelitian lain menunjukkan bahwa penggunaan RCA berkualitas tinggi masih mampu menghasilkan nilai UPV yang berada pada kategori beton baik hingga sangat baik, terutama pada kadar substitusi yang tidak terlalu tinggi (Tang et al., 2019). Temuan ini menunjukkan bahwa kualitas RCA memiliki pengaruh yang besar terhadap hasil pengujian UPV dan tidak semua beton RCA menunjukkan tingkat kerusakan internal yang sama.

Berbeda dengan RCA, penggunaan RCP pada kadar optimum cenderung meningkatkan nilai UPV karena mampu memperbaiki kepadatan matriks semen dan mengurangi jumlah pori dalam beton. Efek *filler* yang dihasilkan RCP menyebabkan struktur beton menjadi lebih kompak sehingga gelombang ultrasonik dapat merambat lebih cepat (Wan et al., 2023; McNeil & Kang, 2013). Akan tetapi, ketika kadar RCP terlalu tinggi, penurunan jumlah semen aktif dapat menyebabkan terbentuknya struktur yang kurang padat sehingga nilai UPV kembali menurun. Hasil ini sejalan dengan tren perubahan kuat tekan yang menunjukkan bahwa peningkatan kualitas mikrostruktur akibat RCP hanya terjadi pada rentang kadar tertentu. Dengan demikian, UPV dapat digunakan sebagai indikator yang efektif untuk mengevaluasi keberhasilan penggunaan RCP dalam memperbaiki kualitas internal beton.

Pada beton yang terpapar natrium sulfat, nilai UPV umumnya mengalami penurunan seiring bertambahnya tingkat kerusakan yang terjadi. Pembentukan *ettringite* dan *gypsum* pada tahap awal terkadang menyebabkan peningkatan kerapatan lokal akibat terisinya sebagian rongga beton. Namun, seiring berjalannya waktu, ekspansi produk reaksi sulfat akan menghasilkan retak mikro yang memperbesar jalur rambatan gelombang dan mengurangi homogenitas beton, sehingga nilai UPV menurun secara bertahap (Ikumi et al., 2016). Kondisi ini menunjukkan bahwa UPV tidak hanya mampu menggambarkan kualitas beton pada kondisi awal, tetapi juga efektif digunakan untuk memantau perkembangan kerusakan akibat serangan sulfat. Oleh karena itu, dalam penelitian beton yang menggunakan kombinasi RCA dan RCP, pengujian UPV menjadi

penting karena mampu mengintegrasikan informasi mengenai karakteristik mekanis dan kondisi mikrostruktur beton dalam mengevaluasi tingkat degradasi akibat paparan natrium sulfat.

3.5 Analisis Mikrostruktur Beton Menggunakan SEM

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengevaluasi perubahan mikrostruktur beton akibat penggunaan material daur ulang maupun paparan lingkungan agresif. Berbeda dengan pengujian kuat tekan dan UPV yang memberikan informasi pada skala makro, SEM memungkinkan pengamatan langsung terhadap distribusi pori, kualitas zona transisi antar muka (*Interfacial Transition Zone*), produk hidrasi, serta perkembangan retak mikro di dalam beton. Oleh karena itu, SEM menjadi alat yang penting untuk menjelaskan mekanisme yang mendasari perubahan karakteristik mekanis dan durabilitas beton. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa beton yang memiliki mikrostruktur lebih padat umumnya menunjukkan kuat tekan dan nilai UPV yang lebih tinggi dibandingkan beton dengan jumlah pori dan retak mikro yang lebih banyak (Wan et al., 2023; Tang et al., 2019).

Pada beton yang menggunakan RCA, hasil SEM menunjukkan adanya ITZ yang lebih lemah dibandingkan beton normal akibat keberadaan mortar lama yang masih melekat pada permukaan agregat. Mortar lama tersebut umumnya memiliki jumlah pori yang lebih besar dan retak mikro yang telah terbentuk sebelum RCA digunakan kembali dalam campuran beton. Kondisi ini menyebabkan terbentuknya zona transisi yang lebih rentan terhadap propagasi retak ketika beton menerima beban maupun terpapar lingkungan agresif (Malesev et al., 2010). Namun, beberapa penelitian melaporkan bahwa RCA yang berasal dari beton mutu tinggi dan melalui proses pengolahan yang baik dapat menghasilkan mikrostruktur yang lebih homogen dengan jumlah retak yang lebih sedikit, sehingga mampu mempertahankan performa mekanis beton pada tingkat substitusi tertentu (Diosa-Arenas et al., 2026). Temuan ini menjelaskan mengapa hasil kuat tekan beton RCA sering berbeda antar penelitian meskipun menggunakan persentase penggantian agregat yang relatif sama.

Berbeda dengan RCA, penggunaan RCP cenderung memberikan dampak positif terhadap mikrostruktur beton apabila digunakan pada kadar optimum. Hasil SEM menunjukkan bahwa partikel halus RCP mampu mengisi rongga-rongga mikro pada pasta semen dan menghasilkan struktur yang lebih padat serta homogen (Wan et al., 2023). Selain berperan sebagai *filler*, RCP juga dapat menjadi pusat pembentukan produk hidrasi baru yang membantu memperbaiki kualitas matriks semen (McNeil & Kang, 2013). Namun, ketika kadar RCP terlalu tinggi, jumlah partikel yang kurang reaktif meningkat sehingga menyebabkan terbentuknya area dengan ikatan yang lebih lemah dan peningkatan porositas. Kondisi ini sejalan dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa peningkatan kadar RCP di atas nilai optimum cenderung diikuti oleh penurunan kuat tekan dan kualitas beton secara keseluruhan (Wan et al., 2023).

Pada beton yang terpapar natrium sulfat, analisis SEM menunjukkan perubahan mikrostruktur yang jauh lebih kompleks. Beberapa penelitian mengidentifikasi terbentuknya kristal *ettringite* berbentuk jarum dan *gypsum* yang mengisi pori-pori beton sebagai hasil reaksi antara ion sulfat dan produk hidrasi semen (Zhang et al., 2024; Ikumi et al., 2016). Pada tahap awal, produk reaksi tersebut dapat mengurangi volume pori yang terlihat pada citra SEM. Namun, seiring bertambahnya waktu paparan, akumulasi *ettringite* dan *gypsum* menghasilkan tekanan internal yang memicu terbentuknya retak mikro dan memperbesar kerusakan struktur beton. Kerusakan ini terlihat lebih dominan

pada beton yang mengandung RCA dalam jumlah tinggi karena porositas yang lebih besar mempercepat penetrasi ion sulfat ke dalam matriks beton (Shawnim & Mohammad, 2019; Colman et al., 2020). Sebaliknya, beton yang mengandung RCP pada kadar optimum menunjukkan mikrostruktur yang lebih rapat sehingga perkembangan retak akibat serangan sulfat cenderung lebih lambat (Wan et al., 2023).

Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa SEM tidak hanya berfungsi sebagai alat observasi mikrostruktur, tetapi juga sebagai metode verifikasi terhadap hasil pengujian mekanis dan durabilitas. Beton dengan mikrostruktur yang lebih padat, ITZ yang lebih baik, dan jumlah retak mikro yang lebih sedikit umumnya menunjukkan kuat tekan yang lebih tinggi serta nilai UPV yang lebih baik. Sebaliknya, peningkatan porositas, kerusakan ITZ, dan perkembangan retak akibat serangan sulfat akan tercermin pada penurunan kuat tekan dan nilai UPV. Dengan demikian, analisis SEM memberikan bukti visual yang memperkuat hubungan antara penggunaan RCA dan RCP, perubahan mikrostruktur, serta performa beton pada lingkungan natrium sulfat.

3.6 Hubungan Kuat Tekan, UPV, dan SEM pada Beton RCA-RCP Terpapar Sulfat

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa kuat tekan, UPV, dan SEM memiliki hubungan yang erat dalam mengevaluasi kinerja beton. Kuat tekan menggambarkan kemampuan beton dalam menahan beban, UPV menunjukkan tingkat kepadatan dan homogenitas internal beton, sedangkan SEM memberikan gambaran visual mengenai kondisi mikrostruktur yang memengaruhi kedua parameter tersebut. Beberapa penelitian melaporkan bahwa beton dengan nilai UPV yang tinggi umumnya memiliki kuat tekan yang lebih besar karena didukung oleh struktur internal yang lebih padat dan jumlah pori yang lebih sedikit (Tang et al., 2019). Sebaliknya, peningkatan porositas dan retak mikro yang teramati melalui SEM sering diikuti oleh penurunan nilai UPV dan kuat tekan beton (Ikumi et al., 2016).

Pada beton yang menggunakan RCA, keberadaan mortar lama yang masih melekat pada agregat menyebabkan meningkatnya porositas dan menurunkan kualitas zona transisi antar muka (ITZ) (Malesev et al., 2010). Kondisi tersebut terlihat pada hasil SEM berupa struktur yang kurang homogen dan keberadaan retak mikro di sekitar agregat daur ulang. Mikrostruktur yang lebih berpori menyebabkan rambatan gelombang ultrasonik menjadi kurang efektif sehingga nilai UPV menurun. Penurunan kualitas internal tersebut pada akhirnya berdampak pada berkurangnya kuat tekan beton. Namun, beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RCA berkualitas tinggi masih mampu menghasilkan mikrostruktur yang lebih baik sehingga nilai UPV dan kuat tekan yang diperoleh tetap berada pada kategori yang dapat diterima (Diosa-Arenas et al., 2026; Tang et al., 2019).

Berbeda dengan RCA, penggunaan RCP pada kadar optimum mampu memperbaiki mikrostruktur beton melalui efek *filler* dan peningkatan kepadatan matriks semen. Hasil SEM menunjukkan berkurangnya jumlah pori dan meningkatnya kekompakan pasta semen pada campuran yang mengandung RCP (Wan et al., 2023; McNeil & Kang, 2013). Perbaikan mikrostruktur tersebut menyebabkan gelombang ultrasonik dapat merambat lebih cepat sehingga nilai UPV meningkat dan diikuti oleh peningkatan atau mempertahankan kuat tekan beton. Akan tetapi, apabila kadar RCP terlalu tinggi, jumlah semen aktif yang berkurang dapat menyebabkan peningkatan porositas dan penurunan kualitas mikrostruktur, yang kemudian tercermin pada menurunnya nilai UPV dan kuat tekan (Wan et al., 2023).

Pada kondisi paparan natrium sulfat, hubungan antara ketiga parameter tersebut menjadi semakin jelas. Pembentukan *ettringite* dan *gypsum* menyebabkan ekspansi internal yang memicu retak mikro dan kerusakan mikrostruktur beton, sebagaimana terlihat pada hasil SEM (Zhang et al., 2024; Ikumi et al., 2016). Kerusakan ini mengganggu rambatan gelombang ultrasonik sehingga nilai UPV menurun, kemudian diikuti oleh penurunan kuat tekan beton. Dengan demikian, perubahan kuat tekan akibat serangan sulfat dapat dijelaskan melalui perubahan mikrostruktur yang diamati menggunakan SEM dan perubahan kualitas internal yang terdeteksi melalui UPV. Integrasi ketiga parameter tersebut memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme degradasi beton RCA-RCP pada lingkungan sulfat dibandingkan jika hanya menggunakan satu metode pengujian saja.

3.7 Research Gap dan Arah Penelitian Selanjutnya

Berdasarkan hasil kajian literatur, penelitian mengenai RCA dan RCP telah berkembang cukup pesat dalam beberapa tahun terakhir. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada penggunaan RCA atau RCP secara terpisah dalam campuran beton. Penelitian terkait RCA umumnya membahas pengaruhnya terhadap kuat tekan, porositas, dan durabilitas beton (Diosa-Arenas et al., 2026; Malesev et al., 2010), sedangkan penelitian mengenai RCP lebih banyak menitikberatkan pada perannya sebagai *filler* atau pengganti sebagian semen untuk memperbaiki mikrostruktur beton (Wan et al., 2023; McNeil & Kang, 2013). Dengan demikian, informasi mengenai interaksi antara RCA dan RCP dalam satu sistem beton masih relatif terbatas.

Selain itu, kajian mengenai ketahanan beton daur ulang terhadap paparan natrium sulfat sebagian besar masih dilakukan pada beton yang hanya menggunakan RCA atau hanya menggunakan RCP. Padahal, kombinasi kedua material tersebut berpotensi menghasilkan mekanisme yang berbeda dibandingkan penggunaan tunggal. RCA cenderung meningkatkan porositas dan mempercepat penetrasi ion sulfat, sedangkan RCP berpotensi memperbaiki struktur pori dan meningkatkan kepadatan matriks semen (Wan et al., 2023; Shawnim & Mohammad, 2019). Oleh karena itu, masih diperlukan penelitian yang mengevaluasi sejauh mana penggunaan RCP mampu mengkompensasi kelemahan RCA terhadap serangan sulfat.

Kesenjangan penelitian lainnya terletak pada metode evaluasi yang digunakan. Sebagian besar penelitian hanya berfokus pada satu atau dua parameter, seperti kuat tekan dan kehilangan massa, tanpa menghubungkannya dengan hasil pengujian UPV maupun analisis mikrostruktur menggunakan SEM (Ikumi et al., 2016; Tang et al., 2019). Padahal, integrasi ketiga parameter tersebut dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme degradasi beton akibat serangan sulfat. Hubungan antara perubahan mikrostruktur, kualitas internal beton, dan penurunan karakteristik mekanis masih belum banyak dibahas secara terpadu, khususnya pada beton yang menggunakan kombinasi RCA dan RCP.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada evaluasi beton yang menggunakan kombinasi RCA dan RCP dengan berbagai variasi proporsi material daur ulang pada lingkungan natrium sulfat. Selain pengujian kuat tekan, penelitian juga perlu mengintegrasikan pengujian UPV dan SEM untuk menjelaskan hubungan antara perubahan mikrostruktur, kualitas internal, dan performa mekanis beton secara menyeluruh. Pendekatan tersebut diharapkan dapat menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai potensi penggunaan RCA dan RCP

sebagai material beton berkelanjutan yang memiliki ketahanan yang baik terhadap lingkungan agresif.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur, penggunaan RCA dan RCP memberikan pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik beton. Penggunaan RCA pada kadar yang tinggi cenderung meningkatkan porositas dan melemahkan *Interfacial Transition Zone* (ITZ) akibat keberadaan mortar lama yang melekat pada agregat, sehingga menyebabkan penurunan kuat tekan dan durabilitas beton. Sebaliknya, penggunaan RCP pada kadar optimum berperan sebagai *filler* yang mampu memperbaiki kepadatan mikrostruktur, mengurangi porositas, serta meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi ion sulfat. Pada lingkungan yang mengandung natrium sulfat, proses degradasi beton terjadi melalui pembentukan *ettringite* dan *gypsum* yang memicu ekspansi, retak mikro, penurunan nilai UPV, serta penurunan kuat tekan beton.

Kajian ini juga menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang erat antara kuat tekan, nilai UPV, dan kondisi mikrostruktur yang diamati menggunakan SEM. Perubahan mikrostruktur akibat penggunaan RCA, RCP, maupun paparan natrium sulfat secara langsung memengaruhi kualitas internal beton yang kemudian tercermin pada perubahan nilai UPV dan kuat tekan. Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji penggunaan RCA maupun RCP secara terpisah, penelitian mengenai kombinasi kedua material tersebut pada beton yang terpapar natrium sulfat masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu dilakukan secara eksperimental dengan mengintegrasikan pengujian kuat tekan, UPV, dan SEM pada berbagai proporsi kombinasi RCA–RCP serta variasi tingkat paparan natrium sulfat untuk memperoleh komposisi optimum yang mampu menghasilkan beton berkelanjutan dengan karakteristik mekanis dan durabilitas yang lebih baik.

Referensi

- Bai, H., Li, Y., & Dai, D. (2022). Study on the Durability of Recycled Powder Concrete against Sulfate Attack under Partial Immersion Condition. *Journal of Renewable Materials*, 10, 1–20. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.020148>
- Colman, C., Bulteel, D., Thiery, V., Remond, S., Michel, F., & Courard, L. (2020). Internal Sulfate Attack in Mortars Containing Contaminated Fine Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 1–28.
- Diosa-Arenas, J. S., Rojas-Manzano, M. A., Madera-Sierra, I. E., & Maury-Ramírez, A. (2026). Influence of High-Performance Recycled Aggregates on Mechanical Properties of High-Strength Concrete. *Infrastructures*, 11(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/infrastructures11020066>
- Gu, R., Wang, J., Li, B., Qi, D., Gao, X., & Yang, Z. (2024). Experimental Study on Mechanical Properties and Compressive Constitutive Model of Recycled Concrete under Sulfate Attack Considering the Effects of Multiple Factors. *Buildings*, 14(9), 1–24. <https://doi.org/10.3390/buildings14092761>
- Hewayde, E., Pachenari, A., & Al-eleaj, H. (2020). Resistance of Recycled Aggregate Concrete (RAC) Subjected to Drying-Wetting Cycles to Attack of Magnesium and Sodium Sulfates. *Journal of Engineering*, 2020, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/9746341>
- Ikumi, T., Segura, I., Cavalaro, S. H. P., & Aguado, A. (2016). *Simplified Methodology to Evaluate the External Sulfate Attack in Concrete Structures*. 1–25.

- Malesev, M., Radonjanin, V., & Marinkovic, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, 2, 1204–1225. <https://doi.org/10.3390/su2051204>
- McGinnis, M. J., Davis, M., Rosa, A. D. La, Weldon, B. D., & Kurama, Y. C. (2017). Strength and Stiffness of Concrete with Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 1–41.
- McNeil, K., & Kang, T. H. (2013). Recycled Concrete Aggregates: A Review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), 61–69. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
- Najaf, E., & Abbasi, H. (2022). Using Recycled Concrete Powder, Waste Glass Powder, and Plastic Powder to Improve the Mechanical Properties of Compacted Concrete: Cement Elimination Approach. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2022/9481466>
- Santill, L. R., Zega, C. J., & Irassar, E. (2024). Current Knowledge and Pending Research on Sulfate Resistance of Recycled Aggregate Concrete. *Sustainability*, 16, 1–21.
- Shaju, A. C., Nagarajan, P., Sudhakumar, J., Thomas, B. S., Das, S., & Berhe, M. A. (2026). Sustainable Enhancement of Chemical Durability and Microstructural Stability in Cement Mortar Incorporating Sodium Silicate–Silica Fume Treated Recycled Fine Aggregate. *Scientific Reports*, 16, 1–25.
- Shawnim, P., & Mohammad, F. (2019). Porosity, Permeability and Microstructure of Foamed Concrete Through SEM Images. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 10(1), 22–33.
- Syahputra, B., Megasari, S. W., & Soehardi, F. (2024). Pengaruh Pemanfaatan Recycled Concrete Aggregate Sebagai Bahan Substitusi Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer. *Jurnal Saintis*, 24(02), 93–102. [https://doi.org/10.25299/saintis.2024.vol24\(02\).19095](https://doi.org/10.25299/saintis.2024.vol24(02).19095)
- Tahwia, A. M., Abdellatief, M., Salah, A., & Youssf, O. (2025). Valorization of Recycled Concrete Powder, Clay Brick Powder, and Volcanic Pumice Powder in Sustainable Geopolymer Concrete. *Scientific Reports*, 15(1), 1–22. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93598-x>
- Tang, Z., Ke, G., Li, W., Tam, V. W. Y., & Zhou, J. L. (2019). Sulfate Attack Resistance of Sustainable Concrete Incorporating Various Industrial Solid Wastes. *Journal of Cleaner Production*, 1–43.
- 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), 1–15. <https://doi.org/10.3390/pr11010203>
- Yan, X., Chen, W., He, Z., Liu, H., Xu, S., Lu, S., Hua, M., & Wang, X. (2025). Modification Effects and Mechanism of Cement Paste Wrapping on Sulfate-Containing Recycled Aggregate. *Materials*, 18, 1–19.
- Zhang, C., Li, J., Yu, M., Lu, Y., & Liu, S. (2024). Mechanism and Performance Control Methods of Sulfate Attack on Concrete: A Review. *Materials*, 17(19), 1–28. <https://doi.org/10.3390/ma17194836>
- Zhong, C., Wang, D., Zhang, L., Mao, W., Xing, S., Chen, J., & Xiao, Y. (2024). Durability Analysis of Metakaolin Recycled Concrete under Sulphate Dry and Wet Cycle. *Scientific Reports*, 14, 1–23. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66803-6>