

No. 2/JHI/SP/X/26

Jakarta, 8 Oktober 2026

Kepada Yth
Tim ISBN dan KDT
Perpustakaan Nasional Republik Indonesia
Jalan Salemba Raya No. 28 A
DKI Jakarta 10430

Hal : Permohonan ISBN dan KDT

Dengan Hormat,

Kami Penerbit Yayasan John Hi-Tech Idetama, anggota IKAPI DKI Jakarta no. Anggota: 566/DKI/2018 Pada kesempatan ini, kami mengajukan permohonan ISBN dan Barcode untuk buku dengan spesifikasi

- Penerbit : Yayasan John Hi-Tech Idetama
- Judul : : **REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC)**
Rekayasa Particle Packing, Hidrasi, Mikrostruktur, Sifat Mekanik, durabilitas, dan Pengembangan Low -Carbon Ultra-High -Performance Concrete
- Jumlah halaman : 163 halaman
- Jumlah Produksi : 300 eks
- Ukuran : (15,5 x 23 cm)
- Penulis : Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T.
- Rencana terbit di Bulan Oktober 2026 ini, Berikut kami Lampirkan :
 1. Halaman Judul
 2. Balik Halaman Judul
 3. Kata Pengantar
 4. Daftar Isi

Demikian permohonan kami atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Hormat Kami



Prof. Dr. Ir. Jonbi, MT., MM., MSi, INV

REACTIVE POWDER CONCRETE

Rekayasa Particle Packing, Hidrasi, Mikrostruktur, Sifat Mekanik, Durabilitas, dan Pengembangan Low-Carbon Ultra-High-Performance Concrete



Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T.

REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC)

Rekayasa Particle Packing, Hidrasi, Mikrostruktur, Sifat Mekanik, Durabilitas, dan Pengembangan Low-Carbon Ultra-High-Performance Concrete

Penulis:

Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, ST., MT.

Judul Buku:

REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC)

Rekayasa Particle Packing, Hidrasi, Mikrostruktur, Sifat Mekanik, Durabilitas, dan Pengembangan Low-Carbon Ultra-High-Performance Concrete

Penulis:

Dr.Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T.

Editor:

Jonbi

Desain Cover: Dominica Dea Devina

Hak pengarang dan penerbit dilindungi Undang-undang

Penerbit:

Yayasan John Hi-Tech Idetama

Anggota IKAPI No. 566/DKI/2018

Buku Referensi REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC)

SN: 054

Edisi pertama, Cetakan 1, 2026

ISBN:

KATA PENGANTAR

Reactive Powder Concrete (RPC) merupakan salah satu tonggak penting dalam perkembangan beton berperforma sangat tinggi. Konsep RPC dibangun berdasarkan rekayasa sistem partikel dengan menghilangkan agregat kasar, menggunakan partikel halus dan sangat halus, mengendalikan rasio air terhadap binder, memanfaatkan material pozzolanik, serta menggunakan superplasticizer dan serat untuk menghasilkan matriks yang sangat padat dan memiliki kinerja mekanik serta durabilitas tinggi.

Perkembangan RPC kemudian menjadi bagian penting dari evolusi Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). Dalam penelitian modern, fokus RPC tidak lagi hanya diarahkan pada pencapaian kuat tekan setinggi mungkin, tetapi juga pada optimasi workability, fracture behavior, durability, biaya, embodied carbon, penggunaan supplementary cementitious materials (SCM), serta efisiensi material.

Kajian mutakhir menunjukkan bahwa tantangan utama RPC/UHPC adalah tingginya intensitas binder dan energi pada sebagian formulasi konvensional. Karena itu, penelitian 2023–2026 semakin banyak diarahkan pada sustainable RPC/UHPC melalui pemanfaatan SCM, limbah industri, material daur ulang, optimasi particle packing, hybrid fiber, internal curing, serta pendekatan life-cycle assessment.

Monograf ini disusun untuk mengintegrasikan aspek material, desain campuran, hidrasi, mikrostruktur, sifat mekanik, durabilitas, optimasi dan sustainability RPC dalam satu kerangka ilmiah. Dengan demikian, RPC dipandang bukan hanya sebagai beton berkekuatan sangat tinggi, tetapi sebagai material cementitious hasil rekayasa multiskala.

Jakarta, Oktober 2026

Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, ST., MT

DAFTAR ISI

Kata Pengantar	iii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	v
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Evolusi RPC menuju UHPC	13
1.3 Permasalahan RPC Konvensional.....	32
1.4 Rumusan Masalah	38
1.5 Tujuan.....	38
1.6 Urgensi Penelitian	39
1.7 Kebaruan dan Posisi Keilmuan	44
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN STATE-OF-THE-ART	53
2.1 Konsep Reactive Powder Concrete.....	53
2.2 RPC dalam Keluarga UHPC	57
2.3 Particle Packing.....	65
2.4 Water-to-Binder Ratio.....	72
2.5 Silica Fume.....	80
2.6 Supplementary Cementitious Materials	81
2.7 Superplasticizer dan Rheology.....	81
2.8 Serat dan Fiber Bridging	82
2.9 Mekanisme Hidrasi	82
2.10 Curing	83
2.11 Mikrostruktur.....	84
2.12 Sifat Mekanik	84
2.13 Durabilitas	85
2.14 Shrinkage.....	85
2.15 Nano-Modified RPC	86
2.16 Sustainable dan Low-Carbon RPC.....	86
2.17 Optimasi Mix Design	87
2.18 AI dan Digital Mix Design.....	87
2.19 Aplikasi Struktural	88
2.20 Research Gap.....	88

BAB 3 METODE PENELITIAN	91
3.1 Kerangka Penelitian	91
3.2 Bahan	92
3.3 Karakterisasi Bahan.....	93
3.4 Perancangan Campuran.....	93
3.5 Optimasi Particle Packing	94
3.6 Pembuatan Benda Uji.....	95
3.7 Curing	95
3.8 Pengujian Fresh Properties	95
3.9 Pengujian Mekanik.....	96
3.10 Pengujian Durabilitas	96
3.11 Karakterisasi Mikrostruktur	97
3.12 DOE/RSM	98
3.13 Analisis Statistik.....	98
3.14 Analisis Sustainability.....	99
 BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	 101
4.1 Karakteristik Material	101
4.2 Particle Packing.....	101
4.3 Workability.....	102
4.4 Kuat Tekan	102
4.5 Kuat Tarik dan Lentur	103
4.6 Toughness.....	103
4.7 Pengaruh Curing.....	104
4.8 Shrinkage.....	104
4.9 Porositas	104
4.10 Durabilitas	105
4.11 SEM-EDS.....	105
4.12 XRD.....	106
4.13 FTIR	106
4.14 TGA/DTG	106
4.15 BET/BJH	107
4.16 Hubungan Mikrostruktur–Strength	107
4.17 Hubungan Mikrostruktur–Durabilitas.....	107

4.18 Pengaruh Fiber	108
4.19 Sustainability	108
4.20 Optimasi Formula.....	109
4.21 Mekanisme Terpadu RPC	110
4.22 Implikasi Engineering	112
4.23 Perilaku Eksperimental Sambungan Balok-Kolom RPC terhadap beban Lateral Siklik.....	112

BAB 5 APLIKASI REACTIVE POWDER CONCRET..... 119

5.1 Pendahuluan	119
5.2 Konsep dan Karakteristik RPC untuk Aplikasi Struktur.....	121
5.3 Peran Sambungan Balok-Kolom dalam Sistem Tahan Gempa	124
5.4 Ringkasan Penelitian Eksperimental Naibaho dkk. (2015)	126
5.5 Prinsip Pembebanan Lateral Siklik dan Instrumentasi	129
5.6 Pola Retak dan Kurva Histeretik.....	130
5.7 Parameter Kinerja: Kekuatan, Daktilitas, Kekakuan dan Energi	132
5.8 Interpretasi Komparatif BU-1, BU-2 dan BU-3	136
5.9 Implikasi untuk Perencanaan Sambungan RPC.....	138
5.10 Produksi, Pengecoran, dan Pengendalian Mutu RPC	140
5.11 Kerangka Verifikasi dan Pengujian Lanjutan	142
5.12 Potensi Aplikasi RPC dan Pertimbangan Ekonomi	144
5.13 Keterbatasan Bukti dan Batas Generalisasi	146
5.14 Rekomendasi Pengembangan di Indonesia.....	147

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN..... 113

6.1 Kesimpulan.....	151
6.2 Kontribusi Keilmuan	152
6.3 Implikasi Engineering	152
6.4 Keterbatasan	152
6.5 Rekomendasi	153

DAFTAR PUSTAKA	155
INDEKS	161



Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T., lahir di Sibuluan (Sarudik/ Sibolga/ Tapanuli Tengah) tanggal 14 Juli 1971. Alamat tinggal di Jalan Haji Bain No. 26 RT 05 RW 06, Kelapa Dua Wetan, Ciracas, Jakarta Timur-13730. Beliau merupakan Dosen pada Universitas Tama Jagakarsa Jakarta, Lulus Sertifikasi Dosen sebagai Dosen Profesional pada Bidang Ilmu Teknik Sipil, Ketua Program Studi (Kaprodik) Program Teknik Sipil (S2) Fakultas Teknik Universitas Tama Jagakarsa Jakarta, Asesor Beban Kerja Dosen (BKD) Kementerian Pendidikan Kebudayaan Riset dan Teknologi (KEMENDIKBUDRISTEK), Kepala Laboratorium PT. Mixindo Abadi Karya (PT MIXINDO), Komisaris Utama PT Barokah Konstruksi Engineering (PT. BAKO), Anggota Biasa Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia (HAKI), Anggota Asosiasi Dosen Indonesia (ADI), Anggota Perkumpulan Ahli Tenaga Anggota Konstruksi Infrastruktur (ATAKI), pernah sebagai Asesor Kompetensi Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP), Pengurus *Indonesian Society of Steel Construction (ISSC)* sebagai Anggota Bidang Pelatihan & Sertifikasi, Anggota Persatuan Insinyur Indonesia (PII), *Member American Institute of Steel Construction (AISC)*, Anggota Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI), Anggota Perkumpulan Ahli Pengkaji Teknis Indonesia (PAPTI), Anggota Perkumpulan Pendirian Ahli Konstruksi Indonesia (PPAKI), Anggota Asosiasi Kelaikan Bangunan Gedung (AKBG), dan Ikatan Asesor Profesional Indonesia (IASPRO). Lulus S1 Teknik Sipil (Struktur), Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan, Universitas Jayabaya pada tahun 1995. Lulus S2 Teknik Sipil (Struktur), Fakultas Teknik, Universitas Indonesia (UI) pada tahun 2009. Lulus S3 Teknik Sipil (Rekayasa Struktur), Fakultas Teknik Sipil & Lingkungan, Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 2015. Lulus Uji Kompetensi, Pendidikan Profesi Insinyur (PPI), Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan pada tahun 2023.

Email:

pioranaptua@jagakarsa.ac.id, piorthnaibaho@gmail.com, dan piorthnaibaho@yahoo.co.id

Scopus ID : 60277458400

SINTA ID : 6803926



Penerbit Yayasan
John Hi-Tech Idetama
Jl. Rawa Bambu Raya No. 17 A
Pasar Minggu Jakarta 12520
Anggota IKAPI No. 566/DKI/2018

Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T.

REACTIVE POWDER CONCRETE

REACTIVE POWDER CONCRETE

Rekayasa Particle Packing, Hidrasi, Mikrostruktur, Sifat Mekanik, Durabilitas, dan Pengembangan Low-Carbon Ultra-High-Performance Concrete



Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T.

REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC)

Rekayasa Particle Packing, Hidrasi, Mikrostruktur, Sifat Mekanik, Durabilitas, dan Pengembangan Low-Carbon Ultra-High-Performance Concrete

Penulis:

Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, ST., MT.

Judul Buku:

REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC)

Rekayasa Particle Packing, Hidrasi, Mikrostruktur, Sifat Mekanik, Durabilitas, dan Pengembangan Low-Carbon Ultra-High-Performance Concrete

Penulis:

Dr.Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T.

Editor:

Jonbi

Desain Cover: Dominica Dea Devina

Hak pengarang dan penerbit dilindungi Undang-undang

Penerbit:

Yayasan John Hi-Tech Idetama

Anggota IKAPI No. 566/DKI/2018

Buku Referensi REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC)

SN: 054

Edisi pertama, Cetakan 1, 2026

ISBN:

KATA PENGANTAR

Reactive Powder Concrete (RPC) merupakan salah satu tonggak penting dalam perkembangan beton berperforma sangat tinggi. Konsep RPC dibangun berdasarkan rekayasa sistem partikel dengan menghilangkan agregat kasar, menggunakan partikel halus dan sangat halus, mengendalikan rasio air terhadap binder, memanfaatkan material pozzolanik, serta menggunakan superplasticizer dan serat untuk menghasilkan matriks yang sangat padat dan memiliki kinerja mekanik serta durabilitas tinggi.

Perkembangan RPC kemudian menjadi bagian penting dari evolusi Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). Dalam penelitian modern, fokus RPC tidak lagi hanya diarahkan pada pencapaian kuat tekan setinggi mungkin, tetapi juga pada optimasi workability, fracture behavior, durability, biaya, embodied carbon, penggunaan supplementary cementitious materials (SCM), serta efisiensi material.

Kajian mutakhir menunjukkan bahwa tantangan utama RPC/UHPC adalah tingginya intensitas binder dan energi pada sebagian formulasi konvensional. Karena itu, penelitian 2023–2026 semakin banyak diarahkan pada sustainable RPC/UHPC melalui pemanfaatan SCM, limbah industri, material daur ulang, optimasi particle packing, hybrid fiber, internal curing, serta pendekatan life-cycle assessment.

Monograf ini disusun untuk mengintegrasikan aspek material, desain campuran, hidrasi, mikrostruktur, sifat mekanik, durabilitas, optimasi dan sustainability RPC dalam satu kerangka ilmiah. Dengan demikian, RPC dipandang bukan hanya sebagai beton berkekuatan sangat tinggi, tetapi sebagai material cementitious hasil rekayasa multiskala.

Jakarta, Oktober 2026

Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, ST., MT

NASKAH PENGAJUNAN ISBN

DAFTAR ISI

Kata Pengantar	iii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	v
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Evolusi RPC menuju UHPC	13
1.3 Permasalahan RPC Konvensional.....	32
1.4 Rumusan Masalah	38
1.5 Tujuan.....	38
1.6 Urgensi Penelitian	39
1.7 Kebaruan dan Posisi Keilmuan	44
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN STATE-OF-THE-ART	53
2.1 Konsep Reactive Powder Concrete.....	53
2.2 RPC dalam Keluarga UHPC	57
2.3 Particle Packing.....	65
2.4 Water-to-Binder Ratio.....	72
2.5 Silica Fume.....	80
2.6 Supplementary Cementitious Materials	81
2.7 Superplasticizer dan Rheology.....	81
2.8 Serat dan Fiber Bridging	82
2.9 Mekanisme Hidrasi	82
2.10 Curing.....	83
2.11 Mikrostruktur.....	84
2.12 Sifat Mekanik	84
2.13 Durabilitas	85
2.14 Shrinkage.....	85
2.15 Nano-Modified RPC	86
2.16 Sustainable dan Low-Carbon RPC.....	86
2.17 Optimasi Mix Design	87
2.18 AI dan Digital Mix Design.....	87
2.19 Aplikasi Struktural	88
2.20 Research Gap.....	88

BAB 3 METODE PENELITIAN.....	91
3.1 Kerangka Penelitian	91
3.2 Bahan.....	92
3.3 Karakterisasi Bahan.....	93
3.4 Perancangan Campuran.....	93
3.5 Optimasi Particle Packing.....	94
3.6 Pembuatan Benda Uji.....	95
3.7 Curing.....	95
3.8 Pengujian Fresh Properties.....	95
3.9 Pengujian Mekanik.....	96
3.10 Pengujian Durabilitas	96
3.11 Karakterisasi Mikrostruktur	97
3.12 DOE/RSM	98
3.13 Analisis Statistik.....	98
3.14 Analisis Sustainability.....	99
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	101
4.1 Karakteristik Material	101
4.2 Particle Packing.....	101
4.3 Workability.....	102
4.4 Kuat Tekan	102
4.5 Kuat Tarik dan Lentur	103
4.6 Toughness.....	103
4.7 Pengaruh Curing.....	104
4.8 Shrinkage.....	104
4.9 Porositas	104
4.10 Durabilitas	105
4.11 SEM-EDS.....	105
4.12 XRD.....	106
4.13 FTIR	106
4.14 TGA/DTG	106
4.15 BET/BJH	107
4.16 Hubungan Mikrostruktur–Strength	107
4.17 Hubungan Mikrostruktur–Durabilitas.....	107

4.18 Pengaruh Fiber	108
4.19 Sustainability	108
4.20 Optimasi Formula.....	109
4.21 Mekanisme Terpadu RPC	110
4.22 Implikasi Engineering	112
4.23 Perilaku Eksperimental Sambungan Balok-Kolom RPC terhadap beban Lateral Siklik.....	112

BAB 5 APLIKASI REACTIVE POWDER CONCRET..... 119

5.1 Pendahuluan	119
5.2 Konsep dan Karakteristik RPC untuk Aplikasi Struktur.....	121
5.3 Peran Sambungan Balok-Kolom dalam Sistem Tahan Gempa	124
5.4 Ringkasan Penelitian Eksperimental Naibaho dkk. (2015)	126
5.5 Prinsip Pembebanan Lateral Siklik dan Instrumentasi	129
5.6 Pola Retak dan Kurva Histeretik.....	130
5.7 Parameter Kinerja: Kekuatan, Daktilitas, Kekakuan dan Energi	132
5.8 Interpretasi Komparatif BU-1, BU-2 dan BU-3	136
5.9 Implikasi untuk Perencanaan Sambungan RPC.....	138
5.10 Produksi, Pengecoran, dan Pengendalian Mutu RPC	140
5.11 Kerangka Verifikasi dan Pengujian Lanjutan	142
5.12 Potensi Aplikasi RPC dan Pertimbangan Ekonomi	144
5.13 Keterbatasan Bukti dan Batas Generalisasi	146
5.14 Rekomendasi Pengembangan di Indonesia.....	147

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN..... 113

6.1 Kesimpulan.....	151
6.2 Kontribusi Keilmuan	152
6.3 Implikasi Engineering	152
6.4 Keterbatasan	152
6.5 Rekomendasi	153

DAFTAR PUSTAKA	155
INDEKS	161

NASKAH PENGAJUNAN ISBN

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan karena memiliki ketersediaan bahan baku yang relatif luas, teknologi produksi yang telah berkembang, serta kemampuan yang baik dalam menahan beban tekan. Beton konvensional pada dasarnya merupakan material komposit yang tersusun atas binder semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan, dalam perkembangannya, berbagai bahan tambahan kimia maupun mineral. Meskipun memiliki keunggulan tersebut, perkembangan kebutuhan infrastruktur modern menuntut material konstruksi dengan tingkat kinerja yang lebih tinggi. Struktur dengan bentang yang semakin panjang, penampang yang semakin tipis, kebutuhan pengurangan berat struktur, umur layanan yang lebih panjang, serta tuntutan terhadap ketahanan pada lingkungan agresif telah mendorong perkembangan teknologi dari Conventional Concrete menuju High-Performance Concrete (HPC) dan selanjutnya menuju Ultra-High-Performance Concrete (UHPC).

Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kualitas beton tidak lagi hanya diarahkan pada peningkatan kuat tekan, tetapi juga pada kemampuan material dalam memenuhi berbagai tuntutan kinerja secara simultan. Kravanja, Mumtaz, dan Kravanja (2024),

dalam kajian komprehensif mengenai UHPC menunjukkan bahwa perkembangan UHPC mencakup aspek material, proses manufaktur, sifat mekanik, inovasi, dampak lingkungan, dan aplikasi. Dengan demikian, UHPC dapat dipahami sebagai hasil evolusi teknologi beton yang mengintegrasikan rekayasa komposisi material, pengendalian mikrostruktur, peningkatan sifat mekanik, durability, serta pertimbangan keberlanjutan.

Salah satu pendekatan fundamental yang memberikan kontribusi besar terhadap perkembangan UHPC adalah Reactive Powder Concrete (RPC). Konsep dasar RPC dikembangkan secara sistematis oleh Richard dan Cheyrezy (1995) melalui pendekatan yang berbeda dari beton konvensional. Dalam konsep tersebut, agregat kasar dihilangkan dan sistem material dirancang menggunakan partikel dengan ukuran yang lebih halus dan distribusi ukuran yang dioptimalkan. Penggunaan silica fume, quartz atau material halus lainnya, rasio air terhadap binder yang rendah, serta pengendalian curing menjadi bagian penting dari desain RPC. Tujuan utamanya adalah menghasilkan susunan partikel dengan *packing density* tinggi sehingga volume rongga di dalam matriks dapat diminimalkan.

Konsep tersebut memiliki implikasi fundamental terhadap mekanisme pembentukan mikrostruktur beton. Pada beton konvensional, agregat kasar berperan sebagai komponen utama pembentuk skeleton material. Sebaliknya, pada RPC, distribusi ukuran partikel dirancang secara

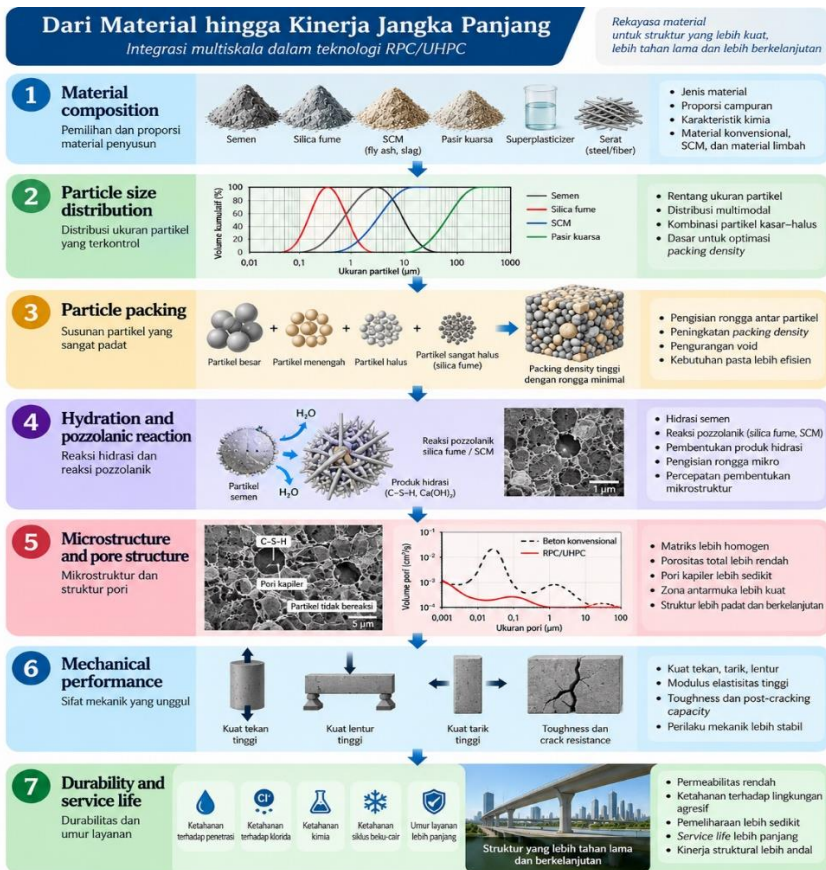
lebih terkontrol sehingga partikel yang lebih kecil dapat mengisi ruang di antara partikel yang lebih besar. Mekanisme ini menghasilkan matriks yang lebih padat dan berpotensi mengurangi volume pori kapiler. Oleh karena itu, hubungan antara particle packing, water-to-binder ratio, hidrasi, porositas, dan sifat mekanik menjadi dasar penting dalam memahami perilaku RPC.

Perkembangan penelitian kemudian menunjukkan bahwa kinerja RPC tidak dapat dijelaskan hanya melalui konsep particle packing. Ge et al. (2023) menunjukkan bahwa RPC mempunyai karakteristik hidrasi dan perkembangan produk hidrasi yang kompleks. Interaksi antara material penyusun dapat memengaruhi proses hidrasi, pembentukan produk hidrasi, serta evolusi mikrostruktur. Penelitian tersebut memperkuat pemahaman bahwa RPC merupakan sistem cementitious composite yang kompleks, di mana perubahan komposisi material dapat memberikan konsekuensi terhadap workability, setting, hidrasi, mikrostruktur, dan sifat akhir material.

Dengan demikian, peningkatan kinerja RPC tidak dapat dipahami hanya sebagai konsekuensi dari peningkatan jumlah semen atau binder. Prinsip utama RPC justru terletak pada rekayasa struktur material dari skala partikel hingga mikrostruktur. Distribusi ukuran partikel menentukan tingkat packing; packing memengaruhi volume rongga; jumlah dan karakteristik air memengaruhi proses hidrasi; hidrasi menghasilkan produk yang mengisi dan memperkuat matriks;

sedangkan mikrostruktur yang terbentuk selanjutnya menentukan sifat mekanik dan durability.

Hubungan tersebut dapat dirumuskan secara konseptual seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Integrasi multiskala dalam teknologi RPC/UHPC

Kerangka tersebut menjadi salah satu alasan mengapa RPC memiliki posisi penting dalam perkembangan UHPC. RPC tidak hanya memperkenalkan beton dengan kuat tekan tinggi, tetapi juga

memperkenalkan cara berpikir baru bahwa kinerja beton dapat direkayasa melalui pengendalian struktur material pada berbagai skala.

Peranan silica fume menjadi sangat penting dalam sistem tersebut. Silica fume memiliki ukuran partikel yang sangat halus sehingga dapat berkontribusi terhadap pengisian ruang antarpartikel sekaligus berpartisipasi dalam reaksi pozzolanik. Namun, penambahan silica fume dalam jumlah besar juga meningkatkan luas permukaan total partikel dan dapat meningkatkan kebutuhan superplasticizer. Oleh karena itu, optimasi silica fume tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan persentase penggantian binder, tetapi harus mempertimbangkan hubungan antara workability, hidrasi, packing density, porositas, dan strength.

Hal tersebut ditunjukkan oleh Šoukal et al. (2023) yang meneliti pengaruh silica fume dan jenis superplasticizer terhadap sifat dan mikrostruktur RPC. Penelitian tersebut memperlihatkan bahwa interaksi antara silica fume dan superplasticizer memiliki peranan penting terhadap karakteristik RPC, terutama karena sistem RPC mempunyai volume partikel halus yang tinggi dan rasio air terhadap binder yang rendah.

Selain silica fume, perkembangan RPC juga mengarah pada penggunaan supplementary cementitious materials (SCM) seperti slag dan fly ash. Penggunaan SCM memiliki dua fungsi penting. Pertama,

SCM dapat berkontribusi terhadap perubahan distribusi ukuran partikel dan packing density. Kedua, SCM dapat berpartisipasi dalam reaksi kimia yang memengaruhi perkembangan produk hidrasi dan mikrostruktur. Oleh sebab itu, penggunaan SCM menjadi salah satu strategi penting untuk mengurangi ketergantungan terhadap clinker sekaligus mengembangkan RPC yang lebih berkelanjutan.

Dalam konteks UHPC, aspek durability juga menjadi semakin penting. Struktur yang mempunyai kuat tekan sangat tinggi belum tentu memberikan manfaat maksimum apabila umur layanannya rendah atau membutuhkan pemeliharaan yang tinggi. Li et al. (2025) melalui kajian komprehensif mengenai durability UHPC di lingkungan agresif menunjukkan bahwa durability harus dipahami dari berbagai tingkat, mulai dari material dan interface hingga tingkat struktur.

Perhatian terhadap durability juga berkaitan erat dengan penggunaan SCM. Song, Banthia, dan Yoo (2025) meninjau pengaruh SCM terhadap durability UHPC dan menunjukkan bahwa SCM tidak hanya relevan dalam konteks pengurangan penggunaan semen, tetapi juga harus dievaluasi berdasarkan pengaruhnya terhadap kemampuan UHPC menghadapi lingkungan agresif. Dengan demikian, strategi pengurangan clinker harus tetap mempertahankan integritas mikrostruktur dan kinerja jangka panjang.

Perkembangan berikutnya adalah integrasi prinsip *sustainability* ke dalam desain RPC/UHPC. Hal ini menjadi penting karena sistem UHPC umumnya menggunakan binder dalam jumlah relatif tinggi dan dapat membutuhkan material khusus seperti silica fume, superplasticizer, serta serat. Walaupun material tersebut diperlukan untuk memperoleh kinerja tinggi, penggunaan material dalam jumlah besar dapat meningkatkan konsumsi sumber daya, biaya produksi, dan embodied carbon.

Wang, Chow, dan Lau (2024) menekankan pentingnya perspektif multiskala dalam meningkatkan *sustainability* pada fiber-reinforced UHPC. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa keberlanjutan tidak dapat dipisahkan dari hubungan antara komposisi material, mikrostruktur, mechanical performance, durability, dan umur layanan.

Dengan perspektif tersebut, UHPC mempunyai suatu paradoks keberlanjutan. Di satu sisi, UHPC membutuhkan binder dan material berkinerja tinggi yang dapat meningkatkan dampak lingkungan pada tahap produksi. Di sisi lain, karakteristik UHPC berupa kekuatan tinggi, durability tinggi, permeabilitas rendah, dan umur layanan panjang dapat memungkinkan pengurangan dimensi elemen, pengurangan volume material struktural, serta pengurangan kebutuhan pemeliharaan. Oleh karena itu, evaluasi *sustainability* tidak cukup dilakukan hanya dengan membandingkan emisi karbon per meter

kubik beton, tetapi perlu mempertimbangkan kinerja struktur dan umur layanannya.

Lande dan Thorstensen (2023) menekankan perlunya strategi sustainability yang komprehensif dalam pengembangan industri UHPC. Perspektif tersebut mengarah pada pemikiran bahwa pengurangan dampak lingkungan harus dilakukan melalui kombinasi efisiensi material, pemilihan bahan, pengurangan clinker, peningkatan umur layanan, serta evaluasi sepanjang siklus hidup. Selanjutnya, Farahzadi et al. (2025) mengevaluasi sustainability UHPC yang menggunakan berbagai SCM. Penelitian tersebut memperkuat arah penelitian menuju penggunaan material alternatif yang dapat mengurangi ketergantungan terhadap semen Portland sekaligus mempertahankan karakteristik kinerja UHPC. Arah perkembangan tersebut semakin jelas dalam kajian Hiew et al. (2026) mengenai low-carbon UHPC.

Perkembangan material, mekanisme, dan perspektif sustainability dalam pengembangan UHPC rendah karbon. Hal ini menunjukkan bahwa konsep low-carbon UHPC telah berkembang dari sekadar substitusi sebagian semen menjadi pendekatan sistematis yang mempertimbangkan komposisi binder, penggunaan SCM, efisiensi material, mekanisme mikrostruktur, kinerja mekanik, durability, dan dampak lingkungan.

Dengan demikian, arah pengembangan RPC/UHPC modern dapat dirumuskan sebagai pergeseran dari:

High Strength menuju: **High Strength + Toughness + Durability + Sustainability + Low Carbon**

Pergeseran tersebut juga mendorong penggunaan material limbah dan material daur ulang sebagai bagian dari strategi circular economy. Sun et al. (2025) menunjukkan perkembangan UHPC yang menggunakan material limbah padat sebagai sumber material dan mengevaluasi keterkaitan antara mechanical strength, microstructure, dan sustainability. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa material limbah dapat dipertimbangkan bukan hanya sebagai bahan pengganti, tetapi sebagai bagian dari rekayasa mikrostruktur material berkinerja tinggi.

Selain aspek material, tantangan lain yang perlu diperhatikan adalah *workability*. Sistem RPC/UHPC mempunyai volume partikel halus yang tinggi dan rasio air terhadap binder yang sangat rendah. Kondisi tersebut dapat menghasilkan matriks yang sangat padat, tetapi pada saat yang sama meningkatkan kebutuhan terhadap superplasticizer dan membuat rheology menjadi lebih kompleks. Karena itu, optimasi RPC harus mempertimbangkan keseimbangan antara packing density dan kemampuan alir material.

Aspek *shrinkage* juga menjadi perhatian penting. Kandungan binder yang tinggi dan rasio air terhadap binder yang rendah dapat meningkatkan risiko autogenous shrinkage. Al Moman et al. (2025) secara khusus mengkaji autogenous shrinkage dan drying shrinkage pada UHPC serta efektivitas internal curing. Hasil kajian tersebut menunjukkan bahwa pengendalian kehilangan kelembapan dan mekanisme internal curing merupakan bagian penting dalam pengembangan UHPC dengan risiko retak yang lebih rendah.

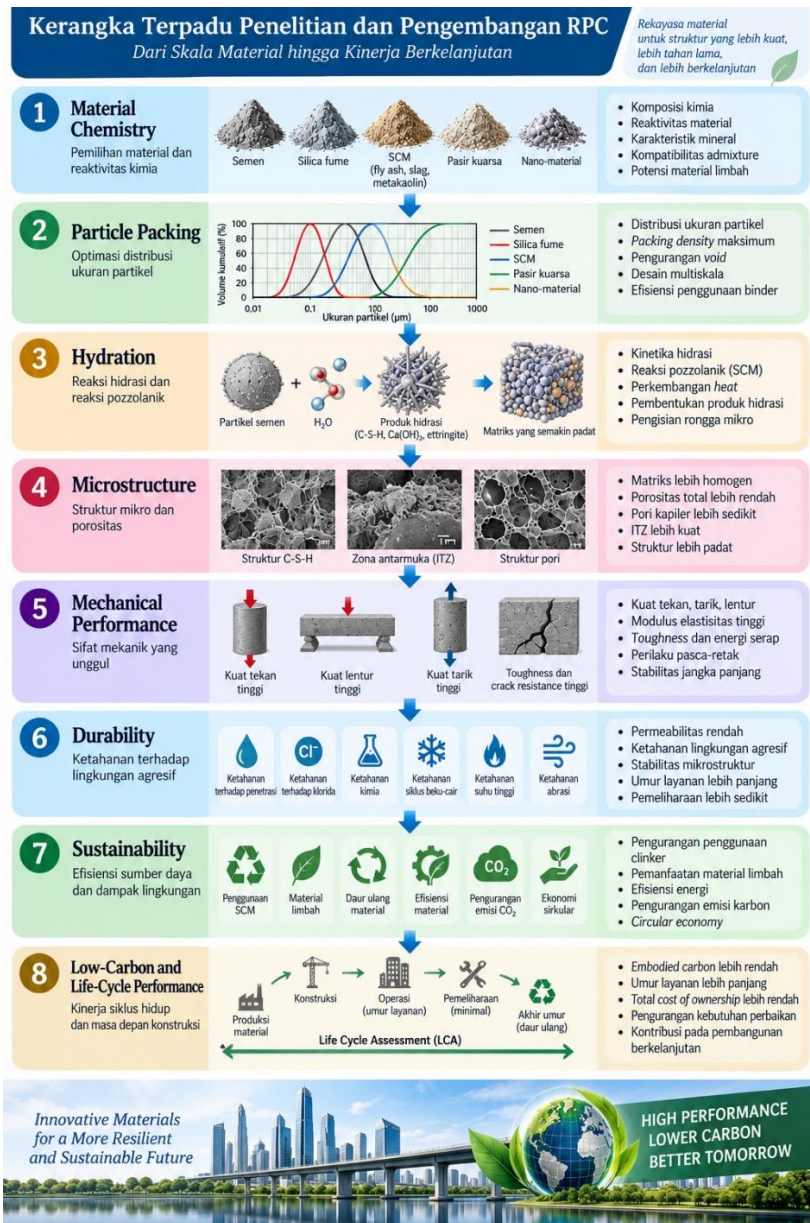
Selain shrinkage, proses curing merupakan parameter penting dalam perkembangan mikrostruktur dan strength RPC/UHPC. Curing yang berbeda dapat menghasilkan tingkat hidrasi dan perkembangan strength yang berbeda. Yaragal et al. (2025) meneliti pengaruh regime dan durasi curing terhadap perkembangan early strength pada fiber-based RPC, sedangkan Özalp et al. (2025) mengevaluasi pengaruh berbagai regime curing terhadap perilaku mekanik RPC. Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa curing merupakan bagian integral dari desain RPC dan bukan sekadar tahap akhir setelah pengecoran.

Berdasarkan perkembangan tersebut, RPC modern perlu dipahami sebagai *multiscale engineered cementitious composite*. Pada skala material, komposisi kimia dan karakteristik partikel menentukan potensi reaksi dan packing. Pada skala mikrostruktur, hidrasi dan reaksi pozzolanik menentukan pembentukan produk hidrasi serta

struktur pori. Pada skala meso, distribusi pori, interface, dan serat menentukan mekanisme transfer tegangan dan perkembangan retak. Selanjutnya, seluruh mekanisme tersebut akan menentukan mechanical performance, durability, dan service life pada tingkat struktur.

Dengan demikian, pengembangan RPC masa depan tidak lagi cukup diarahkan untuk memperoleh kuat tekan maksimum. Desain material harus mampu mencapai keseimbangan antara *mechanical performance, toughness, durability, workability, cost, resource efficiency, embodied carbon, dan service life*. Pendekatan ini sejalan dengan perkembangan UHPC modern yang semakin mengintegrasikan aspek material, mikrostruktur, mechanical performance, environmental impact, dan aplikasi struktural.

Atas dasar tersebut, penelitian dan pengembangan RPC dalam monograf ini ditempatkan dalam suatu kerangka terpadu terlihat pada Gambar 2.

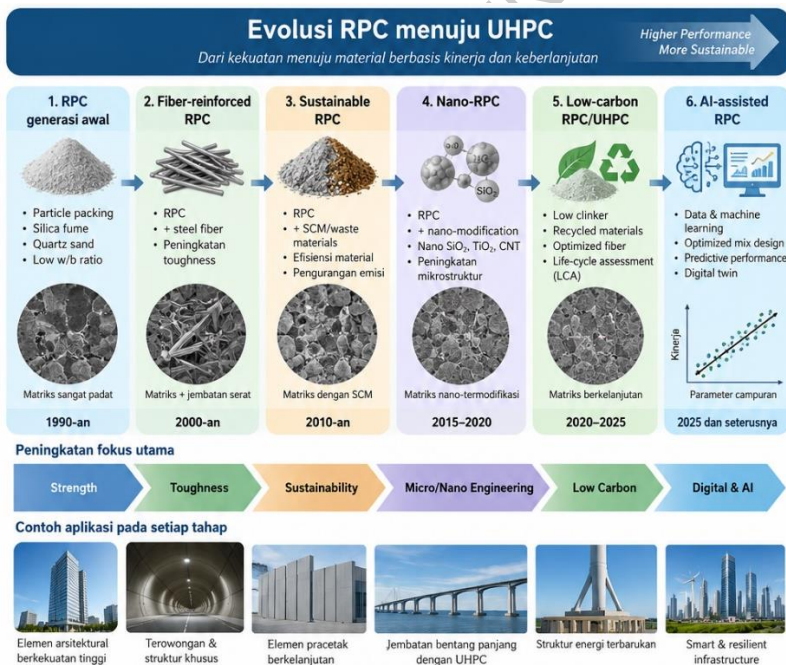


Kerangka tersebut menjadi dasar untuk memahami RPC bukan sebagai beton dengan kandungan semen tinggi, tetapi sebagai material cementitious composite yang dirancang melalui pengendalian interaksi antar-komponen pada berbagai skala. Dengan pendekatan tersebut, pengembangan RPC dapat diarahkan tidak hanya untuk mencapai **ultra-high performance**, tetapi juga untuk menghasilkan material yang lebih efisien, tahan lama, ekonomis, dan memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah.

1.2 Evolusi RPC menuju UHPC

Reactive Powder Concrete (RPC) merupakan salah satu tonggak penting dalam perkembangan beton berkinerja sangat tinggi karena memperkenalkan pendekatan baru dalam merancang matriks semen melalui pengendalian ukuran partikel, peningkatan packing density, penggunaan material ultrahalus, rasio air terhadap binder yang sangat rendah, serta pengendalian proses hidrasi dan curing. Konsep tersebut berbeda dari pendekatan beton konvensional yang terutama mengandalkan kombinasi pasta semen, agregat halus, dan agregat kasar. Dalam RPC, perhatian lebih besar diberikan pada pembentukan matriks yang sangat padat dan homogen sehingga volume pori dapat diminimalkan dan transfer tegangan di dalam material menjadi lebih efektif.

Konsep awal RPC dikembangkan secara sistematis oleh **Richard dan Cheyrezy (1995)** melalui penelitian *Composition of Reactive Powder Concretes*. Mereka menunjukkan bahwa peningkatan kinerja beton dapat dicapai melalui penghilangan agregat kasar, optimasi distribusi ukuran partikel, penggunaan silica fume, rasio air terhadap binder yang rendah, serta pengaturan kondisi curing. Pendekatan tersebut kemudian menjadi dasar pengembangan material yang saat ini secara lebih luas dikategorikan sebagai *Ultra-High Performance Concrete (UHPC)* dan, ketika diperkuat serat secara signifikan, sebagai *Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC)*.



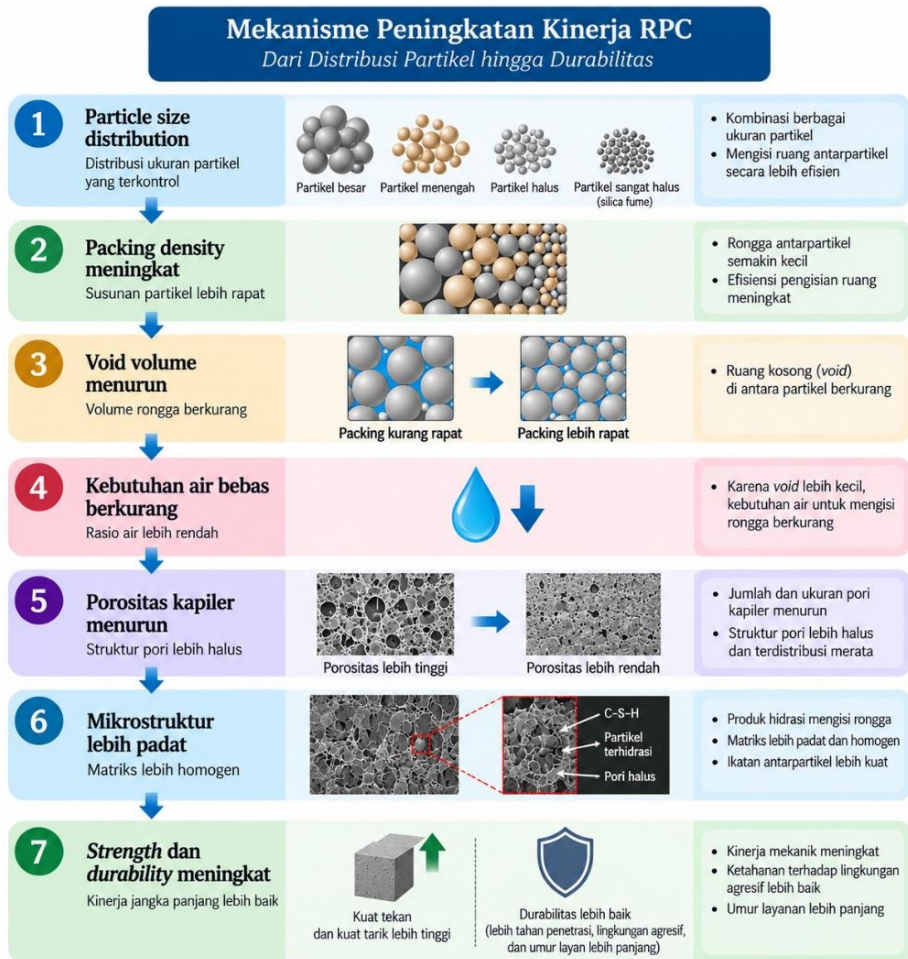
Gambar 3. Evolusi RPC menuju UHPC : Tahapan Perkembangan, karakteristik utama, mikrostruktur dan contoh aplikasi

Dengan demikian, evolusi RPC tidak hanya dapat dipandang sebagai peningkatan kuat tekan, tetapi sebagai perubahan paradigma dari *strength-oriented concrete* menuju *performance-based material design*. Dalam paradigma baru tersebut, kuat tekan hanya merupakan salah satu parameter kinerja. Toughness, kontrol retak, durability, permeabilitas, efisiensi material, embodied carbon, serta kemampuan material untuk mempertahankan kinerja selama umur layan menjadi bagian integral dari desain material. Perkembangan ini sejalan dengan kajian komprehensif mengenai UHPC yang menunjukkan bahwa inovasi material, metode manufaktur, sifat mekanik, dampak lingkungan, dan aplikasi struktural kini menjadi bagian yang tidak terpisahkan dalam perkembangan UHPC modern. Kravanja, Mumtaz, dan Kravanja (2024) menempatkan perkembangan UHPC dalam perspektif yang lebih luas, yaitu tidak hanya sebagai beton berkekuatan sangat tinggi tetapi sebagai material rekayasa dengan kombinasi kinerja mekanik, durability, manufaktur, dan keberlanjutan.

Tahap pertama evolusi RPC ditandai oleh perhatian yang sangat kuat terhadap *particle packing*. Richard dan Cheyrezy (1995) memperkenalkan prinsip bahwa material dengan ukuran partikel yang berbeda dapat disusun sedemikian rupa sehingga rongga antarpartikel dapat diminimalkan. Dalam sistem tersebut, partikel berukuran relatif besar menyediakan kerangka utama, sedangkan partikel yang lebih halus mengisi ruang antarpartikel. Silica fume yang berukuran jauh lebih halus kemudian berfungsi sebagai pengisi mikro sekaligus material pozzolan.

Konsekuensi dari pendekatan ini adalah terbentuknya matriks dengan packing density yang tinggi dan porositas yang lebih rendah. Dengan mengurangi volume rongga, kebutuhan terhadap pasta untuk mengisi ruang kosong juga dapat dikendalikan. Pada saat yang sama, rendahnya rasio air terhadap binder menghasilkan jumlah air bebas yang terbatas sehingga struktur pori kapiler dapat ditekan.

Namun, konsep RPC tidak berhenti pada aspek geometrik particle packing. Ge et al. (2023) menunjukkan bahwa karakteristik hidrasi, produk hidrasi, dan perkembangan mikrostruktur merupakan bagian penting dalam menjelaskan kinerja RPC. Dengan demikian, keberhasilan RPC merupakan hasil interaksi antara desain distribusi partikel, reaksi hidrasi, pembentukan produk hidrasi, dan evolusi pori. Hubungan tersebut dapat dirumuskan secara konseptual seperti terlihat pada Gambar 4



Gambar 4. Mekanisme peningkatan Kinerja RPC

Pendekatan ini menunjukkan bahwa RPC sejak awal sebenarnya merupakan material yang dirancang secara **multiscale**, meskipun istilah multiscale material engineering belum digunakan secara luas pada tahap awal perkembangannya.

1.2.2 Fiber-Reinforced RPC: Dari High Strength menuju High Toughness

Tahap berikutnya terjadi ketika prinsip matriks RPC digabungkan dengan teknologi serat. Matriks yang sangat padat mampu menghasilkan kuat tekan yang tinggi, tetapi material yang sangat padat dan getas tetap menghadapi keterbatasan dalam menahan retak dan deformasi pascaretak. Oleh karena itu, penggunaan serat menjadi langkah penting untuk mengubah karakteristik RPC dari sekadar material berkekuatan tinggi menjadi material yang mempunyai *toughness* dan *crack resistance* yang lebih baik.

Serat baja merupakan salah satu jenis serat yang banyak digunakan karena memiliki kekuatan tarik tinggi dan kemampuan memberikan mekanisme *bridging* pada bidang retak. Ketika retak mulai terbentuk, serat yang melintasi retak dapat mentransfer tegangan dari satu sisi retak ke sisi lainnya. Mekanisme tersebut menyebabkan propagasi retak menjadi lebih terkendali dan meningkatkan kemampuan material dalam mempertahankan kapasitas beban setelah retak awal.

Perkembangan berikutnya mengarah pada penggunaan kombinasi berbagai jenis serat. Patiño, Galli, dan Suraneni (2025) menunjukkan bahwa jenis serat dan kombinasi serat dapat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap sifat beton UHPC pada kondisi segar maupun setelah pengerasan. Sementara itu, Dziomdziora dan Smarzewski (2025) meninjau penggunaan hybrid fiber pada UHPC dan menunjukkan bahwa kombinasi

serat dapat digunakan untuk mengatur respons mekanik sekaligus durability material. Dengan demikian, terjadi perubahan tujuan desain: RPC generasi awal: *High compressive strength* menjadi *Fiber-reinforced RPC*:

High compressive strength + tensile resistance + toughness + crack control

Perubahan ini sangat penting karena struktur beton tidak hanya mengalami beban tekan, tetapi juga tarik, lentur, geser, dampak, fatigue, dan beban lingkungan. Oleh karena itu, kemampuan mengontrol retak menjadi salah satu karakteristik utama dalam evolusi RPC menuju UHPC/UHPFRC.

1.2.3 Sustainable RPC: Integrasi SCM dan Material Limbah

Setelah perhatian terhadap strength dan toughness semakin berkembang, isu keberlanjutan menjadi tahap penting berikutnya. RPC/UHPC memiliki potensi dampak lingkungan yang relatif besar apabila formulasi material menggunakan kandungan semen dan material binder dalam jumlah tinggi. Oleh sebab itu, penelitian kemudian bergeser pada upaya menggantikan sebagian clinker atau semen dengan *supplementary cementitious materials (SCM)* dan material sekunder atau limbah industri.

Pendekatan tersebut bertujuan mempertahankan performa RPC sekaligus mengurangi konsumsi semen. SCM dapat berkontribusi melalui mekanisme filler effect, perubahan packing density, dan reaksi pozzolanik atau hidraulik tambahan. Namun, substitusi semen tidak dapat dilakukan

secara sederhana karena perubahan komposisi binder juga dapat memengaruhi workability, hidrasi, strength development, porositas, dan durability.

Wang, Chow, dan Lau (2024) menekankan pentingnya pendekatan multiskala dalam meningkatkan keberlanjutan fiber-reinforced UHPC. Perspektif tersebut menunjukkan bahwa keberlanjutan tidak cukup dinilai hanya dari pengurangan semen, tetapi harus mempertimbangkan hubungan antara material, mikrostruktur, kinerja mekanik, durability, dan umur layanan.

Hal yang sama terlihat dalam kajian Song, Banthia, dan Yoo (2025) mengenai pengaruh SCM terhadap durability UHPC. Penggunaan SCM perlu dievaluasi bukan hanya berdasarkan kontribusinya terhadap pengurangan clinker, tetapi juga terhadap kemampuan material mempertahankan kinerja pada lingkungan agresif.

Dengan demikian, paradigma desain mulai berubah menjadi:

Performance = Strength + Toughness + Durability + Resource Efficiency + Lower Carbon

Perubahan tersebut merupakan salah satu ciri utama evolusi RPC menuju UHPC generasi baru.

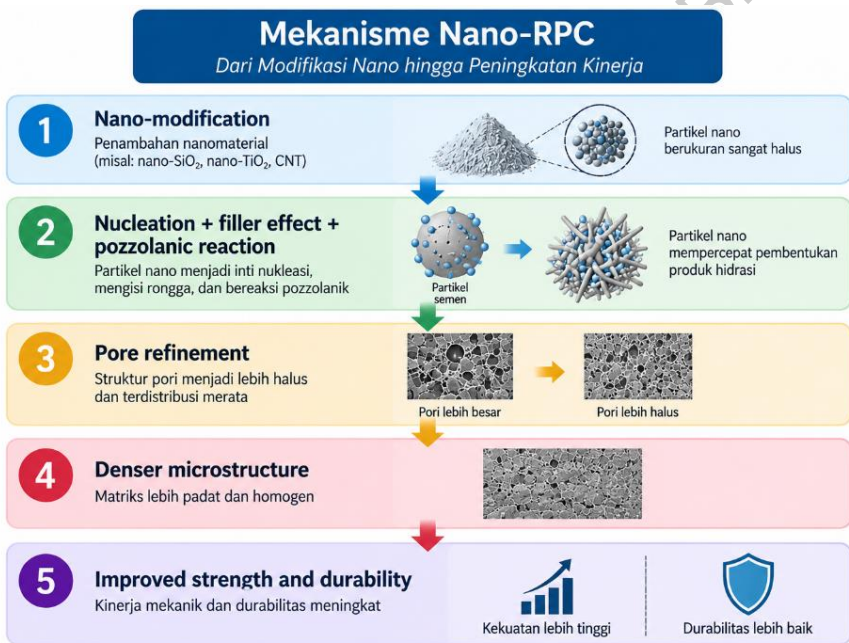
1.2.4 Nano-RPC: Rekayasa Mikrostruktur pada Skala Nano

Tahap perkembangan selanjutnya adalah penggunaan material nanoteknologi untuk mengendalikan struktur material pada skala yang lebih kecil. Jika particle packing konvensional terutama mengatur distribusi partikel pada skala mikro hingga makro, penggunaan material nano memungkinkan modifikasi lebih lanjut terhadap nukleasi produk hidrasi, pengisian pori, dan struktur zona antarmuka.

Nanomaterial seperti nano-silica dapat memiliki luas permukaan yang sangat besar. Kehadirannya dapat meningkatkan jumlah lokasi nukleasi bagi produk hidrasi dan berpotensi mempercepat perkembangan mikrostruktur pada umur awal. Selain itu, partikel nano dapat mengisi ruang yang lebih kecil di antara partikel binder sehingga berpotensi memperbaiki packing pada skala yang tidak dapat dicapai hanya dengan material konvensional.

Dheyaaldin dan Kianmehr (2024) secara khusus membahas pemanfaatan nanomaterial secara berkelanjutan pada reactive powder composite dan menunjukkan bahwa perkembangan nanomaterial membuka peluang baru dalam pengendalian mikrostruktur RPC. Namun, efektivitas nanomaterial sangat bergantung pada dispersi, kompatibilitas dengan sistem binder, kebutuhan superplasticizer, serta kemungkinan terjadinya aglomerasi.

Oleh karena itu, pendekatan nano-RPC harus dipahami sebagai microstructure engineering, bukan sekadar penambahan material berukuran nano. Penambahan nanomaterial dalam jumlah berlebihan bahkan dapat menurunkan workability dan menyebabkan aglomerasi sehingga manfaat yang diharapkan tidak selalu meningkat secara linear. Secara konseptual mekanisme Nano RPC terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Mekanisme nano- RPC

Akan tetapi, jalur tersebut sangat bergantung pada kualitas dispersi dan interaksi antara nanomaterial dengan sistem binder.

1.2.5 Low-Carbon RPC/UHPC: Dari Material Berperforma Tinggi menuju Material Berkelanjutan

Tahap perkembangan yang lebih mutakhir adalah munculnya konsep *low-carbon UHPC*. Pada tahap ini, tujuan desain tidak lagi hanya menghasilkan performa tinggi dengan kandungan binder yang besar, tetapi mencari kombinasi optimum antara performa struktural dan dampak lingkungan.

Lande dan Thorstensen (2023) menekankan bahwa pengembangan industri UHPC memerlukan strategi keberlanjutan yang komprehensif. Pengurangan dampak lingkungan tidak dapat dilakukan hanya dengan mengganti satu bahan, tetapi memerlukan evaluasi sistem secara keseluruhan.

Selanjutnya, Farahzadi et al. (2025) mengevaluasi keberlanjutan UHPC dengan berbagai SCM, yang menunjukkan semakin pentingnya penggunaan material pengganti semen dalam pengembangan UHPC yang lebih berkelanjutan.

Perkembangan yang lebih baru dibahas oleh Hiew et al. (2026) melalui kajian mengenai *low-carbon UHPC* yang mencakup material, mekanisme, dan perspektif keberlanjutan. Pendekatan tersebut memperlihatkan bahwa *low-carbon UHPC* berkembang menjadi bidang penelitian tersendiri, dengan fokus pada pengurangan clinker, pemanfaatan SCM, optimasi komposisi, efisiensi material, dan evaluasi keberlanjutan secara menyeluruh.

Dalam konteks ini, desain RPC/UHPC perlu mempertimbangkan:

1. pengurangan kandungan clinker;
2. peningkatan penggunaan SCM;
3. pemanfaatan material hasil samping industri;
4. pemanfaatan material daur ulang;
5. optimasi kandungan serat;
6. pengurangan kebutuhan curing berenergi tinggi;
7. peningkatan umur layanan struktur; dan
8. evaluasi environmental impact menggunakan pendekatan life-cycle assessment (LCA).

Dengan demikian, material tidak lagi dinilai hanya berdasarkan berapa besar kuat tekannya, tetapi juga berdasarkan berapa banyak sumber daya dan emisi yang diperlukan untuk menghasilkan serta mempertahankan kinerja tersebut selama umur layanan.

1.2.6 RPC/UHPC Berbasis Material Limbah dan Circular Economy

Perkembangan low-carbon UHPC kemudian berlanjut menuju konsep *circular economy*, yaitu penggunaan material sekunder dan limbah sebagai bagian dari sistem material konstruksi. Pendekatan ini memiliki dua tujuan sekaligus, yaitu mengurangi konsumsi sumber daya alam dan mengurangi beban pembuangan limbah.

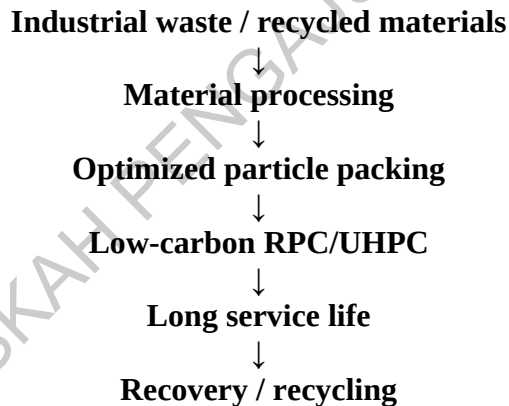
Salah satu perkembangan yang menarik ditunjukkan oleh Sun et al. (2025) melalui pengembangan UHPC yang menggunakan material limbah padat sebagai sumber utama material. Penelitian tersebut mengevaluasi

hubungan antara mechanical strength, microstructure, dan sustainability sehingga memperlihatkan bahwa material limbah tidak hanya perlu dilihat sebagai substitusi murah, tetapi sebagai bagian dari desain mikrostruktur material berkinerja tinggi.

Pendekatan tersebut memperkuat gagasan bahwa masa depan RPC/UHPC akan semakin bergeser dari *linear material consumption* menuju *circular material design*.

Secara sederhana: Raw materials → Cement → RPC → Structure → Demolition

bertransformasi menjadi:



Konsep ini membuka peluang untuk mengembangkan RPC yang tidak hanya memiliki performa tinggi tetapi juga lebih efisien dalam penggunaan sumber daya.

1.2.7 AI-Assisted RPC/UHPC: Evolusi menuju Material Design Berbasis Data

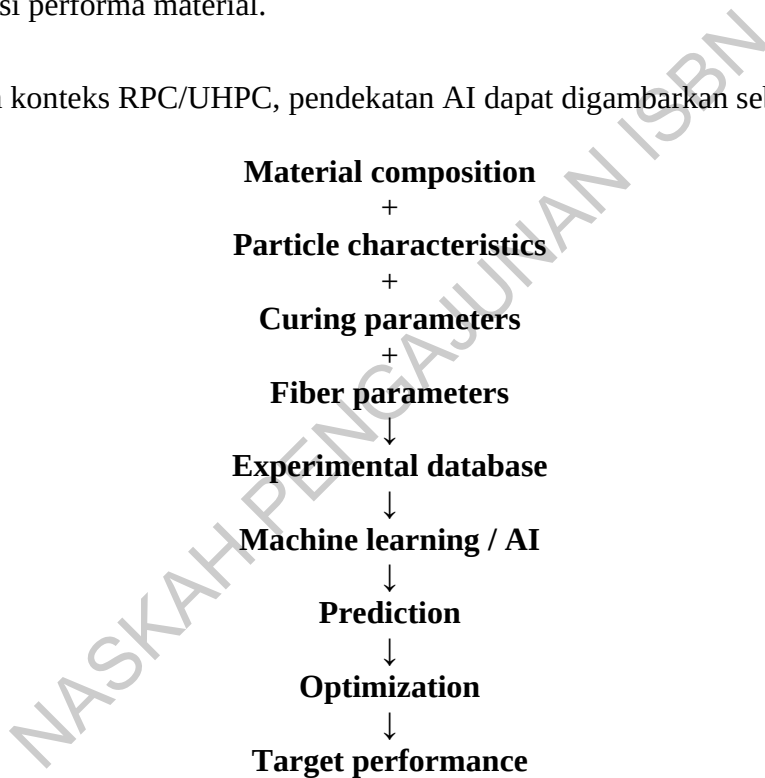
Tahap paling baru dalam evolusi RPC/UHPC adalah integrasi *data science*, *machine learning*, *statistical optimization*, dan *artificial intelligence (AI)*. Kompleksitas sistem RPC menyebabkan hubungan antara komposisi material dan sifat akhir tidak selalu bersifat linear. Perubahan kecil pada rasio binder, silica fume, SCM, superplasticizer, air, fiber, atau curing dapat menghasilkan perubahan signifikan pada workability, strength, shrinkage, dan durability.

Pendekatan eksperimen konvensional memerlukan jumlah percobaan yang relatif besar untuk memahami interaksi berbagai variabel tersebut. Oleh karena itu, metode statistik dan machine learning mulai digunakan sebagai alat bantu dalam menemukan hubungan antara input material dan output kinerja.

Sebagai tahap awal, Naderi Shourabi, Mirzabozorg, dan Zhuge (2024) menggunakan desain Box–Behnken, analysis of variance (ANOVA), analisis interaksi komponen, dan sensitivity analysis untuk mengoptimalkan UHPC berbasis RPC. Pendekatan ini menunjukkan bahwa optimasi komposisi dapat dilakukan secara sistematis dengan mempertimbangkan interaksi antarvariabel, bukan hanya pengaruh masing-masing material secara terpisah.

Perkembangan tersebut kemudian bergerak menuju machine learning. Abdellatief, Hamla, dan Hamouda (2025) mengembangkan pendekatan AI untuk memprediksi kuat tekan umur awal pada ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Hal ini menunjukkan bahwa AI mulai digunakan bukan hanya untuk interpretasi data eksperimen, tetapi juga sebagai alat prediksi performa material.

Dalam konteks RPC/UHPC, pendekatan AI dapat digambarkan sebagai:



Dengan pendekatan tersebut, desain RPC berpotensi berubah dari metode *trial-and-error* menjadi *data-driven material design*.

1.2.8 Pergeseran Paradigma: Dari High Strength menuju Multi-Performance Material

Jika seluruh perkembangan tersebut dirangkum, evolusi RPC dapat dipandang sebagai perjalanan melalui beberapa paradigma utama.

Tabel1. Pergeseran paradigma High Strength menuju Mukti performance material

Tahap evolusi	Fokus utama	Karakteristik desain
RPC generasi awal	Strength	Particle packing, silica fume, quartz, low w/b
Fiber-reinforced RPC	Toughness	Steel fiber, crack bridging, post-cracking capacity
Sustainable RPC	Resource efficiency	SCM dan material sekunder
Nano-RPC	Microstructure engineering	Nano-silica dan nanomaterial
Low-carbon RPC/UHPC	Sustainability	Low clinker, SCM, recycled materials, LCA
Circular RPC/UHPC	Resource circularity	Waste-derived materials dan recycled resources
AI-assisted RPC/UHPC	Data-driven optimization	Machine learning, prediction, optimization

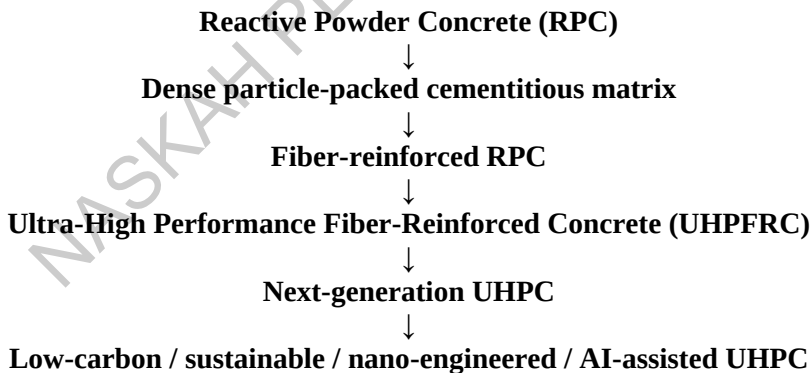
Perubahan tersebut menunjukkan bahwa evolusi RPC bukan sekadar evolusi kekuatan tekan, tetapi evolusi cara berpikir dalam rekayasa material. Pada tahap awal, tujuan utama adalah memperoleh matriks yang sangat padat dan kuat. Pada tahap berikutnya, perhatian berkembang

menuju kemampuan menahan retak dan deformasi. Selanjutnya, keberlanjutan, nanoteknologi, efisiensi sumber daya, dan kecerdasan buatan menjadi bagian dari desain material.

1.2.9 Posisi RPC dalam Keluarga UHPC/UHPFRC

Dalam perkembangan terminologi modern, RPC dapat dipandang sebagai salah satu pendekatan fundamental yang berkontribusi terhadap lahirnya keluarga UHPC. UHPC memiliki cakupan yang lebih luas karena dapat menggunakan berbagai kombinasi binder, filler, agregat halus, serat, SCM, nanomaterial, serta metode curing selama kombinasi tersebut menghasilkan karakteristik kinerja yang memenuhi konsep ultra-high performance.

Dengan demikian, hubungan konseptualnya dapat digambarkan sebagai:



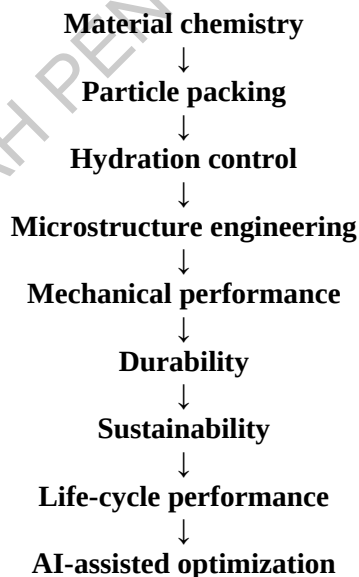
Kajian Kravanja, Mumtaz, dan Kravanja (2024) menunjukkan bahwa UHPC modern telah berkembang menjadi bidang yang mencakup inovasi material, manufacturing, mechanical properties, environmental impact,

dan berbagai aplikasi struktural. Dengan demikian, RPC dapat ditempatkan sebagai salah satu fondasi ilmiah penting dalam evolusi tersebut.

1.2.10 Arah Evolusi RPC pada Masa Mendatang

Berdasarkan perkembangan tersebut, arah penelitian RPC/UHPC pada masa mendatang kemungkinan akan semakin mengintegrasikan beberapa pendekatan sekaligus. Material tidak lagi dirancang berdasarkan satu parameter performa, tetapi melalui optimasi multiobjektif yang mempertimbangkan strength, toughness, durability, workability, cost, carbon emission, dan service life.

Kerangka evolusi tersebut dapat dirumuskan sebagai:



Dengan demikian, RPC/UHPC generasi berikutnya dapat dipahami sebagai *multiscale engineered cementitious composite* yang dirancang secara terpadu dari tingkat material hingga tingkat struktur. Pendekatan ini konsisten dengan arah penelitian modern yang semakin menghubungkan karakteristik material, mikrostruktur, performa mekanik, durability, dan sustainability dalam satu kerangka desain.

Secara keseluruhan, evolusi RPC menuju UHPC dapat diringkas sebagai perubahan paradigma:

- **High Strength**
- **High Toughness**
- **High Durability**
- **Resource Efficiency**
- **Nano/Micro Engineering**
- **Low Carbon**
- **Circularity**
- **Data-Driven and AI-Assisted Material Design**

Oleh karena itu, RPC modern tidak lagi tepat dipandang hanya sebagai beton dengan kuat tekan sangat tinggi. RPC telah berkembang menjadi platform rekayasa material multifungsi, di mana distribusi partikel, hidrasi, mikrostruktur, serat, durability, sustainability, dan optimasi berbasis data saling berinteraksi untuk menghasilkan material dengan kinerja tinggi sekaligus lebih efisien dan lebih berkelanjutan.

1.3 Permasalahan RPC Konvensional

Meskipun Reactive Powder Concrete (RPC) dikembangkan untuk menghasilkan matriks beton dengan kekuatan, kepadatan, dan durabilitas yang sangat tinggi, formulasi RPC konvensional masih menghadapi sejumlah permasalahan fundamental. Permasalahan tersebut tidak hanya berkaitan dengan pencapaian kekuatan mekanik, tetapi juga mencakup efisiensi penggunaan binder, workability, shrinkage, biaya produksi, serta kebutuhan energi dan pengendalian pada proses curing. Dengan demikian, peningkatan kinerja RPC perlu dipahami sebagai persoalan optimasi multiaspek, bukan sekadar peningkatan kandungan semen atau penurunan rasio air terhadap binder.

Pertama, penggunaan binder yang relatif tinggi merupakan salah satu tantangan utama RPC konvensional. Formulasi RPC/UHPC umumnya memerlukan matriks binder yang tinggi untuk menghasilkan packing density, kohesi, dan perkembangan mikrostruktur yang sesuai dengan target kinerja. Kravanja et al. (2024) menjelaskan bahwa UHPC memiliki karakteristik material yang berbeda dari beton konvensional karena memanfaatkan sistem binder dan partikel halus dalam jumlah besar untuk menghasilkan matriks yang sangat padat. Konsekuensinya, penggunaan semen dalam jumlah tinggi dapat meningkatkan kebutuhan sumber daya sekaligus memperbesar *embodied carbon* dari material. Lande dan Thorstensen (2023) menekankan bahwa pengembangan industri UHPC perlu mempertimbangkan strategi keberlanjutan secara menyeluruh karena peningkatan performa material tidak secara otomatis

menghasilkan kinerja lingkungan yang lebih baik. Perspektif tersebut diperkuat oleh Hiew et al. (2026), yang menunjukkan bahwa tantangan utama UHPC generasi baru adalah mempertahankan performa tinggi sambil menurunkan kontribusi karbon dari binder dan proses produksinya.

Kedua, workability dan rheology menjadi semakin kompleks seiring meningkatnya kepadatan sistem partikel. RPC menggunakan rasio water-to-binder yang rendah dan material berukuran sangat halus, seperti silica fume, sehingga luas permukaan spesifik partikel menjadi sangat besar. Kondisi tersebut meningkatkan kebutuhan air untuk membasahi permukaan partikel dan pada saat yang sama meningkatkan kebutuhan superplasticizer agar campuran tetap dapat mengalir. Šoukal et al. (2023) menunjukkan bahwa jenis silica fume dan superplasticizer mempunyai pengaruh terhadap sifat RPC segar sekaligus perkembangan mikrostrukturnya. Oleh karena itu, penurunan rasio air/binder tidak dapat dilakukan secara terpisah dari pengendalian workability. Formulasi RPC harus mencapai keseimbangan antara *packing density*, jumlah air bebas, dosis superplasticizer, dan karakteristik rheologi campuran.

Permasalahan rheologi tersebut menjadi semakin penting pada sistem dengan volume padatan yang sangat tinggi. Dalam kondisi demikian, perubahan kecil pada proporsi partikel halus, silica fume, superplasticizer, atau air dapat menghasilkan perubahan yang cukup besar pada viskositas dan kemampuan alir campuran. Karena itu, desain RPC modern perlu

memandang workability sebagai bagian integral dari desain mikrostruktur, bukan hanya sebagai parameter kemudahan pengerjaan. Pendekatan optimasi berbasis statistik juga mulai digunakan untuk memahami interaksi antar-komponen dan menentukan kombinasi material yang menghasilkan keseimbangan antara workability dan strength. Naderi Shourabi et al. (2024), misalnya, menggunakan pendekatan Box–Behnken, analisis varians, dan analisis sensitivitas untuk mengoptimalkan UHPC berbasis RPC.

Ketiga, shrinkage merupakan tantangan penting pada RPC dengan kandungan pasta tinggi dan rasio water-to-binder rendah. Matriks yang sangat padat dan rendah air menyebabkan konsumsi air melalui reaksi hidrasi dapat menghasilkan perubahan kelembapan internal yang signifikan. Kondisi ini dapat meningkatkan risiko *autogenous shrinkage*, terutama ketika sistem binder mengandung material sangat reaktif dan silica fume dalam jumlah tinggi. Al Moman et al. (2025) secara khusus membahas *autogenous and drying shrinkage* pada UHPC serta menunjukkan pentingnya strategi *internal curing* dalam mengendalikan perubahan volume tersebut. Dengan demikian, pencapaian kekuatan tinggi harus selalu dipertimbangkan bersama dengan pengendalian deformasi dan risiko retak pada usia awal.

Permasalahan shrinkage menjadi semakin kritis apabila deformasi yang terjadi tidak dapat diakomodasi oleh elemen struktur. Retak akibat

shrinkage dapat mengurangi keunggulan RPC karena membuka jalur transportasi bagi air dan zat agresif serta berpotensi memengaruhi durabilitas jangka panjang. Oleh sebab itu, desain RPC tidak cukup hanya berdasarkan target compressive strength, tetapi perlu mempertimbangkan keseimbangan antara perkembangan strength, hidrasi, kelembapan internal, deformasi, dan kemampuan material dalam menahan retak.

Keempat, biaya produksi RPC relatif tinggi dibandingkan beton konvensional. Penggunaan silica fume, superplasticizer berkinerja tinggi, steel fiber, material ultrahalus, serta kemungkinan penggunaan metode curing khusus dapat meningkatkan biaya material dan proses produksi. Kravanja et al. (2024) menempatkan biaya, manufaktur, dan dampak lingkungan sebagai bagian penting dalam evaluasi perkembangan UHPC. Silvestre (2025) juga menekankan pentingnya mengevaluasi kinerja ekonomi dan lingkungan UHPC secara bersamaan, karena material dengan performa teknis yang sangat tinggi belum tentu menghasilkan keuntungan ekonomi atau lingkungan apabila biaya dan input produksinya terlalu besar.

Permasalahan biaya tersebut menunjukkan bahwa pengembangan RPC generasi berikutnya perlu diarahkan pada efisiensi material, bukan sekadar peningkatan kandungan material berkinerja tinggi. Pengurangan klinker, pemanfaatan *supplementary cementitious materials* (SCM), penggunaan material limbah atau hasil samping industri, serta optimasi distribusi

ukuran partikel dapat menjadi strategi untuk mempertahankan performa sambil menekan biaya dan dampak lingkungan. Wang et al. (2024) menempatkan pendekatan multiskala sebagai salah satu dasar penting untuk meningkatkan keberlanjutan fiber-reinforced UHPC, sedangkan Farahzadi et al. (2025) menunjukkan pentingnya evaluasi SCM dalam kaitannya dengan keberlanjutan UHPC.

Kelima, proses curing merupakan faktor penting yang sekaligus menjadi tantangan dalam produksi RPC. Curing termal atau kombinasi metode curing dapat mempercepat reaksi hidrasi dan perkembangan *early-age strength*, tetapi membutuhkan pengendalian temperatur, waktu, dan energi yang lebih ketat dibandingkan curing konvensional. Yaragal et al. (2025) menunjukkan bahwa regime dan durasi curing berpengaruh terhadap perkembangan kekuatan awal *fiber-based RPC*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa respons RPC terhadap curing tidak hanya ditentukan oleh temperatur, tetapi juga oleh durasi dan karakteristik sistem material yang digunakan.

Özalp et al. (2025) juga menunjukkan bahwa perbedaan *curing regime* dapat menghasilkan respons mekanik RPC yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa curing bukan sekadar tahap perawatan setelah pengecoran, tetapi merupakan bagian dari rekayasa mikrostruktur RPC. Perubahan temperatur dan kondisi curing dapat memengaruhi kinetika hidrasi, pembentukan produk hidrasi, perkembangan porositas, serta akhirnya sifat mekanik material. Dengan demikian, pemilihan curing perlu

dilakukan berdasarkan karakteristik binder, target strength, kebutuhan produksi, serta pertimbangan energi dan keberlanjutan.

Berdasarkan kelima permasalahan tersebut, dapat disimpulkan bahwa RPC konvensional memiliki suatu trade-off fundamental antara performa, workability, shrinkage, biaya, dan energi proses. Peningkatan packing density dan penggunaan binder halus dapat menghasilkan matriks yang semakin padat, tetapi pada saat yang sama dapat meningkatkan kebutuhan superplasticizer dan risiko shrinkage. Demikian pula, curing yang lebih intensif dapat mempercepat perkembangan strength, tetapi dapat meningkatkan kebutuhan energi dan kompleksitas produksi. Oleh karena itu, pengembangan RPC tidak dapat dilakukan melalui optimasi satu parameter secara terpisah.

Kerangka pengembangan RPC yang lebih maju perlu mengintegrasikan *material chemistry, particle packing, water-to-binder ratio, rheology, hydration, microstructure, mechanical performance, durability, dan sustainability* dalam satu sistem desain. Pendekatan inilah yang menjadi dasar pengembangan RPC menuju UHPC generasi baru, termasuk pemanfaatan SCM, material limbah, nanomaterial, optimasi serat, curing yang lebih efisien, serta strategi *low-carbon* dan *life-cycle performance*.

1.4 Rumusan Masalah

Monograf ini membahas pertanyaan ilmiah:

1. Bagaimana particle packing mengontrol mikrostruktur RPC?
2. Bagaimana silica fume memengaruhi hidrasi?
3. Bagaimana rasio water-to-binder memengaruhi workability dan strength?
4. Bagaimana curing memengaruhi perkembangan mikrostruktur?
5. Bagaimana fiber mengontrol cracking dan toughness?
6. Bagaimana mikrostruktur mengontrol durability?
7. Bagaimana SCM dapat mengurangi penggunaan cement?
8. Bagaimana RPC dapat dioptimasi secara statistik?
9. Bagaimana RPC dapat dikembangkan menjadi low-carbon material?
10. Bagaimana RPC dapat ditransfer ke aplikasi struktural?

1.5 Tujuan

Tujuan utama monograf adalah mengembangkan kerangka ilmiah terpadu untuk memahami dan mengoptimasi RPC berdasarkan hubungan:

material → particle packing → hydration → microstructure → mechanical performance → durability → sustainability.

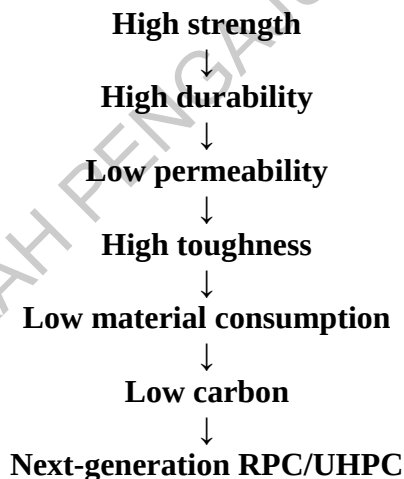
Secara khusus, tujuan tersebut mencakup:

1. menjelaskan prinsip RPC;
2. menganalisis particle packing;
3. menjelaskan mekanisme hidrasi;
4. mengevaluasi pengaruh silica fume dan SCM;
5. mengevaluasi pengaruh fiber;
6. menganalisis pengaruh curing;
7. menghubungkan mikrostruktur dengan sifat mekanik;
8. menghubungkan mikrostruktur dengan durability;
9. mengembangkan metode optimasi;
10. merumuskan strategi sustainable RPC.

1.6 Urgensi Penelitian

Pengembangan Reactive Powder Concrete (RPC) menuju generasi baru menjadi semakin penting karena kebutuhan material konstruksi saat ini tidak lagi hanya berorientasi pada pencapaian **kuat tekan maksimum**, tetapi pada kombinasi antara kekuatan, durabilitas, efisiensi material, umur layan, dan dampak lingkungan. Dengan kata lain, keberhasilan RPC modern harus dinilai berdasarkan kemampuan material dalam memberikan performance advantage yang nyata sepanjang masa layan struktur.

Secara konseptual, urgensi pengembangan RPC modern dapat dirumuskan melalui integrasi beberapa karakteristik utama:



High strength tetap menjadi salah satu karakteristik fundamental RPC karena memungkinkan penggunaan penampang struktur yang lebih kecil, peningkatan kapasitas beban, serta pengembangan elemen dengan dimensi yang lebih tipis. Namun, kuat tekan yang tinggi tidak dapat dipandang

sebagai satu-satunya indikator keberhasilan. Kravanja et al. (2024) menunjukkan bahwa perkembangan UHPC mencakup tidak hanya aspek mechanical properties, tetapi juga manufacturing, innovation, environmental impact, dan application. Hal tersebut menunjukkan adanya pergeseran dari pendekatan berbasis kekuatan menuju pendekatan berbasis **multi-performance**.

Karakteristik kedua adalah **high durability**, Matriks RPC yang sangat padat dan permeabilitas rendah berpotensi memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi air dan berbagai lingkungan agresif. Li et al. (2025) menekankan bahwa durabilitas UHPC perlu dipahami secara komprehensif dengan mempertimbangkan material, interface, struktur, serta berbagai mekanisme degradasi. Dengan demikian, peningkatan durabilitas bukan sekadar konsekuensi dari kuat tekan tinggi, tetapi merupakan hasil dari pengendalian mikrostruktur dan transportasi fluida dalam material.

Selanjutnya, **low permeability** menjadi karakteristik penting karena transportasi air dan ion agresif merupakan salah satu faktor yang mengontrol proses degradasi beton. Matriks dengan pori kapiler yang lebih sedikit dan konektivitas pori yang rendah dapat membatasi penetrasi agen agresif sehingga berpotensi memperpanjang umur layan. Dalam konteks tersebut, desain particle packing, hidrasi, dan mikrostruktur menjadi sangat penting karena ketiganya menentukan distribusi dan konektivitas pori dalam RPC.

Karakteristik berikutnya adalah **high toughness**. RPC yang digunakan pada aplikasi struktural tidak hanya harus mampu menahan beban tekan, tetapi juga harus memiliki kemampuan untuk mengendalikan retak dan mempertahankan kapasitas setelah retak terbentuk. Patiño et al. (2025) menunjukkan bahwa jenis dan kombinasi serat memengaruhi sifat beton UHPC pada kondisi segar maupun mengeras. Dziomdziora dan Smarzewski (2025) juga menekankan pentingnya komposisi hybrid fiber terhadap mechanical properties dan durability UHPC. Dengan demikian, pengembangan RPC modern perlu memperhatikan interaksi antara matriks yang padat dan mekanisme *fiber bridging* untuk menghasilkan kombinasi strength, ductility, dan toughness yang lebih baik.

Namun, keunggulan teknis tersebut harus diikuti oleh **low material consumption**. Salah satu alasan penting penggunaan RPC/UHPC adalah peluang untuk mengurangi dimensi elemen struktur melalui peningkatan kapasitas material. Pengurangan ketebalan elemen, volume beton, atau kebutuhan penggantian selama masa layan dapat memberikan keuntungan yang lebih besar dibandingkan sekadar membandingkan konsumsi material pada tahap produksi awal. Wang et al. (2024) menempatkan *material efficiency* dan pendekatan multiskala sebagai bagian penting dalam pengembangan keberlanjutan fiber-reinforced UHPC.

Konsep tersebut kemudian berhubungan langsung dengan **low carbon**. Penggunaan RPC dengan kandungan binder tinggi dapat meningkatkan dampak lingkungan pada tahap awal apabila tidak diimbangi dengan pengurangan material struktural atau perpanjangan umur layan. Lande dan Thorstensen (2023) menekankan perlunya strategi keberlanjutan yang komprehensif untuk industri UHPC, sedangkan Farahzadi et al. (2025) menunjukkan pentingnya penggunaan dan evaluasi berbagai *supplementary cementitious materials* dalam meningkatkan aspek keberlanjutan UHPC.

Perspektif tersebut semakin diperkuat oleh Hiew et al. (2026), yang menempatkan pengembangan *low-carbon UHPC* sebagai arah penting penelitian mutakhir melalui kombinasi inovasi material, pemahaman mekanisme, dan strategi keberlanjutan. Dengan demikian, penurunan kandungan klinker, pemanfaatan SCM dan material limbah, optimasi particle packing, penggunaan serat secara efisien, serta pengendalian proses produksi menjadi bagian penting dari strategi RPC generasi berikutnya.

Dengan demikian, *urgensi utama penelitian RPC modern terletak pada pergeseran paradigma dari “maximum strength” menuju “maximum performance efficiency”*. Material tidak lagi dinilai hanya berdasarkan berapa MPa kuat tekan yang dapat dicapai, tetapi berdasarkan seberapa besar manfaat struktural yang dapat diperoleh dari setiap satuan material dan energi yang digunakan.

Dalam perspektif *life-cycle performance*, Li et al. (2025) menunjukkan pentingnya durabilitas dalam mempertahankan kinerja UHPC pada lingkungan agresif, sedangkan Song, Banthia, dan Yoo (2025) menunjukkan bahwa pemanfaatan SCM juga perlu dikaji dalam kaitannya dengan durabilitas UHPC. Oleh karena itu, pengurangan material, peningkatan *service life*, dan pengurangan kebutuhan *maintenance* dapat menjadi sumber manfaat lingkungan yang signifikan sepanjang siklus hidup struktur.

Konsekuensinya, strength tinggi tidak secara otomatis berarti sustainable. Keberlanjutan RPC baru dapat dicapai apabila peningkatan performa material mampu menghasilkan pengurangan dimensi struktur, pengurangan konsumsi material, peningkatan umur layan, penurunan frekuensi maintenance atau replacement, serta pengurangan dampak lingkungan sepanjang siklus hidup. Kerangka ini sejalan dengan pendekatan dalam manuskrip yang menempatkan *material efficiency*, *service life*, *maintenance*, dan *structural dematerialization* sebagai bagian dari evaluasi lifecycle.

Atas dasar tersebut, pengembangan RPC dalam monograf ini diarahkan pada integrasi:

High Strength

- **High Durability**
- **Low Permeability**
- **High Toughness**
- **Material Efficiency**
- **Low Carbon**



Next-Generation RPC/UHPC

Pendekatan terintegrasi tersebut menjadi dasar untuk mengembangkan RPC yang tidak hanya unggul secara mekanik, tetapi juga **durable, efficient, economical, dan environmentally responsible**. Dengan demikian, fokus penelitian bergeser dari sekadar menghasilkan beton dengan kekuatan sangat tinggi menuju rekayasa material yang mampu memberikan **kinerja optimum** sepanjang siklus hidup struktur.

1.7 Kebaruan dan Posisi Keilmuan

Kebaruan utama kerangka keilmuan dalam monograf ini terletak pada upaya mengintegrasikan karakteristik material, distribusi ukuran partikel, particle packing, mekanisme hidrasi, perkembangan mikrostruktur, hingga kinerja engineering ke dalam satu kerangka multiskala. Pendekatan tersebut menempatkan Reactive Powder Concrete (RPC) tidak hanya sebagai formulasi beton berkekuatan tinggi, tetapi sebagai suatu *multiscale engineered cementitious composite*, yaitu material yang sifat akhirnya merupakan konsekuensi dari interaksi berbagai fenomena pada skala kimia, partikel, mikrostruktur, dan struktur.

Konsep dasar RPC sendiri berangkat dari pemikiran Richard dan Cheyrezy (1995) yang menekankan pentingnya optimasi komposisi material, pengurangan porositas, peningkatan homogenitas matriks, serta pengendalian distribusi partikel untuk memperoleh beton dengan kinerja sangat tinggi. Perkembangan penelitian berikutnya menunjukkan bahwa pencapaian kinerja RPC tidak dapat dipisahkan dari proses hidrasi dan pembentukan mikrostruktur. Ge et al. (2023), misalnya, menunjukkan bahwa karakteristik hidrasi, produk hidrasi, dan perkembangan mikrostruktur mempunyai hubungan erat dengan kinerja RPC. Dengan demikian, formulasi campuran tidak cukup dipandang sebagai kombinasi proporsi material, tetapi harus dipahami sebagai suatu sistem yang menghasilkan mekanisme fisik dan kimia tertentu.

Berdasarkan perspektif tersebut, kebaruan monograf ini dirumuskan melalui lima level integrasi keilmuan.

Level 1 — Material Chemistry dan Karakterisasi Material

Tahap pertama dimulai dari pemahaman terhadap karakteristik dasar material penyusun RPC. Komposisi kimia dan mineralogi material dianalisis melalui XRF dan XRD, sedangkan distribusi ukuran partikel dianalisis untuk mengetahui karakteristik fisik material halus yang digunakan. Pendekatan ini penting karena material dengan nama atau jenis yang sama belum tentu memberikan respons yang sama dalam RPC apabila memiliki komposisi kimia, mineralogi, luas permukaan, atau distribusi ukuran partikel yang berbeda.

Kravanja et al. (2024) menekankan bahwa desain UHPC sangat dipengaruhi oleh pemilihan material dan pengendalian komposisi campuran, sementara Šoukal et al. (2023) menunjukkan bahwa interaksi antara silica fume, semen, dan superplasticizer dapat memengaruhi sifat segar sekaligus mikrostruktur RPC. Oleh karena itu, karakterisasi material ditempatkan sebagai titik awal desain, bukan sekadar pengujian pendahuluan.

Level 2 — Particle Packing

Karakterisasi material kemudian diterjemahkan ke dalam konsep *particle packing*, yaitu bagaimana berbagai ukuran partikel tersusun untuk memaksimalkan packing density dan meminimalkan volume rongga. Tujuan utama tahap ini adalah memperoleh susunan partikel yang lebih efisien sehingga ruang kosong di antara partikel dapat dikurangi dan kebutuhan pasta pengisi dapat dikendalikan.

Dalam konteks RPC, prinsip particle packing merupakan salah satu fondasi yang diperkenalkan sejak konsep awal Richard dan Cheyrezy (1995). Perkembangan berikutnya memperlihatkan bahwa optimasi distribusi ukuran partikel tetap menjadi aspek penting dalam desain UHPC. Naderi Shourabi et al. (2024), melalui pendekatan Box–Behnken design dan ANOVA, menunjukkan bahwa parameter komposisi campuran dapat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap respons mekanik

sehingga optimasi berbasis interaksi antarparameter menjadi lebih rasional dibandingkan pendekatan trial-and-error.

Dengan demikian, dalam kerangka monograf ini, *particle packing* diposisikan sebagai jembatan antara karakteristik material dan perkembangan mikrostruktur. Distribusi ukuran partikel yang lebih optimal diharapkan menghasilkan packing density yang lebih tinggi, volume rongga yang lebih rendah, serta kondisi yang lebih menguntungkan bagi pembentukan matriks semen yang padat.

Level 3 — Hydration dan Pozzolanik Reaction

Level berikutnya adalah mekanisme *hidrasi* dan reaksi pozzolanik. Setelah sistem partikel dirancang, interaksi kimia selama proses hidrasi menentukan jenis dan jumlah produk hidrasi yang terbentuk serta bagaimana produk tersebut mengisi ruang antarpartikel.

Ge et al. (2023) menunjukkan bahwa perubahan karakteristik sistem RPC dapat memengaruhi hydration characteristics, hydration products, dan microstructure. Dalam sistem yang mengandung silica fume dan material pozzolanik lainnya, reaksi tidak hanya melibatkan hidrasi semen, tetapi juga reaksi pozzolanik yang menghasilkan tambahan produk pengikat dan berkontribusi terhadap densifikasi matriks.

Šoukal et al. (2023) juga menunjukkan bahwa silica fume memiliki peranan penting dalam perkembangan sifat dan mikrostruktur RPC. Dengan demikian, hidrasi tidak dipandang sebagai proses kimia yang

berdiri sendiri, tetapi sebagai mekanisme yang menghubungkan komposisi material dan particle packing dengan pembentukan mikrostruktur.

Kerangka ini memberikan hubungan sebab-akibat:

**komposisi material → particle packing → reaksi hidrasi/pozzolanik
→ produk hidrasi → perkembangan mikrostruktur.**

Level 4 — Microstructure

Level keempat merupakan tahap karakterisasi mikrostruktur yang digunakan untuk memverifikasi apakah mekanisme pada level material, packing, dan hidrasi benar-benar menghasilkan perubahan struktur internal yang diharapkan.

Dalam monograf ini, karakterisasi mikrostruktur mencakup SEM, XRD, FTIR, TGA, dan BET. Setiap metode memberikan informasi yang berbeda. SEM digunakan untuk mengamati morfologi dan kondisi matriks; XRD digunakan untuk mengidentifikasi fase kristalin; FTIR memberikan informasi mengenai ikatan kimia dan perubahan struktur; TGA dapat digunakan untuk mengevaluasi perubahan massa yang berkaitan dengan produk hidrasi; sedangkan BET memberikan informasi mengenai karakteristik permukaan dan struktur pori.

Pendekatan multi-teknik tersebut menjadi penting karena mikrostruktur RPC tidak dapat dijelaskan hanya melalui satu parameter. Ge et al. (2023) menghubungkan karakteristik hidrasi dan produk hidrasi dengan

perkembangan mikrostruktur RPC, sedangkan Li et al. (2025) menunjukkan bahwa kinerja durability UHPC berkaitan erat dengan karakteristik material, interface, struktur pori, serta mekanisme degradasi.

Dengan demikian, mikrostruktur dalam monograf ini berfungsi sebagai level verifikasi mekanistik. Jika peningkatan packing density dan perubahan hidrasi menghasilkan matriks yang lebih padat, maka perubahan tersebut harus dapat ditelusuri melalui karakterisasi mikrostruktur.

Level 5 — Engineering Performance

Level kelima merupakan konsekuensi akhir dari seluruh proses pada level sebelumnya, yaitu kinerja engineering. Parameter yang dievaluasi tidak hanya berupa compressive strength, tetapi mencakup strength, toughness, durability, dan aspek carbon performance.

Pendekatan ini penting karena strength yang tinggi tidak selalu identik dengan kinerja material yang optimal. Patiño et al. (2025) menunjukkan bahwa jenis dan kombinasi serat dapat memengaruhi sifat segar maupun sifat hardened UHPC, khususnya terkait perilaku pascaretak dan kemampuan mekanik. Dziomdziora dan Smarzewski (2025) juga menekankan pentingnya hybrid fiber dalam meningkatkan kombinasi mechanical properties dan durability.

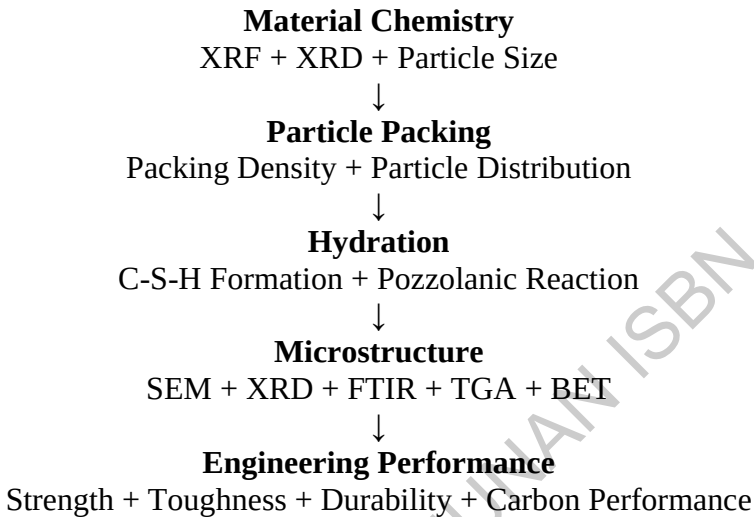
Pada sisi durability, Li et al. (2025) menunjukkan bahwa ketahanan UHPC pada lingkungan agresif perlu dipahami secara lebih luas melalui interaksi antara material, interface, struktur, dan mekanisme degradasi. Sementara itu, Song, Banthia, dan Yoo (2025) menunjukkan bahwa penggunaan supplementary cementitious materials tidak hanya berkaitan dengan pengurangan penggunaan semen, tetapi juga dapat berkontribusi terhadap durability UHPC.

Aspek sustainability kemudian ditempatkan sebagai bagian integral dari engineering performance. Wang, Chow, dan Lau (2024) menempatkan keberlanjutan fiber-reinforced UHPC dalam perspektif multiskala, sedangkan Lande dan Thorstensen (2023) menekankan perlunya strategi sustainability yang mencakup efisiensi material dan konsekuensi sepanjang siklus hidup. Hiew et al. (2026) lebih lanjut menunjukkan bahwa pengembangan low-carbon UHPC perlu mempertimbangkan material, mekanisme, dan perspektif sustainability secara terpadu.

Dengan demikian, kinerja RPC dalam monograf ini tidak didefinisikan hanya sebagai:

strength maksimum, tetapi sebagai kombinasi: *strength* + *toughness* + *durability* + *material efficiency* + *carbon performance*.

Integrasi kelima level tersebut menghasilkan kerangka keilmuan:



Kerangka tersebut memberikan posisi keilmuan monograf pada pendekatan material-to-performance, yaitu pendekatan yang menelusuri bagaimana karakteristik material pada skala awal diterjemahkan menjadi struktur internal dan akhirnya menghasilkan kinerja engineering. Pendekatan ini sejalan dengan perkembangan penelitian UHPC yang semakin menghubungkan material, microstructure, interface, structural performance, durability, dan lifecycle performance.

Oleh karena itu, kontribusi keilmuan utama monograf ini bukan sekadar menyajikan data mengenai kuat tekan, kuat lentur, atau durability RPC, tetapi membangun rantai hubungan mekanistik:

**Material → Particle Packing → Hydration → Microstructure →
Mechanical Performance → Durability → Sustainability.**

Rantai tersebut menjadi dasar untuk memahami RPC sebagai *multiscale engineered cementitious composite*. Dengan perspektif ini, setiap perubahan formulasi material dapat ditelusuri melalui perubahan distribusi partikel, mekanisme hidrasi, struktur pori dan mikrostruktur, kemudian dikaitkan dengan perubahan sifat mekanik, durability, serta dampak lingkungan.

Pendekatan tersebut sekaligus menjawab salah satu research gap yang diidentifikasi dalam monograf, yaitu masih perlunya penguatan hubungan kuantitatif antara *particle packing–hydration–microstructure–performance*, serta integrasi antara karakterisasi eksperimental, optimasi campuran, durability, dan sustainability.

Dengan demikian, posisi keilmuan monograf ini dapat dirumuskan sebagai *integrasi multiskala antara ilmu material semen, particle packing, kimia hidrasi, ilmu mikrostruktur, dan engineering performance*. Perspektif tersebut diharapkan dapat menggeser paradigma pengembangan RPC dari sekadar “*high-strength concrete*” menuju “*mechanism-based, performance-efficient, durable, and low-carbon cementitious composite*.”

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN STATE-OF-THE-ART

2.1 Konsep Reactive Powder Concrete

Reactive Powder Concrete (RPC) merupakan salah satu bentuk beton berkinerja sangat tinggi yang dikembangkan melalui pengendalian secara ketat terhadap komposisi material, distribusi ukuran partikel, rasio air terhadap binder, serta proses pembentukan mikrostruktur. Berbeda dengan beton konvensional yang umumnya menggunakan agregat kasar sebagai bagian utama skeleton granular, RPC pada prinsipnya menggunakan material berukuran relatif halus dan menghilangkan atau meminimalkan penggunaan agregat kasar. Pendekatan tersebut bertujuan menghasilkan matriks yang lebih homogen, mengurangi heterogenitas internal, serta meningkatkan efisiensi penyusunan partikel dalam sistem cementitious.

Konsep awal RPC dikembangkan oleh Richard dan Cheyrezy (1995) melalui pendekatan yang menekankan optimasi distribusi ukuran partikel, penggunaan material sangat halus, pengurangan rasio air terhadap binder, pemanfaatan silica fume, serta perlakuan curing yang sesuai. Dalam konsep tersebut, beton tidak lagi dirancang hanya berdasarkan proporsi semen, air, dan agregat, tetapi melalui rekayasa sistem partikel untuk menghasilkan matriks dengan porositas rendah dan struktur internal yang lebih padat.

Secara umum, RPC tersusun atas semen, material cementitious sangat halus, fine aggregate, silica fume, air, superplasticizer, dan pada formulasi *fiber-reinforced RPC*, ditambahkan serat. Setiap komponen memiliki fungsi yang saling berkaitan. Semen berperan sebagai sumber utama reaksi hidrasi, material halus dan silica fume berkontribusi terhadap pengisian rongga serta reaksi pozzolanik, fine aggregate membentuk skeleton granular, sedangkan superplasticizer memungkinkan penggunaan rasio air terhadap binder yang sangat rendah tanpa kehilangan workability secara berlebihan.

Ge et al. (2023) menunjukkan bahwa karakteristik hidrasi, produk hidrasi, dan perkembangan mikrostruktur merupakan aspek penting dalam memahami perilaku RPC. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja RPC tidak hanya ditentukan oleh jumlah material yang digunakan, tetapi juga oleh bagaimana material tersebut berinteraksi selama proses hidrasi dan membentuk struktur internal beton. Dengan kata lain, desain RPC harus dipahami sebagai proses yang menghubungkan komposisi material → proses hidrasi → mikrostruktur → sifat engineering.

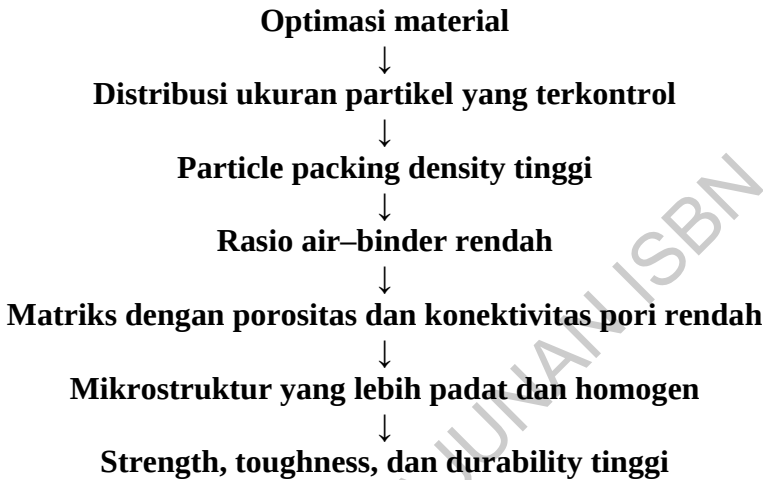
Salah satu karakteristik penting RPC adalah penggunaan silica fume dan material berukuran sangat halus. Silica fume dapat berfungsi sebagai *micro-filler* yang mengisi ruang di antara partikel semen sekaligus sebagai material pozzolanik yang bereaksi dengan produk hidrasi semen. Šoukal et al. (2023) menunjukkan bahwa silica fume dan jenis superplasticizer dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat dan mikrostruktur

RPC. Oleh karena itu, penggunaan silica fume tidak dapat dipisahkan dari pengendalian rheology dan workability karena peningkatan luas permukaan partikel dapat meningkatkan kebutuhan superplasticizer.

Komponen lain yang sangat penting adalah **superplasticizer**. Rasio air terhadap binder yang rendah merupakan salah satu karakteristik utama RPC karena dapat mengurangi volume pori kapiler dan membantu menghasilkan matriks yang lebih padat. Namun, penurunan kandungan air juga meningkatkan interaksi antarpartikel dan kecenderungan peningkatan viscosity. Oleh sebab itu, superplasticizer diperlukan untuk mempertahankan flowability selama proses pencampuran dan pembentukan benda uji. Kravanja et al. (2024) menempatkan pengendalian komposisi, workability, particle packing, dan proses manufaktur sebagai bagian penting dalam pengembangan UHPC/RPC.

Pada formulasi fiber-reinforced RPC, serat ditambahkan untuk mengatasi keterbatasan matriks cementitious yang pada dasarnya bersifat 55system55e getas. Serat bekerja melalui mekanisme *crack bridging*, yaitu memberikan tahanan terhadap pembukaan dan propagasi retak setelah matriks mengalami retak. Patiño et al. (2025) menunjukkan bahwa jenis dan kombinasi serat dapat memengaruhi sifat segar dan sifat hardened UHPC, sedangkan Dziomdziora dan Smarzewski (2025) menekankan bahwa kombinasi hybrid fiber dapat memberikan peningkatan terhadap mechanical properties, crack resistance, toughness, dan durability.

Dengan demikian, prinsip utama RPC dapat dirumuskan sebagai suatu system yang mengintegrasikan:



Konsep tersebut kemudian berkembang menjadi salah satu fondasi penting dalam perkembangan Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) modern. Kravanja et al. (2024) menunjukkan bahwa perkembangan UHPC modern mencakup tidak hanya peningkatan strength, tetapi juga pengembangan mikrostruktur, durability, inovasi material, efisiensi manufaktur, dan aspek lingkungan. Dengan demikian, RPC dapat dipandang sebagai salah satu pendekatan fundamental dalam evolusi beton berkinerja sangat tinggi, khususnya dalam hal particle packing, densifikasi matriks, pengendalian porositas, dan rekayasa mikrostruktur.

Dalam perspektif monograf ini, konsep RPC tidak dibatasi pada pencapaian nilai kuat tekan yang tinggi. RPC dipahami sebagai engineered cementitious composite yang kinerjanya merupakan hasil interaksi antara karakteristik material, distribusi partikel, hidrasi, mikrostruktur, serat, serta kondisi curing. Oleh karena itu, pembahasan RPC pada bagian-bagian selanjutnya akan diarahkan untuk menjelaskan hubungan mekanistik antara material → particle packing → hydration → microstructure → mechanical performance → durability → sustainability. Pendekatan tersebut menjadi penting karena perkembangan RPC/UHPC saat ini telah bergeser dari paradigma “maximum strength” menuju paradigma “**optimized performance**”, yaitu memperoleh kombinasi strength, toughness, durability, workability, efisiensi material, dan sustainability yang optimal. Perspektif ini juga sejalan dengan perkembangan UHPC berkelanjutan yang dibahas oleh Wang et al. (2024) dan Hiew et al. (2026), yang menempatkan efisiensi material dan pengurangan dampak lingkungan sebagai bagian integral dari pengembangan UHPC generasi berikutnya.

2.2 RPC dan UHPC

Reactive Powder Concrete (RPC) merupakan salah satu pendekatan material yang menjadi fondasi penting dalam perkembangan Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). Perkembangan RPC tidak dapat dipisahkan dari upaya untuk menghasilkan material semen dengan matriks

yang sangat padat, porositas rendah, permeabilitas kecil, serta kemampuan mekanik dan durabilitas yang lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. Richard dan Cheyrezy (1995) memperkenalkan konsep RPC melalui rekayasa distribusi ukuran partikel, penghilangan agregat kasar, penggunaan material berukuran sangat halus, rasio air terhadap binder yang rendah, serta optimasi proses curing. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kinerja beton tidak hanya bergantung pada peningkatan kadar semen, tetapi terutama pada rekayasa struktur internal material.

Dalam perkembangan selanjutnya, konsep RPC menjadi bagian dari evolusi material menuju UHPC dan Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC). Kravanja et al. (2024) menjelaskan bahwa UHPC merupakan kelompok beton berkinerja sangat tinggi yang dirancang melalui kombinasi optimasi material, packing partikel, rendahnya porositas, penggunaan admixture berperforma tinggi, serta pada banyak formulasi penggunaan serat untuk meningkatkan respons tarik dan ketangguhan. Dengan demikian, RPC dapat dipandang bukan sebagai material yang sepenuhnya terpisah dari UHPC, tetapi sebagai salah satu pendekatan formulasi dan rekayasa mikrostruktur yang sangat kuat dalam keluarga UHPC.

Secara konseptual, posisi RPC dalam keluarga beton berkinerja tinggi dapat dipahami melalui perkembangan bertahap **dari beton normal** →

High-Performance Concrete (HPC) → RPC/UHPC → UHPFRC.

Beton normal umumnya masih menggunakan agregat kasar dalam jumlah signifikan dan memiliki heterogenitas mikrostruktur yang relatif tinggi. HPC dikembangkan untuk memperoleh kekuatan dan durabilitas yang lebih baik melalui pengurangan rasio air terhadap binder, penggunaan material tambahan, dan admixture kimia. RPC kemudian membawa prinsip tersebut lebih jauh melalui penghilangan atau pembatasan agregat kasar, penggunaan partikel halus dengan distribusi ukuran yang dikendalikan, packing density yang tinggi, serta pembentukan matriks semen yang sangat rapat.

Perbedaan tersebut bukan hanya merupakan perbedaan komposisi, tetapi juga mencerminkan perbedaan filosofi desain material. Pada beton konvensional, agregat kasar berfungsi sebagai komponen utama pembentuk volume dan kerangka beton. Pada RPC, struktur material lebih diarahkan pada pembentukan matriks granular yang teroptimasi, sehingga ruang kosong di antara partikel dapat diminimalkan. Richard dan Cheyrezy (1995) menempatkan optimasi distribusi ukuran partikel sebagai salah satu prinsip utama RPC karena partikel yang lebih kecil dapat mengisi ruang antarpartikel yang lebih besar dan menghasilkan struktur yang lebih padat.

Kepadatan packing tersebut memiliki konsekuensi langsung terhadap kebutuhan air dan struktur pori. Semakin efektif partikel mengisi ruang

antarpartikel, semakin kecil volume rongga yang harus diisi oleh pasta atau air. Kondisi ini memungkinkan penggunaan rasio air terhadap binder yang sangat rendah, meskipun pengendalian workability menjadi semakin penting. Šoukal et al. (2023) menunjukkan bahwa kombinasi silica fume dan superplasticizer memiliki pengaruh penting terhadap sifat segar sekaligus perkembangan mikrostruktur RPC. Oleh karena itu, peningkatan packing density tidak dapat dipisahkan dari pengendalian rheology melalui penggunaan admixture yang sesuai.

Dari perspektif mikrostruktur, keunggulan RPC/UHPC terutama berasal dari terbentuknya matriks yang lebih homogen dan lebih rapat. Ge et al. (2023) menunjukkan bahwa karakteristik hidrasi, produk hidrasi, dan perkembangan mikrostruktur memiliki hubungan erat dengan kinerja RPC. Penggunaan material berukuran sangat halus, silica fume, serta rasio air terhadap binder yang rendah dapat mendorong terbentuknya zona matriks dengan porositas dan konektivitas pori yang lebih rendah. Dengan demikian, peningkatan kuat tekan bukan hanya akibat tingginya kandungan binder, tetapi merupakan hasil interaksi antara packing, hidrasi, pembentukan produk hidrasi, dan evolusi struktur pori.

Ketika serat ditambahkan ke dalam matriks RPC/UHPC, material tersebut berkembang menjadi sistem **UHPFRC** dengan karakteristik mekanik yang lebih kompleks. Serat berfungsi sebagai elemen penghubung retak (*crack bridging*) yang mampu meningkatkan kapasitas tarik, daktilitas, energi fraktur, dan ketangguhan. Patiño et al. (2025) menunjukkan bahwa jenis,

geometri, dan kombinasi serat dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat segar maupun sifat mekanik UHPC. Dziomdziora dan Smarzewski (2025) juga menekankan bahwa penggunaan kombinasi beberapa jenis serat dapat menghasilkan mekanisme pengendalian retak pada berbagai skala dan meningkatkan keseimbangan antara kekuatan, ketangguhan, dan durabilitas.

Dengan demikian, **RPC dan UHPFRC memiliki hubungan yang sangat erat tetapi tidak identik**. RPC dapat dirancang tanpa serat, sedangkan UHPFRC secara konseptual menambahkan sistem penguatan serat untuk meningkatkan respons tarik dan ketangguhan. Oleh karena itu, istilah RPC lebih tepat digunakan untuk menekankan filosofi dan rekayasa matriks berbasis *reactive powder*, sedangkan UHPC merupakan kategori performa yang lebih luas dan UHPFRC menekankan keberadaan serat sebagai bagian penting dari sistem material.

Secara umum, perbedaan karakteristik antara beton normal, HPC, dan RPC/UHPC dapat dirangkum sebagai berikut.

Tabel 2 perbedaan karakteristik antara beton normal, HPC, dan
RPC/UHPC

Parameter	Beton Normal	HPC	RPC/UHPC
Agregat kasar	Umumnya digunakan	Umumnya digunakan	Dapat dihilangkan atau sangat dibatasi

Rasio air/binder	Relatif lebih tinggi	Rendah	Sangat rendah
Distribusi ukuran partikel	Tidak selalu dioptimalkan secara ketat	Lebih terkontrol	Sangat terkontrol
Silica fume/material ultrahalus	Tidak selalu digunakan	Dapat digunakan	Umumnya penting dalam banyak formulasi
Superplasticizer	Dapat digunakan	Umumnya digunakan	Sangat penting untuk mempertahankan workability
Packing density	Relatif lebih rendah	Tinggi	Sangat tinggi
Porositas	Relatif lebih tinggi	Lebih rendah	Sangat rendah
Kuat tekan	Normal	Tinggi	Sangat tinggi
Toughness	Relatif rendah	Sedang	Tinggi terutama jika menggunakan serat
Durabilitas	Sedang	Tinggi	Sangat tinggi

Tabel tersebut perlu dipahami sebagai perbandingan konseptual, bukan batas klasifikasi universal. Kravanja et al. (2024) menunjukkan bahwa definisi UHPC dapat berbeda menurut standar, pendekatan penelitian, dan persyaratan performa yang digunakan. Oleh karena itu, UHPC tidak sebaiknya didefinisikan hanya berdasarkan satu nilai kuat tekan. Parameter seperti permeabilitas, porositas, ketahanan terhadap lingkungan agresif, respons tarik, ketangguhan, serta stabilitas jangka panjang juga perlu dipertimbangkan.

Perspektif tersebut menjadi semakin penting karena perkembangan UHPC saat ini telah bergerak dari paradigma “high strength” menuju “high performance”. Li et al. (2025) menempatkan durabilitas sebagai aspek penting dalam evaluasi UHPC, terutama karena material tersebut banyak dikembangkan untuk lingkungan agresif dan struktur dengan tuntutan umur layanan tinggi. Dengan demikian, material yang memiliki kuat tekan sangat tinggi tetapi mengalami masalah shrinkage, kehilangan workability, kerentanan terhadap kondisi termal tertentu, atau memiliki jejak karbon yang sangat tinggi belum tentu merupakan solusi UHPC yang paling optimal.

Pada sisi lain, penggunaan binder dalam jumlah besar menjadi salah satu tantangan penting dalam pengembangan RPC/UHPC yang lebih berkelanjutan. Wang et al. (2024) menunjukkan pentingnya pendekatan multiskala dalam meningkatkan keberlanjutan beton serat berkinerja

sangat tinggi, sedangkan Lande dan Thorstensen (2023) menekankan bahwa strategi keberlanjutan UHPC perlu mempertimbangkan keseluruhan sistem material dan siklus hidup, bukan hanya performa mekaniknya. Hiew et al. (2026) lebih lanjut menunjukkan bahwa arah perkembangan UHPC semakin bergeser menuju formulasi rendah karbon melalui optimasi binder, penggunaan supplementary cementitious materials (SCM), material alternatif, dan pendekatan desain yang mempertimbangkan mekanisme serta keberlanjutan.

Oleh karena itu, posisi RPC dalam keluarga UHPC dapat dirumuskan sebagai pendekatan rekayasa matriks yang menempatkan particle packing, rasio air terhadap binder yang rendah, material ultrahalus, hidrasi, **dan mikrostruktur sebagai dasar pencapaian performa tinggi**. Ketika sistem tersebut dikombinasikan dengan serat, material dapat berkembang menjadi UHPFRC dengan kemampuan pengendalian retak dan ketangguhan yang lebih tinggi.

Secara keseluruhan, hubungan konseptual tersebut dapat dinyatakan sebagai:

Optimasi material → Particle packing tinggi → Rasio air/binder rendah → Hidrasi dan reaksi pozzolanik → Mikrostruktur padat → Porositas dan permeabilitas rendah → Kekuatan dan durabilitas tinggi → Fiber bridging dan toughness tinggi → Performance-efficient UHPC/UHPFRC.

Dengan kerangka tersebut, RPC dalam monograf ini tidak diposisikan hanya sebagai beton dengan kuat tekan sangat tinggi, tetapi sebagai sistem material yang direkayasa secara multiskala, mulai dari karakteristik

material penyusun, distribusi ukuran partikel, proses hidrasi, struktur pori, mikrostruktur, hingga respons mekanik dan durabilitas. Perspektif ini menjadi dasar pembahasan pada subbab berikutnya mengenai particle packing, karena optimasi packing merupakan salah satu mekanisme fundamental yang membedakan filosofi desain RPC dari beton konvensional.

2.3 Particle Packing

Particle packing merupakan salah satu prinsip fundamental dalam desain Reactive Powder Concrete (RPC). Konsep ini didasarkan pada pengaturan distribusi ukuran partikel sedemikian rupa sehingga ruang kosong (*void*) di antara partikel dapat diminimalkan dan diperoleh struktur granular dengan kepadatan yang tinggi. Richard dan Cheyrezy (1995) menempatkan optimasi distribusi ukuran partikel sebagai salah satu prinsip utama pengembangan RPC, karena partikel yang lebih kecil dapat mengisi ruang di antara partikel yang lebih besar sehingga menghasilkan matriks yang lebih rapat dan homogen.

Pada sistem beton konvensional, distribusi ukuran agregat umumnya didominasi oleh agregat kasar, agregat halus, dan fraksi semen. Pada RPC, pendekatan tersebut dikembangkan menjadi sistem partikel yang jauh lebih halus dan terkontrol, mulai dari agregat halus hingga partikel berukuran mikrometer. Oleh karena itu, desain RPC tidak cukup hanya menentukan jumlah semen, pasir, silica fume, atau material tambahan,

tetapi harus mempertimbangkan interaksi ukuran, jumlah, dan distribusi setiap fraksi partikel.

Secara sederhana, prinsip *particle packing* dapat digambarkan sebagai susunan partikel dari ukuran relatif besar menuju ukuran yang semakin kecil:

Partikel besar → partikel sedang → partikel halus → partikel ultrahalus

Partikel yang lebih kecil akan menempati sebagian ruang antarpartikel yang lebih besar sehingga volume rongga antarpartikel dapat dikurangi. Apabila distribusi ukuran partikel dirancang secara tepat, sistem granular akan memiliki **packing density** yang lebih tinggi dan *void volume* yang lebih rendah. Kondisi tersebut menjadi sangat penting bagi RPC karena volume rongga yang rendah dapat membantu membentuk matriks yang lebih padat setelah proses hidrasi dan curing.

Secara matematis, **packing density** dapat dinyatakan sebagai:

$$\phi = \frac{V_s}{V_t} \quad (2-1)$$

dengan:

- ϕ = *packing density*;
- V_s = volume padatan;
- V_t = total volume sistem partikel.

Hubungan antara *packing density* dan volume rongga dapat dinyatakan secara sederhana sebagai:

$$V_{void} = 1 - \phi \quad (2-2)$$

Semakin besar nilai ϕ , semakin kecil volume rongga yang tersedia di antara partikel. Namun, *packing density* yang tinggi tidak selalu berarti campuran akan memiliki workability yang baik. Interaksi antarpartikel, luas permukaan spesifik, bentuk partikel, dan kebutuhan air atau superplasticizer tetap harus diperhitungkan. Dengan demikian, tujuan desain RPC bukan sekadar memperoleh *packing density* maksimum, tetapi memperoleh packing yang optimal terhadap workability, hidrasi, mikrostruktur, dan kinerja akhir.

Salah satu pendekatan teoritis yang banyak digunakan untuk menjelaskan distribusi ukuran partikel kontinu adalah **model Andreassen**. Dalam bentuk umum, distribusi kumulatif partikel dapat dinyatakan sebagai:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (2-3)$$

dengan:

- $P(D)$ = fraksi kumulatif partikel yang berukuran lebih kecil dari D ;
- D = ukuran partikel yang sedang ditinjau;
- D_{min} = ukuran partikel minimum;
- D_{max} = ukuran partikel maksimum;
- q = *distribution modulus*.

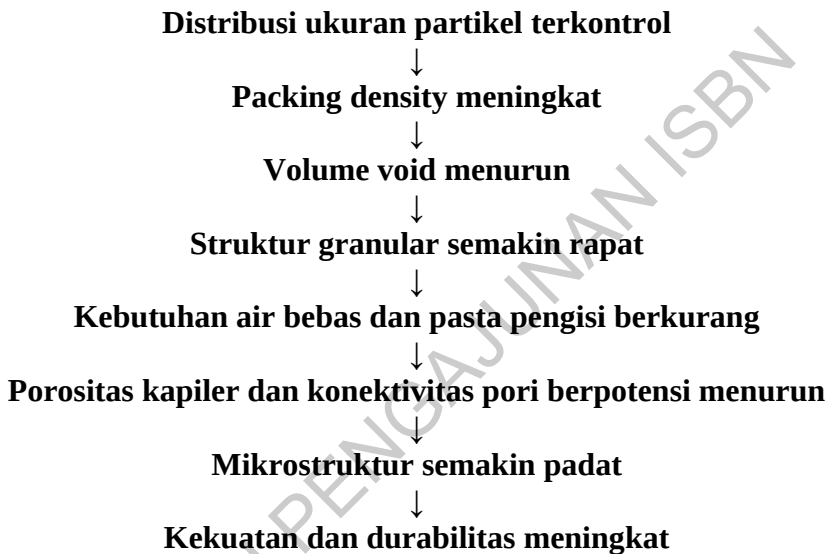
Model tersebut memberikan dasar untuk memahami bahwa distribusi partikel yang baik tidak hanya ditentukan oleh keberadaan partikel kasar dan halus, tetapi oleh **kesinambungan distribusi ukuran partikel**. Dalam sistem ideal, fraksi partikel berukuran lebih kecil dapat mengisi rongga di antara fraksi yang lebih besar secara bertahap. Prinsip inilah yang kemudian menjadi dasar pengembangan berbagai model *particle packing* untuk material semen berkinerja tinggi.

Dalam RPC, distribusi ukuran partikel dapat melibatkan beberapa tingkatan, misalnya fine aggregate, quartz powder, cement, silica fume, dan material ultrahalus atau SCM. Setiap fraksi memiliki fungsi yang berbeda dalam sistem. Agregat halus berfungsi sebagai kerangka granular utama, partikel semen mengisi sebagian ruang di antara agregat, sedangkan silica fume dan material ultrahalus mengisi ruang yang lebih kecil sekaligus dapat berkontribusi terhadap reaksi pozzolanik. Dengan demikian, setiap material tidak seharusnya dipandang hanya berdasarkan persentase beratnya, tetapi berdasarkan perannya dalam membangun struktur granular dan mikrostruktur.

Ge et al. (2023) menunjukkan bahwa karakteristik hidrasi, produk hidrasi, dan perkembangan mikrostruktur RPC memiliki hubungan erat dengan karakteristik material penyusunnya. Oleh karena itu, peningkatan *packing density* dapat memberikan kondisi awal yang lebih menguntungkan bagi pembentukan matriks yang rapat. Ketika ruang antarpartikel semakin kecil, kebutuhan untuk mengisi rongga dengan pasta atau air bebas dapat

berkurang. Selanjutnya, melalui proses hidrasi dan reaksi pozzolanik, struktur tersebut dapat berkembang menjadi matriks dengan porositas dan konektivitas pori yang rendah.

Hubungan tersebut dapat dipahami melalui rangkaian mekanisme:



Meskipun demikian, penggunaan partikel yang semakin halus juga meningkatkan luas permukaan spesifik sistem. Kondisi tersebut dapat meningkatkan kebutuhan air dan menyebabkan peningkatan gaya antarpartikel sehingga campuran menjadi lebih sulit mengalir. Oleh sebab itu, optimasi *particle packing* harus selalu dikombinasikan dengan pengendalian **rheology**. Šoukal et al. (2023) menunjukkan bahwa kombinasi silica fume dan jenis superplasticizer dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat segar dan perkembangan mikrostruktur RPC. Artinya, peningkatan kepadatan packing harus dicapai

tanpa mengorbankan kemampuan campuran untuk dicampur, ditempatkan, dan dipadatkan.

Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa konsep *particle packing* mulai bergerak dari pendekatan teoritis menuju parameter kuantitatif yang dapat digunakan langsung dalam mix design. Baten dan Garg (2025) memperkenalkan Particle Packing Factor (P_{pf}) sebagai parameter kuantitatif untuk mengevaluasi efisiensi packing pada sistem binder UHPC dan menghubungkannya dengan performa material. Dalam penelitian terhadap 19 formulasi UHPC, peningkatan P_{pf} dari 52,9 menjadi 68,7 dikaitkan dengan peningkatan efisiensi HRWR, peningkatan kuat tekan, dan penurunan porositas.

Temuan Baten dan Garg (2025) penting karena menunjukkan bahwa *particle packing* tidak lagi hanya dapat digunakan sebagai konsep geometris untuk menjelaskan pengurangan rongga, tetapi dapat diposisikan sebagai parameter desain yang berhubungan dengan rheology, strength, porosity, dan sustainability. Dalam studi tersebut, peningkatan P_{pf} juga berkaitan dengan peningkatan *strength-to-cement ratio* dan pengurangan indikator dampak lingkungan, sehingga optimasi packing berpotensi mendukung pengurangan penggunaan binder tanpa harus mengorbankan performa.

Baten dan Garg (2025) juga menunjukkan bahwa pengaruh *particle packing* tidak terbatas pada kuat tekan. Dalam penelitian lain pada tahun

yang sama, Baten dan Garg (2025) menemukan hubungan yang kuat antara P_{pf} , porositas terbuka, dan *drying shrinkage* UHPC. Peningkatan kualitas packing dikaitkan dengan penyempurnaan struktur pori dan penurunan *drying shrinkage*, sehingga memperlihatkan bahwa optimasi distribusi partikel dapat memberikan pengaruh terhadap beberapa aspek kinerja sekaligus.

Dengan demikian, pendekatan modern terhadap *particle packing* dapat dirumuskan sebagai perubahan paradigma dari:

“berapa persen material digunakan?” menjadi:

“apa fungsi setiap fraksi ukuran partikel dalam membangun struktur granular yang optimal?”

Pertanyaan tersebut menjadi sangat penting dalam desain RPC karena dua campuran dengan komposisi kimia yang sama belum tentu menghasilkan kinerja yang sama apabila distribusi ukuran partikelnya berbeda. Perbedaan *particle size distribution* dapat menghasilkan perbedaan *packing density*, kebutuhan superplasticizer, rheology, porositas, hidrasi, dan akhirnya sifat mekanik serta durabilitas.

Oleh karena itu, desain RPC yang rasional sebaiknya mempertimbangkan sedikitnya empat aspek secara simultan, yaitu **(1) distribusi ukuran partikel, (2) packing density, (3) workability/rheology, dan (4) perkembangan mikrostruktur setelah hidrasi.** Pendekatan ini

memungkinkan penggunaan material yang lebih efisien karena setiap fraksi partikel diberikan fungsi tertentu dalam sistem.

Secara konseptual, hubungan antara *particle packing* dan performa RPC dapat dirumuskan sebagai:

PSD Optimization $\rightarrow$ *Packing Density* $\uparrow \rightarrow$ *Void Volume* $\downarrow \rightarrow$ *Porosity* $\downarrow \rightarrow$
Microstructure Density $\uparrow \rightarrow$ *Strength, Durability, dan Efficiency* $\uparrow$

Dengan demikian, particle packing bukan sekadar teknik mencampurkan material berukuran berbeda, tetapi merupakan strategi rekayasa mikrostruktur sejak tahap awal desain RPC. Pendekatan ini menjadi dasar untuk memahami hubungan antara ukuran partikel, kebutuhan air, hidrasi, pembentukan pori, dan kinerja akhir. Selanjutnya, prinsip tersebut perlu dikaitkan dengan **water-to-binder ratio**, karena setelah struktur granular dioptimalkan, jumlah air yang tersedia akan menentukan workability sekaligus sangat memengaruhi perkembangan porositas dan mikrostruktur RPC.

2.4 Water-to-Binder Ratio

Water-to-binder ratio (w/b) merupakan salah satu parameter paling penting dalam desain Reactive Powder Concrete (RPC) karena secara langsung memengaruhi workability, proses hidrasi, struktur pori, mikrostruktur, dan sifat mekanik beton. Berbeda dengan beton konvensional yang umumnya menggunakan rasio air terhadap semen relatif lebih tinggi, RPC dirancang dengan rasio air terhadap binder yang

sangat rendah untuk menghasilkan matriks yang lebih padat dan porositas yang lebih kecil. Richard dan Cheyrezy (1995) menempatkan penggunaan rasio air yang rendah sebagai salah satu prinsip penting dalam formulasi RPC, bersama dengan optimasi distribusi ukuran partikel, penggunaan material sangat halus, dan pengendalian mikrostruktur.

Secara konseptual, penurunan rasio w/b akan mengurangi jumlah air yang tersedia di dalam sistem. Air tersebut tidak seluruhnya menjadi bagian dari produk hidrasi. Sebagian air diperlukan untuk proses hidrasi, sedangkan sebagian lainnya pada kondisi tertentu berada sebagai air bebas yang kemudian dapat membentuk ruang pori setelah proses pengeringan atau konsumsi selama hidrasi. Oleh karena itu, ketika rasio w/b diturunkan secara terkendali, volume ruang yang berpotensi berkembang menjadi **kapiler pori** juga dapat berkurang.

Hubungan sederhana tersebut dapat digambarkan sebagai:

$\frac{w}{b} \downarrow \rightarrow \text{Capillary Pore Volume} \downarrow \rightarrow \text{Porosity} \downarrow \rightarrow \text{Matrix Density} \uparrow \rightarrow$ <i>Strength dan Durability</i> $\uparrow$
--

Namun, hubungan tersebut tidak bersifat linear tanpa batas. Penurunan w/b yang terlalu jauh dapat menimbulkan konsekuensi terhadap hidrasi dan sifat segar. Pada campuran RPC, sebagian besar permukaan partikel berasal dari semen, silica fume, quartz powder, dan material ultrahalus lainnya. Semakin rendah w/b, semakin terbatas lapisan air yang tersedia di

sekitar partikel sehingga gaya antarpartikel meningkat dan campuran cenderung menjadi lebih kental.

Kondisi tersebut menyebabkan **workability** menjadi salah satu faktor pembatas utama dalam penerapan w/b yang sangat rendah. Šoukal et al. (2023) menunjukkan bahwa karakteristik silica fume dan jenis superplasticizer memiliki pengaruh penting terhadap sifat segar RPC dan perkembangan mikrostrukturnya. Dengan demikian, pengurangan w/b tidak dapat dilakukan secara terpisah dari desain *particle packing* dan penggunaan *high-range water-reducing admixture* (HRWR).

Dalam konteks ini, superplasticizer memiliki fungsi yang sangat penting. Superplasticizer memungkinkan partikel-partikel binder mengalami dispersi yang lebih baik sehingga campuran tetap dapat mengalir meskipun jumlah air relatif rendah. Dengan kata lain, strategi RPC bukan sekadar mengurangi air sebanyak mungkin, tetapi mengurangi air bebas sambil mempertahankan *workability* yang diperlukan melalui optimasi distribusi partikel dan admixture.

Ge et al. (2023) menunjukkan bahwa karakteristik hidrasi dan perkembangan produk hidrasi RPC berkaitan erat dengan struktur mikro yang terbentuk selama proses pengerasan. Rasio w/b yang rendah dapat menyediakan kondisi awal untuk menghasilkan matriks yang lebih rapat, tetapi perkembangan mikrostruktur akhirnya tetap bergantung pada tingkat hidrasi, ketersediaan air, curing, dan karakteristik material penyusun. Oleh

karena itu, nilai w/b harus dipahami sebagai salah satu parameter dalam suatu sistem yang saling berinteraksi, bukan sebagai variabel tunggal yang menentukan kuat tekan.

Secara sederhana, pengaruh w/b terhadap struktur RPC dapat dipahami melalui dua kondisi ekstrem.

Pada w/b yang relatif tinggi, jumlah air bebas lebih besar sehingga workability cenderung lebih mudah dicapai. Namun, setelah hidrasi dan pengeringan berlangsung, sebagian ruang yang sebelumnya ditempati air dapat berkembang menjadi pori kapiler. Kondisi tersebut dapat meningkatkan porositas dan konektivitas pori sehingga berpotensi menurunkan densitas matriks dan ketahanan terhadap penetrasi zat agresif.

Sebaliknya, pada w/b yang sangat rendah, volume air bebas dapat ditekan dan struktur matriks berpotensi menjadi lebih padat. Akan tetapi, campuran menjadi semakin sulit mengalir, viscosity meningkat, dan kebutuhan superplasticizer menjadi semakin tinggi. Jika workability tidak dapat dipertahankan, proses pencampuran dan pengecoran dapat terganggu sehingga terjadi distribusi material yang tidak seragam atau bahkan terbentuk rongga akibat proses pemadatan yang tidak optimal.

Dengan demikian, hubungan antara w/b dan kuat tekan lebih tepat digambarkan sebagai hubungan **optimum**, bukan hubungan “semakin rendah selalu semakin baik”.

$w/b \downarrow \rightarrow \text{Strength} \uparrow$ hingga kondisi optimum
--

Setelah melewati kondisi optimum, penurunan w/b lebih lanjut tidak selalu menghasilkan peningkatan performa karena keterbatasan workability, dispersi partikel, dan kondisi hidrasi dapat mulai menjadi faktor pembatas.

Hubungan tersebut dapat diperluas menjadi:

$$w/b \downarrow \rightarrow \text{Porosity} \downarrow \rightarrow \text{Strength} \uparrow$$

tetapi secara simultan:

$$w/b \downarrow \rightarrow \text{Viscosity} \uparrow \rightarrow \text{HRWR/SP Requirement} \uparrow \rightarrow \text{Workability} \downarrow$$

Kedua hubungan tersebut menunjukkan adanya trade-off antara densifikasi matriks dan rheology. Oleh karena itu, desain RPC harus mencari kondisi yang menghasilkan keseimbangan antara kebutuhan air minimum dan kemampuan campuran untuk tetap dapat diproses.

Hubungan antara *particle packing* dan w/b juga sangat penting. Hasil optimasi *particle packing* yang baik dapat mengurangi volume rongga antarpartikel sehingga kebutuhan pasta dan air untuk mengisi ruang kosong dapat ditekan. Dengan demikian, *particle packing* dapat membantu memungkinkan penggunaan w/b yang rendah tanpa harus secara ekstrem meningkatkan kandungan superplasticizer. Richard dan Cheyrezy (1995) menunjukkan pentingnya kombinasi antara optimasi granular dan rendahnya kandungan air dalam menghasilkan matriks RPC yang padat.

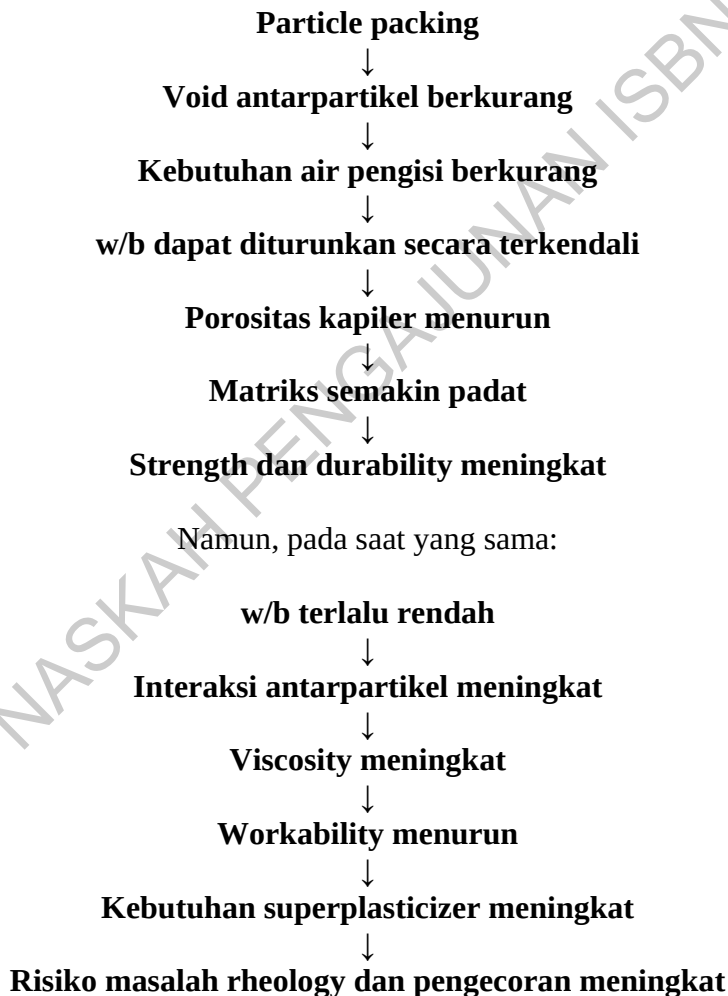
Pada tingkat mikrostruktur, rendahnya w/b juga berkaitan dengan pembentukan struktur pori yang lebih halus. Namun, pada RPC, fenomena tersebut harus dibedakan dari masalah self-desiccation dan *autogenous shrinkage*. Ketika air yang tersedia terbatas dan terus dikonsumsi selama hidrasi, kelembapan internal dapat menurun sehingga menghasilkan tekanan kapiler internal dan deformasi susut. Al Moman et al. (2025) menunjukkan bahwa autogenous dan drying shrinkage merupakan aspek penting pada UHPC dan bahwa strategi *internal curing* dapat digunakan untuk mengendalikan sebagian permasalahan tersebut.

Hal ini menunjukkan bahwa w/b yang rendah memberikan keuntungan sekaligus tantangan. Keuntungannya adalah potensi pembentukan matriks yang lebih padat, porositas lebih rendah, dan kekuatan yang tinggi. Tantangannya adalah meningkatnya risiko kehilangan workability, kebutuhan superplasticizer yang lebih besar, keterbatasan air untuk hidrasi, serta potensi peningkatan *autogenous shrinkage*. Oleh karena itu, pengembangan RPC tidak dapat didasarkan pada prinsip sederhana “semakin rendah w/b, semakin baik”.

Pendekatan yang lebih tepat adalah menentukan w/b optimum berdasarkan interaksi antara particle packing, binder reactivity, superplasticizer, curing, dan target performa. Naderi Shourabi et al. (2024), melalui pendekatan *Box–Behnken design*, analisis varians, dan analisis sensitivitas pada UHPC berbasis RPC, menunjukkan bahwa parameter komposisi dan interaksi antarkomponen dapat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap

respons campuran. Temuan tersebut memperkuat kebutuhan untuk menggunakan pendekatan optimasi multivariat dibandingkan menentukan w/b secara terpisah.

Dalam kerangka desain RPC, maka w/b dapat diposisikan sebagai parameter penghubung antara struktur granular dan struktur mikro:



Dengan demikian, water-to-binder ratio pada RPC bukan sekadar angka desain, tetapi merupakan parameter pengendali keseimbangan antara densifikasi matriks, hidrasi, rheology, dan performa akhir. Nilai w/b yang optimum harus ditentukan bersama dengan distribusi ukuran partikel, jenis dan dosis silica fume atau SCM, karakteristik superplasticizer, metode pencampuran, serta kondisi curing.

Secara konseptual, desain w/b RPC dapat dirumuskan sebagai:

$\frac{\text{Optimasi } w}{b} = \text{Porositas minimum} + \text{Hidrasi efektif} + \text{Workability memadai} + \text{Rheology terkendali}$
--

Dengan pendekatan tersebut, tujuan desain bukan memperoleh w/b serendah mungkin, melainkan memperoleh w/b terendah yang masih memungkinkan hidrasi, dispersi partikel, workability, dan proses pengecoran berlangsung secara efektif. Prinsip ini menjadi dasar penting untuk memahami pembahasan berikutnya mengenai silica fume, karena material ultrahalus tersebut tidak hanya berfungsi sebagai pengisi ruang antarpartikel, tetapi juga memengaruhi kebutuhan air, rheology, hidrasi, dan densifikasi mikrostruktur RPC.

2.5 Silica Fume

Silica fume merupakan salah satu material ultrahalus yang memiliki peran penting dalam pembentukan matriks Reactive Powder Concrete (RPC). Penggunaannya tidak hanya ditujukan untuk meningkatkan kandungan material reaktif, tetapi juga untuk mengendalikan struktur pori dan meningkatkan kerapatan mikrostruktur. Dalam sistem RPC, silica fume bekerja melalui dua mekanisme utama, yaitu **physical filling effect** dan **pozzolanic reaction**. Kedua mekanisme tersebut berlangsung secara simultan dan memberikan kontribusi terhadap peningkatan densifikasi matriks semen.

Secara fisik, ukuran partikel silica fume yang sangat halus memungkinkan material ini mengisi ruang kosong di antara partikel semen dan material halus lainnya. Mekanisme tersebut dapat meningkatkan **particle packing density** dan mengurangi volume rongga awal dalam sistem binder. Richard dan Cheyrezy (1995) menempatkan material ultrahalus, termasuk silica fume, sebagai bagian penting dari konsep RPC karena kemampuannya untuk memperbaiki susunan partikel dan menghasilkan matriks dengan porositas yang lebih rendah. Dengan demikian, keberadaan silica fume tidak hanya berfungsi sebagai material tambahan, tetapi juga sebagai bagian dari strategi rekayasa distribusi ukuran partikel.

Selain memberikan efek pengisian fisik, silica fume mempunyai aktivitas pozzolanik yang tinggi karena kandungan silika amorfnya. Silika reaktif tersebut dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida, Ca(OH)_2 , yang terbentuk selama hidrasi semen. Secara sederhana, reaksi pozzolanik dapat dituliskan sebagai:

2.6 Supplementary Cementitious Materials

SCM seperti:

- fly ash;
- GGBFS;
- metakaolin;
- rice husk ash;
- limestone;
- industrial by-products

dapat digunakan untuk mengurangi cement dan meningkatkan sustainability.

Review 2025 menunjukkan bahwa SCM dapat meningkatkan durability UHPC melalui kombinasi particle packing dan reaktivitas pozzolanik/hidraulik.

2.7 Superplasticizer dan Rheology

Superplasticizer memungkinkan RPC mempertahankan flowability meskipun w/b rendah. Namun efektivitas SP sangat dipengaruhi oleh chemistry cement, silica fume, SCM dan luas permukaan partikel. Rheology UHPC merupakan masalah kompleks karena volume padatan tinggi dan air rendah. Review terbaru menunjukkan bahwa rheological

design menjadi semakin penting untuk pumping, self-consolidating, spraying dan 3D printing.

2.8 Serat dan Fiber Bridging

Serat berfungsi menghambat propagasi crack.

Mekanisme:

Crack → Fiber Bridging → Pull – out → Energy Dissipation

Steel fiber umumnya memberikan kapasitas bridging tinggi, sedangkan synthetic fibers dapat membantu crack control pada skala lebih kecil. Review 2024 menunjukkan bahwa fiber merupakan komponen penting dalam tensile strength, post-cracking toughness dan crack control UHPC [25]. Hybrid fiber dapat memberikan efek sinergis. Review 2025 menunjukkan bahwa kombinasi steel–synthetic atau steel–basalt dapat meningkatkan kombinasi strength, ductility dan crack resistance [26,27].

2.9 Mekanisme Hidrasi

RPC mempunyai sistem hidrasi yang lebih kompleks daripada cement paste biasa karena terdapat cement, silica fume, SCM, quartz dan admixture.

Tahapan:

1. dissolution;
2. nucleation;
3. C-S-H formation;
4. pozzolanic reaction;
5. pore filling;
6. microstructure densification.

Ge et al. menunjukkan bahwa perubahan kandungan active admixtures dapat memengaruhi hydration characteristics, hydration products dan microstructure RPC [4].

2.10 Curing

Curing merupakan salah satu parameter paling sensitif dalam RPC.

Metode:

- water curing;
- ambient curing;
- steam curing;
- hot water curing;
- hot air curing;
- combined curing.

Studi 2025 pada fiber-based RPC menunjukkan bahwa combined curing memberikan perkembangan strength yang sangat baik dan bahwa curing berpengaruh besar terhadap fase hidrasi . Penelitian lain pada 2025 menunjukkan bahwa high-temperature curing selama kondisi tertentu

dapat menghasilkan pembentukan fase seperti tobermorite dan densifikasi pori [22].

2.11 Mikrostruktur

Mikrostruktur RPC dapat dianalisis menggunakan:

- SEM-EDS;
- XRD;
- FTIR;
- TGA/DTG;
- BET/BJH.

SEM menunjukkan morphology dan crack/interface. XRD menunjukkan crystalline phases. FTIR menunjukkan perubahan ikatan kimia. TGA/DTG memberikan informasi thermal decomposition. BET/BJH memberikan informasi surface area dan pore structure.

Pendekatan multimetode lebih kuat daripada mengandalkan satu instrumen karena hydration products, pore structure dan morphology mempunyai karakter berbeda.

2.12 Sifat Mekanik

RPC dapat mencapai strength sangat tinggi karena:

Dense packing + Low porosity + Strong matrix + Fiber bridging

Kuat tekan terutama dikontrol oleh matrix density, hydration dan porosity, sedangkan tensile/flexural behavior sangat dipengaruhi fiber orientation, fiber volume fraction, bond dan pull-out behavior

2.13 Durabilitas

Durability RPC berkaitan dengan rendahnya connectivity pori dan rendahnya transport aggressor.

Konsep:

$$\text{Porosity} \downarrow \Rightarrow \text{Permeability} \downarrow \Rightarrow \text{Ion Transport} \downarrow \Rightarrow \text{Durability} \uparrow$$

Namun UHPC/RPC tetap dapat mengalami degradation pada kondisi ekstrem, termasuk aggressive chemical exposure, freeze-thaw, elevated temperature dan coupled deterioration [28].

2.14 Shrinkage

Low w/b ratio menyebabkan self-desiccation dan meningkatkan autogenous shrinkage.

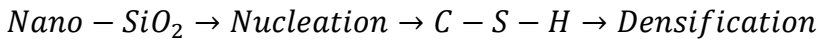
Penelitian 2025 menunjukkan bahwa internal curing menggunakan saturated lightweight sand dapat mengurangi autogenous dan drying shrinkage secara signifikan, sedangkan fiber membantu mengontrol crack development.

Dengan demikian, desain RPC perlu memasukkan shrinkage sebagai performance criterion, bukan sekadar strength.

2.15 Nano-Modified RPC

Nano-silica dapat berfungsi sebagai nucleation site dan highly reactive pozzolanic material.

Mekanisme:



Review 2024 mengenai nanomaterials dalam RPC menempatkan nano-silica sebagai salah satu pendekatan utama untuk peningkatan microstructure, strength dan durability.

Kendala utama adalah agglomeration, dispersion dan biaya.

2.16 Sustainable dan Low-Carbon RPC

Sustainable RPC harus mempertimbangkan:

$$\text{Mechanical Performance} + \text{Durability} + \text{Cost} \\ + \text{Embodied Carbon} + \text{Service Life}$$

Hiew et al. menunjukkan bahwa low-carbon UHPC dapat dicapai melalui low-clinker binder, SCM, material alternatif, optimasi fiber dan pendekatan lifecycle.

Strategi sustainability lainnya meliputi efisiensi cement, efisiensi steel fiber, pemanfaatan by-products, produksi lokal dan pengurangan volume material structural.

2.17 Optimasi Mix Design

Optimasi berbasis DOE/RSM lebih kuat dibandingkan trial-and-error.

Naderi Shourabi et al. menggunakan Box–Behnken design dan ANOVA untuk mengevaluasi pengaruh parameter RPC/UHPC dan menemukan bahwa sand/cement ratio merupakan salah satu parameter sensitif terhadap strength.

Model umum:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{ii} X_i^2 \quad (2-4)$$

Respons dapat berupa:

$$Y_1 = f_c$$

$$Y_2 = f_{flex}$$

$$Y_3 = Flow$$

$$Y_4 = Water\ Absorption$$

$$Y_5 = CO_2$$

2.18 AI dan Digital Mix Design

Perkembangan 2025–2026 mulai mengarah pada machine learning untuk prediksi strength dan optimasi mix design. Studi AI-driven 2025 menunjukkan bahwa early-age compressive strength UHPFRC dapat diprediksi menggunakan pendekatan machine learning.

Pada 2026, review sistematis AI-UHPC menunjukkan bahwa machine learning semakin digunakan untuk menghadapi interaksi nonlinear antara particle packing, binder chemistry, w/b ratio, admixture, fiber dan curing.

Arah masa depan:

*Experimental Data → ML → Prediction → Optimization
→ Experimental Validation*

2.19 Aplikasi Struktural

RPC/UHPC dapat digunakan untuk:

- bridge deck;
- precast segment;
- thin panels;
- repair layer;
- strengthening;
- marine structures;
- industrial structures;
- high-rise components;
- infrastructure exposed to aggressive environments.

Review 2025 menunjukkan bahwa UHPC layer dapat meningkatkan mechanical performance, durability dan multifunctionality pada concrete repair/strengthening systems [32].

2.20 Research Gap

Berdasarkan literatur 2023–2026, terdapat lima gap utama.

Gap 1 : Banyak penelitian masih mengejar strength dibandingkan optimasi performance secara simultan.

Gap 2 : Hubungan quantitative particle packing–hydration microstructure–performance masih perlu diperkuat.

- Gap 3** : Sustainable RPC masih menghadapi trade-off antara cement ` reduction dan early-age performance.
- Gap 4** : Durability banyak diuji pada single exposure, sedangkan kondisi lapangan sering bersifat coupled exposure [28].
- Gap 5** : Integrasi experimental characterization, DOE, LCA dan AI masih terbatas.

Karena itu, research framework monograf ini diarahkan pada:

Particle Packing → Hydration → Microstructure → Mechanical Performance → Durability → Sustainability → Optimization.

NASKAH PENGAJUNAN ISBN

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Penelitian RPC dirancang menggunakan pendekatan multiskala:

Material characterization



Particle-size optimization



Mix design



Fresh properties



Curing



Mechanical testing



Durability



Microstructure



Statistical modelling



Sustainability



Optimum RPC

Pendekatan multiskala ini sesuai dengan perkembangan penelitian UHPC yang semakin menghubungkan material, interface, structure dan lifecycle performance.

3.2 Bahan

Bahan utama:

1. Portland cement;
2. silica fume;
3. quartz powder;
4. fine quartz sand;
5. water;
6. high-range water-reducing admixture;
7. steel/synthetic/basalt fiber;
8. SCM untuk formulasi sustainable RPC.

Pemilihan material harus berdasarkan particle size, chemical composition, mineralogy dan compatibility.

3.3 Karakterisasi Bahan

Cement

- XRF;
- XRD;
- particle-size distribution;
- specific gravity;
- Blaine.

Silica fume

- SiO₂ content;
- BET;
- particle size;
- SEM.

Quartz

- XRD;
- particle size;
- specific gravity.

Fiber

- diameter;
- length;
- aspect ratio;
- tensile strength;
- surface condition.

3.4 Perancangan Campuran

Formulasi awal harus memenuhi:

$$w/b = 0.15 - 0.25 \quad (3-1)$$

dengan nilai aktual ditentukan berdasarkan workability dan target strength. Contoh preliminary mixture Tabel 4. :

Tabel 4. JMF reactive Powder Concrete

Material	kg/m ³
Cement	700–850
Silica fume	100–200
Quartz powder	200–300
Fine sand	700–900
Water	170–210
SP	disesuaikan
Fiber	1–2.5 vol.%

3.5 Optimasi Particle Packing

Distribusi particle size ditentukan menggunakan PSA.

Target:

Packing Density → Maximum

dan:

Void Volume → Minimum

Parameter packing kemudian dimasukkan sebagai faktor dalam DOE.

3.6 Pembuatan Benda Uji

Prosedur:

1. dry mixing cement + silica fume + quartz;
2. penambahan fine sand;
3. penambahan sebagian air;
4. penambahan SP;
5. high-shear mixing;
6. penambahan fiber secara bertahap;
7. flowability testing;
8. molding;
9. curing.

Metode four-stage mixing telah digunakan dalam studi RPC terbaru [21].

3.7 Curing

Minimal tiga kondisi: **C1:** standard water curing; **C2:** steam curing dan **C3:** combined/heat curing. Jika fasilitas memungkinkan, dapat ditambahkan hot-water curing.

3.8 Fresh Properties

Pengujian:

- flow spread;
- setting time;
- density;
- temperature;
- air content.

Rheological performance harus dianalisis bersama SP dosage karena peningkatan silica fume atau nano-silica dapat meningkatkan viscosity.

3.9 Mechanical Testing

Pengujian:

Compressive strength

$$f_c = P/A \quad (3-2)$$

Splitting tensile strength

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3-3)$$

Flexural strength

Mengikuti konfigurasi three-point atau four-point bending. **Modulus**

Ditentukan dari stress–strain response. **Toughness** Dihitung dari area di bawah load–deflection atau stress–strain curve.

3.10 Durability

Parameter:

- water absorption;
- sorptivity;
- chloride penetration;
- chloride migration;
- carbonation;
- sulfate resistance;
- thermal cycling;
- freeze-thaw jika relevan.

Durability sebaiknya dianalisis berdasarkan transport mechanism dan microstructure, bukan hanya perubahan strength.

3.11 Karakterisasi Mikrostruktur

SEM-EDS

Untuk:

- morphology;
- pore;
- crack;
- fiber–matrix interface;
- elemental mapping.

XRD untuk crystalline phases.

FTIR untuk functional groups dan perubahan bonding.

TGA/DTG Untuk:

- bound water;
- C-S-H decomposition;
- portlandite;
- carbonate.

BET/BJH untuk:

- surface area;
- pore volume;
- pore diameter.

3.12 DOE/RSM

Desain eksperimen dapat menggunakan:

- Central Composite Design;
- Box–Behnken Design.

Faktor:

$$\begin{aligned}X_1 &= SF \\X_2 &= SCM \\X_3 &= w/b \\X_4 &= Fiber \\X_5 &= Sand/Binder\end{aligned}$$

Respons:

$$\begin{aligned}Y_1 &= f_c \\Y_2 &= f_{flex} \\Y_3 &= Flow \\Y_4 &= Absorption \\Y_5 &= CO_2\end{aligned}$$

3.13 Analisis Statistik

ANOVA dilakukan dengan:

$$\alpha = 0.05$$

Parameter:

- p-value;
- F-value;
- R^2 ;
- adjusted R^2 ;

- predicted R^2 ;
- lack-of-fit.

Model dianggap layak apabila residual dan lack-of-fit memenuhi kriteria statistik.

3.14 Sustainability

Environmental assessment menggunakan:

$$CO_{2eq} = \sum_i m_i EF_i \quad (3-4)$$

dengan:

- m_i = massa material;
- EF_i = emission factor.

Namun evaluasi sebaiknya tidak berhenti pada kg CO₂/m³. Pendekatan lifecycle perlu mempertimbangkan material efficiency, service life, maintenance dan structural dematerialization

NASKAH PENGAJUNAN ISBN

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Material

Karakterisasi awal bertujuan menentukan chemical composition, mineralogy dan particle-size distribution. Parameter tersebut merupakan dasar untuk menjelaskan perbedaan reaktivitas dan packing antar-komponen.

Hasil XRF diharapkan menunjukkan bahwa silica fume memiliki kandungan SiO_2 tinggi, sedangkan cement mempunyai komposisi dominan $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Quartz powder terutama berfungsi sebagai filler mineral yang relatif inert.

4.2 Particle Packing

Kurva particle-size distribution harus menunjukkan bagaimana kombinasi cement, silica fume, quartz powder dan sand menghasilkan distribusi yang lebih kontinu.

Jika formulasi optimum menghasilkan:

$$\eta_{opt} > \eta_{reference} \quad (4-1)$$

maka peningkatan packing density dapat digunakan untuk menjelaskan penurunan void volume.

Pendekatan quantitative packing menjadi semakin penting dalam desain sustainable UHPC .

4.3 Workability

Penurunan flow akibat peningkatan silica fume atau nano-silica harus dikaitkan dengan peningkatan specific surface area.

Secara umum:

$$\text{Surface Area} \uparrow \rightarrow \text{Water Demand} \uparrow \rightarrow \text{SP Demand} \uparrow$$

Studi RPC menunjukkan bahwa jenis superplasticizer dan silica fume berpengaruh terhadap rheology dan microstructure.

4.4 Kuat Tekan

Kuat tekan harus dianalisis berdasarkan kombinasi:

$$\text{Packing} + \text{Hydration} + \text{Porosity}$$

Formulasi dengan packing lebih baik dan microstructure lebih padat diperkirakan menghasilkan strength lebih tinggi.

Jika campuran dengan SCM menunjukkan strength awal lebih rendah, hal tersebut tidak langsung menunjukkan kegagalan desain. SCM dengan reaktivitas lebih rendah dapat menyebabkan delayed contribution terhadap hydration, sementara pada umur lanjut densification dapat meningkat.

4.5 Kuat Lentur dan Tarik

Performa lentur tidak hanya dikontrol oleh matrix strength. Fiber volume fraction, fiber orientation, bond dan pull-out sangat menentukan post-cracking response [25–27].

Jika fiber hybrid digunakan, peningkatan toughness dapat dijelaskan melalui:

Microcrack Bridging + Macrocrack Bridging
→ Multiple Cracking → Higher Energy Absorption

4.6 Toughness

Toughness merupakan parameter penting untuk membedakan RPC fiber-reinforced dari brittle high-strength concrete.

Area di bawah kurva:

$$T = \int_0^{\delta_u} P(\delta) d\delta \quad (4-2)$$

dapat digunakan sebagai indikator energy absorption.

Hybrid fiber berpotensi menghasilkan synergistic effect karena masing-masing fiber bekerja pada skala crack yang berbeda .

4.7 Pengaruh Curing

Curing temperature meningkatkan reaction kinetics. Namun, peningkatan temperatur tidak selalu berarti peningkatan durability secara proporsional. Pada penelitian RPC 2025, curing temperature dan duration memengaruhi perkembangan strength dan hydration phases].

Karena itu, curing optimum harus ditentukan berdasarkan:

$$\text{Strength} + \text{Microstructure} + \text{Durability} + \text{Energy}$$

bukan strength saja.

4.8 Shrinkage

Jika data menunjukkan autogenous shrinkage tinggi pada RPC dengan w/b rendah, mekanismenya dapat dikaitkan dengan self-desiccation. Internal curing dapat digunakan untuk menjaga internal relative humidity dan mengurangi shrinkage.

Fiber tidak selalu mengurangi nilai free shrinkage secara langsung, tetapi dapat mengurangi crack propagation melalui bridging.

4.9 Porositas

Penurunan porosity merupakan salah satu mekanisme utama RPC.

$$\text{Packing} \uparrow + \text{Hydration} \uparrow \rightarrow \text{Porosity} \downarrow$$

Namun total porosity harus dianalisis bersama pore connectivity dan pore-size distribution.

4.10 Durabilitas

Jika water absorption dan sorptivity turun bersamaan dengan peningkatan strength, hubungan tersebut mendukung hipotesis bahwa densifikasi microstructure terjadi.

Namun durability tidak boleh disimpulkan hanya dari compressive strength. Studi UHPC terbaru menunjukkan bahwa aggressive exposure dapat menghasilkan degradation pada matrix, interface maupun fiber system.

4.11 SEM-EDS

SEM digunakan untuk mengidentifikasi:

- dense C-S-H matrix;
- unhydrated particles;
- pores;
- microcracks;
- fiber-matrix interface.

EDS dapat digunakan untuk mengevaluasi elemental distribution. Interpretasi harus menghindari klaim berlebihan seperti "all pores were eliminated". Istilah yang lebih tepat adalah **pore** refinement, matrix densification atau reduced pore connectivity, apabila data mendukung.

4.12 XRD

XRD digunakan untuk mengidentifikasi fase crystalline. Jika intensitas quartz tinggi, hal tersebut konsisten dengan keberadaan quartz powder/sand. Perubahan portlandite dapat digunakan bersama TGA untuk mendukung interpretasi pozzolanic reaction, tetapi XRD saja tidak cukup untuk mengkuantifikasi C-S-H karena sifatnya yang sebagian besar amorf [4].

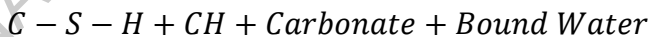
4.13 FTIR

FTIR digunakan untuk melihat perubahan vibrational bands yang berkaitan dengan silicate network dan carbonate.

Perubahan posisi/intensitas peak dapat digunakan untuk mendukung interpretasi perubahan struktur hydration products.

4.14 TGA/DTG

TGA/DTG memberikan informasi kuantitatif tambahan mengenai:



Kombinasi XRD–TGA lebih kuat untuk menginterpretasikan hydration evolution dibandingkan masing-masing metode secara terpisah.

4.15 BET/BJH

BET surface area dan pore volume dapat digunakan untuk menghubungkan material structure dengan transport properties.

Jika formulasi optimum menunjukkan:

Pore Volume ↓

dan:

Average Pore Diameter ↓

bersamaan dengan penurunan absorption, maka terdapat dukungan terhadap mekanisme pore refinement.

4.16 Hubungan Mikrostruktur–Strength

Hubungan utama dapat dirumuskan:

*Particle Packing → Void Reduction → Hydration
→ C – S – H Densification → Strength*

Ge et al. memberikan dukungan eksperimental bahwa active admixtures memengaruhi hydration products dan microstructure RPC.

4.17 Hubungan Mikrostruktur–Durability

Transport properties dipengaruhi oleh pore connectivity.

Secara konseptual:

Pore Connectivity ↓ → *Transport* ↓ → *Durability* ↑

Namun crack akibat shrinkage atau mechanical loading dapat menciptakan jalur transport baru. Oleh karena itu, durability RPC harus dipahami sebagai interaksi antara matrix, crack dan exposure environment.

4.18 Pengaruh Fiber

Fiber memberikan keuntungan utama pada tensile dan flexural behavior, bukan semata-mata compressive strength.

Steel fiber meningkatkan bridging capacity, sedangkan synthetic/basalt fiber dapat berkontribusi terhadap crack control dan hybrid response.

Studi marine exposure menunjukkan bahwa steel fiber dapat menghadapi risiko corrosion yang berbeda dari PE fiber, sehingga pemilihan fiber harus disesuaikan dengan exposure condition.

4.19 Sustainability

Sustainability RPC harus dihitung berdasarkan:

$$\text{Carbon intensity} = \frac{CO_{2eq}}{\text{Performance}}$$

Pendekatan tersebut lebih bermakna daripada sekadar membandingkan CO_2/m^3 . SCM dapat mengurangi environmental impact secara signifikan.

Studi LCA 2025 menunjukkan bahwa penggunaan GGBFS dan fly ash dapat menurunkan dampak lingkungan UHPC dengan tetap

mempertahankan performa utama pada formulasi tertentu . Strategi lain adalah penggunaan industrial solid waste. Studi 2025 bahkan menunjukkan kemungkinan UHPC berbasis solid waste dengan penurunan CO₂ dan biaya dibandingkan UHPC konvensional.

4.20 Optimasi Formula

Formulasi optimum ditentukan menggunakan desirability function:

$$D = (d_1 d_2 \dots d_n)^{1/n} \quad (4-3)$$

dengan tujuan:

maximize

- compressive strength;
- flexural strength;
- toughness.

minimize

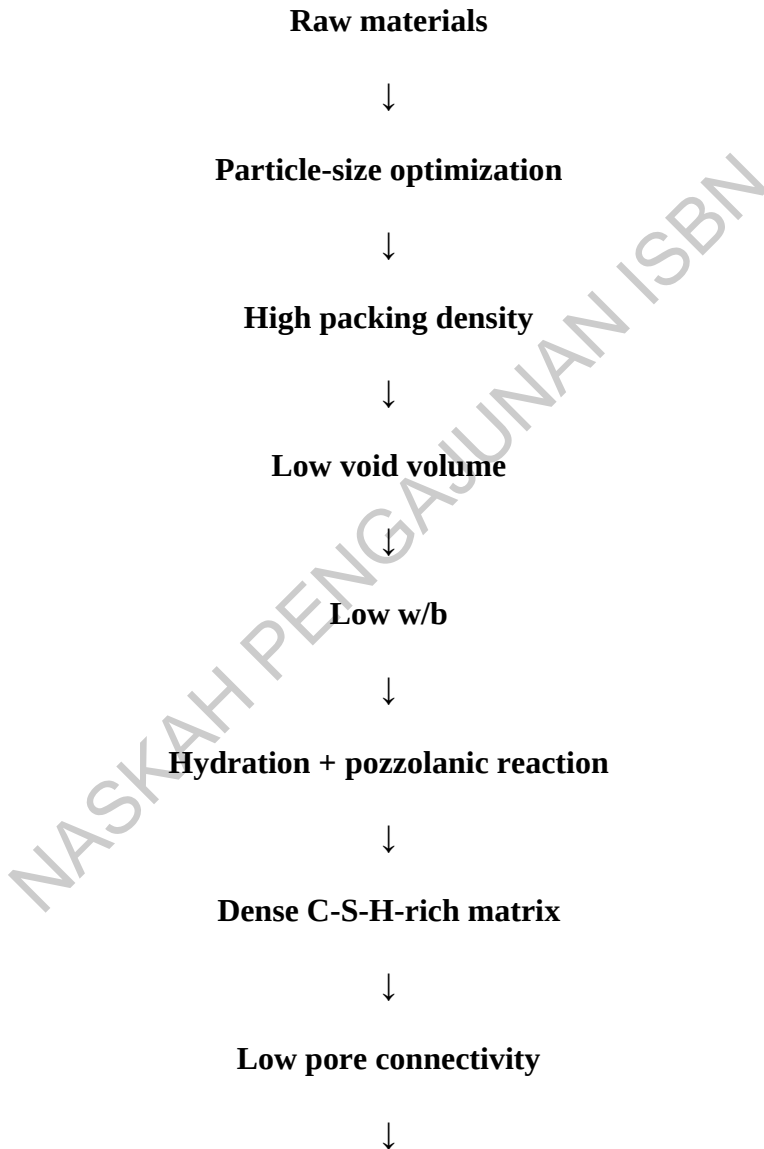
- water absorption;
- shrinkage;
- cement;
- CO₂.

constraint

- flowability;
- setting time;
- constructability.

4.21 Mekanisme Terpadu RPC

Mekanisme akhir dapat dirumuskan:



High compressive strength



Fiber bridging



High tensile/flexural toughness



Low transport



High durability



Longer service life



Potentially lower life-cycle impact

Konsep terakhir sangat penting: strength tinggi tidak otomatis berarti sustainable. Sustainability baru dapat dicapai jika performance advantage menghasilkan pengurangan material, maintenance atau replacement selama service life.

4.22 Implikasi Engineering

RPC sangat menarik untuk struktur yang memperoleh keuntungan dari pengurangan dimensi atau peningkatan durability.

Contohnya:

1. bridge deck;
2. thin precast panels;
3. structural joints;
4. repair overlays;
5. marine structures;
6. industrial facilities;
7. infrastructure exposed to chloride;
8. strengthening systems.

Review UHPC layer 2025 menunjukkan potensi UHPC untuk repair dan strengthening melalui kombinasi mechanical performance dan durability.

4.23. Perilaku Eksperimental Sambungan Balok–Kolom RPC terhadap Beban Lateral Siklik

Subbab ini mengintegrasikan hasil penelitian eksperimental Naibaho, Budiono, Surono, dan Pane (2015) mengenai sambungan balok–kolom eksterior berbahan Reactive Powder Concrete (RPC). Artikel yang dapat diverifikasi melaporkan tiga benda uji dengan kuat tekan RPC sekitar 135 MPa. Karena dokumen disertasi lengkap belum menjadi sumber yang dapat diperiksa pada saat penyusunan bagian ini, angka dan uraian di bawah dirujuk pada publikasi ilmiah tersebut; penomoran halaman disertasi tidak diklaim. Jika naskah disertasi tersedia, data tambahan dapat dicocokkan dan sitasi diperluas pada revisi berikutnya.

Tujuan eksperimen adalah mengevaluasi apakah perubahan detail penulangan pada sambungan eksterior dapat memperbaiki respons terhadap pembebanan lateral bolak-balik. Perbandingan ini penting karena sambungan harus meneruskan gaya dari balok ke kolom ketika arah gempa berubah, sekaligus menjaga kemampuan deformasi dan disipasi energi tanpa penurunan kekuatan yang tidak terkendali.

Tabel 5. Konfigurasi benda uji dalam penelitian Naibaho dkk. (2015)

Benda uji	Konfigurasi sambungan	Makna perbandingan
BU-1	Sambungan balok–kolom konvensional	Pembanding dasar.
BU-2	Tulangan balok diteruskan menembus kolom dan dilas pada pelat baja berukuran sebanding dengan penampang balok di sisi jauh kolom.	Menilai detail penyaluran melalui tulangan menerus dan pelat baja.
BU-3	Penambahan tulangan pada tulangan pokok balok di daerah sambungan eksterior.	Menilai pengaruh penambahan tulangan terhadap respons siklik sambungan.

Campuran RPC yang dilaporkan untuk pembuatan benda uji ditunjukkan pada Tabel 4.23.2. Komposisi ini merupakan data campuran dari artikel, bukan rekomendasi universal untuk semua produksi RPC. Perubahan sumber bahan, karakteristik pasir kuarsa, superplasticizer, prosedur pencampuran, dan curing dapat mengubah workability maupun sifat beton.

Tabel 6. Komposisi campuran RPC yang dilaporkan (per m³)

Material	Kuantitas (kg/m ³)
Semen	950
Silica fume	114
Pasir kuarsa #50	1.064
Pasir kuarsa #200	66,21
Sika Fibre	0,60
Superplasticizer Sika Viscocrete-10	27,07
Air	208,54

Pembebanan dilakukan secara lateral siklik dengan kendali perpindahan. Protokol pengujian mengacu pada kriteria ACI 374.1-05: beberapa siklus diterapkan pada setiap tingkat drift, lalu amplitudo drift dinaikkan secara bertahap. Pengukuran perpindahan dilakukan menggunakan LVDT, sedangkan regangan tulangan direkam menggunakan strain gauge. Pengujian dilanjutkan hingga drift besar; artikel melaporkan data sampai sekitar 6,33%. Karena pembebanan bolak-balik menukar sisi tarik dan tekan pada balok, pola retak serta respons positif dan negatif tidak selalu simetris.

Retak awal yang halus dilaporkan muncul pada sisi tarik balok pada drift sekitar 0,35%; pada drift sekitar 0,75%, sebagian retak mulai berkembang dan menghubungkan daerah tarik dengan sisi tekan. Pada drift tinggi, retak lentur lebih dominan daripada retak geser diagonal menurut pengamatan penulis. BU-3 menunjukkan pola retak yang lebih tersebar, sedangkan BU-2 memperlihatkan jumlah retak paling sedikit pada tahap akhir yang dilaporkan. Banyaknya retak tidak boleh langsung

diartikan sebagai kerusakan yang lebih buruk: retak yang tersebar dan relatif halus dapat menunjukkan distribusi deformasi, tetapi penilaian tetap harus mempertimbangkan lebar retak, slip tulangan, kerusakan inti sambungan, dan kehilangan kapasitas.

Kurva histeretik dan hubungan beban–perpindahan menunjukkan bahwa detail sambungan memengaruhi respons siklik. Berdasarkan ringkasan hasil artikel, BU-3 secara umum menunjukkan perilaku siklik yang lebih baik dalam pola retak, bentuk kurva histeretik, hubungan beban–lendutan, degradasi kekuatan, dan degradasi kekakuan. Artikel melaporkan bahwa, dibandingkan BU-1, beban BU-3 meningkat sekitar 21,37% pada arah push dan menurun sekitar 6,55% pada arah pull; kenaikan rata-ratanya dilaporkan sekitar 8,12%. Untuk BU-2, perubahan yang dilaporkan sekitar +18,77% pada arah push dan -4,54% pada arah pull, dengan rata-rata sekitar +8,11%. Perbandingan rata-rata ini tidak menghapus perbedaan respons menurut arah pembebanan.

Kekakuan siklik menurun ketika drift bertambah, sebagaimana lazim terjadi akibat retak, slip, dan kerusakan progresif. Nilai peak-to-peak stiffness pada siklus ketiga untuk beberapa tingkat drift yang dilaporkan disarikan dalam Tabel 4.23.3. Nilai ini ditampilkan untuk menunjukkan tren, bukan sebagai nilai desain yang dapat langsung dipakai tanpa verifikasi geometri, satuan, dan prosedur pengujian.

Tabel 7. Kekakuan peak-to-peak pada tingkat drift terpilih (kN/mm)

Drift (%)	BU-1	BU-2	BU-3
0,20	3,20	5,04	4,93
0,75	3,30	3,53	3,55
2,20	1,64	1,67	1,70
3,50	1,22	1,28	1,30
6,33	0,82	0,89	0,89

Data memperlihatkan penurunan kekakuan pada ketiga benda uji: dari kisaran 3,20–5,04 kN/mm pada drift 0,20% menjadi sekitar 0,82–0,89 kN/mm pada drift 6,33%. Pada drift tinggi, BU-3 dan BU-2 mempertahankan kekakuan sedikit lebih tinggi daripada BU-1 pada beberapa tingkat drift, tetapi selisihnya tidak besar dan tidak seragam untuk seluruh respons. Dengan demikian, kesimpulan yang tepat bukan bahwa satu detail unggul mutlak pada setiap metrik, melainkan bahwa perubahan detailing mengubah lintasan degradasi dan respons histeretik sambungan.

Disipasi energi dihitung dari luas loop histeretik dan diakumulasikan sepanjang siklus. Artikel melaporkan bahwa benda uji dengan energi kumulatif terbesar berubah menurut tingkat drift: BU-3 unggul pada beberapa tahap awal hingga menengah, BU-2 pada drift sekitar 6%, sedangkan pada drift 6,33% nilai kumulatif yang dilaporkan adalah BU-1 = 38.197 kN·mm, BU-2 = 37.015 kN·mm, dan BU-3 = 34.951 kN·mm. Karena itu, tidak tepat menyatakan BU-3 memiliki energi kumulatif tertinggi pada seluruh pengujian. Penilaian kinerja gempa harus

menggabungkan bentuk loop, kapasitas beban, degradasi kekuatan dan kekakuan, drift yang dicapai, serta kondisi kerusakan akhir.

Implikasi utama untuk desain adalah bahwa mutu RPC yang tinggi perlu disertai detailing tulangan yang memadai. Pada penelitian tersebut, BU-3 dinilai penulis memiliki kekuatan, daktilitas, dan indeks pengekanan efektif yang lebih baik daripada BU-1 dan BU-2 secara keseluruhan. Temuan ini memberi bukti potensi RPC untuk sambungan eksterior, tetapi belum cukup untuk menjadikan satu detail sebagai ketentuan desain umum: jumlah benda uji hanya tiga, hasil bergantung pada konfigurasi spesimen dan setup laboratorium, dan validasi pada variasi geometri, beban aksial kolom, rasio tulangan, ukuran sambungan, serta kondisi konstruksi nyata masih diperlukan. Penerapan praktis harus mengikuti standar desain gempa dan beton bertulang yang berlaku serta evaluasi rekayasa oleh perencana struktur.

BAB 5

Aplikasi Reactive Powder Concrete Pada Sambungan Balok–Kolom Beton Bertulang Di Daerah Rawan Gempa

Bab ini membahas penerapan Reactive Powder Concrete (RPC) pada sambungan balok–kolom eksterior sebagai salah satu komponen penting dalam sistem rangka beton bertulang tahan gempa. Uraian disusun dengan mengacu pada penelitian eksperimental Naibaho, Budiono, Surono, dan Pane (2015), serta dilengkapi penjelasan mekanika struktur, interpretasi perilaku siklik, pertimbangan desain, pelaksanaan, dan arah pengembangan. Angka dan temuan eksperimen yang dinyatakan sebagai hasil penelitian dibatasi pada informasi yang dilaporkan dalam publikasi tersebut; uraian lain merupakan penjelasan prinsip rekayasa dan rekomendasi yang harus diverifikasi melalui analisis serta pengujian.

5.1 Pendahuluan

Perkembangan teknologi beton tidak hanya diarahkan pada peningkatan kuat tekan, tetapi juga pada kemampuan elemen struktur mempertahankan fungsi ketika menerima beban berulang, perubahan arah gaya, dan deformasi inelastik. Kebutuhan tersebut sangat penting pada bangunan di wilayah rawan gempa. Pada saat gempa terjadi, gaya inersia massa bangunan menghasilkan respons lateral yang diteruskan melalui pelat, balok, kolom, sambungan, dan fondasi. Apabila salah satu bagian

dalam jalur gaya mengalami kerusakan getas sebelum mekanisme disipasi energi berkembang, kapasitas keseluruhan sistem dapat menurun secara tajam.

Sambungan balok–kolom merupakan daerah kritis karena di dalamnya gaya geser, momen lentur, gaya aksial, dan gaya tarik tulangan saling berinteraksi dalam ruang yang relatif terbatas. Pada sambungan eksterior, balok hanya masuk dari satu sisi kolom. Kondisi ini membuat penyaluran gaya tarik tulangan balok dan pengungkuran di dalam inti sambungan menjadi persoalan penting. Ruang yang sempit, kepadatan tulangan, panjang penyaluran terbatas, dan kebutuhan pengekangan dapat meningkatkan risiko retak diagonal serta kerusakan lokal.

Reactive Powder Concrete dikembangkan sebagai beton berkinerja sangat tinggi melalui rekayasa partikel halus, pengurangan atau penghilangan agregat kasar, penggunaan bahan pozzolanik kaya silika, pengendalian rasio air terhadap bahan pengikat, dan penggunaan superplasticizer. Pada formulasi tertentu, serat juga ditambahkan untuk membantu mengendalikan retak dan meningkatkan respons pascaretak. Matriks yang padat dapat memberikan kuat tekan tinggi dan mengurangi porositas kapiler, tetapi kuat tekan tinggi tidak secara otomatis menjamin sambungan tahan gempa. Kinerja sambungan tetap bergantung pada detail tulangan, pengungkuran, pengekangan, kualitas pengecoran, dan mekanisme kerusakan yang terbentuk.

Penelitian Naibaho dkk. (2015) memberikan contoh penting bagaimana RPC dapat dikaji bukan hanya sebagai material, melainkan sebagai bagian dari sistem struktur. Penelitian tersebut membandingkan tiga konfigurasi sambungan balok–kolom eksterior dengan kuat tekan RPC yang dilaporkan sebesar 135 MPa. Benda uji mencakup sambungan konvensional, sambungan dengan tulangan balok yang diteruskan menembus kolom dan pelat baja yang dilas, serta sambungan dengan penambahan tulangan pada tulangan pokok balok di daerah sambungan. Hasil publikasi menyatakan bahwa benda uji ketiga menunjukkan perilaku siklik yang lebih baik dibandingkan dua benda uji lainnya berdasarkan sejumlah indikator.

Bab ini menempatkan hasil tersebut dalam konteks rekayasa struktur. Tujuannya bukan menyimpulkan bahwa satu detail dapat digunakan untuk semua bangunan, melainkan menjelaskan alasan sambungan perlu diuji di bawah beban siklik, bagaimana hasil pengujian dibaca, dan apa yang harus diperiksa sebelum teknologi RPC diterapkan pada proyek nyata.

5.2 Konsep dan Karakteristik RPC untuk Aplikasi Struktural

5.2.1 Pengertian dan prinsip material

Reactive Powder Concrete, yang dalam bahasa Indonesia sering disebut beton bubuk reaktif, adalah material berbasis semen dengan distribusi ukuran partikel yang dirancang untuk menghasilkan susunan padat. Istilah “reaktif” mengacu pada pemanfaatan bahan sangat halus dan reaksi kimia yang berkontribusi terhadap pembentukan produk hidrasi.

Konsepnya menggabungkan dua pendekatan: pemadatan fisik melalui pengaturan gradasi partikel dan peningkatan ikatan matriks melalui reaksi semen serta bahan pozzolanik.

Komponen yang umum digunakan pada RPC meliputi semen, silica fume, pasir kuarsa berukuran halus, air dalam jumlah terkendali, superplasticizer, dan pada formulasi tertentu serat. Artikel Naibaho dkk. (2015) menyebutkan penggunaan semen, silica fume, pasir kuarsa dengan ukuran maksimum sekitar 600 mikrometer, superplasticizer, dan serat polypropylene. Komposisi tepat, kadar masing-masing bahan, kondisi perawatan, serta karakteristik serat harus merujuk pada naskah lengkap penelitian apabila hendak direplikasi. Komposisi tidak boleh direkonstruksi hanya berdasarkan abstrak.

Penggunaan partikel halus dapat mengurangi ruang kosong di antara butiran dan membantu menghasilkan matriks yang rapat. Silica fume berperan sebagai bahan pengisi mikro sekaligus bahan pozzolanik yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen. Pasir kuarsa halus membentuk kerangka agregat dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan beton konvensional. Superplasticizer membantu mempertahankan kemampuan alir pada kadar air rendah. Namun, campuran RPC sangat peka terhadap urutan pencampuran, energi pengadukan, kelembapan bahan, temperatur, dan waktu antara pencampuran dengan pengecoran.

5.2.2 Kuat tekan tinggi bukan satu-satunya ukuran kinerja

Kuat tekan yang tinggi dapat menguntungkan ketika dimensi elemen dibatasi atau ketika dibutuhkan kapasitas tekan besar. Matriks rapat juga berpotensi meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi air dan beberapa mekanisme transport zat agresif. Akan tetapi, sambungan tahan gempa harus dinilai dengan parameter yang lebih luas, antara lain kapasitas beban lateral, hubungan beban–perpindahan, daktilitas, kemampuan disipasi energi, degradasi kekuatan, degradasi kekakuan, lebar dan distribusi retak, serta mode keruntuhan.

Pada beton berkekuatan tinggi, kapasitas tarik dan deformasi pascaretak tidak selalu meningkat sebanding dengan kuat tekan. Matriks yang sangat kuat dapat mengalami retak dengan bidang yang relatif tajam apabila tidak terdapat mekanisme penghubung retak yang memadai. Serat dapat membantu menjembatani retak mikro dan memperbaiki respons pascaretak, tetapi kontribusinya bergantung pada jenis serat, geometri, orientasi, kadar, lekatan, dan proses pencampuran. Serat polypropylene pada penelitian yang dibahas tidak boleh dianggap otomatis menggantikan kebutuhan tulangan baja atau pengekanan inti sambungan.

Karena itu, pemilihan RPC untuk elemen tahan gempa harus didasarkan pada kinerja sistem. Material dengan kuat tekan sangat tinggi dapat memberikan manfaat, tetapi hanya jika detail tulangan dan geometri sambungan mampu mengembangkan kapasitas yang direncanakan tanpa keruntuhan getas. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip bahwa desain

tahan gempa berorientasi pada jalur gaya yang jelas, mekanisme plastis yang terkendali, dan kapasitas deformasi yang memadai.

5.3 Peran Sambungan Balok–Kolom dalam Sistem Tahan Gempa

5.3.1 Jalur gaya dan tuntutan pada inti sambungan

Ketika rangka gedung bergoyang akibat gempa, balok dan kolom mengalami perubahan momen sesuai arah perpindahan. Di muka kolom, momen balok berkaitan dengan pasangan gaya tarik dan tekan pada tulangan serta beton. Gaya-gaya tersebut harus diteruskan melewati inti sambungan menuju kolom dan elemen rangka lainnya. Pada saat yang sama, inti sambungan menerima gaya geser yang dapat menghasilkan tegangan diagonal.

Pada sambungan eksterior, tulangan longitudinal balok harus diangkur di dalam kolom atau menggunakan detail mekanis yang memenuhi persyaratan desain. Ruang untuk penyaluran sering terbatas karena balok hanya datang dari satu sisi. Jika tulangan tidak dapat mengembangkan tegangan yang diperlukan, dapat terjadi slip tulangan, pembukaan retak di muka kolom, atau penurunan kekakuan. Jika kapasitas geser inti sambungan tidak memadai, retak diagonal dapat berkembang dan menyebabkan penurunan kekuatan.

Kepadatan tulangan pada inti sambungan juga memengaruhi kemampuan beton mengisi ruang di antara batang baja. Campuran RPC yang memiliki kemampuan alir tinggi berpotensi membantu pengisian daerah rapat, tetapi hal tersebut tidak boleh diasumsikan tanpa pengujian

workability, pemeriksaan segregasi, dan verifikasi prosedur pengecoran. Viskositas yang tinggi atau waktu kerja yang pendek justru dapat menimbulkan rongga jika proses pengecoran tidak terkendali.

5.3.2 Mekanisme yang diharapkan dan mekanisme yang harus dihindari

Dalam konsep desain kapasitas, struktur diarahkan agar terbentuk mekanisme inelastik yang telah dipertimbangkan, biasanya berupa sendi plastis pada balok pada lokasi yang direncanakan, sementara kolom dan inti sambungan tetap memiliki kapasitas yang cukup. Tujuan tersebut tidak berarti kerusakan dapat dihilangkan sama sekali. Tujuannya ialah mengatur lokasi, urutan, dan tingkat kerusakan sehingga struktur mampu mengembangkan deformasi tanpa kehilangan kestabilan secara tiba-tiba.

Mekanisme yang perlu dihindari antara lain keruntuhan geser getas pada inti sambungan, kegagalan pengangkuran tulangan, kehilangan lekatan yang berlebihan, dan kerusakan kolom yang mendahului mekanisme balok yang direncanakan. Beton berkekuatan tinggi tidak menghapus risiko ini. Sebaliknya, perbedaan antara kapasitas material beton dan kapasitas tulangan dapat menuntut perhatian lebih besar pada detail dan pemeriksaan kapasitas.

Untuk menilai sambungan, peneliti perlu mencatat bukan hanya beban maksimum, tetapi juga kapan retak pertama muncul, bagaimana retak berkembang, apakah retak terkonsentrasi pada inti atau menyebar ke balok, apakah terjadi slip tulangan, dan apakah kekuatan dapat

dipertahankan setelah beberapa siklus. Pengamatan visual perlu dilengkapi pengukuran perpindahan dan, jika tersedia, regangan tulangan atau beton.

5.4 Ringkasan Penelitian Eksperimental Naibaho dkk. (2015)

5.4.1 Tujuan dan ruang lingkup

Naibaho, Budiono, Surono, dan Pane memublikasikan penelitian berjudul “Studi Eksperimental Perilaku Sambungan Balok-Kolom Eksterior Beton Bubuk Reaktif Terhadap Beban Lateral Siklis” pada Jurnal Teknik Sipil, Volume 22, Nomor 3, halaman 165–174, tahun 2015. Artikel tersebut meneliti perilaku sambungan balok–kolom eksterior yang menggunakan RPC dan mengalami pembebanan lateral siklik. Fokusnya adalah membandingkan konfigurasi detail sambungan, khususnya strategi penyaluran dan penambahan tulangan.

Dalam pengujian siklik, gaya lateral atau perpindahan lateral diberikan berulang kali dengan arah bolak-balik. Metode ini lebih representatif untuk mengevaluasi perilaku rangka saat gempa dibandingkan pengujian monotonik satu arah saja, karena gempa dapat menyebabkan pembalikan momen dan regangan. Siklus berulang dapat membuka dan menutup retak, mengubah lekatan tulangan, menurunkan kekakuan, serta menyebabkan akumulasi kerusakan.

Artikel melaporkan tiga benda uji dengan kuat tekan RPC 135 MPa. Angka ini merupakan nilai yang disebutkan dalam publikasi dan harus dipahami sesuai konteks pengujian yang dilaporkan. Nilai tersebut tidak serta-merta dapat digunakan sebagai nilai desain karakteristik untuk semua

produksi RPC. Dalam praktik, kuat tekan desain memerlukan pengendalian mutu, jumlah benda uji yang memadai, metode pengujian yang sesuai, dan evaluasi variabilitas hasil.

5.4.2 Konfigurasi benda uji

BU-1 merupakan sambungan balok–kolom konvensional dan berfungsi sebagai pembanding. BU-2 menggunakan konfigurasi yang meneruskan tulangan balok menembus kolom dan menambahkan pelat baja dengan ukuran sebanding dengan penampang balok pada sisi kolom, dengan sambungan las sebagaimana dijelaskan dalam abstrak artikel. BU-3 menggunakan penambahan tulangan pada tulangan pokok balok di daerah sambungan eksterior.

Ketiga konfigurasi tersebut menunjukkan bahwa penelitian tidak hanya mengubah material, tetapi juga mengubah detail penyaluran gaya. Ini penting karena bila semua benda uji menggunakan material RPC dengan kuat tekan yang sama, perbedaan respons dapat dianalisis terutama dalam kaitannya dengan konfigurasi sambungan, sepanjang faktor lain seperti dimensi, mutu tulangan, kondisi pengecoran, dan prosedur pengujian dikendalikan.

5.4.3 Temuan utama yang dilaporkan

Kesimpulan utama artikel menyatakan bahwa BU-3 menunjukkan perilaku yang lebih baik daripada BU-2 dan BU-1 pada beberapa aspek, yaitu pola retak, kurva histeretik, hubungan beban dan lendutan, disipasi

energi, degradasi kekuatan, dan degradasi kekakuan pada setiap siklus pembebanan. Pernyataan ini merupakan temuan komparatif yang dilaporkan oleh penulis. Tanpa mengambil angka langsung dari grafik dan tabel lengkap, bab ini tidak menambahkan nilai numerik untuk beban maksimum, daktilitas, energi, atau kekakuan.

Makna teknis temuan tersebut adalah bahwa konfigurasi tulangan pada daerah sambungan dapat memengaruhi respons siklik secara berarti, bahkan ketika material RPC yang digunakan memiliki kuat tekan tinggi. Penambahan tulangan pada BU-3 diduga membantu penyaluran gaya dan pengendalian respons retak, tetapi penjelasan mekanistik yang terperinci harus disesuaikan dengan geometri benda uji, posisi tulangan, pola retak, serta data pengujian lengkap. Oleh sebab itu, kata “diduga” digunakan ketika membahas mekanisme yang tidak dapat dipastikan hanya dari abstrak.

Hasil ini tidak berarti setiap sambungan dengan penambahan tulangan pasti lebih baik. Efektivitas suatu detail bergantung pada panjang penyaluran, lekatan, diameter dan jarak tulangan, rasio tulangan, pengekangan, mutu baja, dimensi kolom, gaya aksial, serta kondisi beban. Detail yang baik pada satu konfigurasi eksperimental perlu diverifikasi sebelum diterapkan pada geometri atau tingkat pembebanan lain.

5.5 Prinsip Pembebanan Lateral Siklik dan Instrumentasi

5.5.1 Mengapa beban diberikan bolak-balik?

Beban siklik diberikan secara berulang dengan arah yang berganti. Pada rangka yang mengalami gempa, arah perpindahan dapat berganti dari positif ke negatif sehingga tulangan yang sebelumnya mengalami tarik dapat beralih mengalami tekan atau sebaliknya. Retak yang telah terbentuk tidak selalu menutup sempurna; gesekan antarpermukaan retak, slip tulangan, dan kerusakan lokal memengaruhi lintasan respons pada siklus berikutnya.

Protokol pengujian dapat dikendalikan berdasarkan beban atau perpindahan. Dalam pengujian berbasis perpindahan, amplitudo perpindahan dinaikkan bertahap dan setiap tingkat dapat diulang beberapa kali. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi kapasitas deformasi dan penurunan kinerja ketika spesimen memasuki rentang inelastik. Namun, urutan dan amplitudo siklus harus mengikuti protokol yang ditetapkan serta dilaporkan secara jelas.

Karena artikel yang dirujuk membahas beban lateral siklik, pembaca perlu memeriksa naskah lengkap untuk detail aktuator, titik pembebanan, kondisi tumpuan, beban aksial kolom, instrumen, tahapan siklus, dan kriteria penghentian pengujian. Unsur-unsur tersebut sangat penting untuk replikasi dan untuk membandingkan hasil dari laboratorium berbeda.

5.5.2 Pengukuran yang diperlukan

Pengukuran minimum dalam pengujian sambungan mencakup gaya lateral dan perpindahan pada titik pembebanan. Bila memungkinkan, pengujian juga mengukur perpindahan relatif pada muka sambungan, slip tulangan, rotasi balok, regangan tulangan baja, serta regangan beton di daerah kritis. Dokumentasi foto pada setiap tingkat perpindahan membantu menghubungkan data kuantitatif dengan pola kerusakan.

Pemasangan instrumen harus memperhitungkan kemungkinan pergeseran titik ukur dan gangguan kabel ketika benda uji mengalami deformasi besar. Data harus diperiksa terhadap nol awal, kalibrasi alat, kehilangan sinyal, dan sinkronisasi waktu. Tanpa kontrol mutu data, bentuk kurva histeretik atau hasil perhitungan energi dapat terdistorsi.

Pada akhir pengujian, kondisi spesimen perlu didokumentasikan dari beberapa arah. Retak sebaiknya dipetakan dengan kode, lokasi, arah, dan tingkat pembebanan saat retak muncul. Jika kerusakan berupa pengelupasan selimut beton atau terbukanya tulangan, lokasi dan luasnya perlu dicatat. Catatan visual yang baik mempermudah interpretasi perbedaan BU-1, BU-2, dan BU-3.

5.6 Pola Retak dan Kurva Histeretik

5.6.1 Pola retak sebagai petunjuk mekanisme

Pola retak adalah rekaman visual mengenai jalur gaya dan perubahan tegangan di dalam spesimen. Retak lentur umumnya muncul di daerah momen tinggi dan cenderung tegak lurus terhadap sumbu elemen. Retak

geser sering membentuk arah diagonal. Pada sambungan balok–kolom, retak diagonal di inti dapat mengindikasikan tuntutan geser yang tinggi, sedangkan retak pada muka kolom dapat berkaitan dengan transfer momen, lekatan, atau pengangkuran tulangan.

Klasifikasi tersebut merupakan pedoman interpretasi, bukan diagnosis tunggal. Retak dapat terbentuk akibat kombinasi lentur, geser, lekatan, dan tegangan lokal. Karena itu, pola retak harus dibaca bersama kurva beban–perpindahan, regangan tulangan, serta riwayat pembebanan. Retak awal yang halus belum tentu menandakan kegagalan, tetapi perkembangan retak diagonal yang cepat atau pelebaran retak yang terkonsentrasi pada inti perlu mendapat perhatian.

Untuk sambungan yang menggunakan RPC, matriks yang padat dapat menunda beberapa bentuk kerusakan, tetapi tidak menghilangkan kebutuhan pengekangan dan pengangkuran. Ketika kapasitas tarik matriks terlampaui, retak tetap akan terjadi. Jika serat digunakan, serat dapat membantu menahan pembukaan retak dalam batas tertentu, tetapi kontribusinya harus dikonfirmasi melalui data material dan pengujian struktural.

5.6.2 Bentuk kurva histeretik

Kurva histeretik menggambarkan hubungan gaya lateral dengan perpindahan selama pembebanan bolak-balik. Kurva yang relatif lebar menunjukkan kemampuan menyerap energi yang lebih besar pada siklus terkait, sedangkan penyempitan di sekitar titik nol dapat mencerminkan

pinching akibat slip, pembukaan dan penutupan retak, atau hilangnya lekatan. Penurunan puncak gaya dari satu siklus ke siklus berikutnya pada amplitudo serupa dapat mengindikasikan degradasi kekuatan.

Interpretasi kurva perlu membedakan antara kapasitas maksimum dan stabilitas respons. Spesimen dapat mencapai gaya puncak tinggi pada siklus awal, tetapi mengalami penurunan besar pada siklus berikutnya. Sebaliknya, spesimen dengan puncak gaya sedikit lebih rendah dapat menunjukkan respons yang lebih stabil dan kemampuan deformasi yang lebih baik. Dalam desain tahan gempa, penilaian tidak cukup berdasarkan satu titik beban maksimum.

Perbandingan BU-1, BU-2, dan BU-3 dalam artikel Naibaho dkk. menempatkan kurva histeretik sebagai salah satu indikator penting dan menyimpulkan BU-3 lebih baik. Untuk evaluasi independen, data gaya dan perpindahan mentah atau tabel puncak tiap siklus akan sangat berguna. Dengan data tersebut, peneliti dapat menghitung kekakuan siklik, energi per siklus, energi kumulatif, serta rasio penurunan kekuatan pada amplitudo yang sebanding.

5.7 Parameter Kinerja: Kekuatan, Daktilitas, Kekakuan, dan Energi

5.7.1 Kekuatan lateral

Kekuatan lateral biasanya dinyatakan sebagai gaya maksimum yang dapat ditahan spesimen pada arah positif dan negatif. Kedua arah perlu diperiksa karena perbedaan detail, kondisi retak, atau ketidaksempurnaan spesimen dapat menghasilkan respons yang tidak simetris. Nilai

maksimum saja tidak menggambarkan apakah spesimen mampu mempertahankan kekuatan selama siklus berikutnya.

Untuk membandingkan spesimen, gaya maksimum perlu dibaca pada konteks dimensi, mutu material, rasio tulangan, beban aksial, dan protokol pembebanan yang sama. Bila geometri berbeda, normalisasi terhadap dimensi atau kapasitas teoritis dapat membantu, tetapi metode normalisasi harus dijelaskan. Dalam pembahasan penelitian Naibaho dkk., informasi yang aman dinyatakan adalah hasil komparatif bahwa BU-3 memiliki perilaku yang lebih baik menurut sejumlah indikator yang dilaporkan.

5.7.2 Daktilitas perpindahan

Daktilitas menunjukkan kemampuan elemen mengalami deformasi inelastik setelah melewati kondisi leleh tanpa kehilangan kapasitas secara tiba-tiba. Dalam bentuk sederhana, faktor daktilitas perpindahan dapat dinyatakan sebagai rasio perpindahan ultimit terhadap perpindahan leleh:

$$\mu\Delta = \Delta u / \Delta y \quad (5-1)$$

dengan $\mu\Delta$ adalah faktor daktilitas perpindahan, Δu adalah perpindahan ultimit menurut kriteria yang dipilih, dan Δy adalah perpindahan leleh. Dalam praktik, penentuan titik leleh dan titik ultimit dapat menggunakan beberapa konvensi. Karena itu, metode yang digunakan harus dinyatakan secara eksplisit agar hasil antarpencapaian dapat dibandingkan.

Daktilitas bukan berarti struktur tidak rusak. Daktilitas berarti deformasi yang besar dapat berlangsung dengan penurunan kapasitas yang

terkendali. Pada sambungan, daktilitas yang baik harus disertai pengendalian kerusakan inti dan pengangkur. Jika deformasi besar dicapai melalui slip tulangan yang tidak terkendali atau kerusakan geser getas, nilai perpindahan saja dapat memberikan gambaran yang menyesatkan.

5.7.3 Kekakuan dan degradasi kekakuan

Kekakuan awal menggambarkan hubungan antara gaya dan perpindahan pada tahap respons awal. Pada pengujian siklik, kekakuan efektif dapat dihitung dari kemiringan garis yang menghubungkan titik puncak positif dan negatif pada suatu siklus, atau menggunakan definisi lain yang sesuai protokol. Ketika retak berkembang, lekatan mengalami slip, dan kerusakan terakumulasi, kekakuan umumnya menurun.

$$K_{eff} = (P^+ - P^-) / (\Delta^+ - \Delta^-) \quad (5-2)$$

Persamaan tersebut merupakan bentuk sederhana kekakuan efektif siklik, dengan P^+ dan P^- sebagai gaya pada titik puncak positif dan negatif, sedangkan Δ^+ dan Δ^- adalah perpindahan yang bersesuaian. Definisi ini harus disesuaikan dengan protokol penelitian yang digunakan. Degradasi kekakuan dapat dinilai dengan membandingkan kekakuan pada siklus tertentu terhadap kekakuan acuan.

5.7.4 Disipasi energi

Energi yang didisipasikan dalam satu siklus dapat dipahami sebagai luas daerah yang dilingkupi kurva histeretik gaya–perpindahan. Secara konseptual, energi ini berkaitan dengan kerja mekanis yang tidak sepenuhnya pulih setelah siklus berakhir. Mekanisme yang berkontribusi dapat meliputi pembentukan dan penutupan retak, gesekan, slip tulangan, deformasi inelastik baja, serta kerusakan material.

Energi kumulatif merupakan penjumlahan energi yang didisipasikan selama seluruh siklus. Nilai yang tinggi tidak boleh ditafsirkan secara terpisah dari tingkat kerusakan dan stabilitas kekuatan. Spesimen yang mengalami kerusakan berat dapat menunjukkan disipasi energi besar, tetapi belum tentu memenuhi kriteria kinerja yang diinginkan. Evaluasi harus menggabungkan energi, kekuatan sisa, daktilitas, dan pola kerusakan.

5.7.5 Degradasi kekuatan

Degradasi kekuatan terjadi ketika kapasitas puncak pada siklus berikutnya lebih rendah dibandingkan kapasitas pada siklus sebelumnya atau dibandingkan nilai acuan pada amplitudo yang sama. Penilaian yang tepat membutuhkan perbandingan pada tingkat perpindahan yang sebanding. Jika amplitudo berubah antar-siklus, penurunan gaya tidak dapat langsung dianggap sebagai degradasi tanpa mempertimbangkan perubahan amplitudo.

Dalam penelitian sambungan, penurunan kekuatan dapat berkaitan dengan kerusakan inti, slip tulangan, penghancuran beton tekan, kehilangan pengekanan, atau kombinasi mekanisme. Karena itu, hasil kuantitatif harus dihubungkan dengan bukti visual dan, bila tersedia, pengukuran regangan.

5.8 Interpretasi Komparatif BU-1, BU-2, dan BU-3

BU-1 menyediakan gambaran perilaku sambungan konvensional yang digunakan sebagai pembandingan. Keberadaan BU-1 penting karena memungkinkan peneliti menilai apakah perubahan detail pada BU-2 dan BU-3 menghasilkan respons yang lebih baik daripada konfigurasi dasar. Namun, istilah “konvensional” tidak berarti detail tersebut pasti tidak memenuhi standar; kinerja tetap bergantung pada detail aktual dan ketentuan desain yang berlaku pada saat perencanaan.

BU-2 mengeksplorasi strategi dengan meneruskan tulangan balok menembus kolom serta menambahkan pelat baja yang dilas. Secara konseptual, strategi tersebut berusaha mengubah cara gaya tarik diteruskan melalui daerah sambungan. Akan tetapi, detail berbasis pelat dan las membawa persoalan tersendiri, antara lain kapasitas dan mutu las, konsentrasi tegangan, ketahanan terhadap beban berulang, kompatibilitas deformasi baja dan beton, perlindungan korosi, serta kemudahan inspeksi. Pelat tidak boleh dianggap sebagai solusi universal tanpa desain dan kualifikasi sambungan baja yang memadai.

BU-3 menggunakan penambahan tulangan pada tulangan pokok balok di daerah sambungan. Penambahan tulangan dapat mengubah distribusi gaya, meningkatkan kapasitas tarik lokal, atau memengaruhi perkembangan retak. Namun, efeknya tidak semata-mata ditentukan oleh jumlah baja tambahan. Panjang penyaluran, posisi batang, jarak bersih, kemampuan beton mengisi ruang, dan interaksi dengan tulangan transversal menentukan apakah tambahan tersebut dapat bekerja efektif.

Penulis penelitian melaporkan bahwa BU-3 memiliki kinerja lebih baik pada pola retak, kurva histeretik, hubungan beban–lendutan, disipasi energi, degradasi kekuatan, dan degradasi kekakuan. Temuan tersebut memberi indikasi bahwa pengaturan tulangan tambahan pada zona sambungan layak diteliti lebih lanjut. Akan tetapi, hasil tiga benda uji tidak cukup untuk membangun aturan desain umum atau menyatakan bahwa detail BU-3 selalu unggul dalam seluruh kondisi pembebanan.

Dalam evaluasi ilmiah, hasil komparatif perlu dibaca bersama keterbatasan jumlah spesimen. Tiga konfigurasi memberikan dasar untuk membandingkan alternatif, tetapi tidak menggambarkan seluruh variasi bahan, toleransi pelaksanaan, dimensi sambungan, rasio tulangan, gaya aksial kolom, atau karakteristik gempa. Penelitian lanjutan perlu mengulang tiap konfigurasi dengan replikasi yang cukup agar variabilitas dan tingkat kepercayaan hasil dapat dinilai.

5.9 Implikasi untuk Perencanaan Sambungan RPC

5.9.1 Desain harus berawal dari mekanisme struktur

Penggunaan RPC sebaiknya dimulai dari kebutuhan struktural yang jelas. Perencana perlu menentukan apakah tujuan utama adalah mengurangi dimensi elemen, meningkatkan kapasitas tekan, memperbaiki durabilitas, mempercepat konstruksi, atau meningkatkan kinerja sambungan. Jika tujuan utamanya adalah kinerja gempa, maka parameter penerimaan harus mencakup kapasitas deformasi, ketahanan siklik, dan mekanisme kerusakan, bukan hanya kuat tekan material.

Sebelum suatu detail diadopsi, analisis harus menunjukkan jalur transfer gaya dari tulangan balok ke kolom dan dari inti sambungan ke elemen rangka. Pemeriksaan perlu meliputi kapasitas geser inti, penyaluran tulangan, pengekangan, kapasitas lentur balok dan kolom, serta prinsip desain kapasitas. Perencana juga perlu memperhitungkan kemungkinan bahwa beton RPC memiliki kuat tekan jauh lebih tinggi daripada beton konvensional, sementara mutu tulangan dan ketentuan daktilitas tetap menjadi faktor pembatas.

5.9.2 Penyaluran dan pengankuran tulangan

Penyaluran tulangan adalah isu utama pada sambungan eksterior. Tulangan yang tidak dapat mengembangkan tegangan rencana akan menyebabkan kapasitas sambungan lebih rendah daripada yang diasumsikan. Panjang penyaluran dan kebutuhan kait atau perangkat

mekanis harus ditentukan berdasarkan standar yang berlaku, mutu beton yang dapat diandalkan, diameter batang, selimut, jarak antarbatang, pengekangan, serta kondisi tegangan. Tidak tepat mengurangi panjang penyaluran hanya karena kuat tekan RPC sangat tinggi tanpa dasar ketentuan yang sah dan bukti validasi.

Jika menggunakan pelat baja atau detail las seperti konsep BU-2, rancangan harus mencakup perhitungan kapasitas pelat, sambungan las, tegangan lokal, serta kompatibilitas deformasi. Mutu pengerjaan dan pemeriksaan las harus direncanakan sejak awal. Detail yang sulit diperiksa atau memerlukan toleransi pemasangan sangat ketat dapat meningkatkan risiko pada konstruksi lapangan.

5.9.3 Pengekangan dan geser inti sambungan

Pengekangan menjaga inti sambungan tetap terintegrasi ketika beton mengalami tekanan dan retak. Tulangan transversal juga berperan dalam mengendalikan retak diagonal dan membantu mempertahankan kapasitas deformasi. Pada RPC, matriks yang kuat dapat meningkatkan kapasitas tertentu, tetapi tidak menggantikan fungsi tulangan pengekang. Kebutuhan tulangan transversal harus diperiksa menurut ketentuan desain tahan gempa yang berlaku dan tidak ditentukan semata-mata dari kuat tekan.

Pengecoran inti yang padat tulangan memerlukan perhatian khusus. Campuran harus mampu melewati sela batang tanpa segregasi dan tanpa terbentuknya rongga. Uji coba skala laboratorium atau mock-up dapat

membantu memastikan bahwa campuran, metode pemadatan, urutan pengecoran, dan akses penuangan sesuai dengan kondisi lapangan.

5.9.4 Hierarki kekuatan dan lokasi sendi plastis

Desain tahan gempa pada rangka momen umumnya mengupayakan agar sendi plastis terbentuk pada lokasi yang direncanakan, lazimnya di ujung balok, dan bukan melalui kegagalan geser getas pada inti sambungan atau keruntuhan kolom yang tidak diinginkan. Penerapan RPC tidak mengubah prinsip dasar ini. Justru peningkatan kapasitas tekan beton perlu diikuti evaluasi ulang kapasitas elemen dan sambungan agar tidak terjadi ketidakseimbangan kekuatan.

Peningkatan kuat tekan dapat mengubah urutan mekanisme kerusakan. Jika balok atau inti sambungan menjadi sangat kuat, tuntutan pada tulangan, kolom, atau komponen lain dapat meningkat. Karena itu, perencana harus mengevaluasi sistem secara menyeluruh, bukan merancang setiap elemen secara terpisah.

5.10 Produksi, Pengecoran, dan Pengendalian Mutu RPC

RPC membutuhkan pengendalian mutu bahan dan proses yang lebih ketat daripada campuran beton biasa. Bahan halus harus disimpan dalam kondisi yang mencegah kelembapan tidak terkendali dan kontaminasi. Distribusi ukuran partikel, kadar air pasir, karakteristik silica fume, dan kompatibilitas superplasticizer dengan semen dapat memengaruhi

kebutuhan air serta waktu kerja. Perubahan pemasok atau sumber bahan dapat mengubah perilaku campuran meskipun proporsi nominal tetap.

Urutan pencampuran harus dikembangkan melalui percobaan. Pada beberapa sistem, pencampuran bahan kering terlebih dahulu membantu mendistribusikan partikel halus; penambahan air dan superplasticizer kemudian dilakukan secara bertahap sesuai prosedur yang telah divalidasi. Namun, tidak ada satu urutan yang berlaku untuk semua formulasi RPC. Waktu pencampuran yang terlalu singkat dapat menghasilkan dispersi tidak merata, sedangkan pencampuran berlebihan dapat meningkatkan temperatur dan memengaruhi waktu kerja.

Pengujian beton segar perlu mencakup kemampuan alir atau parameter workability yang sesuai, waktu kerja, stabilitas campuran, dan pemeriksaan adanya segregasi. Untuk campuran dengan serat, distribusi serat harus diperiksa karena penggumpalan atau orientasi yang tidak seragam dapat menyebabkan variasi lokal. Penambahan serat secara cepat ke dalam campuran yang belum terdispersi dapat meningkatkan risiko balling.

Pengecoran sambungan memerlukan rencana akses penuangan dan jalur aliran. Campuran harus mengisi inti sambungan dan ruang di antara tulangan tanpa meninggalkan rongga. Jika menggunakan pemadatan mekanis, prosedur perlu disesuaikan dengan sifat campuran dan rekomendasi pengembangan campuran; pemadatan berlebihan atau tidak sesuai dapat memicu segregasi pada beberapa formulasi. Benda uji kontrol dan sampel dari batch yang sama perlu dibuat untuk menilai mutu aktual.

Perawatan atau curing harus ditentukan melalui prosedur yang konsisten. Kondisi temperatur, kelembapan, dan durasi perawatan memengaruhi hidrasi dan perkembangan sifat. Perlakuan panas atau steam curing kadang digunakan dalam teknologi RPC tertentu, tetapi tidak boleh diterapkan secara otomatis pada semua produk. Keputusan tersebut harus mempertimbangkan rancangan campuran, kebutuhan produksi, perubahan sifat, konsumsi energi, dan kondisi pelaksanaan.

Dokumentasi mutu sekurang-kurangnya mencakup nomor batch, massa setiap bahan, kadar air agregat halus, waktu pencampuran, temperatur campuran, hasil uji beton segar, metode curing, umur pengujian, dan hasil kuat tekan. Untuk aplikasi struktural kritis, pengendalian mutu perlu dirancang bersama perencana, pemasok, pelaksana, dan pihak pengawas.

5.11 Kerangka Verifikasi dan Pengujian Lanjutan

5.11.1 Tahap karakterisasi material

Tahap pertama ialah memastikan karakteristik bahan penyusun dan RPC yang dihasilkan. Pengujian dapat meliputi distribusi ukuran partikel, berat jenis, kebutuhan air, workability, kuat tekan pada beberapa umur, kuat tarik atau lentur, serta indikator durabilitas sesuai lingkungan layanan. Bila serat digunakan, karakteristik geometris dan mekanis serat perlu dicatat. Tujuan tahap ini adalah menetapkan rentang mutu yang realistis dan dapat direproduksi.

5.11.2 Tahap pengujian elemen dan sambungan

Tahap kedua mencakup pengujian sambungan dengan geometri, rasio tulangan, dan detail yang mewakili aplikasi. Sebelum pengujian utama, perlu dibuat rancangan matriks eksperimen yang mengidentifikasi variabel bebas dan variabel yang dikendalikan. Variabel yang mungkin dikaji antara lain kuat tekan RPC, jumlah tulangan tambahan, rasio tulangan balok, rasio tulangan transversal, beban aksial kolom, serta konfigurasi pengangkur.

Setiap konfigurasi sebaiknya memiliki replikasi yang cukup untuk menilai variabilitas. Jumlah benda uji tidak boleh ditentukan hanya berdasarkan keterbatasan biaya tanpa mempertimbangkan tujuan inferensi. Bila penelitian bertujuan membandingkan rata-rata respons beberapa konfigurasi, rancangan statistik dan ukuran sampel perlu direncanakan sejak awal. Data mentah harus disimpan agar analisis dapat diulang.

5.11.3 Tahap analisis numerik

Pemodelan numerik dapat membantu memahami distribusi tegangan, perkembangan retak, dan sensitivitas terhadap variabel yang tidak semuanya dapat diuji secara fisik. Namun, model tidak dapat menggantikan validasi eksperimen. Model harus dikalibrasi terhadap kurva beban–perpindahan, pola retak, dan parameter kerusakan yang terukur. Pemilihan model konstitutif beton, hukum lekatan tulangan, representasi serat, serta kriteria kerusakan harus dijelaskan.

Analisis elemen hingga dapat digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi dimensi dan detail sambungan, tetapi prediksi pascapuncak sangat sensitif terhadap parameter material dan regularisasi numerik. Hasil simulasi sebaiknya disajikan dengan rentang ketidakpastian atau analisis sensitivitas, bukan sebagai satu prediksi deterministik yang dianggap pasti.

5.11.4 Tahap demonstrasi dan pemantauan

Sebelum diterapkan pada bangunan penting, detail yang telah diuji perlu melalui evaluasi desain independen, uji coba pelaksanaan, dan rencana inspeksi. Jika aplikasi berada pada wilayah dengan bahaya gempa tinggi, pemantauan pascakonstruksi dan inspeksi setelah kejadian gempa dapat memberikan data mengenai perilaku aktual. Pengalaman lapangan kemudian dapat digunakan untuk menyempurnakan spesifikasi produksi, prosedur pengecoran, dan pedoman desain.

5.12 Potensi Aplikasi RPC dan Pertimbangan Ekonomi

RPC berpotensi digunakan pada elemen yang membutuhkan kapasitas tinggi, dimensi relatif ramping, ketahanan lingkungan, atau detail prefabrikasi yang presisi. Pada sistem struktur, kemungkinan aplikasinya meliputi sambungan pracetak, elemen penghubung, komponen jembatan, panel tipis, elemen penguat lokal, dan bagian struktur yang sulit diperbesar dimensinya. Namun, setiap aplikasi memiliki tuntutan yang berbeda

sehingga kinerja satu jenis komponen tidak dapat langsung digeneralisasi ke komponen lain.

Pada sambungan balok–kolom, manfaat potensial RPC antara lain matriks yang padat dan kuat, kemampuan mengisi daerah dengan tulangan rapat apabila workability sesuai, serta kemungkinan mengurangi dimensi lokal. Akan tetapi, manfaat tersebut harus ditimbang terhadap harga bahan pengikat dan silica fume, kebutuhan superplasticizer, proses pencampuran, kontrol mutu, curing, dan kebutuhan tenaga kerja yang terampil. Kuat tekan tinggi tidak selalu berarti biaya struktur terendah.

Evaluasi ekonomi sebaiknya menggunakan pendekatan biaya siklus hidup, bukan hanya harga per meter kubik. Komponen biaya meliputi bahan, produksi, transportasi, cetakan, penulangan, waktu konstruksi, inspeksi, pemeliharaan, perbaikan, dan konsekuensi gangguan layanan. Bila RPC memperpanjang umur layanan atau memungkinkan elemen lebih ramping, manfaat tersebut perlu dihitung berdasarkan skenario yang dapat dipertanggungjawabkan.

Aspek lingkungan juga harus diperhitungkan. RPC konvensional dapat memiliki kandungan semen yang tinggi sehingga jejak karbon per meter kubik berpotensi besar. Strategi pengurangan dampak meliputi optimasi particle packing, penggunaan bahan tambahan mineral yang sesuai, pemilihan sumber bahan lokal, pengurangan limbah, desain elemen yang efisien, dan evaluasi life-cycle assessment. Penggantian sebagian semen tidak boleh dilakukan tanpa memverifikasi kuat tekan, workability, stabilitas, durabilitas, serta kinerja siklik yang dibutuhkan.

Dalam konteks Indonesia, pengembangan RPC sebaiknya menghubungkan kemampuan laboratorium dengan kebutuhan industri konstruksi. Program demonstrasi perlu menyertakan pemasok bahan, produsen beton, kontraktor, konsultan struktur, perguruan tinggi, dan lembaga pengujian. Standardisasi prosedur produksi dan penerimaan mutu akan menjadi faktor penting untuk mengurangi ketidakpastian ketika material berpindah dari laboratorium ke lapangan.

5.13 Keterbatasan Bukti dan Batas Generalisasi

Penelitian Naibaho dkk. (2015) memberikan bukti eksperimental yang bernilai mengenai pengaruh konfigurasi sambungan terhadap respons siklik RPC. Namun, penelitian tersebut melibatkan tiga benda uji dengan konfigurasi tertentu. Hasilnya harus dipahami sebagai bukti pada ruang lingkup eksperimen tersebut, bukan sebagai validasi menyeluruh untuk semua jenis sambungan, seluruh kelas RPC, atau semua tingkat bahaya gempa.

Untuk menerapkan hasil pada proyek nyata, diperlukan informasi rinci tentang dimensi benda uji, mutu dan diameter tulangan, rasio tulangan, detail pengangkuran, beban aksial kolom, skema tumpuan, protokol perpindahan, serta data gaya dan perpindahan. Informasi tersebut diperlukan untuk menghitung parameter kinerja secara kuantitatif dan membandingkan hasil dengan ketentuan penerimaan yang relevan. Karena itu, bab ini tidak mengada-adakan nilai beban maksimum, faktor daktilitas, kekakuan, atau energi yang tidak tersedia dalam informasi terverifikasi.

Selain itu, hasil laboratorium tidak langsung mewakili perilaku bangunan penuh. Struktur nyata dipengaruhi interaksi pelat, balok, kolom, dinding pengisi, efek tiga dimensi, variasi beban aksial, kondisi fondasi, mutu pelaksanaan, dan karakteristik gerakan tanah. Penskalaan benda uji dan kondisi batas juga dapat memengaruhi respons. Sebelum desain diadopsi, diperlukan analisis struktur lengkap dan pemenuhan standar yang berlaku.

Istilah “lebih baik” dalam penelitian harus dibaca sesuai indikator yang digunakan oleh penulis. Suatu konfigurasi dapat unggul pada energi disipasi tetapi memiliki tantangan fabrikasi atau inspeksi. Konfigurasi lain mungkin memiliki kapasitas puncak tinggi tetapi membutuhkan detail pengangkuran yang rumit. Pemilihan detail akhir harus mempertimbangkan kinerja struktural, kemudahan konstruksi, inspeksi, biaya, durabilitas, dan risiko mutu.

5.14 Rekomendasi Pengembangan di Indonesia

Pengembangan RPC untuk sambungan tahan gempa di Indonesia sebaiknya dilakukan melalui tahapan terstruktur. Tahap awal adalah mereplikasi temuan eksperimental dengan dokumentasi lengkap dan prosedur yang dapat diulang. Replikasi perlu mencatat komposisi material, metode pencampuran, kondisi curing, mutu tulangan, serta semua data gaya–perpindahan. Tujuannya memastikan hasil bukan bergantung pada kondisi laboratorium yang sulit direproduksi.

Tahap berikutnya ialah memperluas matriks eksperimen. Variasi dapat mencakup kuat tekan RPC yang lebih realistis untuk produksi lokal, beberapa rasio tulangan, variasi beban aksial kolom, dan alternatif detail pengangkur. Untuk setiap variabel, jumlah benda uji perlu cukup agar pengaruhnya dapat dibedakan dari variasi acak. Pengujian harus dirancang berdasarkan hipotesis yang jelas, misalnya apakah penambahan tulangan memperlambat degradasi kekakuan atau mengurangi kerusakan inti sambungan.

Pengembangan standar pelaksanaan juga penting. RPC membutuhkan pengendalian bahan dan proses yang disiplin. Spesifikasi sebaiknya menetapkan persyaratan bahan, prosedur trial mix, rentang workability, metode sampling, frekuensi uji kuat tekan, kriteria penerimaan, dan dokumentasi curing. Untuk sambungan pracetak atau detail dengan pelat baja, prosedur fabrikasi, inspeksi las, toleransi dimensi, dan perlindungan korosi perlu dimasukkan.

Dari sisi desain, hasil eksperimen perlu diterjemahkan menjadi panduan yang selaras dengan standar beton dan gempa yang berlaku. Panduan tersebut harus membedakan antara penggunaan RPC sebagai material pengganti beton biasa dan penggunaan RPC dengan detail sambungan baru. Jika detail berbeda dari sistem yang telah tercakup dalam standar, diperlukan pembuktian kinerja yang sesuai serta persetujuan otoritas atau pihak berwenang menurut ketentuan proyek.

Arah riset jangka panjang dapat mencakup kombinasi RPC dengan serat baja atau serat hibrida, pengurangan klinker, optimasi pengekanan,

detail sambungan modular, serta model numerik yang dikalibrasi dari eksperimen. Namun, inovasi harus tetap mengikuti urutan yang benar: karakterisasi material, validasi elemen, pengujian sambungan, evaluasi sistem, dan demonstrasi lapangan. Pendekatan tersebut mengurangi risiko bahwa keunggulan material di laboratorium dianggap sebagai bukti kinerja bangunan tanpa validasi yang memadai.

Reactive Powder Concrete merupakan material berkinerja sangat tinggi yang menawarkan potensi bagi elemen struktur dengan tuntutan kekuatan dan kepadatan matriks yang tinggi. Namun, penerapannya pada sambungan balok–kolom tahan gempa harus berlandaskan kinerja sistem, bukan hanya kuat tekan. Penyaluran tulangan, pengekangan inti, kapasitas geser, kemampuan deformasi, serta mutu pengecoran tetap menjadi faktor penentu.

Penelitian Naibaho, Budiono, Surono, dan Pane (2015) menguji tiga konfigurasi sambungan balok–kolom eksterior dengan RPC yang dilaporkan memiliki kuat tekan 135 MPa. Artikel tersebut menyatakan bahwa BU-3, yaitu konfigurasi dengan penambahan tulangan pada tulangan pokok balok di daerah sambungan, menunjukkan perilaku siklik lebih baik dibandingkan BU-2 dan BU-1 dalam aspek pola retak, kurva histeretik, hubungan beban–lendutan, disipasi energi, degradasi kekuatan, dan degradasi kekakuan.

Temuan tersebut memperlihatkan pentingnya detail tulangan dan pengangkuran dalam memanfaatkan keunggulan RPC. Meski demikian,

hasilnya tidak boleh digeneralisasi tanpa mempertimbangkan konfigurasi benda uji dan batas eksperimen. Penerapan di lapangan memerlukan verifikasi terhadap standar yang berlaku, pengujian tambahan, pengendalian mutu, dan evaluasi menyeluruh terhadap sistem struktur.

Dengan demikian, aplikasi RPC pada sambungan balok–kolom dapat dipandang sebagai peluang pengembangan teknologi beton tahan gempa, tetapi bukan solusi otomatis. Keberhasilan penerapan ditentukan oleh keselarasan antara rekayasa material, desain kapasitas, detail tulangan, pelaksanaan, inspeksi, dan pembuktian kinerja melalui pengujian yang dapat direplikasi.

NASKAH PENGAJ

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

RPC merupakan material cementitious hasil rekayasa multiskala yang mengintegrasikan particle packing, low water-to-binder ratio, silica fume/SCM, superplasticizer, curing dan fiber reinforcement. Kinerja RPC terutama berasal dari densifikasi matriks dan pengurangan pore connectivity. Particle packing menjadi dasar untuk mengurangi void, sedangkan hydration dan pozzolanic reaction memperkuat microstructure . Silica fume memiliki fungsi sebagai micro-filler dan pozzolanic material. Namun kandungannya harus dioptimasi karena peningkatan silica fume dapat meningkatkan viscosity dan kebutuhan superplasticizer .

Fiber merupakan elemen penting untuk mengubah perilaku RPC dari brittle matrix menjadi fiber-reinforced composite dengan kemampuan crack bridging, toughness dan post-cracking resistance yang lebih baik. Curing merupakan parameter penting yang mengontrol hydration kinetics dan early-age strength. Curing termal atau kombinasi curing dapat meningkatkan strength, tetapi harus dievaluasi bersama energy demand dan durability.

Durability RPC sangat berkaitan dengan microstructure yang padat dan rendahnya pore connectivity. Namun crack, fiber corrosion dan coupled

environmental exposure tetap menjadi isu penting. Arah masa depan RPC adalah sustainable dan low-carbon RPC. Pengurangan cement melalui SCM, penggunaan waste materials, recycled constituents, hybrid fibers, internal curing, particle packing optimization dan LCA merupakan strategi utama.

6.2 Kontribusi Keilmuan

Kontribusi utama pendekatan monograf ini adalah integrasi:

*Material → Packing → Hydration → Microstructure
→ Mechanical → Durability → Sustainability*

Pendekatan tersebut memungkinkan RPC dianalisis berdasarkan mekanisme, bukan hanya berdasarkan nilai strength.

6.3 Implikasi Engineering

RPC layak dipertimbangkan pada aplikasi yang memberikan manfaat nyata dari high strength, high durability, reduced section thickness atau extended service life. Tidak semua struktur memerlukan RPC. Pemilihan RPC harus berdasarkan performance-based design dan lifecycle economics.

6.4 Keterbatasan

Keterbatasan penelitian RPC meliputi:

1. sensitivitas terhadap material;
2. kebutuhan kontrol mixing;
3. kebutuhan superplasticizer;

4. shrinkage;
5. biaya fiber;
6. energy demand pada thermal curing;
7. ketidakseragaman definisi RPC/UHPC;
8. keterbatasan data long-term field exposure.

6.5 Rekomendasi

Penelitian berikutnya direkomendasikan mengembangkan:

1. low-carbon RPC;
2. biomass-derived silica RPC;
3. nano-silica RPC;
4. hybrid fiber RPC;
5. internal-curing RPC;
6. AI-assisted mix design;
7. LCA-based optimization;
8. field exposure testing;
9. digital twin/service-life prediction;
10. industrial-scale RPC production.

Arah penelitian paling strategis adalah mengembangkan RPC yang tidak hanya mencapai strength tinggi, tetapi mempunyai performance-to-carbon ratio dan performance-to-cost ratio yang tinggi.

NASKAH PENGAJUNAN ISBN

DAFTAR PUSTAKA

1. Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*. 1995;25(7):1501–1511. doi:10.1016/0008-8846(95)00144-2.
2. Ge W, Zhang Z, Ashour AF, Li W, Jiang H, Hu Y, et al. Hydration characteristics, hydration products and microstructure of reactive powder concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023;69:106306. doi:10.1016/j.jobe.2023.106306.
3. Kravanja G, Mumtaz AR, Kravanja S. A comprehensive review of the advances, manufacturing, properties, innovations, environmental impact and applications of ultra-high-performance concrete. *Buildings*. 2024;14(2):382. doi:10.3390/buildings14020382.
4. Šoukal F, Bocian L, Novotný R, Dlabajová L, Šuleková N, Hajzler J, et al. The effects of silica fume and superplasticizer type on the properties and microstructure of reactive powder concrete. *Materials*. 2023;16(20):6670. doi:10.3390/ma16206670.
5. Naderi Shourabi F, Mirzabozorg H, Zhuge Y. Optimization of UHPC based on reactive powder concrete: Box-Behnken design, analysis of variance, components interaction effects and sensitivity analysis. *Journal of Building Engineering*. 2024;98:111291.
6. Shi C, et al. A review on design and performance regulation of ultra-high performance concrete (UHPC). *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2024. doi:10.1080/21650373.2024.2401932.
7. Yaragal SC, Annigeri HV, Krishna KMN, Allikatti C, Dinesh G, Prashanth MH. Influence of curing regimes and duration on the early strength development of fibers based reactive powder concretes. *Journal of Building Engineering*. 2025;102:112020.
8. Özalp F, Yilmaz HD, Zeytun S, Akcay B. Effects of different curing regimes on the mechanical behavior of reactive powder concrete. *Structural Concrete*. 2025;26(6):7403–7412.
9. Patiño J, Galli L, Suraneni P. Effects of different types of fibers and fiber mixes on fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete. *Materials and Structures*. 2025;58:361.

10. Dziomdziora P, Smarzewski P. Effect of hybrid fiber compositions on mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete: A comprehensive review. *Materials*. 2025;18(11):2426.
11. Li X, Zou Y, Dai X, Yang J, Zhang Z. Durability of ultra-high-performance concrete in aggressive environments: A comprehensive review of material, interface, structure and enhancement. *Journal of Building Engineering*. 2025;115:114486.
12. Song J, Banthia N, Yoo DY. Effect of supplementary cementitious materials on durability of ultra-high-performance concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. 2025;163:106198. doi:10.1016/j.cemconcomp.2025.106198.
13. Wang XQ, Chow CL, Lau D. Multiscale perspectives for advancing sustainability in fiber reinforced ultra-high performance concrete. *npj Materials Sustainability*. 2024;2:13. doi:10.1038/s44296-024-00021-z.
14. Hiew SY, Teoh KB, Wong HS, Banthia N, Yoo DY. Recent advances in low-carbon ultra-high-performance concrete: Materials, mechanisms, and sustainability perspectives. *npj Materials Sustainability*. 2026;4:3. doi:10.1038/s44296-025-00093-5.
15. Lande A, Thorstensen RT. Comprehensive sustainability strategy for the emerging ultra-high-performance concrete industry. *Cleaner Materials*. 2023;8:100183. doi:10.1016/j.clema.2023.100183.
16. Farahzadi L, Bozorgmehr N, Shafei B, Kioumars M. Sustainability assessment of ultra-high performance concrete made with various supplementary cementitious materials. *Cleaner Materials*. 2025;15:100301. doi:10.1016/j.clema.2025.100301.
17. Trends toward lower-carbon ultra-high performance concrete (UHPC): A review. *Construction and Building Materials*. 2024;420:135602. doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.135602.
18. Silvestre JD. Environmental and economic performance of alternative ultra-high-performance concrete. *Structural Concrete*. 2025. doi:10.1002/suco.202400431.

19. Dheyaaldin MH, Kianmehr P. Sustainable utilization of nanomaterials in reactive powder composite: State of the art review. *Journal of Building Engineering*. 2024;98:111047.
20. Influence of silica fume on pore structure, mechanical properties and carbon emission of reactive powder concrete prepared by ice crystal homogenization technology. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;21:e03972. doi:10.1016/j.cscm.2024.e03972.
21. Anish V, Logeshwari J. A review on ultra high-performance fibre-reinforced concrete with nanomaterials and its applications. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2024;71:25.
22. Wei D, Liang R. The technological advancements and research trends of ultra-high performance concrete over the past 25 years. *Civil Engineering and Smart Structure Technology*. 2026.
23. Al-Ezzi MJ, Al-Dala'ien RN. Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for sustainable and resilient infrastructure: A state-of-the-art review. *Discover Sustainability*. 2026.
24. Abdellatief M, Hamla W, Hamouda H. AI driven prediction of early age compressive strength in ultra high performance fiber reinforced concrete. *Scientific Reports*. 2025;15:20316. doi:10.1038/s41598-025-06725-z.
25. Sun C, Chang Y, Li J, Ma J, Li Y. Ultra-high-performance concrete from 100% solid waste: Mechanical strength, microstructure and sustainability analysis. *Case Studies in Construction Materials*. 2025;23:e05482. doi:10.1016/j.cscm.2025.e05482.
26. Al Moman AA, Sundar D, Zeng K, Tatar J, Radlińska A, Rajabipour F. Autogenous and drying shrinkage in ultra-high-performance concrete and the effectiveness of internal curing. *Construction and Building Materials*. 2025;464:140217.
27. Sustainable development of eco-friendly ultra-high performance concrete: Cost, carbon emission, and structural ductility. *Construction and Building Materials*. 2023;398:132477.
28. Recycling solid waste to produce eco-friendly ultra-high performance concrete: A review of durability, microstructure and environment characteristics. *Science of the Total Environment*. 2023;876:162804. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.162804.

29. Sustainable reinforced concrete design: The role of ultra-high performance concrete in life-cycle structural performance and environmental impacts. *Engineering Structures*. 2024;316:118585.
30. Effect of thermal cycling on the mechanics and microstructure of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2024;424:135878.
31. Strain-hardening ultra-high performance concrete with hybrid steel and ultra-high molecular weight polyethylene fibers. *Construction and Building Materials*. 2024;438:136716.
32. Synergistic integration of waste fibres and supplementary cementitious materials to enhance sustainability of ultra-high-performance concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;20:e02772.
33. Influence of fly ash on the compressive strength of ultrahigh-performance concrete: A state-of-the-art review towards sustainability. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2025;19:25.
34. Ultra-high-performance concrete for nuclear applications: A review of raw materials and mix design approaches. *Construction and Building Materials*. 2024;136938.
35. Recent advances in the rheological properties of ultra-high-performance concrete: A critical review. *Engineering*. 2026;61:7–28. doi:10.1016/j.eng.2025.04.011.
36. Optimization of ultra-high performance concrete with coarse aggregate for enhanced sustainability: A comprehensive assessment of slump flow and mechanical properties. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2025;14(9). doi:10.1080/21650373.2025.2502139.
37. Hybrid use of supplementary cementitious materials, industrial byproducts, and fillers for sustainable high-performance concrete. *Discover Civil Engineering*. 2025;2:212. doi:10.1007/s44290-025-00379-6.
38. Eco-friendly cementitious composites for enhanced strength: Emerging trends and innovations. *Journal of Cleaner Production*. 2024. doi:10.1016/j.jclepro.2024.142962.

39. Reactive Powder Concrete: Durability and Applications. *Applied Sciences*. 2021;11(12):5629.
40. Effect of supplementary cementitious materials on durability of ultra-high-performance concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. 2025;163:106198. doi:10.1016/j.cemconcomp.2025.106198.
41. Naibaho, P. R. T., Budiono, B., Surono, A., & Pane, I. (2015). Studi eksperimental perilaku sambungan balok-kolom eksterior beton bubuk reaktif terhadap beban lateral siklis. *Jurnal Teknik Sipil*, 22(3), 165–174. <https://doi.org/10.5614/jts.2015.22.3.1>

NASKAH PENGAJUNAN ISBN

INDEKS

REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC)

*Rekayasa Particle Packing, Hidrasi, Mikrostruktur, Sifat Mekanik,
Durabilitas, dan Pengembangan Low-Carbon UHPC*

Indeks berikut disusun berdasarkan istilah dan struktur pembahasan dalam naskah PDF. Nomor halaman mengacu pada nomor halaman tercetak di dalam buku, bukan nomor halaman file PDF. Periksa kembali nomor halaman setelah tata letak akhir ditetapkan.

Agregat kasar 53, 65
AI (artificial intelligence) 87
Analisis statistik 98
Aplikasi struktural 87–88, 111–112, 119–147
Beban lateral siklik 112, 129–138
BET (Brunauer–Emmett–Teller) 84, 97, 107
BET/BJH 97, 107
Binder 56–57, 72–79, 93
C-S-H (calcium silicate hydrate) 45–51, 82, 110
Curing 83, 95, 104, 140–142
Daktilitas 132–138
Desain campuran (mix design) 87, 93–95, 109
DOE/RSM 98–99
Durabilitas 85, 96, 104–108, 142–147
Embodied carbon 56, 86, 99, 108
Fiber bridging 82, 110
Fiber/serat 53, 82, 96, 108, 132–138
FTIR 97, 106–107

Hidrasi 44–51, 57, 82–83, 106–110
Kekakuan 132–138
Kekuatan tarik dan lentur 84, 96, 103, 132–138
Kekuatan tekan 84, 96, 102, 112, 121–123
Kurva histeretik 130–138
LCA (life-cycle assessment) 86, 99, 108–111
Low-carbon RPC/UHPC 86–87, 99, 108–111, 151–153
Mikrostruktur 44–51, 57, 84, 97, 105–110
Nano-silica 86, 152
Optimasi formula 98–99, 109
Packing density 45–46, 65–71, 101
Particle packing 44–46, 65–71, 101
Particle-size distribution 45–46, 65–71, 92–93
Permeabilitas 57, 84–85, 107
Pola retak 130–138
Porositas 57, 65–71, 84–85, 104–107
Pozzolanic reaction / reaksi pozzolanik 45–51, 82, 110
Quartz powder dan quartz sand 92–93
Reactive Powder Concrete (RPC) 1–153
Research gap 88–89
Rheology 81–82
Sambungan balok-kolom 112, 119–147
SCM (supplementary cementitious materials) 56, 81, 86, 92, 108
SEM-EDS 97, 105–107
Shrinkage 85, 96, 104, 109
Sifat mekanik 84, 96, 102–103, 132–138
Silica fume 53, 80–81, 92–93, 106
Superplasticizer 53, 81–82, 92–93

Sustainability 56, 86, 99, 108–111, 151–153
TGA/DTG 97, 106–107
Toughness 82, 103, 108–110, 132–138
TVoid / volume rongga 65–71, 104–107
UHPC (Ultra-High-Performance Concrete) 13–32, 53–64, 86–88
UHPFRC 57–64, 86–87
Water-to-binder ratio (w/b) 72–79, 93
Workability 81–82, 95, 102, 140–142
X-ray diffraction (XRD) 45, 92
X-ray fluorescence (XRF) 45, 92
XRD 45, 84, 92, 97, 106–107
XRF (X-ray fluorescence) 45, 92



Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T., lahir di Sibuluan (Sarudik/ Sibolga/ Tapanuli Tengah) tanggal 14 Juli 1971. Alamat tinggal di Jalan Haji Bain No. 26 RT 05 RW 06, Kelapa Dua Wetan, Ciracas, Jakarta Timur-13730. Beliau merupakan Dosen pada Universitas Tama Jagakarsa Jakarta, Lulus Sertifikasi Dosen sebagai Dosen Profesional pada Bidang Ilmu Teknik Sipil, Ketua Program Studi (Kaprodik) Program Teknik Sipil (S2) Fakultas Teknik Universitas Tama Jagakarsa Jakarta, Asesor Beban Kerja Dosen (BKD) Kementerian Pendidikan Kebudayaan Riset dan Teknologi (KEMENDIKBUDRISTEK), Kepala Laboratorium PT. Mixindo Abadi Karya (PT MIXINDO), Komisaris Utama PT Barokah Konstruksi Engineering (PT. BAKO), Anggota Biasa Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia (HAKI), Anggota Asosiasi Dosen Indonesia (ADI), Anggota Perkumpulan Ahli Tenaga Anggota Konstruksi Infrastruktur (ATAKI), pernah sebagai Asesor Kompetensi Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP), Pengurus *Indonesian Society of Steel Construction (ISSC)* sebagai Anggota Bidang Pelatihan & Sertifikasi, Anggota Persatuan Insinyur Indonesia (PII), *Member American Institute of Steel Construction (AISC)*, Anggota Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI), Anggota Perkumpulan Ahli Pengkaji Teknis Indonesia (PAPTI), Anggota Perkumpulan Pendirian Ahli Konstruksi Indonesia (PPAKI), Anggota Asosiasi Kelaikan Bangunan Gedung (AKBG), dan Ikatan Asesor Profesional Indonesia (IASPRO). Lulus S1 Teknik Sipil (Struktur), Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan, Universitas Jayabaya pada tahun 1995. Lulus S2 Teknik Sipil (Struktur), Fakultas Teknik, Universitas Indonesia (UI) pada tahun 2009. Lulus S3 Teknik Sipil (Rekayasa Struktur), Fakultas Teknik Sipil & Lingkungan, Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 2015. Lulus Uji Kompetensi, Pendidikan Profesi Insinyur (PPI), Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan pada tahun 2023.

Email:

pioranaptua@jagakarsa.ac.id, piorthnaibaho@gmail.com, dan piorthnaibaho@yahoo.co.id

Scopus ID : 60277458400

SINTA ID : 6803926



**Penerbit Yayasan
John Hi-Tech Idetama
Jl. Rawa Bambu Raya No. 17 A
Pasar Minggu Jakarta 12520
Anggota IKAPI No. 566/DKI/2018**

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN KARYA

Yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T.
Alamat : Jl. H. Bain No. 25 RT 005 RW 006, Kelapa Dua Wetan Ciracas Jakarta Timur
NIP : 197107142005011001 :
HP : 081219114867

menyatakan dengan sesungguhnya, bahwa :

Judul : **REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC)**
Rekayasa Particle Packing, Hidrasi, Mikrostruktur, Sifat Mekanik,
Durabilitas, dan Pengembangan Low -Carbon Ultra-High -Performance
Concrete

Penulis : Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T.

adalah benar merupakan karya asli yang dibuat untuk diterbitkan dan disebarluaskan secara umum, melalui :

Penerbit : Yayasan John Hi-Tech Idetama
Alamat : Jl. Rawa Bambu Raya No. 17 A Pasar Minggu Jakarta 12520

Demikian surat ini dibuat dengan sebenar-benarnya serta akan menjadi pertanggungjawaban kami jika terdapat penyalahgunaan dan akibat yang ditimbulkannya.

Jakarta, 1 Oktober 2026

Penanggung Jawab Penerbit



Prof. Dr.Ir. Jonbi, MT., MM., MSI, INV

Penulis



Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T