

Potensi Penggunaan Serbuk GRC Sebagai Filler dan Epoxy Resin Sebagai Material Sambungan Papan GRC

Abraham P. Mewengkang¹

Rekayasa Perawatan dan Restorasi Bangunan Gedung, Teknik Sipil, Politeknik Negeri Manado¹
E-mail: abrahamamewengkang@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini mengkaji potensi penggunaan serbuk GRC sebagai filler dalam campuran resin epoksi dan hardener untuk kebutuhan sambungan pada pekerjaan fasade dan partisi papan GRC diberbagai industri konstruks termasuk pada Kantor Balai Monitor Manado. Sistem sambungan yang kuat, stabil, dan kompatibel sangat dibutuhkan dalam aplikasi GRC arsitektural, baik untuk eksterior (fasade) maupun interior (partisi). Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-komparatif berbasis studi literatur dari sumber-sumber ilmiah bereputasi dalam sepuluh tahun terakhir. Dua sistem dibandingkan: campuran serbuk GRC + epoxy + hardener dan produk komersial Compound GRC A+B. Hasil kajian menunjukkan bahwa formulasi berbasis epoksi menawarkan performa mekanik dan ketahanan cuaca yang lebih baik untuk aplikasi eksterior, sementara Compound GRC A+B lebih praktis digunakan untuk interior dengan beban struktural rendah. Selain potensi keberlanjutan melalui pemanfaatan limbah GRC, formulasi ini juga mendukung efisiensi biaya dan sampah konstruksi. Sebagai tindak lanjut, diperlukan pengujian laboratorium untuk menentukan komposisi ideal antara serbuk GRC, resin epoksi, dan hardener sesuai kebutuhan teknis dan fungsional sambungan fasade dan partisi GRC, guna memperoleh parameter mekanik yang optimal dan aplikatif di lapangan.

Kata kunci — GRC, Filler, Epoxy, Façade, Partisi, Compound A+B

1. PENDAHULUAN

1.1. Definisi Umum

Glass Fibre Reinforced Concrete (GRC) merupakan material komposit berbasis semen yang diperkuat dengan serat kaca alkali-resisten (AR), menghasilkan elemen beton ringan dengan kekuatan lentur tinggi dan ketahanan terhadap retak (Kičaitė & Moceikis, 2024). Serat kaca AR, yang digunakan sebesar 3–5% dari berat semen, memiliki kekuatan tarik tinggi (1.000–3.400 MPa) dan modulus elastisitas sebesar 29–84 GPa, sehingga mampu berperan sebagai *crack bridging* (zat fleksibel yang menutup retakan) dalam mencegah propagasi retakan lentur dan tarik (Ahmad et al., 2022; Blazy et al., 2022). GRC secara luas digunakan dalam industri konstruksi termasuk pada Kantor Balai Monitor Manado, terutama untuk panel fasad bangunan karena kemampuannya membentuk geometri kompleks dan bobot yang ringan ($\sim 1,8\text{--}2,0\text{ g/cm}^3$) tanpa menggunakan agregat kasar (Lalinde et al., 2022). Material ini juga menunjukkan ketahanan terhadap klorida dan suhu tinggi, walaupun rentan terhadap degradasi akibat siklus basah-kering (Lalinde et al., 2022). Sekitar 80% produksi GRC dialokasikan untuk panel fasad, menandakan pentingnya sistem sambungan antar-panel dalam memastikan keandalan struktural dan estetika bangunan (Henriksen, 2018).

1.2. Penelitian Terkait

Salah satu metode penyambungan panel GRC yang umum digunakan adalah menggunakan material mortar dua komponen seperti Compound GRC A+B. Produk ini terdiri dari bubuk semen (Portland, silika, aditif) dan emulsi polimer sintetis seperti lateks akrilik atau SBR, yang bekerja melalui hidrasi dan pembentukan jembatan polimer, meningkatkan kohesi dan fleksibilitas sambungan (Abdulrahman & Bzeni, 2022; Tripathi, 2024). Keunggulan teknisnya meliputi kekuatan tekan dan lentur yang baik, daya rekat tinggi, ketahanan terhadap deformasi, serta kestabilan dalam berbagai kondisi cuaca (Kim, 2020; Sihotang, 2021). Namun, alternatif lain yang mulai diteliti adalah penggunaan resin epoksi dua komponen (resin + hardener) yang dicampur dengan filler dari limbah industri seperti serbuk sisa GRC. Resin epoksi tipe DGEBA dikenal memiliki kekuatan tarik (~30 MPa), kuat tekan (~100 MPa), dan modulus elastisitas tinggi (~3,2 GPa), serta kemampuan adhesi yang kuat pada substrat semen dan serat kaca melalui ikatan mekanik dan kimia (Babba et al., 2024; Peng et al., 2022; Rudawska, 2021). Penambahan filler dari limbah industri, termasuk serbuk GRC, terbukti dapat meningkatkan sifat mekanik, memperbaiki distribusi partikel, serta mengurangi porositas dan biaya produksi (Hodul et al., 2021; Rahman & Li, 2023). Studi lain menunjukkan bahwa resin multi-komponen seperti Sikadur-42 ±HE (A+B+C) yang menggunakan filler berbasis semen dapat meraih kekuatan tekan ~78 MPa dan meningkat menjadi ~92 MPa (Sika, 2024). Dalam konteks pemanfaatan serbuk GRC, diperkirakan sifat mekanik dari ikatan Epoxy–GRC dapat menjadi lebih baik karena kompatibilitas material filler.

1.3. Kelemahan Penggunaan Sambungan Compound GRC A+B

Meskipun Compound GRC A+B memiliki performa teknis yang baik, penggunaan jangka panjangnya menghadapi sejumlah keterbatasan. Sambungan yang dibuat dengan mortar berbasis semen-polimer ini cenderung mengalami penurunan kualitas seiring waktu, seperti munculnya retakan halus atau kebocoran air akibat penyusutan, kehilangan elastisitas, atau kerusakan kimia (Henriksen, 2018). Umur pakai yang terbatas dan ketergantungan pada ketepatan pencampuran serta curing yang sulit dikontrol di lapangan menjadi tantangan tersendiri dalam aplikasinya. Di sisi lain, sifat termoplastik polimer dan ketergantungan pada kelembaban lingkungan untuk proses hidrasi dapat mengakibatkan sambungan tidak berkembang optimal, terutama pada area dengan variasi suhu dan kelembaban ekstrem. Gambar 1 menunjukkan produk compound GRC A+B.



Gambar 1. Produk Compound GRC A+B

Sumber: (Light Group Indonesia, 2025)

1.4. Alasan dan Urgensi Penelitian Sambungan Berbasis Serbuk GRC + Epoksi

Campuran resin epoksi dengan serbuk sisa GRC menawarkan potensi besar sebagai bahan penyambung alternatif. Resin epoksi memiliki keunggulan berupa daya rekat kuat, penyusutan minimal, dan ketahanan kimia yang baik (Rudawska, 2021). Penggunaan filler dari limbah GRC tidak hanya mendukung keberlanjutan dan efisiensi biaya, tetapi juga berkontribusi pada

peningkatan kekuatan tarik dan tekan sambungan (Hodul et al., 2021). Kombinasi antara matriks epoksi dan filler berbasis GRC diharapkan mampu memberikan ikatan adhesi yang kuat, stabil terhadap perubahan lingkungan, dan tahan lama. Mengingat belum banyak penelitian yang secara khusus mengkaji performa teknis dan keandalan campuran **Serbuk GRC + Resin Epoksi + Hardener** sebagai bahan sambungan panel, maka studi ini penting dilakukan. Melalui pendekatan **studi literatur yang sistematis**, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi material tersebut dalam konteks kekuatan adhesi, ketahanan mekanik, dan manfaat lingkungan, sekaligus membandingkannya dengan produk sambungan konvensional yang ada di pasaran.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Pendekatan: Studi Literatur

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk mengevaluasi potensi campuran serbuk GRC daur ulang dan resin epoksi sebagai material sambungan alternatif. Literatur dikumpulkan dari database bereputasi (ScienceDirect, SpringerLink, Scopus, MDPI, Taylor & Francis) menggunakan kata kunci seperti “GRC filler”, “epoxy resin adhesive”, dan “sustainable building adhesives”. Kriteria inklusi meliputi publikasi 10 tahun terakhir (2014–2024), jurnal terindeks Scopus/SINTA, serta studi terkait GRC, epoksi, dan keberlanjutan. Artikel non-peer-reviewed atau tanpa data teknis dikecualikan. Seleksi dilakukan dalam tiga tahap (identifikasi, penyaringan isi, dan penilaian kualitas), lalu dianalisis secara tematik dan naratif untuk menyusun sintesis dan menemukan research gap.

2.2. Objek Penelitian: Sambungan Papan GRC

Objek kajian adalah sambungan antar panel GRC menggunakan dua jenis bahan: (1) formulasi eksperimen serbuk GRC + resin epoksi DGEBA + hardener, dan (2) produk komersial Compound GRC A+B (semen modifikasi + polimer akrilik). Objek ini dipilih karena sambungan GRC merupakan titik kritis dalam konstruksi fasade dan partisi, baik secara estetika maupun struktural. Penelitian menilai apakah formulasi eksperimen dapat menjadi alternatif ramah lingkungan dengan performa teknis yang kompetitif.

2.3. Kriteria Perbandingan

Lima kriteria dijadikan dasar analisis: (a) Ketahanan Mekanik (tarik dan lentur) (b) kompatibilitas material (afinitas dan kestabilan ikatan), (c) Ketahanan Lingkungan (cuaca), (d) Waktu Curing (e) Ketersediaan (di pasaran) (f) Biaya, (g) Kemudahan aplikasi, dan (h) Aplikasi di lapangan.

2.4. Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Data diperoleh dari literatur ilmiah dan lembar teknis produk, lalu dianalisis secara deskriptif-komparatif. Hasil disajikan dalam bentuk tabel dan narasi untuk membandingkan kedua bahan dan menyimpulkan potensi aplikatifnya dalam konstruksi berkelanjutan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Ketahanan Mekanik (tarik dan lentur)

Serbuk GRC + Epoxy Resin + Hardener yaitu resin epoksi dua komponen (resin + hardener) yang dikombinasikan dengan filler limbah industri seperti serbuk GRC dapat meningkatkan kinerja mekanik material. Epoxy tipe DGEBA memiliki sifat unggul, seperti kekuatan tarik sekitar 30 MPa, tekan 100 MPa, dan modulus elastisitas mencapai 3,2 GPa, serta menunjukkan

adhesi kuat terhadap substrat semen dan serat kaca melalui mekanisme ikatan fisik dan kimia (Babba et al., 2024; Peng et al., 2022; Rudawska, 2021). Penambahan filler serbuk sisa GRC diharapkan mampu memperbaiki distribusi partikel, menurunkan porositas, serta mendukung efisiensi biaya (Hodul et al., 2021; Rahman & Li, 2023). Kekuatan adesif epoksi ke beton biasanya berkisar dalam 5–15 MPa untuk sambungan geser-lap (lap-shear) pada kondisi ideal. Epoxy murni memiliki bond strength sekitar 5–10 MPa pada antarmuka cement/mortar, sedangkan epoksi berisi silika (15 vol%) menunjukkan kekuatan ikatan hingga ~13–17 Mpa (Babba et al., 2024). **Compound GRC A+B**, umumnya digunakan untuk mengisi celah antar panel GRC, memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan dengan komposit serbuk GRC + epoxy. Kuat tekan mencapai 41,75 Mpa dan kuat tarik mencapai 7,99 Mpa hingga 28 hari (Y. Fan et al., 2025). Namun, secara umum, material ini dirancang untuk aplikasi non-struktural seperti pengisian celah dan perataan permukaan, sehingga tidak diharapkan memiliki kekuatan lentur setinggi komposit serbuk GRC + epoxy.

3.2. *Kompatibilitas material (afinitas dan kestabilan ikatan)*

Epoxy Resin + Hardener, khususnya tipe DGEBA, menunjukkan afinitas tinggi terhadap substrat semen dan serat kaca. Hal ini disebabkan oleh kemampuan epoksi membentuk ikatan kimia dan mekanik yang kuat dengan permukaan substrat melalui interaksi van der Waals dan ikatan hidrogen. Studi oleh Bahraq et al., (2022) dengan simulasi dinamika molekuler menunjukkan bahwa interaksi ini menghasilkan adhesi yang kuat pada antarmuka epoksi-semen, bahkan dalam kondisi kelembaban yang bervariasi. Ikatan antara epoksi dan substrat semen atau serat kaca cenderung stabil dalam jangka panjang. (Bahraq et al., 2022) menemukan bahwa meskipun kelembaban dapat mempengaruhi kekuatan adhesi, struktur ikatan tetap terjaga dengan baik, terutama pada kondisi kering atau kelembaban rendah. Hal ini menjadikan campuran serbuk GRC dan epoksi cocok untuk aplikasi struktural yang memerlukan kestabilan ikatan jangka panjang. **Compound GRC A+B** merupakan campuran dua komponen yang dirancang khusus untuk aplikasi produk GRC. Komponen A biasanya berupa bubuk semen dan aditif khusus, sedangkan komponen B berisi polimer dan aditif yang meningkatkan adhesi dan fleksibilitas. Campuran ini dirancang untuk memiliki afinitas yang baik terhadap substrat GRC, memungkinkan pengisian celah dan perataan permukaan dengan efektif. Kestabilan ikatannya cenderung lebih rendah dibandingkan dengan perkiraan campuran serbuk GRC dan epoksi.

3.3. *Ketahanan Lingkungan (cuaca)*

Epoxy Resin + Hardener dikenal memiliki kelemahan terhadap paparan sinar UV, yang dapat menyebabkan degradasi sifat mekanik dan perubahan warna seiring waktu. Paparan UV dapat menginduksi pemutusan rantai molekul dalam epoksi, yang mengarah pada penurunan kekuatan mekanik dan munculnya retakan mikro pada permukaan material. Namun, penambahan nanopartikel seperti graphene pada lapisan epoksi telah terbukti meningkatkan ketahanan terhadap cuaca dengan mengurangi pembentukan retakan dan perubahan warna (Acar et al., 2025; Ci et al., 2025). Epoksi memiliki sifat tahan air yang baik, menjadikannya pilihan yang sesuai untuk aplikasi luar ruangan. Namun, paparan jangka panjang terhadap kelembaban tinggi dan suhu ekstrem dapat mempengaruhi kinerja epoksi. Studi menunjukkan bahwa paparan lingkungan luar ruangan dapat menyebabkan penurunan kekuatan adhesi epoksi seiring waktu. Penambahan filler seperti serbuk GRC dapat membantu meningkatkan stabilitas dimensi dan mengurangi efek negatif dari perubahan suhu dan kelembaban (Yamazaki et al., 2020). **Compound GRC A+B** memiliki kerentanan terhadap kelembaban dan suhu.

3.4. Waktu Curing

Epoxy Resin + Hardener Epoxy resin dua komponen seperti DGEBA membutuhkan waktu curing 48–72 jam pada suhu ruangan ($\sim 23^\circ\text{C}$) untuk mencapai kekuatan tarik dan lentur optimal (C. Fan et al., 2025). Selain itu, peningkatan suhu curing (mis. $50\text{--}60^\circ\text{C}$) dapat mempercepat cross-linking dan meningkatkan kekuatan, tetapi durasi berlebih (>72 jam) tidak menambah kekuatan signifikan dan justru berpotensi menyebabkan kerapuhan (Fan et al., 2025). Tetapi dalam konteks penambahan serbuk GRC, dapat memperlambat waktu ikatan. **Compound GRC A+B** Sebagai produk siap pakai, yang berbasis semen polimer memerlukan waktu ikat penuh dan modulus fleksibilitas terukur memerlukan waktu lebih lama – umumnya antara 7–28 hari di suhu kamar untuk mencapai fase stabil. Pengerasan ini terjadi melalui polimerisasi lenta dan hidrasi semen, sehingga meski awalnya siap digunakan, kekuatan optimal baru tercapai setelah beberapa minggu curing penuh.

3.5. Ketersediaan (di pasaran)

Serbuk GRC + Epoxy Resin + Hardener tersedia luas melalui berbagai merek internasional maupun produsen lokal, dengan ukuran kemasan mulai dari 0,95 L hingga drum industri 19 L. Pasokan filler dari serbuk GRC—berasal dari limbah industri—umumnya dikelola oleh pabrik GRC lokal atau penyedia limbah konstruksi, memungkinkan produksi di lokasi proyek serta mengurangi biaya transportasi dan penyimpanan. **Compound GRC A+B** merupakan produk jadi yang tersedia dari produsen lokal, menawarkan kemasan siap-pakai 1:1 untuk penggunaan panel area $\leq 1\text{ m}^2$. Produk ini dirancang khusus untuk mengisi celah GRC, tersedia di toko material bangunan atau jaringan distributor GRC. berdasarkan katalog mereka, produk ini cepat mengering (~ 4 jam) dan mudah diaplikasikan.

3.6. Biaya

Epoxy Resin + Hardener tersedia dalam berbagai kemasan, disesuaikan dengan skala kebutuhan: Kit kecil (2 qt / $\sim 1,9$ L) dijual sekitar Rp 420.000, Kit besar 105 + 205 (1 gal / $\sim 3,8$ L) dipasarkan sekitar Rp 2,9–3,6 juta. Filler berupa serbuk GRC biasanya dihasilkan langsung dari limbah pekerjaan menjadikan total biaya sambung sangat kompetitif jika diproduksi secara mandiri. **Compound GRC A+B** dijual sebagai produk siap pakai. Berdasarkan katalog distributor nasional, biaya satu kit (untuk area $\leq 1\text{ m}^2$ panel) diperkirakan mencapai Rp 300.000–500.000 per kit. Tidak mencakup filler karena kit ini sudah termasuk material perekat. Metode epoxy + serbuk GRC menawarkan solusi hemat biaya, terutama jika ada akses filler lokal. Sementara itu, Compound GRC A+B menyediakan kemudahan dan kepraktisan, namun dengan biaya per sambungan yang relatif lebih tinggi.

3.7. Kemudahan aplikasi

Serbuk GRC + Epoxy Resin + Hardener memerlukan tiga langkah utama: mencampur resin dan hardener sesuai rasio, menambahkan filler serbuk GRC, kemudian mengaplikasikan pada area sambungan. Proses ini mirip dengan "epoxy putty" dimana komponen dikentalkan hingga dapat dibentuk dan diaplikasikan seperti dempul yang aplikasinya tanpa alat khusus. Resin 2-komponen (2K) cure pada suhu ruang dengan masa kerja (pot-life) beberapa jam, cukup memadai untuk pekerjaan lapangan, namun membutuhkan perhitungan proporsi dan kebersihan alat. Diperlukan keterampilan tingkat menengah untuk memastikan pencampuran dan distribusi filler yang seragam. Kesalahan pencampuran dapat menyebabkan curing tidak sempurna atau perbedaan warna. Namun, formulasi ini fleksibel dan dapat dijangkau oleh teknisi lapangan tanpa peralatan khusus. Compound GRC A+B dirancang sebagai kit siap pakai (komponen A + B), tinggal dicampur dengan perbandingan 1:1, tanpa perlu filler tambahan. Cocok untuk pengisian sela dan

perataan panel (panduan teknis distributor). Diuji untuk aplikasi cepat; cukup dicampur dan dibentuk dengan trowel atau spatula. Cocok untuk area celah dan retakan tipis, bahkan oleh pekerja non-teknis. Waktu pengerjaan cepat, biasanya dalam waktu singkat (<4 jam). Praktis dan minim risiko kesalahan karena komponennya disesuaikan pabrik. Sangat ideal untuk pekerja lapangan tanpa latar teknis tinggi, dan permukaannya lebih mudah diratakan rapi.

3.8. Aplikasi di lapangan

Serbuk GRC + Epoxy Resin + Hardener belum dilakukan pengujian untuk menentukan formula terbaik untuk penyambungan papan GRC. Compound GRC A+B telah dipasarkan, dan digunakan secara luas dengan tujuan pemanfaatan sambungan panel GRC interior.

Dari hasil perbandingan diatas, kita dapat melihat potensi penggunaan serbuk GRC + Epoxy dengan Compound GRC A+B yang dirangkum pada Tabel 1 dibawah ini.

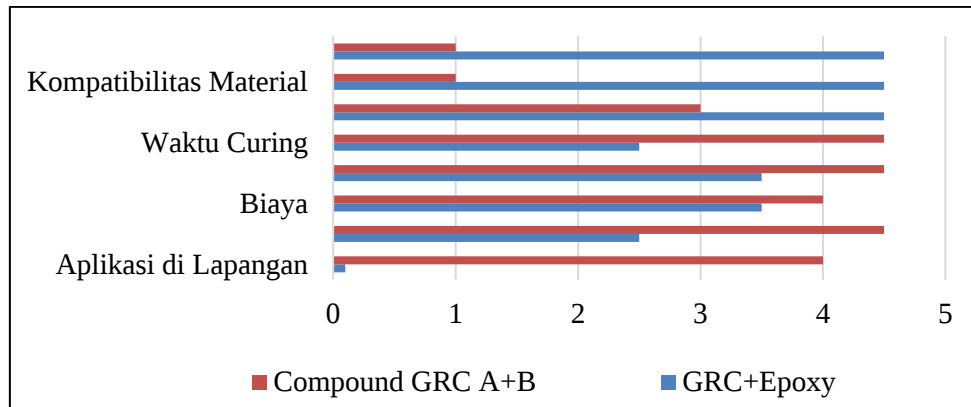
Tabel 1. Perbandingan material

KRITERIA	SERBUK GRC + EPOXY (<i>perkiraan berdasarkan kajian literatur</i>)	COMPOUND GRC A+B
Kekuatan Mekanik	performa mekanik (tarik dan lentur) yang lebih tinggi	performa mekanik (tarik dan lentur) yang lebih rendah
Kompatibilitas Material	afinitas dan ikatan kimia yang kuat	mengandalkan kompatibilitas formulasi pabrik
Ketahanan Lingkungan	lebih tahan terhadap cuaca, terutama sinar UV dan siklus kelembaban	lebih rentan terhadap degradasi jika tidak dilapisi pelindung
Waktu Curing	Relatif lama (belum diketahui)	7–28 hari
Ketersediaan	tersedia luas dan fleksibel dalam skala pembelian	bergantung pada distributor khusus
Biaya	lebih hemat biaya untuk skala besar	mahal per volume aplikasi
Kemudahan Aplikasi	Perlu keahlian & proporsi	tenaga kerja non-teknis
Aplikasi di lapangan	Belum dilakukan, perlu pengujian laboratorium	Praktis

3.9. Implikasi terhadap Efisiensi Konstruksi dan Sustainability

Penggunaan campuran serbuk GRC + epoksi dapat meningkatkan efisiensi konstruksi dengan mengurangi waktu dan biaya perbaikan sambungan, serta meningkatkan daya tahan struktur (Hodul et al., 2021). Selain itu, pendekatan ini mendukung prinsip keberlanjutan dengan memanfaatkan limbah industri, yang berkontribusi pada pengurangan limbah dan emisi karbon (Ostrowski et al., 2025). Dengan demikian, integrasi material ini dalam praktik konstruksi dapat memberikan manfaat jangka panjang baik dari segi ekonomi maupun lingkungan. Berdasarkan kajian literatur, meskipun studi spesifik mengenai serbuk GRC sebagai filler dalam matriks epoksi terbatas, penelitian oleh Ostrowski et al. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan serat kaca (*glass fiber*) limbah dan bubuk basal sebagai aditif dalam komposit berbasis epoksi dapat meningkatkan kekuatan tarik dan ketahanan abrasi, meskipun penambahan bubuk basal cenderung menurunkan kekuatan tarik. Dalam kajian literatur ini, tidak akan menggunakan bubuk basal, tetapi hanya menggunakan serbuk sisa GRC sebagai filler. Di sisi lain menurut informasi dari Light Group Indonesia, Compound GRC A+B adalah produk mortar polimer-modifikasi yang dirancang khusus untuk sambungan papan GRC. Produk ini memiliki kelebihan dalam hal kemudahan aplikasi, fleksibilitas, dan kompatibilitas dengan papan GRC. Namun, kekuatan mekaniknya umumnya lebih rendah dibandingkan dengan sistem epoksi, dan ketahanannya terhadap lingkungan agresif mungkin terbatas. Dari segi keberlanjutan, penggunaan limbah

industri seperti serbuk GRC dalam campuran epoksi mendukung prinsip ekonomi sirkular dengan mengurangi limbah dan emisi karbon (Ostrowski et al., 2025). Pendekatan ini tidak hanya memberikan manfaat teknis tetapi juga berkontribusi pada efisiensi anggaran dan pengurangan limbah pekerjaan (sampah) konstruksi. Gambar 2 dibawah ini, adalah estimasi perbandingan kuantitatif dua jenis bahan.



Gambar 2. Perbandingan karakteristik material

4. KESIMPULAN

Karena artikel ini berupa kajian literatur, maka perlu dilakukan pengujian laboratorium untuk menguji variasi komposisi Serbuk GRC+epoxy + hardener untuk memperoleh formula yang tepat, agar memenuhi berbagai aspek. Untuk tindak lanjut aplikasi di lapangan, jika prioritas proyek adalah ketahanan jangka panjang, keberlanjutan, dan kekuatan struktural, maka campuran serbuk GRC + epoxy lebih direkomendasikan apabila telah dilakukan pengujian laboratorium. Jika prioritas adalah kecepatan aplikasi, biaya rendah, dan penggunaan pada sambungan non-struktural, maka compound GRC A+B merupakan pilihan lebih efisien. Strategi kombinasi kedua bahan bisa menjadi pendekatan ideal, dengan menempatkan material sesuai kebutuhan teknis di masing-masing area bangunan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih Politeknik Negeri Manado, Jurusan Teknik Sipil, Program Studi Rekayasa Perawatan dan Restorasi Bangunan Gedung, serta kepada dosen pengampu mata kuliah Tesis Bapak Steve W.M. Supit, ST, M.Eng. Ph.D, dan Ibu Dr.Ir.Jeanely Rangkang, M.Eng,Sc atas petunjuk dalam penulisan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrahman, P. I., & Bzeni, D. K. (2022). Bond strength evaluation of polymer modified cement mortar incorporated with polypropylene fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01387>
- Acar, M., Aras, U., & Durmaz, S. (2025). Outdoor Performance of Wood-plastic Composites Enhanced with Nano Graphene-Epoxy Coating. *BioResources* , 20(2), 3075–3084. <https://doi.org/10.15376/biores.20.2.3075-3084>

- Ahmad, J., González-Lezcano, R. A., Majdi, A., Ben Kahla, N., Deifalla, A. F., & El-Shorbagy, M. A. (2022). Glass Fibers Reinforced Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis. *Materials*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/ma15155111>
- Babba, R., Hebbache, K., Douadi, A., Boutlikht, M., Hammouche, R., Dahmani, S., Del Serrone, G., & Moretti, L. (2024). Impact of Silica Sand on Mechanical Properties of Epoxy Resin Composites and Their Application in CFRP–Concrete Bonding. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/app14156599>
- Bahraq, A. A., Al-Osta, M. A., Baghabra Al-Amoudi, O. S., Obot, I. B., Adesina, A. Y., & Maslehuddin, M. (2022). A nanoscale adhesion mechanism of cement-epoxy interface under varying moisture conditions: A molecular dynamics study. *Surfaces and Interfaces*, 35, 102446. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102446>
- Blazy, J., Blazy, R., & Drobiec, Ł. (2022). Glass Fiber Reinforced Concrete as a Durable and Enhanced Material for Structural and Architectural Elements in Smart City—A Review. *Materials*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/ma15082754>
- Ci, S., Wang, B., Di, C., Wang, M., Zhu, B., & Qiao, K. (2025). Effect of Ultraviolet Aging on Properties of Epoxy Resin and Its Pultruded Fiber-Reinforced Composite. *Polymers*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/polym17030294>
- Fan, C., Chen, H., Lin, F., Li, W., Xiong, X., Chen, B., & Yu, H. (2025). Impact of Curing Time and Temperature on Bond Performance of Epoxy Resin Adhesives for Steel Bridge Decks. *Polymers*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/polym17081018>
- Fan, Y., Chen, X., Ling, K., Chen, H., Fu, T., Liu, W., Qiu, R., & Fei, M. (2025). Investigation of waterborne epoxy-modified cement mortar with copper slag fillers: Hydration, material performance, and pore structure. *Case Studies in Construction Materials*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04054>
- Henriksen, T. (2018). Key problems associated with complex geometry GFRC. *Architecture and the Built Environment*, 7(5), 59–84. <https://doi.org/10.7480/abe.2017.5.3640>
- Hodul, J., Mészáros, L., & Drochytka, R. (2021). Article recovery of industrial wastes as fillers in the epoxy thermosets for building application. *Materials*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/ma14133490>
- Kičaitė, A., & Mocekis, R. (2024). *The degradation of glass fiber reinforced concrete and the potential for its improvement: A review*. <https://doi.org/10.9790/1813-1306118126>
- Kim, M. O. (2020). Influence of polymer types on the mechanical properties of polymer-modified cement mortars. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/app10031061>
- Lalinde, L. F., Mellado, A., Borrachero, M. V., Monzó, J., & Payá, J. (2022). Durability of Glass Fiber Reinforced Cement (GRC) Containing a High Proportion of Pozzolans. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/app12073696>
- Light Group Indonesia. (2025). *Compound GRC A+B*. [lightgroupindonesia.Com. https://lightgroupindonesia.com/compound-grc-ab/?utm_source=chatgpt.com](https://lightgroupindonesia.com/compound-grc-ab/?utm_source=chatgpt.com)
- Ostrowski, K. A., Piechaczek, M., Lach, M., Sikora, O., Furtak, K., Sajdak, K., & Radecka-Trzop, M. (2025). Sustainable Approach to Utilization of Waste Glass Fibers and Basalt Powder as Potential Additives in Epoxy-Based Composites for Repair of Concrete Structures. *Sustainability (Switzerland)*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/su17031064>
- Peng, H., Zhang, Z., Zou, Y., Guo, J., Zhang, X., & Zeng, X. (2022). Bending Performance of Epoxy Adhesive Joints of Prefabricated Concrete Elements. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.859532>

Rahman, M. U., & Li, J. (2023). Influence of Waste Filler on the Mechanical Properties and Microstructure of Epoxy Mortar. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/app13116857>

Rudawska, A. (2021). Mechanical Properties of Selected Epoxy Adhesive and Adhesive Joints of Steel Sheets. *Applied Mechanics*, 2(1), 108–126. <https://doi.org/10.3390/applmech2010007>

Sihotang, R. (2021). ANALISIS PERBANDINGAN PENGGUNAAN GYPSUM, GRC, ACP, PANEL ANYAMAN ROTAN SINTETIS DALAM INTERIOR RUMAH DAN GEDUNG. *Jurnal Rekayasa Teknologi Nusa Putra*, 7(2), 43. <https://doi.org/https://rekayasa.nusaputra.ac.id/article/download/132/113>

Sika. (2024). Sikadur®-42+ HE Cold Climate. In *Sika Hellas ABEE*.

Tripathi, B. (2024). Effects of Polymers on Cement Hydration and Properties of Concrete: A Review. In *ACS Omega* (Vol. 9, Issue 2, pp. 2014–2021). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05914>

Yamazaki, D., Iwanami, M., & Isa, M. (2020). Assessment of outdoor exposure effects on the long-term durability of epoxy resin adhesives used for steel-plate bonding. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 18(8), 463–472. <https://doi.org/10.3151/jact.18.463>
