

PENGARUH SUBSTITUSI VOLUME RESIN VINYL ESTER DENGAN FILLER TERHADAP KEKUATAN MEKANIK POLIMER MORTAR

Arya Aditama¹, Bobby Asukmajaya R², Taufiq Rochman³

Mahasiswa Manajemen Rekayasa Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang^{2,3}

Email: aryascba@gmail.com¹, bobbyasukma@polinema.ac.id², taufiq.rochman@polinema.ac.id³

ABSTRAK

Kebutuhan material perbaikan beton yang mampu mencapai kekuatan awal tinggi semakin penting pada pekerjaan rehabilitasi struktur yang menuntut waktu henti singkat. Mortar polimer berbasis resin vinyl ester memiliki potensi sebagai material perbaikan cepat karena proses curing yang relatif cepat dan kekuatan mekanik tinggi, tetapi biaya resin masih menjadi kendala penerapan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh substitusi volume resin vinyl ester dengan filler fly ash dan pasir Lumajang terhadap kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, dan efisiensi biaya mortar polimer. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan fokus pada komposisi resin 60% dan filler 40%, dimana filler tersusun atas fly ash dan pasir dengan rasio 50:50. Kuat tekan diuji pada umur 3 jam, 24 jam, dan 28 hari, sedangkan kuat tarik dan kuat lentur diuji pada umur 24 jam. Hasil penelitian menunjukkan kuat tekan sebesar 1005,32 kg/cm² pada umur 3 jam, 1056,00 kg/cm² pada umur 24 jam, dan 1101,32 kg/cm² pada umur 28 hari. Kuat tarik mencapai 155,84 kg/cm² dan kuat lentur mencapai 439,00 kg/cm². Komposisi tersebut menunjukkan keseimbangan antara kekuatan awal, perkembangan kekuatan jangka panjang, dan efisiensi biaya. Hasil ini menunjukkan bahwa mortar polimer vinyl ester dengan filler fly ash dan pasir berpotensi digunakan sebagai material perbaikan cepat, meskipun pengujian lekatan dan durabilitas lapangan masih diperlukan.

Kata kunci : mortar polimer; vinyl ester; fly ash; pasir Lumajang; perbaikan cepat

ABSTRACT

The demand for concrete repair materials with high early strength is increasing in structural rehabilitation works that require short service downtime. Vinyl ester resin based polymer mortar has potential as a rapid repair material due to its relatively fast curing process and high mechanical strength, but resin cost remains a major limitation for wider application. This study aims to analyze the effect of vinyl ester resin volume substitution with fly ash and Lumajang sand filler on the compressive strength, tensile strength, flexural strength, and cost efficiency of polymer mortar. The research was conducted experimentally with a focus on a mixture containing 60% resin and 40% filler, where the filler consisted of fly ash and sand at a 50:50 ratio. Compressive strength was tested at 3 hours, 24 hours, and 28 days, while tensile and flexural strengths were tested at 24 hours. The results showed compressive strengths of 1005.32 kg/cm² at 3 hours, 1056.00 kg/cm² at 24 hours, and 1101.32 kg/cm² at 28 days. The tensile strength reached 155.84 kg/cm² and the flexural strength reached 439.00 kg/cm². The mixture provided a balance between high early strength, long term strength development, and cost efficiency. These findings indicate that vinyl ester polymer mortar containing fly ash and sand filler has potential as a rapid repair material, although bond strength and field durability tests are still required.

Keywords : polymer mortar; vinyl ester; fly ash; Lumajang sand; rapid repair

1. PENDAHULUAN

Perbaikan struktur beton membutuhkan material yang tidak hanya memiliki kekuatan tinggi, tetapi juga mampu mencapai kekuatan awal dalam waktu singkat. Pada pekerjaan jalan, jembatan, lantai industri, pelabuhan, dan

elemen struktur yang melayani aktivitas publik, waktu tunggu setelah perbaikan sering menjadi faktor teknis yang menentukan. Mortar berbasis semen portland masih banyak digunakan, tetapi sistem ini memiliki keterbatasan pada umur sangat awal karena proses pembentukan kekuatan

dipengaruhi oleh hidrasi semen. Kondisi tersebut kurang sesuai untuk pekerjaan perbaikan darurat yang menuntut pembukaan layanan secara cepat.

Mortar polimer menjadi salah satu alternatif karena menggunakan resin sebagai pengikat utama. Dalam sistem ini, pengerasan terjadi melalui reaksi polimerisasi, sehingga proses pembentukan kekuatan dapat berlangsung lebih cepat dibandingkan material berbasis semen. Polymer concrete dan mortar polimer telah dilaporkan memiliki kuat tekan tinggi, permeabilitas rendah, ketahanan kimia baik, dan sifat adhesi yang mendukung aplikasi perbaikan [1], [2]. Keunggulan tersebut menjadikan mortar polimer relevan untuk penelitian material konstruksi inovatif, terutama ketika target aplikasinya adalah rapid repair.

Vinyl ester dipilih sebagai matriks karena memiliki ketahanan kimia dan korosi yang baik serta mampu membentuk jaringan polimer termoset setelah bereaksi dengan katalis dan akselerator. Jin et al. menunjukkan bahwa polymer concrete berbasis vinyl ester dapat mencapai kuat tekan 43,8 sampai 77,2 MPa pada umur 168 jam, yang membuktikan potensi vinyl ester sebagai binder material konstruksi berkekuatan tinggi [3]. Namun, penggunaan resin dalam jumlah besar menyebabkan biaya produksi meningkat. Masalah ini menjadi alasan penting untuk mencari komposisi yang lebih efisien melalui substitusi sebagian volume resin dengan filler.

Fly ash merupakan limbah pembakaran batubara yang memiliki ukuran partikel halus dan komposisi dominan berupa silika, alumina, besi, dan kalsium [4]. Pada material berbasis semen, fly ash sering berperan sebagai supplementary cementitious material. Pada mortar polimer, fly ash lebih relevan dipahami sebagai filler halus yang membantu mengisi rongga, memperbaiki kepadatan, dan mengurangi kebutuhan resin. Selain fly ash, pasir Lumajang digunakan sebagai filler agregat halus yang membentuk rangka granular dalam campuran. Keseimbangan antara fly ash dan pasir menjadi penting karena fly ash mengisi ruang mikro, sedangkan pasir memberi volume dan stabilitas mekanik.

Research gap penelitian ini terletak pada pengujian umur sangat awal. Sebagian besar penelitian mortar polimer dan polymer concrete masih berfokus pada umur 1 hari, 3 hari, 7 hari, atau 28 hari. Untuk material perbaikan cepat, data umur 3 jam dan 24 jam justru sangat krusial karena dapat menunjukkan kesiapan awal material setelah diaplikasikan. Rochman et al. telah mengkaji mortar polimer vinyl ester yang diperkuat fly ash dan pasir besi Lumajang, serta melaporkan kuat tekan 92,64 MPa, kuat tarik 12,19 MPa, dan kuat lentur 106,18 MPa pada komposisi optimum [5]. Rochman et al. juga menunjukkan bahwa vinyl ester polymer

concrete dengan high volume fly ash dapat memberikan respons tekan, tarik, dan lentur yang tinggi [6]. Namun, analisis khusus pada komposisi resin 60% dan filler 40% dengan rasio fly ash dan pasir 50:50 pada umur 3 jam, 24 jam, dan 28 hari masih perlu dibahas secara lebih terarah.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh substitusi volume resin vinyl ester dengan filler terhadap kekuatan mekanik mortar polimer. Fokus utama diarahkan pada kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, dan efisiensi biaya campuran. Komposisi yang dianalisis secara khusus adalah resin 60% dan filler 40%, dengan filler terdiri dari fly ash dan pasir Lumajang pada rasio 50:50. Hasil penelitian diharapkan memberi rekomendasi komposisi campuran yang tidak hanya kuat, tetapi juga aplikatif untuk perbaikan cepat dan lebih efisien dari sisi penggunaan resin.

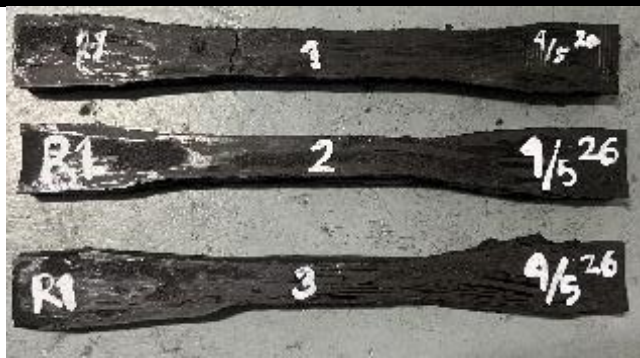
2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium. Material utama yang digunakan meliputi resin vinyl ester R804 J500 sebagai matriks, methyl ethyl ketone peroxide sebagai aktivator, cobalt sebagai akselerator, fly ash sebagai filler halus, dan pasir Lumajang sebagai filler agregat halus. Variasi campuran dibuat dengan mengubah persentase resin dan filler. Fokus naskah ini diarahkan pada komposisi resin 60% dan filler 40%, dimana filler terdiri atas fly ash 50% dan pasir 50%. Dengan demikian, komposisi utama campuran dapat ditulis sebagai 60% resin vinyl ester, 20% fly ash, dan 20% pasir.



Gambar 1. Benda Uji Kuat Tekan Mortar

Benda uji kuat tekan dibuat dalam bentuk kubus dengan dimensi 50 mm x 50 mm x 50 mm. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3 jam, 24 jam, dan 28 hari. Pemilihan umur tersebut bertujuan melihat kemampuan mortar polimer mencapai kekuatan sangat awal, kekuatan awal, dan kekuatan jangka panjang. Kuat tekan dihitung dengan membagi beban maksimum terhadap luas penampang tekan. Prinsip pengujian mengikuti SNI 03-6825-2002 untuk mortar kubus, dengan penyesuaian pada sistem material polimer.



Gambar 2. Benda Uji Kuat Tarik Dog Bone

Benda uji tarik dibuat dalam bentuk dog bone dan diuji menggunakan Universal Testing Machine pada umur 24 jam. Pengujian ini digunakan untuk mengetahui kemampuan mortar polimer menahan gaya tarik langsung. Kuat tarik dihitung dari beban maksimum dibagi luas penampang efektif pada daerah tarik. Prinsip pengujian mengacu pada konsep pengujian tarik material komposit sebagaimana digunakan dalam ASTM D638 [7].



Gambar 3. Benda Uji Kuat Lentur Balok

Benda uji lentur dibuat dalam bentuk balok dan diuji pada umur 24 jam menggunakan Universal Testing Machine. Pengujian lentur bertujuan mengetahui respons mortar polimer terhadap pembebanan yang menghasilkan tegangan tarik dan tekan secara bersamaan. Perhitungan kuat lentur mengikuti prinsip three point bending dan standar ASTM D7264 untuk material komposit bermatriks polimer [8]. Selain pengujian mekanik, penelitian ini juga menghitung berat jenis dan biaya material. Berat jenis dihitung dari perbandingan berat benda uji terhadap volume. Biaya dihitung berdasarkan kebutuhan material pada spesimen kubus dengan volume 125 cm³. Efisiensi biaya dianalisis melalui hubungan antara kekuatan mekanik dan biaya material. Pendekatan ini digunakan karena komposisi terbaik dalam aplikasi perbaikan tidak selalu komposisi yang memiliki kekuatan paling tinggi, tetapi komposisi yang memberikan keseimbangan antara performa dan biaya.

Tabel 1. Komposisi fokus mortar polimer

Parameter	Nilai
Resin vinyl ester (2% MEKP, 0.6% Cobalt)	60%
Filler total	40%
Fly ash dalam filler	50%

Pasir Lumajang dalam filler	50%
Komposisi efektif	60% VE, 20% FA, 20% PL
Umur uji tekan	3 jam, 24 jam, 28 hari
Umur uji tarik dan lentur	24 jam

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan dilakukan untuk menilai hubungan antara komposisi resin, distribusi filler, kekuatan mekanik, berat jenis, dan biaya. Fokus analisis tidak hanya menjelaskan angka hasil pengujian, tetapi juga menghubungkannya dengan mekanisme kerja material. Pada mortar polimer, kekuatan terbentuk melalui ikatan resin yang membungkus filler dan agregat halus. Oleh karena itu, performa campuran dipengaruhi oleh jumlah resin, kemampuan filler mengisi rongga, serta distribusi partikel di dalam matriks.

Tabel 2. Hasil kuat tekan dengan komposisi resin 60% dan filler 40%

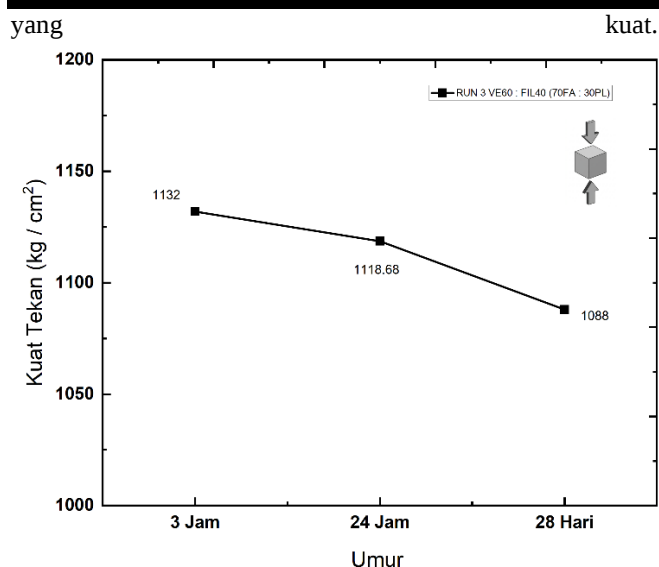
Umur	Kuat tekan (kg/cm ²)	Kuat tekan (MPa)
3 jam	1005,32	98,60
24 jam	1056,00	103,55
28 hari	1101,32	107,99

Sumber: Hasil pengujian dan konversi 1 kg/cm² = 0,0980665 MPa

Hasil pengujian menunjukkan bahwa komposisi resin 60% dan filler 40% dengan fly ash dan pasir 50:50 mampu menghasilkan kuat tekan 1005,32 kg/cm² pada umur 3 jam. Nilai ini setara dengan 98,60 MPa. Kuat tekan tersebut sangat tinggi untuk umur sangat awal dan menunjukkan bahwa reaksi curing vinyl ester berlangsung cepat. Pada sistem mortar polimer, kekuatan awal tidak dikontrol oleh hidrasi semen, tetapi oleh proses pembentukan matriks polimer. Ketika resin, aktivator, dan akselerator bereaksi, jaringan polimer terbentuk dan mengikat partikel fly ash serta pasir dalam waktu singkat.

Kuat tekan pada umur 24 jam meningkat menjadi 1056,00 kg/cm² atau 103,55 MPa. Kenaikan ini menunjukkan bahwa proses pengerasan masih berlanjut setelah 3 jam pertama. Secara material, peningkatan tersebut dapat terjadi karena ikatan silang dalam resin semakin stabil dan kontak antarfasa antara resin dan filler semakin efektif. Hasil ini mendukung karakter mortar polimer sebagai material rapid repair. Dalam skenario lapangan, kekuatan 24 jam sangat penting karena menjadi indikator awal apakah material dapat menerima beban layanan setelah pekerjaan perbaikan selesai.

Pada umur 28 hari, kuat tekan meningkat menjadi 1101,32 kg/cm² atau 107,99 MPa. Nilai ini menjadi hasil kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari dalam rangkaian variasi penelitian. Temuan ini menunjukkan bahwa proporsi fly ash dan pasir yang seimbang mampu memberi kestabilan struktur internal jangka panjang. Fly ash mengisi rongga halus di antara butiran pasir, sedangkan pasir berperan sebagai rangka granular yang menahan beban tekan. Resin 60% masih cukup untuk membungkus partikel dan membentuk ikatan antar fase



Gambar 4. Grafik Kuat Tekan Seluruh RUN dengan Waktu Pengujian 3 Jam, 24 Jam, dan 28 Hari

Perkembangan kuat tekan dari 3 jam ke 28 hari memperlihatkan pola yang konsisten. Kenaikan dari 1005,32 kg/cm² menjadi 1101,32 kg/cm² menunjukkan bahwa campuran tidak hanya kuat pada umur awal, tetapi juga tetap berkembang sampai umur 28 hari. Hal ini penting karena sebagian material perbaikan cepat dapat mencapai kekuatan awal tinggi, tetapi tidak selalu menunjukkan perkembangan kekuatan jangka panjang. Pada campuran ini, rasio fly ash dan pasir 50:50 tampak memberi keseimbangan antara kepadatan awal dan stabilitas jangka panjang.

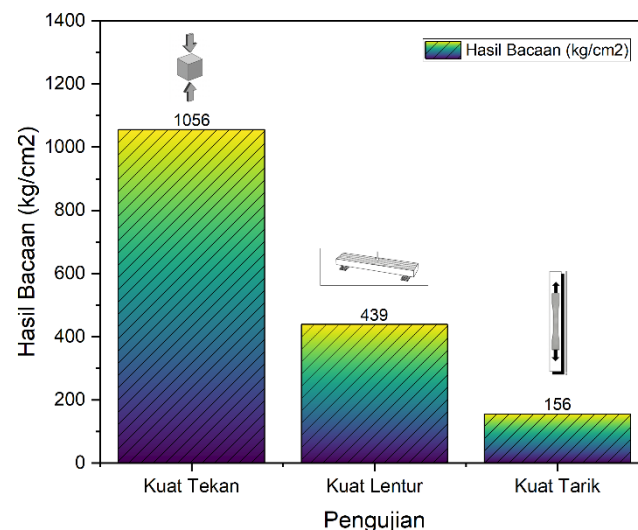
Jika dibandingkan dengan komposisi lain dalam penelitian, komposisi dengan fly ash lebih tinggi mampu memberikan kuat tekan 24 jam yang lebih besar. Namun, komposisi fly ash dan pasir 50:50 justru memberikan kuat tekan 28 hari paling tinggi. Perbedaan ini menunjukkan bahwa campuran terbaik pada umur awal belum tentu menjadi campuran terbaik pada umur jangka panjang. Secara teoritis, fly ash yang lebih tinggi dapat memperbaiki kepadatan awal karena partikel halus mengisi pori. Akan tetapi, jika proporsi partikel halus terlalu dominan, kebutuhan resin untuk membasahi permukaan partikel juga meningkat. Pada umur 28 hari, keseimbangan antara fly ash dan pasir tampaknya memberi susunan partikel yang lebih stabil.

Pengujian tarik menunjukkan bahwa komposisi fokus menghasilkan kuat tarik 155,84 kg/cm² atau sekitar 15,28 MPa pada umur 24 jam. Nilai ini sangat dekat dengan nilai tertinggi pada seluruh variasi, yaitu 156,06 kg/cm². Kedekatan nilai tersebut menunjukkan bahwa rasio fly ash dan pasir 50:50 mampu mempertahankan efektivitas ikatan matriks pada pembebanan tarik. Pada material komposit, kuat tarik sangat dipengaruhi oleh kualitas ikatan antarfase. Apabila resin tidak membasahi filler dengan baik, retak dapat

muncul pada batas antara resin dan partikel. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa resin 60% masih cukup untuk menjaga kontinuitas matriks.

Kuat tarik yang tinggi juga menunjukkan bahwa filler tidak hanya berperan sebagai pengisi pasif. Filler yang terdistribusi baik dapat membantu menahan perambatan retak mikro. Fly ash yang halus dapat menutup ruang kosong di sekitar pasir, sementara pasir memberikan tahanan mekanik terhadap deformasi. Namun, mekanisme ini hanya bekerja baik jika resin mampu mengikat seluruh partikel. Hal ini sejalan dengan penelitian Kubit et al. yang menunjukkan bahwa filler dapat memperbaiki sifat mekanik resin, tetapi kadar dan dispersi filler harus dikontrol agar tidak terbentuk aglomerasi [9].

Pengujian lentur menunjukkan bahwa komposisi fokus menghasilkan kuat lentur 439,00 kg/cm² atau sekitar 43,05 MPa pada umur 24 jam. Nilai ini lebih rendah dibandingkan komposisi dengan fly ash lebih tinggi, tetapi tetap menunjukkan performa lentur yang baik. Perbedaan antara kuat tekan dan kuat lentur memberi gambaran bahwa parameter mekanik tidak selalu mencapai nilai maksimum pada komposisi yang sama. Kuat tekan lebih dipengaruhi oleh kepadatan dan kemampuan menahan beban aksial, sedangkan kuat lentur lebih sensitif terhadap ketahanan retak tarik pada zona bawah balok.



Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan, Kuat Lentur, Kuat Tarik dengan Waktu Pengujian 24 Jam

Pada pembebanan lentur, bagian bawah spesimen menerima tegangan tarik dan bagian atas menerima tegangan tekan. Dengan demikian, kuat lentur sangat dipengaruhi oleh ketangguhan matriks dan kualitas ikatan resin terhadap filler. Komposisi resin 60% memberi matriks yang cukup kuat, tetapi rasio fly ash dan pasir 50:50 mungkin menghasilkan distribusi tegangan yang berbeda dibandingkan campuran dengan fly ash lebih tinggi. Campuran dengan fly ash lebih

tinggi dapat memiliki pori yang lebih kecil pada umur awal, sehingga kuat lenturnya lebih besar. Namun, komposisi 50:50 tetap unggul dari sisi perkembangan kuat tekan 28 hari. Hubungan antara kuat tekan, tarik, dan lentur menunjukkan bahwa komposisi fokus dapat dikategorikan sebagai campuran seimbang. Kuat tekannya sangat tinggi sejak 3 jam, kuat tariknya hampir mencapai nilai terbaik, dan kuat lenturnya masih berada pada level tinggi. Pada aplikasi perbaikan cepat, campuran seimbang seperti ini sering lebih relevan daripada campuran yang hanya unggul pada satu parameter. Material perbaikan harus mampu menahan tekan, tarik, dan lentur karena kondisi lapangan jarang menghasilkan satu jenis tegangan saja.

Berat jenis komposisi fokus adalah 1752 kg/m^3 . Nilai ini menunjukkan bahwa campuran masih berada pada rentang yang relatif ringan dibandingkan beton normal, tetapi tetap menghasilkan kuat tekan tinggi. Kondisi ini menguntungkan karena material perbaikan dengan berat jenis lebih rendah dapat mengurangi beban tambahan pada struktur lama. Namun, berat jenis tidak boleh terlalu rendah jika disertai porositas tinggi. Pada penelitian ini, kuat tekan tinggi menunjukkan bahwa berat jenis tersebut masih didukung oleh struktur internal yang padat.

Biaya material komposisi fokus sebesar Rp5.670,36 untuk spesimen kubus 125 cm^3 . Biaya ini bukan yang paling rendah, karena campuran dengan resin lebih sedikit memiliki biaya lebih murah. Akan tetapi, biaya tersebut harus dibaca bersama performa mekanik. Komposisi fokus menghasilkan kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari dan kuat tekan awal yang sangat tinggi pada umur 3 jam. Oleh karena itu, campuran ini dapat dinilai efisien secara teknis karena biaya yang dikeluarkan diikuti oleh performa mekanik yang tinggi. Indeks efisiensi kuat tekan terhadap biaya pada komposisi ini sebesar 0,186. Nilai ini menunjukkan perbandingan antara kekuatan dan biaya material. Dalam konteks rapid repair, efisiensi tidak hanya ditentukan oleh harga per satuan volume, tetapi juga oleh kemampuan material mengurangi waktu tunggu pekerjaan. Jika material dapat mencapai kekuatan tinggi dalam 3 jam sampai 24 jam, maka nilai ekonominya dapat meningkat karena mempercepat pembukaan layanan. Oleh sebab itu, komposisi fokus layak dipertimbangkan sebagai campuran teknis yang kuat dan cukup efisien.

Dari sisi keberlanjutan, penggunaan fly ash sebagai filler memberi nilai tambah karena memanfaatkan limbah industri. Penggunaan filler juga mengurangi sebagian kebutuhan resin. Namun, klaim ramah lingkungan harus tetap dibatasi karena penelitian ini belum melakukan analisis daur hidup. Istilah yang lebih tepat adalah material ini berpotensi mendukung konstruksi yang lebih berkelanjutan melalui

pemanfaatan fly ash dan pengurangan volume resin. Untuk membuktikan dampak lingkungan secara kuantitatif, penelitian lanjutan perlu melakukan life cycle assessment.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi resin 60% dan filler 40% dengan rasio fly ash dan pasir 50:50 memberikan performa yang kuat, stabil, dan aplikatif. Komposisi ini tidak selalu menjadi yang tertinggi pada setiap parameter, tetapi memberikan keseimbangan yang baik antara kuat tekan umur sangat awal, kuat tekan 28 hari, kuat tarik, kuat lentur, berat jenis, dan biaya. Dengan demikian, campuran ini dapat direkomendasikan sebagai salah satu kandidat mortar polimer untuk perbaikan cepat pada struktur beton.

Tabel 3. Rekapitulasi Sifat Mekanik dan Biaya Komposisi

Parameter	Nilai
Kuat tekan 3 jam	1005,32 kg/cm^2
Kuat tekan 24 jam	1056,00 kg/cm^2
Kuat tekan 28 hari	1101,32 kg/cm^2
Kuat tarik 24 jam	155,84 kg/cm^2
Kuat lentur 24 jam	439,00 kg/cm^2
Berat jenis	1752 kg/m^3
Biaya spesimen 125 cm^3	Rp5.670,36
Indeks efisiensi tekan/biaya	0,186

Sumber: Hasil Analisis Pengujian

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, mortar polimer dengan komposisi resin vinyl ester 60% dan filler 40%, dimana filler tersusun atas fly ash dan pasir Lumajang 50:50, mampu menghasilkan kuat tekan sangat tinggi pada umur awal. Kuat tekan yang diperoleh adalah $1005,32 \text{ kg/cm}^2$ pada umur 3 jam, $1056,00 \text{ kg/cm}^2$ pada umur 24 jam, dan $1101,32 \text{ kg/cm}^2$ pada umur 28 hari. Peningkatan kekuatan dari 3 jam sampai 28 hari menunjukkan bahwa campuran ini tidak hanya cepat mengeras, tetapi juga tetap mengalami perkembangan kekuatan jangka panjang.

Kuat tarik pada umur 24 jam sebesar $155,84 \text{ kg/cm}^2$ menunjukkan bahwa komposisi fokus memiliki ikatan matriks yang baik. Nilai ini hampir sama dengan nilai tertinggi pada seluruh variasi, sehingga campuran fly ash dan pasir 50:50 dapat dinilai mampu menjaga kualitas ikatan antarfasa pada pembebanan tarik. Kuat lentur sebesar $439,00 \text{ kg/cm}^2$ juga menunjukkan kapasitas lentur yang baik, meskipun bukan nilai tertinggi pada seluruh variasi.

Komposisi resin 60% dan filler 40% dengan rasio fly ash dan pasir 50:50 memberikan keseimbangan antara microfiller dan agregat halus. Fly ash membantu mengisi rongga, pasir membentuk rangka granular, dan resin vinyl ester mengikat partikel menjadi matriks komposit yang padat. Keseimbangan ini menjadi alasan utama mengapa campuran tersebut menghasilkan kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari.

Dari sisi biaya, komposisi ini membutuhkan biaya Rp5.670,36 per spesimen kubus 125 cm^3 dengan indeks efisiensi tekan terhadap biaya sebesar 0,186. Campuran ini bukan yang paling murah, tetapi memiliki performa mekanik yang tinggi dan stabil. Oleh karena itu, komposisi ini dapat

direkomendasikan sebagai kandidat mortar polimer perbaikan cepat yang kuat dan cukup efisien. Penelitian lanjutan perlu menguji kuat lekat terhadap beton lama, susut, ketahanan kimia, ketahanan siklus basah kering,

dan performa aplikasi lapangan. Pengujian tersebut penting agar mortar polimer yang dikembangkan tidak hanya unggul pada uji mekanik laboratorium, tetapi juga layak diterapkan pada kondisi perbaikan struktur beton sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) N. J. Jin, J. Yeon, S. H. Min, and K. S. Yeon, "Strength developments and deformation characteristics of MMA-modified vinyl ester polymer concrete," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 12, no. 4, 2018, doi: 10.1186/s40069-018-0232-0.
- 2) T. Rochman, E. Arifi, E. N. Cahya, and A. M. Wicaksono, "The performance of novel polymer mortar containing vinyl ester resin reinforced by fly ash and iron sand under compressive, tensile, and flexural test," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, 107205, 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.107205.
- 3) T. Rochman, Sumardi, S. H. Susilo, and H. A. Wardhana, "Vinyl-ester-based polymer concrete incorporating high volume fly ash under tensile, compressive, and flexural loads," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 36, no. 3, pp. 153-163, 2024, doi: 10.1016/j.jksues.2023.03.001.
- 4) ASTM International, ASTM D3039/D3039M Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- 5) ASTM International, ASTM D7264/D7264M Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- 6) A. Kubit, M. Bucior, R. Kluz, K. Ochalek, and K. Burnat, "Effect of nanofillers on the mechanical properties of vinyl ester resin used as a carbon fiber reinforced polymer matrix," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 10-21, 2022, doi: 10.12913/22998624/152053.
- 7) ASTM International, ASTM C579-23 Standard Test Methods for Compressive Strength of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.
- 8) Badan Standardisasi Nasional, SNI 03-6825-2002 Metode Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Semen Portland untuk Pekerjaan Sipil. Jakarta: BSN, 2002.