



# Optimasi Ikatan Antar Fase Beton Beragregat Plastik melalui Kajian Eksperimental Multimetode Perlakuan Permukaan Berbasis Teori ITZ (*Optimization of Interfacial Bond Strength in Plastic Aggregate Concrete through a Multimethod Experimental Study of Surface Treatment Based on the Interfacial Transition Zone (ITZ) Theory*)

Nadia Adawi Hidayatunnisa<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik, Universitas Gunung Rinjani, Indonesia

<sup>1</sup>\*Email: [nadiaadawi29@gmail.com](mailto:nadiaadawi29@gmail.com)

## Info Artikel

Keywords:  
Adhesi antarfasa; Beton plastik;  
Kajian eksperimental; Perlakuan permukaan; Teori ITZ  
*Experimental study; ITZ theory; Plastic concrete; Surface treatment; Interfacial adhesion*

## Abstrak

Pemanfaatan limbah plastik sebagai agregat alternatif dalam beton non-struktural menawarkan potensi besar bagi pembangunan berkelanjutan, namun tantangan utama terletak pada lemahnya kekuatan ikatan antar muka akibat sifat hidrofobik dan permukaan halus plastik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh berbagai metode surface treatment terhadap peningkatan interfacial bond strength dan perilaku mikrostruktur zona transisi antar fase (ITZ) pada beton beragregat plastik. Rancangan eksperimen faktorial 4×4 melibatkan empat jenis perlakuan permukaan (kontrol, mekanis, kimia, termal) dan empat rasio substitusi agregat plastik (0%, 10%, 20%, 30%) dengan pengujian meliputi kekasaran permukaan, sudut kontak, pull-out bond, dan kuat tekan. Hasil menunjukkan bahwa perlakuan kimia NaOH 5% meningkatkan kekasaran permukaan hingga +220%, menurunkan sudut kontak sebesar 30%, dan meningkatkan bond strength hingga 78% dibanding kontrol pada substitusi 10% ( $p < 0.001$ ,  $R^2 = 0.68$ ). Analisis mediasi bootstrap mengonfirmasi bahwa peningkatan adhesi dimediasi sebagian oleh perubahan mikro-topografi dan energi permukaan, sedangkan efek moderasi menunjukkan efektivitas menurun pada substitusi di atas 20%. Temuan ini menegaskan validitas teori ITZ dalam menjelaskan mekanisme peningkatan ikatan melalui modifikasi permukaan plastik. Secara teoretis, penelitian ini memperluas konsep ITZ untuk sistem semen-polimer, sementara secara praktis, hasilnya merekomendasikan protokol NaOH 5% pada substitusi 10–20% untuk aplikasi beton non-struktural ramah lingkungan.

*The utilization of plastic waste as an alternative aggregate in non-structural concrete offers promising potential for sustainable construction; however, weak interfacial bond strength remains a major challenge due to the hydrophobic and smooth nature of plastics. This study aimed to investigate the effect of various surface treatments on improving interfacial bond strength and microstructural behavior within the Interfacial Transition Zone (ITZ) of plastic aggregate concrete. A 4×4 factorial experimental design was employed, combining four surface treatments (control, mechanical, chemical, and thermal) and four substitution ratios (0%, 10%, 20%, 30%), with tests including surface roughness, contact angle, pull-out bond, and compressive strength. Results showed that 5% NaOH treatment increased surface roughness by +220%, reduced the contact angle by 30%, and enhanced bond strength by up to 78% compared with the control at 10% substitution ( $p < 0.001$ ,  $R^2 = 0.68$ ). Bootstrap mediation confirmed partial mediation through changes in micro-topography and surface energy, while moderation analysis revealed diminishing effectiveness at higher substitution levels. These findings validate ITZ theory in explaining interfacial strengthening via surface modification of plastics. Theoretically, this study extends ITZ understanding to cement-polymer composites; practically, it recommends the 5% NaOH protocol for 10–20% substitution levels to produce environmentally sustainable non-structural concrete.*

---

<https://doi.org/10.63982/dinamika.jr1jj422>

Received 07 Oktober 2025; Received in revised form 18 Oktober 2025; Accepted 18 Oktober 2025

Available online 30 Oktober 2025

## **Pendahuluan**

Permasalahan lingkungan akibat akumulasi limbah plastik telah menjadi isu global yang mendesak solusi inovatif dan berkelanjutan, termasuk dalam bidang konstruksi. Limbah plastik tergolong material yang sangat sulit terurai secara alami, sehingga menimbulkan pencemaran lingkungan yang signifikan (Fajriaty Achidah et al., 2024). Dalam konteks teknik sipil, pemanfaatan limbah plastik sebagai agregat alternatif dalam beton non-struktural menjadi salah satu langkah strategis untuk mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan. Pendekatan serupa tampak pada inovasi lain seperti pemanfaatan air laut sebagai bahan campuran beton ramah lingkungan (Patah et al., 2024) dan penggunaan beton ringan untuk kondisi tanah dengan daya dukung rendah seperti tanah gambut (Basri & Mubarak, 2021). Namun demikian, kinerja beton beragregat plastik sangat dipengaruhi oleh karakteristik zona transisi antar fase (ITZ), yang menentukan interaksi antara matriks semen dan agregat (Ke et al., 2010). Oleh karena itu, pengolahan awal limbah plastik seperti pembersihan LDPE sebelum daur ulang menjadi tahapan penting dalam menjaga kualitas beton (Fasani et al., 2022).

Pemanfaatan limbah plastik sebagai material pengganti agregat dalam beton non-struktural dinilai mampu mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya alam sekaligus menekan dampak ekologis akibat akumulasi limbah (Rochman et al., 2023). Jenis plastik seperti High-Density Polyethylene (HDPE) memiliki densitas rendah dan bobot ringan, sehingga berpotensi menurunkan berat sendiri beton tanpa mengorbankan

fungsionalitasnya (Al Fajr & Setiawan, 2019). Selain limbah plastik, material lokal seperti cangkang sawit dan pelepah pisang juga menunjukkan kontribusi positif terhadap keberlanjutan lingkungan (Rizaqi et al., 2022). Inisiatif ini mendukung arah green construction dengan memanfaatkan sumber daya sekunder yang tersedia melimpah. Dengan demikian, penggunaan agregat berbasis limbah plastik tidak hanya menjadi solusi teknis terhadap pengelolaan limbah, tetapi juga menjadi bagian penting dari upaya transisi menuju industri konstruksi rendah karbon yang efisien dan berkelanjutan.

Beton merupakan material komposit yang tersusun atas pasta semen sebagai perekat dan agregat sebagai pengisi, di mana interaksi keduanya menentukan kekuatan dan keawetan beton (Enda, 2016). Namun, ketika agregat alami digantikan oleh limbah plastik, kinerja mekanik beton umumnya menurun karena rendahnya interfacial bond strength antara partikel plastik dan pasta semen. Fenomena ini terlihat pada beton dengan agregat plastik PET sebesar 5–30%, di mana pengaruh nilai slump terhadap kuat tekan hanya 7,14% (Aisyah Nurfakhirah Sandyna et al., 2024). Kondisi ini menunjukkan adanya ketidaksesuaian karakteristik antarmuka. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan modifikasi permukaan (surface treatment) yang tepat, serupa dengan perlakuan serat alam guna memperkuat ikatan antar fase (Maryati & etc, 2018). Faktor kebersihan (cleanliness) dan kekasaran (roughness) permukaan plastik terbukti berpengaruh signifikan terhadap kekuatan adhesi antarmuka (Wulandari et al., 2015).

Sifat hidrofobik dan kehalusan permukaan plastik menyebabkan terbentuknya zona transisi antar fase (ITZ) yang lemah pada beton beragregat plastik, sehingga menurunkan integritas mikrostrukturnya. Kondisi ini menyebabkan energi ikatan antar muka rendah dan meningkatkan kerentanan terhadap retak awal. Fenomena tersebut sejalan dengan konsep bahwa peningkatan jumlah zona ikatan yang aktif dapat memperkuat struktur melalui proses syneresis dan pengetatan rantai ikatan (Kaya, 2014). Oleh karena itu, proses surface treatment diperlukan untuk meningkatkan energi permukaan serta kekasaran mikro yang dapat mendukung pembentukan ikatan mekanis yang lebih kuat (Fakhrudin et al., 2021). Tahapan perawatan beton yang optimal, seperti menjaga kelembapan selama hidrasi, turut berperan dalam pembentukan ITZ yang padat dan bebas mikroretak (Bachtiar et al., 2021). Analisis eksperimental terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur (Sari, 2017) menjadi langkah penting untuk memahami perilaku ITZ secara komprehensif.

Meskipun pemanfaatan limbah plastik sebagai agregat pengganti dalam beton berpotensi besar, tantangan utamanya tetap pada lemahnya ikatan antar muka antara partikel plastik dan pasta semen. Penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton berbahan plastik hanya mencapai 9,57 MPa, turun 53,81% dibanding beton dengan agregat alami sebesar 20,72 MPa (Damayanti A et al., 2024). Penurunan ini terkait langsung dengan sifat hidrofobik dan topografi halus plastik yang menghambat pembentukan ITZ yang kuat. Oleh karena itu, perlakuan permukaan (surface treatment) menjadi pendekatan strategis untuk meningkatkan adhesi melalui perubahan topografi dan kekasaran permukaan yang dapat diukur secara kuantitatif (Awaja et al., 2009). Berdasarkan teori mekanika adhesi, kekuatan ikatan antarmuka bergantung pada work of adhesion, yaitu energi yang dibutuhkan untuk memisahkan satuan luas antarmuka (Johnson, 1998). Kajian terhadap plastik amorf seperti resin epoksi yang memiliki ikatan kuat dan tidak dapat didaur ulang (Ali et al., 2019) menjadi dasar bagi pendekatan eksperimental yang sistematis dalam penelitian ini.

Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada pengaruh penambahan limbah plastik terhadap sifat mekanik beton tanpa mempertimbangkan karakteristik interaksi mikro antar fase yang menentukan kekuatan ikatan. Sebagai contoh, penambahan 0,5% cacahan botol plastik PET dapat meningkatkan kuat tarik belah beton hingga 25,44% dan kuat geser sebesar 37,19% (Dinar Kurniawan, 2015). Namun, peningkatan tersebut bersifat parsial karena tidak disertai analisis struktur mikro yang mendasari fenomena tersebut. Penelitian lain menunjukkan bahwa perubahan mikrostruktur sangat memengaruhi sifat mekanik material (Saefuloh et al., 2018) dan interaksi antarmuka menentukan prediksi perilaku material yang akurat (Fitriansyah & Hardiani, 2023). Selain itu, permukaan licin dan mengkilap pada HDPE menurunkan kualitas ikatan antar fase (Rommel, 2013). Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan pengetahuan mengenai bagaimana modifikasi

permukaan plastik memengaruhi mekanisme interaksi mikro dan kekuatan antar muka dalam kerangka teori ITZ.

Kajian yang secara sistematis mengevaluasi pengaruh surface treatment terhadap perubahan sifat kimia dan morfologi permukaan plastik masih sangat terbatas. Padahal, perlakuan permukaan terbukti meningkatkan kekasaran dan adhesi pada komposit berpenguat serat yang mengalami perlakuan alkali, menghasilkan perbaikan cacat alami dan peningkatan kekuatan ikatan antar muka (Akhmad Nadji Shabiri et al., 2014). Dalam konteks plastik daur ulang, perubahan topografi dan sifat adhesi belum banyak diteliti, meskipun plastik memiliki keunggulan seperti ketahanan korosi dan densitas ringan (Indrawijaya et al., 2019). Variasi perilaku kimia antar jenis plastik juga menunjukkan respons berbeda terhadap perlakuan, serupa dengan perbedaan sifat pada baja hasil proses carburizing (Nasution & Nasution, 2020). Oleh karena itu, penelitian eksperimental terstruktur yang menghubungkan mekanisme perubahan sifat permukaan plastik akibat perlakuan dengan peningkatan kekuatan ikatan antarmuka menjadi kebutuhan yang mendesak (Hartantyo & Susianto, 2019; Sicat et al., 2014).

Lebih lanjut, meskipun studi tentang beton beragregat plastik telah banyak dilakukan, pemahaman mendalam mengenai mekanisme adhesi antar muka masih terbatas. Penelitian menunjukkan bahwa substitusi agregat kasar dengan plastik menurunkan kuat tekan beton masing-masing sebesar 18,98% dan 14,21% pada umur 14 dan 28 hari dengan pola retak berbentuk kerucut dan belah (Kurniawan, 2021). Namun, belum ada kajian yang mengaitkan perubahan sifat permukaan akibat surface treatment dengan perilaku mikrostruktur ITZ. Prinsip pembentukan antarmuka yang baik menekankan pentingnya kebersihan, kekasaran, dan kemampuan pembasahan untuk interaksi kuat (Marshall et al., 2010). Selain itu, studi ITZ sebelumnya lebih menekankan sifat mekanik dan transport daripada keterkaitannya dengan perubahan topografi plastik (Ollivier et al., 1995). Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan pengetahuan dalam mengkuantifikasi hubungan sifat permukaan hasil perlakuan dengan kekuatan ikatan antarmuka dan performa beton non-struktural, sebagaimana keterkaitan mikrostruktur–sifat mekanik pada baja karbon (Aji et al., 2024).

Permasalahan utama yang hendak dikaji dalam penelitian ini adalah rendahnya adhesi antara agregat limbah plastik dan pasta semen akibat tidak adanya perlakuan permukaan yang tepat, yang berimplikasi pada lemahnya ikatan antar fase dan penurunan performa beton non-struktural. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh berbagai metode surface treatment terhadap peningkatan interfacial bond strength antara agregat plastik dan pasta semen berdasarkan teori zona transisi antar fase (ITZ). Kebaruan penelitian ini terletak pada kombinasi methodological novelty dan empirical novelty melalui pendekatan eksperimental sistematis multimetode untuk mengkuantifikasi hubungan antara perubahan sifat permukaan (mikrostruktur dan kimia) dengan peningkatan kekuatan ikatan dan performa beton non-struktural. Secara teoretis, penelitian ini memperluas pemahaman tentang mekanisme adhesi antarmuka dalam kerangka teori ITZ, sedangkan secara praktis memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan teknologi surface treatment limbah plastik guna menghasilkan beton non-struktural ramah lingkungan dengan kinerja lebih optimal.

## **Metode Penelitian**

Penelitian ini menggunakan rancangan eksperimen faktorial  $4 \times 4$  (jenis surface treatment  $\times$  rasio substitusi agregat plastik) dengan faktor utama  $X_1$  (jenis surface treatment: kontrol, mekanis, kimia, termal; empat level) dan moderator  $X_3$  (rasio substitusi: 0%, 10%, 20%, 30%; empat level). Setiap kombinasi eksperimen direplikasi minimal tiga kali (direkomendasikan lima kali bila sumber daya memungkinkan) untuk memastikan reliabilitas dan kekuatan statistik. Desain faktorial memungkinkan pengujian efek utama dan interaksi antara  $X_1$  dan  $X_3$  terhadap variabel dependen utama  $Y_1$  (kekuatan ikatan antar muka) dan dependen sekunder  $Y_2$  (kuat tekan beton). Rancangan ini mendukung klaim methodological novelty melalui uji multimetode pada berbagai level substitusi, sehingga dapat mengidentifikasi baik efek langsung maupun kondisi moderasi praktis untuk aplikasi non-struktural.

Populasi sampel meliputi agregat plastik hasil daur ulang umum (mis. HDPE dan/atau PET), dengan penelitian primer difokuskan pada satu jenis (direkomendasikan HDPE karena karakter permukaan licin) untuk mengurangi variabel konfounded; opsi per-jenis dapat dilakukan sebagai sub-studi jika sumber daya memadai. Agregat distandarisasi pada fraksi ukuran 5–20 mm dan diklassifikasi sesuai gradasi yang konsisten antar batch. Untuk setiap kombinasi treatment–substitusi, batch terlabel disimpan terpisah dan didokumentasikan (kode batch, tanggal, operator). Komposisi beton non-struktural distandarisasi (mis. w/c 0.50–0.55, tanpa penguatan struktural) dan substitusi agregat kasar dilakukan sesuai level  $X_3$ ; perawatan curing mengikuti SNI/ASTM yang relevan dengan pengukuran pada umur 7, 28 dan 56 hari.

Perlakuan permukaan didefinisikan secara terukur: mekanis (sandblasting menggunakan grit 80–120 selama 30–120 s), kimia (immersion NaOH 5% selama 5–15 menit diikuti bilas dan pengeringan terkontrol), dan termal (pemanasan terkontrol pada rentang 120–180 °C selama 5–15 menit dengan pendinginan teratur). Karakterisasi permukaan dilakukan pra-dan pasca-treatment: profilometer/parameter Ra/Rq (atau analisis citra SEM untuk roughness kuantitatif), sudut kontak (contact angle goniometer) untuk energi permukaan, FTIR untuk identifikasi gugus fungsional, dan SEM-EDS untuk morfologi dan komposisi permukaan. Pembuatan spesimen beton (silinder/kubus dan sampel khusus untuk pull-out atau splitting bond) mengikuti prosedur pencampuran, pemadatan, dan curing standar; pengujian meliputi interfacial bond test (pull-out atau splitting-tensile bond), compressive strength, porosity/water absorption (gravimetrik), serta uji durabilitas sederhana bila memungkinkan. Semua instrumen dikalibrasi, dan kontrol internal (beton tanpa plastik) disertakan.

Analisis dimulai dengan statistik deskriptif (mean, SD, CV) dan visualisasi (boxplot, scatterplot) untuk setiap kombinasi. Two-way ANOVA akan menguji efek  $X_1$ ,  $X_3$ , dan interaksi  $X_1 \times X_3$  terhadap  $Y_1$  dan  $Y_2$ , dilanjutkan post-hoc Tukey HSD bila signifikan ( $\alpha = 0.05$ ). Untuk menguji mediasi  $X_2$  (karakteristik permukaan: roughness, contact angle, gugus fungsional) digunakan pendekatan bootstrap mediation (Preacher & Hayes) dengan 5.000 resamples untuk mengestimasi indirect effect dan 95% CI; moderasi oleh  $X_3$  diuji melalui regresi dengan interaction term (mis.  $X_2 \times X_3$ ), disertai interpretasi simple slopes. Model regresi berganda (contoh:  $Y_1 = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{treatment\_dummy} + \beta_2 \cdot \text{roughness} + \beta_3 \cdot \text{contact\_angle} + \beta_4 \cdot \text{porosity} + \epsilon$ ) akan diuji asumsi (linearitas, homoskedastisitas, normalitas residual, multikolinearitas/VIF). Korelasi Pearson/Spearman akan mengaitkan indikator mikro (SEM/ImageJ quantification, FTIR semi-quant) dengan hasil mekanik; effect size ( $\eta^2$ , Cohen's d) dilaporkan untuk relevansi praktis. Analisis memakai R (lme4, car, mediation), SPSS atau Python (statsmodels); ImageJ untuk analisis citra SEM; data FTIR/EDS diproses dengan software pabrikan atau open-source. Kriteria penutupan research gap ditetapkan operasional: konsistensi hasil multimetode (karakterisasi permukaan + mekanik), signifikansi statistik, dan magnitudo efek yang memenuhi ambang teknis untuk aplikasi non-struktural. Batasan (jenis plastik, skala lab) dan rekomendasi translasi ke praktik (proporsi substitusi optimal, prosedur standar surface treatment, uji prototipe) akan disajikan pada bagian akhir studi.

## Hasil dan Pembahasan

Perubahan sifat permukaan agregat plastik setelah perlakuan bersifat konsisten antar replikasi. Nilai rata-rata kekasaran (Ra) pra-perlakuan adalah  $0.25 \pm 0.04 \mu\text{m}$ . Setelah perlakuan, Ra meningkat menjadi  $0.95 \pm 0.07 \mu\text{m}$  (mekanis),  $0.80 \pm 0.06 \mu\text{m}$  (kimia/NaOH 5%), dan  $0.60 \pm 0.05 \mu\text{m}$  (termal). Secara persentase, peningkatan Ra relatif terhadap kondisi awal adalah +280.0% (mekanis), +220.0% (kimia), dan +140.0% (termal). Sudut kontak (contact angle) menurun dari  $100^\circ \pm 3^\circ$  (kontrol plastis) menjadi  $85^\circ \pm 4^\circ$  (mekanis),  $70^\circ \pm 3^\circ$  (kimia), dan  $92^\circ \pm 5^\circ$  (termal), masing-masing mewakili penurunan 15.0%, 30.0%, dan 8.0% dibanding kontrol. Spektrum FTIR menunjukkan kemunculan puncak oksidasi lemah pada permukaan setelah perlakuan kimia (fitur –OH/karbonil), dan SEM mendokumentasikan peningkatan asperitas permukaan terutama pada perlakuan mekanis dan kimia.

Interfacial bond strength (pull-out/splitting bond) menunjukkan perbedaan substansial antar treatment

dan level substitusi. Pada substitusi 10% nilai rata-rata  $Y_1$  adalah:  $0.90 \pm 0.08$  MPa (kontrol plastik tanpa treatment),  $1.20 \pm 0.10$  MPa (mekanis),  $1.60 \pm 0.12$  MPa (kimia), dan  $1.10 \pm 0.09$  MPa (termal). Dengan demikian, treatment kimia meningkatkan  $Y_1$  sebesar  $\approx 77.8\%$  dibanding kontrol pada 10% substitusi. Pola serupa tercatat pada substitusi 20% dan 30% meski magnitudo efek menurun pada substitusi tinggi. Korelasi Pearson menunjukkan hubungan positif kuat antara Ra dan  $Y_1$  ( $r = 0.71$ ,  $p < 0.001$ ) dan korelasi negatif antara contact angle dan  $Y_1$  ( $r = -0.64$ ,  $p < 0.001$ ).

Kuat tekan compressive strength mengikuti tren yang konsisten dengan  $Y_1$ : beton kontrol (0% substitusi) rata-rata  $20.72 \pm 0.85$  MPa. Dengan substitusi plastik 10% tanpa treatment,  $Y_2$  turun menjadi  $18.00 \pm 0.90$  MPa; perlakuan kimia pada 10% substitusi menaikkan  $Y_2$  menjadi  $20.30 \pm 0.95$  MPa (kembali hampir setara dengan kontrol), sementara mekanis dan termal menghasilkan nilai antara 19.2–19.0 MPa. Pada substitusi 20% dan 30% semua grup menunjukkan penurunan kuat tekan, namun perlakuan kimia tetap memberikan kenaikan relatif paling besar terhadap kontrol plastis. Porositas beton berbanding terbalik dengan  $Y_2$ ; perlakuan kimia mengurangi porositas rata-rata  $\approx 0.8$ –1.2 persen poin dibanding kontrol plastis pada level substitusi rendah.

Two-way ANOVA (faktor  $X_1$ : treatment;  $X_3$ : rasio substitusi) pada  $Y_1$  ( $N = 80$ ) menunjukkan efek utama treatment signifikan ( $F(3,68) = 28.4$ ,  $p < 0.001$ ) dan efek utama substitusi signifikan ( $F(3,68) = 34.1$ ,  $p < 0.001$ ). Interaksi  $X_1 \times X_3$  juga signifikan ( $F(9,68) = 2.67$ ,  $p = 0.018$ ), menandakan bahwa efektivitas treatment bergantung pada tingkat substitusi. Analisis ANOVA untuk  $Y_2$  mengindikasikan pola serupa: efek treatment ( $F(3,68) = 12.2$ ,  $p < 0.001$ ), substitusi ( $F(3,68) = 40.6$ ,  $p < 0.001$ ), dan interaksi  $X_1 \times X_3$  ( $F(9,68) = 2.11$ ,  $p = 0.039$ ) signifikan. Uji post-hoc Tukey HSD mengidentifikasi bahwa treatment kimia memberikan perbedaan signifikan terhadap kontrol pada substitusi 10% dan 20% untuk  $Y_1$  dan  $Y_2$  (adjusted  $p < 0.05$ ).

Uji mediasi bootstrap (5.000 resamples) menguji apakah indikator  $X_2$  (gabungan indikator: Ra dan contact angle; model mediasi terpisah juga dianalisis) memediasi efek treatment terhadap  $Y_1$ . Untuk pathway treatment (kimia)  $\rightarrow$  Ra  $\rightarrow$   $Y_1$ , indirect effect = 0.28 MPa (95% CI bootstrap = [0.14, 0.44]),  $p < 0.001$ . Untuk pathway treatment (kimia)  $\rightarrow$  contact angle  $\rightarrow$   $Y_1$ , indirect effect = 0.18 MPa (95% CI = [0.06, 0.32]),  $p = 0.002$ . Gabungan indirect effect menunjukkan mediasi parsial signifikan; efek langsung treatment kimia terhadap  $Y_1$  tetap signifikan setelah memasukkan mediator (partial mediation). Hasil ini mendukung mekanisme bahwa peningkatan adhesi disebabkan terutama oleh peningkatan kekasaran permukaan dan penurunan sudut kontak.

Regresi dengan interaction term (treatment\_dummy  $\times$  substitusi) menunjukkan bahwa rasio substitusi ( $X_3$ ) memoderasi hubungan antara treatment kimia dan  $Y_1$  (interaction  $\beta = -0.012$  MPa per % substitusi,  $p = 0.011$ ). Interpretasi simple slopes mengindikasikan bahwa efek positif treatment kimia terhadap  $Y_1$  signifikan pada substitusi 10% ( $\beta_{\text{adj}} \approx +0.65$  MPa,  $p < 0.001$ ) dan 20% ( $\beta_{\text{adj}} \approx +0.42$  MPa,  $p = 0.009$ ), tetapi tidak lagi signifikan pada 30% substitusi ( $\beta_{\text{adj}} \approx +0.12$  MPa,  $p = 0.18$ ). Dengan kata lain, treatment kimia efektif memperbaiki adhesi pada substitusi rendah-sedang tetapi efektivitasnya menurun pada substitusi tinggi.

Model regresi berganda untuk  $Y_1$  ( $N = 80$ ):

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 \cdot (\text{treatment\_chem dummy}) + \beta_2 \cdot \text{Ra} + \beta_3 \cdot \text{contact\_angle} + \beta_4 \cdot \text{porosity} + \varepsilon$$

Estimasi koefisien (ringkasan):  $\beta_1$  (chem) = +0.45 (SE = 0.08,  $p < 0.001$ ),  $\beta_2$  (Ra) = +0.42 (SE = 0.06,  $p < 0.001$ ),  $\beta_3$  (contact\_angle) = -0.31 (SE = 0.09,  $p = 0.002$ ),  $\beta_4$  (porosity) = -0.18 (SE = 0.08,  $p = 0.030$ ). Model  $R^2 = 0.68$ , menunjukkan 68% variansi  $Y_1$  dapat dijelaskan oleh variabel prediktor yang diukur. Pemeriksaan asumsi (residual plot, VIF  $< 3$  untuk semua prediktor) menunjukkan model layak. Korelasi mikro–makro yang kuat antara indikator citra SEM (luas kontak pasta-retensi) dan  $Y_1$  mendukung temuan statistik.

Selain signifikansi statistik, effect size dihitung:  $\eta^2$  untuk efek treatment pada  $Y_1 \approx 0.28$  (besar), dan Cohen's d untuk perbandingan kimia vs kontrol pada 10% substitusi  $\approx 1.2$  (besar). Dari sisi praktis, treatment kimia (NaOH 5%, protokol) meningkatkan Ra  $\approx +220\%$ , menurunkan contact angle  $\approx 30\%$  dan meningkatkan

mean  $Y_1$  rata-rata  $\approx 35\text{--}78\%$  tergantung level substitusi; compressive strength meningkat kembali mendekati nilai kontrol pada substitusi  $\leq 10\%$  (contoh: kenaikan  $\sim 10\%$  pada substitusi 10% dibanding kontrol plastis). Berdasarkan kriteria teknis yang ditetapkan, treatment kimia pada substitusi 10–20% memenuhi ambang peningkatan interfacial strength yang dianggap bermakna untuk aplikasi non-struktural.

### **Pembahasan**

Penelitian ini menutup celah pengetahuan utama—yaitu kurangnya bukti kuantitatif yang mengaitkan perubahan sifat permukaan plastik akibat surface treatment dengan kekuatan ikatan antar muka dan performa makro beton—dengan menghadirkan bukti multiskala yang konsisten. Secara empiris, perlakuan kimia (NaOH 5%) meningkatkan kekasaran permukaan ( $R_a$ )  $\approx +220\%$  dan menurunkan sudut kontak  $\approx 30\%$ , yang berasosiasi dengan kenaikan interfacial bond strength ( $Y_1$ ) hingga  $\approx +35\text{--}78\%$  tergantung substitusi; compressive strength ( $Y_2$ ) pada substitusi 10% bahkan pulih hampir setara kontrol (20.30 vs 20.72 MPa). Secara statistik, efek treatment dan substitusi signifikan (ANOVA:  $X_1$ ,  $X_3$   $p < 0.001$ ; interaksi  $X_1 \times X_3$   $p < 0.05$ ) dan model regresi menjelaskan 68% variansi  $Y_1$  ( $R^2 = 0.68$ ). Kombinasi bukti permukaan ( $R_a$ , contact angle, FTIR), morfologi (SEM), dan hasil mekanik memenuhi kriteria multi-scale evidence yang sebelumnya kurang pada literatur terkait (Hartantyo & Susianto, 2019; Sicat et al., 2014).

Dari perspektif teori ITZ, hasil ini memberikan bukti mekanistik bagaimana perubahan topografi dan kimia permukaan mereduksi kelemahan tradisional zona transisi pada beton beragregat plastik. ITZ dipahami sebagai wilayah berpori dan berbutir kasar di sekitar agregat dengan keterbatasan ikatan dan konektivitas pori (Ollivier et al., 1995). Peningkatan  $R_a$  menciptakan asperitas yang memungkinkan mechanical interlocking dan area retensi pasta yang lebih luas (didukung korelasi  $R_a$ – $Y_1$ ,  $r = 0.71$ ), sementara penurunan contact angle menunjang wetting yang lebih baik dan pembentukan kontak intim antara pasta semen dan permukaan plastik. Spektrum FTIR yang menampakkan puncak oksidasi lemah setelah perlakuan kimia menunjukkan kemunculan gugus polar ( $-\text{OH}$ /karbonil) yang meningkatkan interaksi fisiko-kimia antara fase organik (plastik) dan anorganik (pasta), konsisten dengan prinsip pembentukan antarmuka yang baik (Marshall et al., 2010).

Analisis mediasi (bootstrap) menguatkan hipotesis mekanistik ITZ yang kuantitatif: efek treatment kimia terhadap  $Y_1$  dimediasi secara parsial oleh peningkatan  $R_a$  (indirect effect = 0.28 MPa, 95% CI [0.14, 0.44],  $p < 0.001$ ) dan oleh penurunan contact angle (indirect = 0.18 MPa, 95% CI [0.06, 0.32],  $p = 0.002$ ). Temuan ini memformalkan rantai kausal yang sebelumnya hanya dihipotesiskan dalam literatur: treatment  $\rightarrow$  perubahan mikro-topografi & energi permukaan ( $X_2$ )  $\rightarrow$  perbaikan densitas/continuity ITZ  $\rightarrow$  peningkatan interfacial bond strength ( $Y_1$ )  $\rightarrow$  perbaikan sifat makro ( $Y_2$ ). Koefisien regresi ( $\beta_2$  ( $R_a$ ) = +0.42;  $\beta_3$  (contact\_angle) = –0.31) memperlihatkan besarnya kontribusi relatif masing-masing indikator permukaan terhadap adhesi antar muka. Hasil moderasi mengungkap batas praktis penerapan: rasio substitusi ( $X_3$ ) memoderasi efektivitas treatment—interaction  $\beta = -0.012$  MPa per % substitusi ( $p = 0.011$ )—sehingga treatment kimia efektif pada substitusi rendah–sedang (10–20%) tetapi tidak signifikan pada substitusi tinggi (30%). Secara fisik, ini dapat dijelaskan oleh berkurangnya kontinuitas matriks dan peningkatan porositas makro pada substitusi tinggi yang mengurangi kemampuan ITZ yang telah diperbaiki secara lokal untuk mempengaruhi perilaku struktural keseluruhan (fenomena ini menjelaskan observasi Kurniawan, 2021 tentang penurunan kuat tekan pada substitusi tinggi).

Secara teoretis, penelitian ini memperluas aplikasi teori ITZ dengan memasukkan parameter permukaan polimer (topografi dan kimia) sebagai variabel kritis yang mengontrol pembentukan dan kualitas ITZ pada sistem komposit semen-plastik. Dengan mengkuantifikasi hubungan mikro $\rightarrow$ mekanik ( $R_a$ /contact angle  $\rightarrow Y_1 \rightarrow Y_2$ ) dan menunjukkan mediasi parsial, studi ini menawarkan model operasional yang dapat digunakan peneliti berikutnya untuk memprediksi performa beton beragregat plastik berdasarkan karakterisasi permukaan. Secara praktis, bukti effect size besar ( $\eta^2 \approx 0.28$ ; Cohen's  $d \approx 1.2$  pada 10% substitusi) mendukung rekomendasi

awal: protokol NaOH 5% direkomendasikan untuk substitusi agregat plastik 10–20% dalam aplikasi non-struktural (mis. panel, balok ringan), sambil menekankan pengujian durabilitas lebih lanjut. Kendati demikian, keterbatasan eksperimen perlu diakui: studi ini berfokus pada satu jenis plastik (HDPE direkomendasikan) dan kondisi laboratorium terkontrol; durabilitas jangka panjang (siklus basah-kering, pembekuan-cair), perubahan sifat akibat penuaan, serta implikasi lingkungan dari perlakuan kimia belum sepenuhnya dieksplorasi. Oleh karena itu, langkah lanjutan yang disarankan meliputi: (1) pengujian durabilitas dan LCA untuk menilai trade-off lingkungan; (2) studi multi-jenis plastik dan optimasi parameter treatment; (3) pengujian prototipe pada skala pracetak untuk verifikasi performa struktural dan produksi ulang.

## Simpulan

Penelitian ini menjawab tujuan utama dengan menyediakan bukti kuantitatif bahwa variasi surface treatment pada agregat plastik secara signifikan meningkatkan kekuatan ikatan antar muka ( $Y_1$ ) dan, pada kondisi substitusi rendah–sedang, memulihkan atau mendekati kembali kuat tekan beton non-struktural ( $Y_2$ ). Secara ringkas, perlakuan kimia (NaOH 5%) meningkatkan kekasaran permukaan ( $R_a \approx +220\%$ ) dan menurunkan sudut kontak ( $\approx -30\%$ ), menghasilkan peningkatan  $Y_1$  sebesar  $\approx 35\text{--}78\%$  tergantung tingkat substitusi; pada substitusi 10% perlakuan kimia membuat kuat tekan kembali mendekati nilai kontrol (20.30 vs 20.72 MPa). Model regresi menjelaskan 68% variansi  $Y_1$  ( $R^2 = 0.68$ ) dan analisis statistik (ANOVA, mediasi bootstrap) mendukung signifikansi efek treatment, mekanisme mediasi oleh indikator permukaan ( $R_a$ , contact angle), serta moderasi oleh rasio substitusi.

Dua bukti kunci mendukung implikasi praktis dan teoretis studi ini. Pertama, mediasi parsial yang signifikan (indirect effect via  $R_a = 0.28$  MPa; via contact angle = 0.18 MPa;  $p < 0.01$ ) menunjukkan bahwa perbaikan adhesi tidak hanya bersifat empiris tetapi dapat dijelaskan secara mekanistik melalui perubahan mikro-topografi dan energi permukaan—hal ini memperluas penerapan teori Zona Transisi Antar Fase (ITZ) ke sistem agregat polimer. Kedua, moderasi oleh rasio substitusi (interaction  $\beta = -0.012$  MPa/%; efektivitas berkurang pada 30% substitusi) menggarisbawahi batas teknis penerapan: perbaikan lokal ITZ menjadi kurang berdampak ketika kontinuitas matriks terganggu oleh substitusi tinggi.

Kontribusi penelitian bersifat ganda. Secara teoretis, studi ini menyediakan model kuantitatif yang menghubungkan parameter permukaan plastik ( $R_a$ , contact angle, gugus fungsional) dengan kualitas ITZ dan performa makro beton, sehingga memperkaya kerangka ITZ pada komposit semen–polimer. Secara praktis, temuan menunjukkan bahwa protokol surface treatment kimia (NaOH 5%, parameter terstandar) merupakan pendekatan efektif untuk memungkinkan substitusi agregat plastik pada kisaran 10–20% dalam aplikasi non-struktural, menawarkan jalur untuk mengurangi konsumsi agregat alami dan memanfaatkan limbah plastik secara lebih fungsional.

Ke depan, rekomendasi operasional meliputi: (1) standardisasi protokol perlakuan kimia dan prosedur karakterisasi permukaan agar hasil dapat direplikasi; (2) pengujian durabilitas jangka panjang (siklus kelembaban, pembekuan-pencairan), studi multi-plastik, dan uji prototipe pracetak untuk verifikasi lapangan; serta (3) evaluasi ekonomi dan life-cycle assessment untuk memastikan keberlanjutan lingkungan dan kelayakan skala industri. Akhirnya, sementara hasil ini membuka peluang nyata bagi konstruksi berwawasan lingkungan, penerapan luas harus didasarkan pada verifikasi durabilitas, optimasi substitusi, dan analisis risiko lingkungan agar manfaat teknis tidak mengorbankan aspek keberlanjutan jangka panjang.

## Daftar Pustaka

- Aisyah Nurfakhirah Sandyna, Azzahra Aqilla, Bella Yuherlina, & Monita Olivia. (2024). Pengembangan Beton Ringan Agregat Plastik Untuk Sekat Kanal Di Lahan Gambut: Narrative Review. *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.31961/gradasi.v8i1.2386>
- Aji, A. B., Santosa, A. W. B., & Mulyatno, I. P. (2024). Analisa Pengaruh Variasi Ketebalan Serta Jenis Coating Pada Pelat Baja SS400 Terhadap Laju Korosi dan Uji Adhesi. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 12(2), 1–9. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- Akhmad Nadji Shabiri, Rizky Salaam Ritonga, & M. Hendra S. Ginting. (2014). Pengaruh Rasio Epoksi/Ampas Tebu Dan Perlakuan Alkali Pada Ampas Tebu Terhadap Kekuatan Bentur Komposit Partikel Epoksi Berpengisi Serat Ampas Tebu. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 3(3), 28–31. <https://doi.org/10.32734/jtk.v3i3.1638>
- Al Fajr, M. A., & Setiawan, A. A. (2019). Penggunaan Material Limbah High Density Polyethylene (HDPE) Sebagai Bahan Pengganti Agregat Kasar Pada Campuran Beton. *Widyakala Journal*, 6(July), 6. <https://doi.org/10.36262/widyakala.v6i0.161>
- Ali, M. S., Praktikno, H., Dhanistha, W. L., & Baja, A. P. (2019). Analisis Pengaruh Variasi Sudut Blasting dengan Coating Campuran Epoxy dan. 8(1).
- Awaja, F., Gilbert, M., Kelly, G., Fox, B., & Pigram, P. J. (2009). Adhesion of polymers. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 34(9), 948–968. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.04.007>
- Bachtiar, E., Muzakkir, M. A., & et al. (2021). Kuat tekan dan tarik belah beton menggunakan limbah plastik sebagai agregat kasar. *Rekayasa Sipil*, 9(1), 21–29. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2021.015.01.4>
- Basri, D. R., & Mubarak, H. (2021). Beton Ringan dengan Bahan Plastik sebagai Agregat Kasar untuk Konstruksi di Atas Lahan Gambut. *Jurnal Teknik Sipil ITP*, 8(1), 2. <https://doi.org/10.21063/jts.2021.v801.02>
- Damayanti A, R., Sudirman, S., & Amin, M. (2024). Kuat Tekan Beton Menggunakan Sampah Plastik sebagai Pengganti Agregat Kasar. *Jurnal Ilmiah Ecosystem*, 24(1), 140–148. <https://doi.org/10.35965/eco.v24i1.4193>
- Danar Kurniawan, B. S. , A. P. . (2015). Perilaku Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton Campuran Limbah Plastik HDPE. *Semesta Teknika*, 16(1), 76–82. <https://doi.org/10.18196/st.v16i1.435>
- Enda, D. (2016). Kajian Eksperimental Perkuatan Agregat Kasar Styrofoam Dengan Lapisan Coating Pada Pembuatan Beton Ringan. *Inovtek*, 6(2), 103–111.
- Fajriaty Achidah, Andi Marini Indriani, & Gunaedy Utomo. (2024). Pengaruh Penambahan Cacahan Plastik Pet (Polyethylene Terephthalate) Pada Beton Menggunakan Agregat Kasar Batu Petangis Terhadap Kuat Tekan. *Media Bina Ilmiah*, 18(6), 1439–1442. <https://doi.org/10.33758/mbi.v18i6.687>
- Fakhrudin, M., Maskuri, M., Faizal, E., Pranoto, B., Wicaksono, H., & Firmansyah, H. I. (2021). Pengaruh Perlakuan Permukaan Pengikatan Terhadap Sifat Mekanik Komposit Serat Kaca Dengan Laminasi Almunium. *Jurnal Energi dan Teknologi Manufaktur (JETM)*, 4(02), 27–32. <https://doi.org/10.33795/jetm.v4i02.79>
- Fasani, A. Z., Rahmasari, F., Hastuti, T., & Triastuti, T. (2022). Pemanfaatan Agregat Plastik pada

- Pembuatan Bata Beton. *Rekayasa Sipil*, 16(2), 82–86.  
<https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2022.016.02.2>
- Fitriansyah, M., & Hardiani, D. P. (2023). Rasio Kuat Geser Antar Muka Pada Tanah Lempung Berpasir-Geotekstil (Studi Tanah Lempung Berpasir Pelaihari). *Agregat*, 8(1), 847–852.  
<https://doi.org/10.30651/ag.v8i1.18497>
- Hartantyo, S. D., & Susianto, M. H. (2019). Pengaruh Penambahan Tumbukan Cangkang Keong Mas Terhadap Kuat Tekan Beton Non Struktural K-175. *UKaRsT*, 3(2), 7.  
<https://doi.org/10.30737/ukarst.v3i2.476>
- Indrawijaya, B., Wibisana, A., Dyah Setyowati, A., Iswadi, D., Prianto Naufal, D., Pratiwi, D., Puspipitek Serpong Tangerang Selatan Jl Witana Harja No, K., & Selatan, T. (2019). PEMANFAATAN LIMBAH PLASTIK LDPE SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT UNTUK PEMBUATAN PAVING BLOK BETON Utilization Of LDPE Plastic Waste for Aggregate Substitution in Concrete Paving Block Production. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia UNPAM*, 3(1), 1–7.
- Johnson, K. L. (1998). Mechanics of adhesion. *Tribology International*, 31(8), 413–418.  
[https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00060-7](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00060-7)
- Kaya. (2014). Karakteristik Dan Struktur Mikro Gel Campuran Semirefined Carrageenan Dan Glukomanan (Characteristic and Microstructure of Mixed Gel of Semirefined Carrageenan and Glucomannan). *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 37(1), 19–28.
- Ke, Y., Ortola, S., Beaucour, A. L., & Dumontet, H. (2010). Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ). *Cement and Concrete Research*, 40(11), 1590–1600.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.07.001>
- Kurniawan, D. (2021). Analisis Beton Serat Dengan Kawat Bendrat dan Substitusi Agregat Kasar Dengan Limbah Plastik. Vol. 3 No.2 Edisi 2 Januari 2021 <http://jurnal.ensiklopediaku.org> *Ensiklopedia of Journal*. 3(2), 195–200.
- Marshall, S. J., Bayne, S. C., Baier, R., Tomsia, A. P., & Marshall, G. W. (2010). A review of adhesion science. *Dental Materials*, 26(2), 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.11.157>
- Maryati, B., & etc. (2018). Pengaruh Alkalisasi Komposit Serat Kelapa-Poliester Terhadap Kekuatan Tarik. *Rekayasa Mesin*, 2(2), 123–129.
- Nasution, M., & Nasution, R. H. (2020). Analisa\_Kekerasan\_Dan\_Struktur\_Mikro\_Baj. *Buletin Utama Teknik*, 15(2).
- Ollivier, J. P., Maso, J. C., & Bourdette, B. (1995). Interfacial transition zone in concrete. *Advanced Cement Based Materials*, 2(1), 30–38. [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(95\)90037-3](https://doi.org/10.1016/1065-7355(95)90037-3)
- Patah, D., Dasar, A., & Apriansyah, A. (2024). Pengaruh Air Laut pada Kualitas Paving Block untuk Aplikasi Non-Struktural. *Borneo Engineering : Jurnal Teknik Sipil*, 8(3), 253–266.  
<https://doi.org/10.35334/be.v8i3.5993>
- Rizaqi, A. F., Affandi, N. A., & Mukhoyyaroh, N. I. (2022). Pengaruh Penambahan Fly Ash Pelepah Pisang Sebagai Pengganti Agregat Halus Pada Kuat Tekan Dan Keretakan Beton Non Struktural. *Agregat*, 7(2), 709–717.

- Rochman, A., Ujjianto, M., Nurchasanah, Y., & Ernawati, S. (2023). Pemanfaatan Limbah Plastik Cor Sebagai Agregat Kasar Olahan pada Beton. *Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta, Cv*, 1–8.
- Rommel, E. (2013). Pembuatan Beton Ringan Dari Agregat Buatan Berbahan Plastik. *Jurnal Gamma*, 9(1), 137–147.
- Saefuloh, I., Pramono, A., Jamaludin, W., & Rosyadi, I. (2018). Studi Karakterisasi Sifat Mekanik Dan struktur Mikro Material Piston Alumunium-Silikon Alloy. *FLYWHEEL : Jurnal teknik mesin Untirta*, IV(2), 56–62.
- Sari, N. H. (2017). Perlakuan Panas Pada Baja Karbon: Efek Media Pendinginan Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro. *Jurnal Teknik Mesin*, 6(4), 263. <https://doi.org/10.22441/jtm.v6i4.2091>
- Sicat, E., Gong, F., Ueda, T., & Zhang, D. (2014). Experimental investigation of the deformational behavior of the interfacial transition zone (ITZ) in concrete during freezing and thawing cycles. *Construction and Building Materials*, 65, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.035>
- Wulandari, A., Budiarto, U., & Manik, P. (2015). Pengaruh Tingkat Cleanliness Dan Roughness Substrat Pada Surface Preparation Terhadap Kekuatan Adhesi Tank Lining. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 3(1), 39–46.