

Dampak Penerapan Bahan Komposit Laminat E-Glass Epoksi terhadap Pola Retak Permukaan Dinding Silinder

The Impact of E-Glass Epoxy Composite Laminate Application on the Crack Pattern of Cylinder Wall Surface

Achmad Jusuf Zulfikar^{(1)*}, Ari Purnomo⁽¹⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area
Jl. Kolam No. 1, Medan Estate, Medan, Sumatera Utara, Indonesia, 20223

Email: zulfikar@staff.uma.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh pola kerusakan pada spesimen beton kolom silinder (BKS) yang diperkuat dengan komposit laminat e-glass epoxy (KLG) berdasarkan hasil uji Split Tensile Test, menyelidiki fenomena pemberian penguatan bahan KLG terhadap BKS berdasarkan persentase pola retak (PPR) permukaan dinding, dan menganalisis perbandingan antara kekuatan tarik belah (KTB) dan PPR. Spesimen BKS yang digunakan dalam penelitian ini memiliki bentuk silinder dengan diameter 50 mm dan panjang 150 mm sesuai dengan standar ASTM C496. Bahan KLG digunakan sebagai lapisan tambahan pada BKS dengan variasi 0, 1, 2, 3, dan 4 lapis lembaran serat e-glass anyaman. Uji split tensile dilakukan menggunakan alat uji UTM (Universal Testing Machine) sesuai dengan standar ASTM C496. Penghitungan persentase pola retak dilakukan menggunakan metode Histogram dan bantuan perangkat lunak Adobe Photoshop. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola kerusakan terbesar terjadi pada spesimen yang diperkuat dengan 4 lapis KLG. Hal ini mengindikasikan bahwa diperlukan beban yang cukup besar untuk merusak spesimen yang telah diperkuat. Oleh karena itu, pemberian lapisan KLG pada BKS dapat meredam kerusakan yang terjadi pada spesimen tersebut. Analisis perbandingan antara kekuatan tarik belah dan persentase pola retak juga memberikan wawasan tambahan mengenai kinerja BKS yang diperkuat dengan KLG.

Kata kunci: KLG; Pola Retak; BKS; kekuatan tarik belah; serat e-glass.

ABSTRACT

This research aims to obtain the damage pattern of reinforced concrete column specimens (RCC) using e-glass epoxy composite laminate (GEC) based on the results of the Split Tensile Test, investigate the phenomenon of applying GEC reinforcement to RCC based on the percentage of surface crack pattern (SCP), and analyze the comparison between the splitting tensile strength (STS) and SCP. The RCC specimens used in this study were cylindrical in shape with a diameter of 50 mm and a length of 150 mm, following ASTM C496 standards. GEC material was used as an additional layer on the RCC with variations of 0, 1, 2, 3, and 4 layers of woven e-glass fiber sheets. The split tensile test was conducted using a Universal Testing Machine (UTM) in accordance with ASTM C496 standards. The percentage calculation of the crack pattern was performed using the Histogram method with the assistance of Adobe Photoshop software. The results of the study showed that the largest damage pattern occurred in the specimens reinforced with 4 layers of GEC. This indicates that a significant load is required to damage the reinforced specimens. Therefore, the application of GEC layers on RCC can mitigate the damage that occurs in the specimens. The comparative analysis between the splitting tensile strength and the percentage of crack pattern also provides additional insights into the performance of RCC reinforced with GEC.

Keywords: KLG, Crack Pattern; BKS; Splitting Tensile Strength; E-glass Fiber.

1. PENDAHULUAN

Beton adalah salah satu bahan konstruksi yang penting dalam industri bangunan. Beton

diperoleh melalui proses pencampuran agregat halus seperti pasir, agregat kasar seperti kerikil, air, dan semen Portland atau bahan pengikat

hidrolis serupa. Kadang-kadang, bahan tambahan seperti admixture juga digunakan dalam pencampuran untuk memberikan sifat-sifat tertentu pada beton [1]. Beton memiliki definisi yang jelas sebagai campuran antara semen Portland atau jenis semen hidrolis lainnya, agregat kasar, agregat halus, dan air. Proses ini menghasilkan suatu massa padat yang dapat membentuk struktur bangunan yang kuat dan tahan lama. Untuk komponen struktural, mutu beton yang digunakan biasanya memiliki kuat tekan minimal sebesar 14,5 MPa atau setara dengan mutu beton K-175. Kuat tekan ini menjadi indikator kekuatan beton untuk menahan beban yang bekerja pada struktur tersebut [2].

Penggunaan beton dalam konstruksi sangat umum karena memiliki beberapa keunggulan. Beton memiliki daya tahan yang baik terhadap tekanan, ketahanan terhadap kelembaban, dan mampu membentuk berbagai bentuk sesuai dengan kebutuhan desain [3]. Selain itu, beton juga dapat memberikan perlindungan terhadap api dan meminimalkan perambatan suara. Dengan sifat-sifat tersebut, beton menjadi pilihan utama dalam pembangunan gedung, jembatan, jalan, dan struktur lainnya [4]. Dalam industri konstruksi, pemahaman yang baik tentang karakteristik beton dan penggunaan yang tepat sangat penting. Dengan memahami komposisi dan kualitas beton yang diperlukan untuk berbagai komponen struktural, insinyur dan arsitek dapat merencanakan dan mendesain struktur yang aman dan kokoh [5].

Kekuatan tarik beton hanya mencapai 10% hingga 15% dari nilai kekuatan tekan beton. Sifat ini menyebabkan munculnya retakan-retakan kecil pada beton yang dapat menyebabkan kerusakan yang serius jika dikenai beban [6]. Untuk meningkatkan kekuatannya, serat ditambahkan ke dalam campuran, sehingga terbentuklah suatu bahan komposit yang terdiri dari beton dan serat. Harapannya, serat dalam campuran beton dapat berperan sebagai tulangan mikro, di mana serat tersebut akan menahan retakan-retakan kecil sebelum terjadi retakan yang cukup besar akibat peningkatan beban, sehingga pada akhirnya beton tidak mengalami kegagalan struktural [7].

Penambahan serat pada beton dapat memberikan beberapa keuntungan. Serat yang terdistribusi secara merata dalam campuran beton dapat meningkatkan ketahanan terhadap gaya tarik. Ketika beban diterapkan pada beton, serat akan mencegah retakan-retakan kecil dari membesar dan menjaga keutuhan struktur beton. Hal ini mengurangi risiko keruntuhan dan meningkatkan daya tahan beton terhadap pembebanan yang diterima [8]. Penggunaan serat dalam beton merupakan salah satu inovasi penting dalam industri konstruksi. Penggunaan bahan

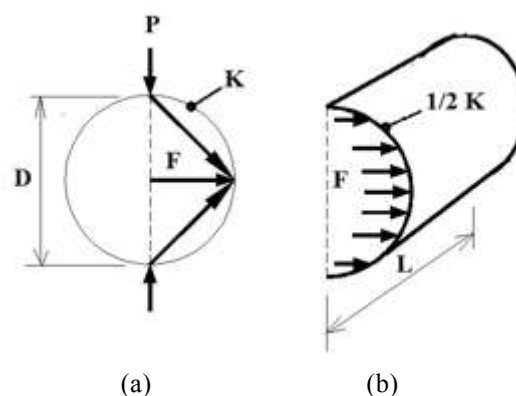
komposit beton-serat ini memberikan keunggulan dalam meningkatkan kekuatan tarik beton dan meminimalkan risiko retakan yang dapat menyebabkan kerusakan struktural [9]. Dalam perencanaan dan desain struktur beton, penting untuk mempertimbangkan kebutuhan dan karakteristik serat yang tepat, serta metode pencampuran dan distribusi serat yang efektif, guna memastikan bahwa beton yang dihasilkan memiliki kekuatan tarik yang memadai dan kinerja struktural yang handal [10].

Komposit adalah suatu sistem material multiphase yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih material dengan sifat yang berbeda. Dalam komposit, terdapat komponen serat dan matriks. Serat berperan sebagai material rangka yang membentuk struktur komposit, sedangkan matriks berfungsi untuk mengikat serat-serat tersebut dan menjaga posisinya tetap stabil [11]. Matriks memiliki sifat yang memungkinkannya untuk diubah bentuknya melalui pemotongan atau cetakan sesuai dengan kebutuhan desain yang diinginkan. Komposit merupakan material yang terdiri dari dua atau lebih konstituen atau fase yang berbeda, baik secara fisik maupun kimia. Material ini dibangun dalam arsitektur kompleks pada tingkat skala mikro, meso, atau makro. Kombinasi yang terjadi antara serat dan matriks dalam komposit membentuk struktur yang memiliki sifat-sifat khusus, seperti kekuatan yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, atau sifat termal yang baik [12]. Kehadiran serat memberikan kekuatan tarik dan ketahanan terhadap beban mekanis, sedangkan matriks berperan dalam mentransfer beban dan melindungi serat dari kerusakan [13]. Pemanfaatan komposit dalam berbagai industri, seperti industri otomotif, penerbangan, dan konstruksi, telah memberikan keuntungan dalam pengembangan material yang lebih kuat, lebih ringan, dan lebih tahan lama. Dengan memahami sifat-sifat material serat dan matriks serta interaksi antara keduanya, pengembangan komposit yang inovatif dapat dilakukan untuk memenuhi kebutuhan aplikasi yang beragam [14].

Serat E-glass merupakan serat penguat borosilicate yang memiliki ketahanan yang baik terhadap air dan zat kimia. Serat ini merupakan jenis serat penguat yang umumnya digunakan dalam pembuatan kapal [15]. Komposit E-glass epoxy, yang juga dikenal sebagai glass fiber reinforced polymer (GFRP), merupakan komposit polimer matriks yang menggunakan serat E-glass sebagai penguatnya. GFRP memiliki kualitas yang sangat baik, termasuk rasio kekuatan yang tinggi dan kekuatan yang mendekati logam. Selain itu, komposit ini juga memiliki berbagai keunggulan, seperti ringan, transparan, tidak berwarna, dan tidak terbatas pada ukuran objek dalam proses pembuatannya. Oleh karena itu,

penggunaan GFRP sering digunakan dalam berbagai aplikasi industri [16]. Dalam industri konstruksi kapal, serat E-glass digunakan sebagai penguat dalam komposit E-glass epoxy untuk memberikan kekuatan struktural yang diperlukan. Sifat tahan air dan zat kimia yang baik dari serat ini membuatnya cocok digunakan dalam lingkungan maritim yang korosif. Selain itu, keunggulan GFRP seperti kekuatan yang tinggi dan ringan membuatnya menjadi alternatif yang menarik bagi logam dalam pembuatan kapal, karena dapat mengurangi bobot dan meningkatkan efisiensi penggunaan energi. Penggunaan GFRP juga meluas ke industri lain, seperti konstruksi bangunan, otomotif, dan aeronautika. Keunggulan GFRP dalam hal kekuatan, keberlanjutan, dan fleksibilitas desain menjadikannya pilihan yang populer dalam pengembangan komponen struktural yang ringan dan tahan lama [17].

Kekuatan tarik belah (KTB) adalah nilai kekuatan tarik tidak langsung yang diperoleh dari pengujian benda uji beton berbentuk silinder. Pengujian dilakukan dengan meletakkan benda uji secara mendatar sejajar dengan permukaan meja mesin uji tekan [18], [19]. Pengukuran parameter kekuatan tarik beton secara langsung sangatlah sulit. Oleh karena itu, pengujian kekuatan tarik belah beton umumnya dilakukan karena memberikan hasil yang mencerminkan kekuatan tarik sebenarnya, yang kemudian digunakan untuk menentukan nilai kekuatan tarik beton. Kekuatan tarik belah digunakan dalam proses perancangan elemen struktur beton untuk mengevaluasi ketahanan geser beton dan menentukan panjang penyaluran dari tulangan. Biasanya, kekuatan tarik belah memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan kekuatan tarik langsung, namun lebih rendah daripada kekuatan lentur (modulus of rupture). Metode pengujian ini melibatkan penentuan kekuatan tarik belah dari benda uji berbentuk silinder. Dalam proses pengujian, benda uji berbentuk silinder dengan diameter 50 mm dan tinggi 150 mm yang berasal dari beton akan ditekan menggunakan mesin uji tekan dengan posisi horizontal, dengan tujuan untuk menentukan seberapa besar kekuatan tarik belah yang dapat ditahan oleh benda uji tersebut. Pola retak yang dihasilkan dari hasil pengujian tarik belah diakibatkan oleh gaya tarik menarik yang terjadi dalam spesimen akibat bentuk struktur silinder [20]. Pembentukan pola retak diilustrasikan pada gambar 1. Beban P ialah beban atau gaya eksternal yang masuk ke spesimen melalui satu titik pembebanan. Ketika beban telah memasuki spesimen, maka beban tersebut berubah arah dan menekan ke permukaan dinding spesimen dengan gaya F pada setengah keliling silinder $\frac{1}{2} K$. Hal ini mengakibatkan terjadinya gaya tarik menarik dalam spesimen yang menghasilkan keretakan [21].



Gambar 1. Proses pembebanan dalam spesimen: (a) inisiasi beban, dan (b) arah beban dalam spesimen

Histogram dalam konteks perhitungan jumlah warna suatu objek adalah representasi grafis dari distribusi frekuensi masing-masing nilai warna yang ada pada gambar atau objek tersebut [22]. Histogram digunakan untuk menganalisis dan menggambarkan sejauh mana intensitas warna yang berbeda muncul dalam gambar atau objek. Histogram biasanya digunakan untuk menganalisis gambar digital. Gambar digital terdiri dari piksel-piksel, dan setiap piksel memiliki nilai warna tertentu. Histogram membantu mengidentifikasi seberapa sering nilai warna tertentu muncul dalam gambar tersebut. Histogram umumnya terdiri dari sumbu horizontal yang mewakili nilai-nilai warna yang mungkin, misalnya dari 0 hingga 255 untuk gambar dengan kedalaman warna 8-bit. Sumbu vertikal menunjukkan jumlah piksel pada gambar yang memiliki nilai warna tertentu. Dengan melihat histogram, Anda dapat mengidentifikasi pola warna yang dominan dalam gambar. Misalnya, jika terdapat puncak pada nilai warna tertentu dalam histogram, ini menunjukkan bahwa warna tersebut muncul secara signifikan lebih banyak daripada warna lain dalam gambar [23], [24].

Histogram juga dapat digunakan untuk melakukan operasi pengolahan citra seperti peningkatan kontras, perataan histogram, atau segmentasi warna. Dengan memahami distribusi warna dalam gambar, Anda dapat mengambil keputusan tentang bagaimana memanipulasi atau menganalisis gambar tersebut. Histogram memberikan pemahaman yang lebih baik tentang komposisi warna dalam gambar atau objek, sehingga dapat membantu dalam analisis dan pemrosesan selanjutnya [25].

Pengamatan pola retak merupakan langkah penting dalam pengujian kekuatan bahan, terutama dalam analisis kegagalan dan peningkatan desain. Pengamatan pola retak dapat memberikan wawasan yang berharga tentang alasan terjadinya kegagalan. Pola retak yang terbentuk pada bahan dapat memberikan petunjuk tentang jenis kegagalan yang terjadi, seperti

kegagalan tarik, kegagalan lentur, atau kegagalan leleh [26]. Dengan memahami penyebab dan karakteristik pola retak, insinyur dapat mengidentifikasi masalah potensial dalam desain atau manufaktur dan mengambil langkah-langkah yang diperlukan untuk mencegah kegagalan di masa depan. Selain itu, pola retak yang terbentuk pada bahan dapat memberikan indikasi tentang kualitas dan kekuatan bahan tersebut. Dengan mempelajari pola retak pada sampel uji, insinyur dapat menilai apakah bahan memenuhi standar kekuatan dan keuletan yang diharapkan. Jika pola retak tidak memenuhi kriteria yang ditetapkan, itu bisa menjadi petunjuk bahwa bahan tersebut tidak memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Lebih lanjut, pengamatan pola retak dapat membantu dalam perbaikan desain. Dengan memahami bagaimana dan di mana retakan terjadi, insinyur dapat memodifikasi desain untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahan bahan. Informasi dari pengamatan pola retak juga dapat digunakan untuk memperbaiki proses manufaktur atau pemilihan bahan yang lebih baik. Akhirnya, pola retak pada bahan juga dapat memberikan informasi tentang umur pakai atau masa pakai yang diharapkan. Dengan menganalisis dan memahami karakteristik pola retak pada bahan yang telah terkena beban atau stres, insinyur dapat membuat perkiraan tentang berapa lama bahan tersebut akan bertahan dalam kondisi operasional yang serupa [27].

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah lapisan komposit laminat serat e-glass (KLG) terhadap persentase pola rusak (PPR) pada permukaan spesimen beton kolom silinder (BKS). Menginvestigasi hubungan antara kekuatan tarik belah (KTB) dan persentase pola retak (PPR) pada pengujian tarik belah untuk masing-masing variasi KLG. Menyelidiki trade-off antara peningkatan kekuatan tarik belah dan peningkatan pola retak pada variasi jumlah lapisan KLG dalam pengujian tarik belah.

2. METODE

Dalam penelitian ini, sampel BKS diproduksi sesuai dengan standar ASTM C496. Massa sampel diukur menggunakan timbangan digital tipe SF-400 dengan kapasitas maksimum 10 kg dan ketelitian 1 g. Pengujian kekuatan tarik dilakukan menggunakan alat uji UTM (Universal Testing Machine) tipe Hydraulic UTM model WEW-300D dengan kapasitas 300 kN (Gambar 2). Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah kain anyaman e-glass (Gambar 3) yang berfungsi sebagai penguat struktur BKS, dengan menggunakan metode Vacuum Bagging untuk proses pencetakan. Resin epoksi yang digunakan adalah jenis Bisphenol A-Epichlorohydrin berserta

pengerasnya. Semen yang digunakan adalah semen Portland Komposit sesuai dengan standar SNI 7064 tahun 2014. Komposisi agregat beton terdiri dari semen, pasir, kerikil, dan air yang telah direndam dalam air bersih selama 28 hari, kemudian dikeringkan di udara terbuka selama 28 hari sesuai standar ACI 308R-2016.



Gambar 2. Mesin uji tarik belah



Gambar 3. Serat kaca e-glass anyaman

Prosedur pelapisan KLG dalam penelitian ini diimplementasikan dengan langkah-langkah berikut ini: (1) Permukaan spesimen dibersihkan menggunakan kertas pasir (amplas) dan kain lap, (2) Resin epoksi dicampur dengan hardener dalam perbandingan komposisi 1:1 (campuran ini disebut sebagai C1), (3) Spesimen dilapisi secara keseluruhan dengan C1, (4) Kain e-glass ditempelkan secara merata pada permukaan spesimen hingga tertutup sepenuhnya, (5) C1 dioleskan kembali secara merata pada permukaan kain e-glass, (6) Pompa vakum dan wadah vakum disiapkan, (7) Bagian dalam wadah vakum dilumasi dengan minyak pelumas untuk memfasilitasi pemisahan spesimen dan wadah saat proses pembongkaran, (8) Spesimen yang telah dilapisi kain e-glass ditempatkan ke dalam wadah vakum, (9) Wadah vakum ditutup rapat menggunakan isolasi untuk menciptakan kondisi hampa udara, (10) Pompa vakum diaktifkan untuk

menghilangkan udara dari wadah vakum, dan (11) Setelah wadah vakum mencapai kondisi hampa udara yang ditunjukkan oleh tekanan nol pada manometer pompa, wadah vakum diikat rapat dan pompa vakum dilepas. Dalam penelitian ini, dilakukan variasi jumlah lapisan kain jute e-glass pada pelapisan, yaitu 1, 2, 3, dan 4. Sebagai pembandingan, juga disiapkan 3 spesimen BKS tanpa pelapisan kain e-glass.

Prosedur analisa pola kerusakan dengan menggunakan software adobe photoshop dimulai dengan membuka tampilan software adobe photoshop dan membuka gambar yang akan di analisa pola keretakannya di softwere adobe photoshop. Sealnjutnya, memotong (*crop*) gambar yang akan di analisa pola keretakannya. Klik image size pada menubar photoshop dan tentukan size agar resolusi gambar bagus. Buat layer baru dan klik eyedropter tool untuk meyesuaikan warna. Klik pen tool dan Ikuti alur pola yang akan di analisa. Klik fill path untuk menampilkan warna pola kerusakan. Simpan gambar yang sudah di analisa/gambar ilustrasi. Selanjutnya, pilih warna pola kerusakan pada fitur colour range. Pilih menu edit kemudian histogram untuk menampilkan data pixels dari pola kerusakan tersebut. Data yang didapat kemudian diolah di pernagkat lunak Microsoft Excel untuk mendapatkan persentase pola kerusakannya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan pengujian tarik belah terhadap spesimen BKS yang dilapisi KLG, diperoleh pola kerusakan pada permukaan BKS pada variasi jumlah lapisan e-glass epoxy sebanyak 1, 2, 3, dan 4 lapis (G1, G2, G3, dan G4), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



(a)



(b)



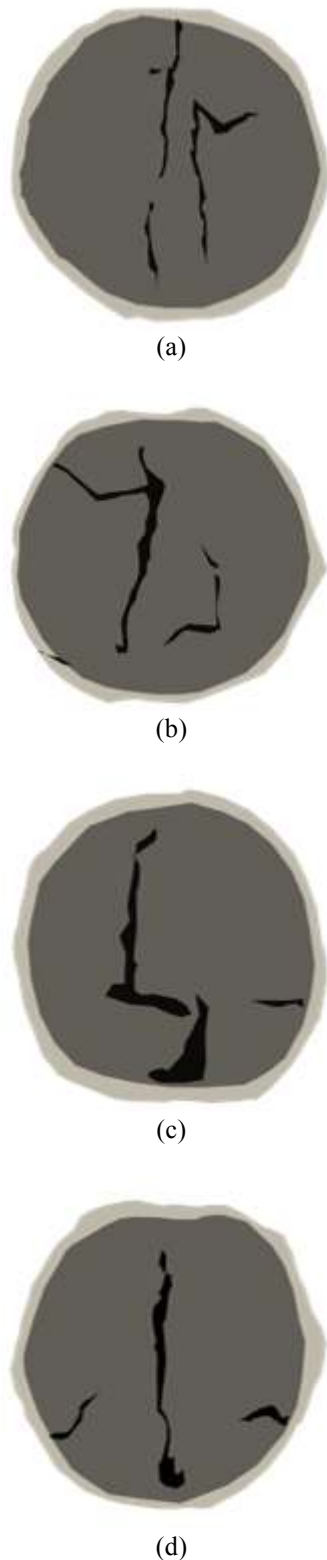
(c)



(d)

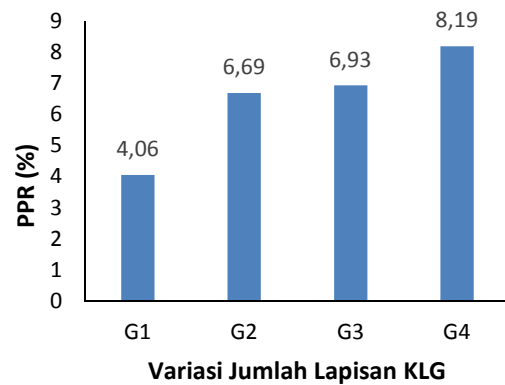
Gambar 4. Pola retak spesimen: (a) G1, (b) G2, (c) G3, dan (d) G4

Selanjutnya, foto pola retak tersebut digambarkan kembali dengan menggunakan bantuan software Adobe Photoshop. Warna yang lebih muda menunjukkan permukaan spesimen yang tidak mengalami kerusakan, sedangkan warna hitam menunjukkan permukaan spesimen yang mengalami kerusakan. Hasilnya diperlihatkan pada gambar 5.

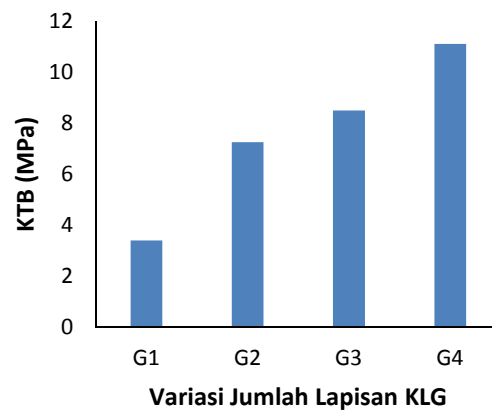


Gambar 5. Sketsa pola retak permukaan spesimen: (a) G1, (b) G2, (c) G3, dan (d) G4

Hasil perhitungan metode Histogram dengan bantuan perangkat lunak Adobe Photoshop terhadap persentase luas kerusakan pada permukaan spesimen atau persentase pola rusak (PPR) diperlihatkan pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil perhitungan PPR permukaan spesimen pada masing-masing variasi



Gambar 7. Grafik KTB spesimen KLG pada masing-masing variasi

Berdasarkan gambar 6, diperoleh data-data hasil perhitungan persentase pola rusak (PPR) rata-rata pada permukaan spesimen beton kolom silinder (BKS) untuk masing-masing variasi KLG. Pada variasi KLG 1 lapis, persentase pola rusak rata-rata pada permukaan spesimen BKS adalah sebesar 4,06%. Pada variasi KLG 2 lapis, persentase pola rusak rata-rata meningkat menjadi 6,69%. Variasi KLG 3 lapis menunjukkan persentase pola rusak rata-rata sebesar 6,93%. Namun, pada variasi KLG 4 lapis, terjadi peningkatan yang signifikan dalam persentase pola rusak rata-rata mencapai 8,19%.

Kekuatan tarik belah (KTB) rata-rata spesimen KLG pada masing-masing variasi diperlihatkan pada gambar 7. Berdasarkan grafik KTB dan dihubungkan dengan dengan grafik PPR, terdapat hubungan antara KTB dan PPR pada pengujian tarik belah untuk masing-masing variasi KLG. Dari data-data tersebut, terlihat bahwa KTB meningkat seiring dengan peningkatan jumlah lapisan KLG. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak lapisan KLG yang diterapkan, kekuatan tarik belah pada spesimen meningkat. Namun, PPR

juga mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan jumlah lapisan KLG, menunjukkan adanya pembentukan retakan yang lebih signifikan. Oleh karena itu, terdapat trade-off antara peningkatan kekuatan tarik belah dan peningkatan pola retak pada variasi jumlah lapisan KLG dalam pengujian tarik belah tersebut. Artinya, semakin banyak lapisan KLG yang diterapkan, KTB semakin tinggi. Namun, seiring dengan peningkatan jumlah lapisan KLG, persentase pola retak (PPR) juga meningkat. Ini menunjukkan bahwa retakan pada spesimen menjadi lebih signifikan dengan peningkatan jumlah lapisan KLG. Dengan demikian, ada trade-off antara kekuatan tarik belah dan persentase pola retak. Jika fokus utama adalah meningkatkan kekuatan tarik belah, maka peningkatan jumlah lapisan KLG akan diinginkan, tetapi dengan konsekuensi persentase pola retak yang lebih tinggi. Sebaliknya, jika penekanan diberikan pada mengurangi persentase pola retak, maka jumlah lapisan KLG harus diperhatikan dengan hati-hati agar tidak menyebabkan penurunan signifikan dalam kekuatan tarik belah.

4. KESIMPULAN

Jumlah lapisan komposit laminat serat e-glass (KLG) memiliki pengaruh signifikan terhadap persentase pola rusak (PPR) pada permukaan spesimen BKS. Semakin banyak lapisan KLG yang diterapkan, PPR cenderung meningkat. Terdapat hubungan positif antara kekuatan tarik belah (KTB) dan jumlah lapisan KLG. Semakin banyak lapisan KLG yang diterapkan, KTB spesimen BKS meningkat. Namun, peningkatan jumlah lapisan KLG juga menyebabkan peningkatan PPR. Hal ini menunjukkan adanya trade-off antara peningkatan kekuatan tarik belah dan peningkatan pola retak. Peningkatan kekuatan tarik belah dapat dicapai dengan peningkatan jumlah lapisan KLG, tetapi akan disertai dengan peningkatan pola retak pada spesimen. Kesimpulan ini mengindikasikan bahwa dalam memilih variasi jumlah lapisan KLG dalam desain atau aplikasi, perlu dipertimbangkan secara holistik antara peningkatan kekuatan tarik belah dan tingkat kerusakan yang dapat diterima dalam bentuk pola retak.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih kepada *Excellent Centre of Innovations and New Science* dan Laboratorium Teknik Mesin, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area yang telah mendukung dan memfasilitasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Arian, S. Permana, and R. Roestaman, "Pengaruh Penggunaan Agregat Kasar

- Kerikil Alami Terhadap Mutu Beton," *J. Konstr.*, vol. 19, no. 1, pp. 52–59, 2021.
- [2] M. F. Khonado, H. Manalip, and S. E. Wallah, "Kuat Tekan dan Permeabilitas Beton Porous dengan Variasi Ukuran Agregat," *J. Sipil Statik*, vol. 7, no. 3, pp. 351–358, 2019.
- [3] M. Setyowati, "Perkembangan Penggunaan Beton Bertulang di Indonesia Pada Masa Kolonial (1901-1942)," *Berk. Arkeol.*, vol. 39, no. 2, pp. 201–220, 2019.
- [4] H. Handoyo, M. O. Kurniawan, and P. Nugraha, "Survey Perkembangan Penggunaan Beton Precast di Surabaya dan Sekitarnya," *Dimens. Pratama Tek. Sipil*, vol. 9, no. 2, pp. 108–115, 2020.
- [5] F. C. Nugrahini and T. A. Permana, "Building Information Modelling (BIM) dalam Tahapan Desain dan Konstruksi di Indonesia, Peluang Dan Tantangan (Studi Kasus Perluasan T1 Bandara Juanda Surabaya)," *AGREGAT*, vol. 5, no. 2, pp. 459–467, 2020.
- [6] N. Hidayat, A. J. Zulfikar, and I. Iswandi, "Analisis Metode Split Tensile Test Komposit Laminat Jute Terhadap Kekuatan Tarik Belah Beton Kolom Silinder," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 2, pp. 18–26, 2022.
- [7] S. Gistyantoro, V. A. Noorhidana, T. Junaedi, and S. Sebayang, "Pengaruh Penambahan Admixture Naptha E121 Terhadap Perkembangan Kekuatan Beton Rigid Pavement," in *SINTA (Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri)*, 2022, pp. 1–6.
- [8] Y. Trianah and S. Sani, "Pengaruh Penambahan Serabut (Fiber) Kelapa Sawit Terhadap Porositas Beton," *J. Deform.*, vol. 7, no. 1, pp. 92–101, 2022.
- [9] A. J. Zulfikar, "The Flexural Strength of Artificial Laminate Composite Boards made from Banana Stems," *Budapest Int. Res. Exact Sci. J.*, vol. 2, no. 3, pp. 334–340, 2020.
- [10] D. Alamsyah, A. J. Zulfikar, M. Yusuf, and R. Siahaan, "Optimasi kekuatan tekan beton kolom silinder diperkuat selubung komposit laminat jute dengan metode anova," *Jcebt*, vol. 6, no. 1, pp. 30–36, 2022, [Online]. Available: <http://ojs.uma.ac.id/index.php/jcebt>
- [11] D. A. Siregar and A. J. Zulfikar, "Analisis Kekuatan Tekan Selubung Komposit Laminat E-glass pada Beton Kolom Silinder dengan Metode Vacuum Bagging," *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 5, no. 1, pp. 20–25, 2022.
- [12] M. Y. Yuhazri, A. J. Zulfikar, and A. Ginting, "Fiber Reinforced Polymer

- Composite as a Strengthening of Concrete Structures: A Review,” in *Materials Science and Engineering*, Medan: IOP Conference Series, 2020, p. 13. doi: 10.1088/1757-899X/1003/1/012135.
- [13] M. Amirhafizan, M. Yuhazri, H. Umarfaruq, S. Lau, A. Kamarul, and A. Zulfikar, “Laminated Jute and Glass Fibre Reinforced Composite for Repairing Concrete Through Wrapping Technique,” *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–8, 2023.
- [14] A. J. Zulfikar, D. A. A. Ritonga, S. Pranoto, F. A. K. Nasution, Z. Arif, and J. Junaidi, “Analisis Kekuatan Mekanik Komposit Polimer Diperkuat Serbuk Kulit Kerang,” *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 6, no. 1, pp. 30–40, 2023.
- [15] A. J. Zulfikar, M. Y. R. Siahaan, and R. B. Syahputra, “Analisis Signifikansi Roda Skateboard Berbahan Komposit Serbuk Batang Pisang Terhadap Perfoma Kecepatan Dengan Metode Anova,” *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 4, no. 2, pp. 83–90, 2021.
- [16] A. J. Zulfikar and I. Iswandi, “Analisis Kekuatan Tarik Belah Komposit Laminat Jute sebagai Penguat Beton Kolom Silinder Berdasarkan Metode Penyerapan Energi Bahan,” *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 2, pp. 55–64, 2022.
- [17] M. A. Rasyid, A. J. Zulfikar, and I. Iswandi, “Analisis Kekuatan Tarik Komposit Laminat Jute Berdasarkan Pola Kerusakan Kolom Silinder Metode Split Tensile Test Analysis,” *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 2, pp. 27–34, 2022.
- [18] R. A. Purba, A. J. Zulfikar, and I. Iswandi, “Analisis Kekuatan Komposit Laminat Hybrid Jute E-Glass Berdasarkan Pola Kerusakan dengan Metode Split Tensile Test,” *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 3, pp. 83–91, 2022.
- [19] D. Wang *et al.*, “Tuning layer thickness and layer arrangement in a GdMnO₃ and GdMnO₃-MoSe₂ bi-layer absorber to cover the S, C, and X band frequency range,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 36, no. 1, p. 102507, 2023.
- [20] S. U. Dewi and F. Prasetyo, “Analisa Penambahan Bottom Ash terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton,” *J. Infrastructural Civ. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 31–45, 2021.
- [21] R. Armidion and T. Rahayu, “Peningkatan nilai kuat tarik belah beton dengan campuran limbah botol plastik polyethylene terephthalate (pet),” *J. Konstr.*, vol. 10, no. 1, pp. 117–126, 2018.
- [22] G. Winarno, M. Irsal, C. A. Karenina, G. Sari, and R. N. Hidayati, “Metode Histogram Equalization untuk Peningkatan Kualitas Citra dengan Menggunakan Studi Phantom Lumbosacral,” *J. Kesehatan. Vokasional*, vol. 7, no. 2, pp. 104–110, 2022.
- [23] M. Sipan and R. K. Pramuyanti, “Analisa Citra Berbasis Fitur Warna Tekstur dan Histogram untuk Menentukan Kemiripan Citra,” *Elektrika*, vol. 11, no. 1, pp. 45–56, 2019.
- [24] D. Derlini and A. J. Zulfikar, “Penyelidikan Kegagalan pada Alat Pemisah Karet Alam Jenis LRH 410,” *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 3, pp. 51–61, 2022.
- [25] S. Ratna, “Pengolahan Citra Digital dan Histogram Dengan Phytton dan Text Editor Phycharm,” *Technologia*, vol. 11, no. 3, pp. 22–31, 2020.
- [26] N. Rasidi, “Perbandingan Pola Retak dan Lendutan pada Pelat Beton Menggunakan Tulangan Konvensional dan Wiremesh,” *J. Tek. Ilmu dan Apl.*, vol. 1, no. 2, pp. 33–43, 2020.
- [27] A. Amir, A. Rahman, Y. Rahmi, D. Purnamasari, and Veranita, “Pola Kegagalan Balok Beton Bertulang Spiral Tanpa Beton Pada Penampang Tarik,” *J. Tek. Sipil dan Teknol. Konstr.*, vol. 9, no. 1, pp. 55–64, 2023.