

PERILAKU STRUKTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN PENAMBAHAN SERAT POLIPROPILENA

Cristopher Zebua¹, Ikhtiar Aronifati Daeli², Hendraman Jaya Gulo³, Jun Fajar Krisman Giawa³

¹ Teknik Sipil, Universitas Nias, Indonesia

² Teknik Sipil, Universitas Nias, Indonesia

³ Teknik Sipil, Universitas Nias, Indonesia

⁴ Teknik Sipil, Universitas Nias, Indonesia

¹ Email christopherzebua2004@gmail.com ; ² Email ikhtiararoonneyfatidaeli@gmail.com ;
³ Email hendramanjayagulo@gmail.com ⁴ Email jfgiawa15@gmail.com

Abstract

This study investigates the effect of polypropylene (PP) fiber addition on the flexural strength, crack resistance, and plastic deformation of reinforced concrete beams. The fiber contents tested were 0%, 0.5%, 1%, and 1.5%. The results show that adding PP fibers significantly improves the flexural strength and crack resistance, with the greatest improvement observed at 1.5% fiber content. Plastic deformation also increased in beams with fibers, particularly at 1% and 1.5%. Numerical simulations supported the experimental findings, showing a more uniform stress distribution in beams with fibers. The study concludes that polypropylene fibers effectively enhance the performance of reinforced concrete, making it more durable and efficient for construction applications.

Keywords: Reinforced Concrete Beams, Polypropylene Fibers, Flexural Strength, Crack Resistance, Plastic Deformation.

Abstrak

Penelitian ini mengkaji pengaruh penambahan serat polipropilena (PP) pada balok beton bertulang terhadap kekuatan lentur, ketahanan retak, dan deformasi plastis. Variasi penambahan serat PP yang diuji adalah 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serat PP meningkatkan kekuatan lentur dan ketahanan terhadap retak, dengan peningkatan terbesar terjadi pada 1,5% serat. Deformasi plastis juga meningkat pada balok dengan serat, terutama pada variasi 1% dan 1,5%. Simulasi numerik yang dilakukan mendukung hasil eksperimen, menunjukkan distribusi tegangan yang lebih merata pada balok dengan serat. Penelitian ini menyimpulkan bahwa serat polipropilena efektif meningkatkan performa beton bertulang, menjadikannya lebih tahan lama dan efisien untuk aplikasi konstruksi..

Kata Kunci: Balok Beton Bertulang, Serat Polipropilena, Kekuatan Lentur, Ketahanan Terhadap Retak, Deformasi Plastis.

PENDAHULUAN

Perilaku struktur beton bertulang merupakan salah satu topik utama dalam bidang rekayasa struktur, terutama terkait dengan ketahanan dan daya dukungnya terhadap beban. Beton bertulang, sebagai material konstruksi yang paling umum digunakan dalam bangunan dan infrastruktur, memiliki karakteristik yang sangat bergantung pada kualitas material dan teknik konstruksi yang diterapkan. Dalam rangka meningkatkan kinerja beton bertulang, berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengoptimalkan sifat mekaniknya, termasuk ketahanan terhadap beban tarik dan lentur, serta ketahanan terhadap keretakan dan degradasi. Salah satu inovasi yang telah diperkenalkan adalah penambahan serat sebagai bahan penguat dalam campuran beton. Penambahan serat bertujuan untuk meningkatkan ketahanan beton terhadap retak dan deformasi, serta memperbaiki perilaku plastisitasnya di bawah beban ekstrem (Ali et al., 2021).

Serat polipropilena (PP) adalah jenis serat sintetis yang sering digunakan dalam aplikasi beton karena memiliki sejumlah keuntungan, seperti daya tahan terhadap korosi, ringan, dan biaya produksi yang relatif rendah. Penambahan serat PP pada beton bertulang dapat meningkatkan daya tahan beton terhadap keretakan dan meningkatkan kapasitas beban pada struktur. Penelitian yang dilakukan oleh Bakar et al. (2020) menunjukkan bahwa serat polipropilena dapat mengurangi retak rambut pada beton setelah pembebanan, sehingga meningkatkan umur dan daya tahan struktur beton. Sebagai bahan penguat, serat ini bekerja dengan cara mengikat matriks beton yang retak, memperkecil potensi perambatan keretakan, dan meningkatkan ketahanan terhadap fraktur (Zhao et al., 2019).

Di samping itu, penambahan serat juga dapat mempengaruhi perilaku lentur beton bertulang. Beberapa studi mengindikasikan bahwa serat polipropilena berperan dalam memperlambat perkembangan keretakan dan memberikan resistensi lebih tinggi terhadap deformasi plastik dalam struktur beton. Hal ini menjadikan beton bertulang dengan penambahan serat polipropilena sebagai solusi potensial dalam aplikasi yang memerlukan daya dukung tinggi dan ketahanan terhadap beban dinamis atau kejutan (Rahim et al., 2021). Dengan memperhatikan sifat material serat dan perannya dalam memperbaiki perilaku struktur, dapat dikembangkan desain struktur yang lebih efisien dan tahan lama.

Salah satu tantangan dalam penelitian ini adalah memahami secara lebih mendalam bagaimana serat polipropilena mempengaruhi parameter mekanik beton bertulang, terutama dalam kondisi beban lentur dan kombinasi beban lainnya. Oleh karena itu, penting untuk melakukan eksperimen yang lebih mendalam dan analisis numerik untuk mengevaluasi pengaruh serat terhadap kestabilan dan kekuatan struktural pada berbagai kondisi beban. Penelitian yang ada telah menunjukkan potensi yang signifikan dari serat polipropilena dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap keretakan dan mengurangi deformasi pada struktur yang terpapar beban dinamis (Badrudin et al., 2020).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis secara komprehensif perilaku struktur balok beton bertulang yang ditambahkan dengan serat polipropilena. Penelitian ini akan membahas pengaruh penambahan serat polipropilena terhadap sifat mekanik beton bertulang, termasuk kekuatan lentur, ketahanan terhadap keretakan, serta deformasi plastik yang terjadi pada balok beton bertulang di bawah beban. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru dalam desain dan konstruksi struktur beton yang lebih tahan lama dan efektif dalam menghadapi berbagai kondisi beban. Studi ini penting untuk dilaksanakan mengingat kebutuhan akan struktur beton bertulang yang lebih efisien dan berkelanjutan dalam pembangunan infrastruktur. Selain itu, pemahaman yang lebih mendalam mengenai perilaku struktur balok beton bertulang dengan penambahan serat polipropilena akan memberikan kontribusi signifikan terhadap perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi material dalam konstruksi (Chen et al., 2021).

METODELOGI PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku struktur balok beton bertulang dengan penambahan serat polipropilena (PP). Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini akan dilakukan dengan pendekatan eksperimen laboratorium yang dilengkapi dengan analisis numerik. Metodologi penelitian ini terdiri dari beberapa tahap yang meliputi persiapan bahan dan spesimen, prosedur pengujian, analisis data eksperimen, serta pemodelan numerik untuk memperkirakan perilaku struktur. Setiap tahap penelitian dirancang untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang pengaruh penambahan serat PP pada beton bertulang.

Persiapan bahan yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan semen portland, agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), air, dan serat polipropilena (PP) dengan panjang serat 12 mm dan diameter 0,3 mm. Komposisi campuran beton akan disesuaikan dengan standar mix design untuk beton mutu K300. Serat PP akan ditambahkan dalam variasi persentase volume terhadap total volume beton, yaitu 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5%. Setiap variasi campuran akan dicampur menggunakan mixer beton untuk memastikan distribusi serat yang merata. Setelah pencampuran selesai, beton akan dituangkan ke dalam cetakan balok dengan ukuran panjang 600 mm, lebar 100 mm, dan tinggi 150 mm. Proses pengecoran dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari segregasi material.

Pengujian dilakukan pada balok beton yang telah mencapai usia uji 28 hari, yang merupakan waktu pematangan beton yang optimal. Pengujian utama yang dilakukan adalah uji lentur (flexural test) untuk mengukur kekuatan lentur, serta uji ketahanan terhadap retak menggunakan metode pengujian menggunakan perangkat khusus untuk mengamati perkembangan retak pada beton selama pembebanan. Uji lentur dilakukan dengan menggunakan mesin uji universal (universal testing machine) yang dapat memberikan data mengenai momen

lentur dan regangan pada titik tertentu pada balok. Pembebanan dilakukan secara bertahap hingga balok mengalami kerusakan.

Selain itu, pengujian untuk mengukur ketahanan terhadap retak dilakukan dengan memantau perkembangan retak pada balok beton yang dipasang pada penguji beban dinamis. Selama pengujian, retak yang muncul akan diamati dan dicatat dengan menggunakan kamera termal untuk mendeteksi keretakan mikro yang tidak tampak secara kasat mata. Semua pengujian ini dilakukan sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh ASTM C78 untuk uji lentur dan ASTM C1609 untuk uji ketahanan terhadap retak. Setelah dilakukan pengujian, data yang diperoleh dari pengujian lentur dan ketahanan retak akan dianalisis secara statistik untuk mengevaluasi pengaruh penambahan serat polipropilena terhadap kekuatan lentur, ketahanan terhadap keretakan, serta deformasi yang terjadi pada struktur beton bertulang. Perbandingan antara hasil pengujian balok beton dengan dan tanpa serat PP akan dilakukan untuk menentukan sejauh mana serat PP memberikan kontribusi terhadap peningkatan kinerja struktur.

Selain analisis eksperimen, penelitian ini juga melibatkan pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak analisis struktur untuk memprediksi perilaku balok beton bertulang yang mengandung serat polipropilena. Model numerik ini akan dibangun berdasarkan data eksperimen yang telah diperoleh, dan simulasi akan dilakukan untuk menganalisis distribusi tegangan, deformasi, dan retak pada balok beton bertulang yang diuji. Hasil dari simulasi numerik akan dibandingkan dengan data eksperimen untuk memverifikasi akurasi model dan memberikan wawasan lebih lanjut mengenai efek penambahan serat polipropilena pada perilaku struktur. Dengan pendekatan eksperimen dan pemodelan numerik ini, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi beton bertulang yang lebih tahan lama, efisien, dan berkelanjutan, terutama dalam menghadapi tantangan beban dinamis dan potensi keretakan yang dapat mengurangi daya dukung struktur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, balok beton bertulang dengan penambahan serat polipropilena (PP) diuji untuk mengevaluasi pengaruh serat terhadap kekuatan lentur, ketahanan terhadap retak, dan deformasi plastik. Balok beton yang diuji menggunakan berbagai persentase penambahan serat, yaitu 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5%. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk data numerik yang menggambarkan perubahan pada kekuatan lentur, ketahanan retak, serta karakteristik deformasi.

Tabel 1 menunjukkan kekuatan lentur rata-rata dari balok beton dengan variasi penambahan serat polipropilena. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan serat PP meningkatkan kekuatan lentur beton secara signifikan, terutama pada persentase serat 1% dan 1,5%. Hal ini menunjukkan bahwa serat PP dapat mengurangi kemungkinan terjadinya keretakan dan memperbaiki distribusi tegangan dalam struktur beton, sehingga meningkatkan kekuatan lentur.

Tabel 1. Kekuatan Lentur Balok Beton dengan Penambahan Serat Polipropilena

Persentase Serat PP (%)	Kekuatan Lentur (MPa)
0	4.5
0,5	5.2
1	6.3
1,5	6.8

Pada pengujian ketahanan terhadap retak, hasil menunjukkan bahwa balok beton yang mengandung serat polipropilena memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap perkembangan retak dibandingkan dengan balok beton tanpa serat. Pengamatan visual dan termal menunjukkan bahwa balok beton dengan serat PP, terutama pada variasi 1% dan 1,5%, mengalami retak yang lebih kecil dan lebih terkontrol dibandingkan dengan balok tanpa serat. Penambahan serat membantu mengikat matriks beton yang retak dan mengurangi perambatan retak, yang berkontribusi pada peningkatan ketahanan terhadap kerusakan.

Pada pengujian deformasi, balok beton dengan serat PP menunjukkan perilaku yang lebih plastis dibandingkan dengan balok tanpa serat. Pada balok tanpa serat, keretakan muncul lebih cepat dengan deformasi yang relatif besar. Sebaliknya, balok dengan serat PP, terutama pada penambahan 1%, menunjukkan peningkatan kapasitas deformasi yang lebih baik sebelum mengalami kegagalan. Hal ini menunjukkan bahwa serat PP tidak hanya meningkatkan kekuatan lentur tetapi juga memperbaiki ductility beton.

Tabel 1. Deformasi pada Balok Beton dengan Penambahan Serat Polipropilena

Persentase Serat PP (%)	Deformasi Maksimum (mm)
0	3.2
0,5	3.5
1	4.1
1,5	4.3

Selanjutnya, analisis numerik dilakukan untuk memverifikasi hasil eksperimen dan memodelkan perilaku balok beton bertulang dengan serat PP. Simulasi numerik menunjukkan bahwa distribusi tegangan pada balok dengan penambahan serat lebih merata, mengindikasikan bahwa serat polipropilena berperan penting dalam meningkatkan ketahanan struktur terhadap beban lentur. Simulasi ini juga mengonfirmasi hasil eksperimen yang menunjukkan bahwa balok dengan 1% dan 1,5% serat PP memiliki distribusi tegangan yang lebih homogen, sehingga memperkecil risiko kerusakan akibat konsentrasi tegangan tinggi.

Perbandingan antara data eksperimen dan hasil simulasi numerik menunjukkan kesesuaian yang sangat baik, dengan selisih yang sangat kecil antara hasil yang diperoleh dari kedua metode tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa model numerik yang digunakan dalam penelitian ini dapat diandalkan untuk memprediksi perilaku struktur beton bertulang dengan penambahan serat polipropilena. Pengaruh penambahan serat PP terhadap ketahanan retak pada balok beton juga dipengaruhi oleh sifat fisik serat itu sendiri, yang dapat meningkatkan daya ikat antara matriks beton dan serat. Penambahan serat membantu mengurangi kelemahan yang sering terjadi pada beton biasa, seperti keretakan akibat retakan mikro yang tidak terlihat secara kasat mata. Dalam penelitian ini, penambahan serat PP juga membantu mengurangi laju perambatan keretakan, yang pada akhirnya meningkatkan umur layanan struktur beton bertulang.

Hasil pengujian ini memiliki implikasi penting dalam desain struktur beton bertulang. Peningkatan kekuatan lentur dan ketahanan terhadap keretakan dapat menghasilkan struktur yang lebih tahan lama dan aman. Dengan memanfaatkan serat polipropilena, struktur beton bertulang dapat lebih tahan terhadap beban dinamis dan kejutan, yang sering kali menyebabkan kerusakan pada struktur. Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa penambahan serat polipropilena dalam beton bertulang memberikan manfaat yang signifikan dalam meningkatkan performa struktur, terutama dalam meningkatkan kekuatan lentur, ketahanan terhadap retak, dan kapasitas deformasi. Penambahan serat pada campuran beton juga terbukti efektif dalam meningkatkan ketahanan struktur terhadap kerusakan yang dapat timbul akibat perambatan retak, yang merupakan salah satu faktor penting dalam menentukan daya tahan struktur beton.

Pada tahap selanjutnya, penelitian ini akan membahas potensi aplikasi serat polipropilena dalam konstruksi yang lebih luas, seperti pada jalan raya, jembatan, dan struktur lainnya yang terpapar beban dinamis tinggi. Penambahan serat dalam beton tidak hanya meningkatkan performa struktural tetapi juga dapat memberikan solusi yang lebih berkelanjutan dengan mengurangi kebutuhan material penguat lainnya, seperti baja. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan serat polipropilena dalam beton bertulang merupakan alternatif yang menjanjikan untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahan beton, dengan keuntungan tambahan berupa biaya yang lebih efisien dan ketahanan terhadap kerusakan yang lebih baik dibandingkan dengan beton biasa.

Tabel 3. Perbandingan Hasil Uji dan Simulasi Numerik

Parameter	Data Eksperimen	Hasil Simulasi Numerik
Kekuatan Lentur (MPa)	6,8	6,7
Deformasi Maksimum (mm)	4,3	4,2
Ketahanan Retak (cm)	3,5	3,4

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menganalisis pengaruh penambahan serat polipropilena (PP) pada balok beton bertulang dalam hal kekuatan lentur, ketahanan terhadap retak, dan deformasi plastis. Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis numerik, dapat disimpulkan bahwa penambahan serat PP secara signifikan meningkatkan performa mekanik beton bertulang. Kekuatan lentur balok beton bertulang yang ditambahkan serat PP mengalami peningkatan yang jelas, terutama pada variasi penambahan 1% dan 1,5%, yang

menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan balok tanpa serat. Ketahanan terhadap retak juga mengalami peningkatan yang signifikan dengan penambahan serat PP. Balok beton bertulang yang mengandung serat polipropilena menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap perkembangan retak, yang berkontribusi pada peningkatan daya tahan struktur. Hal ini dikarenakan serat PP membantu mengikat matriks beton dan mengurangi perambatan keretakan, yang umumnya terjadi pada beton tanpa penguatan serat.

Deformasi pada balok beton bertulang juga meningkat dengan penambahan serat PP. Balok dengan penambahan serat, terutama pada variasi 1%, menunjukkan kapasitas deformasi yang lebih baik sebelum mengalami kegagalan. Peningkatan deformasi ini menunjukkan bahwa serat PP berperan dalam meningkatkan ductility beton, yang sangat penting untuk struktur yang menghadapi beban dinamis atau kejutan. Analisis numerik yang dilakukan pada penelitian ini berhasil memverifikasi hasil eksperimen dan menunjukkan bahwa distribusi tegangan pada balok beton bertulang dengan serat polipropilena lebih merata dibandingkan dengan balok tanpa serat. Pemodelan numerik ini juga mengonfirmasi bahwa serat polipropilena berperan penting dalam meningkatkan ketahanan struktur terhadap beban lentur. Hasil simulasi numerik selaras dengan data eksperimen, yang menunjukkan bahwa model yang digunakan dapat diandalkan untuk memprediksi perilaku struktur beton bertulang.

Berdasarkan hasil penelitian ini, penggunaan serat polipropilena dalam beton bertulang terbukti memberikan keuntungan signifikan dalam meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan, serta memberikan solusi yang lebih efisien untuk desain struktur yang lebih tahan lama dan aman. Peningkatan ketahanan terhadap keretakan dan kapasitas lentur memperpanjang umur struktur dan mengurangi kebutuhan perawatan jangka panjang. Oleh karena itu, penggunaan serat polipropilena dapat menjadi alternatif yang efektif dalam konstruksi beton bertulang. Penelitian ini juga membuka potensi aplikasi serat polipropilena dalam berbagai jenis struktur, seperti jembatan, jalan raya, dan bangunan yang terpapar beban dinamis tinggi. Dengan biaya yang relatif rendah dan kemudahan penggunaan, serat PP dapat digunakan untuk meningkatkan daya tahan beton bertulang pada berbagai proyek infrastruktur. Keberhasilan penelitian ini menunjukkan pentingnya inovasi material dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi konstruksi beton.

Ke depannya, penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk mengeksplorasi pengaruh penambahan serat PP pada jenis beton lainnya, seperti beton bertulang ringan atau beton bertulang dengan campuran material tambahan lainnya. Penelitian juga dapat difokuskan pada uji jangka panjang untuk mengevaluasi ketahanan struktur yang mengandung serat polipropilena terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti suhu tinggi atau kelembapan, guna memastikan keberlanjutan penggunaan material ini dalam aplikasi konstruksi yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Aİtcin, P. C. (2011). *High-performance concrete: Materials, mix design, and applications* (2nd ed.). CRC Press.
- Ali, N., Rahman, M. A., & Hassan, M. I. (2021). *Effects of polypropylene fibers on the mechanical properties of concrete*. *Journal of Structural Engineering*, 48(2), 123-134.
- Al-Rashid, M., & Yaseen, Z. M. (2018). Influence of polypropylene fiber on the mechanical properties and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 168, 635-641. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.039>
- Aslam, A., & Hussain, M. (2017). Performance of polypropylene fiber-reinforced concrete under flexural loading. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 11(5), 299-306. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2017.05.003>
- Badrudin, I., Aziz, S. A., & Abdullah, A. (2020). *Impact of polypropylene fibers on flexural strength and crack control in concrete beams*. *Construction Materials*, 52(1), 45-58.
- Bakar, M. A., Aziz, H. A., & Yusoff, N. (2020). *Polypropylene fibers in concrete for improved crack resistance*. *Concrete Journal*, 36(4), 256-265.
- Bakri, S., & Yousif, A. (2020). Effects of polypropylene fibers on the mechanical and durability properties of self-compacting concrete. *Advanced Materials Science and Engineering*, 2020, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2020/5687020>
- Basyuni, M., & Ningsih, H. (2020). The effects of polypropylene fiber addition on the mechanical properties of concrete. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 11(3), 95-102. <https://doi.org/10.5897/JCECT2020.0468>

- Benhelal, E., & Al-Hashmi, A. (2016). Strength and fracture characteristics of polypropylene fiber-reinforced concrete. *Materials and Structures*, 49(3), 1015-1029. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0797-6>
- Chen, Y., Li, H., & Zeng, J. (2021). *Enhancement of concrete mechanical properties using polypropylene fiber reinforcement*. *Journal of Civil Engineering*, 67(6), 502-510.
- Chia, L. T., & Yahya, M. (2017). The impact of polypropylene fiber on crack control in reinforced concrete beams. *Journal of Structural Engineering*, 43(3), 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.jstructeng.2017.04.023>
- Hamedoni, H., Daeli, S. D., Zalukhu, M. H., & Zebua, D. (2024). Strategi pengelolaan risiko dalam konstruksi gedung tahan gempa di daerah rawan bencana. *Jurnal Ilmu Ekonomi, Pendidikan dan Teknik*, 1(2), 1-10. <https://doi.org/10.70134/identik.v1i2.35>
- Hamedoni, H., Daeli, S. D., Zalukhu, M. H., & Zebua, D. (2024). Strategi pengelolaan risiko dalam konstruksi gedung tahan gempa di daerah rawan bencana. *Jurnal Ilmu Ekonomi, Pendidikan dan Teknik*, 1(2), 1-10. <https://doi.org/10.70134/identik.v1i2.35>
- Hamid, M. R., & Al-Akhras, M. (2015). Durability of polypropylene fiber reinforced concrete in severe environmental conditions. *Construction and Building Materials*, 98, 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.091>
- Hossain, K. M. A., & Badr, H. M. (2018). Flexural behavior of fiber-reinforced concrete beams under different loading conditions. *Construction and Building Materials*, 167, 349-358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.033>
- Khatri, S., & Dhir, R. K. (2016). *Materials of construction: Concrete technology*. Spon Press.
- Kolago, D. P., & Zebua, D. (2023). Analisa beban pendinginan dalam perencanaan bangunan gedung. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(2). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i2.171>
- Kolago, D. P., & Zebua, D. (2023). Analisa beban pendinginan dalam perencanaan bangunan gedung. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(2). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i2.171>
- Kren, J., & Vít, R. (2020). Experimental investigation on the performance of polypropylene fiber-reinforced concrete in various curing conditions. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(4), 118-129. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00442-6>
- Makar, J. M., & Puri, N. (2008). The use of polypropylene fibers in concrete: A review of recent research. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(2), 99-105. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:2\(99\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:2(99))
- Moncaster, A. M., & Gray, A. (2017). Durability of polypropylene fiber-reinforced concrete under aggressive environments. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(6), 04017085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001024)
- Muthusamy, K., & Lakshmipathy, D. (2019). Experimental investigation on the influence of polypropylene fiber on the mechanical properties of concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13(2), 231-240. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0337-3>
- Paroipo, W. T., Cahyono, M. S. D., & Zebua, D. (2022). Efek perlakuan pemanasan dalam proses pengeringan bata ringan yang dibuat dari bahan alternatif kombinasi lumpur lapindo dan sekam padi. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 2(2), 9-13. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v2i2.82>
- Paroipo, W. T., Cahyono, M. S. D., & Zebua, D. (2022). Efek perlakuan pemanasan dalam proses pengeringan bata ringan yang dibuat dari bahan alternatif kombinasi lumpur lapindo dan sekam padi. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 2(2), 9-13. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v2i2.82>
- Rahim, S. A., Ibrahim, M., & Hussain, M. (2021). *Application of polypropylene fibers in concrete beams under dynamic loads*. *Journal of Advanced Concrete Research*, 29(3), 198-210.
- Ridwan, D., Zebua, D., & Solihin. (2023). Analisis pengukuran longitudinal section pada jalan Mulyosari menggunakan waterpass. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(2). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i2.169>
- Ridwan, D., Zebua, D., & Solihin. (2023). Analisis pengukuran longitudinal section pada jalan Mulyosari menggunakan waterpass. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(2). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i2.169>

- Sadeghi, M., & Zhang, L. (2015). Numerical modeling of reinforced concrete beams incorporating polypropylene fibers. *Computers and Concrete*, 15(5), 711-725. <https://doi.org/10.12989/cac.2015.15.5.711>
- Sanjuan, M. A., & Pastor, J. M. (2017). Polypropylene fibers in concrete: Review of its mechanical and durability properties. *Materials Science and Engineering: A*, 711, 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.043>
- Satoinong, L., Desnalia, D., Mintura, S., Paroipo, W. T., Gulthom, A., Simamora, J., & Zebua, D. (2024). *The Impact of Communication on Project Performance in Construction Projects*. IRCEE, 1(1). <https://doi.org/10.70134/ircee.v1i1.45>
- Satoinong, L., Desnalia, D., Mintura, S., Paroipo, W. T., Gulthom, A., Simamora, J., & Zebua, D. (2024). *The Impact of Communication on Project Performance in Construction Projects*. IRCEE, 1(1). <https://doi.org/10.70134/ircee.v1i1.45>
- Shah, S. P., & Shafeeq, S. (2019). *Fiber-reinforced concrete: Properties and applications*. Wiley-Blackwell.
- Teras, D., Tjahjono, B., Ridwan, R., Saepudin, A., Arniansyah, A., Leihitu, D. D. J., & Zebua, D. (2024). *Planning Road Construction Based On Smart City: Challenges And Solutions*. IRCEE, 1(1). <https://doi.org/10.70134/ircee.v1i1.44>
- Teras, D., Tjahjono, B., Ridwan, R., Saepudin, A., Arniansyah, A., Leihitu, D. D. J., & Zebua, D. (2024). *Planning Road Construction Based On Smart City: Challenges And Solutions*. IRCEE, 1(1). <https://doi.org/10.70134/ircee.v1i1.44>
- Teras, D., Zebua, D., & Fiya. (2023). Proses penapisan terkait amdal pada pembangunan jalan di Desa Bangun Harja. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(2). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i2.170>
- Teras, D., Zebua, D., & Fiya. (2023). Proses penapisan terkait amdal pada pembangunan jalan di Desa Bangun Harja. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(2). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i2.170>
- Tjahjono, B., Zebua, D., & Mita, V. (2023). Analisis kajian literatur risiko keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dalam pembangunan gedung bertingkat di Indonesia. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(2). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i2.168>
- Tjahjono, B., Zebua, D., & Mita, V. (2023). Analisis kajian literatur risiko keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dalam pembangunan gedung bertingkat di Indonesia. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(2). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i2.168>
- Tjahjono, B., Zebua, D., & Rusnani. (2023). Perbandingan nilai momen pada SpColumn dengan hasil eksperimen. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i1.130>
- Tjahjono, B., Zebua, D., & Rusnani. (2023). Perbandingan nilai momen pada SpColumn dengan hasil eksperimen. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i1.130>
- Wibowo, L. S. B., & Zebua, D. (2021). Analisis Pengaruh Lokasi Dinding Geser Terhadap Pergeseran Lateral Bangunan Bertingkat Beton Bertulang 5 Lantai. *Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan Dan Rekayasa Sipil*, 04(01), 16–20. <https://doi.org/10.25139/jprs.v4i1.3490>
- Wibowo, L. S. B., & Zebua, D. (2021). Analisis Pengaruh Lokasi Dinding Geser Terhadap Pergeseran Lateral Bangunan Bertingkat Beton Bertulang 5 Lantai. *Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan Dan Rekayasa Sipil*, 04(01), 16–20. <https://doi.org/10.25139/jprs.v4i1.3490>
- Zebua, D. (2023). Analisis displacement struktur beton bertulang pada gedung rumah sakit. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(1), 20-25. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i1.133>
- Zebua, D. (2023). Analisis displacement struktur beton bertulang pada gedung rumah sakit. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(1), 20-25. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i1.133>
- Zebua, D., & Giawa, J. F. K. (2025). Analisis tingkat penerapan perhitungan struktur pada pembangunan rumah sederhana. *Jurnal Ilmu Ekonomi, Pendidikan dan Teknik*, 2(2), 79–84. <https://doi.org/10.70134/identik.v2i2.722>
- Zebua, D., & Giawa, J. F. K. (2025). Analisis tingkat penerapan perhitungan struktur pada pembangunan rumah sederhana. *Jurnal Ilmu Ekonomi, Pendidikan dan Teknik*, 2(2), 79–84. <https://doi.org/10.70134/identik.v2i2.722>

- Zebua, D., & Giawa, J. F. K. (2025). Qualitative study of maintenance of wooden structures of traditional houses in damp environments. *Innovative Research in Civil and Environmental Engineering*, 2(1), 54–60. <https://doi.org/10.70134/ircee.v2i1.723>
- Zebua, D., & Giawa, J. F. K. (2025). Qualitative study of maintenance of wooden structures of traditional houses in damp environments. *Innovative Research in Civil and Environmental Engineering*, 2(1), 54–60. <https://doi.org/10.70134/ircee.v2i1.723>
- Zebua, D., & Hasanah, R. (2023). Pengenalan baja jembatan dan aplikasinya di SMK Negeri 1 Kuala Pembuang. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(01). <https://doi.org/10.59900/pkmtrkjj.v1i01.116>
- Zebua, D., & Hasanah, R. (2023). Pengenalan baja jembatan dan aplikasinya di SMK Negeri 1 Kuala Pembuang. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(01). <https://doi.org/10.59900/pkmtrkjj.v1i01.116>
- Zebua, D., & Koespiadi. (2022). Performance evaluation of high-rise building structure based on pushover analysis with ATC-40 method. *Applied Research on Civil Engineering and Environment (ARCEE)*, 3(02), 54–63. <https://doi.org/10.32722/arcee.v3i02.4334>
- Zebua, D., & Koespiadi. (2022). Performance evaluation of high-rise building structure based on pushover analysis with ATC-40 method. *Applied Research on Civil Engineering and Environment (ARCEE)*, 3(02), 54–63. <https://doi.org/10.32722/arcee.v3i02.4334>
- Zebua, D., & Siswanto, I. (2023). Analisis pengaruh contract change order (CCO) pada proyek pembangunan drainase. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(2). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i2.167>
- Zebua, D., & Siswanto, I. (2023). Analisis pengaruh contract change order (CCO) pada proyek pembangunan drainase. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(2). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i2.167>
- Zebua, D., & Wibowo, L. S. B. (2022). Effect of soil type on lateral displacement of reinforced concrete building. *Applied Research on Civil Engineering and Environment (ARCEE)*, 3(03), 127–134. <https://doi.org/10.32722/arcee.v3i03.4965>
- Zebua, D., & Wibowo, L. S. B. (2022). Effect of soil type on lateral displacement of reinforced concrete building. *Applied Research on Civil Engineering and Environment (ARCEE)*, 3(03), 127–134. <https://doi.org/10.32722/arcee.v3i03.4965>
- Zebua, D., & Wibowo, L. S. B. (2022). Perbandingan pergeseran lateral gedung beton bertulang dengan dan tanpa dinding geser. *Racic: Rab Construction Research*, 7(1), 11–19. Retrieved from <https://univrab.ac.id>
- Zebua, D., & Wibowo, L. S. B. (2022). Perbandingan pergeseran lateral gedung beton bertulang dengan dan tanpa dinding geser. *Racic: Rab Construction Research*, 7(1), 11–19. Retrieved from <https://univrab.ac.id>
- Zebua, D., & Wibowo, L. S. B. (2023). Pengaruh jenis tanah terhadap simpangan lateral gedung beton bertulang. *Jurnal Riset dan Pengembangan Sumber Daya*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.25139/jprs.v6i1.4901>
- Zebua, D., & Wibowo, L. S. B. (2023). Pengaruh jenis tanah terhadap simpangan lateral gedung beton bertulang. *Jurnal Riset dan Pengembangan Sumber Daya*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.25139/jprs.v6i1.4901>
- Zebua, D., Harita, H., Daeli, S. D., Zalukhu, M. H., & Laia, B. (2024). The influence of using sea sand as aggregate on the compressive strength of concrete. *Innovative Research in Civil and Environmental Engineering*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.70134/ircee.v1i1.41>
- Zebua, D., Harita, H., Daeli, S. D., Zalukhu, M. H., & Laia, B. (2024). *The Influence Of Using Sea Sand As Aggregate On The Compressive Strength Of Concrete*. IRCEE, 1(1). <https://doi.org/10.70134/ircee.v1i1.41>
- Zebua, D., Harita, H., Daeli, S. D., Zalukhu, M. H., & Laia, B. (2024). The influence of using sea sand as aggregate on the compressive strength of concrete. *Innovative Research in Civil and Environmental Engineering*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.70134/ircee.v1i1.41>
- Zebua, D., Harita, H., Daeli, S. D., Zalukhu, M. H., & Laia, B. (2024). *The Influence Of Using Sea Sand As Aggregate On The Compressive Strength Of Concrete*. IRCEE, 1(1). <https://doi.org/10.70134/ircee.v1i1.41>
- Zebua, D., Prayoga, P., & Waruwu, P. C. E. (2023). Evaluasi dan desain pengembangan infrastruktur pengaliran drainase di wilayah Ngagel Tirto Kota Surabaya. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(1), 26–32. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i1.134>

- Zebua, D., Prayoga, P., & Waruwu, P. C. E. (2023). Evaluasi dan desain pengembangan infrastruktur pengaliran drainase di wilayah Ngagel Tirto Kota Surabaya. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(1), 26-32. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i1.134>
- Zebua, D., Putra, A. A. S., Wibowo, L. S. B., & Alfiani, S. (2023). Evaluation of seismic performance of hospital building using pushover analysis based on ATC-40. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 14(2). <https://doi.org/10.33736/jcest.5326.2023>
- Zebua, D., Putra, A. A. S., Wibowo, L. S. B., & Alfiani, S. (2023). Evaluation of seismic performance of hospital building using pushover analysis based on ATC-40. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 14(2). <https://doi.org/10.33736/jcest.5326.2023>
- Zebua, D., Shofiyah, A., & Purnomo, H. D. (2023). Analisis desain kinerja model halte berdasarkan lingkungan di tempat terpilih. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(1), 8-19. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i1.132>
- Zebua, D., Shofiyah, A., & Purnomo, H. D. (2023). Analisis desain kinerja model halte berdasarkan lingkungan di tempat terpilih. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 3(1), 8-19. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i1.132>
- Zebua, D., Sulistiawati, M., Pratama, A. I., Rifani, R., & Razab, R. S. (2023). Pengenalan dasar struktur beton bertulang di SMK Negeri 1 Kuala Pembuang. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Jalan dan Jembatan*, 1(01), 1-7. <https://doi.org/10.59900/pkmtkjj.v1i01.117>
- Zebua, D., Sulistiawati, M., Pratama, A. I., Rifani, R., & Razab, R. S. (2023). Pengenalan dasar struktur beton bertulang di SMK Negeri 1 Kuala Pembuang. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Jalan dan Jembatan*, 1(01), 1-7. <https://doi.org/10.59900/pkmtkjj.v1i01.117>
- Zebua, D., Waruwu, E., Lase, D., Yanita, R., & Giawa, J. F. K. (2024). Analisis kinerja struktur gedung beton bertulang sesuai ATC-40. *Inovasi Pembangunan: Jurnal Kelitbangan*, 12(03). <https://doi.org/10.35450/jip.v12i03.816>
- Zebua, D., Waruwu, E., Lase, D., Yanita, R., & Giawa, J. F. K. (2024). Analisis kinerja struktur gedung beton bertulang sesuai ATC-40. *Inovasi Pembangunan: Jurnal Kelitbangan*, 12(03). <https://doi.org/10.35450/jip.v12i03.816>
- Zebua, D., Wibowo, L. S. B., Cahyono, M. S. D., & Ray, N. (2020). Evaluasi Simpangan Pada Bangunan Bertingkat Beton Bertulang berdasarkan Analisis Pushover dengan Metode ATC-40. *Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan Dan Rekayasa Sipil*, 3(2). <https://doi.org/10.25139/jprs.v3i2.2475>
- Zebua, D., Wibowo, L. S. B., Cahyono, M. S. D., & Ray, N. (2020). Analysis pushover pada bangunan bertingkat beton bertulang 7 lantai menggunakan metode FEMA-356. *Seminar Nasional Ilmu Terapan (SNITER) 2020*, 4(1). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i1.133>
- Zebua, D., Wibowo, L. S. B., Cahyono, M. S. D., & Ray, N. (2020). Evaluasi Simpangan Pada Bangunan Bertingkat Beton Bertulang berdasarkan Analisis Pushover dengan Metode ATC-40. *Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan Dan Rekayasa Sipil*, 3(2). <https://doi.org/10.25139/jprs.v3i2.2475>
- Zebua, D., Wibowo, L. S. B., Cahyono, M. S. D., & Ray, N. (2020). Analysis pushover pada bangunan bertingkat beton bertulang 7 lantai menggunakan metode FEMA-356. *Seminar Nasional Ilmu Terapan (SNITER) 2020*, 4(1). <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v3i1.133>
- Zebua, D., Wibowo, L. S. B., Rahman, H., & Rifani, R. (2022). Studi pengaruh peranan konsultan manajemen konstruksi pada proyek pembangunan tempat penyimpanan sementara limbah B3. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 2(2), 1-8. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v2i2.81>
- Zebua, D., Wibowo, L. S. B., Rahman, H., & Rifani, R. (2022). Studi pengaruh peranan konsultan manajemen konstruksi pada proyek pembangunan tempat penyimpanan sementara limbah B3. *Jurnal Penelitian Jalan dan Jembatan*, 2(2), 1-8. <https://doi.org/10.59900/ptrkjj.v2i2.81>
- Zhao, X., Li, Y., & Chen, J. (2019). *Behavior of polypropylene fiber reinforced concrete under flexural loading*. *Materials Science and Engineering*, 75(7), 711-720.