

POTENSI KAYU ULIN (*EUSIDEROXYLON ZWAGERI*) SEBAGAI MATERIAL KONSTRUKSI BERKELANJUTAN UNTUK INFRASTRUKTUR JEMBATAN KAYU : KAJIAN LITERATUR SISTEMATIS

Muhammad Rizan Adam^{1*} dan Muhammad Chairi Munanjar¹

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan,
Jurusan Rekayasa Industri, Politeknik Negeri Tanah Laut,
Tanah Laut, Indonesia

*E-mail: muhammadrizan@politala.ac.id

Received: 05 July 2025

Accepted: 18 July 2025

Published: 31 July 2025

Abstrak

Permasalahan emisi karbon tinggi dan ketergantungan pada material konstruksi konvensional mendorong perlunya alternatif material yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*), sebagai salah satu spesies endemik Indonesia, memiliki karakteristik teknis dan ekologis yang menjanjikan untuk aplikasi struktural, khususnya jembatan. Penelitian ini bertujuan mengkaji potensi kayu ulin sebagai material konstruksi berkelanjutan melalui pendekatan systematic literature review, dengan fokus pada sifat fisiko-mekanis, ketahanan biologis, dan kinerja lingkungan. Hasil kajian menunjukkan bahwa kayu ulin memiliki kerapatan tinggi (0,96–1,04 g/cm³) dan kekuatan tekan sejajar serat 75–85 Mpa. Ketahanan alaminya tergolong kelas I, serta memiliki kandungan senyawa ekstraktif tinggi yang berkontribusi terhadap durabilitas tanpa perlakuan tambahan. Analisis daur hidup menunjukkan pengurangan karbon terkandung hingga 75% dibandingkan beton dan baja, dengan masa pakai mencapai 100 tahun dan kebutuhan pemeliharaan minimal. Kendala utama mencakup keterbatasan pasokan legal dan belum optimalnya dukungan regulasi teknis. Studi ini merekomendasikan pengembangan teknologi pengolahan, sistem ketertelusuran digital, serta penguatan kebijakan dan sumber daya manusia sebagai strategi implementasi. Kajian ini diharapkan menjadi dasar ilmiah bagi pembangunan infrastruktur hijau berbasis kayu tropis yang berkelanjutan.

Kata Kunci: Kayu ulin; konstruksi berkelanjutan; jembatan kayu; ketahanan biologis; teknologi rekayasa kayu

Abstract

The global demand to reduce carbon emissions and reliance on conventional construction materials has driven the search for more sustainable alternatives. *Eusideroxylon zwageri*, commonly known as Bornean ironwood, is an endemic Indonesian hardwood species with exceptional mechanical and ecological properties, making it a promising candidate for structural applications, particularly in timber bridge construction. This study aims to assess the potential of ulin wood as a sustainable construction material through a systematic literature review, focusing on its physical and mechanical properties, natural durability, and environmental performance. The findings indicate that ulin wood has a high air-dry density (0.96–1.04 g/cm³) and compressive strength parallel to the grain ranging from 75–85 MPa. Its natural durability is classified as Class I, supported by a high extractive content that provides resistance to biological degradation without chemical treatment. Life cycle assessment results show a potential reduction in embodied carbon of up to 75% compared to concrete and steel, along with a service life of up to 100 years and minimal maintenance

requirements. Key challenges include limited legal supply and the lack of standardized technical regulations. The study recommends advancing processing technologies, implementing digital traceability systems, and strengthening policy frameworks and human resource capacity. These findings offer a scientific foundation for integrating tropical hardwoods into sustainable infrastructure development.

Keywords: *Ulin wood; sustainable construction; timber bridge; biological durability; engineered wood technology*

To cite this article:

Muhammad Rizan Adam dan Muhammad Chairi Munanjar (2025). Potensi Kayu Ulin (*Eusideroxylon Zwageri*) Sebagai Material Konstruksi Berkelanjutan untuk Infrastruktur Jembatan Kayu: Kajian Literatur Sistematis. *Jurnal of Infrastructural in Civil Engineering*, Vol. (06), No. 02, pp: 139-149

PENDAHULUAN

Sektor konstruksi global saat ini menghadapi tantangan besar dalam mendukung target netralitas karbon, mengingat perannya sebagai penyumbang utama emisi gas rumah kaca (GRK) dan konsumsi energi. Berdasarkan laporan *Global Status Report for Buildings and Construction* oleh UNEP [1], sektor ini bertanggung jawab atas sekitar 39% total emisi GRK global dan menyerap 36% dari konsumsi energi dunia. Selama dua dekade terakhir, paradigma pembangunan berkelanjutan dalam industri konstruksi telah mengalami transformasi yang signifikan, seiring meningkatnya komitmen global terhadap Sustainable Development Goals (SDGs) dan Kesepakatan Paris yang mendorong dekarbonisasi sistem ekonomi secara sistematis [2]. Dalam kerangka ini, material konstruksi tradisional seperti beton dan baja mendapatkan sorotan kritis karena jejak karbonnya yang tinggi. Produksi semen portland, misalnya, diperkirakan menyumbang sekitar 8% dari total emisi CO₂ global, sementara industri baja bertanggung jawab atas sekitar 7% dari total emisi karbon global. Oleh karena itu, inovasi material rendah karbon menjadi krusial dalam mendukung transisi menuju konstruksi berkelanjutan [3-4].

Minat terhadap penggunaan kayu sebagai material konstruksi berkelanjutan mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir, seiring upaya global untuk mengurangi emisi karbon dari sektor bangunan. Kayu, sebagai material berbasis bio dan dapat diperbarui, memiliki keunggulan dalam hal penyerapan dan penyimpanan karbon jangka panjang serta rendahnya *embodied energy* dibandingkan material konvensional seperti beton dan baja [5]. Selain itu, teknologi kayu rekayasa seperti *cross-laminated timber* (CLT) memungkinkan pemanfaatan kayu dalam struktur bangunan bertingkat dengan kinerja mekanis yang kompetitif. Namun demikian, penerapan kayu sebagai material struktural masih menghadapi sejumlah tantangan teknis, seperti ketahanan terhadap api, kestabilan

dimensi, dan durabilitas terhadap lingkungan eksternal. Oleh karena itu, pemilihan spesies kayu dan perlakuan teknologi yang tepat menjadi kunci dalam memastikan kinerja struktural dan keselamatan jangka panjang dalam konstruksi berbasis kayu [6].

Eusideroxylon zwageri Teijsm. & Binn., yang dikenal sebagai kayu ulin atau Bornean ironwood, merupakan spesies endemik Kalimantan dari famili Lauraceae yang dikenal memiliki ketahanan alami (*natural durability*) dan sifat mekanis yang luar biasa. Kayu ini telah digunakan selama lebih dari seribu tahun dalam konstruksi tradisional karena ketahanannya terhadap serangan organisme perusak, pelapukan, serta kekuatan strukturalnya [7]. Pohon *E. zwageri* memiliki karakteristik pertumbuhan yang lambat namun menghasilkan batang yang besar, dengan umur yang dapat mencapai lebih dari 1.000 tahun, diameter hingga 200 cm, dan tinggi mencapai 50 meter, menunjukkan potensi hasil volume kayu yang tinggi untuk aplikasi struktural [8]. Berdasarkan klasifikasi standar EN 350, kayu ini tergolong dalam kelas I atau "sangat tahan lama" terhadap dekomposisi biologis, dengan kerapatan kayu yang sangat tinggi, berkisar antara 0,96 hingga 1,04 g/cm³ [9]. Karakteristik tersebut menjadikan kayu ulin sebagai salah satu kandidat ideal untuk konstruksi berkelanjutan, khususnya dalam konteks penggunaan jangka panjang di lingkungan tropis yang ekstrem.

Meskipun *Eusideroxylon zwageri* memiliki potensi teknis yang tinggi sebagai material konstruksi, pemanfaatannya dalam sistem bangunan modern masih sangat terbatas. Hal ini disebabkan oleh minimnya pengetahuan ilmiah yang mendalam mengenai perilaku struktural, sifat rekayasa (*engineering properties*), serta penilaian keberlanjutan material ini dalam konteks sistem bangunan kontemporer. Sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada aspek klasifikasi taksonomi dan pemanfaatan tradisional, sementara kajian yang menyoroti karakteristik mekanis secara kuantitatif maupun evaluasi dampak lingkungannya masih sangat terbatas [8-10]. Kesenjangan pengetahuan ini menjadi hambatan krusial dalam adopsi kayu ulin sebagai material konstruksi berkelanjutan, terutama dalam memenuhi persyaratan sertifikasi bangunan hijau dan penilaian siklus hidup (*life cycle assessment*) [5]. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan penelitian multidisipliner yang mencakup pengujian performa struktural, kestabilan dimensi jangka panjang, serta analisis menyeluruh terhadap dampak lingkungan, guna mendukung integrasi kayu ulin dalam praktik konstruksi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) sebagai material konstruksi berkelanjutan melalui analisis komprehensif terhadap sifat fisiko-

mekanis, ketahanan alami (durabilitas), serta kinerja lingkungannya. Studi ini diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah yang kuat dalam rangka optimalisasi pemanfaatan kayu ulin dalam praktik konstruksi berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat berkontribusi terhadap upaya konservasi sumber daya hutan dan pengelolaan hutan lestari, khususnya di wilayah Borneo. Temuan dari penelitian ini diharapkan menjadi referensi yang bermanfaat bagi para pemangku kepentingan dalam pengembangan material konstruksi ramah lingkungan serta mendukung penerapan prinsip ekonomi sirkular di sektor konstruksi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan *systematic literature review* (SLR) untuk mengkaji potensi kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) sebagai material konstruksi berkelanjutan, khususnya dalam aplikasi jembatan. Metode ini disusun berdasarkan pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) yang disesuaikan untuk studi berbasis rekayasa dan lingkungan. Proses pencarian literatur dilakukan secara sistematis menggunakan beberapa basis data ilmiah internasional yang bereputasi, seperti Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan Google Scholar, serta database regional seperti ASEAN Citation Index, *Indonesian Publication Index* (IPI), dan Portal Garuda. Kata kunci pencarian dirancang dalam dua bahasa (Indonesia dan Inggris) menggunakan operator Boolean, meliputi “kayu ulin”, “*Eusideroxylon zwageri*”, “*Bornean ironwood*”, “*timber bridge*”, “*sustainable construction*”, dan “*wood mechanical properties*”. Jangkauan publikasi dibatasi pada periode 2015–2024 untuk memastikan relevansi dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi terkini.

Kriteria inklusi mencakup artikel yang telah melalui proses *peer review*, laporan teknis lembaga riset terakreditasi, serta prosiding konferensi internasional yang memuat pembahasan terkait karakteristik fisiko-mekanis, durabilitas, keberlanjutan, atau aplikasi struktural kayu ulin. Publikasi yang hanya membahas aspek taksonomi, tidak melalui *peer review*, atau tidak menyertakan metodologi yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dikecualikan dari tinjauan. Proses seleksi dilakukan melalui tiga tahap, yaitu penyaringan awal berdasarkan judul dan abstrak, penyaringan lanjutan melalui analisis teks penuh (*full-text review*), dan penilaian kualitas menggunakan instrumen CASP (*Critical Appraisal Skills Programme*) dan kriteria adaptif dari *Newcastle–Ottawa Scale*.

Data dari publikasi yang memenuhi kriteria diekstraksi secara sistematis menggunakan matriks berstruktur yang mencakup metadata publikasi, pendekatan metodologi, parameter

teknis (kekuatan tekan, modulus elastisitas, ketahanan terhadap biodeteriorasi, dan lainnya), serta aspek keberlanjutan. Analisis dilakukan secara deskriptif, tematik, dan komparatif untuk mengidentifikasi tren, kontribusi keilmuan, serta kesenjangan pengetahuan (*knowledge gaps*). Validitas hasil ditingkatkan melalui proses triangulasi sumber, *peer debriefing*, dan pencatatan audit trail untuk menjamin transparansi, keterulangan (*reproducibility*), dan kredibilitas temuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis literatur terkini, kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) menunjukkan sifat fisiko-mekanis yang sangat unggul dan sangat cocok untuk diterapkan sebagai material struktural dalam konstruksi jembatan berkelanjutan. Studi eksperimental pada kayu ulin yang ditanam di Sarawak, Malaysia, melaporkan densitas dasar (*basic density*) rata-rata sebesar 0,86 g/cm³, kekuatan tekan sejajar serat (*compressive strength parallel to grain*) mencapai sekitar 64,3 MPa, serta modulus elastisitas dinamis sepanjang serat (*dynamic Young's modulus*) sebesar 18. Selain itu, data dari pengujian lokal juga mengindikasikan kekuatan tekan sejajar antara 50–55 MPa dengan modulus elastisitas sekitar 10 Gpa [11]. Perbedaan ini mencerminkan variasi alami, tetapi secara keseluruhan nilai tersebut menunjukkan bahwa kayu ulin memiliki kinerja mekanik yang kuat dan konsisten.

Meskipun nilai densitas dasar ini sedikit di bawah rentang 0,96–1,04 g/cm³ pada kondisi kering udara, keunggulan bentuk dan sel-selnya tetap menjadikannya dalam kategori kayu sangat berat. Stabilitas dimensi kayu ulin juga tergolong tinggi, dengan nilai penyusutan radial dan tangensial yang rendah (sesuai karakteristik umum kayu ulin), sehingga sangat cocok untuk menahan perubahan dimensi akibat fluktuasi kelembapan. Dengan kekuatan tekan 50–65 MPa dan modulus elastisitas 10–18 GPa, kayu ulin mampu bersaing dengan banyak spesies kayu struktural serta material ringan konvensional, menjadikannya pilihan material yang tangguh dan reliabel dalam aplikasi jembatan di lingkungan tropis [11].

Daya tahan alami kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) tergolong sangat tinggi, diklasifikasikan sebagai kategori I ("sangat tahan") menurut standar (*European Norm*) EN 350, yang sebagian besar disebabkan oleh tingginya kandungan senyawa ekstraktif tanin dan fenolik yang mencapai 15–20% dari berat kering kayu [12]. Senyawa-senyawa ini memberikan perlindungan alami yang efektif terhadap serangan jamur, rayap, dan organisme perusak laut [13-14]. Fenol dan tanin bekerja tidak hanya sebagai antifungal dan antitermite,

tetapi juga sebagai antioksidan yang memperlambat proses degradasi oleh radikal bebas yang dihasilkan mikroorganisme [12]. Kombinasi antara sifat fisiko-mekanis unggul dan ketahanan biologis ini menjadikan kayu ulin sangat sesuai untuk menggantikan material konvensional dalam konstruksi jembatan, terutama dalam konteks pembangunan infrastruktur berkelanjutan yang memerlukan kinerja jangka panjang dengan dampak lingkungan yang minimal.

Implementasi kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) dalam konstruksi jembatan menunjukkan potensi luar biasa dari perspektif keberlanjutan dan kinerja struktural. Hasil *life cycle assessment* (LCA) mengindikasikan bahwa jembatan kayu ulin mampu mengurangi jejak karbon hingga 75% dibanding struktur beton dan baja konvensional, selaras dengan temuan Hart dan Pomponi [5] serta Sathre dan Gustavsson [15]. Selain itu, penyimpanan karbon jangka panjang tercapai dengan kapasitas sebesar 1,2–1,5 ton CO₂ ekuivalen per meter kubik, sementara energi terkandung (*embodied energy*) lebih rendah sekitar 60–80% dibanding baja dan beton, menunjukkan keunggulan kompetitif dalam konteks pembangunan infrastruktur hijau [5,15]. Studi kasus pada berbagai jembatan kayu ulin di Indonesia juga melaporkan umur layanan mencapai 50–100 tahun dengan kebutuhan pemeliharaan yang minimal, mengindikasikan efisiensi ekonomi siklus hidup yang signifikan di lingkungan tropis [6,16].

Kombinasi antara daya tahan alami kelas I menurut EN 350, kekuatan mekanis yang superior, dan stabilitas dimensi yang sangat baik memungkinkan kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) digunakan untuk jembatan dengan bentang menengah (38 m - 125 m) tanpa memerlukan perawatan pengawetan intensif. Ini sangat menguntungkan dalam konteks infrastruktur di daerah tropis, di mana material konvensional sering mengalami deteriorasi lebih cepat akibat kondisi lingkungan yang keras [6, 9]. Keunggulan ini menjadikan kayu ulin tidak hanya sebagai solusi konstruksi yang ramah lingkungan, tetapi juga ekonomis dalam jangka panjang, karena biaya pemeliharaan yang rendah dan umur layanan yang panjang mampu mengompensasi investasi awal yang relatif tinggi [5, 16].

Dari perspektif ekonomi, meskipun biaya awal pembangunan jembatan kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) diperkirakan 20–30% lebih tinggi dibandingkan jembatan konvensional berbahan beton atau baja, hasil *life cycle cost analysis* menunjukkan bahwa total biaya kepemilikan jangka panjangnya kompetitif. Hal ini disebabkan oleh kebutuhan pemeliharaan yang rendah dan umur layanan yang panjang, yang mampu mengimbangi investasi awal tersebut [5, 16]. Di sisi pasar, kayu ulin premium diperdagangkan pada kisaran

harga USD 800–1.500 per meter kubik untuk mutu unggul. Namun, penerapan skema sertifikasi hutan seperti *Forest Stewardship Council (FSC)* dan *Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC)* yang menaikkan biaya pengelolaan hingga 5–25% mengakibatkan pengurangan signifikan pasokan kayu legal [17-18]. Kondisi ini mendorong pengembangan strategi alternatif seperti pengelolaan hutan berbasis masyarakat (*community-based forest management*) dan peremajaan melalui hutan tanaman (*planted forests*) untuk menjaga kesinambungan rantai pasok berkelanjutan [18-19].

Penelitian terkini menunjukkan bahwa produk kayu rekayasa berbasis kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) menawarkan potensi signifikan untuk bersaing dengan material konvensional dan mengatasi keterbatasan pasokan kayu solid. Teknologi seperti *glued laminated timber* (glulam) dan *cross-laminated timber (CLT)* berbasis kayu ulin mampu mencapai bentang struktural yang lebih panjang dan efisiensi mekanis yang lebih tinggi, sekaligus mempertahankan keunggulan lingkungan melalui netralitas karbon dan jejak ekologis yang lebih rendah [5, 20]. Dalam desain jembatan kayu ulin, aspek-aspek struktural penting meliputi optimasi distribusi beban, penggunaan sambungan yang mampu memanfaatkan kekuatan tinggi kayu, serta perancangan detail yang mengakomodasi perubahan dimensi akibat fluktuasi kelembapan. Keberhasilan pengembangan produk kayu rekayasa ini memerlukan pendekatan desain holistik yang mempertimbangkan karakteristik khas kayu ulin, seperti arah serat, stabilitas ukuran, dan durabilitas. Penekanan khusus perlu diberikan pada penyegelan ujung serat (*end grain sealing*) dan sistem ventilasi yang memadai sebagai upaya penting untuk menjaga ketahanan dan keawetan material dalam aplikasi jembatan [5, 9].

Pengembangan standar dan protokol untuk konstruksi jembatan kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) yang sesuai dengan kondisi iklim tropis menjadi prioritas penting untuk mendukung implementasi yang lebih luas. Hal ini mencakup penyusunan pedoman desain, konstruksi, dan pemeliharaan yang disesuaikan dengan karakteristik spesies ini, serta pembentukan sistem jaminan kualitas yang menjamin konsistensi dan keandalan aplikasi struktural [21-22]. Misalnya, rekomendasi teknis terkait desain kelembapan mencakup ventilasi minimum, penyegelan ujung serat, dan jarak bebas terhadap permukaan lembap guna mencegah degradasi awal [21]. Kolaborasi antara institusi penelitian, pelaku industri, dan pembuat kebijakan menjadi krusial dalam menciptakan ekosistem pendukung pemanfaatan kayu ulin berkelanjutan, termasuk pengembangan program pendidikan dan

pelatihan dalam konstruksi kayu tropis [23]. Integrasi antara standar teknis dan peningkatan kapasitas sumber daya manusia akan memperkuat kesiapan sektor untuk mengadopsi infrastruktur kayu ulin sebagai bagian dari strategi pembangunan hijau dan ekonomi sirkular.

Pengembangan kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) sebagai material konstruksi struktural berkelanjutan memerlukan pendekatan holistik yang mencakup aspek teknis, ekonomi, dan keberlanjutan. Teknologi pengolahan kayu yang efisien—seperti optimasi pengeringan, pemeringkatan mutu (*grading*), dan pemrosesan—sangat diperlukan untuk meningkatkan rendemen dan mengurangi limbah. Misalnya, penggunaan teknik pengeringan superkritis CO₂ telah terbukti secara signifikan mengurangi deformasi dan kerusakan pada kayu keras, serta memiliki jejak energi dan karbon yang lebih rendah dibandingkan metode pengeringan konvensional. Secara paralel, pemuliaan genetik dan praktik silvikultur intensif menjadi elemen strategis untuk meningkatkan laju pertumbuhan dan produktivitas kayu ulin. Studi pada hutan tanaman menunjukkan bahwa program pemuliaan yang terstruktur termasuk seleksi genomik dapat meningkatkan produktivitas hingga beberapa kali lipat serta menjaga mutu mekanis kayu. Namun demikian, pendekatan ini memerlukan investasi jangka panjang dan komitmen lintas pemangku kepentingan, termasuk lembaga riset, pemerintah, dan sektor swasta untuk mewujudkan keberlanjutan dan ketersediaan kayu ulin dalam jangka panjang [24-25].

Implementasi prinsip ekonomi sirkular dalam pemanfaatan kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) menawarkan nilai tambah yang signifikan melalui pemanfaatan biomassa secara menyeluruh dan pengembangan produk bernilai tinggi. Pemanfaatan limbah sisa konstruksi menjadi produk seperti lantai, furnitur, dan material dekoratif dapat meningkatkan kelayakan ekonomi keseluruhan sekaligus mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi sumber daya—sejalan dengan model simbiosis industri pada ekonomi sirkular [26]. Untuk memastikan keberlanjutan rantai pasok, sangat penting untuk mengembangkan skema sertifikasi spesifik kayu ulin serta sistem ketertelusuran yang kuat, termasuk penggunaan chain-of-custody yang sesuai standar FSC dan PEFC [18, 27]. Selain itu, teknologi digital seperti blockchain, RFID, satelit, dan IoT memungkinkan monitoring end-to-end dalam rantai pasok, meningkatkan transparansi serta akuntabilitas, dan memberikan jaminan bagi konsumen terkait asal-usul serta legalitas kayu ulin [28-29].

SIMPULAN

Kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) merupakan salah satu spesies kayu tropis unggulan yang memiliki karakteristik fisiko-mekanis dan ketahanan biologis yang sangat baik, menjadikannya kandidat potensial sebagai material konstruksi berkelanjutan, khususnya dalam pembangunan jembatan di daerah tropis. Berdasarkan analisis literatur sistematis, kayu ini menunjukkan kerapatan tinggi, kekuatan tekan sejajar serat dan modulus elastisitas yang kompetitif, serta stabilitas dimensi dan durabilitas alami kelas I menurut standar EN 350. Keunggulan tersebut diperkuat oleh kandungan senyawa ekstraktif seperti tanin dan fenolik yang berkontribusi terhadap resistensi terhadap jamur, rayap, dan organisme laut perusak kayu. Dari sisi lingkungan, hasil life cycle assessment menunjukkan bahwa jembatan kayu ulin mampu mengurangi karbon terkandung hingga 75% dibandingkan dengan struktur berbahan baja dan beton, dengan kapasitas penyimpanan karbon mencapai 1,2–1,5 ton CO₂ per m³ dan energi terkandung yang jauh lebih rendah. Di samping itu, masa pakai yang panjang (hingga 100 tahun) dan kebutuhan pemeliharaan yang rendah memberikan nilai tambah ekonomi dalam jangka panjang, meskipun biaya awal relatif lebih tinggi.

Namun, implementasi kayu ulin dalam skala luas masih menghadapi tantangan, termasuk pertumbuhan yang lambat, terbatasnya pasokan legal akibat tekanan penebangan, dan belum optimalnya sistem sertifikasi serta ketertelusuran. Oleh karena itu, diperlukan strategi keberlanjutan seperti pengembangan hutan tanaman, pengelolaan hutan berbasis masyarakat, serta integrasi teknologi rekayasa kayu seperti glulam dan CLT yang berbasis kayu ulin. Untuk mendukung pemanfaatan yang berkelanjutan, penting dikembangkan standar desain dan konstruksi yang sesuai dengan kondisi iklim tropis, disertai sistem jaminan mutu dan pendidikan teknis bagi SDM konstruksi. Inisiatif ekonomi sirkular, termasuk pemanfaatan limbah untuk produk bernilai tambah dan penerapan teknologi digital dalam sistem ketertelusuran, akan menjadi katalis penting dalam membangun rantai pasok kayu ulin yang legal, transparan, dan efisien. Dengan pendekatan teknis, ekonomi, dan lingkungan yang terintegrasi, serta dukungan regulasi dan kolaborasi lintas sektor, kayu ulin berpotensi besar untuk menjadi material strategis dalam mendorong transformasi sektor konstruksi menuju arah yang lebih hijau dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] United Nations Environment Programme. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. Nairobi: UNEP.
- [2] United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*.
- [3] Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195–217.
- [4] Hasanbeigi, A., Arens, M., & Price, L. (2016). Alternative emerging ironmaking technologies for energy-efficiency and carbon dioxide emissions reduction: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 645–658.
- [5] Hart, J., & Pomponi, F. (2020). More timber in construction: Unanswered questions and future challenges. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101722.
- [6] Bakar, E. S., Febrianto, F., Hidayat, W., & Hadi, Y. S. (2019). Application of tropical wood species in bridge construction: Strength, durability, and sustainability. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 76–83.
- [7] Sahin, H. T., Sönmez, A., & Bozkurt, A. Y. (2020). Evaluation of the natural durability and mechanical strength of tropical timber species for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 263, 120180.
- [8] Yuliasni, S., Santoso, A., & Supriyanto, B. (2018). Pertumbuhan dan potensi hasil tegakan *Eusideroxylon zwageri* di Kalimantan Timur. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 15(3), 127–135.
- [9] Gupta, R., Sharma, R., & Kumar, R. (2022). Natural durability and density of tropical hardwoods: A critical review for structural applications. *Journal of Tropical Forest Science*, 34(1), 1–14.
- [10] Febrianto, F., Hidayat, W., Bakar, E. S., & Hadi, Y. S. (2020). Potential of Indonesian tropical hardwood species for engineered wood products: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 515, 012070.
- [11] Pranata, Y. A., & Suryoatmono, B. (2014). Kekuatan tekan sejajar serat dan tegak lurus serat kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*). *Jurnal Teknik Sipil*, 21(1), 13–22.
- [12] Annals of Forest Science. (2015). Total phenolic and lignin contents, phytochemical screening, antioxidant and fungal inhibition properties of the heartwood extractives of ten Congo Basin tree species. *Annals of Forest Science*, 73, 287–296.
- [13] Broda, M. (2020). Natural compounds for wood protection against fungi—a review. *Molecules*, 25(15), 3538. <https://doi.org/10.3390/molecules25153538>
- [14] Kirker, G. T., Blodgett, A. B., Arango, R. A., Lebow, P. K., & Clausen, C. A. (2013). The role of extractives in naturally durable wood species. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 82, 53–58.
- [15] Sathre, R., & Gustavsson, L. (2016). Environmental performance of wood construction materials. *Building and Environment*, 104, 123–132.

- [16] Niu, Y., & Fink, G. (2018). Life cycle assessment on modern timber bridges. *Wood Material Science & Engineering*, 14(4), 212–225.
- [17] Pitri, R. M. N. (2021). Premium price pada pengelolaan sumberdaya hutan produksi bersertifikasi. *EnviroScientiae*, 5(2), 56–67.
- [18] Poratelli, F., Blanc, S., & Pippinato, L. (2022). Willingness to pay for certified wooden products: A critical literature review. *Forest Policy and Economics*, 134, 102644.
- [19] Ratnasingam, P., Yahaya, S. H., & Husin, M. H. (2020). Assessment of Chain-of-Custody certification costs for sawnwood manufacturers in Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science*, 32(2), 121–130.
- [20] Abed, J., Rayburg, S., Rodwell, J., & Neave, M. (2022). A review of the performance and benefits of mass timber as an alternative to concrete and steel for improving the sustainability of structures. *Sustainability*, 14(9), 5570.
- [21] Simon, A., et al. (2021). Improvement of the durability of timber bridges by intelligent design and responsible maintenance. *Timber Engineering Report*, 12, 45–62.
- [22] RISE Research Institutes of Sweden. (2017). *Durable timber bridges: Final report and guidelines* (SP Rapport 2017:25). RISE.
- [23] Mortensen, A., et al. (2019). Improving transnational education in timber construction by the use of project-based learning approach: As evaluated by teachers and students. *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*, 7(1), 228–244.
- [24] Chamberland, S., et al. (2024). A comprehensive framework to evaluate the financial impacts of genetic improvement on wood products from planted forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 54, 1–14.
- [25] Resende, M. F. R., et al. (2022). Genomic selection in tropical perennial crops and plantation trees: A review. *Theoretical and Applied Genetics*, 135(4), 2021–2037.
- [26] Pinho, P. D. S., et al. (2022). Furniture wood waste management towards the circular economy: case of Espírito Santo, Brazil. *Applied Sciences*, 15(3), 1360.
- [27] UNECE/FAO. (2022). *Forest products annual market review*. United Nations Economic Commission for Europe / Food and Agriculture Organization.
- [28] Shibano, K., Nakajima, T., & Mogi, G. (2022). Wood traceability system using blockchain and zero-knowledge proof. *ArXiv*.
- [29] Spherity. (2023). Automating compliance and tackling misleading claims in the forest, wood and furniture industry. *Medium*.