

Penerapan Ekonomi Sirkular dalam Inovasi Material Konstruksi: Bambu sebagai Substitusi Plat Beton Bertulang

¹ A'izzatul Khiyana, ^{2*} Meriana Wahyu Nugroho, ³ Totok Yulianto, ⁴ Titin Sundari, ⁵ Rahma Ramadhani, ⁶ Sulung Rahmawan Wira Ghani, ⁷ Ita Suhermin Ingsih

^{1,2,3,4} Teknik Sipil, Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang, Jombang

⁵ Pendidikan Matematika, Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang, Jombang

⁶ Teknik Industri, Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang, Jombang

⁷ Teknik Sipil, Universitas Islam Malang, Malang

¹ aizzatulkhiyana@unhasy.ac.id, ² meriananugroho@unhasy.ac.id, ³ totokyulianto@unhasy.ac.id, ⁴ titinsundari@unhasy.ac.id, ⁵ rahmaramadhani@unhasy.ac.id, ⁶ sulungghani@unhasy.ac.id, ⁷ ita.suhermin@unisma.ac.id

Article Info

Article history:

Received: 3 February 2026

Revised: 16 March 2026

Accepted: 07 May 2026

Keyword:

Circular economy
Laminated bamboo
Plate
Flexural strength

ABSTRACT

The construction industry faces sustainability challenges due to high resource consumption and carbon emissions, which requires the application of circular economy principles to minimize environmental impacts. Under these conditions, bamboo as a local material with a fast growth cycle and high regeneration ability has the potential to be a sustainable alternative that supports the transformation of green construction. This research aims to examine the utilization of bamboo as a substitute material for reinforcement in concrete slabs by emphasizing the sustainability aspect and analyzing the comparative costs in utilizing bamboo and steel reinforcement. The analysis began by conducting a literature study related to the application of circular economy in the use of bamboo, conducting experiments by making test specimens of bamboo reinforcement substitution plates and testing their flexural strength, and calculating the cost difference of using bamboo and steel as reinforcement in concrete slabs. The results showed that bamboo has a tensile strength comparable to conventional steel, with the added advantages of abundant availability, relatively low cost, and a relatively low carbon footprint. The implementation of bamboo in construction not only contributes to the reduction of carbon emissions, but also opens up opportunities for the development of a more sustainable local material supply chain. Thus, the integration of bamboo as a substitute for reinforced concrete slabs in a circular economy perspective can be an innovative solution towards environmentally-friendly and resource-efficient green infrastructure development.

This is an open access article under the CC BY-SA license



DOI: <https://doi.org/10.32492/nucleus.v5i1.5108>

Corresponding Author:

Meriana Wahyu Nugroho, Teknik Sipil, Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang
Email: meriananugroho@unhasy.ac.id

Abstrak— Industri konstruksi menghadapi tantangan keberlanjutan akibat tingginya konsumsi sumber daya dan emisi karbon, sehingga diperlukan penerapan prinsip ekonomi sirkular untuk meminimalkan dampak lingkungan. Dalam kondisi ini, bambu sebagai material lokal dengan siklus tumbuh cepat dan

kemampuan regenerasi tinggi berpotensi menjadi alternatif berkelanjutan yang mendukung transformasi konstruksi ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menguji pemanfaatan bambu sebagai material substitusi tulangan pada plat beton dengan menekankan aspek keberlanjutan dan menganalisis komparatif biaya dalam pemanfaatan bambu dan tulangan baja. Analisis dimulai dengan melakukan studi literatur terkait penerapan ekonomi sirkular dalam penggunaan bambu, melakukan eksperimen dengan membuat benda uji plat substitusi tulangan bambu dan menguji kuat lenturnya, serta menghitung perbedaan biaya penggunaan bambu dan baja sebagai tulangan pada plat beton. Hasil kajian menunjukkan bahwa bambu memiliki kekuatan tarik yang sebanding dengan baja konvensional, dengan keunggulan tambahan berupa ketersediaan melimpah, biaya relatif rendah, dan jejak karbon yang relatif rendah. Implementasi bambu dalam konstruksi tidak hanya berkontribusi pada pengurangan emisi karbon, tetapi juga membuka peluang pengembangan rantai pasok material lokal yang lebih berkelanjutan. Dengan demikian, integrasi bambu sebagai substitusi plat beton bertulang dalam perspektif ekonomi sirkular dapat menjadi solusi inovatif menuju pembangunan infrastruktur hijau yang ramah lingkungan dan efisien sumber daya.

I. Pendahuluan

Industri konstruksi merupakan salah satu industri dengan tingkat pemanfaatan sumber daya alam yang tinggi serta memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi karbon [1][2][3]. Kondisi ini menimbulkan tantangan serius terkait keberlanjutan, khususnya dalam konteks efisiensi energi, pengurangan limbah, serta mitigasi dampak lingkungan [4]. Penggunaan material seperti beton bertulang memiliki dampak lingkungan yang tinggi mulai dari eksploitasi agregat dan pasir, konsumsi energi tinggi dalam produksi semen, hingga emisi CO₂ yang dihasilkan selama proses pembuatannya [5][6]. Kondisi ini mendorong perlunya penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam sektor konstruksi untuk meminimalkan limbah, mengurangi dampak lingkungan dan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya.

Penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam industri konstruksi menekankan pada optimalisasi siklus hidup material melalui konsep *refuse, reduce, reuse, repair, refurbish, remanufacture, repurpose, recycle, recovery*, dan *rethink* [7]. Dalam hal ini, bambu dapat menjadi representasi nyata dari material berkelanjutan yang sesuai dengan prinsip ekonomi sirkular. Bambu merupakan sumber daya hayati yang ketersediaannya melimpah di Indonesia, dengan siklus tumbuh yang relatif cepat serta kemampuan regenerasi alami yang tinggi [8]. Karakteristik ini menjadikan bambu lebih berkelanjutan dibandingkan material konvensional lainnya karena mampu menyediakan pasokan yang stabil tanpa menimbulkan eksploitasi berlebihan terhadap ekosistem. Selain itu, pemanfaatan bambu secara optimal dapat memperkuat pemanfaatan material lokal yang ramah lingkungan. Dengan demikian, bambu memiliki peran yang penting dalam mendukung transformasi sektor konstruksi menuju sistem yang lebih berkelanjutan.

Penelitian terdahulu yang menunjukkan relevansi terhadap studi ini dilakukan oleh [9][10][11][12] yang menyimpulkan jika ekonomi sirkular memiliki potensi yang besar dalam mengurangi dampak lingkungan dan biaya dalam jangka panjang, akan tetapi implementasinya masih terbatas karena hambatan regulasi, biaya, teknologi, dan rendahnya kesediaan stakeholder untuk mengubah cara kerja lama dengan metode ekonomi linier (ambil → pakai → buang). Hal ini dikarenakan penerapan ekonomi sirkular membutuhkan investasi awal yang lebih tinggi (teknologi daur ulang material ramah lingkungan).

[13] juga melakukan penelitian terkait ekonomi sirkular pada industri konstruksi. Hasil dari penelitian ini menjelaskan jika penerapan ekonomi sirkular pada industri konstruksi masih didominasi praktik daur ulang material, sedangkan aspek desain untuk keberlanjutan dan kolaborasi lintas rantai pasok masih kurang diterapkan. Hambatan utamanya adalah keterbatasan regulasi, kesenjangan teknologi, serta rendahnya kesadaran stakeholder. Untuk itu peneliti melakukan penelitian ini untuk menerapkan aspek desain dan keberlanjutan dalam ekonomi sirkular yang akan diaplikasikan dalam pemanfaatan bambu betung sebagai substitusi tulangan pada plat beton.

Jenis bambu yang digunakan dalam penelitian ini adalah bambu betung (*Dendrocalamus asper*) dengan usia panen optimal antara 3 hingga 5 tahun. Pemilihan bambu betung didasarkan pada sifat mekanisnya yang unggul, seperti kekuatan tarik yang tinggi, diameter batang yang besar, serta dinding yang tebal sehingga mampu memberikan performa struktural yang memadai untuk aplikasi konstruksi [14]. Umur panen bambu yang digunakan berkisar antara 3–5 tahun, hal ini dipertimbangkan sebagai fase pertumbuhan ideal, di mana

kandungan lignin dan selulosa telah mencapai stabilitas maksimum sehingga meningkatkan kekuatan serta daya tahan bambu. Selain itu, bambu betung pada usia tersebut memiliki kadar air yang relatif lebih rendah, sehingga lebih mudah diproses dan meningkatkan ketahanannya terhadap serangan jamur atau rayap apabila diberikan perlakuan pengawetan yang sesuai. Dengan karakteristik tersebut, bambu betung menjadi material alternatif yang potensial untuk diaplikasikan sebagai substitusi plat beton bertulang dalam kerangka pembangunan berkelanjutan berbasis ekonomi sirkular.

Dari perspektif ekonomi, penggunaan bambu betung sebagai substitusi tulangan pada plat beton memberikan implikasi signifikan terhadap efisiensi biaya dibandingkan penggunaan baja konvensional. Harga bambu secara umum lebih rendah dan ketersediaannya melimpah di wilayah tropis, termasuk Indonesia, sehingga mampu menekan biaya material. Penelitian ini akan melakukan analisis perbandingan biaya terhadap dua penggunaan tulangan, yaitu bambu betung dan baja pada plat beton. Perbandingan tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran empiris mengenai kelayakan teknis dan efisiensi biaya dari pemanfaatan bambu dalam mendukung implementasi prinsip ekonomi sirkular. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji pemanfaatan prinsip ekonomi sirkular melalui penggunaan bamboo betung sebagai substitusi tulangan pada plat beton guna mendukung keberlanjutan konstruksi, menganalisis kuat lentur yang dihasilkan serta melakukan perhitungan analisis komparatif biaya antara plat beton bertulang baja dan plat beton bertulang bambu.

II. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif, dimana dilakukan pengujian laboratorium untuk menganalisis kinerja mekanis serta efisiensi biaya penggunaan bambu betung sebagai substitusi tulangan pada plat beton. Penelitian ini diawali dengan studi literatur yang bertujuan untuk memperoleh landasan teoritis mengenai pemanfaatan bambu betung sebagai material substitusi pada plat beton serta relevansinya dalam prinsip ekonomi sirkular. Kajian pustaka dilakukan terhadap berbagai hasil penelitian terdahulu yang membahas sifat mekanis bambu betung, penerapannya sebagai tulangan pada elemen beton, serta potensi kontribusinya dalam mengurangi ketergantungan terhadap baja konvensional yang memiliki dampak negatif terhadap lingkungan.

Selanjutnya yaitu persiapan material berupa pemilihan dan perlakuan preservasi bambu betung. Bambu yang digunakan telah mencapai umur 3-5 tahun dengan rata-rata ukuran diameter bambu antara 10-15 cm, dan tebal daging bambu 5-10 cm.



Gambar 1. Bambu umur 3-5 tahun

Setelah proses pemilihan batang bambu, selanjutnya proses membelah menggunakan alat pemecah bambu sesuai dengan gambar 2.



Gambar 2. Alat pemecah bilah bamboo

Bambu yang sudah dibelah dan dirapikan, selanjutnya akan dilakukan proses penganyaman bambu dengan pemotongan panjang bambu menjadi 45 cm (tulangan melintang), dan 95 cm (tulangan memanjang). Penyatuan antar bilah bambu menggunakan kawat besi untuk mengikat bagian simpul agar tidak mudah bergeser dengan jarak antara satu bilah bambu dan yang lain sepanjang 10 cm seperti gambar 3.



Gambar 3. Perakitan bilah bambu

Bilah anyaman bambu yang sudah disatukan, selanjutnya dilakukan penjemuran \pm 5 hari di bawah sinar matahari untuk mengurangi kadar air yang terdapat pada bambu. Setelah proses pengeringan bambu, dilaksanakan perendaman bambu dalam air selama 2-4 minggu untuk mengurangi kandungan pati yang ada dalam bambu, sebagai upaya agar bambu tertahan dari hewan yang menyebabkan bambu mengalami pelapukan.

Selanjutnya, spesimen plat beton akan dirancang dengan variasi jumlah penulangan berupa satu lapis (*single layer*) dan dua lapis (*double layer*) anyaman bambu betung. Variasi ini dimaksudkan untuk mengevaluasi pengaruh jumlah lapisan tulangan terhadap kinerja struktural, khususnya dalam menahan beban lentur pada plat beton. Pemilihan satu lapis tulangan bertujuan untuk merepresentasikan kondisi minimum penggunaan bambu sebagai substitusi tulangan, sedangkan penggunaan dua lapis tulangan ditujukan untuk mengetahui sejauh mana peningkatan kapasitas struktural dapat dicapai melalui penambahan lapisan penguat. Dengan demikian, perbandingan kedua konfigurasi ini akan memberikan gambaran empiris mengenai efektivitas jumlah lapisan bambu terhadap perilaku mekanis dan efisiensi biaya konstruksi.

Tabel 1. Kode dan ukuran dimensi tulangan bambu

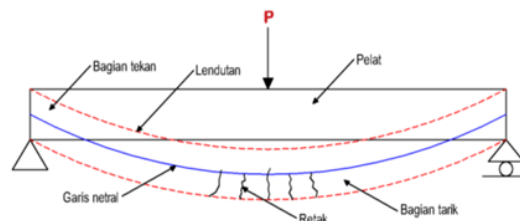
Kode benda uji	Ukuran tulangan	Lapis	Jumlah benda uji
Plat A1	Dia. 0,5 x 2 x 90 cm;	1	2
	Dia. 0,5 x 2 x 40 cm		
Plat B1	Dia. 0,5 x 2 x 90 cm;	2	2
	Dia. 0,5 x 2 x 40 cm		

Pembuatan campuran beton (*mix design*) pada penelitian ini direncanakan dengan mutu beton $f'c$ 20 MPa, yang disusun berdasarkan acuan [15] tentang Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Perancangan campuran dilakukan melalui penentuan proporsi agregat halus, agregat kasar, semen Portland, serta air pencampur dengan penyesuaian yang ditujukan untuk mencapai kuat tekan rencana. Faktor air-semen dikendalikan secara terukur agar beton memiliki workability yang memadai sekaligus memenuhi target kekuatan struktural. Mutu beton 20 MPa dipilih karena mewakili kelas beton struktural yang umum diaplikasikan pada konstruksi bangunan sederhana hingga menengah, sehingga hasil penelitian ini diharapkan memiliki relevansi praktis dengan kondisi lapangan.

Proses pencetakan beton dilakukan dengan menuangkan campuran beton segar ke dalam cetakan plat yang telah dipersiapkan dengan penempatan tulangan bambu sesuai variasi desain. Pemadatan beton dilakukan menggunakan alat penggetar (*concrete vibrator*) guna meminimalkan terbentuknya rongga udara dan memastikan homogenitas material. Setelah beton dicetak, tahap perawatan (*curing*) dilaksanakan dengan menjaga kelembapan permukaan beton selama periode 28 hari, baik melalui perendaman maupun penyiraman secara berkala. Prosedur curing ini bertujuan untuk mendukung proses hidrasi semen secara optimal sehingga beton mampu mencapai kekuatan rencana yang telah ditetapkan.

Setelah proses pencetakan beton, tahapan selanjutnya adalah melakukan uji kuat lentur plat. Pengujian kuat lentur dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan elemen plat beton dalam menahan beban lentur tanpa

mengalami retak maupun kerusakan struktural yang signifikan. Tahap pengujian ini dilakukan dengan memberikan beban terkontrol pada spesimen plat beton, kemudian mencatat deformasi atau perubahan bentuk yang terjadi. Hasil pengujian digunakan sebagai dasar untuk membandingkan nilai kuat lentur dengan spesifikasi benda uji yang direncanakan. Teknik pengujian ini diketahui menghasilkan tingkat akurasi pengukuran yang lebih tinggi dibandingkan standar [16]. Adapun ilustrasi rancangan alat uji kuat lentur ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Ilustrasi pengujian kuat lentur beton [17]

Secara sederhana, perhitungan kuat lentur suatu pelat yang diberikan beban dan bertumpu pada suatu tumpuan sederhana sebagai berikut [18].

$$f_r = \frac{1}{4} PL + \frac{1}{8} qL^2 \quad (1)$$

dengan:

- f_r = kuat lentur
- P = beban maksimum (kg)
- L = jarak tumpuan (m)
- q = berat plat (kg)

III. Hasil dan Pembahasan

A. Bambu dalam perspektif ekonomi sirkular

Bambu (*Dendrocalamus asper*) adalah material yang memiliki sifat yang mendukung penggunaannya sebagai material struktural dalam beton bertulang dengan beberapa keunggulan antara lain rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan diameter serta ketebalan bilah bambu yang memadai [19]. Perkembangan teknologi rekayasa material menghasilkan berbagai bentuk bambu olahan, seperti *laminated bamboo*, *densified bamboo* dan bambu komposit. Produk bambu rekayasa tersebut menunjukkan peningkatan pada stabilitas dimensi, ketahanan terhadap perubahan akibat siklus basah kering, serta interaksi ikat (*bond behavior*) yang lebih baik dengan matriks beton. Dengan demikian, bambu tidak hanya berpotensi sebagai material alternatif, tetapi juga dapat memenuhi persyaratan teknis untuk aplikasi struktural dalam konstruksi berkelanjutan [20].

Dari sudut pandang ekonomi sirkular, bambu memenuhi beberapa prinsip dasar seperti sumber daya terbarukan, siklus panen relatif singkat ($\pm 3-5$ tahun) dan potensi daur ulang pada akhir masa pakainya. Dampak dari pemanfaatan bambu sebagai substitusi tulangan pada plat beton dapat berpotensi mengurangi konsumsi material utama dan jejak karbon sektor konstruksi. Studi LCA menunjukkan bahwa bambu dapat menghasilkan pengurangan emisi karbon dan konsumsi energi siklus hidup yang substansial bila dibandingkan dengan material intensif energi seperti baja pada beton konvensional [21].

Dari perspektif ekonomi, sejumlah studi menunjukkan bahwa bambu lokal maupun modifikasi (*engineered bamboo*) berpotensi menjadi alternatif yang lebih ekonomis dibandingkan baja untuk aplikasi tertentu dalam konstruksi beton [22][23]. Nilai ekonomis ini ditentukan oleh faktor ketersediaan bahan baku di wilayah setempat, skala produksi yang mampu menekan biaya unit, serta efektivitas proses perlakuan preservasi yang diperlukan untuk meningkatkan durabilitas bambu. Namun demikian, literatur menegaskan bahwa analisis biaya tidak hanya dapat didasarkan pada harga material awal semata, melainkan juga harus memasukkan komponen biaya tambahan, seperti proses pengolahan dan perlakuan preservasi, kebutuhan kontrol kualitas, serta potensi biaya pemeliharaan jangka panjang. Pertimbangan menyeluruh terhadap seluruh komponen biaya tersebut diperlukan untuk menghasilkan estimasi *life cycle cost* yang komprehensif dan lebih mencerminkan kelayakan ekonomi pemanfaatan bambu sebagai substitusi tulangan pada elemen plat beton [24].

Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa bambu memiliki potensi besar sebagai material berkelanjutan untuk substitusi tulangan pada plat beton dalam kerangka ekonomi sirkular. Potensi ini didukung oleh sifat mekanis bambu, ketersediaan sumber daya yang melimpah, serta kontribusi positif terhadap pengurangan jejak karbon. Gambar 5 berikut menyajikan representasi penerapan ekonomi sirkular pada bambu yang mencakup siklus keberlanjutan dari tahap budidaya, proses pengolahan, pemanfaatan sebagai material konstruksi, untuk mendukung efisiensi sumber daya dan pembangunan berkelanjutan.



Gambar 5. Ekonomi sirkular pada bamboo

Gambar 5 merepresentasikan konsep ekonomi sirkular dalam pemanfaatan bambu sebagai material konstruksi berkelanjutan. Tahapan dimulai dari proses pemanenan bambu, yang kemudian diproses melalui pembelahan dan perakitan menjadi tulangan untuk diaplikasikan pada elemen struktural plat beton. Setelah menjalani fungsi strukturalnya, bambu tidak langsung menjadi limbah, melainkan masuk ke tahap *recycling*. Pada fase ini, bambu dapat dimanfaatkan kembali dalam berbagai bentuk, seperti anyaman bambu untuk produk kerajinan, *biochar* sebagai penyerap karbon dan meningkatkan kesuburan tanah, papan partikel untuk kebutuhan panel konstruksi, maupun pagar sementara di lapangan proyek. Alur ini menunjukkan bagaimana bambu mampu berperan sebagai material yang mendukung prinsip *reduce, reuse, recycle* (3R) dalam industri konstruksi. Dengan demikian, pemanfaatan bambu tidak hanya menekan ketergantungan terhadap baja tulangan, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan limbah konstruksi, penyerapan karbon, serta mendorong terciptanya ekosistem konstruksi hijau yang berkelanjutan. Implementasi ini masih menghadapi beberapa tantangan, antara lain kebutuhan akan kinerja struktural (kuat lentur) serta kerangka ekonomi yang memadai untuk menjamin keberlanjutan penggunaannya. Pembahasan selanjutnya akan memaparkan kinerja struktural bambu dalam menahan beban lentur, sekaligus meninjau kerangka ekonomi yang diperlukan agar implementasi material ini dapat berkelanjutan.

B. Kuat lentur plat beton

Proses pengujian kuat lentur pada plat beton dilakukan menggunakan *bonding testing machine* dengan metode pembebanan bertahap hingga spesimen mengalami kondisi keruntuhan. Pembebanan diberikan secara merata dan kontinu untuk memastikan distribusi gaya dapat diterima oleh panel sesuai dengan kapasitas struktur yang dimilikinya.

Selama proses uji, lendutan dan retak yang terjadi pada permukaan beton diamati serta dicatat menggunakan *dial gauge* sebagai instrumen pengukuran deformasi. Pengujian dihentikan ketika panel beton menunjukkan tanda-tanda kegagalan, baik berupa retak signifikan yang berkembang cepat maupun ketika panel sudah tidak mampu menerima tambahan beban. Dengan demikian, titik akhir pengujian ditentukan

pada saat panel plat beton mengalami patah atau kehilangan kekakuan struktural, yang menandakan bahwa kapasitas ultimit telah tercapai.

Tabel 2. Hasil uji lentur plat beton

No	Uraian	Dimensi				Berat Total Kgf	P crack kgf	Hasil Uji	
		w	T	l	LO			Lebar retak	P ult
1	Plat beton dengan 1 layer penulangan	0,50	0,15	1,00	0,85	166,00	1270,00	0,30	1270,00
2	Plat beton dengan 2 layer penulangan	0,50	0,15	1,00	0,85	174,00	2400,00	0,65	2400,00

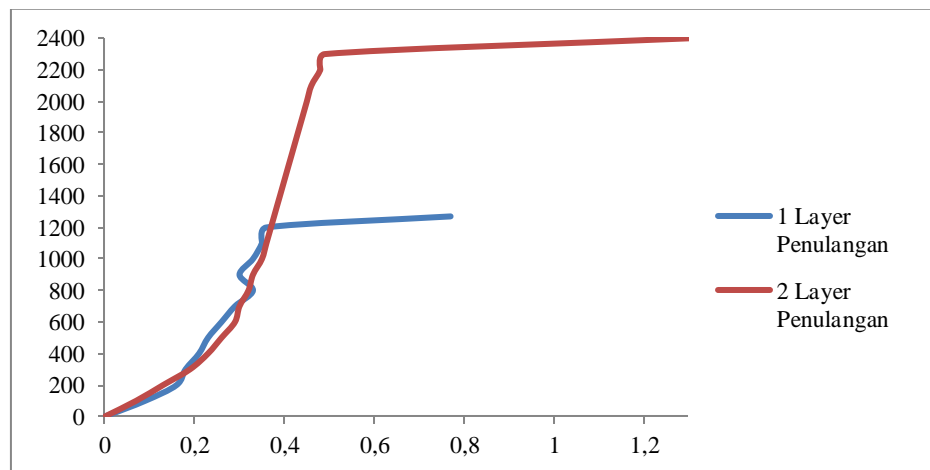
Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 2, terlihat bahwa jumlah tulangan memberikan pengaruh signifikan terhadap kapasitas struktural plat beton. Plat dengan satu layer tulangan, retak pertama (P_{crack}) terjadi pada beban 1.270 kgf dengan lebar retak 0,30 mm, sedangkan kapasitas ultimit (P_{ult}) tidak mengalami peningkatan setelah retak awal. Hal ini membuktikan bahwa jumlah tulangan yang terbatas hanya mampu menahan tegangan tarik awal sebelum terjadi keruntuhan, sehingga distribusi gaya dalam tidak optimal.

Sebaliknya, plat dengan dua tulangan menunjukkan kinerja struktural yang jauh lebih baik. Retak pertama terbentuk pada beban 2.400 kgf dengan lebar retak 0,65 mm, dan kapasitas ultimit yang dicapai juga sebesar 2.400 kgf. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penambahan tulangan berperan dalam meningkatkan daktilitas serta kemampuan redistribusi tegangan setelah terbentuknya retak awal. Dengan demikian, perilaku struktur lebih sesuai dengan prinsip beton bertulang sebagaimana dijelaskan dalam [25] maupun [26], di mana peran tulangan bukan hanya meningkatkan kekuatan lentur tetapi juga menjaga agar lebar retak tetap dalam batas yang diizinkan.

Apabila dibandingkan dengan batas lebar retak yang direkomendasikan oleh standar internasional, yakni 0,30–0,40 mm untuk elemen struktural yang terekspos [27], maka plat dengan satu layer tulangan masih berada dalam batas aman, sedangkan plat dengan dua layer tulangan cenderung melebihi batas tersebut. Walaupun demikian, peningkatan kapasitas beban ultimit hampir dua kali lipat membuktikan bahwa penambahan tulangan secara signifikan meningkatkan ketahanan struktural plat, meskipun perlu diimbangi dengan pengendalian lebar retak agar sesuai dengan kriteria layanan.

Hasil ini memperkuat pemahaman bahwa desain plat beton bertulang dengan jumlah tulangan yang memadai sangat menentukan kekuatan struktural. Penambahan tulangan tidak hanya meningkatkan kekuatan lentur, tetapi juga memperbaiki redistribusi tegangan internal, yang berimplikasi pada peningkatan keamanan dan umur layan struktur beton bertulang, hal ini di dukung oleh penelitian yang dilakukan oleh [28].

Selain aspek retak dan kapasitas ultimit, hubungan antara beban dan lendutan juga memberikan gambaran penting mengenai kinerja struktural plat beton. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui beban maksimum yang dapat di terima benda uji pelat beton dengan sampel benda uji setelah mencapai umur yang diinginkan yaitu 28 hari.



Gambar 6. Uji lentur plat beton

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara beban dan lendutan pada panel plat beton dengan variasi jumlah tulangan, yaitu satu layer penulangan dan dua layer penulangan. Secara umum, kurva beban–lendutan pada kedua spesimen memperlihatkan pola kenaikan yang relatif linier pada tahap awal pembebanan, yang menandakan perilaku elastis material beton bertulang. Pada tahap ini, peningkatan beban menghasilkan pertambahan lendutan yang sebanding, sesuai dengan hukum Hooke dalam kondisi elastis.

Pada plat dengan satu layer penulangan, lendutan maksimum yang tercatat sebesar 0,77 mm pada beban ultimit 1.270 kgf. Setelah titik ini, plat tidak mampu menahan tambahan beban, sehingga kurva menunjukkan kondisi mendatar yang mengindikasikan keruntuhan. Sebaliknya, plat dengan dua layer penulangan menunjukkan kapasitas beban yang jauh lebih tinggi, mencapai 2.400 kgf, dengan lendutan maksimum 1,25 mm. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan jumlah tulangan tidak hanya meningkatkan kapasitas beban ultimit, tetapi juga memperbesar kemampuan deformasi struktur sebelum mengalami keruntuhan.

Fenomena ini sejalan dengan konsep daktilitas pada beton bertulang, di mana jumlah tulangan yang lebih banyak meningkatkan kemampuan redistribusi tegangan serta memberikan warning melalui deformasi yang signifikan sebelum kegagalan total terjadi. Dari perspektif standar desain, seperti SNI 2847:2019 dan ACI 318, kinerja tersebut sangat penting karena elemen struktural tidak hanya dituntut memiliki kekuatan ultimit yang tinggi, tetapi juga perilaku deformasi yang cukup agar memberikan keamanan tambahan bagi pengguna bangunan. Dengan demikian, grafik beban–lendutan ini memperkuat temuan bahwa jumlah tulangan berperan ganda, yakni meningkatkan kapasitas beban serta memperbaiki perilaku deformasi, yang pada akhirnya berdampak positif terhadap keamanan dan umur layan struktur beton bertulang.

Penggunaan bambu sebagai substitusi tulangan pada plat beton memiliki keterbatasan struktural khususnya dalam kuat tarik dan modulus elastisitas, masih berada jauh di bawah standar tulangan baja konvensional. Hal ini berdampak pada rendahnya kapasitas menahan beban serta deformasi yang lebih besar pada elemen struktur. Selain itu, variabilitas kualitas material, kerentanan terhadap kelembaban, dan potensi degradasi jangka panjang semakin membatasi keandalannya untuk konstruksi berskala besar. Oleh karena itu, meskipun tulangan bambu dapat menjadi alternatif ramah lingkungan untuk bangunan sederhana atau non-struktural, penerapannya pada bangunan bertingkat tinggi tidak dapat direkomendasikan karena tidak mampu memenuhi persyaratan kinerja struktural dan keselamatan yang ditetapkan dalam standar konstruksi. Berdasarkan keterbatasan tersebut, penggunaan bambu sebagai substitusi tulangan pada plat beton dapat direkomendasikan untuk infrastruktur pedesaan, seperti jembatan pejalan kaki dan plat jalan yang tidak dilalui kendaraan berat [29][30].

C. Efisiensi Biaya

Dari perspektif ekonomi konstruksi, pemanfaatan bambu sebagai alternatif pengganti tulangan baja pada elemen plat beton menunjukkan potensi efisiensi biaya yang signifikan. Harga baja tulangan relatif tinggi dan fluktuatif karena dipengaruhi pasar global, sedangkan bambu merupakan material lokal yang ketersediaannya melimpah di berbagai daerah dengan biaya produksi dan transportasi yang lebih rendah.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan bambu sebagai tulangan mampu menekan biaya konstruksi hingga 20–40% dibandingkan dengan penggunaan baja [31][32][33] khususnya pada skala proyek perumahan sederhana dan infrastruktur pedesaan. Walaupun kapasitas mekanis bambu lebih rendah dibandingkan baja, proses perlakuan awal seperti perendaman, pengawetan, dan laminasi dapat meningkatkan daya tahannya sehingga lebih layak digunakan dalam aplikasi struktural. Oleh karena itu, pemanfaatan bambu bukan hanya memberikan keuntungan ekonomi melalui pengurangan biaya material, tetapi juga mendukung konsep pembangunan berkelanjutan dengan mengoptimalkan sumber daya alam terbarukan. Berikut ini adalah perbandingan biaya antara penggunaan tulangan baja dan bambu untuk plat beton.

Tabel 3. Perbandingan biaya material tulangan baja dan bambu pada plat beton (per m², tebal 12 cm)

Jenis tulangan	Kebutuhan material	Harga satuan	Total biaya material	Efisiensi biaya
Baja tulangan	8 kg	Rp. 16.000/kg	Rp. 128.000	-
Bambu	4 batang (Ø 1,5 – 2 cm)	Rp. 9.000/batang	Rp. 36.000	72%

Data perbandingan menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan antara penggunaan baja dan bambu dalam konstruksi plat beton. Apabila memakai baja, kebutuhan material relatif lebih besar dengan total pengeluaran Rp.128.000 per meter persegi. Sebaliknya, apabila memanfaatkan bambu yang telah melalui tahap pengawetan, biaya yang diperlukan jauh lebih rendah, hanya Rp.36.000 untuk luasan yang sama. Selisih tersebut menghasilkan penghematan hingga 72% dari total biaya, sehingga pemanfaatan bambu dapat menjadi solusi ekonomis, khususnya untuk bangunan sederhana dan infrastruktur skala kecil. Temuan ini mengindikasikan bahwa bambu tidak hanya berpotensi sebagai alternatif material lokal yang terjangkau, tetapi juga selaras dengan prinsip pembangunan berkelanjutan karena mengurangi ketergantungan pada sumber daya non-terbarukan.

IV. Kesimpulan

Dari hasil kajian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Bambu memiliki potensi besar sebagai alternatif material pengganti baja tulangan dalam konstruksi plat beton bertulang. Dari sisi keberlanjutan, bambu mendukung prinsip ekonomi sirkular karena berasal dari sumber daya terbarukan, memiliki siklus tumbuh cepat, dan dapat diolah kembali setelah masa layanannya berakhir.
2. Uji kuat lentur menunjukkan bahwa penambahan jumlah layer tulangan bambu berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kapasitas beban serta deformasi yang dapat ditahan oleh elemen struktur.
3. Analisis biaya memperlihatkan bahwa pemanfaatan bambu dapat menekan biaya konstruksi hingga 72% dibandingkan baja tulangan. Temuan ini tidak hanya menegaskan aspek efisiensi dari sisi ekonomi, tetapi juga menunjukkan potensi penerapan yang lebih luas pada konstruksi dengan anggaran terbatas serta pada pengembangan infrastruktur di kawasan pedesaan. Dengan demikian, bambu dapat diposisikan sebagai material alternatif yang tidak hanya mendukung aspek kekuatan dan efisiensi, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap tercapainya pembangunan berkelanjutan di sektor konstruksi.

V. Daftar Pustaka

- [1] D. Mahardika, R. P. Dewanti, and A. Subagyo, "Strategi Green Construction dalam Konstruksi Berkelanjutan Untuk Bangunan Gedung Ramah Lingkungan Dan Ekonomis di Indonesia," *Jurnal Ilmu Multidisiplin*, vol. 5, no. 2, pp. 52–61, 2025, doi: 10.37329/metta.v5i2.4092.
- [2] M. A. Supariarta, A. M. Hidayati, S. G. Tonyes, and Y. Ciawi, "Graphene Oxide in Construction : A Comprehensive Review on the Prospects , Challenges , and Sustainable Cement Reinforcement," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 29, no. 1, pp. 70–83, 2023, doi: 10.14710/mkts.v29i1.55906.
- [3] A. A. Rahman, and S. Suharyani "Optimalisasi Material Lokal Sebagai Strategi Pengurangan Emisi Karbon : Studi Kasus Co-Housing Samadya," *Prosiding (SIAR) Seminar Ilmiah Arsitektur*, pp. 754-764, 2019.

- [4] S. Sumarni, A. P. Yusti, and C. Habsya, "Pengaruh Substitusi Agregat Halus dengan Limbah Ban Karet terhadap Karakteristik Mekanik dan Kemampuan Absorpsi Suara pada Panel Dinding Beton," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 30, no. 2, pp. 275–283, 2025, doi: 10.14710/mkts.v30i2.65498.
- [5] E. Widayanto, K. A. Wiswamitra, and B. R. Subchan, "Advances in Bamboo Science Flexural behaviour of bamboo-reinforced concrete beams soaked in salt solution and molasse treatments and wrapped in fibreglass tape : An experimental and numerical study," *Advance in Bamboo Science*, vol. 11, 100147, 2025, doi: 10.1016/j.bamboo.2025.100147.
- [6] A. M. Ummati, I. P. E. Sarasantika, G. T. Fanna, S. Syuhada, and A. P. Nasution, "Performance of the Pivot Hooks to Enhance the Flexural Capacity of Bamboo Reinforced Concrete Beams," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 29(2), pp. 308–315, 2024, doi: 10.14710/mkts.v29i2.48288.
- [7] S. Munoz, M. R. Hosseini, and R. H. Crowford, "Exploring the environmental assessment of circular economy in the construction industry: A scoping review," *Sustainable Production and Consumption*, 42, pp. 196–210. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.09.022>.
- [8] E. Suriani, "Bambu Sebagai Alternatif Penerapan Material Ekologis : Potensi dan Tantangannya," *EMARA Indonesian Journal of Architecture*, vol. 3, no. 1, pp. 33-42, 2017.
- [9] M. Norouzi, M. Chafer, L. F. Cabeza, L. Jimenez, and D. Boer, "Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis," *Journal of Building Engineering*, 44, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102704>.
- [10] M. Sparrevik, L. D. Boer, O. Michelsen, C. Skaar, H. Knudson, and A. M. Fet, "Circular economy in the construction sector: advancing environmental performance through systemic and holistic thinking," *Environment Systems and Decisions*, vol. 41, no. 3, pp. 392–400, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10669-021-09803-5>.
- [11] I. Papamichael, I. Voukkali, P. Loizia, and A. A. Zorpas, "Construction and demolition waste framework of circular economy : A mini review," *Waste Management & Research*, vol. 41, no. 12, pp. 1728-1740, 2023, <https://doi.org/10.1177/0734242X231190804>.
- [12] E. Gasparri, S. Arasteh, A. Kuru, P. Stracchi, and A. Brambilla, "Circular economy in construction : A systematic review of knowledge gaps towards a novel research framework," *Frontiers in Built Environment*, pp. 1–14, 2023, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1239757>.
- [13] M. Finamore, and C. Oltean-dumbrava, "Circular economy in construction - findings from a literature review," *Heliyon*, vol. 10, no. 15, e34647, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34647>.
- [14] A. S. Budi, E. Rismunarsi, and Kharir, "Kapasitas Lentur Balok Beton Tulangan Bambu Ori Takikan Jarak 20 dan 30 mm," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 22, no. 2, pp. 145–149, 2016.
- [15] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-2834-2000: Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*, Jakarta, Indonesia: BSN, 2000.
- [16] ASTM International, *ASTM C78/C78M-22, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.
- [17] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 4154:2014: Metode Uji Kuat Lentur Beton dengan Balok Sederhana*, Jakarta, Indonesia: BSN, 2014.
- [18] W. Kushartomo, and D. P. Sari, "Sifat Mekanis Beton Normal dengan Campuran Tepung Marmer," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 24, no. 1, pp. 71–78, 2018.
- [19] F. T. Wulandari, "Karateristik dan Sifat Fisik Bambu Petung (*Dendrocalamus asper*. Backer) di Kawasan Hutan Kemasyarakatan (HKM) Desa Aik Bual, Provinsi Nusa Tenggara Barat," *Buletin LOUPE*, vol. 15, no. 01, pp. 44-49, 2019.
- [20] C. Wu, Y. Wei, J. Chen, G. Wang, and Y. Lin, "Experimental and theoretical investigation on bond performance between surface-modified bamboo scrimber bars and concrete," *Journal of Building Engineering*, 98, 111261, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111261>.
- [21] W. Chen, P. Liang, W. Wang, P. Chiang, J. Rysavy, J. Cespiva, and J. Chang, "Applications, life cycle assessment, and circular economy of bamboo torrefaction for sustainability: A state-of-the-art review," *Bioresource Technology*, 431, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132629>.
- [22] P. Kumar, P. Gautam, S. Kaur, M. Chaudhary, A. Afreen, and T. Mehta, "Bamboo as reinforcement in structural concrete," *Materials Today: Proceedings*, 46, pp. 6793–6799, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.342>.

-
- [23] M. Yadav, and A. Mathur, "Bamboo as a sustainable material in the construction industry: An overview," *Materials Today: Proceedings*, 43, pp. 2872–2876, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.125>.
- [24] M. Terai, "Bond properties of bamboo reinforcement," *Journal of Building Engineering*, 86, 2024, 108890. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108890>.
- [25] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2847:2019: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*, Jakarta, Indonesia: BSN, 2019.
- [26] American Concrete Institute (ACI Committee 318), *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2019.
- [27] American Concrete Institute (ACI Committee 224), *Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-01)*, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2001.
- [28] J. Ahmad, Z. Zhou, and A. Deifalla, "Structural properties of concrete reinforced with bamboo fibers: a review," *Journal of Materials Research and Technology*, 24, pp. 844–865, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.038>.
- [29] O. Karakus-zambak, and O. C. Celik, "Behavior of bamboo reinforced concrete (BRC) beams under monotonic and dynamic loads," *Construction and Building Materials*, 458, 139683, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139683>.
- [30] H. Archila, S. Kaminski, D. Trujillo, E. Escamilla, K. A. Harries, "Bamboo reinforced concrete : a critical review," *Materials and Structures*, vol. 51, no. 4, pp. 1–18, 2018, <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1228-6>.
- [31] I. P. Das, P. G. Kini, and S. Prashant, "A systematic literature review of bamboo as reinforcement in concrete," *Discover Sustainability*, 6:306, 2025, <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01132-w>.
- [32] Muhtar, "The use of a bamboo reinforced concrete foundation for a simple environmentally friendly house in Indonesia," *Advances in Bamboo Science*, 6, 100056, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2024.100056>.
- [33] R. Sivakumar, R. Ganesan, A. Latha, K. Moolchandani, A. K. Sharma, S. R. K. Mishra, F. Khan, A. K. Yadav, and L. Ayele, "Experimental Analysis on the Feasibility of Bamboo Reinforcement in Concrete Mix Design and Comparison with Steel Reinforced Concrete," *Advances in Materials Science and Engineering*, 1- 11, 2023, <https://doi.org/10.1155/2023/6931291>.