

STUDI LITERATUR METODE PENGUJIAN DAN JENIS KERUSAKAN PADA BALOK BAMBU UTUH

G. M. M. Syahtama¹, I.S. Irawati^{1*}, A.F. Setiawan¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: inggar_septhia@ugm.ac.id

INTISARI

Bambu merupakan material alami yang melimpah di Indonesia, memiliki kekuatan tinggi, ringan, dapat diperbarui, serta berpotensi besar sebagai material konstruksi berkelanjutan. Namun, sifat ortotropik bambu membuat perilaku mekanisnya berbeda dengan kayu, sehingga standar pengujian kayu tidak dapat dijadikan acuan langsung untuk bambu. ISO 22157:2019 telah menetapkan metode pengujian lentur bambu, tetapi belum memberikan deskripsi detail mengenai bentuk kegagalan. Oleh karena itu, studi literatur ini dilakukan untuk meninjau secara sistematis metode pengujian dan jenis-jenis kegagalan lentur pada bambu utuh. Hasil kajian menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian menggunakan ketentuan ISO 22157, khususnya panjang bentang minimal 30D untuk memastikan kegagalan lentur murni. Apabila bentang lebih pendek dari *critical length*, kegagalan geser lebih dominan terjadi. Variasi konfigurasi *saddle*, panjang bentang, dan kecepatan pembebanan juga memengaruhi pola kegagalan. Secara umum, tipe kegagalan lentur bambu dapat dikelompokkan berdasarkan panjang bentang dan jenis beban, yaitu momen dan geser. Beberapa peneliti bahkan mengidentifikasi mode geser tambahan, yaitu *splitting failure* (mode I), *in-plane shear* (mode II), dan kombinasi keduanya. Studi ini menegaskan pentingnya pengembangan standar pengujian yang lebih komprehensif dengan deskripsi eksplisit tipe kegagalan lentur bambu. Hal tersebut akan mendukung penerapan bambu sebagai material struktur yang andal dan berkelanjutan.

Kata kunci: Bambu, pengujian lentur, *four-point bending*, kegagalan struktur, *critical length*.

1 PENDAHULUAN

Bambu merupakan salah satu sumber daya hayati yang melimpah di Indonesia (Ritonga et al., 2023; Ervianti et al., 2018; Setiawati et al., 2017; Christanty et al., 1997). Sebagai tanaman cepat tumbuh dengan siklus panen relatif singkat, bambu memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Hutan bambu memiliki kapasitas penyimpanan dan penyerapan karbon yang tinggi (Pan et al., 2023; Rincón et al., 2023; Liu et al., 2023; Xu et al., 2022). Dengan kekuatan yang sebanding dengan kayu, bambu banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti furnitur, tekstil, hingga konstruksi (Yudhistira, 2022; Supriadi and Trisatya, 2021; Nurdiah and Juniwati, 2020; Maslucha et al., 2020; Lianto et al., 2019; Sofiana et al., 2018, 2017; Archila-Santos et al., 2012). Oleh karena itu, produk bambu dapat menjadi alternatif yang efektif untuk menggantikan produk kayu.

Batang bambu tersusun atas ruas-ruas berbentuk tabung berongga dengan sekat diafragma internal dan tonjolan eksternal pada setiap batas ruasnya. Batang bambu merupakan material yang dapat diperbarui, ringan, serta memiliki kekuatan tinggi, terutama dalam menahan gaya tarik. Ruas bambu berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik dan modulus tekan radial (Meng et al., 2023; Chaowana et al., 2021; Liese and Köhl, 2015; Taylor et al., 2015; Wang et al., 2012). Bambu juga memiliki sifat ortotropik, yaitu sifat mekanisnya berbeda pada arah longitudinal, radial, dan tangensial. Penelitian menunjukkan bahwa kekuatan arah longitudinal lebih dominan memengaruhi sifat mekanis bambu (Akinbade et al., 2020; Al-Rukaibawi et al., 2021; Candelaria et al., 2019; Akinbade et al., 2019; Mannan et al., 2017; Dixon and Gibson, 2014).

Mengingat bambu banyak digunakan di bidang konstruksi, dengan bentuk dan sifat ortotropiknya, maka kekuatan bambu dalam menahan beban, termasuk beban lentur, perlu diketahui untuk menjamin keselamatan pengguna maupun penghuni bangunan. Pengujian untuk mengetahui kekuatan bambu tersebut harus dilakukan sesuai dengan standar yang berlaku. Standar pengujian material bambu yang berlaku saat ini adalah ISO 22157:2019, yang juga diadopsi menjadi SNI ISO 22157:2019. Namun pada kasus pengujian lentur, standar tersebut tidak mencantumkan dengan jelas jenis-jenis kegagalan lentur yang mungkin terjadi pada bambu utuh. Hal ini berbeda dengan standar pengujian kayu, seperti ASTM D143-94, yang telah memuat informasi mengenai jenis kegagalan lentur lengkap dengan ilustrasinya. Karena bentuk bambu dan kayu berbeda, maka pola kegagalan lentur bambu kemungkinan besar juga berbeda dengan kegagalan lentur kayu. Dengan demikian, pola kegagalan kayu pada standar kayu tidak dapat dijadikan acuan untuk kegagalan lentur bambu.

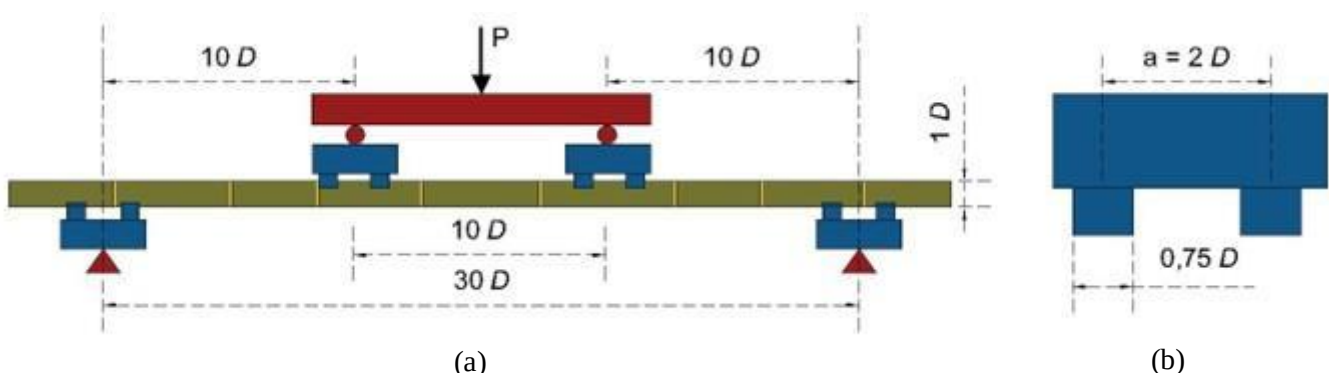
Informasi mengenai pola kegagalan lentur bambu sangat penting untuk mendukung aplikasi bambu di bidang konstruksi. Namun, karena informasi tersebut belum tersedia dalam standar pengujian bambu, studi literatur terhadap penelitian-penelitian lentur bambu, khususnya yang berkaitan dengan pola kegagalan lentur, menjadi sangat penting untuk dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk meninjau secara sistematis metode dan jenis-jenis kerusakan lentur yang umum terjadi pada batang bambu utuh dari penelitian-penelitian terdahulu.

Dalam rangka mencapai tujuan penelitian, pendekatan yang digunakan adalah metode studi literatur dengan menelaah berbagai penelitian terdahulu yang berfokus pada pengujian lentur bambu utuh. Proses kajian dilakukan melalui pengumpulan dan observasi hasil-hasil penelitian terdahulu, khususnya yang membahas konfigurasi uji lentur, parameter pengujian, serta dokumentasi pola kegagalan. Kriteria artikel penelitian yang digunakan untuk studi literatur dibatasi pada artikel yang membahas tentang uji lentur bambu utuh dengan menggunakan metode *four-point bending* batang bambu utuh. Pengujian lentur bambu berupa bilah dan produk rekayasa bambu tidak dimasukkan dalam studi literatur. Pencarian artikel menggunakan basis data dari laman *Google Scholar* dan *ScienceDirect*. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian yaitu *four-point bending*, *flexural*, *ISO 22157*, *bamboo culm*, dan *failure*. Literatur yang ditinjau dibandingkan dengan standar ISO 22157:2019 untuk mengidentifikasi kesesuaian maupun perbedaannya. Selanjutnya, informasi yang diperoleh dikompilasi dan dikategorikan berdasarkan jenis-jenis kegagalan lentur yang dilaporkan. Observasi juga difokuskan pada faktor-faktor teknis, seperti panjang bentang, bentuk serta posisi *saddle*, dan kecepatan pembebanan, yang berpengaruh terhadap variasi pola kerusakan.

2 RESUME STANDAR PENGUJIAN KUAT LENTUR BAMBUN SEJAJAR SERAT

Konfigurasi pengujian lentur bambu sejajar serat berdasarkan ISO 22157:2019 dapat dilihat pada Gambar 1(a). Metode pengujian yang disyaratkan dalam ISO 22157:2019 adalah metode *four point bending test*, di mana dua beban yang sama besar diaplikasikan pada spesimen bambu yang ditumpu sederhana, sehingga tercipta daerah dengan momen konstan di antara titik pembebanan. Untuk mencegah kerusakan lokal seperti *crushing* dan *kinking* pada bambu, beban dan reaksi diberikan melalui empat tumpuan *saddle* yang menyebarkan gaya secara merata pada sebagian keliling bambu. Pada bagian tumpuan, batang bambu dibiarkan berotasi bebas terhadap sumbu lenturnya tanpa adanya tahanan momen. Gambar 1 menunjukkan bahwa jarak minimal pusat *saddle* tumpuan dengan pusat *saddle* titik beban terdekat sebesar $10D$ dengan D adalah diameter luar bambu. Jarak minimal antara dua pusat *saddle* beban juga $10D$. Panjang minimal benda uji dari pusat ke pusat *saddle* tumpuan adalah $30D$.

Bentuk *saddle* sesuai ISO 22157:2019 dapat dilihat pada Gambar 1(b). ISO 22157:2019 tidak menyebutkan secara eksplisit detail dimensi *saddle*. ISO 22157:2019 hanya menyebutkan bahwa beban luar dan reaksi tumpuan diberikan ke benda uji secara merata pada setengah keliling batang bambu serta sepanjang jarak memanjang yang cukup, untuk menghindari terjadinya *crushing* (hancur) atau *kinking* (lipatan/tekukan serat) pada dinding batang bambu. Dimensi *saddle* yang ditunjukkan pada Gambar 1(b) pada paper ini diperoleh dari ISO 22157:2019, dengan nilai angka yang diperoleh melalui perkiraan berdasarkan hasil penskalaan gambar pada standar ISO tersebut. ISO 22157:2019 tidak menyebutkan bahwa posisi *saddle* harus pada ruas. Hal tersebut juga tampak pada Gambar 1(a) yang menunjukkan bahwa posisi beban titik *saddle* tidak berada pada ruas bambu.



Gambar 1 (a) Pengujian Lentur Bambu sesuai ISO 22157:2019, (b) Tampak Depan Saddle

Penjelasan terkait bentuk dan posisi penempatan *saddle* pada benda uji berdasarkan ISO 22157:2019 berbeda dengan penjelasan pada ISO 22157:2004. Bentuk *saddle* pada ISO 22157:2019 serupa dengan bentuk *saddle* pada ISO 22157:2004. Hanya, pada ISO 22157:2004 terdapat penjelasan secara eksplisit bahwa panjang *saddle* a menyesuaikan sehingga bagian *saddle* yang menyentuh bambu terletak pada bagian ruas bambu. Meskipun ISO

22157 telah menetapkan metode standar untuk mengukur kekuatan dan kekakuan lentur bambu, standar ini masih memiliki keterbatasan, khususnya dalam hal deskripsi jenis-jenis kerusakan yang terjadi selama pengujian lentur. Dokumen standar hanya membedakan kegagalan yang terjadi di daerah momen konstan sebagai kegagalan lentur, sementara kegagalan pada daerah geser dapat melibatkan mekanisme geser, lentur, atau kombinasi keduanya tanpa memperlihatkan ilustrasi skema gambar kegagalan.

3 TINJAUAN PENGUJIAN LENTUR *FOUR POINT BENDING* BAMBU TERDAHULU

Sejumlah penelitian telah dilakukan terkait pengujian lentur *four-point bending* pada beragam spesies bambu. Kompilasi penelitian terdahulu terkait jenis spesies, panjang specimen, kecepatan pembebanan, dan konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Lampiran 1. Namun, semua peneliti tidak menjelaskan dimensi dudukan *saddle* benda uji lentur secara detail.

Lampiran 1 menunjukkan semua peneliti, kecuali Chaowana et al 2021, mengikuti ketentuan persyaratan minimal panjang bentang minimal antar tumpuan berdasarkan standar ISO 22157. Panjang bentang antar tumpuan pada pengujian lentur bambu yang dilakukan oleh Chaowana et al 2021 tidak memenuhi standar ISO 22157 dikarenakan keterbatasan panjang bambu total yang tersedia untuk membuat specimen. ISO 22157:2019 mensyaratkan panjang bentang minimal antar tumpuan pada pengujian lentur sebesar $30D$, seperti yang telah ditunjukkan oleh Gambar 1(a). Panjang bentang $30D$ sesuai dengan ketentuan ISO 22157 tersebut diperlukan untuk mengobservasi kegagalan lentur murni. Apabila panjang bentang antar tumpuan kurang dari *critical length* maka kegagalan akibat gaya geser akan terjadi (Vaessen dan Janssen 1997). Penjelasan tentang *critical length* juga dapat dijumpai pada ISO/TR 22157-2:2004 Pasal 10.4. Persamaan *critical length* yang diusulkan oleh Vaessen dan Janssen (1997) dapat dilihat pada Persamaan (1). Persamaan *critical length* yang terdapat pada ISO 22157:2004 dapat dilihat pada Persamaan (2).

$$l_c = \frac{R \varepsilon_{max} E_R}{\tau_{max}} \left[\frac{14x^3 - 60x^2 + 100 - 80}{20(x - 2)} \right] \quad (1)$$

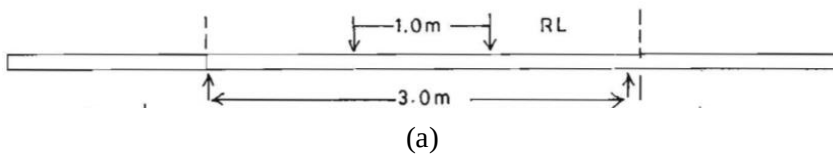
dengan l_c adalah *critical length*; R adalah jari jari pada sisi terluar bambu; ε_{max} adalah regangan maksimum; E_R adalah modulus elastisitas bambu lapisan luar; τ_{max} adalah tegangan geser maksimum; dan x adalah tebal bambu dibagi jari-jari R .

$$L = \frac{(1,76 \times \varepsilon_{ult} \times E_R \times R)}{\tau_{ult}} \quad (2)$$

dengan L adalah bentang tumpuan dalam mm; ε_{ult} adalah regangan longitudinal ultimit pada bambu; E_R adalah modulus elastisitas pada sisi kulit terluar dari batang; R adalah jari jari terluar dari batang, setengah dari diameter; dan τ_{ult} adalah tegangan tangensial ultimit.

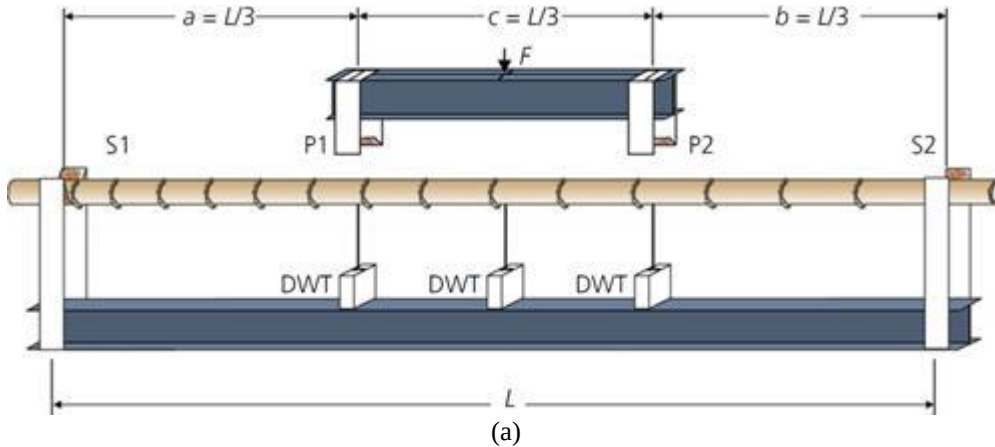
Kecepatan pembebanan juga dijelaskan pada beberapa penelitian (lihat Lampiran 1). Kecepatan pembebanan 0.5mm/s digunakan pada beberapa penelitian, sementara penelitian lain menggunakan kecepatan pembebanan yang berbeda. Kecepatan pembebanan yang disyaratkan ISO 22157:2004 sebesar 0.5 mm/s. ISO 22157:2019 tidak mensyaratkan secara eksplisit kecepatan pembebanan. Namun, ISO 22157:2019 menyebutkan bahwa kecepatan pembebanan harus diatur sedemikian rupa agar kegagalan tercapat dalam waktu (300 ± 120) detik.

Resume konfigurasi pengujian dan bentuk *saddle* yang digunakan masing-masing peneliti dapat dilihat pada Lampiran 1. Hampir semua peneliti menggunakan konfigurasi pengujian sesuai dengan ISO 22157:2019. Namun, terdapat perbedaan pada posisi dan bentuk *saddle*. Tidak semua *saddle* berada pada ruas. ISO 22157:2019 tidak eksplisit mensyaratkan posisi *saddle* berada pada ruas bambu. Namun, ISO 2215:2004 mensyaratkan secara eksplisit bahwa *saddle* diletakkan pada ruas. Terkait bentuk *saddle*, beberapa peneliti menggunakan bentuk *saddle* sesuai rekomendasi ISO 22157:2019 dan ISO 22157:2004 (Fritz et al., 2025; Lorenzo et al., 2021; Gnanaharan et al., 1995). Namun, beberapa peneliti menggunakan bentuk *saddle* tidak sesuai dengan ISO 22157:2019 dan ISO 22157:2004 (Cacanando et al., 2024; Seixas et al., 2024; Musthaffa et al., 2024; Mergiauw et al., 2023; Correal et al., 2022; Chaowana et al., 2021; Lorenzo et al., 2019; Sá Ribeiro et al., 2017; Nurmadi et al., 2017; Trujillo et al., 2017; Richard et al., 2017; Vaessen and Janssen, 1997). Pengaruh bentuk *saddle* dan posisi *saddle* ini perlu dilakukan kajian analisis lebih lanjut, baik berupa eksperimen maupun analisis numerik, sehingga dapat digunakan untuk memperbaiki atau memastikan kehandalan metode pengujian lentur bambu utuh yang ada pada ISO 22157:2019 untuk memperoleh probabilitas tinggi benda uji mengalami kegagalan lentur.

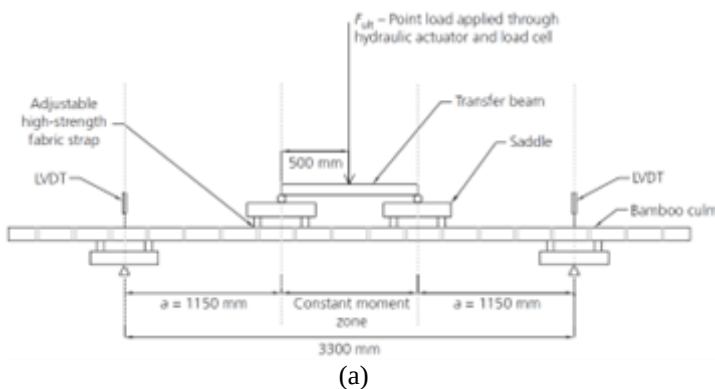


(a) (b)

Gambar 2 (a) Konfigurasi Pengujian Lentur, dan (b) Bentuk Saddle oleh R. Gnanaharan et al (1995)

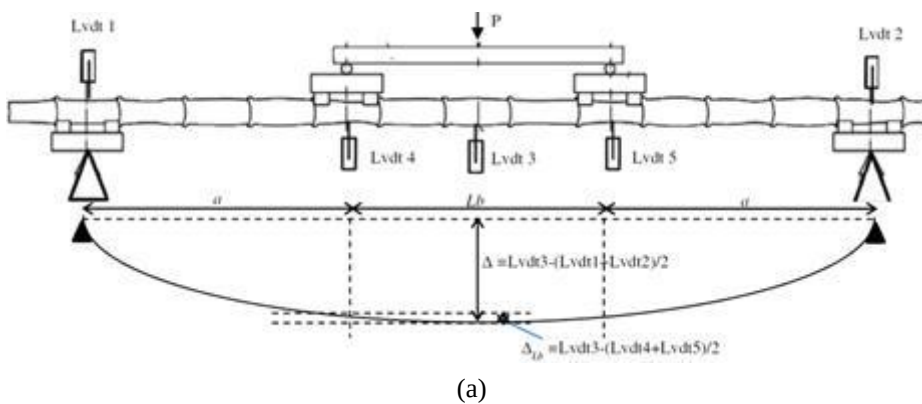


Gambar 3 (a) Konfigurasi Pengujian Lentur, (b) Bentuk Saddle Support, dan (c) Bentuk Saddle Beban oleh Richard et al (2017)



(a) (b)

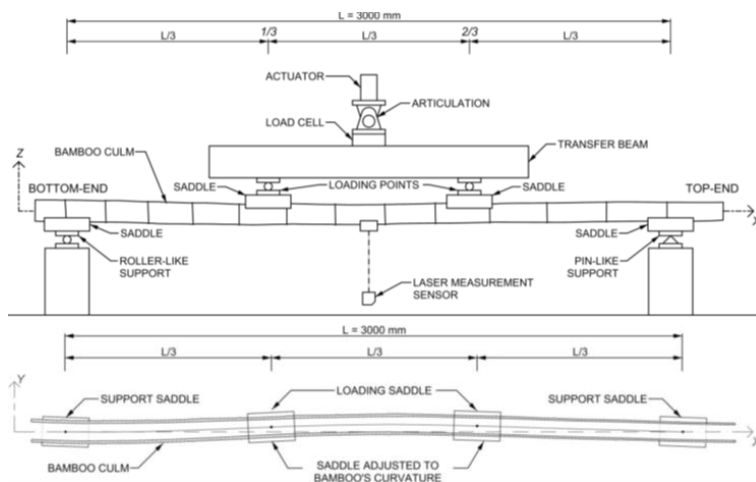
Gambar 4 (a) Konfigurasi Pengujian Lentur dan (b) Bentuk Saddle oleh Trujillo et al (2017)



Gambar 5 (a) Konfigurasi Pengujian Lentur, (b) Posisi dan bentuk Saddle pada Batang oleh Nurmadina et al (2017)



Gambar 6 Konfigurasi Pengujian Lentur oleh Sá Ribeiro et al (2017)



(a)



(b)

Gambar 7 (a) Konfigurasi Pengujian Lentur, dan (b) Bentuk Saddle oleh Lorenzo et al (2019)

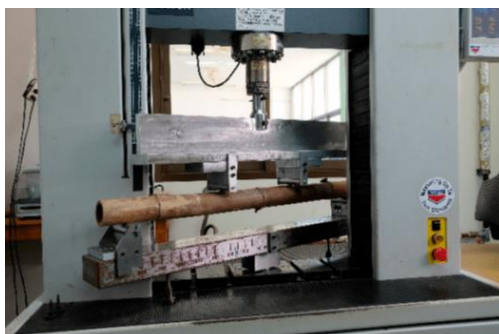


(a)



(b)

Gambar 8 (a) Jenis Saddle Dua Kaki dan (b) Jenis Saddle Memanjang oleh Lorenzo et al (2021)

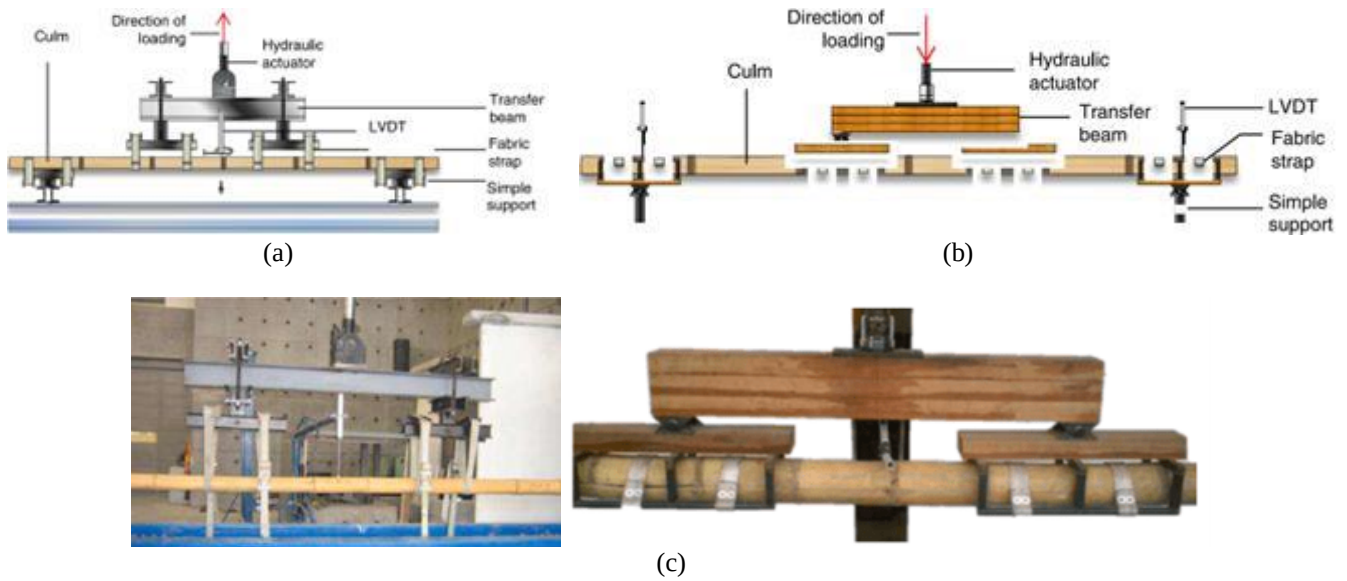


(a)



(b)

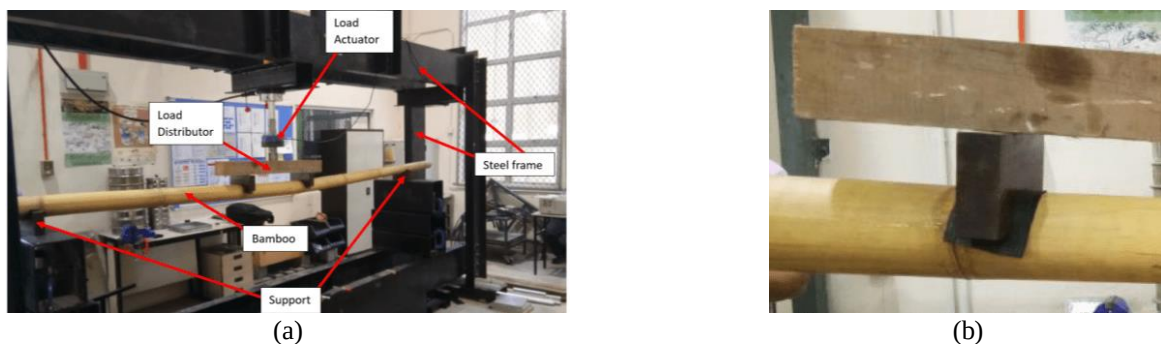
Gambar 9 (a) Konfigurasi Pengujian Lentur, dan (b) Bentuk Saddle oleh Chaowana et al (2021)



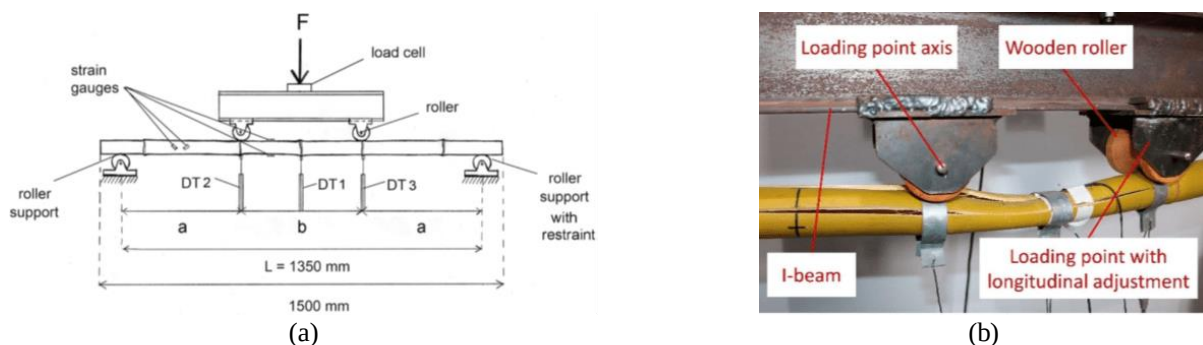
Gambar 10 (a) Konfigurasi pembebanan keatas, (b) Konfigurasi pembebanan kebawah, dan (c) Bentuk Saddle oleh Correal et al (2022)



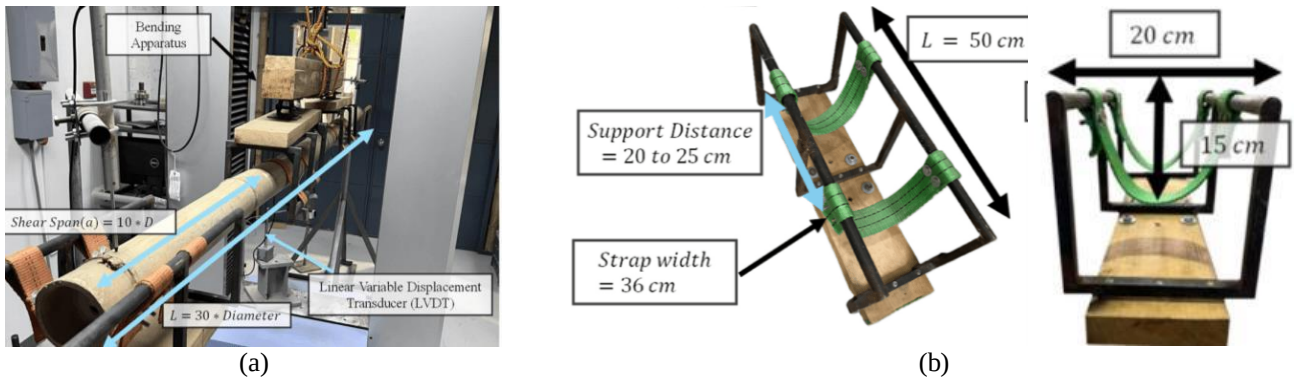
Gambar 11 Konfigurasi Pengujian oleh Mergiauw et al (2023)



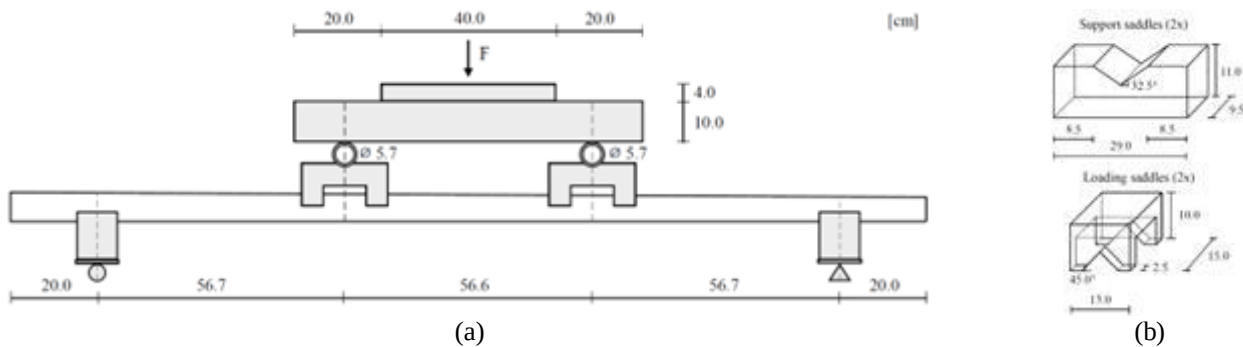
Gambar 12 (a) Konfigurasi Pengujian Lentur, dan (b) Bentuk Saddle oleh Musthaffa et al (2024)



Gambar (a) Konfigurasi Pengujian Lentur, dan (b) Bentuk Saddle oleh 13 Seixas et al (2024)



Gambar 14 (a) Konfigurasi Pengujian Lentur, dan (b) Bentuk Saddle oleh Cacando et al (2024)



Gambar 15 (a) Konfigurasi Pengujian Lentur, dan (b) Bentuk Saddle oleh Fritz et al (2025)

4 BENTUK KEGAGALAN PADA PENGUJIAN LENTUR

ISO 22157:2019 Pasal 12.4 menjelaskan bahwa kegagalan yang terjadi di daerah momen konstan dikategorikan sebagai kegagalan lentur. Pasal tersebut juga menjelaskan bahwa kegagalan yang berada di bentang geser dapat disebabkan oleh beberapa kemungkinan, yaitu geser, lentur, atau kombinasi keduanya. Namun, ISO 22157:2019 tidak menjelaskan lebih detail terkait ilustrasi bentuk kerusakannya. Hal ini berbeda dengan standar pengujian kayu ASTM D143. ASTM D143 Pasal 8.7 mendeskripsikan secara jelas dan lengkap dengan ilustrasi gambar terkait tipe kegagalan lentur pada benda uji *small clear specimens* kayu.

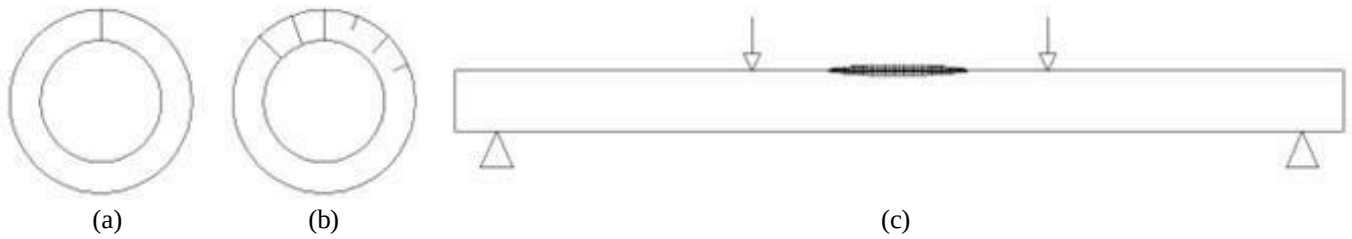
Hasil studi literatur terkait tipe kegagalan bambu pada pengujian lentur dapat dilihat pada Lampiran 1. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengelompokan tipe kegagalan pada pengujian lentur bambu dapat diwakili oleh hasil penelitian yang dilakukan oleh Vaessen dan Janssen (1997) dan Trujillo et al (2017). Vaessen dan Janssen (1997) mengelompokkan kegagalan berdasarkan perbandingan panjang bentang batang tumpuan ke tumpuan terhadap *critical length*, yang dihitung berdasarkan Persamaan (2), yaitu kegagalan pada benda uji dengan bentang lebih dari *critical length*, kurang dari *critical length*, dan mendekati *critical length*. Secara detail, Vaessen dan Janssen (1997) menjelaskan bahwa terdapat 4 tipe kegagalan ketika panjang bentang benda uji lentur lebih dari *critical length* dan terdapat 2 tipe kegagalan ketika panjang benda uji lentur di bawah dan mendekati *critical length*. Trujillo et al (2017) mengklasifikasikan 6 tipe kegagalan, yaitu *shear plane between fibers*; *bending-compression failure*; *bending-collapse of culm*; *bending-failure under support*; *bending-tension failure*; dan kombinasi dari masing-masing kegagalan.

Pada kasus kegagalan geser pada pengujian bambu, Richard et al (2017) secara spesifik menyebutkan terdapat 3 mode kegagalan geser, yaitu kegagalan geser mode I, kegagalan geser mode II, dan kegagalan geser kombinasi mode I dengan mode II. Kegagalan geser mode I yaitu *splitting failure*. Kekuatan bambu terhadap *splitting failure* dapat dihitung menggunakan Persamaan 3, dengan V adalah gaya geser internal pada lokasi yang dipertimbangkan; I adalah momen inersia dari penampang batang bambu; t adalah lebar penampang yang menahan gaya geser; A adalah luas area di atas penampang yang ditinjau; dan y adalah jarak antara pusat massa (*centroid*) area A dengan sumbu netral penampang.

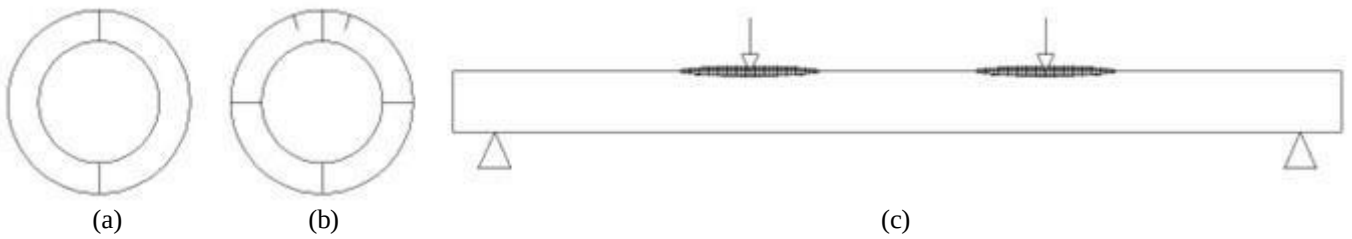
$$\tau = \frac{VAy}{It} \quad (3)$$

Kegagalan geser kombinasi mode I dan mode II dinyatakan dalam Persamaan 4, dengan τ_{II} tegangan mode II; σ_{II} adalah tegangan mode I; τ_{IIcr} adalah tegangan kritis mode II; dan σ_{Icr} adalah tegangan kritis mode I (Chai, 1988).

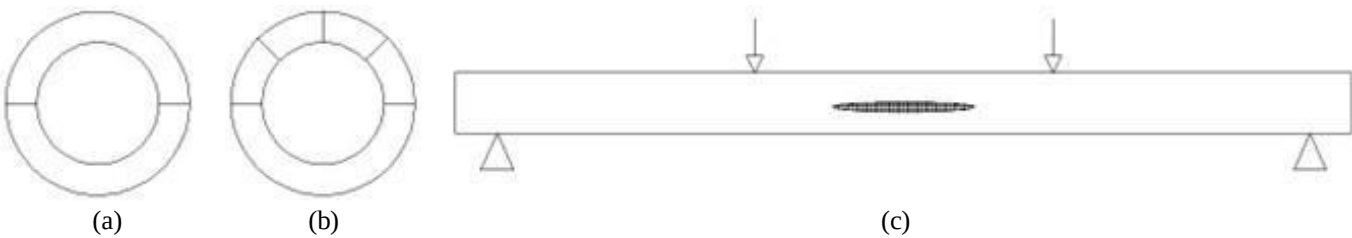
$$\left(\frac{\tau_{II}}{\tau_{IIcr}}\right)^n + \left(\frac{\sigma_I}{\sigma_{Icr}}\right)^m < 1 \quad (4)$$



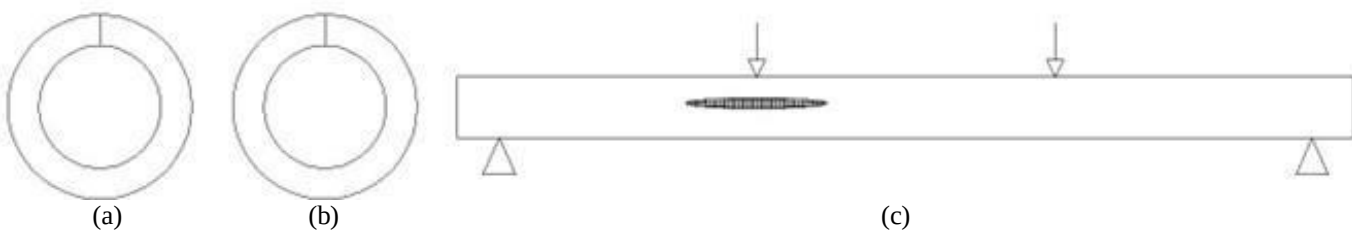
Gambar 16 (a) Retak Pertama, (b) Retak akhir, dan (c) Posisi Retak tipe Kegagalan 1 pada spesimen lebih dari *Critical Length* oleh Vaessen dan Janssen (1997)



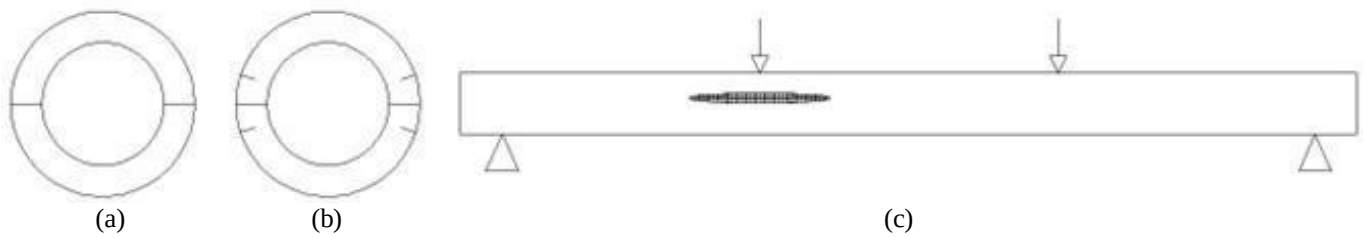
Gambar 17 (a) Retak Pertama, (b) Retak akhir, dan (c) Posisi Retak tipe Kegagalan 2 pada spesimen lebih dari *Critical Length* oleh Vaessen dan Janssen (1997)



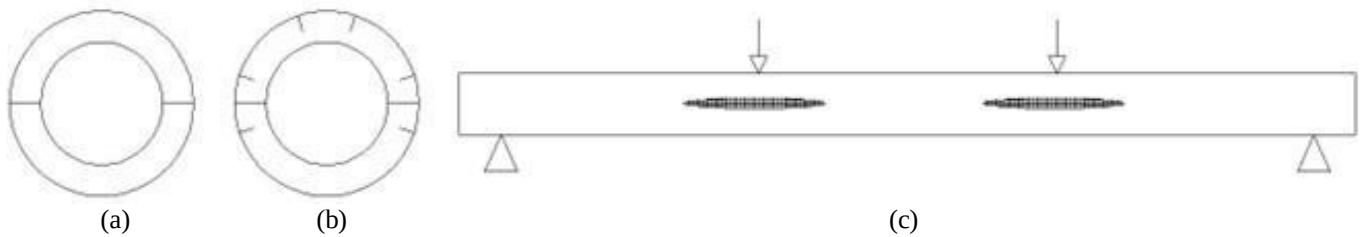
Gambar 18 (a) Retak Pertama, (b) Retak akhir, dan (c) Posisi Retak tipe Kegagalan 3 pada spesimen lebih dari *Critical Length* oleh Vaessen dan Janssen (1997)



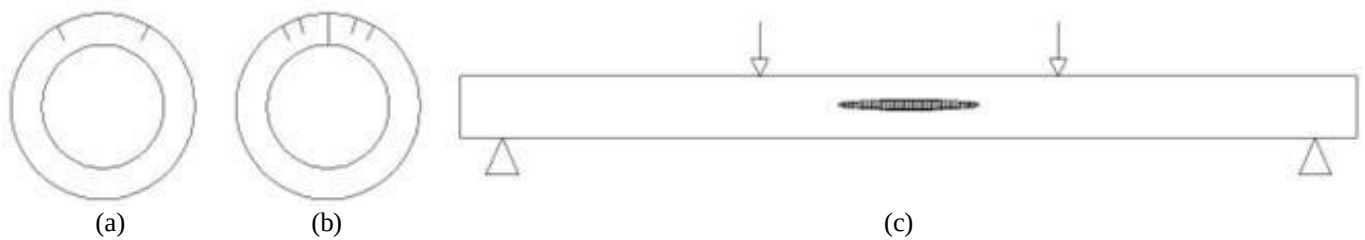
Gambar 19 (a) Retak Pertama, (b) Retak akhir, dan (c) Posisi Retak tipe Kegagalan 4 pada spesimen lebih dari *Critical Length* oleh Vaessen dan Janssen (1997)



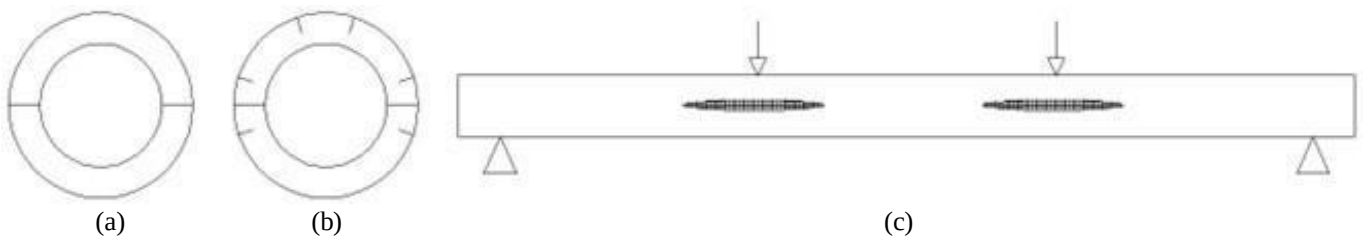
Gambar 20 (a) Retak Pertama, (b) Retak akhir, dan (c) Posisi Retak tipe Kegagalan 1 pada spesimen kurang dari *Critical Length* oleh Vaessen dan Janssen (1997)



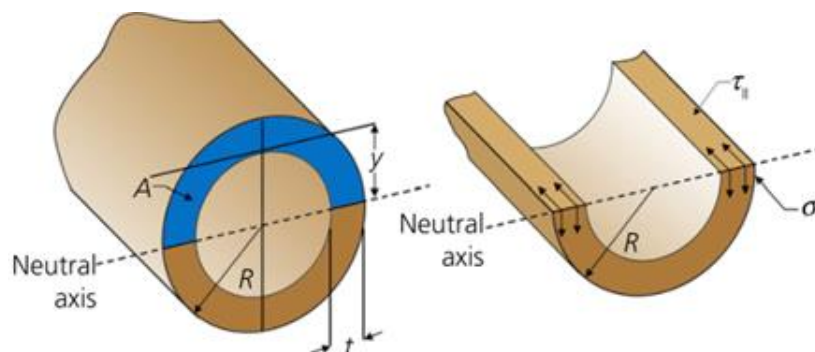
Gambar 21(a) Retak Pertama, (b) Retak akhir, dan (c) Posisi Retak tipe Kegagalan 2 pada spesimen kurang dari *Critical Length* oleh Vaessen dan Janssen (1997)



Gambar 22 (a) Retak Pertama, (b) Retak akhir, dan (c) Posisi Retak tipe Kegagalan 1 pada spesimen mendekati dari *Critical Length* oleh Vaessen dan Janssen (1997)



Gambar 23 (a) Retak Pertama, (b) Retak akhir, dan (c) Posisi Retak tipe Kegagalan 2 pada spesimen mendekati dari *Critical Length* oleh Vaessen dan Janssen (1997)



Gambar 24 Kegagalan Geser dengan mode I (σ_I) dan mode II (τ_{II}) oleh Richard et al (2017)



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 25 (a) *Shear plane between fibers*, (b) *Bending-compression failure*, (c) *Bending-collapse of culm*, (d) *Bending-failure under support*, (e) *Bending-tension failure*, oleh Trujillo et al (2017)



(a)



(b)

Gambar 26 (a) *Compression failure* dan (b) *Failure under support*, oleh Nurmadina et al (2017)



Gambar 27 Kegagalan pada tengah bentang oleh Lorenzo et al (2019)



(a)



(b)

Gambar 28 Kegagalan pada Saddle 2 Kaki dan (b) Kegagalan pada pada Saddle Panjang oleh Lorenzo et al (2021)



Gambar 29 Longitudinal Splitting pada bambu oleh Chaowana *et al* (2021)



(a)



(b)

Gambar 30 (a) *Compression Failure* dan (b) *Tension Failure* oleh Correal *et al* (2022)



Gambar 31 Local Failure pada bambu oleh Musthaffa *et al* (2024)



(a)



(b)

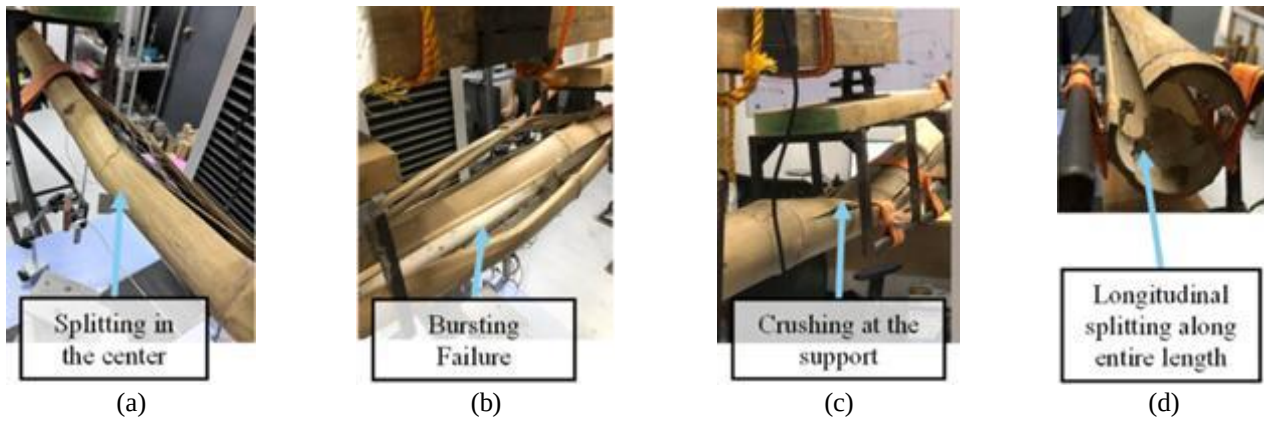


(c)



(d)

Gambar 32 (a) *Local crushing*, (b) *Longitudinal shear cracking along the neutral axis followed by buckling*, (c) *Local buckling*, (d) *Splitting followed by rupture at the tension layer*, oleh Seixas *et al* (2024)



Gambar 33 Beberapa tipe kegagalan lentur pada bambu oleh Cacando et al (2024)



Gambar 34(a) Tensile perpendicular to the fibers dan (b) Failure due to tensile stresses in fiber direction at the nodes oleh Fritz et al (2025)

5 KESIMPULAN

Hasil studi literatur menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian lentur bambu menggunakan ketentuan ISO 22157, khususnya terkait panjang bentang minimal $30D$ untuk memastikan kegagalan lentur murni. Apabila panjang bentang kurang dari *critical length*, maka kegagalan geser lebih dominan terjadi. Perhitungan *critical length* yang diajukan oleh Vaessen dan Janssen (1997) serta ISO 22157:2004 menjadi acuan penting dalam menentukan validitas pengujian. Selain itu, kecepatan pembebanan juga bervariasi antar penelitian, meskipun standar hanya memberikan rentang waktu kegagalan (300 ± 120 detik). Variasi bentuk dan posisi *saddle* turut memengaruhi pola kegagalan, di mana standar ISO 22157:2019 tidak mensyaratkan letak pada ruas, sementara ISO 22157:2004 menyebutkannya secara eksplisit. Perbedaan tersebut menegaskan perlunya konsistensi dalam metode pengujian agar hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara lebih reliabel.

ISO 22157:2019 telah menetapkan kategori kegagalan lentur pada daerah momen konstan, namun belum memberikan ilustrasi detail bentuk kerusakan seperti yang tersedia pada standar kayu ASTM D143. Hasil studi literatur menunjukkan bahwa tipe kegagalan bambu pada pengujian lentur sangat bervariasi, dipengaruhi oleh panjang bentang, konfigurasi pengujian, serta sifat mekanis bambu. Vaessen dan Janssen (1997) mengelompokkan kegagalan berdasarkan *critical length*, sedangkan Trujillo et al (2017) mengklasifikasikan enam tipe kegagalan, mulai dari *shear plane between fibers* hingga *bending-tension failure*. Selain itu, Richard et al (2017) menambahkan tiga mode kegagalan geser, yakni mode I (*splitting failure*), mode II (*in-plane shear*), serta kombinasi keduanya yang dapat dirumuskan secara analitis. Variasi klasifikasi ini menegaskan perlunya standar yang lebih komprehensif untuk mendeskripsikan pola kegagalan lentur bambu secara konsisten dan aplikatif.

REFERENSI

- Akinbade, Y., Harries, K. A., Flower, C. V., Nettleship, I., & Papadopoulos, C. (2019). Through-culm wall mechanical behaviour of bamboo. *Construction and Building Materials*, 216, 485–495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.214>
- Akinbade, Y., Nettleship, I., Papadopoulos, C., & Harries, K. A. (2020). Modelling full-culm bamboo as a naturally varying functionally graded material. *Wood Science and Technology*, 55(1), 155–179. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01246-6>

- Al-Rukaibawi, L. S., Omairey, S. L., & Károlyi, G. (2021). A numerical anatomy-based modelling of bamboo microstructure. *Construction and Building Materials*, 308, 125036. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125036>
- Archila-Santos, H. F., Martin P. Ansell, Ansell, M. P., Pete Walker, & Walker, P. (2012). Low Carbon Construction Using Guadua Bamboo in Colombia. *Key Engineering Materials*, 517, 127–134. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.517.127>
- Cacanando, C. J. D. C., López, L. F., Atienza, E., & Pradhan, N. P. N. (2024). Experimental Characterization of Mechanical Properties of Bambusa Blumeana Bamboo Poles and Determination of Design Values. *Construction and Building Materials*, 490, 142498. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5040792>
- Candelaria, Ma. D. E., Jaime Y. Hernandez, & Hernandez, J. Y. (2019). Determination Of The Properties Of Bambusa Blumeana Using Full-Culm Compression Tests And Layered Tensile Tests For Finite Element Model Simulation Using Orthotropic Material Modeling. *ASEAN Engineering Journal*, 9(1), 54–71. <https://doi.org/10.11113/aej.v9.15508>
- Chaowana, K., Wisadsatorn, S., & Chaowana, P. (2021). Bamboo as a Sustainable Building Material—Culm Characteristics and Properties. *Sustainability*, 13(13), 7376. <https://doi.org/10.3390/su13137376>
- Christanty, L., Kimmins, J. P., & Mailly, D. (1997). ‘Without bamboo, the land dies’: A conceptual model of the biogeochemical role of bamboo in an Indonesian agroforestry system. *Forest Ecology and Management*, 91(1), 83–91. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03881-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03881-9)
- Correal, J. F., Calvo, A. F., Trujillo, D. J. A., & Echeverry, J. S. (2022). Inference of mechanical properties and structural grades of bamboo by machine learning methods. *Construction and Building Materials*, 354, 129116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129116>
- Dixon, P. G., & Gibson, L. J. (2014). The structure and mechanics of Moso bamboo material. *Journal of The Royal Society Interface*, 11(99), 20140321. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0321>
- Ervianti, D., Widjaja, E. A., & Sedayu, A. (2018). Bamboo diversity of Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 20(1), 91–109. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200112>
- Fritz, H., Penzl, P., & Kraus, M. (2025). Photogrammetric Inspection on Full-Culm Bending Tests of Italian Phyllostachys edulis. In S. Amziane, R. D. Toledo Filho, M. Y. R. Da Gloria, & J. Page (Eds.), *Bio-Based Building Materials—Proceedings of ICBBM 2025* (Vol. 60, pp. 129–140). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-92777-5_11
- Gnanaharan, R., Jja Jules Janssen, & Arce, O. O. (1995). *Bending strength of guadua bamboo: Comparison of different testing procedures*.
- Lianto, F., Trisno, R., Husin, D., & Teh, S. W. (2019). Changing the face of modern architecture: Bamboo as a construction material. case study: Green school, Bali – Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 508, 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/508/1/012023>
- Liese, W., & Köhl, M. (Eds.). (2015). *Bamboo: The Plant and its Uses* (Vol. 10). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6>
- Liu, Y., Zhang, J., Xu, J., Wang, Y., Li, B., & Zhang, S. (2023). Carbon emission-based life cycle assessment of rural residential buildings constructed with engineering bamboo: A case study in China. *Journal of Building Engineering*, 76, 107182. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107182>
- Lorenzo, R., Mimendi, L., & Li, H. (2019). Digital analysis of the geometric variability of bamboo poles in bending. *MATEC Web of Conferences*, 275, 01007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927501007>
- Lorenzo, R., Mimendi, L., Yang, D., Li, H., Mouka, T., & Dimitrakopoulos, E. G. (2021). Non-linear behaviour and failure mechanism of bamboo poles in bending. *Construction and Building Materials*, 305, 124747. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124747>
- Mannan, S., Paul Knox, J., & Basu, S. (2017). Correlations between axial stiffness and microstructure of a species of bamboo. *Royal Society Open Science*, 4(1), 160412. <https://doi.org/10.1098/rsos.160412>
- Maslucha, L., Putrie, Y. E., Rahma, S., Handryant, A. N., & Ramardani, V. (2020). Contribution of bamboo materials in architecture education towards sustainable community development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 456(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/456/1/012047>
- Meng, X., Zhang, Z., Wu, Y., Xu, F., & Feng, P. (2023). A comprehensive evaluation of the effects of bamboo nodes on the mechanical properties of bamboo culms. *Engineering Structures*, 297, 116975. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116975>
- Mergiw, T., Addissie, D., & Goedert, J. (2023). Failure Behavior and Failure Locations of Oxytenanthera Abyssinica Bamboo Culms under Bending Load. *Sustainable Structures*. <https://doi.org/10.54113/j.sust.2023.000029>

- Musthaffa, A. A., Mohamad Nor, N., Alhayek, A., Alias Yusof, M., & Yaakob, M. Y. (2024). Finite Element Analysis of a Portable Bamboo Girder Used in Emergency Responses. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 32(5), 2369–2384. <https://doi.org/10.47836/pjst.32.5.24>
- Nurdiah, E. A., & Juniwati, A. (2020). Bamboo architecture as a learning project for community development of rural area in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 490(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/490/1/012004>
- Nurmadina, Nugroho, N., & Bahtiar, E. T. (2017). Structural grading of Gigantochloa apus bamboo based on its flexural properties. *Construction and Building Materials*, 157, 1173–1189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.170>
- Pan, C., Zhou, G., Shrestha, A. K., Chen, J., Kozak, R., Li, N., Li, J., He, Y., Sheng, C., & Wang, G. (2023). Bamboo as a Nature-Based Solution (NbS) for Climate Change Mitigation: Biomass, Products, and Carbon Credits. *Climate*, 11(9), 175. <https://doi.org/10.3390/cli11090175>
- Richard, M. J., Gottron, J., Harries, K. A., & Ghavami, K. (2017). Experimental evaluation of longitudinal splitting of bamboo flexural components. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 170(4), 265–274. <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00072>
- Rincón, C. E., Montoya, J. A., & Archila, H. F. (2023). Bamboo Construction Inspired by Vernacular Techniques for Reducing Carbon Footprint: A Life Cycle Assessment (LCA). *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su152416893>
- Ritonga, M. A., Syamsuardi, S., Nurainas, N., & Damayanto, I. P. G. P. (2023). Bamboo diversity in Weh Island, Aceh, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 24(5). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240508>
- Sá Ribeiro, R. A., Sá Ribeiro, M. G., & Miranda, I. P. A. (2017). Bending strength and nondestructive evaluation of structural bamboo. *Construction and Building Materials*, 146, 38–42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.074>
- Seixas, M., Cardoso, D., Moreira, L. E., & Paciornik, S. (2024). Influence of elastic properties and nodes on the flexural behaviour of bamboo culms. *Advances in Bamboo Science*, 9, 100100. <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2024.100100>
- Setiawati, T., Mutaqin, A. Z., Irawan, B., An'amillah, A., & Iskandar, J. (2017). Species diversity and utilization of bamboo to support lifestyles the community of Karangwangi Village, Cidaun Sub-District of Cianjur, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 18(1). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180109>
- Sofiana, Y., Sylvia, C. O., & Purbasari, M. (2017). Potential of Bamboo as Material for Furniture in Rural Area in Indonesia. *Advanced Science Letters*, 23(1), 263–266. <https://doi.org/10.1166/asl.2017.7153>
- Sofiana, Y., Wahidiat, M. P., & Caroline, O. S. (2018). Bamboo as sustainable material for furniture design in disaster and remote areas in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 126(1), 012150. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/126/1/012150>
- Supriadi, A., & Trisatya, D. R. (2021). Engineered bamboo: The promising material for building and construction application in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 886(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/886/1/012040>
- Taylor, D., Kinane, B., Sweeney, C., Sweetnam, D., O'Reilly, P., & Duan, K. (2015). The biomechanics of bamboo: Investigating the role of the nodes. *Wood Science and Technology*, 49(2), 345–357. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0694-4>
- Trujillo, D., Jangra, S., & Gibson, J. M. (2017). Flexural properties as a basis for bamboo strength grading. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 170(4), 284–294. <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00084>
- Vaessen, M. J., & Janssen, J. J. A. (1997). Analysis of the critical length of culms of bamboo in four-point bending tests. *Heron*, 42(2), 113–124.
- Wang, X., Ren, H., Zhang, B., Fei, B., & Burgert, I. (2012). Cell wall structure and formation of maturing fibres of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) increase buckling resistance. *Journal of The Royal Society Interface*, 9(70), 988–996. <https://doi.org/10.1098/rsif.2011.0462>
- Xu, X., Xu, P., Zhu, J., Li, H., & Xiong, Z. (2022). Bamboo construction materials: Carbon storage and potential to reduce associated CO₂ emissions. *Science of The Total Environment*, 814, 152697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152697>
- Yudhistira, K. (2022). Local Wisdom as a Sustainable Building Solution: Bamboo Incremental House Design Concept. *Journal of Applied Science and Engineering*, 25(1), 119–127. [https://doi.org/10.6180/jase.202202_25\(1\).0012](https://doi.org/10.6180/jase.202202_25(1).0012)

LAMPIRAN

Lampiran 1 Kompilasi Pengujian Lentur Beberapa Penelitian

No	Nama Peneliti	Spesies Bambu	Jarak antar Tumpuan	Kecepatan pembebanan	Konfigurasi Pengujian	Tipe Kegagalan
1	R. Gnanaharan et al (1995)	<i>Guadua angustifolia</i>	~ 38 D	tidak dijelaskan	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 2a. ~ Posisi <i>saddle</i> tidak pada ruas ~ <i>Saddle</i> terbuat dari kayu (lihat Gambar 2b).	~ Ada 3 kemungkinan kegagalan, yaitu <i>shear stress</i> , <i>crushing</i> , dan <i>tangential strain perpendicular to grain</i> . ~ Tidak ada ilustrasi atau foto bentuk kegagalan
2	Vaessen dan Janssen (1997)	<i>Bambusa blumeana</i>	Ada 3 tipe: ~ di atas <i>critical length</i> (40D - 23D), ~ di bawah <i>critical length</i> (17D dan 12D), ~ mendekati <i>critical length</i> (24D dan 19D).	tidak dijelaskan	Konfigurasi pengujian dan bentuk <i>saddle</i> tidak dijelaskan	~ Pada spesimen dengan panjang lebih dari <i>critical length</i> , terdapat 4 tipe kegagalan, yaitu sebagai berikut: a. Tipe kegagalan 1: Terjadi retakan awal pada bagian atas penampang di bagian tengah bentang spesimen. Saat retakan awal terjadi, deformasi menjadi inelastis. Kegagalan ini dikategorikan kegagalan lentur. Ketika spesimen terus dibebani, retakan berkembang dari bagian atas menuju sumbu netral. Lihat Gambar 16. b. Tipe kegagalan 2: Terjadi retakan yang dimulai pada bagian atas dan bawah penampang. Selanjutnya, retakan berkembang dengan pola yang mirip dengan pola tipe kegagalan 1, yaitu retakan bagian atas dan bawah mengarah pada sumbu netral. Jenis kegagalan ini juga disebut sebagai kegagalan kapasitas lentur. Lihat Gambar 17. c. Tipe kegagalan 3: kegagalan ini merupakan kegagalan premature karena spesimen sudah mengalami retak pada sumbu netral sebelum pengujian. Oleh karena itu, kegagalan ini tidak dapat digunakan untuk menentukan kapasitas lentur. Lihat Gambar 18. d. Tipe kegagalan 4: retakan diawali pada bagian atas penampang pada salah satu posisi titik beban. Semula, spesimen ini diharapkan gagal lentur. Namun, retakan-retakan individu dalam arah longitudinal tidak muncul. Hasil observasi lebih lanjut setelah pengujian menunjukkan bahwa retakan retakan terjadi di dekat ruas, tepat di bawah titik beban. Retakan ini diklasifikasikan sebagai kegagalan akibat tegangan geser. Ruas mampu menahan geser. Namun serat di dekat ruas, tidak mampu menahan gaya geser sehingga kapasitas geser serat tercapai terlebih dahulu. Lihat Gambar 19.

Lampiran 1. Lanjutan

No	Nama Peneliti	Spesies Bambu	Jarak antar Tumpuan	Kecepatan pembebanan	Konfigurasi Pengujian	Tipe Kegagalan
~2	Vaessen and Janssen (1997)	<i>Bambusa blumeana</i>	Ada 3 tipe: ~ di atas <i>critical length</i> (40D - 23D), ~ di bawah <i>critical length</i> (17D dan 12D), ~ mendekati <i>critical length</i> (24D dan 19D).	tidak dijelaskan	Konfigurasi pengujian dan bentuk <i>saddle</i> tidak dijelaskan	~ Pada specimen dengan panjang kurang dari <i>critical length</i>, terdapat 2 tipe kegagalan, yaitu sebagai berikut: a. Tipe kegagalan 1: Terjadi retakan yang dimulai dari sumbu netral. Posisi retak tepat pada posisi pembebanan (pada ruas). Pola retakan ini terjadi pada specimen pendek (12D) yang seharusnya mengalami kegagalan geser. Observasi setelah pengujian yang dilakukan oleh Vaessen dan Janssen (2017), menunjukkan bahwa specimen mengalami kegagalan lentur dan geser pada bagian diafragma ruas. Lihat Gambar 20. b. Tipe kegagalan 2: Retak terjadi pada daerah sumbu netrak di bawah kedua titik pembebanan. Tegangan pada bagian atas dan bawah penampang masih berada di daerah elastis ketika retak terjadi. Oleh karena itu kegagalan diklasifikasikan sebagai kapasitas geser. Lihat Gambar 21. ~ Pada specimen dengan panjang sanat dekat dengan <i>critical length</i>, terdapat 2 tipe kegagalan, yaitu sebagai berikut: a. Tipe kegagalan 1: Muncul retakan sangat kecil tepat diantara sumbu netral dan bagian atas penampang. Retakan tersebut membentuk sudut 45° terhadap sumbu netral. Karena panjang specimen ini sangat dekat dengan <i>critical length</i> maka kegagalan ini diklasifikasikan sebagai kombinasi kegagalan lentur dan geser. Lihat Gambar 22. b. Tipe kegagalan 2: Muncul retak pada area garis netral pada salah satu titik pembebanan. Vaessen dan Janssen (2017) mengklasifikasikan kegagalan ini sebagai kegagalan prematur karena tegangan pada bagian atas penampang di tengah specimen masih berada di daerah elastis. Lihat Gambar 23.
3	Richard et al (2017)	<i>Phyllostachys pubescens</i> <i>Bambusa stenostachya</i>	42 D 35 D	tidak dijelaskan	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 3a ~ <i>Saddle</i> tidak terletak pada ruas ~ <i>Saddle</i> terbuat dari <i>fabric strap</i> ~ Lihat Gambar 3b untuk <i>saddle support</i>. ~ Lihat Gambar 3c untuk <i>saddle</i> beban.	~ Pada benda uji dengan bentang > 30D, muncul retakan longitudinal (<i>longitudinal cracking</i>). Namun, posisi retakan pada specimen tidak dijelaskan. ~ Richard et al (2017) berpendapat bahwa retak geser longitudinal (<i>longitudinal shear splitting</i>) merupakan perilaku kegagalan dominan bambu pada pengujian lentur. ~ Richard et al (2017) memperkenalkan <i>mode I failure</i> dan <i>mode II failure</i> serta kombinasi keduanya. ~ <i>Mode I failure</i> merupakan kegagalan retak belah (<i>splitting failure</i>). Lihat Persamaan (3) dan Gambar 24. ~ <i>Mode II failure</i> merupakan kegagalan geser dalam bidang (<i>in-plane shear</i>) yang dihasilkan dari geser akibat lentur. Lihat Gambar 25. ~ Kombinasi <i>Mode I failure</i> dan <i>Mode II failure</i> dapat dilihat pada Persamaan (4).

Lampiran 1. Lanjutan

No	Nama Peneliti	Spesies Bambu	Jarak antar Tumpuan	Kecepatan pembebanan	Konfigurasi Pengujian	Tipe Kegagalan
4	Trujillo et al (2017)	<i>Guadua angustifolia</i>	32 D	0,5 mm/s	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 4a. ~ Posisi tumpuan <i>saddle</i> tidak presisi terletak pada ruas ~ <i>Saddle</i> terbuat dari <i>fabric strap</i> (lihat Gambar 4b)	Ada 6 tipe kegagalan pada pengujian lentur bambu: <i>Shear plane between fibers</i>. Tipe kegagalan ini selalu terjadi pada bentang geser. Lihat Gambar 25a. <i>Bending-compression failure</i>. Ciri-cirinya adalah: batang bambu tertekuk, serat bagian atas mengalami hancur tekan, dan retakan belah terkadang muncul. Lihat Gambar 25b. <i>Bending-collapse of culm</i>. Ciri-cirinya adalah: batang bambu hancur dikarenakan kegagalan tarik tegak lurus serat. Lihat Gambar 25c. <i>Bending-failure under support</i>. Ciri-cirinya adalah hancurnya batang bambu pada lokasi penempatan beban dengan <i>strap</i>. Lihat Gambar 25d. <i>Bending-tension failure</i>. Ciri-cirinya adalah kegagalan serat di daerah tarik. Lihat Gambar 25e. - Kegagalan kombinasi.
5	Nurmadina et al (2017)	<i>Gigantochloa apus</i>	30 D	tidak dijelaskan	~ Pada gambar sketsa (lihat Gambar 5a), <i>saddle</i> terletak pada ruas tetapi pada eksperimen (lihat pada Gambar 5b) <i>saddle</i> tidak terletak pada ruas. ~ <i>Saddle</i> terbuat dari <i>fabric strap</i> (lihat Gambar 5c)	Ada 2 tipe kegagalan pada pengujian lentur bambu: <i>Compression failure</i>. Lihat Gambar 26a. <i>Failure under support</i>. Lihat Gambar 26b.
6	Sá Ribeiro et al (2017)	<i>Bambusa vulgaris</i>	31 D	30 mm/min ≈ 0,5 mm/s	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 6a. ~ Posisi tumpuan <i>saddle</i> tidak jelas apakah terletak presisi pada ruas atau tidak ~ <i>Saddle</i> terbuat dari kayu dengan bidang tumpu memanjang sepanjang <i>saddle</i> (lihat Gambar 6b).	~ <i>Longitudinal splitting</i> akibat fraktur pada ikatan lignin yang merekatkan serat-serat. ~ Tidak dijumpai gambar ilustrasi.
7	Lorenzo et al (2019)	<i>Phyllostachys edulis</i>	32 D	0,5 mm/s	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 7a. ~ Posisi tumpuan <i>saddle</i> tidak presisi terletak pada ruas ~ <i>Saddle</i> terbuat dari kayu dengan bidang tumpu memanjang sepanjang <i>saddle</i> (lihat Gambar 7b).	~ Terjadi kegagalan retak secara mendadak pada lokasi sepanjang sepertiga bagian tengah bentang. Lihat Gambar 27. ~ Menurut Lorenzo et al (2019), kegagalan disebabkan oleh <i>shear</i> atau <i>crushing</i> pada area sekitar titik pembebanan.

Lampiran 1. Lanjutan

No	Nama Peneliti	Spesies Bambu	Jarak antar Tumpuan	Kecepatan pembebanan	Konfigurasi Pengujian	Tipe Kegagalan
8	Lorenzo et al (2021)	<i>Phyllostachys edulis</i>	32 D	tidak dijelaskan	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 8. ~ Posisi tumpuan <i>saddle</i> tidak presisi terletak pada ruas ~ <i>Saddle</i> terbuat dari kayu. Ada 2 bentuk tumpuan <i>saddle</i> , yaitu ada yang 2 kaki dengan dimensi masing-masing kaki 37,5 mm (lihat Gambar 8a) dan ada yang memanjang dengan panjang kaki <i>saddle</i> 300 mm (lihat Gambar 8b).	~ Kegagalan pada <i>saddle</i> 2 kaki: terjadi tekung <i>kinking</i> lokal yang tajam di bawah salah satu titik beban disertai dengan <i>longitudinal splitting</i> yang terkonsentrasi di area yang terjadi <i>kinking</i> . Retakan ini berkembang secara gradual hingga runtuh. Lihat Gambar 29a. ~ Terjadi kegagalan retak secara mendadak pada lokasi sepanjang seperti bagian tengah bentang. Retak dimulai dari bentang utama menuju salah satu sisi <i>saddle</i> pembebanan. Lihat Gambar 29b.
9	Chaowana et al (2021)	<i>Dendrocalamus asper</i> , <i>Dendrocalamus sericeus</i> , <i>Dendrocalamus membranaceus</i> , <i>Thyrsostachys oliveri</i> , and <i>Phyllostachys makinoi</i>	12 D 14 D 17 D 28 D 25 D	0,5 mm/min $\approx$ 0,008 mm/s	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 9a. ~ Posisi <i>saddle</i> tidak terletak ruas (pada antar ruas) ~ <i>Saddle</i> terbuat dari roller baja (lihat Gambar 9b)	~ Tipe kegagalan pada uji lentur tidak menghancurkan bambu. Ketika beban lentur diberikan, <i>longitudinal splitting</i> terjadi di bagian atas bambu dan bentuk penampang melintang bambu (lingkaran bambu) berubah. Lihat Gambar 29. ~ Berdasarkan Gambar 29, longitudinal splitting terjadi pada lokasi dianatra sumbu netral dengan bagian atas penampang.
10	Correal et al (2022)	<i>Guadua angustifolia</i>	30 D	0,5 mm/s	~ Ada 2 jenis arah pembebanan, yaitu ke atas (lihat Gambar 10a) dan ke bawah (lihat Gambar 10b) ~ Posisi tumpuan <i>saddle</i> tidak presisi terletak pada ruas ~ <i>Saddle</i> terbuat dari <i>fabric strap</i> (lihat Gambar 10c).	~ Ada 2 tipe kegagalan: a. <i>Compression failure</i> . Lihat Gambar 30a. Tidak ada penjelasan secara detail terkait posisi kegagalan. b. <i>Tension failure</i> . Lihat Gambar 30b. Tidak ada penjelasan secara detail terkait posisi kegagalan.
11	Mergia et al (2023)	<i>Oxytenanthera abyssinica</i>	tidak dijelaskan	1 kN/min $\approx$ 5 mm/min $\approx$ 0,008 mm/s	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 11a. ~ Posisi <i>saddle</i> tidak terlihat jelas ~ <i>Saddle</i> terbuat dari <i>fabric strap</i>	~ Mergia et al (2023) mengklasifikasikan kegagalan lentur berdasarkan umur bambu, yaitu sebagai berikut: a. Umur bambu 2 tahun. Pada umur ini, bambu didominasi oleh kegagalan lentur <i>kink buckle failure</i> . Kegagalan ini berupa tekukan lokal serat pada sisi tekan. Kegagalan ini dominan terjadi di zona tekan (<i>compressive zone</i>). Penyebab kegagalan ini adalah <i>hollowness ratio</i> yang tinggi. b. Umur bambu 3 tahun. Pada umur ini, kegagalan bambu didominasi oleh <i>Green stick Failure</i> , yaitu <i>crack</i> akibat gaya geser transversal. c. Umur bambu 4 tahun. Pada umur ini, kegagalan bambu didominasi oleh <i>local buckling</i> dan <i>longitudinal shear</i> . Kegagalan ini merupakan kombinasi buckling lokal pada sisi tekan dan belah memanjang (<i>longitudinal splitting</i>) pada serat.

Lampiran 1. Lanjutan

No	Nama Peneliti	Spesies Bambu	Jarak antar Tumpuan	Kecepatan pembebanan	Konfigurasi Pengujian	Tipe Kegagalan
12	Musthaffa et al (2024)	<i>Gigantochloa scortechinii</i>	34 D	0.5 mm/s	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 12a. ~ Posisi <i>saddle</i> terletak pada ruas. ~ Jarak <i>saddle</i> beban kurang dari 1/3L dengan L jarak bersih antar tumpuan. ~ Bahan <i>Saddle</i> tidak dijelaskan. ~ Bentuk <i>saddle</i> dapat dilihat pada Gambar 12a.	Tipe kegagalan lentur adalah <i>local failure</i> akibat <i>crushing and splitting</i> . Lihat Gambar 31.
13	Seixas et al (2024)	<i>Phyllostachys aurea</i>	31 D	20 mm/min ≈ 0,33 mm/s	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 13a. ~ Posisi <i>saddle</i> terletak pada area ruas. ~ Bahan <i>saddle</i> dari <i>wooden roller</i> (lihat Gambar 13b)	Terdapat 4 tipe kegagalan lentur, yaitu sebagai berikut: a. <i>Local crushing</i> . Lihat Gambar 32a. b. <i>Local buckling</i> . Lihat Gambar 32b. c. <i>Longitudinal shear cracking along the neutral axis followed by buckling</i> . Lihat Gambar 32c. d. <i>Splitting followed by rupture at the tension layer</i> . Lihat Gambar 32d.
14	Cacanando et al (2024)	<i>Bambusa blumeana</i>	30 D	18mm/min ≈ 0,3 mm/s	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 14a. ~ Posisi tumpuan <i>saddle</i> tidak terlekat pada ruas. ~ <i>Saddle</i> terbuat dari <i>fabric strap</i> (lihat Gambar 14b)	Terdapat 4 tipe kegagalan lentur, yaitu sebagai berikut: a. <i>Splitting in the center</i> . Lihat Gambar 33a, b. <i>Bursting Failure</i> . Lihat Gambar 33b, c. <i>Crushing at the support</i> . Lihat Gambar 33c, d. <i>Longitudinal splitting along entire length</i> . Lihat Gambar 33d Menurut Cacanando dkk (2024), mode kegagalan yang diamati bersifat kompleks dan sulit untuk diklasifikasikan sebagai “momen” atau “geser” (sebagaimana dipersyaratkan oleh ISO 22157:2019). Oleh karena itu, Cacanando dkk (2024), mempertimbangkan semua sampel yang diuji, tanpa melihat mode kegagalannya, untuk menentukan kuat lentur bambu sejajar serat.
15	Fritz et al (2025)	<i>Phyllostachys edulis</i>	30 D	0.02 kN/s 0.5 mm/s	~ Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 15a. ~ Posisi tumpuan <i>saddle</i> tidak jelas apakah terletak presisi pada ruas atau tidak ~ <i>Saddle</i> terbuat dari kayu ~ Bentuk <i>saddle</i> bagian tumpuan berbeda dengan bentuk <i>saddle</i> bagian beban (lihat Gambar 15b)	Terdapat 2 tipe kegagalan lentur, yaitu sebagai berikut: a. <i>Tensile perpendicular to the fibers</i> . Lihat Gambar 34a. b. <i>Failure due to tensile stresses in fiber direction at the nodes</i> . Lihat Gambar 34b.