

**KAYU SEBAGAI MATERIAL KONSTRUKSI
BERKELANJUTAN**



UNIVERSITAS GADJAH MADA

**Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar
dalam Bidang Material dan Teknologi Teknik Sipil Berkelanjutan
pada Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada**

**Disampaikan pada Pengukuhan Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
Tanggal 28 Oktober 2025**

**Oleh:
Prof. Ir. Ali Awaludin, S.T., M.Eng., Ph.D., IPU., ACPE.**

*Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh,
Selamat pagi, Salam Sejahtera bagi kita semua.*

Yang terhormat,

Ketua, Sekretaris, dan anggota Majelis Wali Amanat Universitas
Gadjah Mada,

Ketua, Sekretaris, dan anggota Senat Akademik Universitas Gadjah
Mada,

Ketua, Sekretaris, dan anggota Dewan Guru Besar Universitas Gadjah
Mada,

Rektor dan para Wakil Rektor Universitas Gadjah Mada,

Dekan dan Wakil Dekan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada,

Segenap sivitas akademika Universitas Gadjah Mada, terutama para
dosen di Fakultas Teknik di Universitas Gadjah Mada,

Para tamu undangan, rekan sejawat, handai taulan, kerabat, sahabat,
keluarga, dan seluruh hadirin yang saya muliakan.

Pertama, marilah kita panjatkan puji syukur kehadirat Allah Swt., yang telah melimpahkan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga pada hari ini kita dapat hadir di Balai Senat Universitas Gadjah Mada untuk mengikuti Rapat Terbuka Senat Universitas Gadjah Mada dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad Saw., teladan agung yang telah membawa kita dari zaman kegelapan menuju cahaya ilmu pengetahuan.

Selanjutnya, izinkan saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Rektor dan segenap Pimpinan Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan kesempatan dan kepercayaan kepada saya untuk menyampaikan pidato ilmiah ini sebagai bagian dari tanggung jawab akademik saya sebagai Guru Besar dalam bidang Material dan Teknologi Teknik Sipil Berkelanjutan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Pidato ini berjudul:

Kayu sebagai Material Konstruksi Berkelanjutan

Judul pidato ini saya pilih sebagai bagian dari rekam jejak saya di bidang material dan teknologi konstruksi sejak tahun 2002 dan isu keberlanjutan, khususnya pada bidang konstruksi, menjadi *concern* belakangan ini.

Pimpinan Sidang dan hadirin yang saya muliakan,

Dalam dunia teknik sipil, dikenal beberapa jenis material konstruksi seperti kayu, bambu, beton, baja, dan material komposit. Kayu merupakan salah satu material tertua yang digunakan manusia, bahkan sejak era ketika batu masih menjadi material utama dalam peradaban. Keduanya digunakan secara bersamaan sebelum kemudian hadir material baru seperti beton dan baja yang kini mendominasi pembangunan infrastruktur modern. Namun, jika ditinjau dari sudut pandang keberlanjutan, khususnya dari sisi waktu yang diperlukan untuk memperoleh material dasarnya, kayu dan bambu dapat dikelompokkan sebagai material berkelanjutan (*sustainable materials*). Dalam kesempatan ini, izinkan saya lebih mendiskusikan terkait pemanfaatan kayu sebagai material konstruksi berdasarkan hasil penelitian yang saya lakukan dan penelitian lainnya.

Karakteristik Material Kayu

Hadirin yang saya muliakan,

Kayu telah berkontribusi dalam kehidupan penting manusia, seperti penggunaan untuk alat-alat musik, peralatan memasak, komponen bangunan, gedung, hingga infrastruktur jembatan. Pada awal abad ke-19, Wright Brothers mengembangkan pesawat terbang dari kayu jenis *spruce* dan *ash*. Kemudian, pada tahun 2024, LignoSat, satelit yang dibuat dari kayu *honoki* dan dikembangkan oleh Takao Doi dari Universitas Kyoto, telah membuka era baru dalam pemanfaatan kayu pada bidang teknologi antariksa.

Kayu memiliki sifat mekanis yang lengkap, yaitu kekuatan tarik, tekan, lentur, dan geser yang seluruhnya berkontribusi dalam menahan

gaya-gaya internal pada suatu sistem struktur. Selain itu, kayu memiliki kinerja yang baik dalam pembebanan jangka pendek dan memiliki rasio kekuatan-terhadap-berat (*strength-to-weight ratio*) yang tinggi sehingga kayu merupakan bahan konstruksi yang unggul untuk diaplikasikan di zona gempa sedang hingga tinggi seperti Indonesia.

Sebagai produk alam, kayu diperoleh dari batang pohon. Ketika batang dipotong, akan tampak lingkaran-lingkaran konsentris yang disebut dengan lingkaran tahun (*annual rings*), terutama pada pohon yang tumbuh di daerah beriklim subtropis. Lingkaran ini terbentuk akibat perbedaan laju pertumbuhan sel-sel kayu pada musim pertumbuhan cepat (*spring* dan *summer*) dibandingkan dengan musim dormansi (*fall* dan *winter*). Pada musim dormansi, sel-sel kayu tumbuh lebih lambat dan berwarna lebih gelap dibandingkan dengan sel-sel yang terbentuk pada musim pertumbuhan cepat. Dinding sel kayu tersusun dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin, dengan rongga-rongga pada dinding sel yang terisi udara atau air (Yang dkk., 2024). Ukuran dan jumlah rongga ini berpengaruh pada densitas kayu, sehingga kayu berkerapatan tinggi seperti kayu Bangkirai ($750\text{--}950\text{ kg/m}^3$) memiliki jumlah rongga yang lebih sedikit dibandingkan dengan kayu berkerapatan rendah seperti kayu Sengon ($320\text{--}640\text{ kg/m}^3$). Bahkan, kayu ulin dengan densitas $840\text{--}1.100\text{ kg/m}^3$ hampir tidak memiliki rongga.

Secara umum, sifat mekanika kayu diklasifikasikan sebagai material ortotropik, yaitu material yang sifat-sifat kekuatannya dapat dibagi ke dalam tiga sumbu utama yang saling tegak lurus. Ketiga sumbu tersebut adalah sumbu longitudinal (sejajar dengan arah panjang batang pohon), sumbu radial (tegak lurus garis lingkaran tahun), dan sumbu tangensial (menyinggung garis lingkaran tahun). Sifat kekuatan pada ketiga sumbu ini, jika direpresentasikan dalam bentuk kurva tegangan-regangan (*stress-strain*), menunjukkan bahwa kekuatan pada arah longitudinal secara signifikan jauh lebih tinggi dibandingkan dengan arah lainnya. Sedangkan, sifat kekuatan pada arah radial dan tangensial adalah relatif sama.

Oleh karena itu, sifat kekuatan kayu dalam praktiknya sering disederhanakan menjadi sejajar serat (*parallel-to-the-grain*) yang mewakili sifat pada arah longitudinal dan tegak lurus serat (*perpendicular-to-the-grain*) yang mencakup sifat pada arah radial maupun tangensial (Walley dan Rogers, 2022).

Pimpinan sidang dan hadirin yang saya muliakan,

Sebagai material terbarukan (*renewable material*) kayu menjadi primadona dalam bangunan berkonsep “*green*” atau ramah lingkungan. Kayu berperan sebagai *carbon storage* alami sepanjang siklus hidupnya, meskipun telah dipanen dan digunakan dalam konstruksi (Awaludin, 2017; Jauhari dkk., 2021; dan Dzhurko dkk., 2024). Selain mendukung estetika, pemanfaatan kayu lokal berkontribusi pada keberlanjutan (Rilatupa, 2021). Pada dasarnya, kayu merupakan anugerah alam sekaligus sumber daya terbarukan yang lahir dari keselarasan manusia dengan lingkungannya. Dengan pengelolaan hutan yang bijaksana, kayu tidak hanya menjadi bahan konstruksi bernilai tinggi, tetapi juga menjaga keseimbangan ekosistem dan keberlanjutan generasi mendatang.

Bidang infrastruktur berperan dalam menghasilkan, setidaknya, 30% emisi GHG atau *greenhouse gasses* dan 28% emisi karbon dalam tingkat global (Oh dkk., 2023 dan Yang dkk., 2021). Jumlah emisi terus meningkat dari tahap persiapan hingga operasional infrastruktur dan kemudian menurun secara drastis pada tahap penghancuran (*demolishing*). Pemilihan material turut menentukan kuantitas emisi GHG yang dihasilkan. Substitusi material dengan kayu mampu menekan kuantitas emisi GHG yang dihasilkan tanpa mengurangi performa struktur (Trabucco dan Perrucci, 2025). Oleh karena itu, material kayu menjadi pionir dalam bidang infrastruktur untuk menekan jumlah emisi yang dihasilkan. Selain dampak lingkungan, penggunaan material kayu pada masa operasional konstruksi turut memberikan dampak terhadap penggunaannya.

Secara umum, kayu merupakan material alami, dengan memberikan nuansa alami pada interior bangunan, sehingga tingkat

kecemasan dan stres pengguna dapat diturunkan dan dapat meningkatkan produktivitas (Ojala dkk., 2023), dan beberapa spesies kayu memiliki lapisan antibakteri alami sehingga menjadi pilihan yang tepat untuk diaplikasikan dalam interior ruangan (Elina dkk., 2023).

Hadirin yang saya muliakan,

Selama ini, penentuan kuat acuan kayu umumnya mengacu pada informasi jenis kayu (*species*). Namun, pendekatan tersebut memiliki keterbatasan karena sifat mekanis kayu dari jenis yang sama dapat bervariasi akibat faktor umur, kondisi tumbuh, dan cacat alami. Di sisi lain, beberapa standar internasional menetapkan densitas sebagai salah satu parameter mutu kayu. Akan tetapi, densitas saja tidak cukup untuk dijadikan acuan kuat kayu. Kombinasi antara densitas dan modulus elastisitas menjadi kombinasi yang konsisten untuk memprediksi mutu kayu karena keduanya mewakili tidak hanya berat jenis material, tetapi juga kekakuannya. Penilaian mutu kayu sering diawali dengan metode *visual grading*, yaitu pengelompokan berdasarkan pengamatan visual oleh seorang *grader*. Cacat kayu seperti mata kayu, kemiringan serat, bentuk lingkaran tahun, retakan, jarak antarlingkaran tahun, serta perubahan warna menjadi indikator dalam menilai kualitas kayu (Piazza dan Riggio, 2008). Meskipun sederhana, metode ini sangat dipengaruhi oleh pengalaman dan subjektivitas seorang *grader*.

Sejumlah penelitian kemudian berupaya mengaitkan parameter mekanis kayu, terutama modulus elastisitas (*MoE*) dengan kekuatan lenturnya (*MoR*) agar diperoleh metode prediksi yang lebih objektif dan representatif. Analisis regresi pada berbagai spesies kayu menunjukkan bahwa nilai koefisien determinasi (R^2) antara *MoE* dan *MoR* berkisar antara 0,45 hingga 0,76 (Baar dkk., 2015; Baillères dkk., 2012; Ilic, 2009; dan Steiger dkk., 2010). Penelitian ini menegaskan bahwa *MoE* dapat dijadikan parameter prediktif dalam memperkirakan kekuatan lentur kayu. Awaludin dan Wusqo (2021) mengusulkan paradigma baru dengan mengganti pendekatan berbasis jenis kayu menjadi berbasis

Modulus Elastisitas statik (MoE_s) yang diperoleh melalui pengujian lentur dalam rentang elastik.

Pendekatan ini didasarkan pada nilai MoE_s yang memiliki korelasi positif dengan kekuatan lentur maksimum kayu (*Modulus of Rupture, MoR*), sehingga dapat digunakan sebagai prediktor yang andal untuk menentukan kuat acuan lentur. Pengujian terhadap 200 balok kayu tropis Indonesia skala struktur menunjukkan bahwa sifat mekanis kayu mencerminkan kondisi lapangan, termasuk pengaruh cacat alami. Uji lentur statis dilakukan mengacu pada EN 408 dan SNI 03-3539-1995, sedangkan uji dinamis menggunakan metode *stress wave velocity*. Persamaan empiris sebagai hasil analisis regresi diusulkan oleh Awaludin dan Wusqo (2021) dalam Jurnal "Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis". Dari persamaan tersebut, dapat diketahui bahwa standar nilai desain yang tercantum pada SNI 7973:2013 mengenai Spesifikasi Desain untuk Konstruksi Kayu, telah memberikan faktor keamanan yang memadai sehingga dapat diandalkan dalam perancangan konstruksi kayu.

Konstruksi Kayu

Pimpinan sidang dan hadirin yang saya muliakan,

Ketersediaan kayu solid berukuran besar semakin menipis akibat tingginya kebutuhan serta alih fungsi hutan menjadi lahan permukiman maupun pertanian. Kondisi ini menyebabkan harga kayu solid sangat mahal dan keberadaannya pun terbatas. Namun demikian, kayu tetap menjadi prioritas pada bangunan cagar budaya berdasarkan alasan historis dan estetika. Meski dengan biaya tinggi, material ini dipilih demi menjaga keaslian dan nilai *heritage*, sebagaimana pada proyek restorasi Istana Bala Puti Kesultanan Sumbawa (2019–2025) dan rekonstruksi Jembatan Mandomai di Kapuas (2024–2025).

Rekonstruksi Jembatan Bowstring Mandomai menggunakan kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) solid sebagai material utama. Jembatan dengan bentang 69,6 m ini mampu menegaskan kembali peran kayu

lokal yang telah lama menjadi identitas konstruksi di Kalimantan. Kayu ulin dipilih karena memiliki karakteristik yang unggul, dengan nilai modulus elastisitas lentur (MoE) 16.063 MPa dan densitas 1.070 kg/m^3 (Subchan, 2024).

Upaya penggunaan kayu ulin sebagai material Jembatan Mandomai mendukung keberlanjutan dengan mengombinasikan kearifan lokal dalam pemanfaatan material alami dan prinsip rekayasa modern dalam teknik konstruksi jembatan.

Selain itu, kayu juga terbukti dapat dimanfaatkan untuk konstruksi nonkonvensional yang berorientasi pada keberlanjutan. Salah satu contohnya adalah pipa pesat berbahan kayu jati yang dikembangkan di lingkungan Universitas Gadjah Mada bersama mitra dari Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Jerman. Pipa tersebut dibuat dari bilah-bilah kayu jati dengan kadar air rendah (10–12%) yang kemudian dirakit menjadi saluran bertekanan untuk model Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Saat dilakukan uji aliran (*test flow*), bilah kayu menyerap air dan mengalami pengembangan (*swelling*), sehingga celah antarbilah menutup rapat, menghasilkan pipa yang berfungsi optimal dan kedap air (Awaludin, 2017).

Penerapan lain, jembatan pejalan kaki bentang 6 m yang menggunakan kayu jati hutan rakyat berdiameter kecil (10–15 cm) dari Blora, Jawa Tengah. Hasil kinerja struktural memuaskan dengan frekuensi alami 17,5 Hz dan defleksi maksimum 12 mm di bawah beban desain 400 kg/m^2 . Nilai defleksi tersebut jauh lebih kecil dari batas izin defleksi (20 mm), sehingga membuktikan bahwa kayu jati berdiameter kecil pun dapat dimanfaatkan secara efektif untuk konstruksi jembatan pejalan kaki (Awaludin, 2017).

Pimpinan Sidang dan hadirin yang saya muliakan,

Kayu pada dasarnya bersifat getas (*brittle*), sehingga tidak memiliki sifat daktil seperti baja. Oleh karena itu, sambungan menjadi elemen kunci agar struktur kayu tetap berperilaku daktil. Sistem sambungan merupakan salah satu aspek terpenting dalam konstruksi

kayu. Sambungan dengan alat sambung metal seperti paku, *lag screw*, baut, maupun pasak besi (*steel dowel*) harus dirancang dengan baik agar mampu menghasilkan sistem sambungan yang daktail. Perilaku daktail ini sangat penting untuk menjamin keandalan struktur, terutama di wilayah rawan gempa yang memungkinkan terjadinya disipasi energi sekaligus mencegah keruntuhan getas (Awaludin dkk., 2025).

Oleh karena itu, beberapa aspek desain seperti pemilihan diameter baut serta pemenuhan persyaratan geometri sambungan perlu mendapat perhatian. Rasio tebal kayu terhadap diameter baut (t/d) dalam kisaran 8–12 pada sambungan kayu dengan alat sambung baut terbukti memberikan kekuatan dan daktilitas yang disyaratkan, sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian empiris serta rekomendasi standar desain (Sawata, 2015).

Selain rasio tebal kayu terhadap diameter baut, detail pelaksanaan sambungan juga perlu diperhatikan. Misalnya, sambungan baut dan *lag-screw* yang sangat umum dimanfaatkan karena kemudahan dalam proses pemasangannya. Namun, pembuatan lubang penuntun (*pre-drilled hole*) pada komponen kayu yang akan disambung menyebabkan pengurangan luas penampang efektif dan menimbulkan konsentrasi tegangan. Hal ini dapat memicu retak atau pecah pada kayu, terutama jika jarak antarlubang terlalu dekat. Oleh karena itu, jarak tepi, jarak ujung, dan jarak antarbaut dalam standar desain harus dipatuhi agar sambungan bekerja dengan kekuatan dan daktilitas yang memadai. Pemasangan *washer (ring)* pada baut terbukti berpengaruh besar terhadap kinerja sambungan kayu. Saat menerima gaya lateral, baut mengalami deformasi lentur sehingga *washer* menekan permukaan kayu dan menambah tahanan geser. Hasil analisis *finite element* dan uji laboratorium menunjukkan bahwa penggunaan washer dengan ukuran tepat mampu memperbesar bidang tekan efektif dan meningkatkan kekuatan ultimit sambungan (Awaludin dkk., 2012).

Produk Kayu Rekayasa

Pimpinan sidang dan hadirin yang saya muliakan,

Perkembangan teknologi dalam industri kayu telah menghasilkan produk kayu laminasi, yaitu papan-papan kayu yang direkatkan satu dengan lainnya membentuk balok berukuran besar, lebih besar ukuran penampang dari kayu solid alam. Selain itu, teknologi laminasi ini memungkinkan kombinasi papan-papan kayu dari *species* yang berbeda menyesuaikan kriteria teknis yang diharapkan.

Tiga contoh produk kayu rekayasa berbasis teknologi laminasi yang kini telah diproduksi dan dikomersialkan di Indonesia meliputi *Laminated Veneer Lumber (LVL)*, *Glued Laminated Timber (GLT)*, dan *Cross Laminated Timber (CLT)* oleh PT Sumber Graha Sejahtera, PT Woodlam, PT Kayu Lapis Indonesia, PT Buana Triarta, dan PT Hira Utama Group dengan produk IN-CLT menjadi pionir dalam inovasi ini. Balok glulam yang terdiri dari lamina berkerapatan sedang menghasilkan nilai *MoE* dan *MoR* yang tinggi akibat pengaruh dari faktor-faktor penting termasuk proses produksi, jenis perekat, dan ukuran balok (Awaludin dkk., 2025). Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan bahan baku sangat krusial agar tercapai kinerja struktural yang optimal pada produk kayu rekayasa. Kualitas ikatan antarlamina yang diukur melalui delaminasi sangat dipengaruhi oleh spesies kayu, jenis perekat, kondisi proses *curing* atau pengeringan, dan pengaplikasian tekanan (Awaludin dkk., 2025).

Kehadiran produk kayu laminasi memberikan nilai penting dalam dunia konstruksi. Produk laminasi memiliki sifat yang lebih homogen dibandingkan dengan kayu solid karena variasi alami kayu dapat diseleksi dan dikombinasikan yang terbaik pada saat proses produksi. Homogenitas kayu laminasi membuat rentang distribusi kekuatan lebih sempit sehingga kinerja strukturalnya dapat diprediksi dengan lebih akurat. Selain itu, potongan kayu kecil atau yang berbentuk tidak beraturan dapat dimanfaatkan sebagai lamina, sehingga limbah produksi terminimalisasikan. Dimensi kayu laminasi dapat disesuaikan

dengan kebutuhan desain, bahkan untuk bentang panjang yang sudah tidak mungkin dicapai lagi oleh kayu solid. Dengan demikian, kayu laminasi membuka peluang arsitektur dan rekayasa struktur kayu yang lebih inovatif dan menjawab tantangan keterbatasan ketersediaan kayu solid berukuran besar.

Kayu Komposit dan Struktur *Hybrid*

Pimpinan sidang dan hadirin yang saya muliakan,

Pemanfaatan kayu pada konstruksi dapat secara luas ditemukan mulai dari fondasi, balok-kolom-lantai bangunan gedung, rangka jembatan, dan bantalan rel kereta api.

Material kayu dapat dipadukan dengan material konstruksi lainnya, seperti baja, baja canai dingin, dan beton (khususnya beton pracetak), membentuk sistem struktur *hybrid* (hibrida). Sistem lantai komposit merupakan salah satu sistem komposit yang sudah lama dikenal masyarakat sebagai inovasi struktur dengan beberapa keuntungan, yaitu berat struktur menjadi lebih kecil, peningkatan kekakuan dan kapasitas lentur, serta meningkatkan performa getaran terhadap beban dinamis (Dalbiso dan Baghban, 2025; Martín-Gutiérrez dkk., 2023; Perković dkk., 2021; dan Shi dkk., 2024). Dalam sistem struktur komposit dengan beton, komponen kayu diutamakan untuk menahan tegangan tarik, sedangkan komponen beton menahan tegangan tekan yang muncul sebagai respons struktur dalam menahan momen lentur yang diakibatkan oleh beban yang bekerja pada struktur. *Shear connector* berupa *lag-screw* atau paku umumnya dipilih sebagai alat sambung koneksi geser untuk menghubungkan komponen kayu dengan beton.

Penelitian oleh Awaludin dkk. (2017) memanfaatkan kayu LVL (*laminated veneer lumber*) dengan kayu sengon untuk elemen lentur pada sistem lantai, telah sukses diujicobakan skala penuh di laboratorium. Sistem lantai yang dikembangkan telah memenuhi kriteria layan atau persyaratan pada rumah tinggal yang dibuktikan

dengan defleksi atau perpindahan vertikal yang terjadi pada beban desain untuk rumah tinggal ($2,5 \text{ kN/m}^2$). Konfigurasi lain pada struktur lantai menggunakan *open web truss joist* dengan LVL sengon komposit dengan lantai dari material beton, juga dikembangkan oleh Awaludin dkk. (2024) dengan hasil serupa, yaitu defleksi yang terjadi memenuhi kriteria desain. Penelitian oleh Eratodi dan Awaludin (2017) yang menguji balok dengan geometri asimetris telah berhasil dilakukan dengan skala penuh. Penelitian tersebut berhasil membandingkan hasil pemodelan numerik (berbasis metode elemen hingga) dengan eksperimental yang menunjukkan bahwa pemodelan numerik dapat digunakan dalam memprediksi distribusi tegangan dan regangan yang terjadi akibat keberadaan beban. Selain digunakan sebagai sistem lantai dan balok, LVL dengan kayu sengon dapat digunakan pula pada panel dinding pada bangunan.

Penelitian mengenai penerapan LVL sengon sebagai panel dinding oleh Awaludin dkk. (2013) menunjukkan bahwa penambahan pengaku (*bracing*) pada panel LVL sengon meningkatkan kapasitas lateral, tetapi juga menurunkan daktilitas karena elemen pengaku menjadi elemen yang rentan mengalami kegagalan.

Penelitian lain yang dikembangkan adalah mengenai elemen komposit lantai berupa *plywood* jenis meranti-sengon pada permukaan atas dan *plywood* meranti pada permukaan bawah, yang dihubungkan dengan baja canai dingin (*cold-formed steel*) menggunakan baut dan bahan adhesif *epoxy resin* menunjukkan hasil serupa, yaitu elemen komposit kayu dengan baja canai dingin memenuhi kriteria layan (Akbar dkk., 2025). Penelitian yang dilakukan secara eksperimental dan numeris tersebut menunjukkan bahwa elemen komposit tersebut memenuhi kebutuhan kapasitas dan kekakuan yang berkaitan secara langsung dengan frekuensi alaminya. Penelitian lain yang menerapkan struktur komposit antara *plywood* jenis mahoni dengan baja canai dingin telah dikembangkan pada *truss system* oleh Awaludin dkk. (2016). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa deformasi maksimum yang diperoleh dengan menggunakan sistem komposit 1,5–2 kali lebih

besar daripada struktur yang hanya menggunakan baja canai dingin. Hal ini menunjukkan bahwa keruntuhan seketika dapat dihindari dengan menggunakan sistem komposit.

Pada struktur hibrida, atau gabungan antara elemen yang terbuat dari material nonkayu dan elemen yang terbuat dari material kayu, performa struktur tersebut dapat meningkat, terutama dalam performa terhadap beban seismik. Hal ini terjadi karena berat struktur dan gaya seismik yang diperoleh memiliki korelasi positif sehingga ketika berat struktur berkurang, maka gaya seismik yang terjadi pada struktur turut berkurang. Penelitian oleh Tsai dan Hsu (2024) menunjukkan bahwa penggunaan sistem hibrida pada struktur gedung dapat mengurangi berat hingga 38,67% dan menurunkan simpangan antarlantai dibandingkan dengan struktur beton penuh. Selain itu, penggunaan kayu sebagai substitusi dari material beton turut menurunkan emisi karbon sebesar 15,8% sehingga menjadi lebih ramah lingkungan (Tsai dan Hsu, 2024).

Salah satu bangunan gedung yang menerapkan sistem hibrida adalah bangunan asrama mahasiswa di University of British Columbia di Kanada. Bangunan tersebut terdiri dari 18 lantai dengan konfigurasi struktur podium (lantai dasar dan lantai tepat di atasnya) menggunakan material beton dan sisa lantai di atasnya menggunakan material kayu serta *core* atau inti yang terbuat dari material beton. Dalam pelaksanaannya, bangunan ini hanya memerlukan waktu selama 10 minggu untuk diselesaikan. Hal ini menunjukkan kemudahan pelaksanaan atau *workability* dari penggunaan elemen struktur yang terbuat dari kayu. Ditinjau dari respons struktur terhadap beban seismik, struktur ini memiliki bobot yang lebih ringan sebesar 7.648 ton dibandingkan dengan konfigurasi yang menggunakan material beton sepenuhnya, sehingga meningkatkan performa seismiknya (Connolly dkk., 2018). Selain itu, emisi yang dihasilkan (CO_2 ekuivalen) oleh konfigurasi hibrida ini lebih kecil 25% persen (Teshnizi dkk., 2018). Di Indonesia, penerapan struktur hibrida mulai dikembangkan sebagai respons terhadap isu keberlanjutan, salah satunya melalui Pavilion 120

di kawasan Indonesia Design District (IDD), PIK 2. Bangunan tersebut memiliki tiga lantai dengan luasan sekitar 290 m² menggunakan kayu rekayasa (glulam) jenis Meranti yang diproduksi oleh PT Kayu Lapis Indonesia. Ketahanan lateral bangunan tersebut ditingkatkan dengan penambahan elemen dinding geser beton dan portal baja di kedua sisi lebar bangunan.

Tantangan

Pimpinan sidang dan hadirin yang saya muliakan,

Meskipun kayu memiliki banyak keunggulan, terdapat beberapa tantangan dalam pemanfaatannya.

Pertama, ketersediaan kayu solid berukuran besar semakin terbatas sehingga mendorong penggunaan kayu cepat tumbuh (*fast-growing timber*) sebagai alternatif. Namun, kayu jenis ini umumnya memiliki kekuatan yang relatif rendah sehingga memerlukan pengolahan lebih lanjut melalui rekayasa material atau produk kayu rekayasa. Kedua, isu durabilitas juga menjadi perhatian, terutama pada *fast-growing timber*.

Faktor kelembaban tinggi, jamur, rayap, bahkan potensi kebakaran, menjadi tantangan utama yang perlu terus diteliti agar kayu tetap andal sebagai material struktural dalam jangka panjang.

Tantangan berikutnya dari program studi Teknik Sipil adalah mata kuliah konstruksi kayu yang dahulu wajib, kini di banyak perguruan tinggi tidak lagi menjadi mata kuliah inti, padahal dunia tengah bergerak menuju pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang menuntut penggunaan sumber daya material ramah lingkungan lebih dominan pada sektor konstruksi. Hal ini berpotensi mengurangi kapasitas insinyur sipil dalam menguasai teknologi konstruksi kayu. Menyadari hal tersebut, lahirlah inisiatif produk kayu rekayasa yang diimplementasikan pada pembangunan Paviliun CLT Nusantara di kompleks Fakultas Teknik UGM. Paviliun ini dilengkapi dengan panel surya, fasad tanaman hidup dengan sistem irigasi vertikal

berbasis IoT, serta dirancang sebagai *showcase eco-house*. Lebih dari itu, paviliun ini juga menjadi laboratorium alam skala 1:1 sebagai tempat untuk mempelajari karakter dan kinerja kayu tropis dalam iklim Indonesia yang lembap dan penuh tantangan. Paviliun CLT Nusantara ini telah dikunjungi oleh tamu dari lima benua dengan respons yang sangat positif. Terima kasih kepada Dekan Prof. Selo yang telah memberikan izin penggunaan ruang taman manufaktur untuk lokasi paviliun CLT Nusantara ini.

Dari uraian tersebut dapat diketahui bahwa tantangan dalam pemanfaatan kayu memang nyata. Namun, setiap tantangan justru membuka peluang untuk berinovasi. Inisiatif seperti lahirnya paviliun CLT Nusantara menjadi bukti bahwa kayu relevan sebagai material konstruksi berkelanjutan. Dengan komitmen riset, kolaborasi lintas disiplin, dan dukungan kebijakan, kayu dapat terus berperan sebagai pionir yang mewujudkan tujuan pembangunan berkelanjutan.

Dari material ciptaan-Nya yang bernama kayu, saya belajar arti berbagi dan tersadarkan bahwa ciptaan-Nya itu tidak akan abadi;

-- Berkelanjutan --

Pimpinan Sidang dan hadirin yang saya muliakan,

Sebagai akhir dari pidato ini, perkenankan saya mengucapkan terima kasih kepada Pemerintah Republik Indonesia melalui Menteri Pendidikan Tinggi Sains dan Teknologi atas penetapan saya sebagai Guru Besar dengan terhitung mulai tanggal 1 Juli 2025, Pimpinan dan Anggota Senat Akademik UGM, Pimpinan dan Anggota Dewan Guru Besar UGM, Rektor dan para Wakil Rektor UGM, Pimpinan dan Anggota Senat Fakultas Teknik, Dekan dan para Wakil Dekan yang telah memproses usulan Guru Besar saya dalam bidang Material dan Teknologi Teknik Sipil Berkelanjutan.

Rasa hormat dan ucapan terima kasih saya ucapkan kepada Bapak Ir. Soehendrodjati yang pertama kali mengenalkan ilmu Konstruksi kayu di program studi Teknik Sipil jenjang Sarjana, Fakultas Teknik

UGM. Terima kasih dan penghargaan yang tinggi juga saya sampaikan kepada: almarhum Prof. Morisco (dosen pembimbing Tugas Akhir program Sarjana UGM); Assoc. Prof. Watanachai Smittakorn dari Chulalongkorn University (dosen pembimbing Tesis program Magister); dan Prof. Toshiro Hayashikawa serta Prof. Takuro Hirai dari Hokkaido University (dosen pembimbing disertasi program Doktor). Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Prof. Tamon Ueda yang telah memberikan surat rekomendasi sehingga saya bisa diterima dalam program *post-doctoral* selama dua tahun di Hokkaido University, Sapporo, dengan pendanaan dari Japan Society for the Promotion of Science (JSPS).

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tinggi saya sampaikan kepada almarhum Ir. Darmanto, Dip.H.E., M.Sc., Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM (periode 1996–2003) di masa saya awal pertama mengabdikan sebagai dosen; almarhum Prof. Sudjarwadi, Dekan Fakultas Teknik UGM (periode tahun 2000–2004) yang telah membuka kesempatan banyak dosen muda Fakultas Teknik UGM melanjutkan studi lanjut S2/S3 dengan dukungan pendanaan JICA dalam program ASEAN University Network/South East Engineering Education Development–Network (AUN/SEED-Net); Prof. Bambang Triatmodjo, Ketua Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM (periode tahun 2011–2016) yang telah memberikan dukungan kepada saya untuk menempuh program *post-doctoral* di Hokkaido University; Prof. Joko Sujono, Ketua Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM (periode tahun 2016–2021) yang selalu membimbing saya melaksanakan tugas-tugas sebagai Sekretaris Departemen dan tidak melupakan kegiatan penelitian serta penulisan publikasi; Prof. T Faisal Fathani, Ketua Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM (Periode tahun 2022–saat ini) yang selalu memotivasi saya untuk segera mengusulkan kenaikan jabatan akademik Guru Besar; Prof. Djoko Legono yang selalu membimbing saya menjalankan tugas sebagai *editor-in-chief* (periode tahun 2019–2023) pada Journal

of the Civil Engineering Forum (JCEF); *Associate Professor (ret)* A.J.M. Leijten dari TU-Eindhoven sebagai sahabat riset di bidang konstruksi kayu sejak tahun 2004.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga saya sampaikan kepada para guru dan senior di Kelompok Bidang Keahlian Teknik Struktur, yaitu Prof. Ir. Henricus Priyosulistyo, M.Sc., Ph.D.; Prof. Ir. Bambang Suhendro, M.Sc., Ph.D.; Prof. Dr. Ir. Bambang Supriyadi, CES., DEA.; Prof. Dr.Ing. Ir. Andreas Triwiyono; Prof. Ir. Iman Satyarno, M.E., Ph.D.; Dr. Ir. M Fauzie Siswanto, M.Sc.; Dr. Ir. Muliskh, M.Sc., M.Phil.; almarhum Dr. Ir. Fitri Mardjono, M.Sc.; Ir. Sudarmoko, M.Sc.; Dr.-Ing. Ir. Djoko Sulisty; Ir. Suprpto Siswosukarto, Ph.D.; serta rekan-rekan dosen lainnya yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu, atas bimbingan, kerja sama dan kebersamaan yang terjalin dengan baik dalam pelaksanaan kegiatan pengajaran, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada rekan-rekan pengurus Fakultas Teknik UGM: Dekan Prof. Selo; Wakil Dekan Pendidikan dan Kemahasiswaan, Prof. Sugeng Sapto Surjono; Wakil Dekan Keuangan, Aset dan SDM, Prof. Muslikhin Hidayat; para Ketua dan Sekretaris Departemen di Lingkungan Fakultas Teknik UGM; Manajemen ERIC; para Manajer; KKA; Para Ketua Tim; dan semua dosen serta tenaga kependidikan di lingkungan Fakultas Teknik UGM, tanpa mengurangi rasa hormat tidak dapat saya sebutkan satu-persatu.

Ungkapan terima kasih kembali saya sampaikan kepada rekan-rekan Wakil Dekan bidang Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Kerja sama di lingkungan UGM, atas kerja sama dan sinergi dalam mendukung pencapaian TCK dan IKU. Terima kasih kepada Prof. Bambang Supriyadi dan Prof. Andreas Triwiyono yang telah mengoreksi, memberikan masukan, dan menyempurnakan naskah pidato ini. Terima kasih kepada rekan-rekan dosen muda dalam grup UP2R atas semangat persahabatan dan kolaborasi di masa lalu, saat ini, dan di masa yang akan datang.

Rasa hormat dan terima kasih saya sampaikan kepada para guru saya di SD Negeri Linggar, SMP Yayasan Mitra Bakti, SMA Negeri 1 Cicalengka, Kab. Bandung. Terima kasih yang tulus saya sampaikan kepada teman-teman di sekolah dasar, teman-teman SMP, teman-teman SMA, teman-teman SIPIL UGM 94, teman-teman yang tergabung dalam Persatuan Mahasiswa Indonesia di Thailand (PERMITHA), dan teman-teman yang tergabung dalam Persatuan Pelajar Indonesia (PPI) di Sapporo dan di Hokkaido.

Perkenankan saya mengucapkan rasa terima kasih yang tiada henti kepada kedua orang tua tercinta, almarhumah Ibu Cicah Aisyah dan almarhum Bapak Achrum, yang telah menyayangi kami (saya bersama tujuh saudara kandung) dengan sepenuh hati dan bekerja tanpa kenal lelah agar kami bisa tumbuh sehat dalam kesederhanaan. Mohon maaf hingga saat ini saya belum bisa sedikit pun membalas kasih sayang yang Ibu dan Bapak berikan. Kepada kedua bapak ibu mertua yang tercinta, almarhum Bapak Prof. Sudjarwadi dan Ibu Tri Murniningsih, B.A., saya mengucapkan terima kasih atas kasih sayang, doa restu, perhatian, dan dukungan yang selalu dicurahkan kepada saya dan keluarga. Ucapan terima kasih yang tulus dan apresiasi yang tinggi saya sampaikan kepada istri tercinta, Visi Asriningtyas, S.T., M.Si., yang rela melepaskan kedudukan sebagai dosen tetap UGM di saat keluarga memerlukan, dan pendampingan pada sebagian publikasi ilmiah dalam bidang teknik. Kasih sayangnya dan perhatiannya kepada keluarga menjadi motivasi saya dalam melaksanakan tugas dan tanggung jawab dosen dengan sebaik-baiknya.

Terima kasih juga kepada kedua buah hati kami, Euis Alina Kusumaningtyas, S.Ked. dan Hasan Arya Arrayudha, yang selalu menjadi penghibur dalam keluarga. Terima kasih untuk saling menguatkan kita semua.

Akhir kata, kepada Ibu Bapak yang hadir di majelis yang mulia ini, baik yang berada di ruang Balai Senat Universitas Gadjah Mada, maupun yang mengikuti secara daring atau *live streaming*, saya mengucapkan terima kasih atas perhatiannya dan saya mohon doa restu

dari Ibu Bapak semua agar amanah Guru Besar ini dapat saya laksanakan dengan sebaik-baiknya. Saya mohon maaf bila dalam penyampaian pidato pengukuhan ini terdapat perkataan yang kurang berkenan di hati Ibu dan Bapak semua. Semoga Allah Swt., Tuhan Yang Maha Esa, selalu melindungi dan menuntun kita semua agar dapat mengamalkan ilmu pengetahuan untuk kesejahteraan umat manusia.

Aamiin YRA.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, M.K., Awaludin, A., Triwiyono, A., 2025. Development of an innovative cold-formed steel-plywood composite floor system using epoxy-resin adhesive for residential buildings. *Steel and Composite Structures* 54, 1–15. <https://doi.org/10.12989/scs.2025.54.1.001>.
- Awaludin, A., 2017. Sustainable Building Materials adalah Kebutuhan, dalam: Seminar Nasional SenaTS 2. Universitas Udayana, Denpasar.
- Awaludin, A., Danastri, A.D., Supriyadi, B., 2016. Development of cold formed steel-timber composites for roof structures: Connection systems. *International Journal of Technology* 7, 1117–1127. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v7i6.2719>.
- Awaludin, A., Firmanti, A., Muslikh, Theodarmo, H., Astuti, D., 2017. Wood Frame Floor Model of LVL Paraserianthes Falcataria, dalam: *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd, hlm. 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.317>.
- Awaludin, A., Hirai, T., Hayashikawa, T., Leijten, 2012. A Finite Element Analysis of Bearing Resistance of Timber Loaded through a Steel Plate. *Civil Engineering Dimension* 14, 1–6.
- Awaludin, A., Pribadi, A., Satyarno, I., 2013. RACKING RESISTANCE OF PARASERIANTHES FALCATARIA WOODEN PANEL UNDER MONOTONIC LOAD.
- Awaludin, A., Shulhan, M.A., Effendi, M.K., Irawati, I.S., Hassan, R., 2025. Flexural Properties of Structural Size Glulam Beams Made from Indonesian Wood Species: Experimental Programs. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 53, 287–300. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2025.53.3.287>.
- Awaludin, A., Wusqo, U., 2021. Prediksi Nilai Kuat Lentur Kayu Tropis Berdasarkan Nilai Modulus Elastis. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis* 18, 27–42. <https://doi.org/10.51850/jitkt.v18i1.542>.

- Awaludin, A., Wusqo, U., Rusgiyanto, 2024. Structural Evaluation of Timber-Concrete Composite Floor Constructed Using Open Web Truss Joist Made of LVL *Paraserianthes falcataria*. *International Journal of Integrated Engineering* 16, 143–155. <https://doi.org/10.30880/ijie.2024.16.09.011>.
- Baar, J., Tippner, J., Rademacher, P., 2015. Prediction of mechanical properties - modulus of rupture and modulus of elasticity - of five tropical species by nondestructive methods. *Maderas: Ciencia y Tecnologia* 17, 239–252. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000023>.
- Badan Standardisasi Nasional, 2013. Spesifikasi desain untuk konstruksi kayu. Jakarta.
- Baillères, H., Hopewell, G., Boughton, G., Brancheriau, L., 2012. Strength grading of pine, *BioResources*.
- Connolly, T., Loss, C., Iqbal, A., Tannert, T., 2018. Feasibility study of mass-timber cores for the UBC tall wood building. *Buildings* 8. <https://doi.org/10.3390/buildings8080098>.
- Dalbiso, A.D., Baghban, M.H.M., 2025. Environmental Impact of Timber Concrete Composites: An Overview, dalam: *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, hlm. 623–634. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69626-8_52.
- Dzhurko, D., Haacke, B., Haberbosch, A., Köhne, L., König, N., Lode, F., Marx, A., Mühlnickel, L., Neunzig, N., Niemann, A., Polewka, H., Schmidtke, L., Von der Groeben, P.L.M., Wagemann, K., Thoma, F., Bothe, C., Churkina, G., 2024. Future buildings as carbon sinks: Comparative analysis of timber-based building typologies regarding their carbon emissions and storage. *Front Built Environ* 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1330105>.
- Elina, K., Mika, K., Tiina, B., Veikko, M., Anni, H., Anna-Kaisa, T., Anna-Maria, V., Katsushi, K., Yuko, T., Jenni, T., Riina, M.M., Pertti, P., Tuula, J., 2023. Touch the wood: Antimicrobial properties of wooden and other solid material surfaces differ

between dry and moist contamination in public and laboratory exposure. *Environmental Advances* 13. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100416>.

Eratodi, I.G.L.B., Awaludin, A., 2017. Bending Capacity of Non-prismatic LVL Beams *Paraserianthes Falcataria*, dalam: *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd, hlm. 1362–1369. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.439>.

Ilic, J., 2009. MOE and MOR assessment technologies for improving graded recovery of exotic pines in Australia *PRODUCTS & PROCESSING*.

Martín-Gutiérrez, E., Estévez-Cimadevila, J., Suárez-Riestra, F., Otero-Chans, D., 2023. Flexural behaviour of a new timber-concrete composite structural flooring system. Full scale testing. *Journal of Building Engineering* 64. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105606>.

Oh, J.W., Pang, S.J., Ahn, K.S., Oh, J.K., 2023. A STRUCTURAL-MEMBER LEVEL ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF TIMBER, REINFORCED CONCRETE AND STEEL IN BUILDING CONSTRUCTION, dalam: 13th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2023. World Conference on Timber Engineering (WCTE), hlm. 989–994. <https://doi.org/10.52202/069179-0135>.

Ojala, A., Kostensalo, J., Viik, J., Matilainen, H., Wik, I., Virtanen, L., Muilu-Mäkelä, R., 2023. Psychological and physiological effects of a wooden office room on human well-being: Results from a randomized controlled trial. *J Environ Psychol* 89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2023.102059>.

Perković, N., Rajčić, V., Barbalić, J., 2021. Analytical and numerical verification of vibration design in timber concrete composite floors. *Forests* 12. <https://doi.org/10.3390/f12060707>.

Piazza, M., Riggio, M., 2008. Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures. *Journal of Building Appraisal* 3, 267–296. <https://doi.org/10.1057/jba.2008.4>.

- Rilatupa, J., 2021. Prospects of sustainable wood building architecture, dalam: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/878/1/012017>.
- Sawata, K., 2015. Strength of bolted timber joints subjected to lateral force. *Journal of Wood Science* 61, 221–229. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1469-8>.
- Shi, B., Zhou, X., Tao, H., Yang, H., Wen, B., 2024. Long-Term Behavior of Timber–Concrete Composite Structures: A Literature Review on Experimental and Numerical Investigations. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings14061770>.
- Steiger, R., Jockwer, R., Arnold, M., 2010. PROPERTY RELATIONSHIPS USED IN EN 338 STRENGTH GRADES OF NORWAY SPRUCE STRUCTURAL TIMBER.
- Subchan, S.K., 2024. Analisis Perilaku Struktur Jembatan Pedestrian Tipe Bowstring Dari Material Kayu Ulin. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Teshnizi, Z., Pilon, A., Storey, S., Lopez, D., Froese, T.M., 2018. Lessons Learned from Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of Two Residential Towers at the University of British Columbia, dalam: *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., hlm. 172–177. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.121>.
- Trabucco, D., Perrucci, G., 2025. Steel–Timber Hybrid Buildings: A Comparative Life Cycle Assessment Study of Global Warming Potential Impacts. *Sustainability (Switzerland)* 17. <https://doi.org/10.3390/su17020718>.
- Tsai, M.T., Hsu, C.C., 2024. Assessment of structural performance, materials efficiency, and environmental impact of multi-story hybrid timber structures in high seismic zone. *Case Studies in Construction Materials* 21. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03695>.

- Walley, S.M., Rogers, S.J., 2022. Is Wood a Material? Taking the Size Effect Seriously. *Materials* 15. <https://doi.org/10.3390/ma15155403>.
- Yang, T., Luo, D., Wang, L., Hu, C., Mei, C., 2024. New insights into the influencing mechanisms of hemicellulose removal on dynamic wood-water interactions characterized with low-field NMR. *Ind Crops Prod* 219. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119139>.
- Yang, X., Zhang, S., Wang, K., 2021. Quantitative study of life cycle carbon emissions from 7 timber buildings in China. *International Journal of Life Cycle Assessment* 26, 1721–1734. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01960-8>.