

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gambaran Umum Sifat Mekanik Kayu

Kayu memiliki perbedaan kekuatan dan kekakuan bukan saja antar spesies, namun juga dalam species yang sama (Blass dkk., 1995; Rhude,—). Perbedaan ini disebabkan antara lain oleh sifat pertumbuhan kayu, iklim, kepadatan hutan, lokasi pengolahan kayu, kadar air, dan cacat-cacat kayu, sehingga berpengaruh pula pada sifat fisik dan mekanik kayu yang dihasilkan (Somayaji, 1995).

Pada umumnya kayu-kayu yang terberat merupakan kayu yang terkuat dan bahwa keteguhan, kekerasan dan hampir semua sifat-sifat teknis lainnya berbanding lurus dengan berat jenis. Penyimpangan-penyimpangan dapat terjadi antara lain disebabkan oleh kadar ekstraktif yang tinggi atau endapan-endapan diantara serabut-serabut kayu. Zat-zat tersebut tidak meningkatkan kekuatan mekanik kayu, tetapi umumnya penambahan tebal dinding serabut-serabut dan sel-sel menyebabkan kenaikan berat jenis kayu (Soewarsono, 1990).

Untuk dapat menggunakan kaidah-kaidah perhitungan matematis, sifat-sifat mekanik kayu diidealisasikan sebagai berikut (Suhardjono dan Priskasari, 1994).

1. Homogenitas; karena kayu terdiri dari kumpulan serat-serat sehingga tidak bersifat homogen, tetapi dalam praktek kayu masih dapat dianggap homogen.

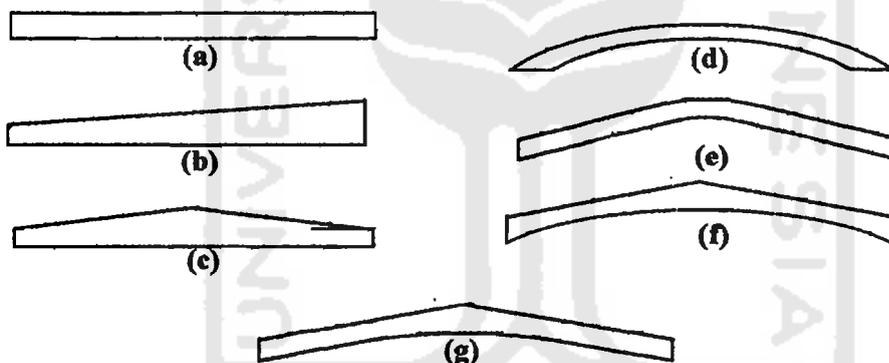
Adanya cacat-cacat kayu, penyimpangan arah serat dan lain-lain menyebabkan berbedanya kekuatan ijin kayu.

2. Hukum Hooke berlaku juga untuk kayu, sampai batas proposional sampai sekitar 75 persen dari tegangan ultimit.
3. Pada pembebanan tekan kayu bersifat elastis sampai batas proposional. Untuk beban tarik sifat-sifat kayu tergantung pada tingkat kelengasan kayu. Kayu kering memperlihatkan batas elastisitas yang rendah, sedangkan kayu yang berkadar lengas tinggi (basah) akan terjadi perubahan bentuk yang permanen pada beban yang kecil sekalipun.
4. Modulus kenyal kayu untuk beban tarik lebih besar 4 sampai 5 persen dari beban tekan, kekuatan tarik kayu lebih tinggi dari kekuatan tekan antara 2 sampai 3 kali.
5. Hipotesis Bernoulli dipakai (anggapan bahwa pada balok terlentur, tampang-tampang pada kondisi plastis tetap rata) untuk mempermudah perhitungan balok terlentur.
6. Kayu bukan bahan *isotropis* (mempunyai sifat sama pada semua arah), yang mana kayu dibedakan dalam tiga arah serat; longitudinal, radial dan tangensial, namun sifat mekanik kayu pada arah tangensial dan radial tidak banyak berbeda, sehingga dapat dibedakan hanya pada dua arah, yakni arah sejajar serat dan arah tegak lurus serat.

2.2 Balok Glulam

Struktur glulam (*glue laminated timber*) mulai diperkenalkan di Eropa pada akhir abad ke 19, berupa lapisan-lapisan kayu gergajian (*lumpers*) yang dilekatkan dengan bahan resin tertentu sehingga semua lapisan seratnya sejajar pada arah

memanjang (Breyer, 1988). Pembuatan struktur glulam telah dimulai di Jerman pada tahun 1906 menggunakan jenis perekat *casein*, kemudian di Switzerland dan Scandinavia, tetapi produksi balok laminasi dalam skala besar dimulai di Amerika beberapa tahun sebelum perang dunia ke II seiring berkembangnya teknologi dalam pembuatan resin sintesis (Tsoumis, 1991). Glulam berbentuk lengkungan (*arch erected*) mulai dibuat di Laboratorium Forest Products U.S.D.A. Madison, Wisconsin pada tahun 1934. Aplikasi struktur glulam lainnya telah dibuat bentuk *curved arches* dan kubah dengan panjang bentangan masing-masing mencapai 91 dan 115 meter (Somayaji, 1995). Beberapa bentuk struktur glulam yang umum seperti terlihat pada Gambar 2.1. (Rhude,—), dapat berupa balok lurus (*straight*) (a.), *single tapered-*

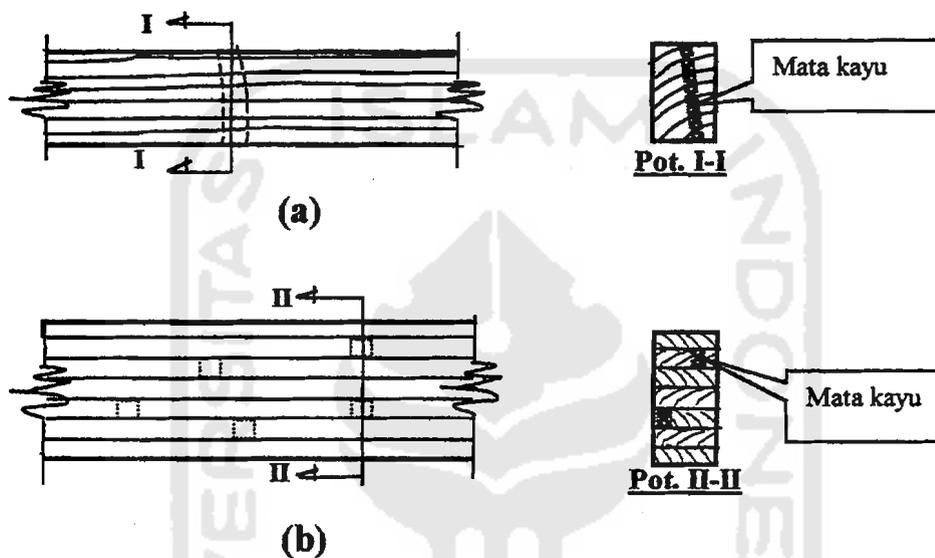


straight (b), *double tapered-straight* (c), *curved* (d), *pitched* (e), *double tapered curved* (f), *double tapered-pitched* (g).

Gambar 2.1 Bentuk-bentuk umum balok glulam

Struktur glulam memiliki beberapa kelebihan dibanding kayu gergajian yang solid, yakni; ukuran dapat dibuat lebih tinggi, lebih lebar, bentangan yang lebih panjang, bentuk penampang lengkung (*curved*) dan konfigurasi bentuk lonjong dapat difabrikasi dengan mudah, mutu kayu lebih rendah dapat digunakan pada daerah tegangan rendah, pengeringan awal tiap lapisan kayu dapat mengurangi perubahan

bentuk, serta reduksi kekuatan akibat adanya cacat-cacat kayu (misalnya mata kayu) menjadi lebih acak di sepanjang volume balok (Falk dan Colling, 1995; Blass dkk., 1995). Penyebaran mata kayu pada suatu potongan melintang balok glulam diilustrasikan oleh Breyer (1988) seperti terlihat pada Gambar 2.2. berikut.



Gambar 2.2 Penyebaran mata kayu; (a) balok utuh, (b) balok glulam

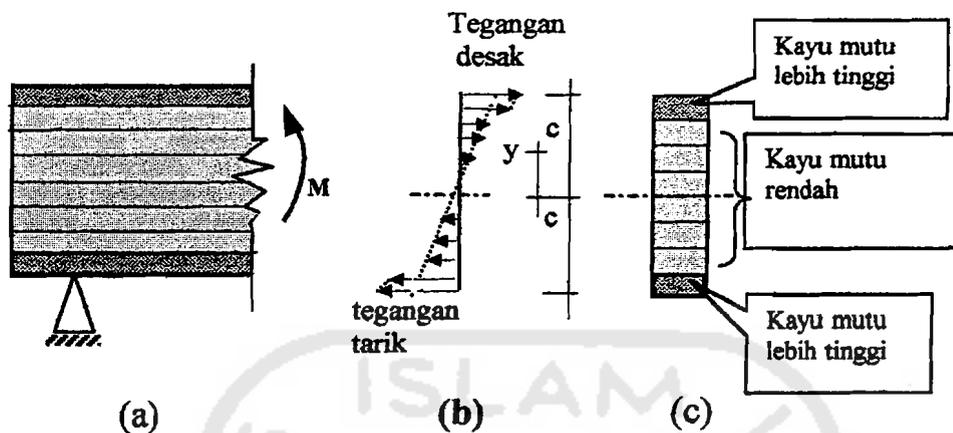
Blass dkk. (1995) menyatakan bahwa dalam pembuatan glulam, penyebaran mata kayu dalam volume balok akan memungkinkan bahan menjadi lebih homogen. Pengaruh kegagalan yang potensial pada daerah mata kayu dapat tereduksi, menghasilkan lebih sedikit variasi, dan pada mutu kayu yang lebih rendah, tegangan rata-rata akan lebih tinggi.

Penelitian balok glulam oleh Koval'chuk dan Batrushaitis (1989) dan Wardhani (1998) memperlihatkan bahwa cacat-cacat (*defect*) pada kayu kurang berpengaruh pada kekuatan balok glulam dibandingkan pada kayu yang solid. Hal tersebut didukung oleh Falk dan Colling (1995), bahwa karakteristik penting balok glulam

menghasilkan kekuatan yang melebihi dibandingkan lapisan tunggal serta deformasi yang terjadi lebih sedikit. Hasil penelitian oleh Bohannon dan Moody (1973) diperoleh bahwa di daerah dalam penampang suatu balok glulam yang mempunyai cacat kurang dari 60 persen, kekuatannya dibandingkan kayu tanpa cacat tidak berbeda secara signifikan, untuk lapisan-lapisan bagian atas dan bawah penampang balok yang kurang dari 20 persen tidak perlu memakai lapisan-lapisan kayu yang bebas cacat untuk memperoleh rasio kekuatan 100 persen.

Struktur glulam umumnya difabrikasi dengan lebar dan tinggi tertentu. Ketebalan bagian-bagian lapis tidak melebihi 2 inci (Blass dkk., 1995). Umumnya ketebalan tiap lapis balok glulam antara $\frac{3}{4}$ inci sampai $1\frac{1}{2}$ inci, lapisan yang lebih tipis untuk ketebalan $\frac{3}{4}$ inci diperlukan untuk membuat struktur glulam bentuk-bentuk lengkung. Lebar glulam dapat bervariasi antara 3 sampai $10\frac{1}{2}$ inci. Kadar air tiap lapisan dibatasi sebesar 16 persen atau kurang sebelum dilekatkan, perbedaan kadar air tiap lapisan dibatasi sampai 5 persen (Breyer, 1988).

Balok glulam dapat dibentuk dengan dua mutu kayu yang berbeda, lapisan-lapisan kayu yang mempunyai kekuatan tinggi ditempatkan pada bagian luar yang mempunyai tegangan lebih tinggi serta lapisan-lapisan bagian dalam dengan kayu mutu lebih rendah (Blass dkk., 1995) seperti terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Penampang balok glulam; (a) penampang memanjang, (b) diagram tegangan, (c) potongan melintang

Golyakov (1976) telah meneliti pengaruh variasi mutu lapisan-lapisan balok glulam terhadap kekakuan balok, hasil yang diperoleh bahwa penempatan lapisan-lapisan kayu mutu lebih rendah pada bagian dalam akan cocok untuk balok bentang panjang. Sebaliknya, penempatan lapisan-lapisan kayu mutu lebih tinggi pada bagian dalam lebih sesuai untuk balok-balok bentangan pendek.

2.3 Kayu Meranti Merah

Kayu meranti merah mempunyai nama botanis *Shorea Leprosula* famili *Dipterocarpaceae*. Kayu meranti merah mempunyai banyak *species*, di beberapa daerah dikenal dengan nama antara lain; meranti abang, abang gunung, damar merah, engkabang bukit, lanan merah, lapong tembaga, merambai dan sebagainya. Kayu meranti merah termasuk kelas kuat II-IV dengan berat jenis antara 0,30 sampai 0,86, berat jenis rata-rata 0,52, serta kelas awet IV/III. Secara visual, kayu meranti merah mempunyai ciri umum kayu teras sangat heterogen, mulai hampir putih, coklat pucat,

merah muda, merah kecoklatan, sampai merah tua kecoklatan, gubal mudah dibedakan, yang umumnya berwarna putih, kekuningan sampai agak coklat muda. Teksturnya agak kasar tetapi rata. Arah serat umumnya berpadu dan bergelombang. Permukaannya biasanya mempunyai corak berupa pita-pita pada bidang radial, licin dan agak mengkilap. Jenis kayu ini tergolong lunak sampai agak lunak. Ciri utama kayu ini mempunyai saluran aksial menyebar menurut garis tangensial panjang, berisi endapan berwarna putih, pori soliter dan berganda radial ada yang berisi tilosis, kayu teras berwarna merah muda kecoklatan

2.4 Kayu Keruing

Kayu keruing mempunyai nama botanis *Dipterocarpus* famili *Dipterocarpaceae*. Kayu keruing mempunyai banyak *species*, di beberapa daerah dikenal dengan nama antara lain; karup, keladan, kelalar, lagan, marakeluang, palahlar, tempehes, tempurau, keruing minyak, keruing daun halus, keruing batu, keruing kutai dan sebagainya. Di negara lain dikenal dengan nama Apitong (Philipina), bagac, basilan, panau, hagakhak (Philipina), keruing (Malaysia barat, Sabah, Serawak), gurjun, indian gurjun (India) dan lain-lain (Martawijaya dan Kartasujana, 1977).

Secara visual, kayu kayu teras terlihat berwarna coklat-merah sampai coklat-kelabu, kayu gubal berwarna kuning atau coklat muda semu-semu kelabu dan mempunyai batas yang jelas dengan kayu teras, tekstur kayu kasar sampai agak kasar dengan arah serat lurus dan kadang-kadang berpadu. Teksturnya kasar sampai agak kasar dengan arah serat lurus, kadang kadang berpadu. Permukaan kayu agak licin,

seringkali melengkak. Kayu keruing mempunyai bau damar yang agak menyolok (Martawijaya dan Kartasujana, 1977).

Kayu keruing termasuk kayu kelas kuat I sampai II dengan berat jenis rata-rata 0,79 serta kelas awet III (Anonim,---). Menurut Maratwijaya dkk. (1981), besarnya penyusutan kayu keruing pada arah radial sebesar 2,8% - 4,7%, penyusutan arah tangensial sebesar 4,7% - 5,9%. Kayu keruing pada umumnya mudah direkat. Penggunaan kayu keruing cocok dipakai untuk konstruksi bangunan (balok, tiang, papan dan kerangka atap).

2.5 Resin Sintetis

Hartomo dkk. (1993) membedakan jenis resin sintetis menurut sifat mekanisnya menjadi tiga jenis, yakni resin *thermoplastik*, resin *thermoset* dan resin *blend* resin-karet. Jenis resin *thermoplastik* antara lain; *poliamida*, *polime vinil/akrilik*, turunan *selulosa* atau bahan alam *rosin*, *shellac*, *resin oleo* dan lilin mineral. Sifat resin tersebut akan melunak bila dipanaskan serta mengalami *creep* bila dikenai tegangan. Resin ini hanya digunakan untuk beban-beban ringan non-struktural.

Resin *thermoset* berasal dari bahan-bahan alam (hewan, tanaman, *kasein*) atau sintetik yang berupa *epoksi*, *fenolik*, *poliester*, *poliaromat*. Resin termoset sifatnya bagus, tahan *creep*, memadai untuk resin struktural beban berat, tahan kondisi ekstrim panas, dingin, tahan radiasi, kelembaban, serta tahan terhadap bahan kimia, sedangkan resin *blend* resin-karet merupakan gabungan resin termoset dengan bahan

karet, beberapa contoh resin ini adalah *fenolik-nitril* dan *penolik-neopren*, penggunaan resin ini dipakai untuk resin struktural maupun non- struktural.

Proses pengerasan resin *thermoplastik* merupakan proses secara fisik hasil penguapan bahan pelarut atau menurunnya temperatur, sifat resin *thermoplastik* yang telah mengeras akan melunak bila dikenai panas. Resin *thermoset* mengeras karena reaksi kimia dengan bantuan panas atau katalis atau kedua-duanya, kemudian akan mengeras secara permanen bila didinginkan (Tsoumis, 1991).

Jenis-jenis perekat buatan yang umum (dipakai secara luas) dalam perekatan kayu adalah; phenol formaldehida (PF), resorsinol formaldehida (RF), melamin formaldehida (MF) dan urea formaldehida (UF). Bahan-bahan tersebut diperoleh dari alam berupa gas alam, coal (batu bara) dan petrolium (minyak bumi) dengan bahan tambahan unsur-unsur alam di udara (Prayitno, 1994). Bagan alir asal pembuatan perekat PF, RF, MF dan UF seperti terlihat pada Lampiran 1.

Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia N1-5 (PKKI-1961) menjelaskan jenis-jenis perekat kayu konstruksi dan macam penggunaannya pada konstruksi, seperti terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Jenis-jenis perekat dan kegunaannya

Macam Perekat	Bentuk dalam Perdagangan	Cocok untuk Bangunan
Casein	tepung	yang terlindung, seperti kuda-kuda dan sebagainya
Urea formaldehyde	cairan atau tepung dengan bahan pengeras	yang terlindung, dimana warna perlu diutamakan
Resorcinol Resin	cairan dengan zat pengeras	yang tidak terlindung, seperti jembatan, stadion, bangunan kapal
Phenolic Resin	cairan dengan zat pengeras	yang tidak terlindung, seperti jembatan, stadion, bangunan kapal

Perekat PF dapat berupa cairan, tepung maupun berupa kertas lembaran (*film*). Pengerasannya pada suhu tinggi, yakni 115 sampai 150°C, hanya untuk jenis setting dingin dapat mengeras pada suhu ruang (20°C) (Tsoumis, 1991). Perekat PF tahan cuaca, air panas atau mikroba dan awet pada suhu tinggi, namun bila terlalu asam (kontrol katalis tidak baik) mengakibatkan kerusakan pada kayu pada suhu hangat-lembab. Penggunaan resin ini banyak dipakai untuk industri plywood dan untuk penggunaan luar ruangan (Blass dkk., 1995).

Perekat RF dapat mengeras pada suhu antara 5 sampai 100°C. dan dapat digunakan pada kadar air kayu sampai 18°. Perekat RF mempunyai kekuatan yang sangat tinggi, namun harganya mahal. Biasanya diformulasikan sebagai phenol-resorcinol menjadi perekat jenis Phenol-Resorcinol Formaldehida (PRF) (Tsoumis, 1991).

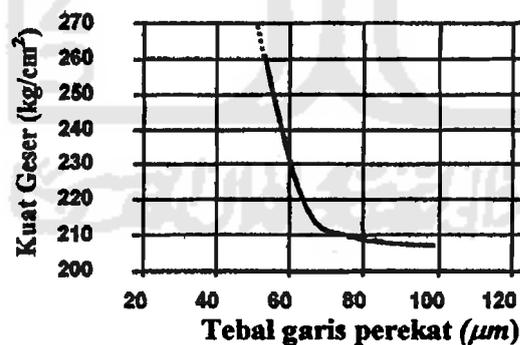
Perekat MF biasanya beredar di pasaran dalam bentuk tepung (yang dapat larut dengan air), sebab dalam bentuk cairan akan sulit dalam masa penyimpanan. Suhu pengerasannya antara 50 sampai 100°C. Perekat MF tahan air, suhu tinggi dan mikroorganisme, namun dari segi harga cukup tinggi (Tsoumis, 1991).

Perekat UF jenis press panas (*hot press*) hanya sesuai untuk penggunaan non-struktural seperti *plywood*, papan *chip* dan lainnya. Hanya perekat UF khusus setting dingin yang cocok untuk keperluan struktural, sifatnya tidak boleh terlalu asam serta harus ditambahkan bahan pengisi (*filler*) agar dapat mengisi celah (sampai 1 mm). Disamping itu, garis perekatan dapat retak apabila lebih tebal dari 0,1 mm. Perekat UF memiliki keterbatasan terhadap air dan panas dalam waktu yang cukup lama. Perekat UF hanya digunakan untuk struktur glulam type interior (Blass dkk., 1995).

2.6 Perekatan Kayu

Teknik perekatan dengan bahan porous memerlukan alat pengempaan. Sistem pengempaan dapat dilakukan dengan tekanan panas (*hot-pressing*) atau kempa dingin (*cold-pressing*). Pengempaan panas membutuhkan waktu relatif singkat, namun secara teknis sulit dilakukan untuk balok laminasi, pengempaan dingin membutuhkan waktu lebih lama (Prayitno, 1996).

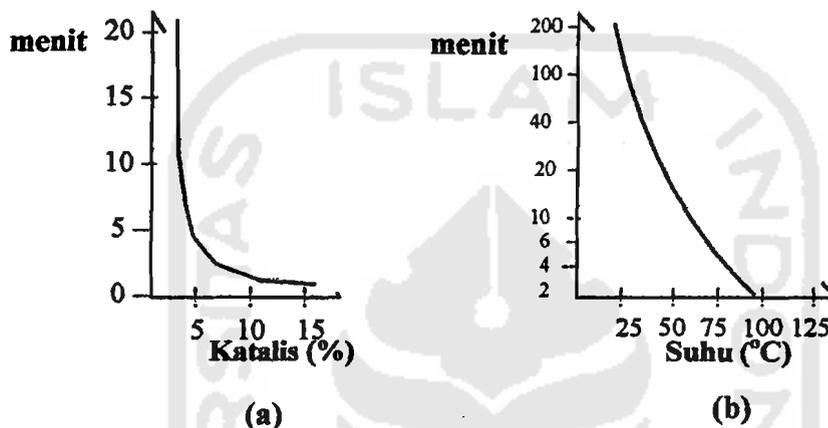
Besarnya tekanan yang diberikan menurut Tsoumis (1991) adalah sebesar 0,7 MPa untuk kayu-kayu lunak dan 1 MPa untuk kayu keras. Menurut Blass dkk. (1995), pada umumnya besarnya tekanan yang diberikan antara 0,4 - 1,2 N/mm². Ketebalan resin menghasilkan keteguhan rekat yang baik antara 0,01 - 0,002 in. (Selbo dalam Prayitno, 1996). Hubungan antara ketebalan garis perekatan dengan kekuatan geser kayu seperti diperlihatkan pada Gambar 2.4 (Maxwell dalam Kollmann, 1975).



Gambar 2.4 Hubungan ketebalan garis perekat dengan kuat geser kayu

Proses dan pengerasan reaksi selama perekatan berlangsung dengan bantuan pemanasan atau bahan katalis. Bahan katalis atau *hardener* dapat berupa jenis-jenis asam, *paraformaldehyde*, garam-garam amonium atau bahan kimia lainnya. Bahan

tambahan diperlukan untuk menekan biaya atau meningkatkan sifat perekatannya (misalnya kekentalan), bahan tambahan tersebut berupa bahan pengembang (*extender*) atau bahan pengisi (*filler*). Beberapa faktor yang mempengaruhi pengerasan perekat terlihat pada Gambar 2.5 (Tsoumis, 1991).



Gambar 2.5 Pengaruh pengerasan perekat terhadap (a) hardener NH_4Cl dan (b) suhu pada perekat UF

Prayitno (1996) menyatakan bahwa kekuatan rekat kayu-kayu Indonesia dengan berat jenis lebih dari 0,80 menghasilkan kekuatan rekat yang kurang lebih sama. Hasil ini masih kurang meyakinkan karena tergantung beberapa faktor, namun dapat disimpulkan bahwa korelasi yang positif hanya terlihat pada berat jenis dibawah 0,80. Beberapa faktor mempengaruhi dalam perekatan kayu antara lain adalah faktor perekat, faktor bahan yang direkat, teknik perekatan, cara pengujian, aplikasi bahan. Faktor perekat dipengaruhi oleh bahan pengisi (*filler*), bahan pengembang (*extender*), bahan pengeras (*hardener*), bahan pengawet, bahan tahan api dan lain sebagainya. Adapun faktor bahan yang direkat dipengaruhi oleh struktur anatomi bahan, massa jenis, kadar air, sifat permukaan dan lain-lain.

2.7 Landasan Teori

2.7.1 Proses perekatan kayu

Glue Spread adalah jumlah perekat yang dilaburkan per satuan luas permukaan bidang rekat. Jumlah perekat yang dilaburkan menggambarkan banyaknya perekat terlabur agar tercapainya garis perekat pejal yang kuat. Satuan luas permukaan rekat ditentukan dengan satuan Inggris yakni seribu kaki persegi (1000 *square feet*) dengan sebutan MSGL yang dinyatakan dengan satuan pound (lbs). Bila kedua bidang permukaan dilabur, maka disebut MDGL atau pelaburan dua sisi. Untuk perekatan dua sisi diperlukan tambahan perekat sebesar 10 persen (Prayitno, 1996). Di laboratorium, satuan perekat dikonversikan menjadi lebih sederhana yang disebut GPU (*gram pick up*) dengan Persamaan 2.1.

$$GPU = \frac{S.A}{317,5} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan *GPU* = gram pick up (dalam gram), *S* = jumlah perekat yang dilaburkan dalam pound/MSGL atau pound/MDGL, *A* = Luas bidang yang akan direkatkan (inci per segi). Apabila luas bidang rekat dihitung dalam centimeter persegi, maka faktor pembagi pada persamaan 2.1 menjadi 2048,2.

Tahapan dalam perekatan kayu secara umum dilakukan sebagai berikut.

1. Menimbang sejumlah dua pertiga bahan perekat yang akan dipakai ke dalam pencampur (biasanya dihitung terhadap bahan padat atau bukan bahan pelarut).
2. Menimbang bahan tambahan seperti pengisi (*filler*), pengembang (*extender*), pengeras (*hardener*), katalisator (*catalyst*) dan pengawet (*preservative*) serta bahan lain yang diperlukan, kemudian dicampur dengan perekat yang terdahulu.

3. Mengaduk bahan adonan perekat tersebut sampai tidak menunjukkan gumpalan (*lump free condition*).
4. Menambahkan sisa sepertiga bahan perekat bersama-sama dengan air yang diperlukan.
5. Mengaduk sampai tidak ada gumpalan.

Langkah pengerasan perekat pada permukaan kayu terdiri dari lima tahap, yakni; *flow* (aliran sisi atau aliran samping), *transfer* (perpindahan dari sisi terlabur ke sisi tak terlabur), *penetration* (masuknya bahan perekat ke dalam bahan yang direkat), *wetting* (pembasahan kayu oleh pelarut perekat) serta *solidification* (pengerasan perekat menurut cara pengerasannya) (Prayitno, 1996).

2.7.2 Kriteria perancangan balok glulam

Perancangan menurut batas tegangan ijin (*allowable state design (ASD)*) sudah lama dipakai sebagai dasar perhitungan konstruksi kayu, dimana tegangan yang terjadi pada elemen struktur tidak melampaui tegangan yang diijinkan. Peraturan konstruksi kayu di Indonesia (PKKI, NI-5) tahun 1961 menggunakan konsep perancangan tersebut. Peraturan lain yang lebih lengkap mengenai perancangan balok glulam adalah peraturan *NDS (National Design Specification)* yang dikeluarkan oleh *National Forest Products Assosiation (NFPA)*.

Konsep lain untuk perancangan struktur kayu yang dikembangkan saat ini yakni perancangan atas dasar *reliability* menggunakan konsep perancangan kekuatan batas (*limit state design*). Kekuatan batas tersebut terdiri dari kekuatan batas ultimit (*ultimate limit state*) dan batas kemampuan layan (*serviceability limit state*), dimana tegangan yang terjadi tidak melampaui batas ultimit bahan. Di sisi lain, tidak ada

beban dari kombinasi-kombinasi pembebanan yang dialami struktur yang melampaui batas kemampuan layannya. Standar perancangan kekuatan batas telah diatur dalam standar LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) yang dikeluarkan oleh AF&PA /ASCE-95.

Dasar perancangan balok glulam sama seperti perancangan balok yang utuh, namun ada beberapa faktor modifikasi diperlukan untuk perancangan struktur glulam (Rhude,—; Breyer, 1988). Faktor-faktor modifikasi balok glulam antara lain oleh pengaruh lama pembebanan, pengaruh kadar air, pengaruh ketinggian balok, pengaruh bentuk penampang balok dan lain sebagainya (dibahas lebih lanjut pada sub bab 2.7.7).

Perancangan menurut ASD. Perancangan balok glulam menurut spesifikasi NDS-1991 didasarkan pada kriteria tegangan lentur aktual (f_b) harus lebih kecil atau sama dengan tegangan lentur izin yang dikoreksi (F'_b), atau :

$$f_b \leq F'_b \dots\dots\dots(2.2a)$$

$$F'_b = F_b \times C \dots\dots\dots(2.2b)$$

dengan; F_b = Tegangan lentur izin, C = faktor-faktor modifikasi.

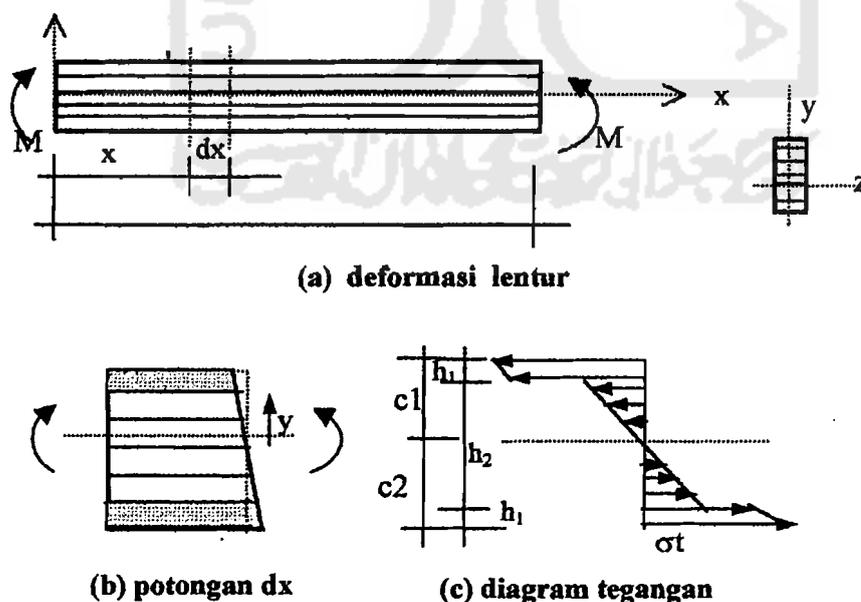
Tegangan ijin lentur mengacu pada ketentuan sebagai berikut.

1. Analisa kekuatan kayu bebas cacat secara statistik (kecuali untuk tegangan tekan sejajar arah serat dan modulus elastisitas), digunakan tingkat kepercayaan (*convident limit*) sebesar 5%.
2. Perbedaan kadar air yang melebihi 5% tidak diperhitungkan.

3. Rasio tegangan digunakan untuk menetapkan nilai kayu bebas cacat sebagai perhitungan reduksi kekuatan.
4. Tegangan pada poin (3) selanjutnya direduksi dengan faktor ketentuan umum (*general adjustment factor*) yang berhubungan dengan waktu pengujian, perakitan dan penggunaan ketentuan serta beberapa faktor-faktor lainnya.

Pengaruh kombinasi ditetapkan sebagai faktor aman rata-rata sebesar 2,5. Untuk modulus elastisitas tidak diberikan faktor aman, beberapa alasannya adalah bahwa modulus elastisitas digunakan untuk perhitungan defleksi aktual balok (Breyer, 1988).

Ketentuan perancangan balok glulam menurut spesifikasi NDS-1991 digunakan persamaan lenturan seperti perancangan balok kayu yang solid dengan memberikan faktor-faktor modifikasi tertentu. Idealisasi distribusi tegangan aktual yang terjadi pada balok diilustrasikan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Idealisasi distribusi tegangan lentur balok glulam

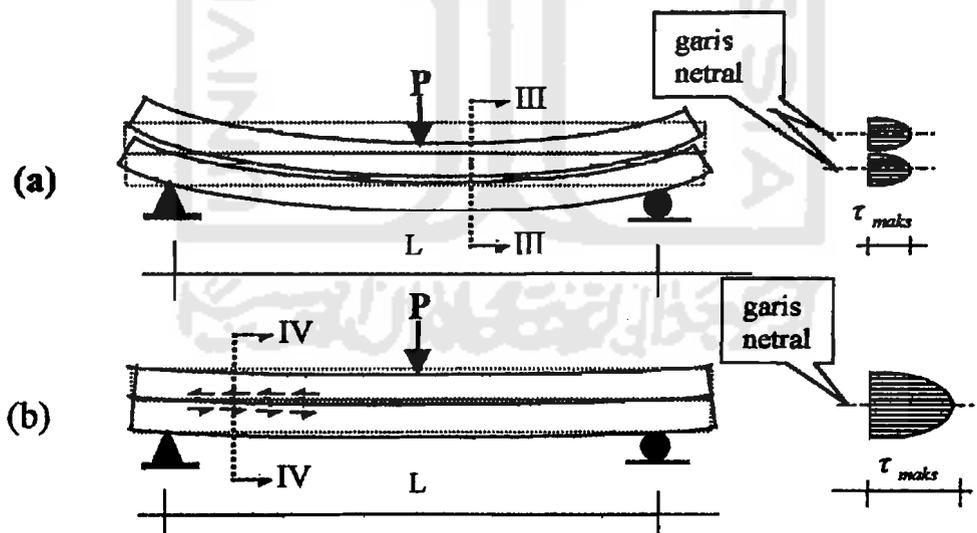
Besarnya tegangan lentur adalah:

$$f_b = \frac{M.y}{I_t} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$I_t = 2 \left\{ \frac{1}{12} b h_1^3 + b h_1 \left(\frac{1}{2} h_1 + \frac{1}{2} h_2 \right)^2 \right\} \frac{E_1}{E_2} + \frac{1}{12} b h_2^3 \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan M = momen akibat beban lateral, y = jarak dari garis netral ke serat penampang yang ditinjau, I_t = momen inersia penampang transformasi.

Gaya geser yang terjadi pada struktur balok dapat berupa gaya geser vertikal maupun horizontal. Oleh karena tegangan geser kayu sejajar arah serat relatif kecil sehingga tegangan geser horizontal dapat pula menjadi penyebab kegagalan struktur (Somayaji, 1995). Perilaku tegangan geser horizontal dalam balok diilustrasikan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Tegangan geser horizontal balok; (a) tanpa interaksi geser dan, (b) dengan interaksi geser

Spesifikasi NDS-1991 memberikan batasan tegangan geser horizontal balok glulam berdasarkan Persamaan 2.5.

$$f_v = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} \leq F'_v \dots\dots\dots(2.5a)$$

$$F'_v = F_v \cdot C \dots\dots\dots(2.5b)$$

dengan V = gaya geser yang terjadi, Q = statis momen terhadap sumbu netral penampang, I = momen inersia penampang, b = lebar balok, F_v = tegangan geser ijin, C = faktor-faktor modifikasi.

Perancangan menurut LRFD. Perancangan balok glulam menurut standar LRFD didasarkan pada kriteria beban terfaktor (R_u) harus lebih kecil atau sama dengan tahanan berfaktor ($\lambda \phi R'$), atau:

$$R_u \leq \lambda \phi R' \dots\dots\dots(2.6a)$$

$$R' = R_n \times C \dots\dots\dots(2.6b)$$

dengan; λ = faktor pengaruh kondisi pembebanan ϕ = faktor ketahanan untuk balok lentur, R_n = Tahanan referensi dan C = faktor-faktor modifikasi. Faktor pengaruh pembebanan (λ) dan faktor tahanan (ϕ) seperti terlihat pada Lampiran 2.

Tahanan referensi R_n ditentukan secara konsep *reliability* berdasarkan kondisi pengujian bahan dalam waktu singkat (*short-term*) dan kondisi kering udara. Tahanan referensi struktur glulam didasarkan pada kondisi sebagai berikut.

1. Kondisi kadar air maksimum 16 persen serta batas bawah kadar air simbang tahunan rata-rata adalah enam persen.

2. Berlaku untuk suhu 32°C, atau suhu dapat mencapai 65°C pada komponen struktur, atau temperatur sesaat yang melebihi 93°C pada panel struktural. Komponen struktur kayu tidak diperkenankan untuk secara terus menerus berada pada suhu di atas 65°C.
3. Produk-produk kayu yang tidak diawetkan.
4. Produk baru (bukan merupakan material yang diambil untuk digunakan kembali).
5. Komponen struktur tunggal tanpa pembagi beban (*load sharing*).

2.7.3 Kerapatan dan kekuatan kayu

Pedoman yang digunakan sebagai kriteria kekuatan kayu untuk struktur mengacu pada PKKI-1961. Kekuatan kayu dibedakan menjadi 5 (lima) kelas kekuatan, yakni kelas I, II, III dan IV dan V. Besarnya kerapatan dan kisaran kekuatan kayu dapat digunakan untuk penentuan kelas kuat kayu. Hubungan kerapatan dengan kekuatan kayu seperti terlihat pada Tabel 2.2 mengacu pada kerapatan kayu pada kondisi kadar lengas 15 % dari kayu kering mutlak (Anonim --).

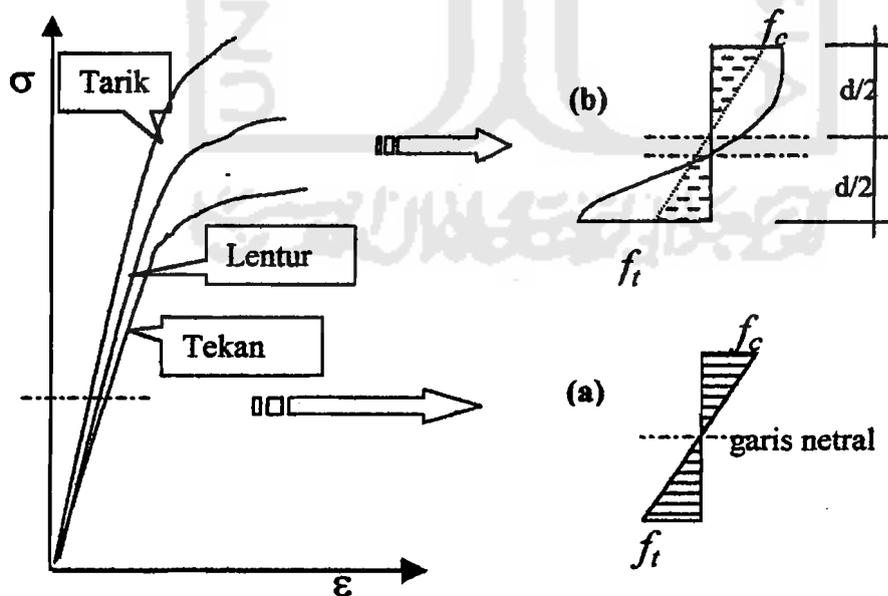
Tabel 2.2 Hubungan kerapatan dengan kelas kuat kayu

Kelas Kuat	Kerapatan (gram/cm ³)	Kekuatan Lengkung Absolut (gram/cm ³)	Kekuatan Tekan Absolut(gram/cm ³)
I	≥ 0,90	≥ 1100	≥ 650
II	0,90 – 0,60	1100 – 725	650 – 425
III	0,60 – 0,40	725 – 500	425 – 300
IV	0,40 – 0,30	500 – 360	300 – 215
V	< 0,30	< 360	< 215

2.7.4 Modulus of Rupture (MOR)

Kekuatan balok sangat dipengaruhi oleh interaksi tegangan tekan dan tarik pada arah sejajar serat. Tegangan lentur balok kayu hanya memperlihatkan perilaku elastis pada kondisi beban rendah, pada tegangan lentur selanjutnya, diagram tegangan-regangan lentur tidak lagi berperilaku elastis. Tegangan lentur maksimum yang terjadi juga disebut *modulus of rupture (MOR)* yang dipengaruhi oleh kapasitas tarik dan tekan pada penampang balok.

Nilai modulus tersebut berada diantara tegangan tarik dan tekan, namun bukan menggambarkan tegangan ekstrim gabungan. Ketidaksesuaian antara tegangan aktual dan tegangan yang dihitung (menggunakan persamaan lenturan) disebabkan perilaku inelastis dan posisi sumbu netral penampang yang selalu berubah (Somayaji, 1995). Gambar 2.8 memperlihatkan hubungan tegangan regangan antara uji tarik, tekan dan lentur kayu.



Gambar 2.8 Diagram tegangan regangan; (a) kondisi elastis, dan (b) saat keruntuhan

2.7.5 Kekakuan balok glulam

Kurva hubungan antara beban dan lendutan yang terjadi pada balok dapat digunakan untuk menentukan kekakuan balok. Kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang dibutuhkan untuk memberikan satu unit *displacement*. Besarnya kekakuan pada balok dihitung dengan Persamaan 2.7.

$$k = \frac{P}{\delta} \dots\dots\dots (2.7)$$

dengan k = kekakuan, P = besarnya beban dan δ = lendutan.

Penentuan besarnya faktor kekakuan (EI) balok dapat diketahui menggunakan hubungan momen dan kelengkungan sebagai berikut.

$$\varphi = \frac{M}{EI} \text{ atau } EI = \frac{M}{\varphi} \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan φ = kelengkungan balok, M = momen, EI = faktor kekakuan.

Kelengkungan balok glulam didekati dengan metode beda hingga (*finite difference*) yakni *central difference*, dimana kelengkungan diperoleh berdasarkan besaran lendutan yang terjadi pada titik tinjauan serta titik-titik yang bersebelahan pada jarak yang sama, atau:

$$\varphi = \frac{1}{r} = \frac{(y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}))}{(\Delta_x)^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan y_i = lendutan pada titik i , Δ_x = jarak antara titik tinjauan terhadap sumbu x.

2.7.6 Lendutan balok glulam

Adanya pembebanan lateral, menyebabkan terjadinya lendutan pada balok. Lendutan yang terjadi akibat pembebanan dua titik untuk penampang balok dapat dihitung menggunakan rumus :

$$\delta = \frac{P \cdot a}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan :

δ = lendutan ; P = besarnya beban ; L = panjang bentang ; EI = faktor kekakuan,
a = jarak antara beban dan tumpuan

Pembatasan lendutan yang disyaratkan PKKI-1961 yakni $\delta_{maks} \leq 1/300L$, untuk konstruksi terlindung, dengan L = panjang bentang. Untuk balok yang tidak terlindung, lendutan dibatasi $\delta_{maks} \leq 1/400L$. Spesifikasi NDS-1991 memberikan batasan $\delta_{maks} \leq 1/240L$ untuk pembebanan kombinasi.

2.7.7 Faktor-faktor modifikasi balok glulam

Faktor modifikasi struktur kayu secara umum adalah; faktor kadar air (C_M), faktor suhu (C_T), faktor pengawetan kayu (C_{PW}), faktor lamanya pembebanan (C_D), faktor ukuran penampang (C_F), faktor untuk balok lengkung (C_C), faktor kelangsingan (C_S), faktor bentuk (C_f), faktor perlakuan terhadap api (C_{ri}). Faktor-faktor tersebut tidak seluruhnya digunakan dan tergantung dari kondisi yang mungkin dialami suatu struktur glulam selama masa layannya.

Tegangan rancang yang disyaratkan menurut ASD, didasarkan pada kondisi beban normal, yakni pembebanan selama 10 tahun (asumsi beban hidup pada lantai). Oleh karena itu, faktor lamanya pembebanan (C_D) ditetapkan sebesar 1,0. Besarnya C_D untuk jenis pembebanan lainnya berkisar antara 0,9 sampai 2,0 (Breyer, 1988; NDS-1991) atau seperti terlihat pada Tabel 2.3. Faktor kadar air (C_M) berdasarkan pada kondisi kadar air masa layan kurang dari 16 persen. Faktor C_M hanya dikoreksi bila konstruksi pada masa layan dapat melebihi 19 persen.

Tabel 2.3 Faktor lama pembebanan (C_d)

Kombinasi Pembebanan Jangka Pendek	C_d
Beban Mati	0,90
Beban Hidup pada Lantai	1,00
Beban Salju	1,15
Beban Hidup pada Atap	1,25
Beban Angin atau Gempa	1,33
Beban Kejut	2,00

Tegangan lentur ijin yang disyaratkan didasarkan pada balok *shallow* penampang persegi yang dikenai tegangan pada sumbu kuat. Balok *shallow* didefinisikan sebagai balok yang dengan tinggi balok 12 inci atau kurang. Faktor ukuran penampang C_F , dihitung berdasarkan Persamaan 2.11.

$$C_F = \left(\frac{12}{d}\right)^{1/9} \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan d = tinggi balok (dalam inci).

Faktor C_F menurut Persamaan diatas berdasarkan pada asumsi; balok dukungan sederhana (sendi-rol), beban merata dan rasio $L/d = 21$. Untuk kondisi lainnya, maka faktor C_F di koreksi menurut Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Faktor reduksi C_F

Rasio Perubahan		Kondisi Pembebanan	Perubahan
l/d	(%)	Balok Sendi-Rol	(%)
7	+6,2	Satu beban terpusat	+7,8
14	+2,3	Beban merata	0,0
21	0,0		

2.7.8 Kestabilan lateral balok glulam

Faktor kelangsingan pada balok dihitung menurut Persamaan 2.12.

$$C_s = \sqrt{\frac{l_e d}{b^2}} \dots\dots\dots (2.12)$$

dengan l_e = panjang bentang efektif balok, d dan b masing-masing adalah tinggi dan lebar balok. Untuk balok satu bentang dengan pembebanan terpusat, $l_e = 1.61 l_u$, untuk balok satu bentang dengan beban terbagi merata, $l_e = 1.92 l_u$, dan untuk balok satu bentang atau balok *cantilever* dengan beban lainnya, harga $l_e = 1.92 l_u$.

Apabila faktor kelangsingan, C_s , tidak lebih dari 10 (balok pendek), harga tegangan disain, F_b' berdasarkan Persamaan 2.3 dan 2.5 dapat dipakai. Jika faktor kelangsingan lebih besar dari 10, maka harga F_b' diperhitungkan faktor kestabilan balok. Untuk balok bentang panjang, faktor C_s tidak boleh lebih dari 50.

Untuk balok penampang empat persegi, digunakan syarat batas pengekanan untuk mencegah perpindahan rotasi lateral. Penentuan pengekanan lateral berdasarkan rasio tinggi terhadap tebal balok, yakni.

- a. Rasio d/b 1 sampai 2: tidak diperlukan pengekanan lateral.
- b. Rasio d/b 3 sampai 4: Ujung-ujung balok dipertahankan dalam posisi yang tetap dengan; balok yang solid setinggi balok, penghalang, penggantung, dipaku atau dibaut pada balok-balok rangka, atau dengan cara lainnya yang sesuai.
- c. Rasio d/b 5: salah satu ujungnya dipegang segaris sepanjang bentang.
- d. Rasio d/b 6: dihalangi balok solid setinggi balok atau pengaku menyilang ditempatkan setiap jarak tidak kurang dari 8 *feet* sekurang-kurangnya kedua ujung dipegang segaris atau sekurang-kurangnya ujung daerah tegangan desak balok disanggah sepanjang bentang.

2.8 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka dan landasan teori maka dapat diajukan suatu hipotesis bahwa kayu meranti merah dapat dimanfaatkan sebagai kayu pengisi balok glulam untuk mendukung beban relatif berat. Apabila persentase kayu pengisi relatif sedikit, kapasitas lentur balok komposit semakin meningkat serta mengurangi defleksi yang terjadi, namun perlu dikontrol kemungkinan terjadi gagal geser horizontal pada daerah kayu pengisi.

