

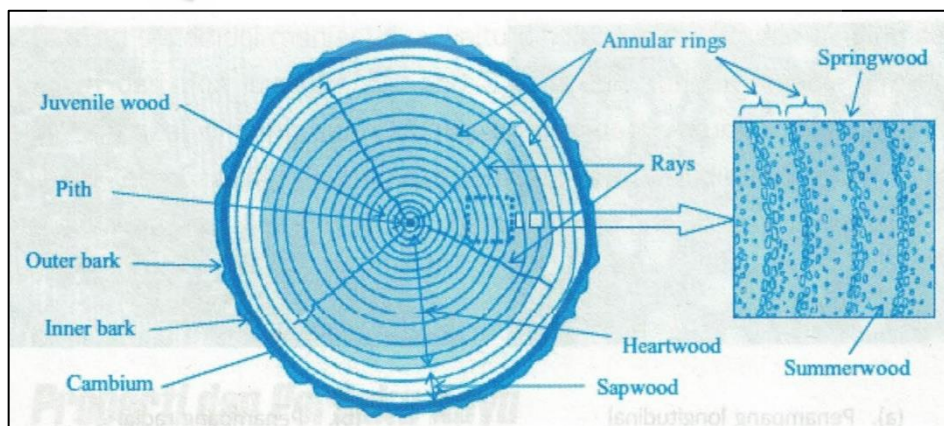
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Kayu

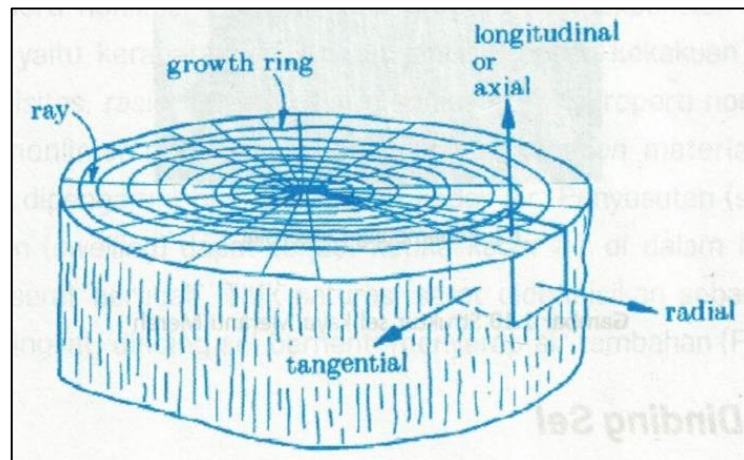
Kayu merupakan material yang memiliki keunikan tersendiri dari jenis material yang lainnya. Dalam sudut pandang perilaku struktur, kayu memiliki keunggulan dan kelemahan. Kayu memiliki tiga arah sumbu utama, yang mana pada arah sumbu terkuat kekakuan dan kekuatannya sangat besar melebihi daripada material lain apabila ditinjau berdasarkan rasio kekuatan terhadap berat jenis material. Kelemahannya adalah pada dua arah sumbu lainnya, kayu relatif lemah dan lunak. Hal ini dapat mengakibatkan adanya retak dan menyebabkan terjadinya kegagalan struktur.

Tiga arah sumbu utama kayu yaitu arah longitudinal, arah radial, dan arah tangensial. Arah longitudinal didefinisikan sebagai arah sejajar serat, arah radial adalah tegak lurus serat serta arah normal terhadap lingkaran pertumbuhan. Arah tangensial adalah tegak lurus serat dan sejajar lingkaran pertumbuhan. Hal tersebut dapat dilihat pada **Gambar 2.1** dan **Gambar 2.2**.



**Gambar 2.1.** Potongan penampang kayu

(Sumber : Pranata, Y. A., & Suryoatmono, B. 2019)



**Gambar 2.2.** Tiga arah sumbu utama pada kayu

(Sumber : Pranata, Y. A., & Suryoatmono, B. 2019)

### 2.1.1 Sifat-Sifat Material Kayu

“Properti (*properties*) dan perilaku (*behavior*) kayu secara umum diklasifikasikan menjadi empat bagian, yaitu sifat fisik material, properti kekakuan (*stiffness*) material, properti nonlinier material, dan properti *hygroexpansion* material. Sifat fisik material yaitu kerapatan atau berat jenis. Properti kekakuan material yaitu modulus elastisitas, rasio *Poisson*, dan modulus geser. Properti nonlinier material adalah sifat nonlinier material. Properti *hygroexpansion* material adalah sifat material yang dipengaruhi oleh perubahan kadar air. Penyusutan (*shrinkage*) atau pembengkakan (*swelling*) dapat terjadi ketika kadar air di dalam kayu di bawah titik saturasi serat berubah. Titik saturasi serat didefinisikan sebagai titik ketika kadar air meningkat, dinding sel berhenti menyerap air tambahan.” (Pranata dan Suryoatmono, 2019:9)

### 2.1.2 Bangunan Kayu

Pada dasarnya, prinsip pembuatan bangunan dengan bahan utama kayu sama saja dengan bangunan dengan bahan beton maupun baja, yaitu dapat menahan beban yang bekerja pada struktur tersebut. Sama halnya dengan bangunan pada umumnya, elemen-elemen struktur utama pada bangunan kayu adalah balok dan kolom (terkadang digunakan juga dinding geser). Pada **Gambar 2.3** diperlihatkan

rangka rumah kayu yang masih berupa struktur utamanya saja yaitu kolom dan balok. Balok berfungsi untuk mendistribusikan beban dari struktur atas ke struktur kolom yang menopangnya. Sementara kolom berfungsi untuk menyalurkan beban dari balok ke struktur dibawahnya sampai kepada fondasi.



**Gambar 2.3.** Struktur utama rumah kayu

(Sumber : <https://rumahkayu1.com>)

Bangunan kayu memiliki keunikan tersendiri baik dalam penampilan maupun fungsinya. Kelebihan-kelebihan dari rumah kayu antara lain adalah tahan terhadap gempa,, ramah lingkungan, harga jual yang tinggi, memiliki nilai arsitektural yang tinggi, dll. Sementara kekurangannya adalah rentan terhadap serangan rayap, mudah terbakar, biaya pembangunan yang lebih mahal, dll.



**Gambar 2.4.** *Mjøstårnet*

(Sumber : <https://cdn.archpaper.com>)

Perkembangan rumah kayu di Indonesia tidak begitu pesat. Di beberapa negara maju seperti Amerika Serikat, Kanada, dan Jerman, perkembangan inovasi mengenai struktur kayu dapat dikatakan sangat pesat khususnya di wilayah Amerika Serikat. **Gambar 2.4** memperlihatkan *Mjøstårnet*, yang merupakan gedung berstruktur kayu tertinggi di dunia yang berada di Brumunddal, Norwegia. Gedung tersebut berlantai 18 dengan tinggi 85,4 meter dan sebagian besar menggunakan kayu laminasi silang dan kayu laminasi terpaku. Bangunan kayu tertinggi urutan kedua adalah *Brock Commons Tallwood House* yang berada di Kanada. Gedung tersebut merupakan asrama bagi mahasiswa Universitas British Columbia berlantai 18 dengan tinggi 53 meter. **Gambar 2.5** memperlihatkan *Brock Commons Tallwood House*.



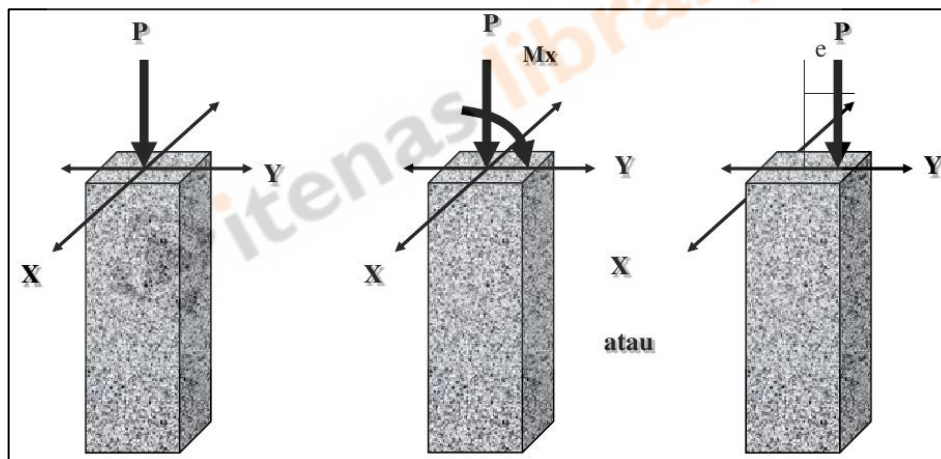
**Gambar 2.5.** *Brock Commons Tallwood House*

(Sumber : <https://www.skyscrapercenter.com>)

### 2.1.3 Kayu sebagai Struktur Kolom

Kolom merupakan struktur tekan yang berfungsi untuk menyalurkan beban dari balok ke elemen struktural di bawahnya. Struktur kolom akan meneruskan beban dari lantai ke lantai hingga akhirnya sampai ke fondasi. Sehingga semakin bawah, beban yang dipikul oleh kolom akan semakin besar pula.

Dari segi posisi pembebanan kolom dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu kolom dengan pembebanan sentris, eksentris *uniaxial* (hanya pada satu sumbu), dan eksentris *biaxial* (berada di dua sumbu). Beban sentris merupakan beban aksial yang berposisi tepat di titik berat penampang kolom sehingga beban yang dipikul oleh struktur kolom hanyalah beban tekan saja. Sementara beban eksentris merupakan beban yang berposisi tidak tepat di titik berat penampang kolom sehingga terdapat beban momen yang akan dipikul oleh struktur kolom tersebut. Pada kondisi sebenarnya, pembebanan sentris hampir tidak mungkin untuk dilakukan mengingat sulitnya menjaga ketelitian posisi pada pelaksanaan pekerjaan. **Gambar 2.6** menunjukkan contoh posisi pembebanan sentris (paling kiri), perletakan eksentris awal (paling kanan), dan perletakan eksentris setelah dikonversikan menjadi beban momen (tengah).

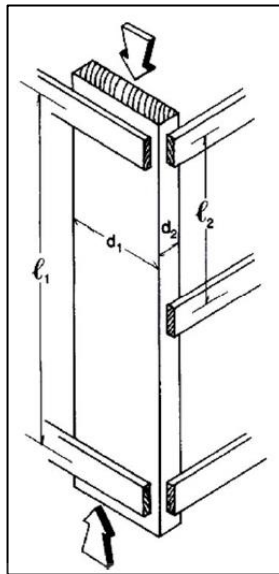


**Gambar 2.6.** Kolom sentris dan kolom eksentris

(Sumber : <https://www.slideshare.net/sahnihilhami/kolom-sahnihilhami>)

Dari segi ukuran, kolom dibedakan menjadi dua jenis yaitu kolom langsing, dan kolom tidak langsing. Kolom dapat terdefinisi langsing atau tidak langsing dapat dilihat dari perbandingan antara panjang efektif dan jari-jari girasi. Pada kolom langsing, keruntuhan akibat tekuk harus diperhitungkan. Sementara untuk kolom tidak langsing, keruntuhan yang diperhitungkan hanya keruntuhan akibat kegagalan material saja.





**Gambar 2.7.** Contoh kolom masif sederhana

(Sumber : Badan Standarisasi Nasional. 2013)

Dalam upaya untuk menentukan apakah kolom kayu solid langsing atau tidak, dapat digunakan nilai rasio kelangsingan (Badan Standarisasi Nasional, 2013) yang dapat diperoleh dengan menggunakan **Persamaan 1** sebagai berikut :

$$\text{Rasio kelangsingan} = \frac{K_e \cdot \ell}{d} < 50 \quad (1)$$

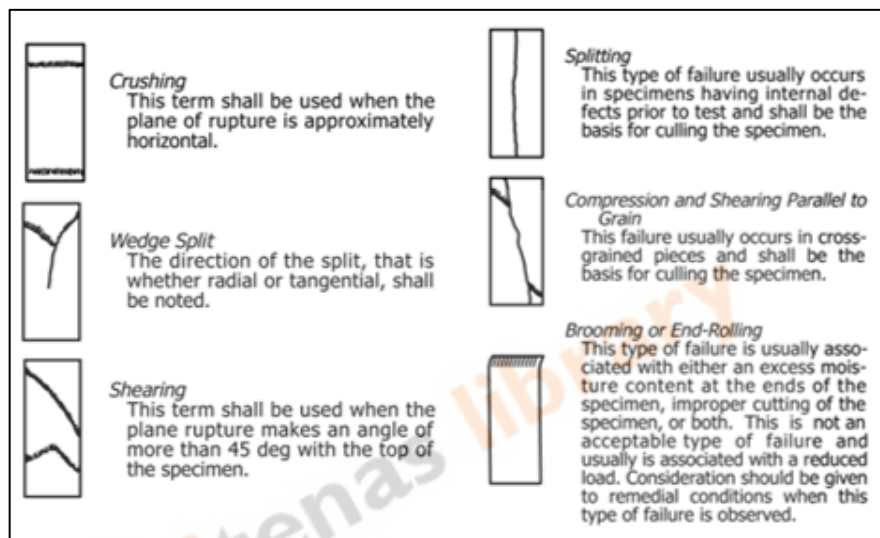
Dimana  $\ell$  merupakan panjang dari kolom,  $d$  merupakan nilai terkecil dari lebar kolom kayu seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.7**, dan  $K_e$  merupakan faktor panjang efektif seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 2.1**.

**Tabel 2.1.** Ragam Koefisien Panjang Tekuk

Ragam Tekuk						
Nilai $K_e$ teoritis	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Nilai $K_e$ desain yang disarankan apabila kondisi ideal merupakan pendekatan	0,65	0,80	1,2	1,0	2,10	2,4
Kode kondisi ujung		Tidak dapat berotasi, tidak dapat bertranslasi				
		Dapat berotasi, tidak dapat bertranslasi				
		Tidak dapat berotasi, dapat bertranslasi				
		Dapat berotasi, dapat bertranslasi				

(Sumber : Badan Standarisasi Nasional. 2013)

Kolom dengan material kayu harus didesain dengan posisi menerima beban tekan sejajar dengan arah serat. Hal tersebut dikarenakan kayu memiliki kekuatan terbesar pada arah sejajar serat. Karenanya, keruntuhan yang dapat terjadi pada kolom kayu hanya diakibatkan oleh kegagalan struktur dalam arah sejajar serat kayu. **Gambar 2.8** menunjukkan jenis-jenis kegagalan akibat tekan sejajar arah serat berdasarkan ASTM D143.



**Gambar 2.8.** Pola keruntuhan pada kolom kayu sejajar arah serat

(Sumber : ASTM international. 2016)

## 2.2 Peraturan Perencanaan Kolom Kayu Berdasarkan SNI 7973:2013

Peraturan kayu Indonesia, SNI 7973:2013, menggunakan dua metode yang di adopsi berdasarkan peraturan kayu Amerika Serikat NDS 2012 (AWC,2011). Dua metode tersebut adalah *Allowable Stress Design* (ASD) yang diterjemahkan menjadi Metode Desain Tegangan Izin (DTI), dan *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) yang diterjemahkan menjadi Metode Desain Faktor Beban Ketahanan (DFBK). Metode DTI menggunakan prinsip bahwa tegangan yang terjadi pada komponen struktur atau sambungan kayu tidak boleh melebihi tegangan terkoreksi. Sementara Metode DFBK berprinsip bahwa kekuatan terkoreksi dari suatu komponen struktur atau sambungan kayu tidak boleh kurang dari kekuatan yang dibutuhkan berdasarkan hasil kombinasi pembebanan LRFD.

### 2.2.1 Faktor-Faktor Koreksi yang Berlaku dalam Desain Kayu

Berdasarkan SNI 7973:2013 nilai desain acuan ,hasil desain dengan durasi pembebanan normal dan kondisi kadar air yang sudah ditetapkan, harus dikalikan dengan faktor-faktor koreksi yang digunakan berdasarkan metode yang digunakan dan jenis penggunaan kayu tersebut dalam suatu struktur. Faktor-faktor reduksi yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

**Tabel 2.2.** Faktor-Faktor Koreksi yang Digunakan Untuk Kayu Gergajian

	Hanya DTI		DTI dan DFBK									Hanya DFBK			
	Faktor Durasi Beban	Faktor Layan Basah	Faktor Temperatur	Faktor Stabilitas Balok	Faktor Ukuran	Faktor Penggunaan Rebah	Faktor Tusukan	Faktor Komponen Struktur Berulang	Faktor Stabilitas Kolom	Faktor Kekakuan Tekuk	Faktor Luas Tumpu	Faktor Konversi Format	Faktor Ketahanan	Faktor Efek Waktu	
$F_b' = F_b$	x	$C_D$	$C_M$	$C_t$	$C_L$	$C_F$	$C_{fu}$	$C_i$	$C_r$	-	-	-	2,54	0,85	$\lambda$
$F_t' = F_t$	x	$C_D$	$C_M$	$C_t$	-	$C_F$	-	$C_i$	-	-	-	-	2,70	0,80	$\lambda$
$F_v' = F_v$	x	$C_D$	$C_M$	$C_t$	-	-	-	$C_i$	-	-	-	-	2,88	0,75	$\lambda$
$F_{c\perp}' = F_{c\perp}$	x	-	$C_M$	$C_t$	-	-	-	$C_i$	-	-	-	$C_b$	1,67	0,90	-
$F_c' = F_c$	x	$C_D$	$C_M$	$C_t$	-	$C_F$	-	$C_i$	-	$C_P$	-	-	2,40	0,90	$\lambda$
$E' = E$	x	-	$C_M$	$C_t$	-	-	-	$C_i$	-	-	-	-	-	-	-
$E_{min}' = E_{min}$	x	-	$C_M$	$C_t$	-	-	-	$C_i$	-	-	$C_T$	-	1,76	0,85	-

(Sumber : Badan Standarisasi Nasional. 2013)



### 2.2.2 Faktor Durasi Beban ( $C_D$ )

Kayu merupakan material yang memiliki sifat mampu memikul beban maksimum lebih besar dalam durasi yang singkat dibandingkan dengan durasi pembebanan yang lama. Nilai desain acuan yang dihasilkan merupakan nilai dengan asumsi durasi beban normal. Yaitu pembebanan beban desain kumulatif selama kurang lebih sepuluh tahun. Apabila kolom kayu tersebut tidak di desain untuk menerima beban durasi normal, maka semua nilai desain acuan selain modulus elastisitas dan kuat tekan tegak lurus harus dikalikan dengan faktor durasi beban.

Faktor durasi beban hanya digunakan apabila menggunakan metode DTI saja sesuai dengan ketentuan pada SNI 7973:2013. Nilai faktor durasi beban dapat dilihat pada **Tabel 2.3**.

**Tabel 2.3.** Faktor Durasi Beban yang Sering Digunakan

Durasi Beban	$C_D$	Beban Desain Tipikal
<b>Permanen</b>	0,9	Beban Mati
<b>Sepuluh Tahun</b>	1,0	Beban Hidup Hunian
<b>Tujuh Hari</b>	1,25	Beban Pelaksanaan
<b>Sepuluh Menit</b>	1,6	Beban Gempa/Angin
<b>Impak</b>	2,0	Beban Impak

(Sumber : Badan Standarisasi Nasional. 2013)

Keterangan :

- a) Faktor durasi beban tidak berlaku pada modulus elastisitas acuan, modulus elastisitas untuk stabilitas balok dan kolom, dan nilai desain tekan acuan tegak lurus serat yang didasarkan limit deformasi.
- b) Faktor durasi beban yang lebih besar daripada 1,6 tidak berlaku pada komponen struktur yang diawetkan dengan proses tekanan menggunakan bahan pengawet larut air, atau bahan kimiawi hambat api. Faktor durasi beban impak tidak berlaku pada sambungan.

### 2.2.3 Faktor Temperatur ( $C_t$ )

SNI 7973:2013 menyebutkan bahwa kekuatan kayu dipengaruhi juga oleh suhunya. Semakin panas suhu kayu tersebut, semakin kecil pula kekuatannya. Sebaliknya, apabila kayu di dinginkan sampai di bawah temperatur normal, kekuatannya akan bertambah. Apabila kayu di panaskan hingga temperatur di bawah  $65^{\circ}\text{C}$ , kekuatan kayu tersebut masih dapat terpulihkan. Namun apabila suhu kayu melebihi  $65^{\circ}\text{C}$ , maka kayu tersebut akan mengalami kehilangan kekuatan secara permanen.

Faktor temperatur harus selalu digunakan baik pada metode DTI maupun DFBK sesuai dengan ketentuan pada SNI 7973:2013. Nilai faktor temperatur dapat dilihat pada **Tabel 2.4**.

**Tabel 2.4.** Faktor Temperatur  $C_t$

Nilai Desain Acuan	Kondisi Kadar Air Layan	$C_t$		
		$T \leq 38^{\circ}\text{C}$	$38^{\circ}\text{C} < T \leq 52^{\circ}\text{C}$	$52^{\circ}\text{C} < T \leq 65^{\circ}\text{C}$
$F_t, E, E_{\min}$	Basah atau Kering	1,0	0,9	0,9
$F_b, F_v, F_c,$ dan $F_{c\perp}$	Kering	1,0	0,8	0,7
	Basah	1,0	0,7	0,5

(Sumber : Badan Standarisasi Nasional. 2013)

### 2.2.4 Faktor Ketahanan ( $\phi$ )

Faktor ketahanan hanya digunakan apabila menggunakan metode DFBK saja sesuai dengan ketentuan pada SNI 7973:2013. Nilai faktor ketahanan dapat dilihat pada **Tabel 2.5**.

**Tabel 2.5.** Faktor Ketahanan ( $\phi$ )

Aplikasi	Properti	Simbol	Nilai
Komponen struktur	$F_b$	$\phi_b$	0,85
	$F_t$	$\phi_t$	0,8
	$F_v, F_{rt}, F_s$	$\phi_v$	0,75
	$F_c, F_{c\perp}$	$\phi_c$	0,9
	$E_{\min}$	$\phi_s$	0,85
Sambungan	(Semua nilai desain)	$\phi_z$	0,65

(Sumber : Badan Standarisasi Nasional. 2013)

### 2.2.5 Faktor Konversi Format

Faktor konversi format hanya digunakan apabila menggunakan metode DFBK saja sesuai dengan ketentuan pada SNI 7973:2013. Nilai faktor konversi format dapat dilihat pada **Tabel 2.6**.

**Tabel 2.6.** Faktor Konversi Format

Aplikasi	Properti	KF
<b>Komponen struktur</b>	Fb	2,54
	Ft	2,7
	Fv, Frt, Fs	2,88
	Fc	2,4
	Fc	1,67
	Emin	1,76
<b>Semua sambungan</b>	(Semua nilai desain)	3,32

(Sumber : Badan Standarisasi Nasional. 2013)

### 2.2.6 Faktor Efek Waktu ( $\lambda$ )

Faktor efek waktu hanya digunakan apabila menggunakan metode DFBK saja sesuai dengan ketentuan pada SNI 7973:2013. Nilai faktor efek waktu dapat dilihat pada **Tabel 2.7**.

**Tabel 2.7.** Faktor Efek Waktu ( $\lambda$ )

Kombinasi Beban	$\lambda$
<b>1,4(D+F)</b>	0,6
<b>1,2(D+F) + 1,6(H) + 0,5(Lr atau R)</b>	0,6
<b>1,2(D+F) + 1,6(L+H) + 0,5(Lr atau R)</b>	0,7 apabila L adalah gudang
	0,8 apabila L adalah hunian
	1,25 apabila L adalah impak
<b>1,2D + 1,6(Lr atau R) atau (L atau 0,8W)</b>	0,8
<b>1,2D + 1,6W + L + 0,5(Lr atau R)</b>	1,0
<b>1,2D + 1,0E + L</b>	1,0
<b>0,9D + 1,6W + 1,6H</b>	1,0
<b>0,9D + 1,0E + 1,6H</b>	1,0

(Sumber : Badan Standarisasi Nasional. 2013)

Keterangan :

- a) Faktor efek waktu ,  $\lambda$ , lebih besar daripada 1 tidak berlaku pada sambungan atau komponen struktur yang diberi perlakuan dengan vakum tekan dengan bahan pengawet larut air atau kimiawi penghambat api.
- b) Kombinasi beban harus mengikuti peraturan pembebanan bangunan yang berlaku. Apabila tidak ada peraturan bangunan yang berlaku, beban nominal dan kombinasi beban yang terkait harus diambil dari ASCE 7.

### 2.2.7 Faktor layan basah ( $C_M$ )

Berdasarkan peraturan kayu Indonesia, kadar air maksimum yang dapat terkandung pada struktur dengan material kayu untuk jangka waktu lama adalah 19%. Apabila nilai kadar air yang terkandung dalam material kayu tersebut melebihi 19%, maka nilai desain acuan harus dikalikan dengan faktor layan basah.

Faktor layan basah harus selalu digunakan baik pada metode DTI maupun DFBK sesuai dengan ketentuan pada SNI 7973:2013. Nilai faktor layan basah dapat dilihat pada **Tabel 2.8**.

**Tabel 2.8.** Faktor Layan Basah ( $C_M$ )

<b>F<sub>b</sub></b>	<b>F<sub>t</sub></b>	<b>F<sub>v</sub></b>	<b>F<sub>c</sub></b>	<b>F<sub>c</sub></b>	<b>E dan E<sub>min</sub></b>
<b>0,85</b>	1	0,97	0,67	0,8	0,9

(Sumber : Badan Standarisasi Nasional. 2013)

Keterangan :

- a) Apabila  $F_b \leq 8$  MPa, maka  $C_M = 1,0$
- b) Apabila  $F_c \leq 5,2$  MPa, maka  $C_M = 1,0$

### 2.2.8 Faktor Tusukan ( $C_i$ )

Faktor layan basah harus selalu digunakan baik pada metode DTI maupun DFBK sesuai dengan ketentuan pada SNI 7973:2013. Nilai faktor layan basah dapat dilihat pada **Tabel 2.9**.

**Tabel 2.9.** Faktor Tusukan ( $C_i$ )

Nilai Desain	$C_i$
<b>E, Emin</b>	0,95
<b>Fb, Ft, Fc, Fv</b>	0,80
<b>Fc</b>	1,00

(Sumber : Badan Standarisasi Nasional. 2013)

**2.2.9 Faktor Ukuran ( $C_F$ )**

SNI 7973:2013 menyebutkan bahwa nilai desain acuan tekan untuk batang gergajian harus dikalikan dengan faktor ukuran. Ketentuan untuk faktor ukuran disebutkan pada SNI 7973:2013 dengan ketentuan sebagai berikut :

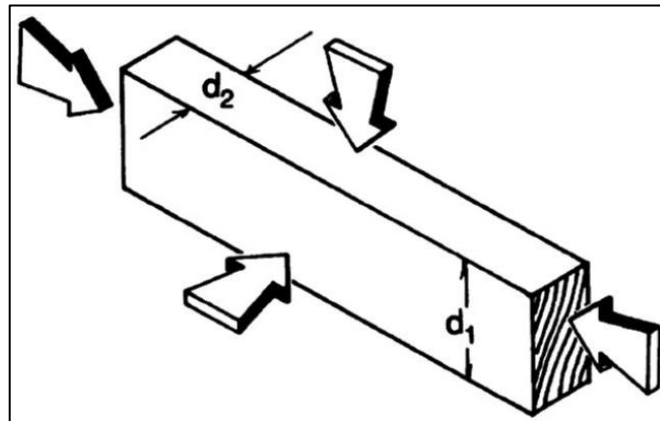
- Nilai desain lentur, tarik, dan tekan sejajar serat acuan untuk kayu dimensi yang tebalnya 50,8 mm sampai 101,6 mm yang dipilih secara visual dikalikan dengan faktor koreksi yang ditetapkan yaitu 1,0
- Apabila tinggi komponen struktur lentur kayu gergajian yang tebalnya 127 mm atau lebih besar melebihi 305 mm dan dipilah secara visual, maka nilai desain lentur acuan,  $F_b$ , harus dikalikan dengan faktor ukuran dengan **Persamaan 2** sebagai berikut :

$$C_F = (305/d)^{1/9} \leq 1,0 \quad (2)$$

Dimana :  $d$  = lebar penampang kayu seperti yang ditunjukkan pada

**Gambar 2.9.**

- Untuk balok dengan penampang lingkaran dan diameter lebih besar daripada 343 mm, atau untuk balok persegi 305 mm atau lebih yang dibebani di bidang diagonal, faktor ukuran harus ditentukan sesuai point diatas berdasarkan balok persegi yang dibebani ekuivalen secara konvensional yang mempunyai penampang sama.



**Gambar 2.9.** Posisi  $d_1$  dan  $d_2$

(Sumber : Badan Standarisasi Nasional. 2013)

### 2.2.10 Faktor Stabilitas Kolom ( $C_P$ )

SNI 7973:2013 menyebutkan bahwa pada perencanaan komponen struktur kolom (batang tekan), faktor akibat stabilitas kolom harus diperhitungkan dengan ketentuan sebagai berikut :

- a) Faktor stabilitas kolom dihitung dengan **Persamaan 3** sebagai berikut :

$$C_P = \frac{1+(F_{cE}/F_c^*)}{2c} - \sqrt{\left[\frac{1+(F_{cE}/F_c^*)}{2c}\right]^2 - \frac{F_{cE}/F_c^*}{c}} \quad (3)$$

Dimana :  $F_c'$  = nilai desain tekan acuan sejajar serat dikalikan dengan semua faktor koreksi kecuali  $C_P$

$c = 0,8$  untuk kayu gergajian

$c = 0,85$  untuk pancang dan tiang kayu bundar

$c = 0,9$  untuk glulam atau kayu komposit struktural

Nilai  $F_{cE}$  diperoleh dari **Persamaan 4** berikut :

$$F_{cE} = \frac{0,822E_{min}'}{(\ell_e/d)^2} \quad (4)$$

- b) Apabila komponen struktur tekan ditumpu di seluruh panjangnya untuk mencegah peralihan lateral di semua arah, maka nilai stabilitas kolom ( $C_P$ ) = 1,0



## 2.3 Properti Kekakuan Material

Pada sub-bab sebelumnya telah dibahas sifat-sifat dari material kayu yang diantaranya adalah properti kekakuan material. Properti kekakuan adalah suatu nilai parameter yang menunjukkan tingkat kekuatan suatu material dalam memikul gaya luar yang bekerja. Properti kekakuan terdiri dari tiga aspek, yaitu modulus elastisitas, rasio poisson, dan modulus geser.

### 2.3.1 Modulus Elastisitas

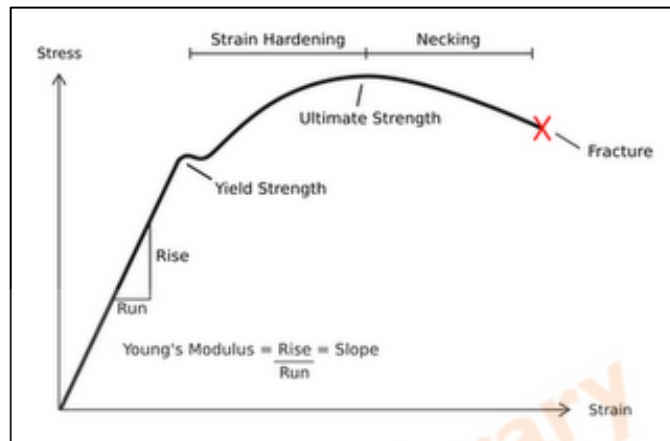
Modulus elastisitas (*Modulus of Elasticity / Young's Modulus*) merupakan nilai perbandingan antara tegangan dengan regangan yang terjadi pada suatu material. Dimana tegangan adalah besarnya gaya yang bekerja apabila dibagi dengan luas penampang material yang menerima beban ( $\text{N/mm}^2$ ). Sedangkan regangan merupakan rasio antara ukuran material sebelum dan sesudah menerima gaya luar. Secara matematis, modulus elastisitas dapat dituliskan dengan **Persamaan 5** berikut :

$$E = \frac{P \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

Ket :	E	= Modulus elastisitas (MPa)
	$\sigma$	= Tegangan (MPa)
	$\varepsilon$	= Regangan
	P	= Gaya (N)
	A	= Luas penampang ( $\text{mm}^2$ )
	$\Delta l$	= Panjang setelah menerima gaya (mm)
	$l_0$	= Panjang awal sebelum menerima gaya (mm)

Modulus elastisitas berfungsi sebagai nilai yang dapat membantu dalam analisis dan penelitian bersangkutan dengan perencanaan dan pemodelan. Hal tersebut dikarenakan nilai modulus elastisitas dapat menunjukkan hubungan aksi-reaksi antara beban yang diterima dengan besarnya translasi yang akan terjadi pada suatu material. **Gambar 2.10** menunjukkan diagram tegangan-regangan. Dari grafik tersebut dapat diperoleh nilai modulus elastisitas leleh (*yield*) dengan

menghitung nilai kemiringan dari kondisi leleh material. Sementara untuk memperoleh nilai modulus elastisitas ultimit dapat membagikan nilai tegangan dengan regangan disaat persis sebelum material mengalami keruntuhan (puncak tertinggi dari grafik tegangan-regangan).

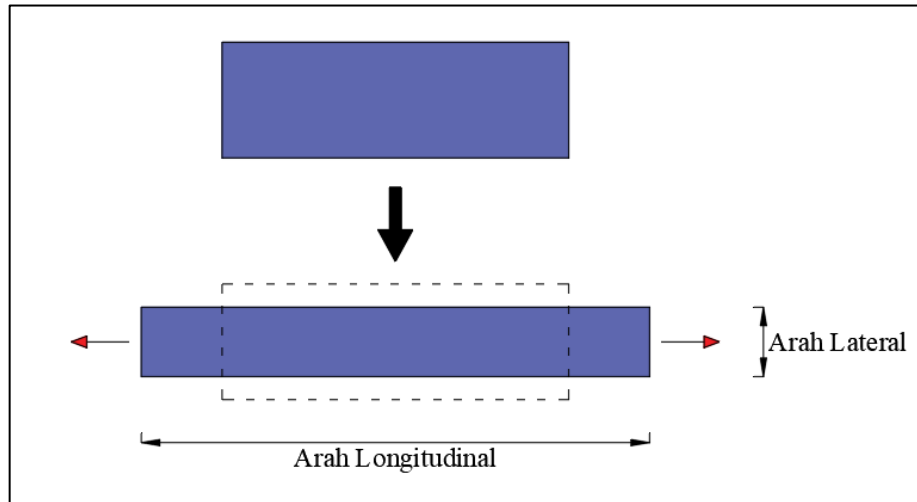


**Gambar 2.10.** Nilai modulus elastisitas pada diagram tegangan-regangan

(Sumber : <https://ahmadsuudi.wordpress.com>)

### 2.3.2 Rasio Poisson

Rasio poisson merupakan nilai perbandingan antara regangan yang terjadi pada arah lateral dengan regangan pada arah longitudinal. Nilai rasio poisson menunjukkan besarnya pembengkakan maupun pelangsingan yang akan terjadi pada suatu material apabila diberi gaya. Contoh termudah dalam menjelaskan rasio poisson adalah pada kasus ketika material karet ditarik kedua sisinya secara berlawanan. Material karet tersebut akan mengalami pemanjangan pada arah longitudinal, dan mengalami pemendekan di arah lateral (pelangsingan). Besarnya pelangsingan yang terjadi inilah yang dapat diketahui dengan menggunakan bantuan nilai rasio poisson. **Gambar 2.11** menunjukkan sketsa material sebelum diberi gaya tarik dan setelah diberi gaya tarik. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa material mengalami pemanjangan pada arah longitudinal dan pemendekan pada arah lateral. Nilai dari perubahan bentuk tersebutlah yang dapat diketahui dari adanya rasio poisson.



**Gambar 2.11.** Rasio Poisson

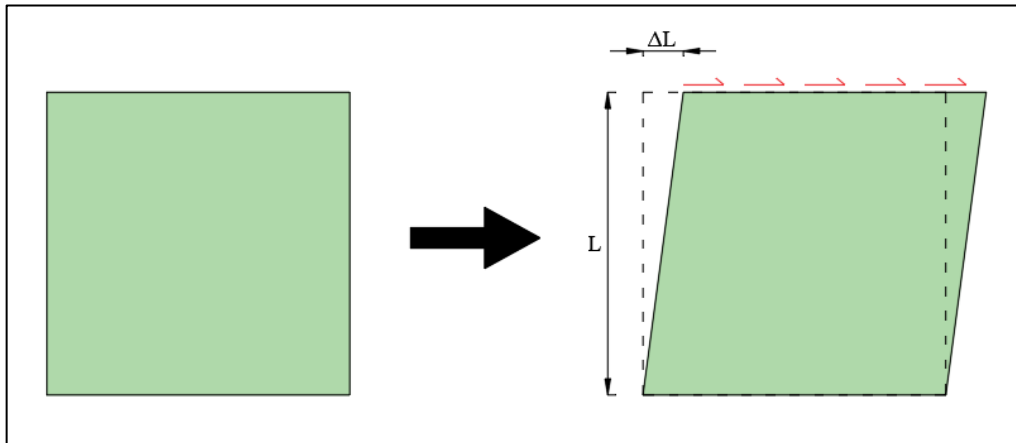
Secara matematis, nilai rasio poisson dapat dituliskan dengan **Persamaan 6** sebagai berikut :

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (6)$$

Ket :  $\nu$  = Rasio poisson  
 $\varepsilon$  = Regangan pada material (bernilai positif apabila memanjang, dan bernilai negatif apabila memendek)

### 2.3.3 Modulus Geser

Modulus geser memiliki pengertian dan fungsi yang secara garis besar sama dengan modulus elastisitas. Perbedaan dari kedua properti kekakuan tersebut terletak pada arah gaya yang bekerja terhadap penampang. Apabila pada modulus elastisitas gaya yang bekerja memiliki arah tegak lurus permukaan, maka pada modulus geser gaya yang bekerja memiliki arah sejajar permukaan material (geser). Pada **Gambar 2.12** ditunjukkan sketksa material yang mengalami pergeseran akibat adanya gaya geser yang diberikan pada permukaan bagian atas material.



**Gambar 2.12.** Modulus geser

Secara matematis, modulus geser dapat dituliskan dengan menggunakan **Persamaan 7** berikut :

$$G = \frac{P \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} = \frac{F_v}{\varepsilon} \quad (7)$$

- Ket :
- G = Modulus geser (MPa)
  - $F_v$  = Tegangan geser (MPa)
  - $\varepsilon$  = Regangan
  - P = Gaya geser yang bekerja (N)
  - A = Luas penampang ( $\text{mm}^2$ )
  - $\Delta l$  = Panjang perpindahan arah aksial (mm)
  - L = Panjang material arah lateral (mm)

#### 2.4 Titik Leleh Material Kayu

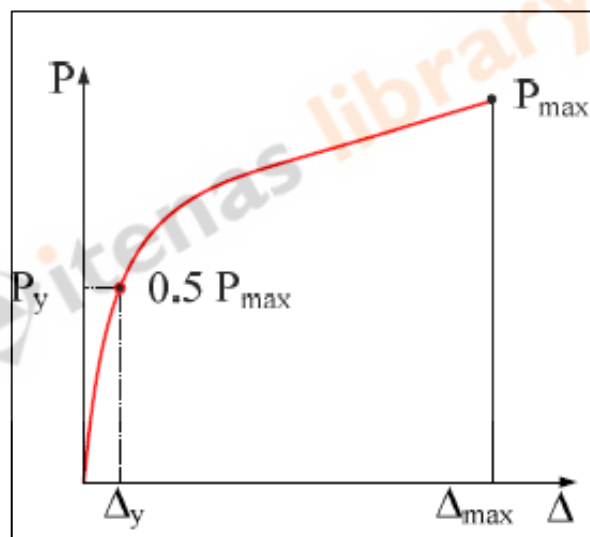
Umumnya, grafik hasil dari pengujian laboratorium tidak dapat langsung digunakan sebagai perwakilan dari suatu material. Hal tersebut dikarenakan adanya faktor luar yang dapat mempengaruhi hasil keluaran dari suatu pengujian. Oleh karena itu perlu dilakukannya pendekatan dan koreksi pada grafik hasil pengujian agar dapat diperolehnya hasil yang mendekati dengan kondisi properti material sesungguhnya.

Titik leleh (*yield point*) merupakan nilai yang menunjukkan besarnya tegangan dan regangan maksimum yang dapat diterima material sebelum

mengalami kondisi plastis. Terdapat berbagai macam metode yang dapat digunakan untuk memperoleh titik leleh, namun hanya beberapa saja yang umum digunakan. Berikut merupakan beberapa metode umum yang sering digunakan pada berbagai negara seperti Amerika Utara, Eropa, Jepang, dan Australia untuk memperkirakan posisi titik leleh.

#### 2.4.1 *Karacabely and Ceccotti Method (K&C)*

Metode Karacabely dan Ceccotti mempertimbangkan bahwa posisi titik leleh berada pada saat beban yang dipikul mencapai ukuran 50% dari beban maksimum yang dapat diperoleh material. **Gambar 2.13** menunjukkan posisi dari titik leleh berdasarkan metode Karacabely dan Ceccotti.



**Gambar 2.13.** Posisi *yield point* berdasarkan metode K&C

(Sumber : Munoz, W., Mohammad, M., Salenikovich, A., & Quenneville, P. 2008)

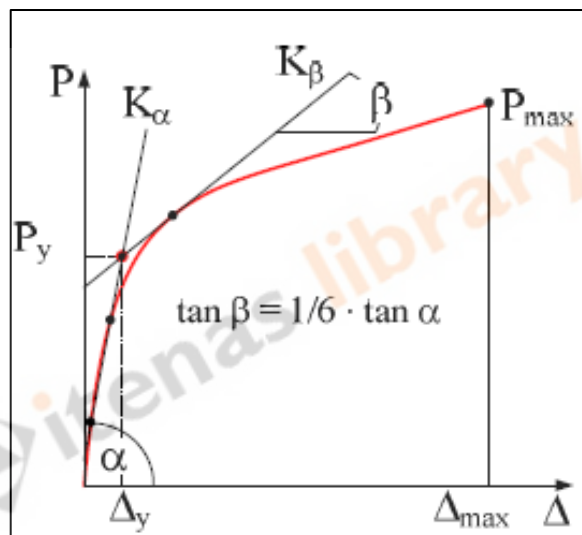
#### 2.4.2 *European Committee for Standardisation (CEN)*

Metode CEN memperkirakan titik leleh dengan menggunakan perpotongan dari dua garis yang ditentukan. Garis pertama merupakan perwakilan dari kekakuan awal ( $K_a$ ), yang diperoleh dengan membuat garis lurus memotong titik 10% dan 40% dari beban maksimum pada grafik. Garis tersebut akan memiliki sudut yang

kemudian dilambangkan dengan  $\alpha$ . Garis kedus ( $K_\beta$ ) merupakan garis dengan sudut sebesar  $\beta$ . Dimana nilai  $\beta$  dapat diperoleh dengan menggunakan **Persamaan 8** :

$$\tan \beta = 1/6 \tan \alpha \quad (8)$$

Setelah kedua garis diperoleh, tahap selanjutnya adalah mencari titik potong dari kedua garis. Dimana titik potong dari kedua garis tersebut akan ditandai sebagai titik leleh. **Gambar 2.14** menunjukkan posisi titik leleh berdasarkan metode CEN.



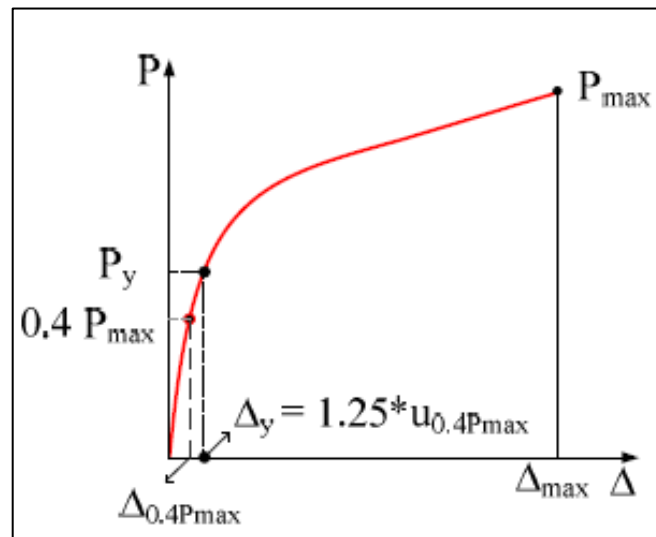
**Gambar 2.14.** Posisi *yield point* berdasarkan metode CEN

(Sumber : Munoz, W., Mohammad, M., Salenikovich, A., & Quenneville, P. 2008)

#### 2.4.3 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)

Pada metode CSIRO, beban leleh merupakan hasil kali antara nilai 40% dari beban maksimum dengan faktor pengali sebesar 1,25. Titik leleh merupakan hasil perpotongan antara grafik dengan nilai beban leleh. **Gambar 2.15** menunjukkan posisi titik leleh berdasarkan metode CSIRO.





**Gambar 2.15.** Posisi *yield point* berdasarkan metode CSIRO

(Sumber : Munoz, W., Mohammad, M., Salenikovich, A., & Quenneville, P. 2008)

#### 2.4.4 Equivalent Energy Elastic-Plastic Curve (EEEP)

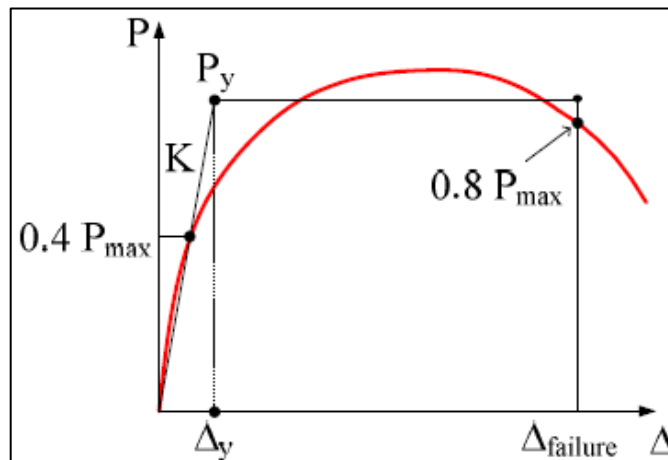
Metode ini awalnya dirancang untuk kurva beton dan sistem baja. **Gambar 2.16** menunjukkan posisi titik leleh berdasarkan metode EEEP. Tahap awalnya adalah dengan membuat garis lurus (K) yang memotong titik 0% dan 40% dari beban maksimum. Setelah itu menentukan besarnya deformasi kegagalan yang didefinisikan sebagai deformasi pada saat 80% dari beban maksimum. Area di bawah kurva uji diasumsikan setara dengan area di bawah kurva bilinear. Kemudian beban leleh dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 9** :

$$P_y = \left[ \Delta_{failure} - \frac{2w_{failure}}{K} \right] \times K \quad (9)$$

Dimana :  $P_y$  = Beban leleh

$\Delta_{failure}$  = Deformasi kegagalan

$w_{failure}$  = Kehilangan energi sampai leleh

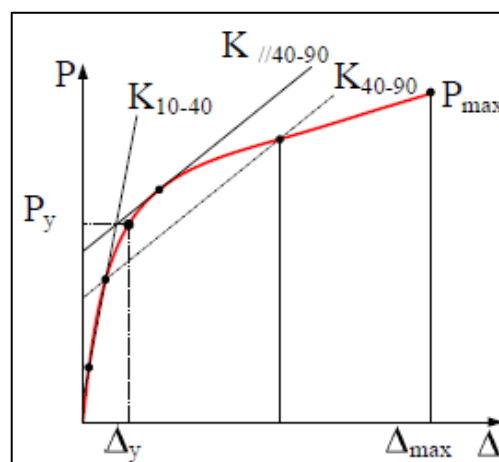


**Gambar 2.16.** Posisi *yield point* berdasarkan metode EEEP

(Sumber : Munoz, W., Mohammad, M., Salenikovich, A., & Quenneville, P. 2008)

#### 2.4.5 Yasumura and Kawai Method (Y&K)

Metode ini menggunakan tiga garis lurus sebagai sarana perhitungan. Beban leleh diperoleh pada titik potong antara garis pertama dan garis ketiga. **Gambar 2.17** menunjukkan posisi titik leleh berdasarkan metode Y&K. Garis pertama merupakan garis lurus yang memotong 10% dan 40% dari beban maksimal. Sementara garis kedua merupakan garis lurus yang memotong 40% dan 90% dari beban maksimum. Dan garis ketiga merupakan translasi searah sumbu-y dari garis kedua sampai menyinggung kurva.

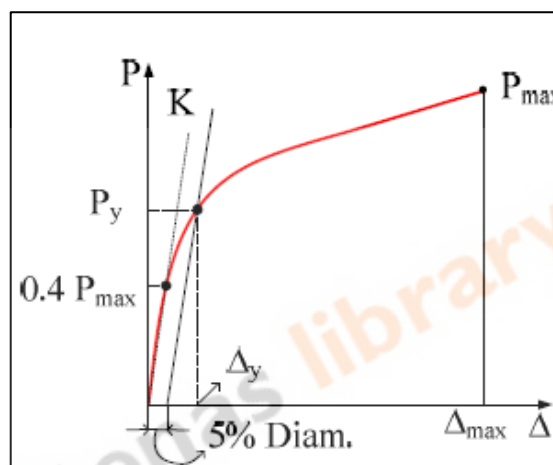


**Gambar 2.17.** Posisi *yield point* berdasarkan metode Y&K

(Sumber : Munoz, W., Mohammad, M., Salenikovich, A., & Quenneville, P. 2008)

#### 2.4.6 5% of Diameter (5% Diameter)

Metode ini merupakan metode yang digunakan pada kayu yang menggunakan sambungan. Dalam metode ini, garis lurus yang memotong 0% dan 40% dari beban maksimum diberikan translasi searah sumbu-x sebesar 5% dari diameter sambungan. Titik leleh pada metode ini adalah titik potong antara garis hasil translasi dengan kurva. **Gambar 2.18** menunjukkan posisi titik leleh berdasarkan metode 5% Diameter.

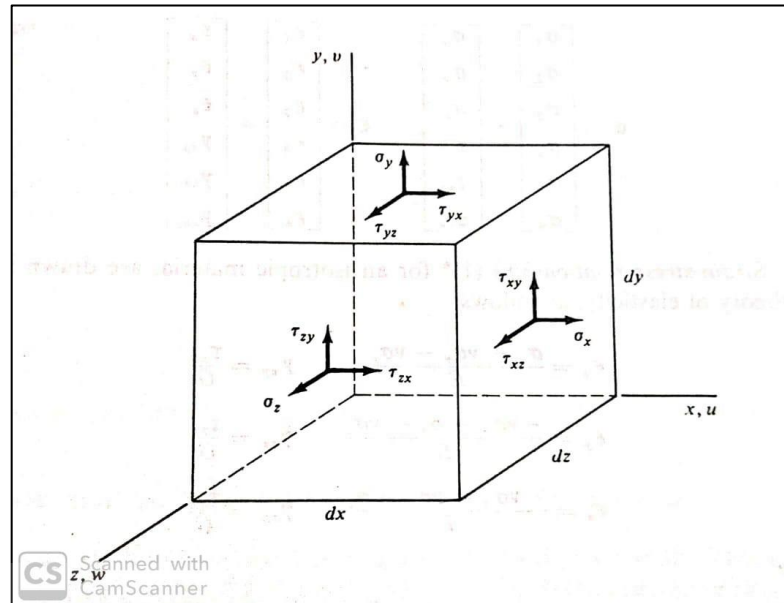


**Gambar 2.18.** Posisi *yield point* berdasarkan metode 5% diameter

(Sumber : Munoz, W., Mohammad, M., Salenikovich, A., & Quenneville, P. 2008)

## 2.5 Material Ortotropik

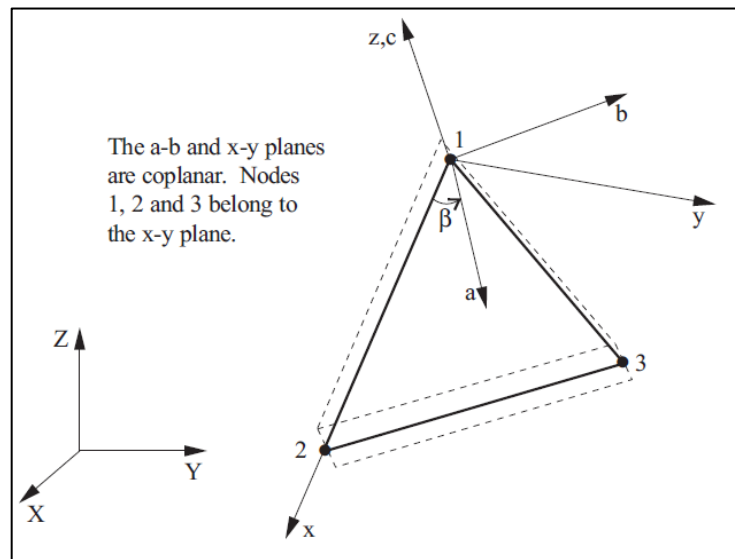
Material ortotropik merupakan jenis material yang memiliki perbedaan sifat pada ketiga arah sumbu utamanya. Perilaku material ini akan berbeda berdasarkan arah gaya yang bekerja pada setiap sumbunya. Dengan begitu, material ini memiliki nilai modulus elastisitas, modulus geser, dan rasio poisson yang berbeda pada setiap arah sumbunya. **Gambar 2.19** menunjukkan sketsa tegangan normal dan tegangan geser yang dapat terjadi pada ketiga arah sumbu utama suatu material. Sifat ortotropik ini umumnya dimiliki oleh material yang memiliki serat. Salah satu contoh material ortotropik yang paling umum adalah kayu.



**Gambar 2.19.** Sketsa tegangan yang terjadi pada material

(Sumber : Weaver, W. J., & Johnston, P. R. 1984)

Seperti yang sudah dibahas sebelumnya, kayu merupakan material ortotropik dengan tiga arah sumbu utama (longitudinal, radial, tangensial). Sumbu ortotropik memiliki bentuk yang sedikit berbeda dari sumbu koordinat ruang. Perbedaannya berada pada sumbu radial dan tangensial yang dapat berputar terhadap sumbu longitudinal dengan sudut tertentu. **Gambar 2.20** menunjukkan hubungan antara sumbu ortotropik dengan sumbu koordinat ruang dengan asumsi sumbu longitudinal dilambangkan sebagai sumbu-c yang sejajar arah sumbu-Z. Pada gambar tersebut ditunjukkan bahwa sumbu radial (sumbu-a) dan sumbu tangensial (sumbu-b) berada pada bidang yang sama terhadap sumbu-X dan sumbu-Y namun memiliki sudut putar yang berpusat pada sumbu longitudinal.



**Gambar 2.20.** Hubungan sumbu utama dengan sumbu material pada ADINA

(Sumber : ADINA R&D Incorporation. 2012)

Perilaku linier elastik pada material ortotropik dapat dideskripsikan berdasarkan hukum Hooke (Bodig, J., & Jane, B. A. 1993) yang ditunjukkan pada

**Persamaan 10** berikut :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

keterangan :

$\varepsilon$  = regangan normal,

$\gamma$  = regangan geser,

$E$  = modulus elastisitas [MPa],

$G$  = modulus geser [MPa],

$\sigma$  = tegangan normal [MPa],

$\tau$  = tegangan geser [MPa],

- $\nu$  = rasio Poisson,  
 $L$  = arah sumbu longitudinal,  
 $R$  = arah sumbu radial,  
 $T$  = arah sumbu tangensial.

Dimana nilai modulus geser (Karlinsari et.al, 2007) dalam penelitian ini diperoleh menggunakan **Persamaan 11.a** hingga **Persamaan 11.c** berikut :

$$G_{LR} = \frac{E_L \cdot E_R}{E_L(1+\nu_{LR}) + E_R(1+\nu_{RL})} \quad (11.a)$$

$$G_{LT} = \frac{E_L \cdot E_T}{E_L(1+\nu_{LT}) + E_T(1+\nu_{TL})} \quad (11.b)$$

$$G_{RT} = \frac{E_R \cdot E_T}{E_R(1+\nu_{RT}) + E_T(1+\nu_{TR})} \quad (11.c)$$

Sementara untuk pemodelan perilaku nonlinier plastis material ortotropik digunakan kriteria leleh Hill (Chen, W. F., & Han, D. J, 2007) yang merupakan perluasan dari kriteri leleh von Mises seperti yang ditunjukkan pada **Persamaan 12**. Untuk nilai koefisien  $F$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $L$ ,  $M$ , dan  $N$  akan ditunjukkan pada **Persamaan 13.a** sampai dengan **Persamaan 14.c**.

$$f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{bb} - \sigma_{cc})^2 + G(\sigma_{cc} - \sigma_{aa})^2 + H(\sigma_{aa} - \sigma_{bb})^2 + 2L\sigma_{ab}^2 + 2M\sigma_{ab}^2 + 2N\sigma_{ac}^2 - 1 = 0 \quad (12)$$

$$F = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \right) \quad (13.a)$$

$$G = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \right) \quad (13.b)$$

$$H = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \right) \quad (13.c)$$

$$L = \frac{1}{2Y_{ab}^2} \quad (14.a)$$

$$M = \frac{1}{2Y_{ac}^2} \quad (14.b)$$

$$N = \frac{1}{2Y_{bc}^2} \quad (14.c)$$



Dimana  $a, b, c$  adalah arah utama material. Kemudian  $X, Y, Z$  adalah tegangan leleh material pada arah  $a, b, c$  dan  $Y_{ab}, Y_{ac}, Y_{bc}$  adalah tegangan leleh untuk geser murni pada bidang  $(a, b), (a, c),$  dan  $(b, c)$ .

Dalam perangkat lunak Adina, kondisi bilinear material dapat diperhitungkan menggunakan nilai *bilinear universal plastic modulus*. Dimana nilai dari modulus tersebut dapat diperoleh dengan menggunakan **Persamaan 15** sebagai berikut :

$$E_u^p \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{1}{3} (E_a^{p2} + E_b^{p2} + E_c^{p2}) + E_{ab}^{p2} + E_{ac}^{p2} + E_{bc}^{p2} \right)} \quad (15)$$

Nilai  $E_a^p, E_b^p, E_c^p, E_{ab}^p, E_{ac}^p,$  dan  $E_{bc}^p$  merupakan nilai *bilinear plastic modulus* pada setiap arah sumbu material yang dapat diperoleh menggunakan **Persamaan 16** dan **Persamaan 17**.

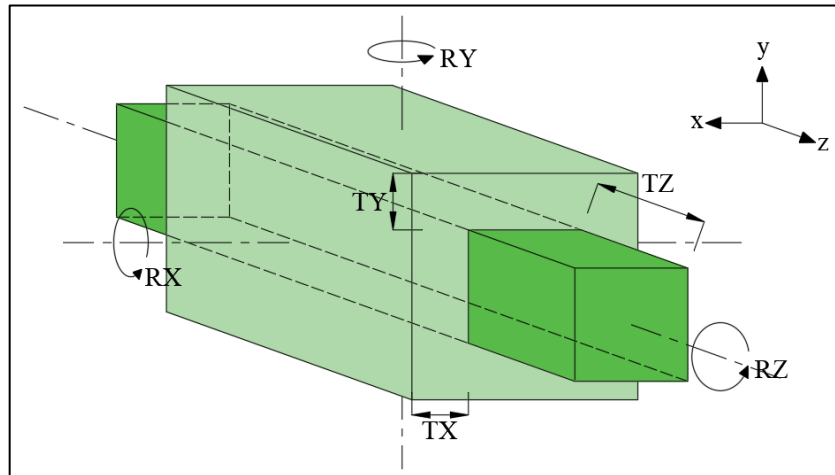
$$E_i^p = \frac{E_i \cdot E_i^T}{E_i - E_i^T}; \quad i = a, b, c \quad (16)$$

$$E_{ij}^p = \frac{E_{ij} \cdot E_{ij}^T}{E_{ij} - E_{ij}^T}; \quad ij = ab, ac, bc \quad (17)$$

Dimana nilai  $E_a^T, E_b^T, E_c^T, E_{ab}^T, E_{ac}^T,$  dan  $E_{bc}^T$  merupakan nilai *independent moduli* untuk setiap arah sumbu material.

## 2.6 Derajat Kebebasan (*Degree of Freedom*)

Derajat kebebasan (*Degree of Freedom*) merupakan suatu parameter yang digunakan untuk menentukan arah dan jenis perubahan pada suatu objek. Derajat kebebasan terbagi menjadi dua jenis yaitu translasi (perpindahan) dan rotasi (perputaran). **Gambar 2.21** menunjukkan contoh translasi dan rotasi yang terjadi pada suatu objek 3D.



**Gambar 2.21.** Translasi dan rotasi

Terdapat juga beberapa contoh derajat kebebasan yang umum digunakan pada jenis perletakan struktur. Perletakan jepit, sendi, dan rol memiliki beberapa perbedaan pada derajat kebebasan yang dibuat tidak dapat bergerak (*Fixed*) dan dibebaskan (*Released*). **Gambar 2.22** menunjukkan contoh penerapan derajat kebebasan yang digunakan pada jenis perletakan jepit, sendi, dan rol.

		(TX)	(TY)	(TZ)	(RX)	(RY)	(RZ)
• Jepit		<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>
• Sendi		<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>R</u>
• Rol		<u>R</u>	<u>F</u>	<u>F</u>	<u>R</u>	<u>R</u>	<u>R</u>

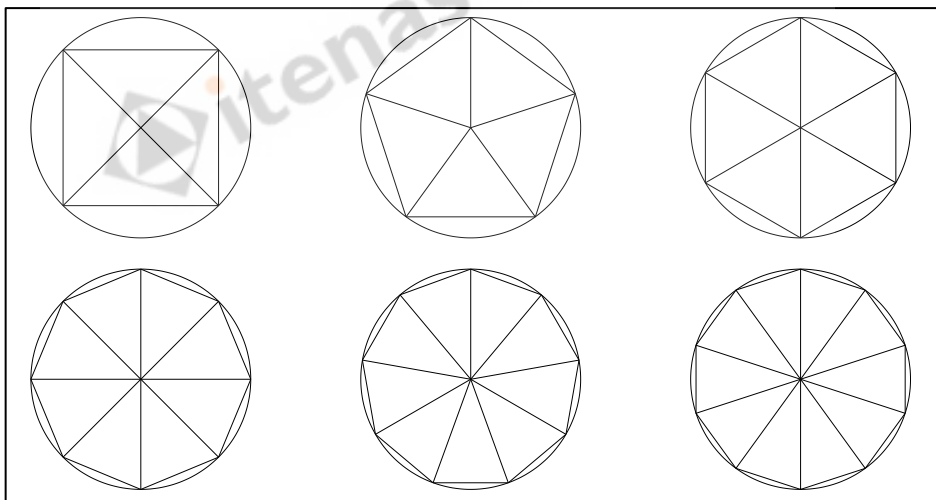
**Gambar 2.22.** Jenis derajat kebebasan pada jenis perletakan umum

Ket : TX = Translasi sumbu-X  
 TY = Translasi sumbu-Y  
 TZ = Translasi sumbu-Z  
 RX = Rotasi sumbu-X

- RY = Rotasi sumbu-Y  
 RZ = Rotasi sumbu-Z  
 F = *Fixed* (dibuat tidak dapat bergerak)  
 R = *Released* (dibebaskan untuk bergerak)

## 2.7 Metode Elemen Hingga (MEH)

Metode elemen hingga (*Finite Element Method* / FEM) merupakan salah satu metode perhitungan numerik dengan konsep pendekatan terhadap hasil yang sebenarnya dengan membagi suatu objek menjadi beberapa elemen (dapat berbentuk kotak maupun segitiga) dalam jumlah yang berhingga. “Metode elemen hingga adalah teknik numerik untuk mendapatkan solusi pendekatan (*approximate*) dari suatu persamaan diferensial parsial dan persamaan integral” (Yosafat Aji Pranata, 2019:3). Metode ini dapat membantu mempermudah perhitungan yang menggunakan objek dengan bentuk sembarang.



**Gambar 2.23.** Diskritisasi pada objek lingkaran

Pada **Gambar 2.23** ditunjukkan sebuah contoh diskritisasi yang dilakukan pada sebuah lingkaran dengan beragam jumlah *mesh* (jaring-jaring yang tersusun sebagai pembagi objek awal menjadi elemen hingga). Semakin banyak jumlah *mesh*

(dalam contoh digunakan segitiga) yang digunakan, maka hasil yang diperoleh semakin mendekati kepada kondisi sebenarnya.

### 2.7.1 Istilah-Istilah yang Digunakan

Dalam penerapannya, terdapat beberapa istilah yang umum digunakan dalam teori metode elemen hingga. Istilah-istilah tersebut perlu diketahui karena akan memengaruhi hasil pola pikir dari pengguna konsep metode elemen hingga. Istilah-istilah tersebut antara lain :

a) Diskritisasi

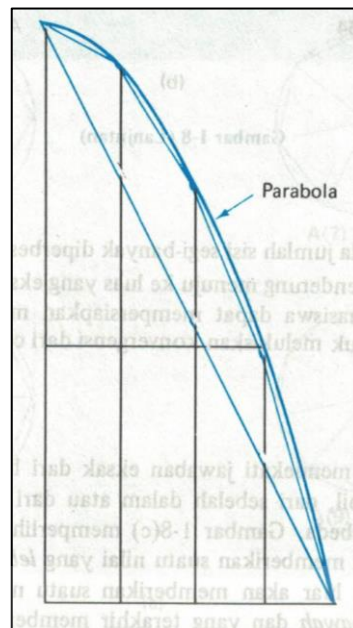
Diskritisasi merupakan proses pembagian suatu objek menjadi beberapa *mesh* dengan tujuan untuk memperoleh pendekatan. “Diskritisasi secara tidak langsung berarti pendekatan dari suatu kenyataan dan kekontinuan” (*Sri Jatno Wirjosoedirdjo, 1996:6*).

b) Kekontinuan

Dalam pembahasan mengenai MEH, kekontinuan merujuk kepada sifat objek yang menerus tanpa adanya pemutusan bidang di antara setiap nodal (titik ujung setiap segmen yang terbagi). “Misalnya, ada titik-titik di antara dua titik sembarang pada suatu garis, dan ada saat yang lain di antara dua saat dalam suatu perioda waktu” (*Sri Jatno Wirjosoedirdjo, 1996:6*).

c) Konvergensi

Konvergensi merupakan kegiatan penambahan jumlah *mesh* (dengan percobaan berkali-kali) yang bertujuan untuk memperoleh data dengan kesalahan seminimal mungkin. **Gambar 2.24** menunjukkan konsep dari konvergensi pada sebuah kurva parabola.



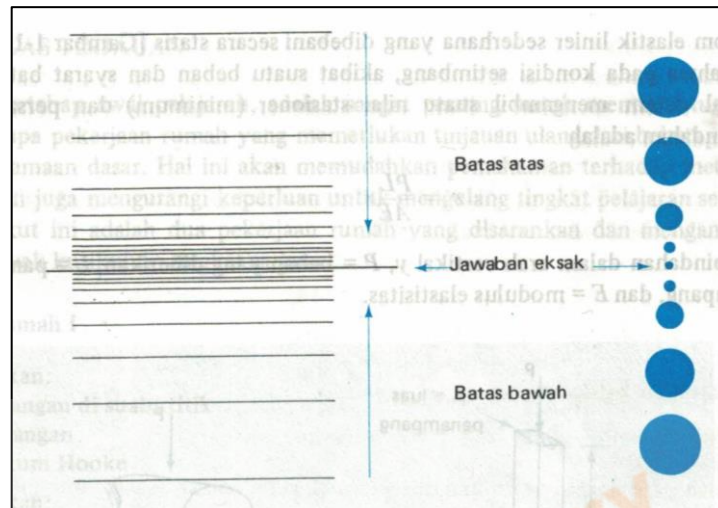
**Gambar 2.24.** Konsep konvergensi

(Sumber : Desai, Chandrakant S. 1996)

d) Batas-batas

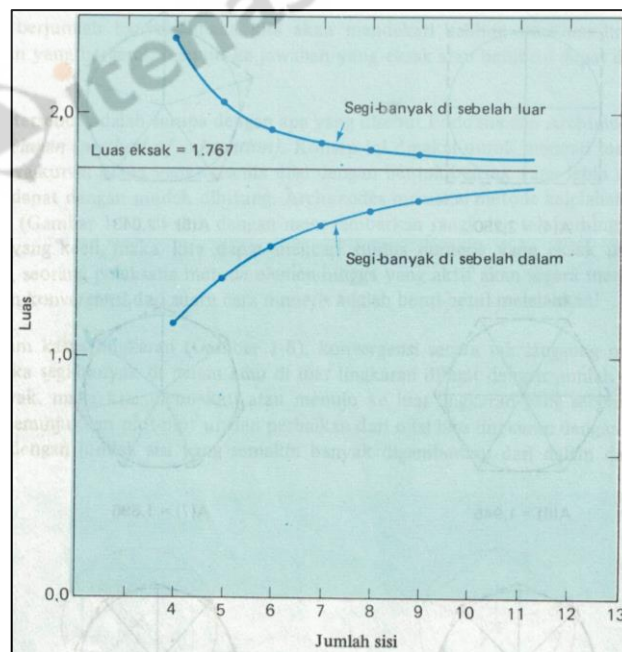
Merupakan kondisi yang menunjukkan perbedaan nilai antara hasil eksak dengan hasil konvergensi. Misalnya, pada **Gambar 2.23** ditunjukkan lingkaran yang akan dicari luasnya dengan pendiskritisasian menggunakan bangun persegi dan segitiga *mesh*, yang berada di dalam lingkaran. Hal tersebut akan berbeda hasilnya dengan apabila kita mengganti posisi lingkaran menjadi berada di dalam bangun persegi atau segitiga tersebut. Saat kondisi lingkaran berada di bagian luar *mesh* akan memberikan hasil yang lebih kecil dari hasil sebenarnya, dan saat lingkaran berada di bagian dalam *mesh* hasil yang diperoleh akan lebih besar dari hasil yang sebenarnya. Dari contoh tersebut, dapat diketahui bahwa kondisi yang pertama merupakan batas bawah dan kondisi yang kedua merupakan batas atas. **Gambar 2.25** menunjukkan konsep dasar batas atas dan batas bawah. Sementara **Gambar 2.26** menunjukkan konsep batas atas dan batas bawah dalam bentuk grafik. Dari kedua contoh tersebut, dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah

konvergensi yang dilakukan hasil akan semakin dekat dengan hasil sebenarnya namun tidak akan pernah mencapai hasil sebenarnya.



**Gambar 2.25.** Konsep batas

(Sumber : Desai, Chandrakant S. 1996)



**Gambar 2.26.** Contoh grafik batas atas dan bawah

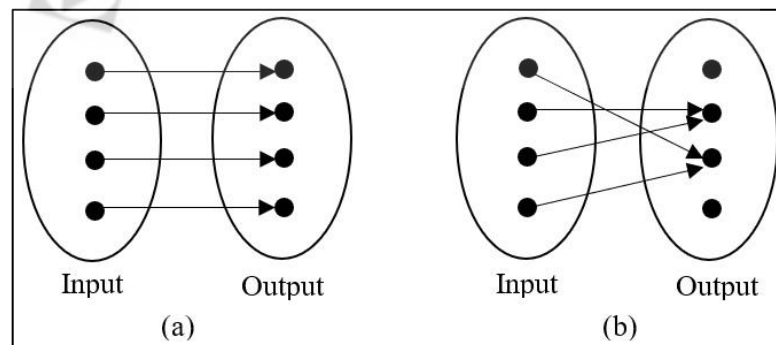
(Sumber : Desai, Chandrakant S. 1996)

e) Kesalahan

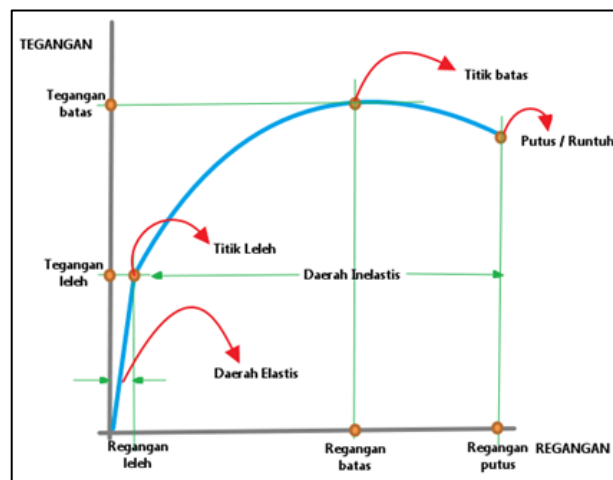
Hasil dari proses diskritisasi merupakan pendekatan. Hal tersebut menyatakan bahwa hasil yang diperoleh bukanlah hasil sebenarnya, namun mendekati yang sebenarnya. Oleh karena itu terdapat istilah kesalahan yang menunjukkan seberapa banyaknya perbedaan yang terdapat pada hasil suatu diskritisasi. Semakin kecil nilai kesalahan, hasil yang diperoleh semakin mendekati kepada hasil sebenarnya.

### 2.7.2 Analisis Linier dan Nonlinier

Dalam perhitungan numerik terdapat dua jenis analisis perhitungan, yaitu perhitungan linier dan non-linier. Analisis linier merupakan analisis yang mengasumsikan bahwa suatu kasus hanya memiliki satu solusi dan hanya menggunakan persamaan berpangkat satu. Sementara analisis non-linier merupakan suatu analisis yang mengasumsikan bahwa suatu kasus memiliki lebih dari satu solusi dan tidak selalu dapat didefinisikan dalam suatu bentuk persamaan matematis. **Gambar 2.27** menunjukkan contoh perbedaan hubungan antara input dengan output pada program linier dan nonlinier.



**Gambar 2.27.** Hubungan *input* dan *output* suatu program. (a) Program linier.  
(b) Program nonlinier.



**Gambar 2.28.** Grafik hubungan tegangan-regangan material beton

(Sumber : <http://kampustekniksipil.blogspot.com>)

Contoh penerapan metode analisis linier dan non-linier dalam bidang Teknik Sipil dapat ditemukan pada grafik hubungan tegangan-regangan pada pengujian tekan silinder beton. Dalam grafik tersebut terlihat garis linier (kondisi saat silinder beton bersifat elastis) dan garis yang tidak beraturan (kondisi saat silinder beton bersifat plastis/inelastis). Kondisi saat silinder beton bersifat elastis merupakan suatu persamaan analisis linier, dan kondisi plastis silinder beton merupakan analisis non-linier. **Gambar 2.28** menunjukkan contoh grafik hubungan tegangan-regangan material beton yang bersifat linier pada saat elastis dan non-linier ketika plastis (*Inelastic*).

### 2.7.3 Penerapan pada Pemodelan Struktur

Tujuan utama penggunaan metode elemen hingga dalam pemodelan struktur adalah memperoleh besarnya translasi pada komponen struktur yang sudah dibagi menjadi beberapa bagian dalam bentuk *mesh*. Besarnya translasi pada komponen struktur diperoleh dengan menggunakan persamaan hubungan antara tegangan-regangan.

Konsep dasarnya adalah dengan menghitung gaya tegangan normal dan tegangan geser pada setiap *mesh* akibat dari adanya gaya eksternal yang kemudian memengaruhi kondisi internal dari komponen struktur tersebut. Dengan diketahui



besar tegangan normal dan tegangan geser, dapat diperoleh besarnya regangan normal dan regangan geser komponen yang terjadi pada tiga arah sumbu utama. **Gambar 2.19** menunjukkan arah tegangan normal dan tegangan geser yang terjadi pada sebuah elemen *infinitesimal* (sangat kecil) berdimensi tiga.

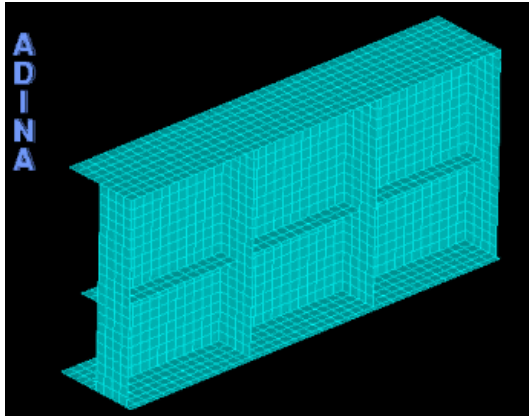
## 2.8 *Wood Handbook*

*Wood Handbook* merupakan buku pegangan yang berisi ringkasan informasi mengenai kayu sebagai material di bidang teknik. Buku ini menyajikan data-data properti produk berbasis kayu yang sering menjadi perhatian khusus pada bidang arsitektur dan beberapa kegunaan terkait. (*Forest Products Laboratory, 2010*)

Buku pegangan ini disediakan oleh *Forest Products Laboratory*, unit penelitian yang termasuk dalam Dinas Kehutanan USDA, dengan tujuan sebagai buku referensi mengenai material kayu dari yang digunakan sebagai bahan struktur konstruksi maupun sebagai bahan dekoratif. Topik utama pada buku pegangan ini membahas mengenai karakteristik, sifat, kegunaan, serta perawatan untuk material kayu. Buku ini juga berisi data-data hubungan antara nilai modulus elastisitas dengan modulus geser untuk beberapa jenis kayu tertentu.

## 2.9 Perangkat Lunak Adina

Adina merupakan suatu perusahaan yang didirikan oleh Dr. KJ Bathe pada tahun 1974 dengan misi untuk menyediakan sistem perangkat lunak terpadu untuk analisis elemen hingga komprehensif struktur, perpindahan panas, fluida, elektromagnetik, interaksi cairan-struktur, dan multi-fisik (*ADINA R&D.Inc, 2019*). Perangkat lunak ini dapat digunakan sebagai alat bantu pemodelan dalam bidang struktur dan non struktural baik sebagai perangkat mandiri ataupun dipadukan dengan perangkat lain. Metode analisis yang digunakan pada perangkat ini adalah metode elemen hingga, dan didesain untuk dapat memecahkan permasalahan linier maupun nonlinier yang rumit. **Gambar 2.29** menunjukkan contoh pemodelan elemen struktur balok baja dengan perangkat lunak adina.



**Gambar 2.29.** Pemodelan elemen balok dengan perangkat lunak Adina

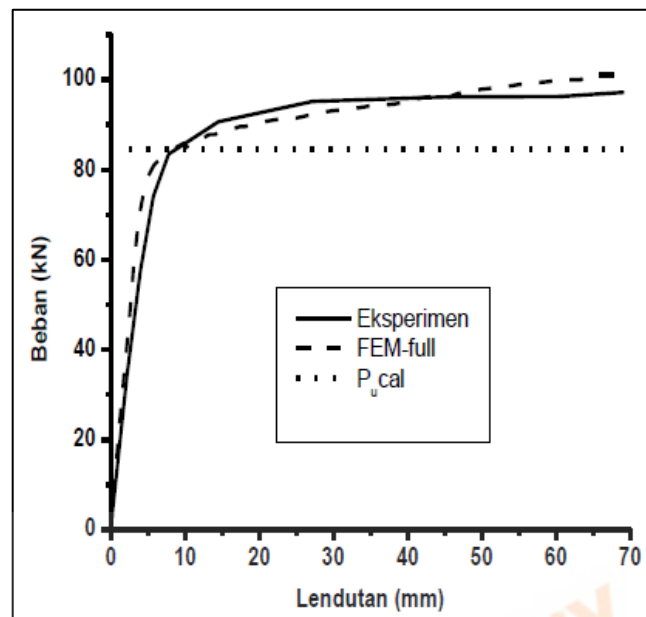
(Sumber : <http://www.adina.com>)

Perangkat lunak Adina sering digunakan dalam pemodelan produk sebelum dilakukan uji coba menggunakan benda uji. Pemodelan yang dilakukan mencakup pengujian statis, dinamis, geometris, nonlinieritas material, deformasi, kondisi kontak, dll. Dalam perangkat ini juga disediakan berbagai jenis material dan bentuk elemen padat (materi dan elemen yang ditentukan pengguna juga dapat diimplementasikan) dalam bentuk 2 dimensi maupun 3 dimensi seperti material tanah, batu, kayu, beton, dll. Sementara untuk elemen padat berupa tiang penopang, balok, pipa, elemen fluida, elemen akustik, dll yang dapat digunakan untuk kemudahan proses pemodelan.

## 2.10 Penelitian Terkait Sebelumnya

Pada sebuah penelitian perlu adanya pembandingan antara hal yang sedang diteliti dengan hasil terkait sebelumnya agar dapat membuktikan keunikan tersendiri dari penelitian yang dilakukan. Pemodelan dengan metode elemen hingga non linier telah banyak dilakukan pada berbagai penelitian. Dalam subbab ini akan ditunjukkan beberapa contoh penelitian menggunakan elemen hingga non linier yang telah dilakukan sebelumnya.

Mahmud Jori Effendi, dari Jurusan Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang (UNNES), telah melakukan penelitian dengan judul “Pengaruh Model dan Sifat Material pada Analisis Metode Elemen Hingga Balok Tabung-Baja Bundar Diisi Beton” pada tahun 2017.



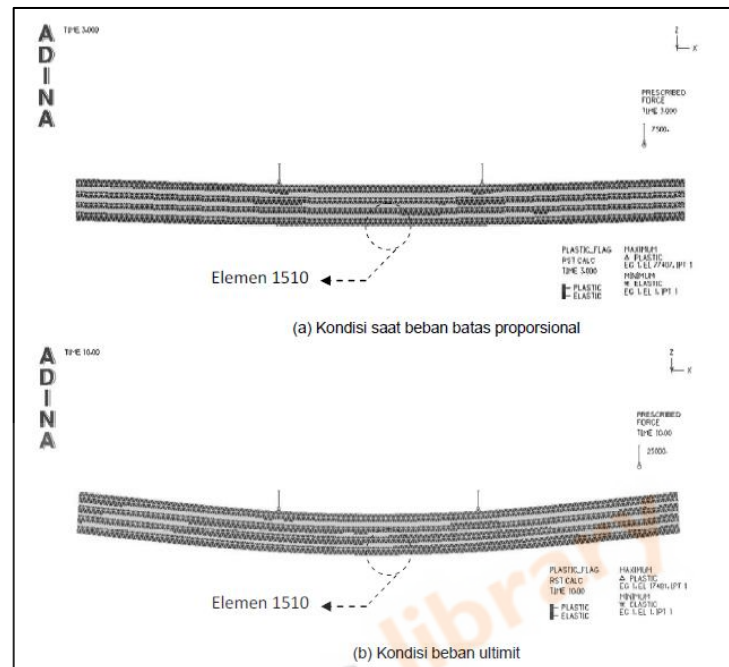
**Gambar 2.30.** Perbandingan beban-lendutan hasil eksperimen dan FEM material non linier oleh Mahmud Jori Effendi

(Sumber : Effendi, Mahmud Kori. 2017)

Penelitian tersebut membandingkan hasil pengujian eksperimen dengan pemodelan sebuah material komposit, terdiri dari baja dan beton, menggunakan metode elemen hingga non linier tiga dimensi. Pemodelan yang dilakukan pada penelitian tersebut menggunakan bantuan perangkat lunak MSC Marc Mentat. Hasil keluaran pada penelitian tersebut merupakan grafik hubungan beban dengan lendutan dimana terdapat perbedaan sebesar 10% antara hasil pemodelan dengan eksperimen.

Penelitian terkait selanjutnya mengambil referensi berdasarkan Jurnal Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha dengan judul “Rasio Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Laminasi-Baut” yang ditulis oleh Yosafat Aji Pranata, Bambang Suryoatmono, dan Johannes Adhijoso Tjondro pada tahun 2012. Pada tulisan tersebut dijelaskan bahwa penulis melakukan penelitian dengan membandingkan hasil pengujian eksperimen balok kayu laminasi-baut dengan pemodelan menggunakan metode elemen hingga non linier tipe elemen solid 3D.

Pemodelan yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ADINA dengan hasil keluaran berupa grafik hubungan tegangan-regangan.



**Gambar 2.31.** Pemodelan dengan perangkat lunak ADINA oleh Pranata dkk  
(Sumber : Pranata, Yosafat Aji, Bambang Suryoatmono dan Johannes Adhijoso Tjondro. 2012)

Penelitian menggunakan berbagai benda uji dengan pengujian pada serat tertarik dan serat tertekan. Untuk hasil serat tertarik, rasio perbedaan hasil pengujian berkisar antara 4,87% sampai dengan 67,66%. Sementara untuk hasil serat tertekan, rasio perbedaan hasil pengujian berkisar antara 8,29% sampai dengan 52,80%.

Contoh dari penelitian terkait berikutnya mengambil referensi berdasarkan jurnal dengan judul “Uji Eksperimental dan Simulasi Numerik metode Elelmen Hingga Pola Fraktur Ragam I Kayu Indonesia” yang ditulis oleh Johannes Adhijoso dan Yosafat Aji Pranata pada tahun 2010. Dalam tulisan tersebut penulis melakukan studi perbandingan kurva penjaralan retak kayu antara hasil uji eksperimental dengan pemodelan metode elemen hingga menggunakan bantuan perangkat lunak ADINA. Jenis kayu yang diteliti adalah kayu Durian, Nyatoh, dan Kayu Mersawa. Hasil simulasi yang dilakukan peneliti menunjukkan bahwa perbedaan %-relatif antara pemodelan dengan eksperimental berkisar antara 0,2% sampai 25,23%.