

BAB II

Tinjauan Pustaka

2.1 Tegangan

Sebelum membahas tentang tegangan, peninjauan beberapa prinsip penting dari statika dan menunjukkan bagaimana mereka digunakan untuk menentukan beban internal (gaya – gaya dalam).

Kesetimbangan Benda Tegar

1. *External Load* (gaya – gaya luar), yaitu gaya yang disebabkan oleh kontak langsung dari suatu benda dengan permukaan benda lain. Dalam semua kasus ini kekuatan didistribusikan ke daerah kontak antara benda.
2. Reaksi pendukung, gaya luar yang terjadi pada dukungan atau titik kontak antara dua benda disebut reaksi. Untuk masalah dua dimensi yaitu benda mengalami sistem kekuatan *coplanar* (gaya – gaya luar), dukungan yang paling sering ditemui ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Jenis – jenis reaksi dukungan.

Tipe Koneksi	Reaksi	Tipe Koneksi	Reaksi
 <p>weightless link</p>		 <p>smooth pin or hinge</p>	
 <p>rollers</p>		 <p>fixed-connected roller</p>	
 <p>smooth pin-connected roller</p>		 <p>fixed support</p>	

Sumber; Hibbeler, R. C. Mechanics of Materials, Eighth Edition.

3. Persamaan Keseimbangan

Dibidang engineering gaya pada benda dapat diwakili sebagai sistem gaya koplanar. Dalam hal ini, gaya terletak pada bidang x-y, maka kondisi untuk keseimbangan benda dapat ditentukan dengan hanya tiga persamaan keseimbangan scalar, yaitu:

$$\left. \begin{array}{l} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum M_o = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

4. Resultan Gaya – Gaya Dalam

Untuk mendapatkan beban internal yang bekerja pada daerah tertentu dalam tubuh, maka perlu untuk melogikakan gaya yang terjadi pada potongan melalui daerah dimana beban internal harus ditentukan. Metode sebagian (pemotongan) digunakan untuk menentukan beban resultan internal yang bekerja pada permukaan benda yang dipotong. Secara umum, resultan ini terdiri dari gaya normal, gaya geser, momen torsi, dan momen lentur.

5. *Free-Body Diagram* (Diagram Benda Bebas)

Gambar diagram benda bebas dari salah satu segmen yang telah dipotong (gaya dalam) akan menunjukkan resultan gaya normal N, gaya geser V, momen lentur M dan momen torsi T.

Resultan ini biasanya ditempatkan pada titik yang mewakili pusat geometris atau pusat massa bidang dipotong.

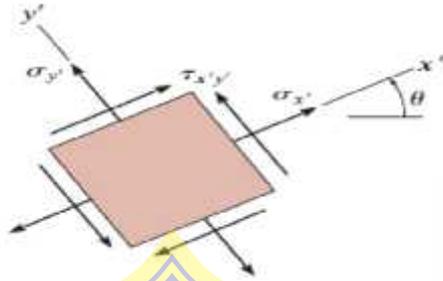
2.1.1 Transformasi Tegangan

Kondisi tegangan pada suatu titik tertentu dapat diketahui dari orientasi sebuah unsur dari material tersebut. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Kondisi tegangan pada bidang $x - y$.

Dalam hal lain juga didapat kondisi tegangan disebuah elemen yang memiliki orientasi dengan sudut. Hal ini dapat dilihat dengan gambar 2.2.



Gambar 2.2. Kondisi tegangan pada bidang $x' - y'$.

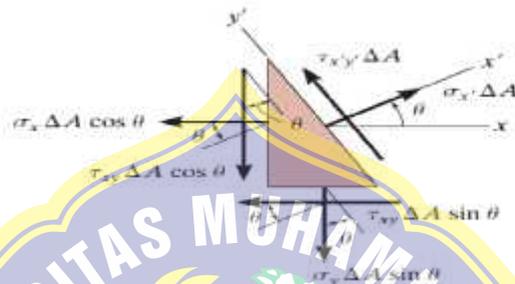
Transformasi tegangan pada komponen tegangan normal dan tegangan geser dari bidang x, y ke bidang x', y' dapat diketahui melalui diagram benda bebas elemen tersebut.

Maka dalam hal ini segmen dipotong sepanjang bidang miring seperti ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Bidang menerima tegangan (a) segmen yang dipotong, (b) potongan segmen.

Dengan demikian didapat diagram benda bebas seperti ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Diagram benda bebas potongan segmen.

Maka dengan menerapkan persamaan kesetimbangan akan didapat variabel $\sigma_{x'}$ dan $\tau_{x'y'}$ sebagai berikut:

$$\sum F_{x'} = 0$$

$$\sigma_{x'} \Delta A - (\tau_{xy} \Delta A \sin \theta) \cos \theta - (\sigma_y \Delta A \sin \theta) \sin \theta - (\tau_{xy} \Delta A \cos \theta) \sin \theta - (\sigma_x \Delta A \cos \theta) \cos \theta = 0$$

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + \tau_{xy} (2 \sin \theta \cos \theta)$$

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \left(\frac{1 + \cos 2\theta}{2} \right) + \sigma_y \left(\frac{1 - \cos 2\theta}{2} \right) + \tau_{xy} (\sin 2\theta)$$

$$\sigma_{x'} = \sigma_x + \sigma_x \cos 2\theta + \sigma_y - \sigma_y \cos 2\theta + 2\tau_{xy} (\sin 2\theta)$$

$$\sigma_{x'} = \sigma_x + \sigma_y + (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + 2\tau_{xy} (\sin 2\theta)$$

$$\sigma_{x'} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} (\sin 2\theta) \dots \dots \dots (2.2)$$

$$\sum F_{y'} = 0$$

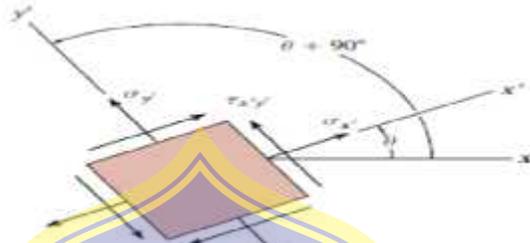
$$\tau_{xy'} \Delta A + (\tau_{xy} \Delta A \sin \theta) \sin \theta - (\sigma_y \Delta A \sin \theta) \cos \theta - (\tau_{xy} \Delta A \cos \theta) \cos \theta + (\sigma_x \Delta A \cos \theta) \sin \theta = 0$$

$$\tau_{xy'} = (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

$$\tau_{xy'} = (\sigma_y - \sigma_x) \frac{1}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta$$

$$\tau_{xy'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \dots \dots \dots (2.3)$$

Dan apabila tegangan normal yang bekerja pada sumbu y' diperlukan, seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Diagram benda bebas bidang $x''-y''$.

maka dapat ditentukan dengan mensubstitusi = kedalam persamaan 2-1, maka:

$$\sigma_{y'} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} - \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} (\sin 2\theta) \dots (2.4)$$

2.1.2 Tegangan utama (*principal stress*)

Untuk menentukan tegangan normal maksimum dan minimum yaitu dengan mendefinisikan persamaan 2-2 terhadap sama dengan nol. Maka:

$$\frac{d\sigma_{x'}}{d\theta} = 0$$

$$\frac{d \left(\frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} (\sin 2\theta) \right)}{d\theta} = 0$$

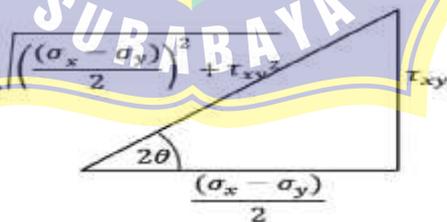
$$-\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} 2 \sin 2\theta + 2\tau_{xy} (\cos 2\theta) = 0$$

$$2\tau_{xy} (\cos 2\theta) = (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta$$

$$\frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta} = \frac{2\tau_{xy}}{(\sigma_x - \sigma_y)}$$

$$\tan 2\theta = \frac{\tau_{xy}}{(\sigma_x - \sigma_y)/2} \quad (2.5)$$

Maka didapat segitiga trigonometri seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Segitiga trigonometri tegangan utama.

Dengan mensubstitusikan nilai trigonometri ke persamaan 2-2, maka:

$$\sigma_{x'} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} (\sin 2\theta)$$

$$\sigma_{x'} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2}$$

$$+ \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \left(\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \right)$$

$$+ \tau_{xy} \left(\sqrt{\left(\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \right)$$

$$\sigma_{x'} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + \sqrt{\left(\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\dots(2.6)$$

2.1.3 Tegangan Geser Maksimum

Untuk mendapatkan tegangan geser maksimum yaitu dengan mendiferensialkan persamaan 2-3 terhadap θ sama dengan nol. Maka:

$$\frac{d(\tau_{x'y'})}{d\theta} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta = 0$$

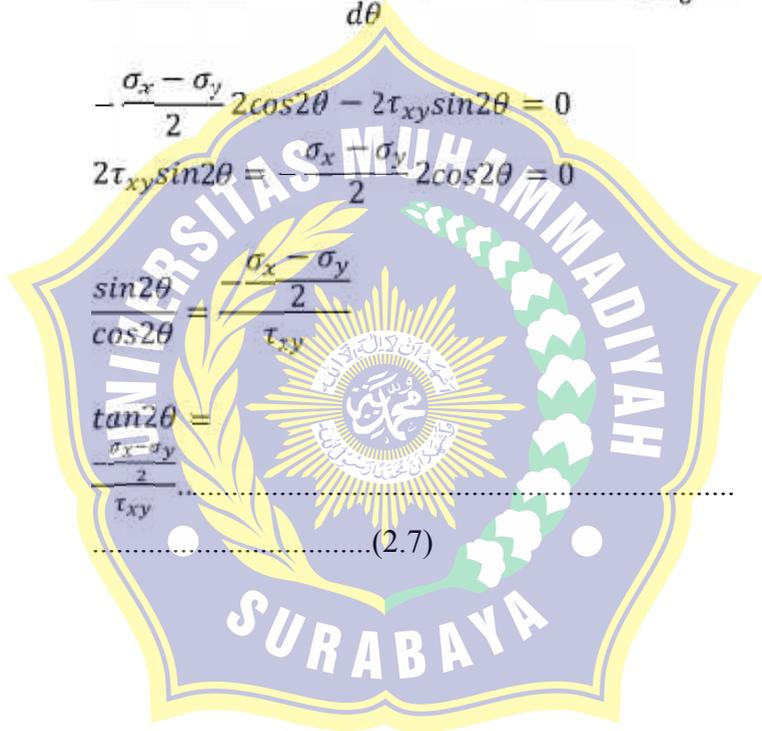
$$-\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} 2 \cos 2\theta - 2\tau_{xy} \sin 2\theta = 0$$

$$2\tau_{xy} \sin 2\theta = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} 2 \cos 2\theta = 0$$

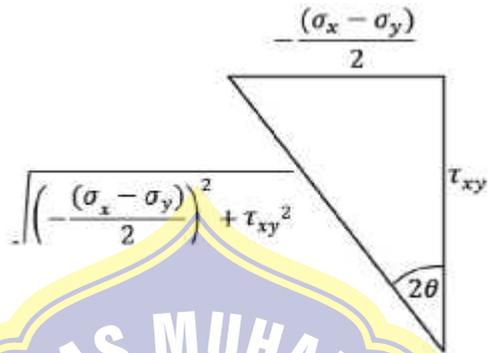
$$\frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta} = \frac{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}}{\tau_{xy}}$$

$$\tan 2\theta = \frac{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}}{\tau_{xy}}$$

(2.7)



Maka didapat trigonometri seperti pada gambar



2.7.

Gambar 2.7. Segitiga trigonometri tegangan geser.

Dengan mensubstitusikan nilai trigonometri ke persamaan 2-3, maka:

$$\tau_{\max \text{ in plane}} = \sqrt{\left(\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \dots\dots\dots (2.8)$$

2.2 Regangan

2.2.1 Transformasi Regangan

Elemen yang mengalami suatu regangan pada suatu bidang x-y seperti ditunjukkan pada gambar



2.8.

a

b

Gambar 2.8. Regangan pada elemen (a) Regangan normal, $\epsilon_{x'}$; (b) Regangan geser $\gamma_{x'y'}$

Persamaan transformasi regangan pada regangan normal $\epsilon_{x'}$ pada arah x' adalah:

$$\epsilon_{x'} = \frac{(\epsilon_x + \epsilon_y)}{2} + \frac{(\epsilon_x - \epsilon_y)}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} (\sin 2\theta)$$

.....(2.9)

Untuk regangan geser $\gamma_{x'y'}$ yang berorientasi pada sudut θ adalah:

$$\frac{\gamma_{x'y'}}{2} = -\frac{(\epsilon_x - \epsilon_y)}{2} \sin 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} (\cos 2\theta)$$

.....(2.10)

2.2.2 Regangan Utama

Seperti halnya sama dengan pencarian tegangan utama dalam menentukan regangan normal maksimum dan minimum yaitu dengan mendiferensialkan persamaan 2-9 terhadap θ sama dengan nol. Maka:

$$d\left(\frac{(\epsilon_x + \epsilon_y)}{2} + \frac{(\epsilon_x - \epsilon_y)}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} (\sin 2\theta)\right) / d\theta = 0$$

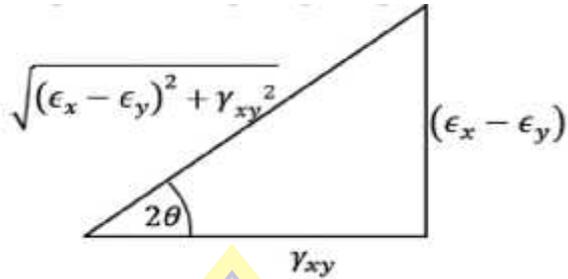
$$\frac{(\epsilon_x - \epsilon_y)}{2} 2 \sin 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} 2 (\cos 2\theta) = 0$$

$$\frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta} = \frac{(\epsilon_x - \epsilon_y)}{2} ; \frac{\gamma_{xy}}{2}$$

$$\tan 2\theta = \frac{(\epsilon_x - \epsilon_y)}{\gamma_{xy}}$$

.....(2.11)

Maka didapat segitiga trigonometri seperti pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Segitiga trigonometri regangan utama.

Dengan mensubstitusikan nilai trigonometri ke persamaan 2-9, maka:

$$\epsilon_{x'} = \frac{(\epsilon_x + \epsilon_y)}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{(\epsilon_x - \epsilon_y)}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (2.12)$$

2.2.3 Regangan Geser Maksimum

Untuk mendapatkan regangan geser maksimum pada arah χ' yaitu dengan mendiferensialkan persamaan 2-10 terhadap θ sama dengan nol.

Maka:

$$\tan 2\theta = -\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{\gamma_{xy}} \quad (2.13)$$

Regangan geser maksimum didapat:

$$\frac{\gamma_{\max \text{ in plane}}}{2} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}$$

.....(2.14)

2.3 Analisa Tegangan dan Regangan

Untuk menganalisa suatu struktur harus memperhatikan tegangan, regangan dan deformasi yang terjadi. Tegangan adalah gaya persatuan luas dan juga dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dengan:

$$\sigma = \text{Tegangan (N/m}^2\text{)}$$

$$F = \text{Gaya (kg/cm}^2\text{)}$$

$$A = \text{Luas Penampang (mm}^2\text{)}$$

Regangan adalah perbandingan deformasi total terhadap panjang mula-mula suatu struktur. Regangan juga dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma = \epsilon \cdot E \dots\dots\dots(2.16)$$

Dengan: $\sigma =$ Tegangan (N/m^2)

$\epsilon =$ Regangan

$E =$ Modulus Elastisitas

Dari hukum Hooke dijelaskan bahwa transisi dari elatisitas menuju plastis dinamakan kekuatan luluh (*yield strength*). jika diberikan penambahan beban diatas batas kekuatan luluhnya maka struktur tersebut akan bersifat patah.

2.4 Hukum Hooke

Diagram tegangan-regangan di kebanyakan material engineering memperlihatkan hubungan yang linear antara tegangann dan regangan diwilayah elastis. Dengan demikian peningkatan tegangan menyebabkan kesebandingan peningkatan regangan. Fakta inilah yang ditemukan oleh Robert Hooke 1676 dalam penerpan pegas an dikenal dengan hukum Hooke.

$$\sigma = E \epsilon \dots\dots\dots(2.17)$$

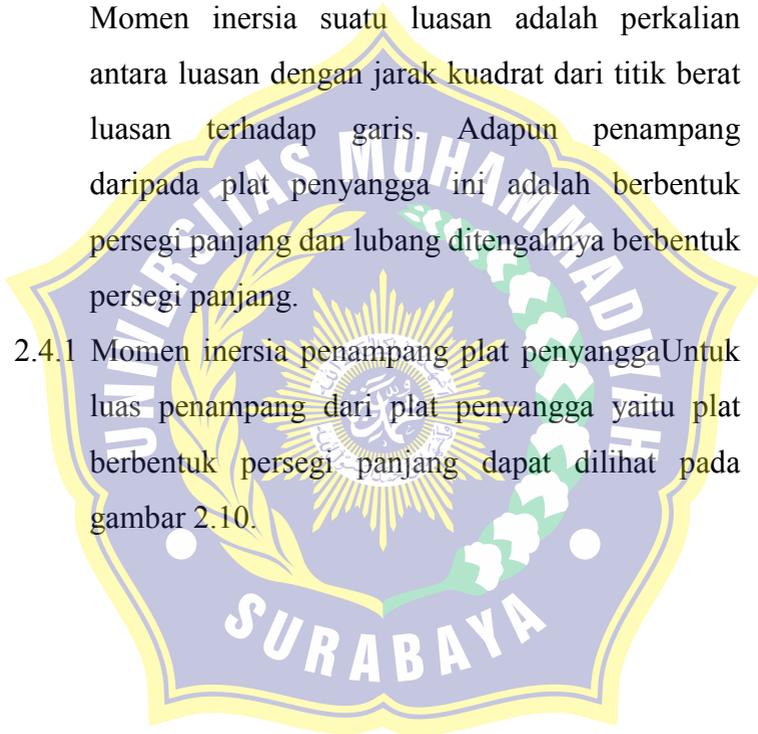
Dimana: $\sigma =$ Tegangan (N/m^2)

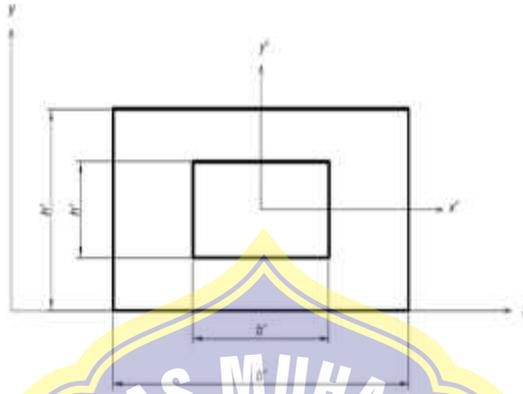
E = Modulus elastisitas atau modulus
young (N/m^2)
= Regangan yang terjadi (m/m)

2.5 Momen Inersia

Momen inersia suatu luasan adalah perkalian antara luasan dengan jarak kuadrat dari titik berat luasan terhadap garis. Adapun penampang daripada plat penyangga ini adalah berbentuk persegi panjang dan lubang ditengahnya berbentuk persegi panjang.

2.4.1 Momen inersia penampang plat penyangga Untuk luas penampang dari plat penyangga yaitu plat berbentuk persegi panjang dapat dilihat pada gambar 2.10.





Gambar 2.10. Penampang plat penyangga.

Dengan adanya dimensi dari penampang plat penyangga maka dapat dicari momen inersia luas penampang plat penyangga. Untuk luas penampang persegi panjang rumus inersia luas penampangnya adalah:

$$I_{x'} = \frac{1}{12}bh^3 \dots\dots\dots(2.18)$$

Maka persamaan dari 2-16, dapat dicari momen inersia luas penampang plat penyangga:

$$I = I_{x'} = \frac{1}{12}bh^3 - \frac{1}{12}b'h'^3 \dots\dots\dots(2.19)$$

2.6 Defleksi

Ketika suatu batang dibebani dengan gaya atau momen, defleksi terjadi pada batang. Sebelum mencari defleksi pada batang perlu diketahui tegangan normal dan tegangan geser. Untuk menentukan besarnya tegangan-tegangan ini pada suatu bagian atau titik tersebut dan menentukan besarnya resultan pada tumpuan dapat menggunakan persamaan-persamaan kesetimbangan.

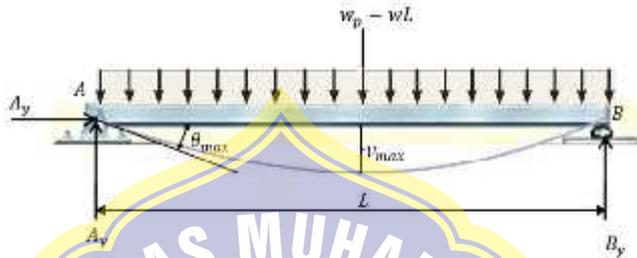
Gambar 2.11. merupakan contoh analisis 1 dimensi arah x untuk menentukan gaya, momen dan defleksi pada batang yang ditumpu yang mengalami beban merata.



Gambar 2.11. Batang yang ditumpu dan diberi beban merata.

Maka dari gambar 2.11 diatas didapat:

1. Diagram benda bebas kesetimbangan gaya-gaya luar dan monen dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12. Diagram benda bebas gaya luar.

Maka dari gambar 2.12 diatas didapat gaya-gaya yang bekerja sebagai berikut:

$$\sum M_A = 0$$

$$w_p \left(\frac{1}{2} L \right) - B_y (L) = 0$$

$$B_y = w_p \left(\frac{1}{2} L \right) / L$$

$$B_y = \frac{1}{2} wL$$

$$\sum F_x$$

$$A_x = 0$$

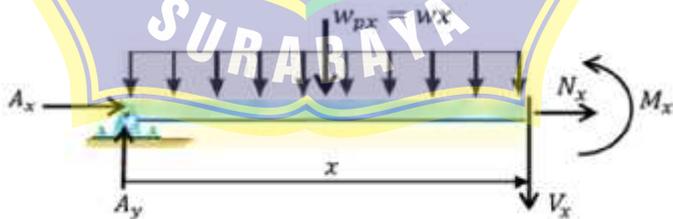
$$\sum F_y = 0$$

$$A_y + B_y - w_p = 0$$

$$A_y + \frac{1}{2}wL - wL = 0$$

$$A_y = \frac{1}{2}wL$$

2. Diagram benda bebas gaya-gaya didalam sepanjang $0 \leq x \leq L$ dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13. Diagram benda bebas gaya-gaya dalam.

Maka dari gambar 2.13 di atas didapat:

$$\sum F_x$$

$$A_x + N_x = 0$$

$$N_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

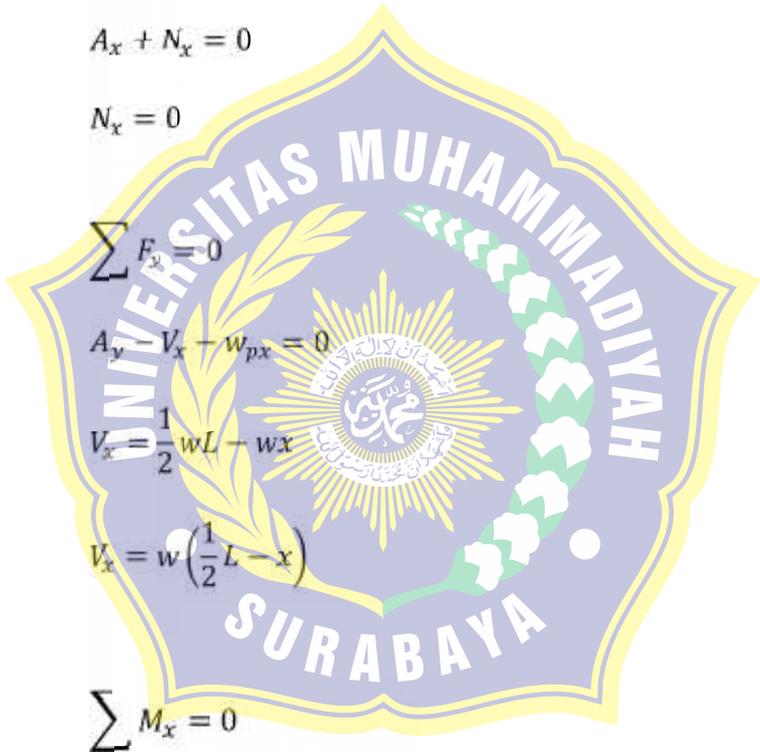
$$A_y - V_x + w_{px} = 0$$

$$V_x = \frac{1}{2}wL - wx$$

$$V_x = w\left(\frac{1}{2}L - x\right)$$

$$\sum M_x = 0$$

$$M_x - A_y(x) + P_x\left(\frac{x}{2}\right) = 0$$



$$M_x = \frac{1}{2}wL(x) - wx\left(\frac{x}{2}\right)$$

$$M_x = \frac{1}{2}wx(L - x)$$

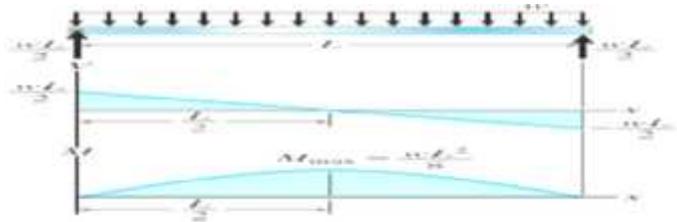
Untuk kondisi batas dengan $x = \frac{1}{2}L$, maka gaya geser $V_x = w\left(\frac{1}{2}L - x\right)$ bernilai nol dan didapat momen maksimum:

$$M_x = \frac{1}{2}wx(L - x)$$

$$M_{max} = \frac{1}{2}w\left(\frac{1}{2}L\right)\left(L - \left(\frac{1}{2}L\right)\right)$$

$$M_{max} = \frac{wL^2}{8} \dots\dots\dots (2.20)$$

Gambar 2.14 adalah diagram momen dan gaya geser yang terjadi pada batang yang diberi beban merata.



Gambar 2.14. Diagram momen dan gaya geser.

Untuk kebanyakan batang yang mengalami defleksi maka persamaan untuk mencari kurva kemiringan adalah:

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{1}{2}wLx - \frac{1}{2}wx^2$$

$$EI \frac{dv}{dx} = \frac{1}{4}wLx^2 - \frac{1}{6}wx^3 + c_1$$

$$Elv = \frac{1}{4}wLx^3 - \frac{1}{24}wx^4 + c_1x + c_2$$

Nilai variabel c_1 dan dapat diketahui dengan kondisi batas $\theta = 0$ pada $x = \frac{L}{2}$.

$$0 = \frac{1}{4}wLx^2 - \frac{1}{6}wx^3 + c_1$$

$$c_1 = \frac{1}{48}wL^3 - \frac{1}{16}wL^3$$

$$c_1 = -\frac{1}{24}wL^3$$

Maka didapat kemiringan kurva

$$EI \frac{dv}{dx} = \frac{1}{4}wLx^2 - \frac{1}{6}wx^3 - \frac{1}{24}wL^3$$

$$\theta = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{4}wLx^2 - \frac{1}{6}wx^3 - \frac{1}{24}wL^3 \right)$$

.....(2.21)

Nilai variabel c_2 dan dapat diketahui dengan kondisi batas $v = 0$ pada $x = 0$

$$EIv = \frac{1}{12}wLx^3 - \frac{1}{24}wx^4 + c_1x + c_2$$

$$0 = \frac{1}{12}wLx^3 - \frac{1}{24}wx^4 - \frac{1}{24}wL^3x + c_2$$

$$c_2 = 0$$

Maka didapat persamaan defleksi kurva

$$EIv = \frac{1}{12}wLx^3 - \frac{1}{24}wx^4 - \frac{1}{24}wL^3x$$

$$v = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{24}wLx^3 - \frac{1}{24}wx^4 - \frac{1}{24}wL^3x \right)$$

.....(2.22)

2.7 Kelelahan (*Fatigue*)

Fatigue atau kelelahan adalah kerusakan material yang diakibatkan oleh adanya tegangan yang berfluktuasi yang besarnya lebih kecil dari tegangan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) (σ_u) maupun tegangan luluh (*yield*) material yang diberikan beban konstan.

Terdapat tiga fase dalam perpatahan *fatigue* yaitu:

1. Permulaan retak

Mekanisme *fatigue* umumnya dimulai dari *crack initiation* yang terjadi dipermukaan material yang lemah atau daerah dimana terjadi konsentrasi tegangan dipermukaan (seperti goresan, *notch*, lubang-pitch dll) akibat adanya pembebanan berulang.

2. Penyebaran retak

Crack initiation ini berkembang menjadi *microcrack*. Perambatan atau perpaduan *microcrack* ini kemudian membentuk *macrocrack* yang akan berujung pada *failure*.

3. Patah

Perpatahan terjadi ketika material mengalami siklus tegangan dan regangan yang menghasilkan kerusakan permanen.

Fatigue atau kelelahan menurut ASM (1975) didefinisikan sebagai perubahan struktur permanen *progressive localized* pada kondisi yang menghasilkan fluktuasi tegangan dan regangan dibawah kekuatan tariknya dan pada satu titik atau banyak titik yang dapat memuncak menjadi retak (*crack*) atau patahan (*fracture*) secara keseluruhan sesudah fluktuasi tertentu.

Progressive mengandung pengertian proses *fatigue* terjadi selama jangka waktu tertentu atau selama pemakaian, sejak komponen atau struktur digunakan. *Localized* bararti proses *fatigue* beroperasi pada luasan lokal yang mempunyai tegangan dan regangan yang tinggi karena pengaruh beban luar, perubahan geometri, perbedaan temperatur, tegangan sisa dan tidak kesempurnaan diri. *Crack* merupakan awal terjadinya kegagalan *fatigue* dimana kemudian

crack karena adanya beban berulang. *Fracture* merupakan tahap akhir dari proses *fatigue* dimana material tidak dapat menahan tegangan dan regangan yang ada sehingga patah menjadi dua bagian atau lebih.

Kegagalan akibat *fatigue* telah diteliti lebih dari 150 tahun lalu. Salah satu studi paling awal dilakukan W.A.J Albert, dengan menguji beban siklik pada rantai pengangkat di Jerman tahun 1828. Istilah *fatigue* digunakan pertama tahun 1839 pada mekanika oleh J.V Poncelet dari Prancis. A. Wohler dari Jerman, mulai meneliti *fatigue* tahun 1850 dan menguji beberapa besi baja dan logam lain dengan beban aksial, lentur dan torsi. Wohler juga menunjukkan bahwa *fatigue* tidak hanya dipengaruhi oleh beban siklik namun juga oleh besar tegangan rerata (*mean stress*). Studi dilanjutkan oleh Soderberg, Geber dan Goodman untuk memprediksi pengaruh *mean stress* terhadap umur *fatigue*.

Collins (1981) menyatakan bahwa ketidakrataan dan kekasaran permukaan secara

umum mengakibatkan sifat *fatigue* lebih rendah daripada permukaan yang halus. Pada beberapa pelapisan (*chromizing*) menyebabkan kekuatan *fatigue* menjadi lebih rendah dibanding dengan tanpa pelapisan.

Hotta et al (1995) meneliti pengaruh kombinasi teknik pelapisan terhadap ketahanan *fatigue* baja karbon rendah. *Thermocreative deposition* (TRD) untuk lapisan *vanadium carbida* dan *chromium carbida*, *chemical vapour deposition* (CVD) untuk *titanium carbida*, *physical vapour deposition* (PVD) untuk *titanium nitrida* dan *chromium plating*.

Secara alami logam bebentuk ktistalin artinya atom-atom disusun berurutan. Kebanyakan struktur logam berbentuk poli kristalin yaitu terdiri atas sejumlah besar kristal-kristal yang tersusun individu. Tiap butir memiliki sifat mekanik yang khas, arah susunan dan susunan tiap arah, dimana beberapa butir diorientasikan sebagai bidang-bidang yang mudah slip atau meluncur dalam arah tegangan geser maksimum. Slip terjadi pada

logam-logam liat dengan gerakan dislokasi sepanjang bidang kristalografi. Slip terjadi disebabkan oleh beban siklik monotonik.

Ketahanan *fatigue* suatu material tergantung dari perlakuan permukaan atau kondisi permukaan dan temperatur operasi. Perlakuan permukaan merubah kondisi permukaan dan tegangan sisa dipermukaan.

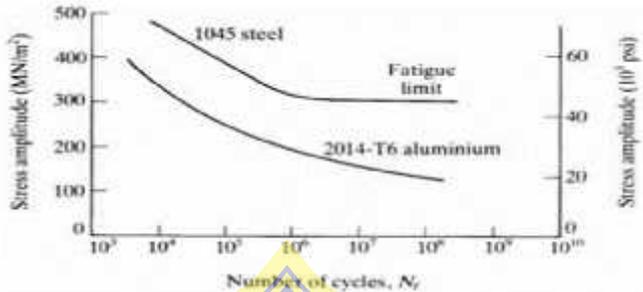
Perlakuan permukaan *shoot peening* menghasilkan tegangan sisa tekan yang mengakibatkan ketahanan lelah yang meningkat (Collins, 1981).

Sedangkan perlakuan permukaan yang menghasilkan tegangan sisa tarik menurunkan ketahanan *fatigue*-nya (Hanssem and Aly, 1994, Hotta at al, 1995). Hal itu terjadi karena pada permukaan terjadi konsentrasi tegangan tekan atau tarik yang paling tinggi. Pada kondisi permukaan sedang menerima tegangan maka tegangan sisa tekan pada permukaan akan menghasilkan resultan tegangan tekan yang semakin besar. Tegangan tekan akan menghambat terjadinya *inital crack*

atau laju perambatan retak. Sehingga ketahanan lelah meningkat, dan akan terjadi sebaliknya apabila terjadi sisa tegangan tarik dipermukaan.

Pada dasarnya kegagalan *fatigue* dimulai dengan terjadinya retakan pada permukaan benda uji. Hal ini membuktikan bahwa sifat-sifat *fatigue* sangat peka terhadap kondisi permukaan, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kekasaran permukaan, perubahan sifat-sifat permukaan dan tegangan sisa permukaan (Dieter, 1992).

Penyajian data *fatigue* rekayasa adalah menggunakan kurva S-N yaitu pemetaan tegangan (S) terhadap jumlah siklus sampai terjadi kegagalan (N). Kurva S-N ini lebih diutamakan menggunakan skala semi log seperti ditunjukkan pada gambar 2.15 Untuk beberapa bahan teknis yang penting.



Gambar 2.15. Kurva S-N.

Kurva tersebut didapat dari pemetaan tegangan terhadap jumlah siklus samapai terjadi kegagalan benda uji. Pada kurva ini siklus menggunakan skala logaritma. Batas ketahanan *fatigue* (*endurance limit*) baja ditentukan pada jumlah siklus $N > 10^7$ (Dieter, 1992).

Persamaan umum kurva S-N dinyatakan oleh persamaan (Dowling, 1991).

$$S = B + C \ln(N_f) \quad (2.23)$$

Dengan:

B dan C adalah konstanta empiris material.

Pengujian *fatigue* dilakukan dengan cara melakukan *stress level* tertentu sehingga spesimen

patah pada siklus tertentu. Dieter (1992) menyatakan untuk mendapatkan kurva S-N dibutuhkan 8 sampai 12 spesimen.

Retak *fatigue* biasanya dimulai pada permukaan dimana lentur dan torsi menyebabkan terjadinya tegangan-tegangan yang tinggi atau ditempat-tempat yang tidak rata menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan. Oleh karena itu, batas ketahanan (*endurance limit*) sangat tergantung pada kualitas penyelesaian permukaan (Van Vlack, 2005).

Pengujian *fatigue* dilakukan dengan *Rotary Bending Machine*. Jika benda uji diputar dan diberi beban, maka akan terjadi momen lentur pada benda uji. Momen lentur ini menyebabkan terjadinya beban lentur pada permukaan benda uji dan besarnya dihitung dengan persamaan (*international for use of ONO'S,-*).

$$\sigma = \frac{WL/2}{\pi/3d^3} k/c^2$$

.....(2.24)

Dengan:

σ = Tegangan lentur (kg/cm^2)

W = Beban lentur (kg)

d = Diameter benda uji (cm)

2.8 Faktor – Faktor Yang Mempengaruhi Kekuatan Lelah

Faktor-faktor yang mempengaruhi atau cenderung mengubah kondisi kelelahan atau kekuatan lelah yaitu tipe pembebanan, putaran, kelembaban lingkungan (korosi), konsentrasi tegangan, suhu, kelelahan bahan, komposisi kimia bahan, tegangan-tegangan sisa dan tegangan kombinasi. Faktor-faktor yang cenderung mengubah kekuatan lelah pada pengujian ini adalah kelembaban lingkungan (korosi) dan tipe pembebanan, sedangkan putaran, suhu, komposisi kimia dan tegangan sisa sebagai variabel yang konstan selama pengujian sehingga tidak ada pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan lelah.

a. Faktor kelembaban lingkungan

Faktor kelembaban lingkungan sangat mempengaruhi kekuatan lelah sebagaimana yang telah diteliti (Haftirman, 1995) bahwa pada kelembaban relatif 70% sampai 80%. Lingkungan kelembaban tinggi membentuk pit korosi dan retak pada permukaan spesimen yang menyebabkan kegagalan lebih cepat terjadi.

b. Tipe pembebanan

Tipe pembebanan ini sangat mempengaruhi kekuatan lelah sebagaimana yang telah diteliti oleh (Ogawa, 1989) bahwa baja S45S yang diberikan tipe pembebanan lentur putar dan pembebanan aksial mempunyai kekuatan lelah yang sangat berbeda, baja S45S dengan pembebanan aksial mempunyai kekuatan lelah lebih rendah dari baja yang menerima pembebanan lentur putar.

c. Faktor putaran

Sebagaimana yang telah diteliti oleh (Iwamoto, 1989) dengan hasil bahwa putaran antara 750 rpm sampai 1500 rpm mempunyai kekuatan lelah yang hampir sama tetapi apabila putaran 50 rpm menurunkan kekuatan lelah jauh lebih besar dari putaran 750 rpm dan 1500 rpm, ehingga putaran yang berada diantar 750 rpm sampai 1500 rpm tidak mempengaruhi kekuatan lelah yang signifikan.

d. Faktor suhu

Faktor suhu sangat mempengaruhi kekuatan lelah karena suhu menaikkan konduktifitas elektrolit lingkungan sehingga dapat mempercepat proses oksidasi. Untuk mengkondisikan pengujian standar terhadap suhu, pengujian dilakukan pada temperatur kamar. Menurut (Haftirman, 1995) bahwa pada pengujian disuhu 40 retakan pada spesimen memanjang daripada pengujian disuhu 20 dengan retakan yang halus, karena suhu yang tinggi menyebabkan molekul air yang

terbentuk mengecil dipermukaan baja sehingga mempercepat terjadinya reaksi oksidasi dan membuat jumlah pit korosi jauh lebih banyak, akibatnya pit korosi cepat bergabung membentuk retakan yang memanjang. (Dieter, 1986) mengemukakan secara umum kekuatan lelah baja akan turun dengan bertambahnya suhu diatas suhu kamar kecuali baja lunak dan kekuatan lelah akan bertambah besar apabila suhu turun.

e. Faktor tegangan sisa

Faktor tegangan sisa yang mungkin timbul pada saat pembuatan spesimen direduksi dengan cara melakukan pemakanan pahat sehalus mungkin terhadap spesimen sehingga pemakanan pahat tidak menimbulkan tegangan sisa maupun tegangan lentur pada spesimen.

f. Faktor komposisi kimia

Pengaruh faktor komposisi kimia terhadap kekuatan lelah diharapkan sama untuk seluruh spesimen uji dengan pemilihan bahan yang diproduksi dalam satu kali proses pembuatan,

sehingga didapat kondisi pengujian yang standar untuk seluruh spesimen uji.

Fatigue life dapat ditingkatkan dengan:

1. Mengontrol tegangan
 - a. Peningkatan tegangan menurunkan umur *fatigue*.
 - b. Pemicunya dapat secara mekanis (*fillet* atau alur pasak) maupun metalurgi (porositas atau inklusi).
 - c. Kegagalan *fatigue* selalu dimulai pada peningkatan tegangan.
2. Mengontrol struktur mikro
 - a. Meningkatnya ukuran benda uji, umur *fatigue* kadang-kadang menurun.
 - b. Kegagalan *fatigue* biasanya dimulai pada permukaan.
 - c. Penambahan luas permukaan dari benda uji besar meningkatkan, Kemungkinan dimana terdapat suatu aliran, yang akan memulai kegagalan dan menurunkan waktu untuk memulai retak.

3. Mengontrol penyelesaian permukaan
 - a. Dalam banyak pengujian dan aplikasi pemakaian, tegangan maksimum terjadi pada permukaan.
 - b. Umur *fatigue* sensitif terhadap kondisi permukaan.
 - c. Faktor lain yang harus dipertimbangkan adalah tegangan sisa permukaan (<http://luvlyly4.wordpress.com>, 2009).

Sejak tahun 1830 telah diketahui bahwa logam yang dikenai tegangan berulang akan rusak pada tegangan yang jauh lebih rendah dibanding yang dibutuhkan untuk menimbulkan perpatahan pada beban tunggal. Kegagalan yang terjadi pada beban dinamik dinamakan kegagalan lelah (*fatigue failure*). Karena pada umumnya kegagalan tersebut hanya terjadi setelah periode pemakaian yang cukup lama.

Kegagalan *fatigue* semakin menonjol sejalan dengan pengembangan teknologi seperti: pesawat, mobil, kompresor, pompa, dan lain-lainnya.

Kesemuanya mengalami beban berulang dan getaran. Hingga kini sering dinyatakan bahwa kelelahan meliputi paling tidak 90% dari seluruh kegagalan yang disebabkan oleh hal-hal yang bersifat mekanis.

Terdapat tiga faktor dasar yang diperlukan agar terjadi kegagalan lelah. Ketiga faktor faktor tersebut adalah:

1. Tegangan tarik maksimum yang cukup tinggi.
2. Variasi atau fluktuasi tegangan yang cukup besar.
3. Siklus penerapan tegangan yang cukup besar.

Selain tiga faktor diatas terdapat sejumlah variabel lain, yakni; konsentrasi tegangan, korosi, suhu, kelebihan bahan, struktur metalurgis, tegangan sisa dan tegangan kombinasi yang cenderung untuk mengubah kondisi kelelahan.

(<http://aguskreatif.blogspot.com>, 2009).

2.9 Perangkat Lunak Analisis Elemen Hingga

Elemen hingga adalah idealisasi matematika terhadap suatu sistem dengan membagi objek menjadi elemen-elemen diskrit yang kecil dengan bentuk yang simpel. Metode elemen hingga adalah teknik yang sangat dominan pada *structural mechanics*. Ada banyak perangkat lunak analisis elemen hingga yang digunakan di industri saat ini dari beraneka disiplin ilmu teknik termasuk *mechanical engineering*. Dan solusi yang tepat untuk masalah-masalah itu adalah “CAD / CAE”. CAD (*Computer Aided Design*) atau merancang berbantuan komputer adalah proses perancangan model yang cepat dan akurat, sedangkan CAE (*Computer Aided Engineering*) atau rancang bangun berbantuan komputer adalah proses analisis dan simulasi tegangan yang mudah dan efektif.

2.9.1 *Ansys*

ANSYS adalah suatu perangkat lunak komputer umum yang mampu menyelesaikan persoalan-persoalan elemen hingga dari permodelan hingga analisis. *ANSYS* digunakan

untuk mensimulasikan semua disiplin ilmu fisika baik statis maupun dinamis. Analisis struktural (kedua-duanya linier dan *nonlinier*), perpindahan panas, dinamika fluida, dan elektromagnetik untuk para engineer.

ANSYS dapat mengimpor data CAD dan juga memungkinkan untuk membangun geometri dengan kemampuan yang “*preprocessing*”. Demikian pula dalam *preprocessor* yang sama, elemen hingga model (jaring alias) yang diperlukan untuk perhitungan untuk menentukan hasil. Setelah mendefinisikan beban dan melakukan analisis, hasil dapat dilihat sebagai numerik dan grafis.

2.9.2 Cara kerja *Ansys*

ANSYS bekerja dengan sistem elemen hingga, dimana penyelesaiannya pada suatu objek dilakukan dengan pendeskritisasi dimana membagi atau memecah objek analitis satu rangkaian kesatuan kedalam jumlah terbatas elemen hingga yaitu menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dan dihubungkan dengan node.

Hasil yang diperoleh dari *ANSYS* ini berupa pendekatan dengan menggunakan analisa numerik. Ketelitiannya bergantung pada cara memecah model tersebut dan menggabungkannya.

Secara umum, suatu solusi elemen hingga dapat dipecahkan dengan mengikuti 3 tahap ini. Ini merupakan panduan umum yang dapat digunakan untuk menghitung analisis elemen hingga.

Ada 3 langkah utama dalam analisis Anasys yaitu:

1. *Model generation*:
 - a. Penyederhanaan, idealisasi.
 - b. Menentukan bahan / sifat material.
 - c. Menghasilakn model elemen hingga.
2. Solusi:
 - a. Menentukan kondisi batas.
 - b. Menjalankan analisisnya untuk mendapatkan solusi.

Hasil ulasan:

- a. Plot / daftar hasil.
- b. Periksa validitas [12].

2.9.3 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (MEH) atau populer juga dengan nama *Finite Elemen Method* (FEM) adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi persamaan diferensial, baik persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) maupun persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equation*). Pada awalnya MEH dikembangkan untuk memecahkan problem dibidang mekanika benda padat (*solid mechanic*), tetapi kini MEH sudah merambah hampir kesemua problem *engineering* seperti mekanika fluida (*fluid mechanic*), perpindahan panas (*heat transfer*), elektromagnetik (*electromagnetism*), getaran (*vibration*), analisis model (*model analysys*), dan banyak lagi problem *engineering* lainnya.

Variabel dasar atau variabel medan yang tidak diketahui yang ditentukan dalam masalah teknik adalah pergeseran dalam mekanik solid, kecepatan dalam mekanika fluida, potensial listrik dan magnet dalam teknik listrik dan suhu dalam aliran

panas. Secara kontinu variabel yang tidak diketahui ini tidak terbatas.

Prosedur elemen hingga mengurangi variabel yang tidak diketahui menjadi sejumlah berhingga dengan membagi daerah penyelesaian menjadi bagian kecil yang disebut elemen dan dinyatakan sebagai variabel medan yang tidak diketahui dalam istilah sebagai fungsi pendekatan (*approximation function / interpolation function / shape function*) dalam setiap elemen. Fungsi pendekatan didefinisikan sebagai medan variabel dari titik tertentu yang disebut node atau titik node.

Variabel medan dapat ditentukan pada beberapa titik menggunakan fungsi interpolasi. Setelah memilih elemen dan variabel titik yang tidak diketahui selanjutnya menyusun sifat material (*properties*) elemen untuk setiap elemen. Contohnya pada mekanika solid pada pergeseran gaya kita menemukan adanya karakteristik kekakuan (*stiffness characteristic*) masing-masing elemen. Secara matematika hubungan ini dapat dibentuk sebagai berikut:

$$[k]e\{\delta\}e = \{F\}.....(2.25)$$

Dimana $[k]e$ adalah matrik kekakuan, $\{\delta\}e$ vektor pergeseran node dari elemen dan $\{F\}e$ adalah vektor gaya node.

Dengan demikian langkah-langkah dalam analisis elemen hingga adalah:

- a. Memilih variabel medan yang cocok dan elemen yang digunakan.
- b. Diskritisasi kontinu.
- c. Memilih fungsi interpolasi.
- d. Menentukan sifat material elemen (*elemen properties*) di *find element properties*.
- e. Menyusun sifat material elemen untuk memperoleh sifat material secara global.
- f. Menentukan kondisi batas (*impose the boundary conditions*).
- g. Memecahkan persamaan sistem untuk memperoleh node yang tidak diketahui.
- h. Membuat perhitungan tambahan untuk memperoleh nilai yang diinginkan.

CATIA yang merupakan *software* terpadu untuk desain dan analisa struktur dengan menerapkan metode elemen hingga. Peneliti dengan program ini hanya membuat model tiga dimensinya dan analisa dapat dilakukan dengan hasil yang langsung dapat diketahui. Pemodelan meliputi diskritisasi benda kerja, pemilihan dan penerapan elemen, pendefinisian tumpuan, serta beban yang bekerja.

Software CATIA menyediakan solusi terpadu untuk menyederhanakan dan memudahkan proses desain dan analisa sebuah struktur. Solusi terpadu tersebut bahwa semua proses dikerjakan oleh satu mesin dan satu *software*, sehingga transfer data dari satu desain / *software* ke mesin / *software* yang tidak diperlukan. Dengan proses tersebut, hilangnya data atau informasi dapat dihindari dan waktu untuk proses analisa jauh lebih singkat. Paket untuk desain dan analisa yang ditawarkan yang diberikan oleh *CATIA* adalah sebagai berikut:

- a. *CATIA* untuk desain (gambar geometri).

- b. *CATIA* untuk pembuatan model elemen hingga.
- a. *CATIA* untuk perhitungan berbasis metode elemen hingga.
- b. *CATIA* untuk menampilkan hasil dan analisa dari detail perhitungan.

Dimulai dengan desain, dimana desain dapat menggunakan model dua dimensi ataupun tiga dimensi. *CATIA FEM* (Finite Elemen Modeler) akan membuat model analisa dari desain yang telah jadi. Model ini dibuat berdasarkan metode elemen hingga. Adapun metode diskritisasi yang ditawarkan antara lain: metode *4-EDGE-ADVANCE*, metode *FRONTAL*, dan metode *OCTREE*. Diantar tiga metode tersebut, metode *OCTREE* adalah metode yang paling mudah digunakan, dan metode inilah yang akan digunakan pada penelitian ini.

Perhitungan dapat dilakukan setelah model selesai dibuat. Perhitungan yang ditawarkan dalam *CATIA* ini adalah: *static linier*, *dynamic*, *termal* dan

bukling. Pada penelitian ini hanya dilakukan menggunakan perhitungan statis.

CATIA V5 merupakan desain grafis tiga dimensi yang dibuat oleh *Dassault System* yang mampu membuat gambar dan analisis dalam bidang teknik. Penulis dalam merancang benda kerja menggunakan program *CATIA* dengan mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut:

- a. Program *CATIA V5* mempunyai aplikasi yang lengkap yang dapat digunakan dalam bidang pendidikan dan bidang industri yang meliputi *mechanical design, analysys, simulation* dan aplikasi lainnya.
- b. Cara pembuatan atau pemodelan benda kerja dengan program *CATIA V5* relatif mudah dibandingkan menggunakan program sejenis serta mempunyai tingkat akurasi yang tinggi.
- c. *Design part* (desain komponen) dengan *CATIA V5* akan menghasilkan gambar yang sesuai dengan hasil produk yang

sesungguhnya. Sehingga produk yang didesain dapat dilihat secara nyata dalam tampilan tiga dimensi, sehingga kita bisa mengetahui secara detail bagian dari produk tersebut.

- d. *CATIA V5* juga dapat melakukan analisa statis dari produk yang telah didesain, sehingga dapat dilihat bagian dari produk yang kurang aman sehingga akan mempermudah mendesain produk sampai didapat produk sesuai yang diinginkan sebelum proses produksi dilakukan.

2.9.4 Dasar Pemodelan *Catia*

Model dalam aplikasi teknik terdiri dari geometri, topologi dan informasi tambahan. Geometri termasuk didalamnya titik, garis, lingkaran, *planes*, silinder dan *surface*. Hal ini mendefinisikan karakteristik bentuk dasarnya. Topologi mewakili hubungan dari geometri dan obyek. CAD merupakan alat untuk yang digunakan untuk memperlihatkan model-model teknik dan

juag digunakan untuk merubah model yang sudah ada.

Sebuah komponen harus dapat dimodelkan sebelum benda tersebut digambarkan. Sistem gambar tradisional, komponen dapat dimodelkan menggunakan geometri dua dimensi yang sederhana. Sebuah gambar selalu terdiri dari sebuah garis, lingkaran dan kurva. Titik digunakan untuk membantu pengalokasian dari sebuah geometri. Sebagai contoh sebuah garis dapat didefinisikan dengan koordinat dari dua titik akhir.

Pemodelan komponen dalam dua dimensi tidak dapat memenuhi kebutuhan aplikasi bidang teknik. Bentuk gambar yang perspektif tidak dapat langsung ditayangkan dari gambar dua dimensi. Bentuk gambar dua dimensi jika ditampilkan dalam layar selalu tampak datar. Untuk menampilkan gambar yang lebih mudah dipahami dibutuhkan sebuah sumbu lagi pada sumbu Z.

Penambahan ini mengantarkan gambar menuju tiga dimensi.

1. Jenis-jenis Model

Sebuah objek fisik dapat ditampilkan sebagai model fisik, model datar dua dimensi (pada kertas) atau model komputer / representasi digital.

a. Model Fisik

Model fisik telah lama digunakan untuk mempresentasikan suatu objek nyata. Suatu model fisik seperti maket bangunan atau model mobil (terbuat dari lilin atau dari tanah liat) yang berukuran seukurannya adalah model tiga dimensi sejati. Model-model ini dapat menjadi alat yang sangat efektif untuk mengkomunikasikan informasi tertentu mengenai objek tersebut, misalnya keseluruhan bentuk dan hubungan antar komponen. Namun jika model fisik kita gunakan, maka banyak aspek-aspek praktis yang tetap tinggal sebagai imajinasi. Selain itu model fisik sulit dan

membutuhkan waktu lama dalam membuat dan merevisinya.

b. Model Datar

Untuk beberapa dekade terakhir, industri-industri telah menggunakan gambar teknik dua dimensi dengan produktifitas dan keterampilan yang tinggi. Sebagai contoh Boeing 747, desain pesawat ini membutuhkan 75000 gambar yang sebagian besar dibuat tanpa bantuan komputer (www.efunda.com). Proses ini dimulai dengan konsep tiga dimensi tentang suatu objek dalam pikiran perancang. Proses ini diakhiri dengan pembuatan objek nyata tiga dimensi dipabrik. Tetapi diantara kedua proses tersebut, objek tersebut dipresetasikan dalam dua bentuk (dua dimensi dan tiga dimensi), banyak waktu dan tenaga yang terbuang untuk itu.

c. Model Digital

Model digital adalah model matematis dari suatu objek nyata. Komputer memanipulasi angka-angka yang menampilkan citra grafis dan informasi yang terdapat didalam angka-angka tersebut. Model digital bisa berbentuk dua dimensi ataupun tiga dimensi. Model digital dua dimensi hanya menampilkan pandangan dua dimensi dari suatu objek. Sedangkan model tiga dimensi terdiri dari tiga jenis dasar yaitu; *wireframe*, *surface* dan *solid*. Semua jenis model tiga dimensi terdiri elemen-elemen pada ruang tiga dimensi (x, y, z) yang mempunyai perbedaaan yang jelas.

1. Model *Wireframe*, mempresentasikan objek dengan cara pendefinisian sisi-sisinya. Sisi objek ini dapat berupa garis, lingkaran, busur, dan *polyline*. Karena sisi-sisi dapat menampilkan permukaan (*surfeace*) dan dapat

memberi citra deskripsi yang berguna bagi suatu objek.

2. Model *Surface*, model jenis ini menampilkan objek dengan cara pendefinisian permukaan-permukaan, termasuk sisi-sisi dari masing-masing dari permukaan tersebut. Sisi-sisi tersebut dapat ditampilkan dalam model *wireframe*, yaitu dengan menampakkan sisi permukaan terdepan yang menutupi permukaan dan sisi-sisi dibelakangnya. Permukaan pada model *surface* dapat mengisi atau memberikan warna (*rendering*) sehingga objeknya lebih mudah dilihat. Namun model *surface* hanyalah sebuah model kosong (hanya mempresentasikan sisi luar dari objek). Dan karena *surface* tidak memiliki ketebalan, maka model ini tidak memiliki sifat-sifat benda bermassa atau informasi tentang momen inersia. Model Solid, model ini

mendefinisikan objek sebagai keseluruhan volume yang ditempati oleh objek termasuk seluruh permukaan dan sisi-sisinya. Hal ini membuat model solid memiliki kelebihan dibandingkan model *wireframe* dan model *surface*. Selain memiliki fungsi yang sama dengan kedua model terdahulu, model solid memiliki tambahan data tentang “bagian dalam” dari objek. Selain memberikan informasi yang komprehensif, model solid juga relatif mudah dibentuk. Model solid dapat ditampilkan baik berupa model *wireframe* atau model *surface*. Tetapi kedua tampilan tersebut sama-sama mengandung seluruh informasi yang diperlukan untuk menghitung luas permukaan, volume dan titik berat. Dan karena itu model solid dapat diberi sifat-sifat material, maka dapat dilakukan analisis terhadap berat,

momen inersia konduktifitas termal, tegangan dan sebagainya. Jadi model solid adalah model yang terlengkap diantara model-model digital yang ada.

d. Model Pembentukan Model Solid

Pada dasarnya terdapat dua metode pembentukan model solid, yaitu metode *Constructive Solid Geometri* (CSG) dan metode *Boundary Representation* (B-Rep). Metode CSG menggunakan prinsip solid (balok, bola, kerucut, silinder dan lain-lain) dan operasi *Boolean* (penggabungan / *union*, pengurangan / *difference*, dan irisan / *intersection*) untuk membentuk model solid. Sedangkan model B-Rep menggunakan satu atau lebih profil *wireframe* untuk membentuk model solid dengan cara *extrude*, *sweep*, *revolve* atau membuat *skin* dari profil-profil tersebut. Operasi *boolean* dapat dilakukan pada profil *wireframe* maupun model solid yang

dihasilkan. Cara lain membentuk model solid adalah dengan menggabungkan beberapa *surface* yang biasanya membentuk yang komplek.

1. Metode Pembentukan Model Tiga Dimensi Solid Dari Dua Dimensi

Metode yang paling umum untuk membentuk tiga dimensi solid dari gambar dua dimensi adalah dengan cara meng-*extrude* suatu profil yang terletak pada sebuah bidang datar dua dimensi. Dengan demikian maka gambar dua dimensi yang semula terletak apada bidang datar tersebut sekarang mempunyai tebal dan menjadi model tiga dimensi solid. Gambar dua dimensi yang ada dibentuk menjadi model solid, bisa berasal dari *file* yang telah dibuat oleh CAD (*softcopy*). Tidak ada perbedaan dalam proses pembentukan dari model solid dari kedua sumber tadi.

Sampai saat ini beberapa CAD berbasis komputer dapat membentuk model tiga dimensi solid dari bentuk geometri, kemudian diberi ketebalan secara manual. Sedangkan beberapa fitur lain yang ada pada model tersebut seperti; lubang, irisan dan lain sebagainya ditambahkan kemudian pada model dasar solid tadi dengan operasi *boolean* atau operasi *feature*.

2. Pemodelan Rakitan

Proses *assembly* merupakan proses penggabungan dari beberapa *part design* yang dijadikan satu kesatuan sesuai bentuk yang dikehendaki sehingga menjadi bentuk baru dan fungsi baru. Proses *assembly* biasanya diawali langkah-langkah sebagai berikut;

- Posisi *part* harus diluruskan dan di*offset*kan pada suatu sistem koordinat.

- Menempatkan permukaan dari dua *part* yang berhimpit dalam sebuah *assembly*.
- Pelurusan garis sumbu tiap *part* yang akan di*assembly*.

Dalam suatu *assembly* dapat ditampilkan dalam sebuah *window* dan secara bersamaan masing-masing *part*-nya.



