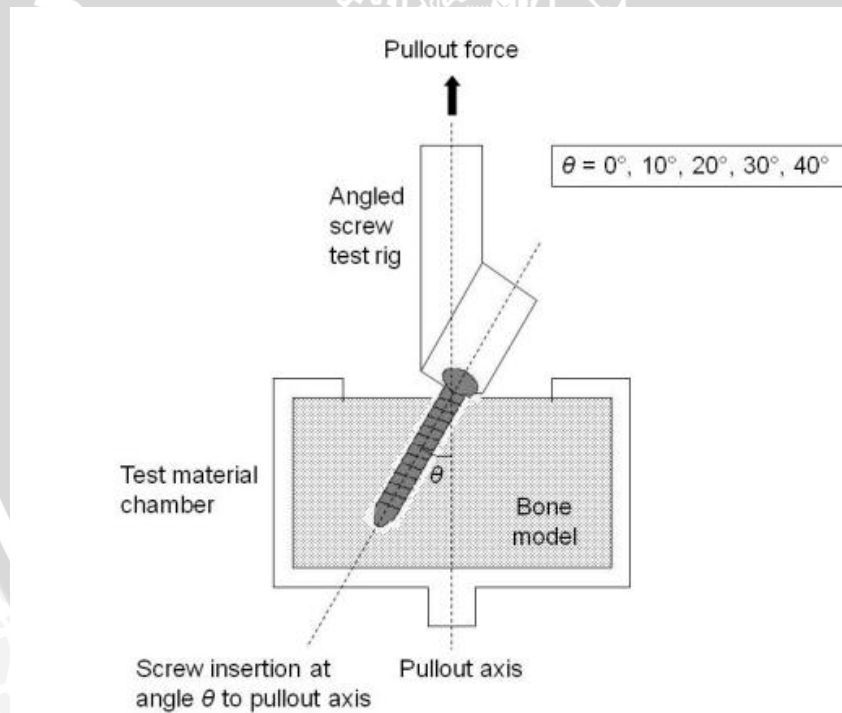


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian pendahuluan telah dilakukan (Patel, 2010) dengan memasang sebuah *bone screw* dengan sudut tertentu pada *foam* dengan *material properties* yang sama dengan tulang dan dikenai beban sampai mengalami *pull out*. Gambar 2.1 memperlihatkan pemasangan sebuah *bone screw* dengan sudut tertentu pada *foam*. Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa pada tulang yang normal, pemasangan *screw* dengan sudut 0° dan 10° menghasilkan *pull out strength* yang lebih besar daripada yang dipasang dengan sudut pemasangan 20° , 30° dan 40° . Pada sudut pemasangan 10° memiliki nilai yang paling tinggi.



Gambar 2.1 Instalasi penelitian mengenai pengaruh sudut pemasangan *bone screw*

Sumber : Patel, 2010,112

Pada penelitian lain, (Patacxi, 2011) perbedaan sudut pemasangan *bone screw* menghasilkan *pull out* yang berbeda pada *density* tulang yang berbeda. Pada *density* tulang 0.08 g/cm^3 dan 0.16 g/cm^3 *pull out load* paling besar pada variasi sudut pemasangan 12° . Pada *density* 0.24 g/cm^3 *pull out load* paling besar pada variasi sudut pemasangan 0° .

2.2 Analisa Tegangan dan Regangan

2.2.1 Tegangan (Stress)

Tegangan adalah suatu ukuran intensitas pembebanan yang dinyatakan oleh gaya dan dibagi oleh luas di tempat gaya tersebut bekerja (Iremonger, 1990). Secara matematis dirumuskan sebagai berikut :

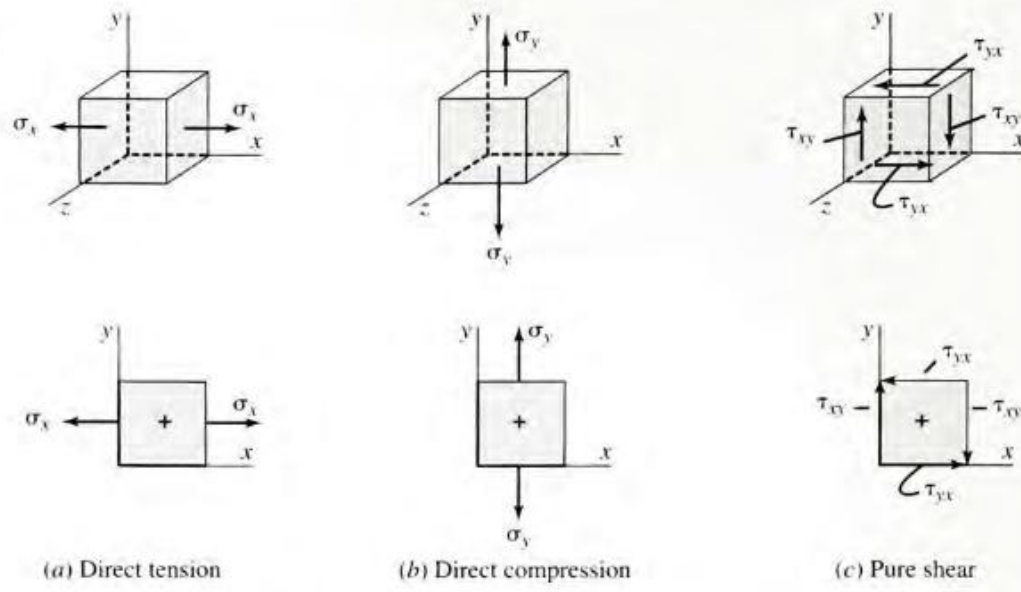
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Keterangan : σ = besarnya tegangan (Pa)

P = besarnya gaya yang bekerja (N)

A = luas penampang (m^2)

Secara umum tegangan dapat dibagi menjadi tiga, yaitu tegangan tarik (*tensile stress*), tegangan tekan (*compression stress*), dan tegangan geser (*shear stress*). Macam- macam tegangan dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Macam - macam tegangan
 Sumber : Mott, 2009

2.2.2 Regangan (Strain)

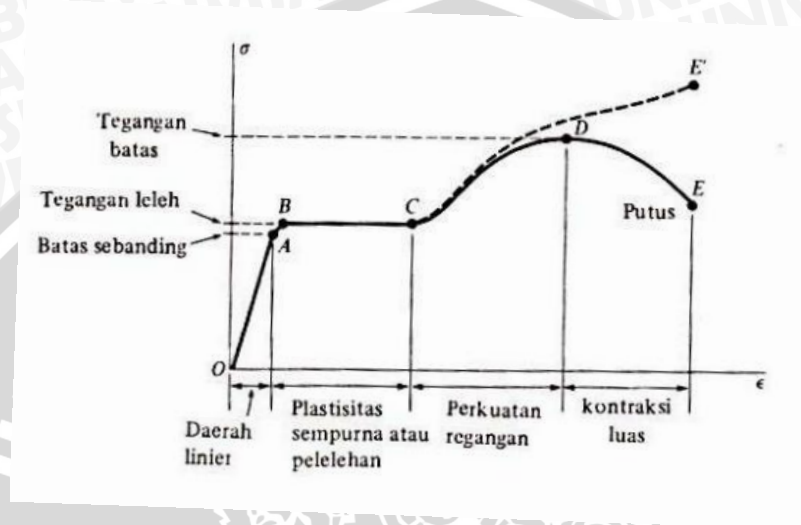
Regangan merupakan pertambahan panjang atau pemuain apabila suatu batang diberi gaya dari luar (Joseph E. Shigley, 1986). Regangan terjadi karena adanya gaya dari luar baik berupa gaya tarik ataupun gaya tekan. Regangan yang ditimbulkan dari gaya tarik disebut *tensile strain* sedangkan regangan yang ditimbulkan oleh gaya tekan disebut *compressive strain*. Karena regangan adalah perbandingan antara dua ukuran panjang, maka regangan tidak memiliki dimensi (*dimension less quantity*). Regangan karena gaya tarik dapat ditulis dalam persamaan berikut :

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \tag{2.2}$$

- Keterangan :
- ε = besarnya regangan
 - δ = pertambahan panjang (m)
 - l = panjang awal (m)

2.2.3 Hubungan Tegangan dengan Regangan

Hubungan tegangan dan regangan dapat dinyatakan dalam diagram tegangan regangan. Gambar 2.3 menunjukkan diagram tegangan regangan baja karbon rendah.



Gambar 2.3 Diagram tegangan regangan baja karbon rendah
Sumber : Gere, 1996 : 13

Diagram tersebut dapat menjelaskan beberapa titik penting, diantaranya adalah :

Titik A adalah *proporsional limit point*, yaitu titik batas antara tegangan dan regangan masih dalam keadaan proporsional atau linier. Pada daerah ini berlaku Hukum Hooke yang menyatakan pertambahan tegangan sebanding dengan pertambahan regangan. Daerah ini dinamakan daerah elastis, yaitu daerah dimana suatu struktur jika diberikan gaya dari luar kemudian gaya tersebut dihilangkan maka struktur akan kembali ke bentuk semula.

Titik B adalah *yield point*, yaitu titik yang menyatakan batas antara daerah elastis dan plastis. Material akan menjadi plastis sempurna ketika sudah mencapai titik C. Apabila dilakukan pemberian gaya secara terus-menerus dari luar maka material akan mengalami *strain hardening* sampai pada titik *ultimate*, yaitu titik D.

Titik D adalah *ultimate point*, yaitu titik yang menunjukkan tegangan suatu bahan mencapai tegangan tertingginya. Jika tegangan terus ditambah maka bahan akan putus sampai titik patahnya (titik E). Garis putus-putus merupakan diagram tegangan regangan sejati yang menggunakan luas sebenarnya.

Pada daerah plastis, Hukum Hooke sudah tidak berlaku lagi. Persamaan yang digunakan untuk mencari tegangan pada daerah plastis adalah sebagai berikut:

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (2.3)$$

Keterangan : σ adalah tegangan

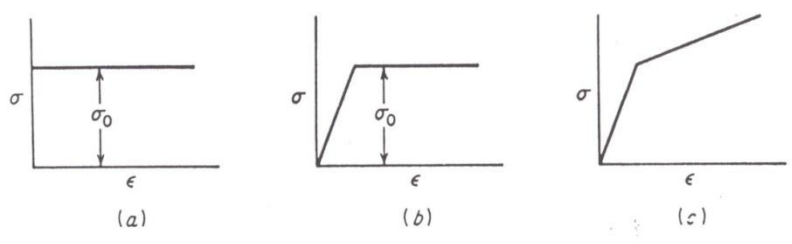
K adalah konstanta penguatan

ϵ adalah regangan

n adalah eksponensial *strain hardening*

Dalam analisa untuk mendapatkan penyelesaian masalah deformasi, maka perlu untuk mengidealisasikan hubungan tegangan-regangan yang terjadi. Pada umumnya ada tiga permodelan pengidealiasian dari sudut pandang terjadinya deformasi pada material, yang pertama adalah *rigid perfectly plastic*, pada pemodelan ini material tidak mengalami deformasi elastis terlebih dahulu, namun langsung mengalami deformasi plastis pada saat diberi pembebanan sampai batas tertentu. Deformasi akan terus terjadi jika pembebanan terus dilakukan walaupun besar pembebanan tidak ditambahkan. Pada kurva diagram tegangan-regangan permodelan material ini dapat dilihat pada gambar 2.4 (a) Untuk material logam sendiri biasanya tergolong material yang *elasto-plastic*, yang mana pada material terjadi dua macam deformasi yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Pada material jenis ini permodelan yang digunakan adalah jenis (b) dan (c), yaitu *elastis perfectly plastic* dan *elastis linier strain hardening*. Pada permodelan ini material akan mengalami deformasi elastis terlebih dahulu selama diberi pembebanan sampai batas tertentu, kemudian akan mengalami deformasi plastis. Untuk *elastis perfectly plastic*, deformasi plastis yang terjadi tidak diikuti penguatan tegangan sedangkan *elastis linier strain hardening*, deformasi plastis

yang terjadi akan diikuti dengan penguatan tegangan. Berikut adalah gambar kurva tegangan-regangan berbagai macam permodelan material:



Gambar 2.4 Pemodelan material pada diagram tegangan regangan
 Sumber : Dieter, 1988 : 72

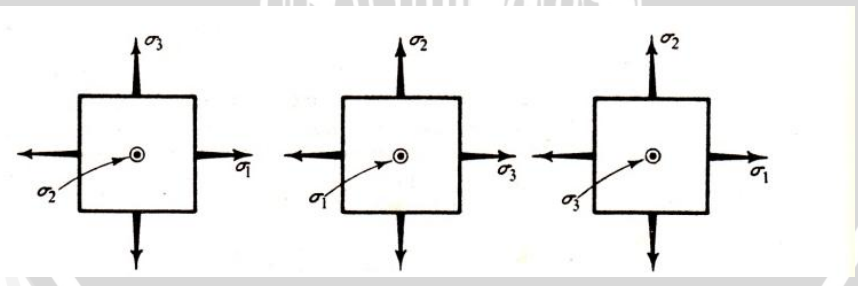
2.3 Teori Kegagalan

2.3.1 Teori Tegangan Normal Maksimum

Teori tegangan normal maksimum menyatakan bahwa kegagalan terjadi bila tagangan utama terbesar sama dengan kekuatan bahan. Gambar 2.5 memperlihatkan arah ketiga tegangan utama. Bila ketiga tegangan utama disusun ke dalam bentuk :

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

- keterangan :
- σ_1 adalah tegangan utama 1
 - σ_2 adalah tegangan utama 2
 - σ_3 adalah tegangan utama 3



Gambar 2.5 Arah tegangan utama pada kondisi tiga dimensi
 Sumber : Popov, 1982 : 254

kemudian, kriteria kegagalan adalah kekuatan *yield*, teori ini meramalkan bahwa kegagalan akan terjadi bila tegangan utama sama dengan kekuatan *yield* bahan.

$$\sigma_1 = S_{yt} \text{ atau } \sigma_3 = -S_{yc}$$

keterangan : S_{yt} adalah kekuatan *yield* tarik bahan

S_{yc} adalah kekuatan *yield* tekan bahan

Untuk bahan yang rapuh, yang digunakan adalah kekuatan *ultimate* sehingga kegagalan terjadi bila tegangan utama sama dengan kekuatan *ultimate* bahan.

$$\sigma_1 = S_{ut} \text{ atau } \sigma_3 = -S_{uc}$$

keterangan : S_{ut} adalah kekuatan *ultimate* tarik bahan

S_{uc} adalah kekuatan *ultimate* tekan bahan

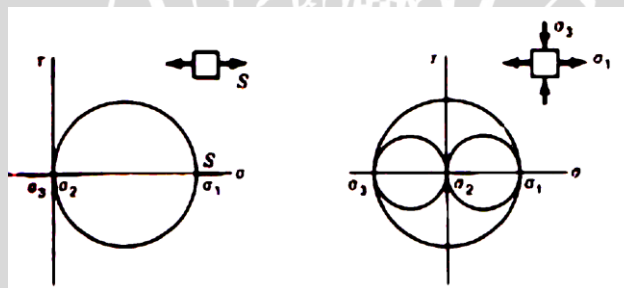
Untuk kasus puntiran murni, dimana $\sigma_1 = \tau = -\sigma_3$ dan $\sigma_2 = 0$, kegagalan akibat torsi atau puntiran akan terjadi bila tegangan geser sama dengan kekuatan *yield* bahan.

$$\tau = S_y$$

keterangan : τ adalah tegangan geser

S_y adalah kekuatan *yield* bahan

Gambar 2.5 memperlihatkan lingkaran Mohr untuk tarikan sederhana dan puntiran murni.



Gambar 2.6 Lingkaran mohr untuk tarikan sederhana dan puntiran murni

Sumber : Shigley, 1983 : 237

2.3.2 Teori Tegangan Geser Maksimum

Teori ini hanya dipakai pada material yang bersifat daktil karena hanya digunakan untuk meramalkan *yield*. Teori ini menyatakan bahwa kegagalan terjadi bila tegangan geser maksimum pada tiap elemen sama dengan tegangan geser maksimum bahan dalam percobaan tarik dari bahan yang sama bila bahan tersebut

mulai mengalami yield. Jadi teori tegangan geser maksimum meramalkan bahwa kegagalan akan terjadi bila

$$\tau_{\max} = S_y / 2 \text{ atau } \sigma_1 - \sigma_3 = S_y$$

2.3.4 Teori Tegangan von-Misses

Teori von Mises ini juga disebut teori energi geser (*shear energy theory*). Teori ini menjelaskan bahwa yield bukanlah semata-mata suatu fenomena tarikan atau tekanan sederhana, tetapi lebih tepat bahwa yield tersebut berkaitan dengan distorsi sudut (puntir) dari elemen yang diberi tegangan tersebut. Teori ini menyatakan bahwa kegagalan diprediksi terjadi pada keadaan tegangan multiaksial bilamana energi distorsi per unit volume sama atau lebih besar dari energi distorsi per unit volume pada saat terjadinya kegagalan dalam pengujian tegangan uniaksial sederhana terhadap spesimen dari material yang sama.

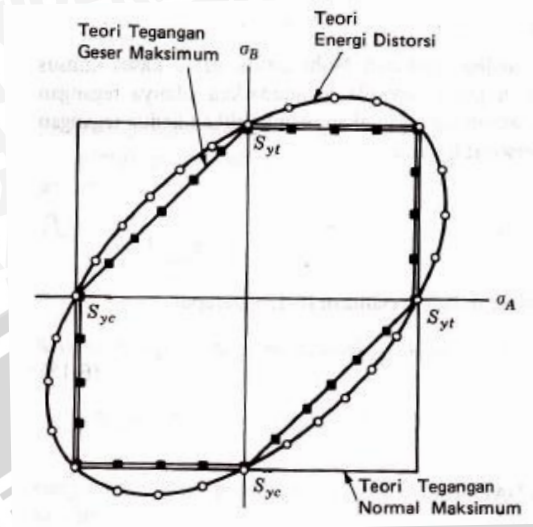
Untuk keadaan tiga dimensi,

$$S_y = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_2 - \sigma_1 \sigma_3 - \sigma_2 \sigma_3)^{1/2} \quad (2.4)$$

Sementara untuk keadaan dua dimensi, $\sigma_2 = 0$ maka

$$S_y = (\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_3)^{1/2} \quad (2.5)$$

Tegangan efektif Von Mises (σ') didefinisikan sebagai tegangan tarik uniaksial yang dapat menghasilkan energi distorsi yang sama dengan yang dihasilkan oleh kombinasi tegangan yang bekerja.



Gambar 2.7 Perbandingan ketiga teori kegagalan
Sumber : Shigley, 1983 : 242

Gambar 2.6 memperlihatkan perbandingan teori von Mises dengan teori yang lainnya. Teori tegangan geser maksimum memberikan hasil yang konservatif, karena grafiknya terdapat di dalam elips von Mises. Pada teori tegangan normal maksimum, pada kuadran 1 dan 3 grafik berada di dalam elips von Mises sementara pada kuadran 2 dan 4 berada pada luar lingkaran von Mises. Jadi sangat berbahaya bila menggunakan teori tegangan normal maksimum karena teori ini memberi ramalan aman sementara pada kenyataannya tidak. Teori von Mises memberi ramalan yang paling tepat.

2.4 Defleksi (Lenturan)

Defleksi merupakan peristiwa melengkungnya suatu batang yang ditumpu akibat adanya beban yang bekerja pada batang tersebut. Beban yang dimaksud di sini dapat berupa beban dari luar ataupun beban dari dalam karena pengaruh berat batang sendiri. Lenturan pada suatu batang dapat terjadi akibat adanya beban gaya geser atau momen lentur. Lenturan akibat beban geser umumnya sangat kecil dibandingkan dengan lenturan akibat beban momen. Lenturan akibat beban

geser biasanya hanya diperhitungkan untuk batang yang sangat pendek, sehingga proporsi terhadap lenturan yang terjadi karena beban momen menjadi cukup berarti. Dalam bahasan buku ini hanya lenturan karena beban momen saja yang diperhitungkan, karena struktur yang dibahas memakai batang relatif panjang. Besarnya lenturan akibat beban momen dapat dihitung dengan memakai salah satu dari empat metode berikut:

- a. Metode analitis (cara integrasi)
- b. Metode luas bidang momen
- c. Metode penjumlahan (superposisi)
- d. Metode energi regangan atau metode Castigliano.

Metode integrasi dilakukan dengan cara mencari persamaan diferensial momen yang terjadi sepanjang batang. Dari persamaan momen kemudian diselesaikan dengan cara integrasi dua kali, untuk mendapatkan persamaan lenturan. Dua konstanta yang timbul akibat proses integrasi dapat dihitung dari kondisi batas (*boundary conditions*), yang ada pada struktur yang bersangkutan. Hasilnya adalah sebuah persamaan fungsi besar lenturan yang terjadi terhadap panjang batang, dari titik koordinat awal yang ditentukan.

Metode luas bidang momen adalah metode semigrafis, dengan memanfaatkan sifat-sifat dari persamaan matematis lenturan. Luas bidang momen tidak dicari dengan menurunkan persamaannya, tetapi dengan cara menghitung luasan yang terjadi secara geometri. Metode ini lebih sederhana dan lebih cepat dibandingkan dengan metode integrasi terutama untuk struktur yang menerima banyak beban sepanjang batangnya.

Metode penjumlahan (superposisi) dilakukan dengan memanfaatkan besar lenturan yang telah dihitung sebelumnya (biasanya ditabelkan), pada struktur yang sederhana. Suatu struktur yang kompleks dibagi menjadi beberapa bagian berupa

struktur yang lebih sederhana, yang besar lenturannya masing-masing telah diketahui. Besar lenturan pada struktur keseluruhan adalah jumlah dari semua lenturan yang terjadi pada masing-masing bagian struktur tersebut.

Metode energi regangan biasa disebut dengan nama penemunya yaitu seorang insinyur Italia bernama Alberto Castigliano, pada tahun 1873. Teori Castigliano menyatakan bahwa lenturan yang terjadi pada suatu titik pada suatu batang adalah merupakan turunan parsial dari persamaan energi yang tersimpan didalam batang akibat beban yang bekerja, terhadap gaya yang bekerja pada titik tersebut. Apabila pada titik yang dicari lenturannya tidak ada gaya yang bekerja, maka biasanya diberikan gaya nol (*dummy load*) pada titik tersebut.

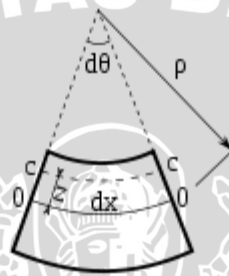
2.4.1 Teori Dasar Lenturan

Untuk dapat menurunkan persamaan matematis lenturan yang terjadi pada suatu batang struktur, diambil beberapa persyaratan dan asumsi sebagai berikut :

- a. Bahan dari batang masih dalam kondisi elastis selama pembebanan
- b. Besarnya lenturan akibat gaya geser kecil sekali dibanding dengan lenturan yang terjadi akibat beban momen (hanya untuk batang yang relatif panjang).
- c. Besarnya modulus elastisitas (E) dan momen inersia (I) konstan sepanjang batang yang ditinjau. Apabila besaran (E) atau (I) tidak konstan, fungsi matematis kedua besaran tersebut terhadap panjang batang harus diketahui.
- d. Struktur bahan sepanjang batang dianggap homogen, sehingga deformasi yang terjadi akibat beban selalu kontinyu. Dengan demikian bentuk lenturan yang terjadi berupa suatu kurva yang kontinyu dan terdapat bidang netral ditengah-tengah batang pada waktu terjadi lenturan.
- e. Besarnya lenturan yang terjadi kecil sekali dibanding panjang batang, sehingga kwadrat dari besaran sudut lenturannya dapat diabaikan.

2.4.2 Lenturan Karena Momen Tidak Konstan

Apabila besar beban momen yang bekerja suatu batang merupakan fungsi matematis dari panjang batang, maka jari-jari lenturan yang terjadi juga merupakan fungsi panjang batang. Jari-jari lenturan disini adalah jari-jari dari segmen-segmen kecil panjang batang, yang lenturannya dapat dianggap berbentuk segmen lingkaran. Karena besar lenturan yang terjadi tergantung kepada jari-jari lenturannya, maka besar lenturan yang terjadi juga merupakan fungsi dari panjang batang.



Gambar 2.8 Jari-jari lendutan
Sumber : Anonymous 1, 2013

Rumus umum untuk besar jari-jari lenturan yang terjadi (ρ) karena beban momen M ,

$$M = EI/\rho \text{ atau,}$$

$$1/\rho = M/EI \quad (2.6)$$

Rumus umum besarnya jari-jari pada titik sepanjang lengkungan suatu kurva sembarang adalah,

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]} \quad (2.7)$$

Dalam persamaan ini y adalah besar lenturan yang terjadi (searah sumbu y), dan x adalah jarak sepanjang batang (searah sumbu x). Salah satu persyaratan dalam

bahasan ini telah ditentukan bahwa kuadrat besaran sudut lenturan dapat diabaikan atau,

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = 0$$

sehingga persamaan diatas menjadi,

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2.8)$$

Harga jari-jari diatas kemudian disubstitusikan kedalam persamaan (2.6), sehingga didapatkan rumus/persamaan umum besar lenturan elastis karena beban momen sebagai berikut.

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M \quad (2.9)$$

Dapat diperhatikan dalam persamaan diatas bahwa arah lenturan (y) selalu searah dengan arah momen, karena besaran modulus elastisitas (E) dan momen inersia (I) selalu positif. Untuk memecahkan persamaan differensial diatas diperlukan persamaan momen terhadap sumbu x. Pemecahan dapat dilakukan secara analitis, yaitu dengan cara mengintegrasikan dua kali sehingga didapatkan besaran lenturannya (y). Parameter-parameter lenturan dapat ditunjukkan dalam bentuk turunan secara berurutan dimulai dengan besaran lenturan y sampai kepada gaya yang bekerja (F) sebagai berikut :

$$\text{Lenturan} = y \quad (2.10)$$

$$\text{Sudut lenturan } (\theta) = \frac{dy}{dx} \quad (2.11)$$

$$\text{Momen (M)} = \frac{dq}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2.12)$$

$$\text{Beban geser (V)} = \frac{dM}{dx}, \text{ atau } \frac{d^3y}{dx^3} \quad (2.13)$$

$$\text{Beban gaya (F)} = \frac{dV}{dx}, \text{ atau } \frac{d^4y}{dx^4} \quad (2.14)$$

Berdasarkan persamaan umum turunan diatas, dapat ditunjukkan bahwa besarnya sudut lenturan didapat dengan mengintegrasikan persamaan umum lenturan akibat momen pada persamaan (2.9) sebagai berikut :

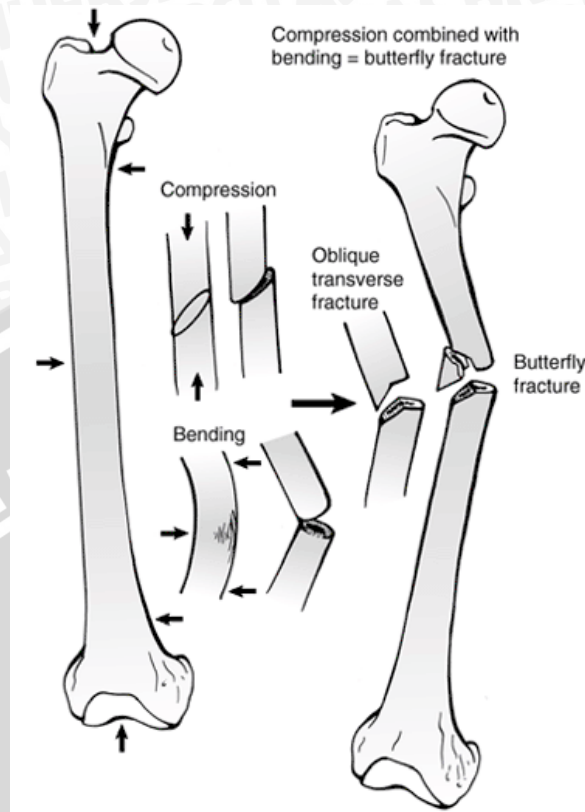
$$y = \frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \text{ atau,}$$

$$\theta = \frac{M}{EI} x \quad (2.15)$$

2.5 Fraktur Femur

Fraktur atau patah tulang adalah terputusnya kontinuitas tulang dan ditentukan sesuai jenis luasannya. Sebagian fraktur dapat disebabkan oleh kekuatan yang tiba – tiba dan berlebihan, yang dapat berupa pemukulan, penghancuran, penekukan, pemuntiran, atau penarikan. Fraktur pada tulang *femur* atau tulang paha, dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu fraktur *femur 1/3 proximal*, fraktur *femur 1/3 medial*, dan fraktur *femur 1/3 distal*. Yang sering terjadi adalah fraktur pada 1/3 *medial* dimana fraktur ini terjadi pada batang tulang.

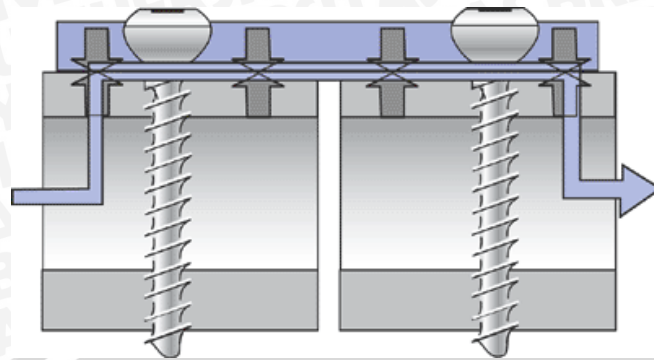
Fraktur pada *femur* umumnya terjadi akibat beban tekan dan *bending*. Bentuk fraktur yang terjadi dipengaruhi beban yang menyebabkan fraktur tersebut. Gambar 2.8 memperlihatkan bentuk fraktur dan arah beban penyebab fraktur *femur*.



Gambar 2.9 Bentuk fraktur dan arah beban penyebab fraktur femur
Sumber : Bucholz, 2006, 19

2.6 Plate Fixation

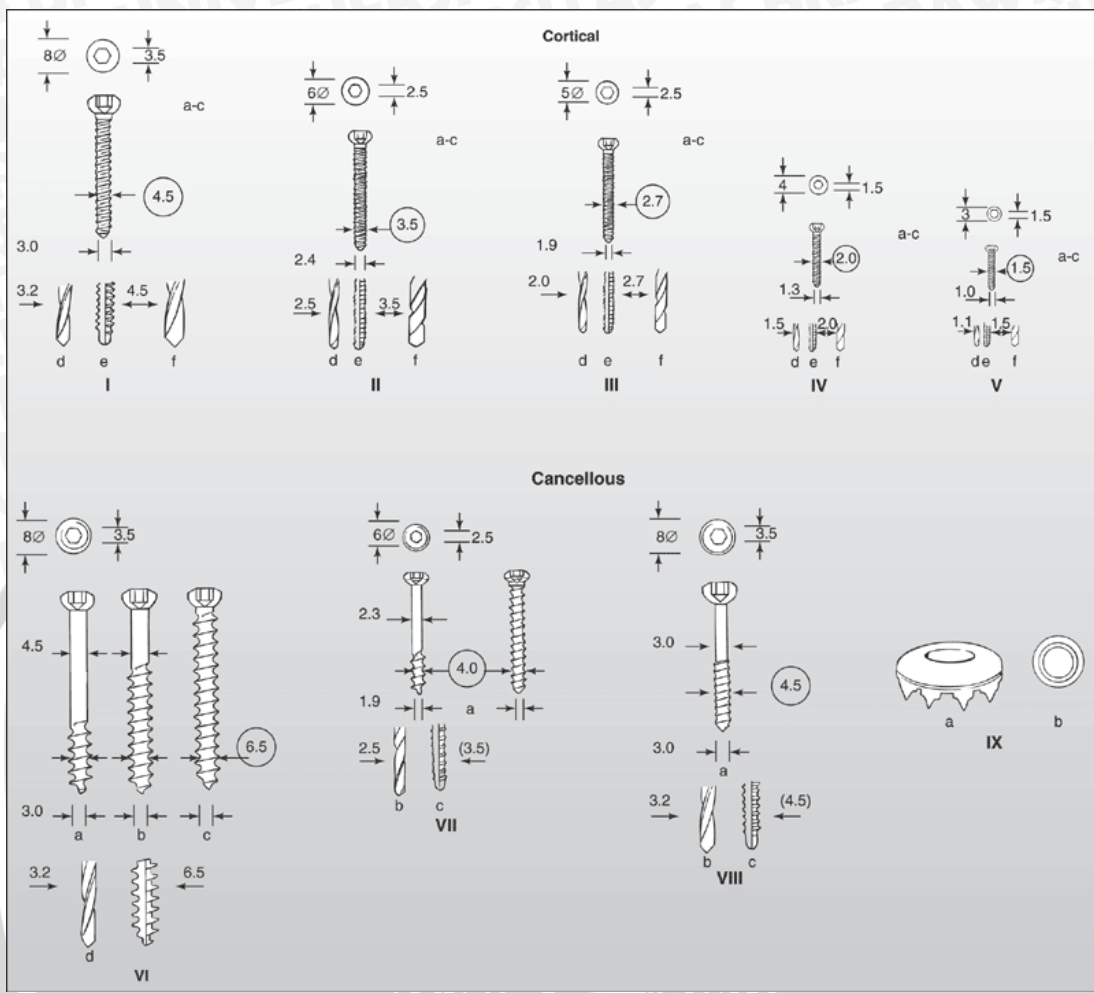
Stabilitas fraktur adalah orang tujuan utama dari *plate fixation*. Stabilitas pada tulang akan mempercepat proses penyembuhan. Pengurangan dan fiksasi dilakukan menggunakan teknik terbuka, mana yang diperlukan luas pendekatan bedah dan jaringan lunak yang cukup besar. Stabilitas plat bergantung pada *bone screw* dan gesekan yang dihasilkan oleh tekanan antara tulang dan plat, lihat gambar 2.9.



Gambar 2.10 *Plate fixation*
Sumber : Bucholz, 2006, 227

2.7 Screw (Sekrup)

Screw (sekrup) adalah sebuah pengunci yang berbentuk silindris berulir yang pemasangannya ditujukan ke dalam suatu lubang yang tersedia, atau dengan kata lain tidak memakai mur (Joseph E. Shigley, 1986). Dalam bidang *osteoporotics*, *screw* digunakan dalam penanganan patah tulang. Penangan patah tulang yang dilakukan dengan menggunakan *screw* terdapat dua jenis yaitu *external fixation* dan *internal fixation*. Pada *internal fixation screw* merupakan komponen yang sangat penting. *Screw* yang digunakan pada *internal fixation* ada dua macam menurut bentuk dan kedalaman dari ulir pada *screw* itu sendiri, dua macam *screw* itu adalah *cortical screw* dan *cancellous screw*. Berdasarkan teknik pemasangan pada *plate* terbagi dua macam yaitu *non locking screw (conventional screw)* dan *locking screw*. Gambar 2.10 menunjukkan geometri *cortical screw* dan *cancellous screw* yang umum digunakan dalam *plate fixation*.



Gambar 2.11 Geometri *cortical screw* dan *cancellous screw*
 Sumber : Bucholz, 2006, 225

2. 8 Penyembuhan Tulang (*Bone Healing*)

Secara umum proses penyembuhan tulang yang mengalami fraktur dapat dibagi menjadi dua, yaitu penyembuhan fraktur tulang primer dan penyembuhan fraktur tulang sekunder. Pada penyembuhan fraktur tulang primer terjadi *internal remodelling* yang meliputi upaya langsung oleh korteks untuk membangun kembali dirinya ketika kontinuitas terganggu. Agar fraktur menjadi menyatu, tulang pada salah satu sisi korteks harus menyatu dengan tulang pada sisi lainnya (kontak langsung) untuk membangun kontinuitas mekanis. Sedangkan penyembuhan fraktur tulang sekunder melalui pembentukan kallus.

Syarat bagi terbentuknya proses penyembuhan fraktur tulang primer adalah reduksi yang benar, fiksasi yang stabil, dan suplai pembuluh darah yang cukup. Apabila kestabilan pada daerah fraktur kurang akan terjadi *micromotion* dan regangan pada daerah fraktur. *Micromotion* dan regangan pada daerah fraktur akan mengganggu proses penyembuhan fraktur tulang primer dan memicu terjadinya penyembuhan fraktur tulang sekunder. Pada proses penyembuhan fraktur tulang sekunder, akan dihasilkan kallus dimana proses ini sama dengan proses pembentukan tulang baru. Hasil sambungan tulang pada proses penyembuhan sekunder memiliki *mechanical properties* yang sama dengan tulang aslinya.

