

BAB III

LANDASAN TEORI

A. Baja

1. Pengertian Baja Secara Umum

Baja adalah logam paduan logam besi sebagai unsur dasar dengan beberapa elemen lainnya termasuk karbon. Fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur penguat dengan mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal atom besi. Baja merupakan komponen utama pada bangunan, infrastruktur, kapal, mobil, mesin, perkakas, dan senjata. (wikipedia)

Baja atau besi yang dihasilkan dari dapur-dapur baja disebut baja atau besi karbon, yaitu campuran antara besi dengan zat arang (karbon). Sedangkan unsur lainnya seperti fosfor, belerang, dan sebagainya juga ada didalamnya, namun dalam presentase yang kecil sekali sehingga dianggap tidak memengaruhinya.

Apabila unsur lainnya itu sengaja dimasukkan ke dalamnya, dikatakan sebagai baja paduan. Unsur paduan itu diberikan dengan maksud memperbaiki atau memberi sifat baja yang sesuai dengan sifat yang dikehendaki pada baja. Berdasarkan banyaknya zat arang yang dikandung besi atau baja, dapat dibedakan menjadi dua bagian:

- a. Mengandung karbon antara 0,01 – 1,7%, disebut besi atau baja tempa
 - b. Mengandung karbon antara 2,3 – 3,5%, disebut baja atau besi tuang.
- (Suchyo, 1995).

Baja dapat dikelompokkan menjadi beberapa macam, salah satu pengelompokan baja yaitu berdasarkan kegunaan dalam konstruksi yaitu baja dapat digunakan sebagai baja konstruksi dan baja non konstruksi. Baja konstruksi digunakan untuk keperluan konstruksi bangunan dan pembuatan bagian-bagian mesin. Berdasarkan campuran dan proses pembuatannya, baja konstruksi dibedakan menjadi (Setiawan, 2008).

a. Baja karbon

Baja karbon dibagi menjadi 3 kategori tergantung dari presentasi kandungan karbonnya, yaitu baja karbon rendah ($C = 0,03 - 0,035\%$), baja

karbon medium ($C = 0,35 - 0,50\%$), dan baja karbon tinggi ($C = 0,55 - 1,70\%$). Baja yang sering digunakan dalam struktur adalah baja karbon medium, misalnya BJ 37. Kandungan karbon baja medium bervariasi dari $0,25 - 0,29\%$ tergantung ketebalan. Naiknya presentase karbon meningkatkan tegangan leleh namun menurunkan daktilitas, salah satu dampaknya adalah membuat pekerjaan las menjadi lebih sulit. Baja karbon umumnya memiliki tegangan leleh (f_y) antara $210 - 250$ MPa.

b. Baja paduan rendah mutu tinggi

Baja yang termasuk dalam kategori baja paduan rendah mutu tinggi mempunyai tegangan leleh berkisar antara $290 - 550$ Mpa dengan tegangan putus (f_u) antara $415 - 700$ Mpa. Penambahan bahan-bahan paduan seperti chromium, columbium, angan, molybden, nikel, fosfor, vanadium atau zirkonium dapat memperbaiki sifat-sifat mekaniknya. Jika baja karbon mendapatkan kekuatannya seiring dengan penambahan presentase karbon, maka bahan-bahan aduan ini mampu memperbaiki sifat mekanik saja dengan membentuk mikrostruktur dalam bahan saja yang lebih halus.

c. Baja paduan

Baja paduan rendah dapat ditempa dan dipanaskan untuk memperoleh tegangan antara $550 - 70$ Mpa. Tegangan leleh dari baja paduan biasanya ditemukan sebagai tegangan yang terjadi saat timbul regangan permanen sebesar $0,2\%$ atau dapat ditentukan pula sebagai tegangan pada saat regangan mencapai $0,5\%$.

Adapun baja konstruksi dibedakan dalam 3 jenis:

1) Baja konstruksi umum

Baja tersebut terdiri dari jenis baja karbon dan baja kualitas tinggi yang tidak dipadu. Penggunaan baja ini didasarkan atas pertimbangan tegangan tarik minimumnya yang cukup tinggi. Baja ini banyak digunakan pada konstruksi bangunan gedung jembatan, poros mesin dan roda gigi.

Kekuatan tarik akan semakin besar bila kandungan karbon dari baja semakin tinggi. Akan tetapi dengan semakin tingginya kandungan karbon, baja akan menjadi rapuh. Demikian pula kemampuan untuk

dikerjakan secara panas maupun secara dingin dan dengan mesin perkakas menjadi jelek

2) Baja Otomat

Baja otomat terdiri atas jenis baja kualitas tinggi yang tidak dipadu dan baja kualitas tinggi paduan rendah dengan kadar belerang (S) dan fosfor (P) yang tinggi. Karena kandungan belerang dan fosfor yang cukup tinggi, baja otomat sangat tidak baik untuk pekerjaan las.

3) Baja *Case Hardening*

Baja *case hardening* diperoleh dengan menaruh baja lunak di antara bahan yang kaya dengan karbon, dan memanaskannya hingga di atas suhu kritis atasnya (900° - 950°C) dalam waktu yang cukup lama untuk mendapatkan lapisan permukaan yang banyak mengandung karbon.

2. Sifat Mekanik Baja

Bahan yang digunakan dalam perancangan harus memperhatikan sifat-sifat logam seperti kekuatan (*strength*), keliatan (*ductility*), kekerasan (*hardness*) atau kekuatan luluh (*fatigue strength*). Sifat mekanik dapat didefinisikan sebagai ukuran kemampuan untuk membawa atau menahan gaya atau tegangan

Sifat mekanik baja dapat diperoleh dengan melakukan uji tarik terhadap suatu benda uji baja. Uji tarik dapat memberikan data yang akurat terhadap sifat-sifat mekanik material baja, karena disebabkan beberapa hal antara lain adanya tekuk pada benda uji yang mengakibatkan ketidakstabilan dari benda uji tersebut. Perhitungan tegangan yang terjadi di dalam benda uji lebih mudah dilakukan jika dilakukan uji tarik daripada uji tekan.

Klasifikasi bahan material ada 2 karakteristik:

a. Isotropik

Bahan yang mempunyai sifat elastis yang reaktif sama pada semua arah pada setiap titik dalam bahan

b. Anisotropik

Bahan yang memiliki sifat yang berbeda dalam arah kristalografi yang berbeda

Dalam perencanaan struktur baja SNI 03-1729-2002 dapat diambil beberapa sifat mekanik dari material baja yang sama yaitu:

Modulus Elastisitas E = 200.000 MPa

Modulus Geser G = 80.000 MPa

Angka Poison = 0.3

Koefisien muai panjang, α = $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Kelas mutu baja yang terdapat pada SNI 03-1729-2002 terbagi menjadi 5 kelas sebagai berikut:

Tabel 3.1 Sifat mekanis baja struktural

Jenis Baja	Tegangan Putus Minimum (f_u Mpa)	Tegangan leleh Minimum (f_y Mpa)	Regangan Minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

3. Teknik Pengelasan

Mengelas merupakan menyambung dua bagian logam dengan proses pemanasan yang didapat dari pembakaran suatu gas yakni gas asam dan gas asitelin (karbit) atau dengan menggunakan pas listrik. Prinsip daripada pengelasan dibagi menjadi dua yaitu:

a. Las penggabungan

Las penggabungan dibedakan menjadi dua yaitu yang dibangkitkan secara listrik dan dibangkitkan dari energi kimia. Yang dibangkitkan secara listrik diantaranya *electron beam*, *inert gas*, *submerged arc*, *flux cored arc*, *shielded metal arc*, *carbon arc*, *electro arc*, *plasma arc*, *atomic hydrogen*, *laser beam* dan *stud welding*. Las peggabungan yang dibangkitkan dengan energi kimia diantaranya ialah *thermit welding*, *oxyacetylene welding*.

b. Las bukan penggabungan.

Las bukan penggabungan dibagi menjadi dua yaitu *brazing* dan *force welding*. *Brazing* sendiri terdiri dari *torch*, *furnace*, *induction*, *resistance* dan *dip brazing*. Sedangkan *force welding* dibedakan dari energi yang dipakai yaitu energi kimia, mekanikal dan energi listrik.

Yang termasuk *force welding* dengan pembangkit energi kimia yaitu *black smith*, *explosive*, *water gas*, dan *pressure gas welding*. Yang termasuk pada energi mekanikal yaitu *friction*, *ultrasonic*, *cold*, dan *pressure welding*. Sedangkan yang termasuk *force welding* dengan energi listrik yaitu *resistance*, *flash*, dan *electro slag welding*.

Untuk jenis-jenis sambungan tertentu pemakaian kawat las kadang-kadang tidak diperlukan sehingga cukup mencairkan bagian logam yang akan disambung saja. Teknik pengelasan yang umum digunakan di Indonesia yaitu:

a. Las karbit

Karbit (CaC_2) adalah persenyawaan antara kalsium (Ca) dengan zat arang (C) yang dibuat dengan jalan memanaskan batu kapur dan oksida dalam dapur listrik sehingga keduanya bersenyawa dalam keadaan cair dan bilamana telah membeku maka dipecahkan menjadi gumpalan-gumpalan kecil. Las karbit merupakan pengelasan dengan bahan bakar gas asetelin dan gas asam.

Pengelasan dapat mengalami kegagalan, yakni las cacat. Las cacat yaitu pengelasan yang hanya berupa titik-titik saja pada beberapa tempat, las cacat ini adalah las kecil atau pendek yang berfungsi sebagai pengikat pada bagian-bagian yang akan disambung atau dilas. Hal ini sangat penting karena untuk mempertahankan kedudukan bagian-bagian sambungan agar ketika pengelasan dilakukan tidak terjadi perubahan bentuk.

Sambungan las adalah suatu proses penyambungan bahan logam yang menghasilkan peleburan bahan dengan atau tanpa pemberian tekanan dan dengan atau tanpa pemakaian bahan pengisi (Setiawan, 2008). Adapun macam-macam sambungan las karbit antara lain:

1) Sambungan tumpul

Adalah sambungan dimana kedua bidang yang akan disambung dihadapkan satu sama lain, pekerjaan dilaksanakan dengan kikir, pahat, gerinda, gergaji atau mesin potong.

2) Sambungan pinggir

Sambungan ini digunakan untuk bahan-bahan yang tebalnya kurang 2 mm, dimana sebelum dikerjakan dengan sambungan las bagian tepi ditekuk 1 – 2 kali tebal plat lalu diimpitkan satu sama lain, pengelasannya tidak diperlukan bahan tambah, cukup cairan bahan dasar itu sendiri.

3) Sambungan tumpang

Macam-macam sambungan tumpang adalah sambungan T dan sambungan sudut luar. Permukaan kampuhnya harus benar-benar bersih agar didapatkan sambungan yang baik, setiap kotoran yang ada padanya akan menghasilkan pengelasan yang keropos.

b. Las listrik

Las listrik merupakan proses pengelasan dengan menggunakan bahan bakar arus listrik dari PLN ataupun dari motor bensin, mesin diesel, dimana pada mesin ini membutuhkan jumlah arus yang besar, hampir mencapai 200 – 500 Ampere, dan Voltasenya adalah sekitar 36 – 70 Volt.

Di dalam pengelasan sebelum dilakukan pengelasan yang sesungguhnya maka kita perlu mengatur letak sambungan itu dan perlu mengikatnya dengan klem penjepit supaya dapat lekat satu sama lain sehingga memudahkan dalam pengelasan sambungannya.

Pada pengelasan listrik juga mempunyai bermacam-macam jenis sambungan sebagaimana halnya pada proses pengelasan asetelin. Macam-macam sambungan las listrik:

- 1) Sambungan ujung (kampuh I) yang dipakai untuk plat tipis dengan tebal 3 – 8 mm
- 2) Sambungan tumpang

- 3) Sambungan tepi
- 4) Sambungan V yang digunakan untuk bahan yang tebal plat mencapai 3 – 28 mm
- 5) Sambungan $\frac{1}{2}$ V dipakai jika salah satu bagian yang akan disambung tidak boleh diubah bentuknya
- 6) Sambungan X dipakai untuk bahan yang tebalnya 12 – 45 mm, sudut kampuh biasanya 60° . Untuk plat 12 – 20 mm digunakan pengelasan dengan sudut lancip dan tebal plat lebih dari 20 mm digunakan pengelasan dengan sudut tumpul
- 7) Sambungan $\frac{1}{2}$ X
- 8) Sambungan U digunakan untuk sambungan yang menerima beban berat dan plat yang tebalnya 32 mm
- 9) Sambungan $\frac{1}{2}$ U besisi satu digunakan untuk plat yang tebalnya 20 – 40 mm, sedangkan $\frac{1}{2}$ U bersisi dua digunakan pada plat 40 – 70 mm.
- 10) Sambungan sudut
- 11) Sambungan T
- 12) Sambungan bevel

B. Balok

1. Balok Secara Umum

Beam/ balok adalah komponen struktur horizontal nominal yang memiliki fungsi utama untuk menahan momen lentur (SNI 1729:2015). Bentang struktural yang didesain untuk menahan gaya-gaya yang bekerja dalam arah transversal terhadap sumbunya disebut balok (*beam*). Berdasarkan pada arah bekerjanya beban-beban, maka balok berbeda dari batang yang mengalami tarik dan batang yang mengalami puntiran (Gere, 1996).

Balok merupakan salah satu elemen struktur yang digunakan sebagai dudukan lantai dan pengikat kolom lantai atas. Fungsinya adalah sebagai rangka penguat horizontal bangunan akan beban-beban. Regangan pada balok dapat mengakibatkan timbulnya tegangan yang harus ditahan oleh balok, tegangan tekan disebelah atas dan tegangan tarik dibawah. (Dipohusodo, I 1996)

2. Balok Kantilever

Balok yang salah satu ujungnya dijepit (*bulit in* atau *fixed*) dan yang lainnya bebas, disebut sebuah balok konsol (*cantilever beam*). Pada penyangga jepit, balok tidak dapat bertranslasi maupun berputar, sedangkan pada ujung bebas ia dapat mengalami keduanya. Akibatnya, naik reakis-reaksi gaya momen dapat hadir pada penyangga jepit (Gere, 1996).

3. Balok Non Prismatic

Balok tak peismatik adalah balok-balok yang mempunyai penampang berbeda pada tiap bagian-bagiannya dan balok-balok tirus. Bila sebuah balok mempunyai dimensi penampang yang berubah secara tiba-tiba, maka pada titikdiman perubahan tersebut akan terjadi konsentrasi tegangan lokal; akan tetapi tegangan lokal ini tidak mempunyai pengaruh yang berarti terhadap perhitungan lendutan. (Gere, James M., 1996)

C. Balok Kastela

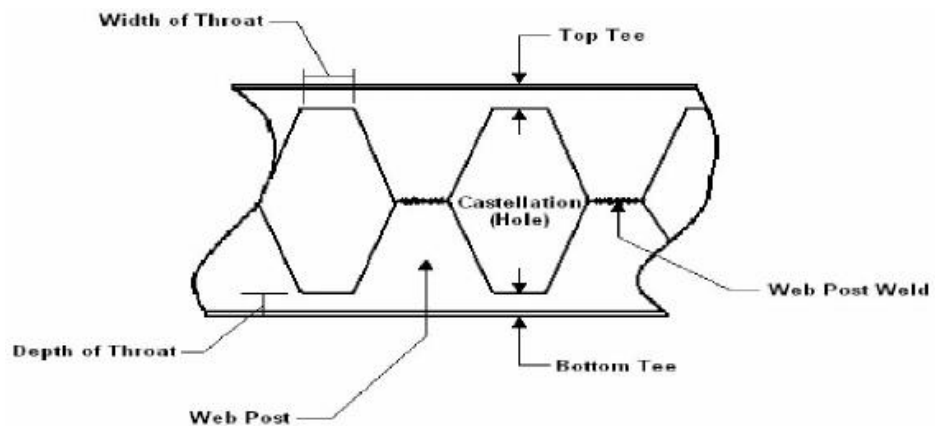
Balok kastela pertama kali dikenal dengan istilah Open web expanded beams and girder (perluasan balok dan girder dengan badan berlubang) adalah balok yang mempunyai elemen pelat badan berlubang, yang dibentuk dengan cara membelah bagian tengah pelat badan, kemudian bagian bawah dari belahan tersebut dibalik dan disatukan kembali antara bagian atas dan bawah dengan cara digeser sedikit kemudian dilas. Gagasan semacam ini pertama kali dikemukakan oleh H.E Horton dari Chicago dan Iron Work sekitar tahun 1910.

Balok kastela adalah profil I, H atau U yang pada bagian badannya dipotong memanjang dengan pola zig-zag. Kemudian bentuk dasar baja diubah dengan cara menggeser setengah bagian profil baja yang telah dipotong. Penyambungan setengah bagian profil dengan cara dilas pada bagian gigi-giginya. Sehingga terbentuk profil baru dengan lubang berbentuk segi enam (*hexagonal*), segi delapan (*octagonal*), dan lingkaran (*circular*). (Johann Grubauer, 2001)

Bagian-bagain balok kastela:

1. *Web post* adalah area solid dari balok kastela
2. *Castellation* adalah area yang sudah mengalami pelubangan (*hole*)
3. *Throat Width* adalah perpanjangan horisontal dari potongan sisi bawah profil

4. *Throat depth* adalah tinggi daerah profil potongan gigi bawah sampai sayap profil (Bardley, 2007)



Gambar 3.1 Bagian-bagian balok kastela

Balok kastela memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan balok *solid*:

1. Dengan lebar profil yang lebih tinggi, menghasilkan momen inersia dengan modulus *section* yang lebih besar sehingga lebih kuat dan kaku bila dibandingkan dengan asalnya
2. Mampu memikul momen lebih besar dengan tegangan ijin yang kecil
3. Bahannya ringan, kuat serta mudah dipasang
4. Sesuai untuk bentang panjang, untuk struktur atap dapat mencapai 10-50 m dan untuk struktur pelat 12 – 25 m
5. Dapat digunakan untuk gedung tingkat tinggi, bangunan perindustrian

D. Pembebanan

Beban-belan yang bekerja pada balok-balok dapat bermacam-macam. Beberapa macam diantaranya adalah beban terpusat (*concretated beam*) dan beban-belan terdistribusi (*distributed loads*). Beban-belan yang bekerja sepanjang suatu daerah dan diukur oleh intensitasnya, yang dinyatakan dalam satuan-satuan gaya per panjang satuan sepanjang sumbu balok.

Sebuah beban terdistribusi secara merata memiliki intensitas konstan q per jarak satuan. Beban yang berubah-ubah memiliki intensitas yang bergantung pada jaraknya sepanjang sumbu misalnya beban yang berubah secara linier. Jenis beban lainnya adalah sebuah kopel yang diilustrasikan dengan momen M yang bekerja pada emper balok (Gere, 1996).

E. Mekanika Material

Mekanika bahan adalah ilmu yang digunakan untuk menentukan besarnya tegangan (*stresses*), regangan (*strains*), dan perpindahan (*displacement*) pada suatu struktur dan komponen-komponennya akibat beban yang bekerja pada struktur tersebut. Besaran-besaran tersebut digunakan untuk mengetahui pemahaman terhadap perilaku mekanis suatu jenis struktur.

Konsep dasar mekanika bahan adalah tegangan dan regangan dapat diilustrasikan dengan meninjau sebuah batang prismatik yang dibebani dengan gaya-gaya aksial pada ujung-ujungnya. Sebuah batang prismatik adalah sebuah batang lurus yang memiliki penampang yang sama pada keseluruhan panjangnya. Dalam hal ini, gaya-gaya aksial menimbulkan suatu tarikan sama rata pada batang, karena itu batang dikatakan mengalami tarik (*tension*) (Gere, 1996).

1. Tegangan Normal

Tegangan adalah besaran pengukuran intensitas gaya atau reaksi dalam yang timbul persatuan luas. Dalam praktik teknik, gaya umumnya diberikan dalam *pound* atau *newton*, dan luas yang menahan dalam satuan luas. Tegangan yang dihasilkan pada keseluruhan benda tergantung dari gaya yang bekerja.

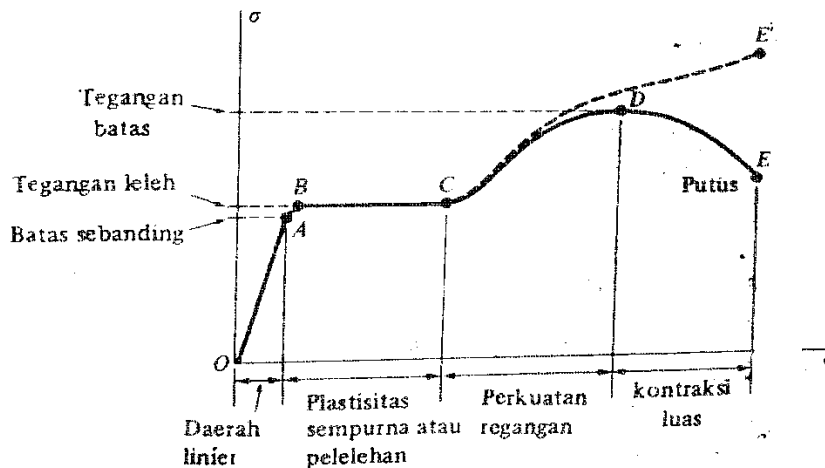
Menurut James M. Gere (1996), tegangan merupakan gaya-gaya yang terdistribusi secara menerus di seluruh penampang, yang analog dengan penyebaran kontinu dari tekanan hidrostatis pada permukaan horisontal dalam zat cair. Intensitas gaya (gaya per satuan luas) disebut tegangan (*stress*). Tegangan dengan arah aksial, maka tegangan yang terjadi adalah tegangan tarik (*tensile stress*). Jika arahnya dibalik, maka ini menyebabkan batang tertekan dan itulah yang dinamakan tegangan tarik (*compressive stress*).

2. Regangan Normal

Regangan dapat diartikan sebagai perubahan panjang material dibagi panjang awal akibat gaya tarik ataupun gaya tekan pada material. Batasan sifat elastis perbandingan regangan dan tegangan akan linier dan akan berakhir sampai pada titik batas ulimit elastisitas material. Batas elastisitas suatu material adalah bila tegangan yang bekerja besarnya dapat kembali pada bentuk semula, sedangkan plastisitas adalah perubahan bentuk yang permanen tanpa mengakibatkan terjadinya kerusakan.

Sebuah batang yang dibebani secara aksial mengalami perubahan panjang, dimana ia menjadi lebih panjang apabila mengalami tarik dan lebih pendek apabila mengalami tekan. Dalam hal ini pemanjangan atau pemendekan per satuan panjang disebut juga dengan regangan.

3. Elastisitas, Plastisitas dan Angka Poisson



Gambar 3.2 Diagram tegangan-regangan baja konstruksi

Diagram diatas merupakan diagram hasil uji tarik pada baja yang dibebani secara statik. Hasil pengujian secara adalah pada gravik yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Daerah linier dapat dikatakan sebagai daerah batas sebanding. Biasanya batas elastis agak sedikit di atas atau hampir sama dengan batas sebanding hal tersebut ditunjukkan pada titik A dan B pada Gambar 3.1. Pada area ini pula bahan material memiliki sifat elastis yakni sifat bahan yang dapat kembali ke dimensi semula selama pembebanan terjadi.

Pada kurva tegangan-regangan daerah elastis selalu diikuti dengan daerah plastis. Apabila terjadi deformasi besar dalam bahan liat yang dibebani hingga daerah plastis yakni beban dapat menimbulkan ketidakmampuan bahan material untuk kembali pada dimensi semula setelah pembebanan dilakukan.

Apabila suatu batang dibebani gaya aksial tarik, maka perpanjangan aksialnya akan diikuti oleh kontraksi dalam arah lateral. Perbandingan antara regangan dan tegangan dalam arah lateral dan arah sumbu dikenal dengan angka poisson yang dinyatakan dalam bahasa Yunani ν . Untuk batang dalam keadaan tarik, regangan lateral menyatakan suatu penurunan dalam ukuran lebar

(regangan negatif) dan regangan aksial menyatakan pemanjangan (regangan positif). Untuk keadaan tekan kita jumpai keadaan sebaliknya, dimana batang menjadi lebih pendek (regangan aksial negatif) dan lebih lebar (regangan lateral positif). Oleh karena itu angka poisson biasanya berniali positif untuk kebanyakan bahan.

4. Tegangan Multiaksial

Untuk tegangan multiaksial, diperlukan definisi leleh yang jelas, definisi dinamakan kondisi leleh (teori keruntuhan) yang merupakan suatu persamaan interaksi antara tegangan-regangan yang bekerja. Kriteria leleh (Von Mises – Huber – Hencky) yang dikenal sebagai kriteria energi distorsi maksimum, teori tegangan geser oktahedral atau Maxwell – Huber – Hencky – Von Mises, sering digunakan untuk memperkirakan kelelahan pada bahan ulet. Material dikatakan mulai leleh yaitu ketika tegangan Von Mises mencapai nilai kritis yang diketahui sebagai *yield strength*. Von Mises menyatakan bahwa kegagalan terjadi ketika energi distorsi mencapai energi yang sama untuk kegagalan dalam ketegangan uniaksial.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2\sigma_y^2 \dots\dots\dots(3.6)$$

Keterangan :

σ_x = tegangan pada arah 1 / arah sumbu x

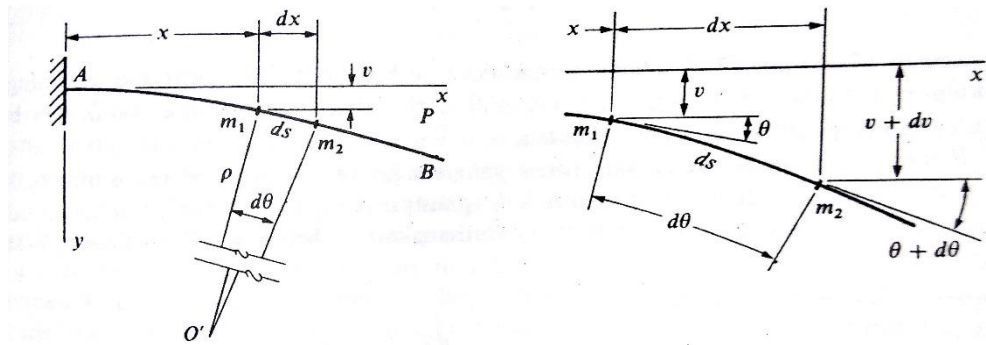
σ_y = tegangan pada arah 2 / arah sumbu y

σ_z = tegangan pada arah 3 / arah sumbu z

σ' = tegangan *Von Mises*

5. *Displacement* (Lendutan)

Lendutan adalah peralihan dalam arah y dari sembarang titik di sumbu balok. Bila sebah balok dibebani maka sumbu longitudinal yang semula lurus akan berubah menjadi kurva yang disebut kurva lendutan dari balok. Dalam perencanaan bangunan, dimana biasanya ada batas maksimum untuk lendutan, karena lendutan yang besar akan mengakibatkan penampilan yang jelek dan struktur yang terlalu lemas.



Gambar 3.3 Kurva lendutan pada balok

Lendutan balok v dari titik m_1 yang berjarak x dari pusat adalah translasi (pergeseran) titik tersebut pada arah y , yang diukur dari sumbu x ke kurva lendutan. Lendutan ke atas maka berniali positif dan jika ke bawah maka berniali negatif. Balok yang dirancang dengan baik tidak hanya mampu memikul beban yang akan diterimanya tetapi juga harus mampu mengatasi terjadinya defleksi sampai batas tertentu.

Persamaan diferensial dasar untuk kuva lendutan suatu balok:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \dots\dots\dots (3.1)$$

Keterangan:

- y = defleksi balok
- M = momen tekuk pada jarak x dari salah satu ujung balok
- E = modulus elastisitas balok
- I = momen inersia penampang melintang terhadap sumbu netral

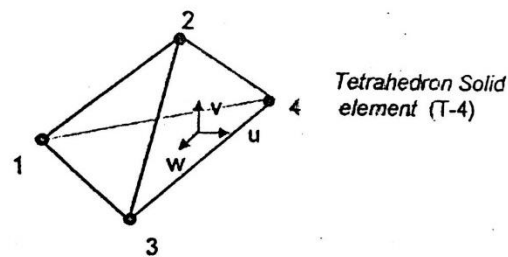
F. Analisis Konstruksi Balok

Secara umum analisis struktur dapat dilakukan atas 3 hal berikut ini:

1. Menentukan hubungan antar aksi (*action*) dan deformasi (*deformation*) yang dikenal sebagai *constitutive law*.
2. Pertimbangan kinematis dari struktur yang terdeformasi (*compatibility*)
3. Keseimbangan (*equilibrium*) antara gaya-gaya yang bekerja (*applied forces*) dan gaya-gaya dalam (*internal forces*)

Dalam analisis metode elemen hingga, elemen sangat mempengaruhi perhitungan. Menurut Suhendro (2002) dalam jurnal Muhtarom (2015), jenis elemen pada 3 dimensional solid yang paling banyak digunakan adalah:

1. *Element Rectangular Solid* (RS elemen ini adalah seperti bata (mempunyai titik nodal minimal 8 buah. Elemen ini digunakan untuk menganalisis bentuk struktur yang beraturan saja karena be menyerupai kubus.
2. *Element Hexahedron Solid* (H adalah pengembangan dari elemen Rectangular Solid (RS-8), mempunyai 6 sisi (*side*) tapi bentuknya tidak berbentuk kubus sempurna. Elemen ini digunakan untuk menganalisis bentuk struktur yang agak beraturan saja.
3. *Element Tetrahedron Solid* (T mempunyai 4 sisi) *side* cocok digunakan untuk menganalisis bentuk struktur yang tidak beraturan. Dalam penelitian ini elemen ini yang dipakai untuk meng idealisasikan struktur balok kastela dengan bukaan atau lubang heksagonal yang bentuknya tidak beraturan.



Gambar 3.4 Elemen tetrahedron

Persamaan umum dalam metode elemen hingga :

$$[K] \{U\} = \{F\} \dots\dots\dots(3.2)$$

dimana :

- [K] : Matriks kekakuan elemen
 {U} : Matriks perpindahan elemen
 {F} : Matriks gaya yang bekerja pada elemen

1) Matriks Perpindahan Elemen *Tetrahedron*

Adapun bentuk *displacement functions* (trilinear) yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned} u &= a_1 + a_2 X + a_3 Y + a_4 Z \\ v &= a_5 + a_6 X + a_7 Y + a_8 Z \dots\dots\dots(3.3) \\ w &= a_9 + a_{10} X + a_{11} Y + a_{12} Z \end{aligned}$$

Dengan kata lain, u, v, dan w dinyatakan sebagai fungsi dari *nodal displacements* yang berjumlah 4 buah. Adapun urutan *degree of freedom* adalah sebagai berikut :

$$\{u\}_{1 \times 12}^T = \{u_1 \ v_1 \ w_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ u_3 \ v_3 \ w_3 \ u_4 \ v_4 \ w_4 \} \dots\dots\dots(3.4)$$

Dengan prosedur serupa pula, matriks [N] dan [B] dapat diperoleh. Matriks [N] atau yang biasanya disebut *shape functions* pada elemen *Tetrahedron Solid* memiliki rumusan operasi matriks yang sama dengan matriks [N] pada elemen *Hexahedron*, hanya saja jumlah titik nodal *displacement* yang ditinjau pada elemen *Tetrahedron Solid* berbeda yaitu di 4 titik sehingga berpengaruh pada besaran orde matriks [N]. Adapun bentuk operasi perkalian matriks pada jenis elemen ini dapat dilihat sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 & f_2 & 0 & 0 & f_3 & 0 & 0 & f_4 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & 0 & f_2 & 0 & 0 & f_3 & 0 & 0 & f_4 & 0 \\ 0 & 0 & f_1 & 0 & 0 & f_3 & 0 & 0 & f_3 & 0 & 0 & f_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ w_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3.5)$$

Matriks [B] pada elemen *Tetrahedron* memiliki bentuk sebagai berikut :

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 & f_2 & 0 & 0 & f_3 & 0 & 0 & f_4 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & 0 & f_2 & 0 & 0 & f_3 & 0 & 0 & f_4 & 0 \\ 0 & 0 & f_1 & 0 & 0 & f_3 & 0 & 0 & f_3 & 0 & 0 & f_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.6)$$

Seperti pada elemen *Hexahedral*, matriks [B] pada elemen *Tetrahedron* juga digunakan untuk mencari nilai matriks regangan dengan menggunakan pola rumusan yang sama.

2) Matriks Kekakuan Elemen *Tetrahedron*

Adapun matriks kekakuan elemennya dapat dihitung dengan rumusan sebagai berikut :

$$\left[k_l^{(e)} \right]_{(12 \times 12)} = \iiint_v [B]_{12 \times 6}^T [E]_{6 \times 6} [B]_{6 \times 12} dv \dots\dots\dots(3.29)$$

Integrasi diselesaikan secara numerik dengan metode *Gauss-Quadrature*