

BAB III

LANDASAN TEORI

A. Program *Abaqus* 6.11

Analisis pemodelan *Abaqus* dengan variasi tipe *bracing* V Terbalik, K, Dan X pada sistem rangka portal baja akan menggunakan bantuan *software Abaqus* 6.11, maka dalam hal ini akan dijelaskan lebih dalam mengenai program *Abaqus* itu sendiri.

Dalam *Abaqus* “*Getting Strateed with Abaqus, Interactive Edition*”, dijelaskan bahwa *Software Abaqus* adalah paket program simulasi rekayasa yang kuat, didasarkan pada metode elemen hingga, yang dapat memecahkan masalah mulai dari analisis linier relative sederhana sampai simulasi nonlinier yang paling menantang. Program *Abaqus* berisi perpustakaan yang luas dari unsur-unsur yang dapat memodelkan hampir semua geometri apapun. Program ini memiliki daftar yang sangat luas dari model material yang dapat mensimulasikan perilaku sebagian besar bahan rekayasa, termasuk logam, karet, polimer, komposit, beton bertulang, busa yang lentur dan kuat, dan bahan geoteknik seperti tanah dan batuan.

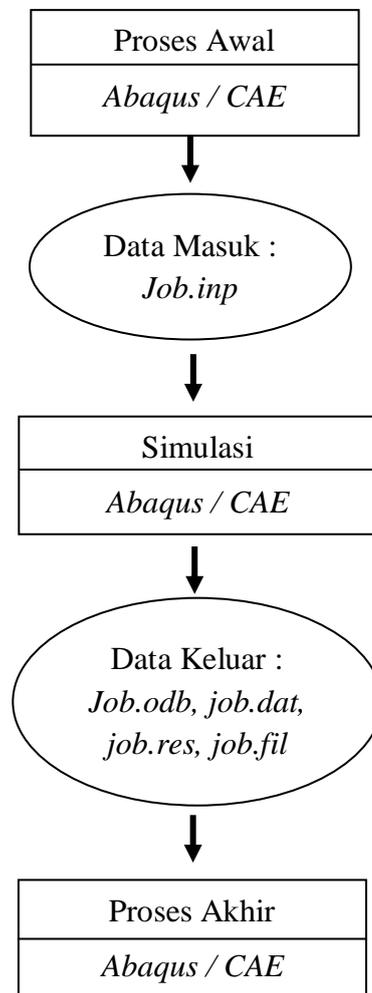
Program ini dirancang sebagai alat simulasi untuk keperluan umum, *Abaqus* dapat digunakan untuk mempelajari lebih dari sekedar masalah struktural (stres/perpindahan). Program ini dapat mensimulasikan masalah di berbagai bidang seperti perpindahan panas, difusi massal, manajemen termal dari komponen listrik (ditambah termal-listrik analisis), akustik, mekanika tanah dll

Abaqus menawarkan berbagai kemampuan untuk simulasi aplikasi linier dan nonlinier. Permasalahan dengan beberapa komponen dimodelkan dengan mengaitkan geometri masing-masing komponen dengan model bahan yang sesuai dan menentukan interaksi komponen. Dalam analisis nonlinier, *Abaqus* otomatis memilih penambahan beban yang tepat dan toleransi konvergensi dan terus

menyesuaikan mereka selama analisis untuk memastikan bahwa solusi yang akurat dan efisiensi diperoleh.

1. Tahapan-Tahapan analisis *Abaqus*

Dalam *Abaqus* “*Getting Strateed with Abaqus, Interactive Edition*”, dijelaskan bahwa untuk menganalisis sampai selesai dengan program *Abaqus* biasanya melalui tiga tahap yang berbeda yaitu proses awal, simulasi dan proses akhir. Kemudian dari ketiga tahap tersebut dihubungkan sehingga menjadi seperti Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Tahapan menjalankan program *abaqus*

a. Proses Awal (*Preprocessing*)

Pada bagian ini kita mulai menentukan model awal yang akan dilakukan analisis. Pemodelan part dilakukan dalam software Abaqus dengan memasukkan geometri yang telah kita ketahui sebelumnya. Dalam menggambarkan model, kita bisa menentukan koordinat sistem yang akan dibuat. Sebelum dilakukan simulasi kita harus memeriksa semua *keyword* dan parameter yang digunakan sehingga tidak terjadi kesalahan. Selain itu urutan dalam memasukkan data harus kita perhatikan dengan benar.

b. Simulasi (*Simulation*)

Simulasi yang biasanya dijalankan sebagai pengantar proses adalah tahap dimana program abaqus memulai proses untuk melakukan pemecahan masalah numerik yang diidentifikasi dalam model. Sebagai contoh, keluaran dari stress analisis termasuk perpindahan dan tekanan yang disimpan dalam berkas biner untuk proses akhir.

c. Proses Akhir (*Post Processing*)

Pada proses akhir kita dapat mengambil kesimpulan dari hasil simulasi yang sudah selesai pada perpindahan, gaya atau variable lainnya yang sudah di dilakukan perhitungan. Hasil akhir biasanya dibuat dalam suatu laporan atau sebuah catatan.

2. Komponen pada Windows Utama Abaqus

a. *Title Bar*

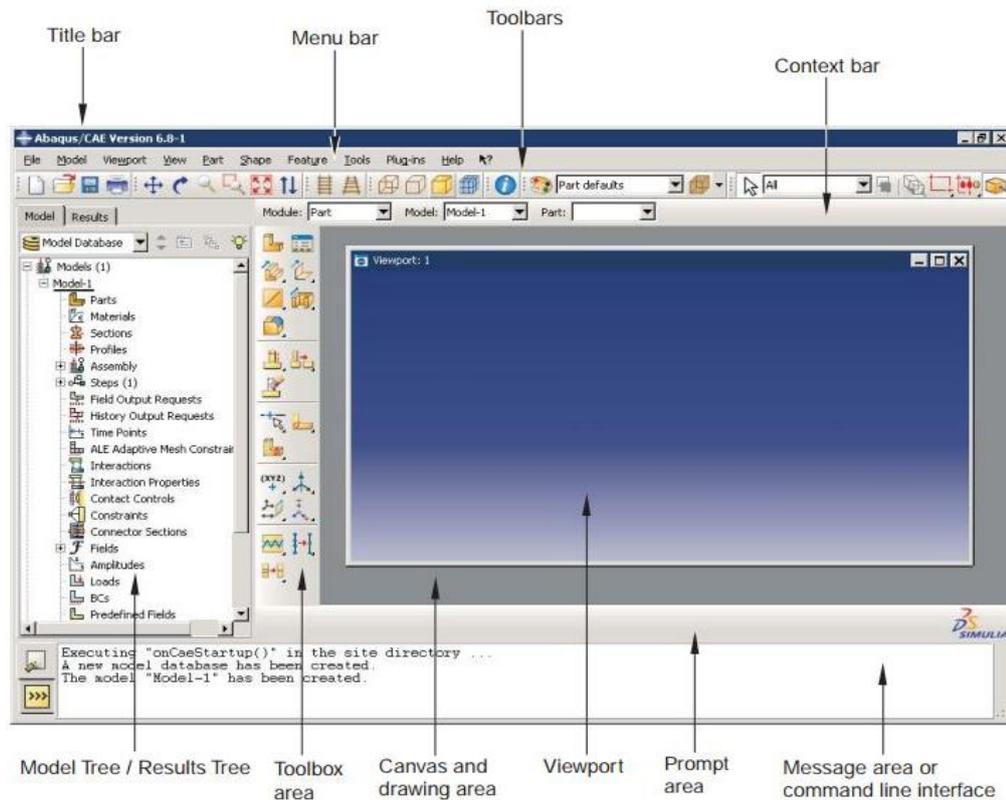
Title bar menunjukkan versi dalam *Abaqus* kita melakukan sedang kita gunakan dan juga menunjukkan judul dari file yang kita buat atau kita gunakan

b. *Menu Bar*

Menu bar berisi semua menu yang tersedia, menu ini memberikan akses ke semua fungsi dalam produk.

c. *Toolbars*

Tools ini memberikan akses cepat yang tersedia pada menu.



Gambar 3. 2 Komponen pada *windows* utama program *abaqus*
(Sumber : *Abaqus helper*)

d. *Context bar*

Dalam konteks bar memungkinkan kita untuk berpindah antar modul serta mengambil bagian yang sudah ada ketika membuat geometri model.

e. *Model Tree / Result Tree*

Model Tree menyediakan grafik sebagai *Review* dari model objek dari masing-masing bagian, material, langkah, pembebanan. *Results Tree* memberikan grafik dari *output data base* dan Spesifik data hasil plot x-y.

f. *Toolbox area*

Memungkin akses cepat ke banyak fungsi modul yang tersedia

g. *Canvas and drawing area*

adalah tempat atau lokasi untuk area gambar

h. *Viewport*

adalah jendela di area gambar di mana abaqus menampilkan model yang telah dibuat

i. *Prompt area*

Berfungsi untuk menampilkan petunjuk atau panduan yang telah kita lakukan pada *software abaqus*

j. *Message Area or command line interface*

Pada bagian ini *Abaqus* akan memunculkan informasi dan peringatan yang terjadi jika ada informasi atau kesalahan.

B. Baja

1. Pengertian Baja

Baja adalah logam paduan antara besi (Fe) dan karbon (C), dimana besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan karbon dalam baja berkisar antara 0,2 % C hingga 1,7% C berat sesuai *grade*-nya. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tariknya (*tensile strength*), namun di sisi lain membuatnya menjadi getas (*brittle*) serta menurunkan keuletannya (*ductility*). Dalam proses pembuatan baja akan terdapat unsur-unsur lain selain karbon yang akan tertinggal di dalam baja seperti *mangan* (Mn), *silikon* (Si), *Kromium* (Cr), *Vanadium* (V), dan unsur lainnya. Dalam hal aplikasi baja sering digunakan sebagai bahan baku untuk alat-alat perkakas, alat-alat pertanian, komponen- komponen otomotif, perabotan rumah tangga dan lain-lain. (Beumer dan Anwir. 1994)

Baja merupakan suatu bahan konstruksi yang lazim digunakan dalam struktur bangunan sipil. Karena kekuatan yang tinggi dan ketahanan terhadap gaya luar yang besar maka baja ini juga telah menjadi bahan pilihan untuk konstruksi menara air rangka baja. Struktur baja bisa dibagi atas tiga kategori umum :

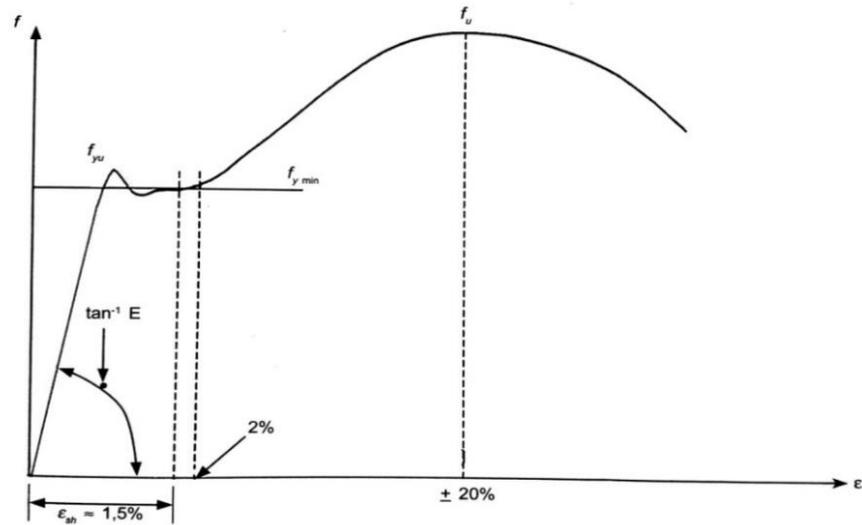
- a. Struktur rangka (*framed structure*), yang elemennya bisa terdiri dari batang tarik, kolom, balok dan batang yang mengalami gabungan lenturan dan beban aksial.

- b. Struktur gantung (*suspension*), yang sistem pendukung utamanya mengalami tarikan aksial yang dominan.
- c. Struktur selaput (*sheel*), yang tegangan aksialnya dominan.

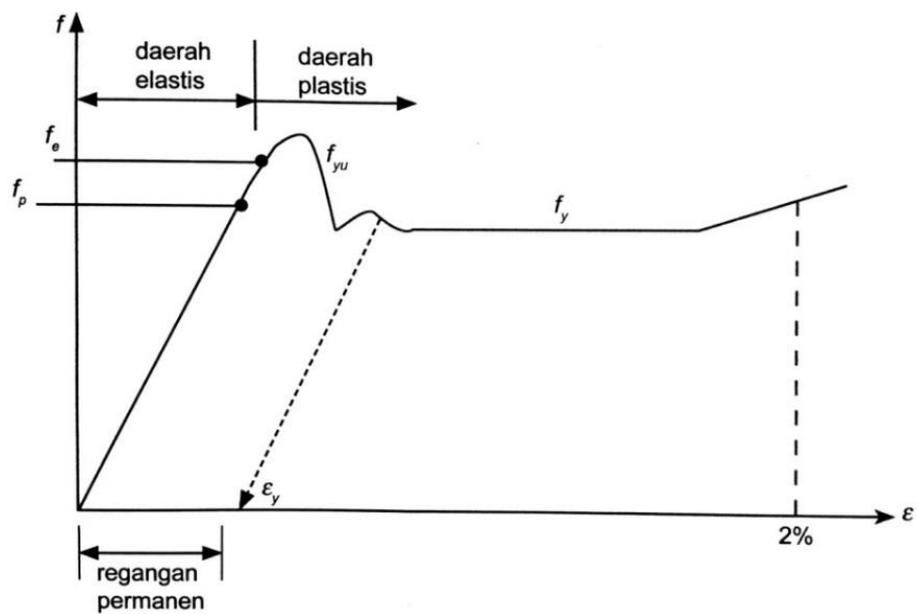
2. Sifat-sifat Mekanik Baja

Untuk dapat memahami perilaku suatu struktur baja dapat dilakukan dengan melakukan model pengujian, pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik material baja yang didapat dari uji tarik terhadap suatu benda uji baja. Uji tekan tidak dapat memberikan data yang akurat terhadap sifat-sifat mekanik material baja, karena disebabkan beberapa hal diantaranya adanya potensi tekuk pada benda uji yang mengakibatkan ketidakstabilan dari benda uji tersebut, selain itu perhitungan tegangan yang terjadi di dalam benda uji lebih mudah dilakukan untuk uji tarik daripada uji tekan.

Dari Gambar 3.3 dan 3.4 dapat ditunjukkan suatu hasil uji tarik material baja yang dilakukan pada suhu kamar serta dengan memberikan laju regangan yang normal. Tegangan nominal (f) yang terjadi dalam benda uji diplot pada sumbu vertikal, sedangkan regangan (ε) yang merupakan perbandingan antara pertambahan panjang dengan panjang mula-mula ($\Delta L/L$) diplot pada sumbu horizontal. Gambar 3.3 merupakan hasil uji tarik dari suatu benda uji baja yang dilakukan hingga benda uji mengalami keruntuhan, sedangkan Gambar 3.4 menunjukkan gambaran yang lebih detail dari perilaku benda uji hingga mencapai regangan sebesar $\pm 2\%$.



Gambar 3. 3 Hubungan tegangan (f) vs regangan (ϵ)
(Sumber : Setiawan, A. 2008)



Gambar 3. 4 Hubungan tegangan (f) – regangan (ϵ) yang diperbesar
(Sumber : Setiawan, A. 2008)

Titik – titik penting dalam kurva tegangan – regangan antara lain adalah:

- f_p : batas proporsional
- f_e : batas elastis
- f_{yu}, f_y : tegangan leleh atas dan bawah
- f_u : tegangan putus (*Ultimate Stress*)

ε_{sh} : regangan saat mulai terjadi efek *strain-hardening* (penguatan regangan)

ε_u : regangan saat tercapainya tegangan putus

Titik – titik penting ini membagi kurva tegangan – regangan menjadi beberapa daerah sebagai berikut :

- a. Daerah linear antara 0 dan f_p , dalam daerah ini berlaku Hukum Hooke, kemiringan dari bagian kurva yang lurus ini disebut sebagai Modulus Elastisitas atau Modulus *Young*, $E (=f/\varepsilon)$
- b. Daerah elastis antara 0 dan f_e , pada daerah ini jika beban dihilangkan maka benda uji akan kembali ke bentuk semula atau dikatakan bahwa benda uji tersebut masih bersifat elastis.
- c. Daerah plastis yang dibatasi oleh regangan antara 2% hingga 1,2 – 1,5%, pada bagaian ini regangan mengalami kenaikan akibat tegangan konstan sebesar f_y . Daerah ini dapat menunjukkan pula tingkat daktilitas dari material baja tersebut. Pada baja mutu tinggi terdapat pula daerah plastis, namun pada daerah ini tegangan masih mengalami kenaikan. Karena itu baja jenis ini tidak mempunyai daerah plastis yang benar – benar datar sehingga tak dapat dipakai dalam analisa plastis
- d. Daerah penguatan regangan (*strain-hardening*) antara ε_{sh} dan ε_u . Untuk regangan lebih besar dari 15 hingga 20 kali regangan elastis maksimum, tegangan kembali mengalami kenaikan namun dengan kemiringan yang lebih kecil daripada kemiringan daerah elastis. Daerah ini dinamakan daerah penguatan regangan (*strain-hardening*), yang berlanjut hingga mencapai tegangan putus. Kemiringan daerah ini dinamakan modulus penguatan regangan (E_{st})

Dalam perencanaan struktur baja, SNI 1729–2015 mengambil beberapa sifat – sifat mekanik dari material baja yang sama yaitu :

Modulus Elastisitas, E = 29.000 ksi (200.000 MPa)

Modulus Geser, G = 11.200 ksi (72.200 MPa)

Angka *poisson* = 0,3

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

Sedangkan berdasarkan tegangan leleh dan tegangan putusnya, SNI 03-1729-2002 mengklasifikasikan mutu dari material baja menjadi 5 kelas mutu yang disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Sifat – sifat mekanis baja struktural
(Sumber: SNI 03-1729-2002)

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. Kelebihan Baja Sebagai Materail Konstruksi

a. Kekuatan Tinggi (*High Strength*)

Kekuatan yang tinggi dari baja persatuan berat mempunyai konsekuensi bahwa beban mati yang terjadi akan kecil. Hal ini sangat berguna untuk struktur yang memiliki bentang panjang, bangunan tinggi dan bangunan dengan kondisi tanah yang buruk

b. Keseragaman (*Uniformity*)

Sifat – sifat baja tidak berubah banyak terhadap waktu. Hampir seluruh bagian baja memiliki sifat-sifat yang sama sehingga menjamin kekuatannya.

c. Elastisitas (*Elasticity*)

Baja mendekati perilaku seperti asumsi yang direncanakan oleh perencana, karena mengikuti hukum Hooke, walaupun telah mencapai tegangan yang cukup tinggi. Modulus elastisitasnya sama untuk tarik dan tekan.

d. Daktilitas (*Ductility*)

Daktilitas adalah kemampuan struktur atau komponennya untuk melakukan deformasi inelastik bolak-balik berulang diluar batas titik leleh pertama, sambil mempertahankan sejumlah besar kemampuan daya dukung bebannya. Manfaat daktilitas ini bagi kinerja struktural adalah pada saat baja mengalami pembebanan yang melebihi kekuatannya, baja tidak langsung hancur tetapi akan meregang sampai batas daktilitas.

e. Permanen

Bangunan Struktur yang menggunakan material baja jika mendapat perawatan yang baik akan berumur sangat panjang, bahkan pada kondisi tertentu baja tidak memerlukan perawatan sama sekali

f. Kuat Patah / Rekah (*Fracture Toughness*)

Baja adalah material yang sangat ulet sehingga dapat memikul beban yang berulang-ulang. Komponen struktur baja yang dibebani sampai mengalami deformasi besar, masih mampu menahan gaya – gaya yang cukup besar tanpa mengalami fraktur. Keuletan ini dibutuhkan jika terjadi konsentrasi tegangan walaupun tegangan yang masih dibawah batas yang diizinkan. Pada bahan yang tidak memiliki keuletan yang tinggi, keruntuhan dapat terjadi pada tegangan yang rendah dan akan bersifat getas (keruntuhan secara langsung).

4. Kekurangan Baja Sebagai Materail Konstruksi

a. Biaya Perawatan (*Maintenance Cost*)

Umumnya material baja sangat rentan terhadap korosi jika dibiarkan terjadi kontak dengan air dan udara. Oleh sebab itu, baja perlu dicat secara berkala

b. Biaya Perlindungan Terhadap Api

Meskipun baja tidak mudah terbakar tetapi kekuatannya akan menurun drastic jika terkena suhu yang sangat tinggi. Selain itu baja juga merupakan konduktor panas yang baik sehingga dapat menjadi pemicu kebakaran pada komponen lain.

c. Rentan Terhadap *Buckling*

Semakin langsung suatu elemen tekan yang terjadi, semakin besar pula bahaya terhadap buckling (tekuk). Sebagaimana telah disebutkan bahwa baja mempunyai kekuatan yang tinggi per satuan berat dan jika digunakan sebagai kolom seringkali tidak ekonomis karena banyak material yang perlu digunakan untuk memperkuat kolom terhadap *buckling*.

d. Kelelahan (*Fatigue*)

Kelelahan pada baja tidak selalu dimulai dengan *yielding* (leleh) atau deformasi yang sangat besar, tetapi dapat juga disebabkan beban siklik ataupun pembebanan berulang-ulang dalam jangka waktu yang lama. Kejadian ini sering terjadi dengan adanya konsentrasi tegangan karena adanya lubang.

e. Keruntuhan Getas

Pada kondisi tertentu baja akan kehilangan daktilitasnya dan keruntuhan getas dapat terjadi pada tempat dengan konsentrasi tegangan tinggi. Jenis beban fatik dan temperature yang sangat rendah akan memperbesar kemungkinan keruntuhan getas.

C. Konsep Dasar Perencanaan Struktur Baja

Dalam melakukan desain struktur suatu bangunan harus memenuhi kriteria-kriteria yang ada, diantaranya kekuatan (*strength*), kemampuan layan (*serviceability*) dan ekonomis (*economy*). (Aristadi, Dian. 2008)

1. Kekuatan (*strength*), yaitu berkaitan dengan kemampuan umum dan keselamatan suatu struktur bangunan pada kondisi pembebanan yang ekstrem. Struktur tersebut diharapkan mampu bertahan meskipun terkadang mendapat beban berlebih tanpa mengalami kerusakan dan kondisi yang membahayakan selama waktu pemakaian struktur tersebut.
2. Kemampuan layan (*serviceability*), yaitu mengacu pada fungsi struktur yang sesuai, berhubungan dengan tampilan, stabilitas dan daya tahan, mengatasi

pembebanan, defleksi, vibrasi, deformasi permanen, retakan dan korosi, dan persyaratan-persyaratan desain lainnya.

3. Ekonomis (*economy*), yaitu mengutamakan pada keseluruhan persyaratan biaya material, pelaksanaan konstruksi dan tenaga kerja, mulai dari tahapan perencanaan, pabrikasi, pendirian dan pemeliharaan struktur.

D. Kestabilan Struktur

Dalam mendesain suatu struktur bangunan, tujuan yang paling utama adalah dapat menjamin adanya kestabilan struktur bangunan tersebut pada segala kondisi pembebanan yang mungkin terjadi. Struktur yang tidak stabil mudah sekali mengalami *collapse* (runtuh) secara menyeluruh dan seketika begitu dibebani karena pada struktur ini tidak ada gaya gaya internal yang dapat mengembalikan struktur ke dalam bentuk semula. Oleh karena itu perencana struktur dalam mendesain harus sesuai dengan tata cara dan persyaratan yang telah ada.

Pada struktur stabil apabila dikenakan beban, struktur tersebut akan mengalami perubahan bentuk (*deformasi*) yang lebih kecil, dan gaya internal yang timbul didalam struktur mempunyai kecenderungan untuk mengembalikan ke dalam bentuk semula apabila bebannya dihilangkan. Hal ini disebabkan karena pada struktur yang stabil memiliki kekuatan dan kestabilan dalam menahan beban. (Schodek, D.L., 1999).

Terdapat beberapa cara dasar untuk menjamin struktur dapat menjadi konfigurasi stabil, diantaranya:

1. Dengan menambahkan elemen struktur *diagonal* pada struktur, sehingga struktur tidak mengalami deformasi menjadi jajaran genjang. Hal ini disebabkan karena dengan menambahkan elemen struktur diagonal gaya gaya yang dikenakan pada struktur akan disebarkan ke seluruh bagian termasuk ke elemen diagonal, gaya-gaya yang diterima masing-masing struktur akan berkurang sehingga simpangan yang dihasilkan lebih kecil.

2. Dengan menggunakan dinding geser (*shearwall*). Elemennya merupakan elemen permukaan bidang kaku, yang tentunya dapat menahan deformasi akibat beban horisontal dan simpangan horisontal yang akan dihasilkan akan lebih kecil.
3. Dengan mengubah hubungan antara elemen struktur sedemikian rupa sehingga perubahan sudut yang terjadi berharga konstan untuk suatu kondisi pembebanan tertentu.

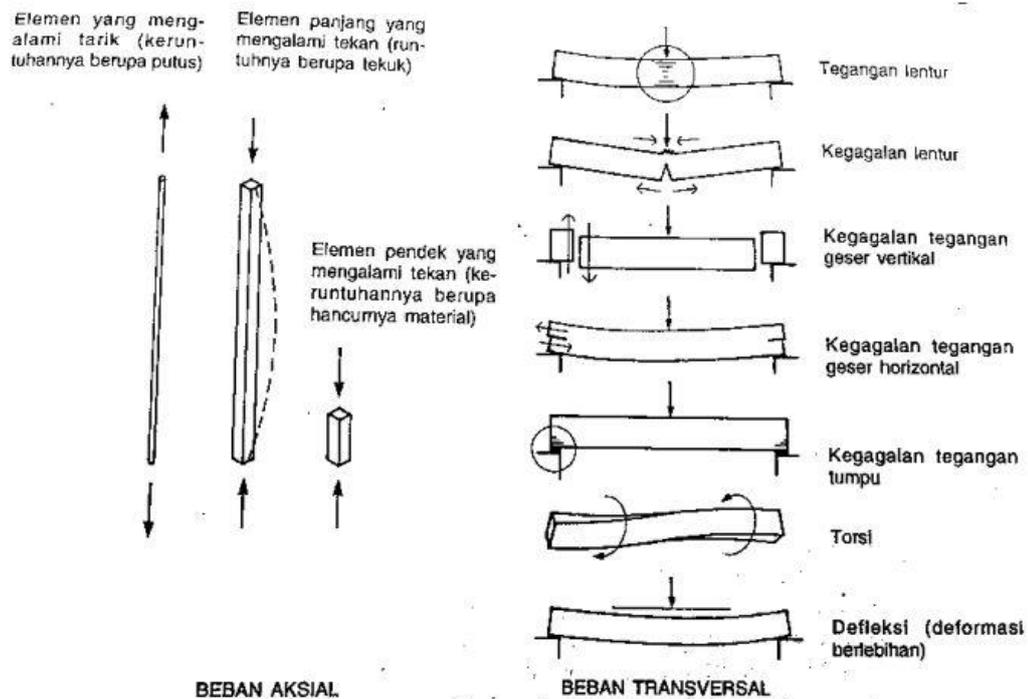
E. Gaya yang bekerja pada struktur

Gaya adalah interaksi antara benda-benda yang mempengaruhi bentuk atau gerak atau keduanya, atau keduanya, pada benda yang terlibat (Schodek, D.L., 1999). Ada beberapa gaya yang bekerja pada bagian elemen struktur, diantaranya:

1. Gaya geser adalah gaya yang berkaitan dengan aksi gaya-gaya yang saling berlawanan arah dimana menyebabkan salah satu bagian struktur tergelincir terhadap bagian lain yang berada didekatnya. Tegangan geser umumnya terjadi pada balok
2. Gaya Lentur adalah keadaan gaya kompleks yang berkaitan dengan melenturnya elemen (biasanya elemen tersebut adalah balok) sebagai akibat dari adanya beban transversal yang menyebabkan adanya gaya tarik dan tekan pada satu bidang elemen. Tegangan tarik dan tekan ini bekerja dalam arah tegak lurus permukaan penampang.
3. Gaya tarik adalah gaya eksternal yang mengalir dari dalam elemen menuju permukaan elemen dengan sifat menarik bidang elemen hingga putus. Kekuatan elemen tarik tergantung pada luas penampang bidang elemen dan jenis material yang digunakan pada elemen. Elemen yang mengalami gaya tarik dapat mempunyai kekuatan tinggi, misalnya pada kabel yang digunakan pada struktur dengan bentang yang panjang. Kekuatan elemen tarik tergantung pada panjangnya.
4. Gaya tekan adalah gaya yang menyebabkan hancur atau tekuk pada bidang elemen. Elemen yang mempunyai bentang pendek cenderung hancur dan

mempunyai kekuatan relative setara dengan kekuatan elemen tersebut apabila mengalami tarik.

5. Defleksi adalah gaya yang diakibatkan adanya beban pada elemen yang harus dibatasi pada taraf batas yang diijinkan.
6. Tegangan Tumpu terjadi antara dua muka bidang elemen yang saling bertemu atau bersentuhan apabila adanya gaya-gaya yang disalurkan dari satu elemen ke elemen lainnya yang ada didekatnya. Sebagai contoh, tegangan tumpu pada unjung-ujung balok yang terletak di atas dinding dan kolom. Tegangan dan interaksi tegangan dapat terjadi pada bagian elemen struktur juga karena pola aliran penyaluran gayanya.

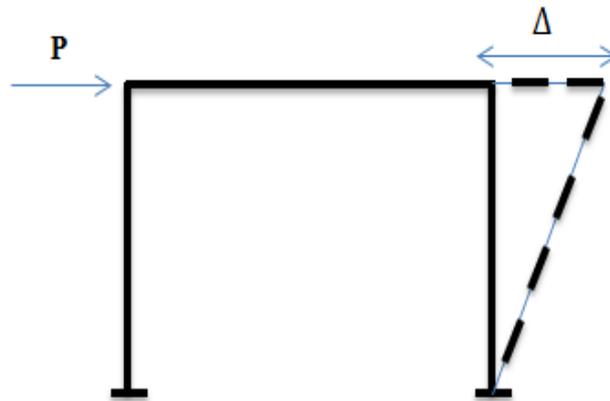


Gambar 3. 5 Gaya geser, lentur, tekan, tarik, defleksi,torsi dan tumpu
(Daniel L. Schodek, 1999)

F. Kekauan Struktur

Dalam melakukan perencanaan suatu struktur bangunan gedung terhadap pengaruh Gempa Rencana, kekakuan unsur struktur harus dipakai baik dalam melakukan analisis statik maupun dalam analisis dinamik tiga (3) dimensi. Tingkat kekakuan suatu material ditunjukkan oleh sudut yang dibentuk oleh tegangan dan

regangan pada daerah *elastic* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.6. Dalam menghitung kekakuan, dapat dilakukan dengan membandingkan antara kekuatan (*Strength*) dengan Simpangan (*displacement*)



Gambar 3. 6 Perbandingan antara kekuatan dengan simpangan

$$K = \frac{Py}{\Delta} \dots\dots\dots (3. 1)$$

Dengan,

- K = kekakuan struktur (N/mm)
- Py = kekuatan (*Strength*) (N)
- Δ = Simpangan (*Displacement*). (mm)

G. Struktur dengan sistem Portal

Struktur portal (*rigih frame*) adalah struktur yang terdiri atas elemen-elemen linear, umumnya terdiri dari balok dan kolom yang saling dihubungkan pada ujung-ujungnya oleh titik hubung (*joints*) dengan kaku yang dapat mencegah rotasi relatif diantara elemen struktur yang dihubungkanya (Schodek, D.L., 1999) Dengan demikian, elemen struktur tersebut menerus pada titik hubung itu. Struktur portal (*rigih frame*) adalah statis taktentu.

Berdasarkan geometrik vertikalnya portal dapat dibedakan menjadi portal simetris dan portal asimetris. Struktur portal asimetris tidak mempunyai cerminan yang sama jika diberikan sumbu tengah yang membagi portal tersebut. Untuk menganalisis sebuah portal asimetris menggunakan ukuran model yang utuh

sehingga membutuhkan ketelitian dan waktu yang agak lama penggunaan data yang lengkap pada tiap segmen portal dan proses analisis yang lebih panjang.

Struktur portal di pengaruhi oleh gaya internal dan gaya eksternal. Gaya internal merupakan kekakuan struktur tersebut terhadap gaya eksternal, dalam hal ini mengenai elastisitas bahan dan momen inersia. Elastisitas (E) dinyatakan seperti persamaan (3.2) (berdasarkan hukum hooke) dengan satuan kg/cm^2 dan momen inersia (I) dimensi persegi seperti persamaan (3.3) dengan satuan cm^4

$$E = \frac{f(\text{tegangangan})}{\varepsilon(\text{regangan})} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$I = \frac{1}{12} bh^3 \dots\dots\dots (3.3)$$

H. Sistem Portal dengan *Bracing*

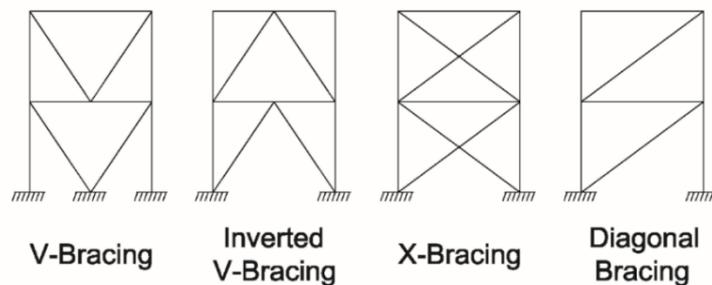
Struktur portal merupakan struktur yang tidak efisien apabila digunakan untuk beban lateral yang sangat besar, terutama beban gempa. Untuk memikul beban sedemikian rupa, cara paling efisien yang dapat dilakukan adalah dengan menambahkan dinding geser (*shear wall*) atau pengaku diagonal (*diagonal bracing*) pada struktur (Schodek, D.L., 1999). Struktur rangka *bracing* merupakan sistem struktur yang didesain untuk menahan beban lateral berupa gempa. Elemen *bracing* berperilaku sebagai rangka batang yaitu hanya menerima gaya tarik atau tekan.

Dalam tugas akhir ini, akan digunakan pengaku pada struktur portal rangka baja dengan menggunakan tiga (3) jenis *bracing* yaitu V Terbalik, K dan X, penggunaan tipe *bracing* jenis ini bertujuan untuk memberikan kekakuan optimal pada struktur sehingga dapat meminimalisir terjadinya simpangan lateral pada struktur, serta untuk mengetahui tipe *bracing* yang bagus dalam memberikan kekakuan pada struktur portal rangka baja. Secara umum bentuk *bracing* yang digunakan untuk struktur portal terdiri dari dua, yaitu rangka *bracing* konsentrik dan rangka *bracing* eksentrik.

Dalam SNI-1729-2002 konfigurasi bentuk rangka *bracing* yang biasa digunakan untuk struktur portal terdiri dari dua yaitu: Sistem Rangka *Bracing* Konsentrik (SRBK) dan Sistem Rangka *Bracing* Eksentrik (SRBE)

1. Sistem Rangka *Bracing* Konsentrik (SRBK)

Sistem Rangka *Bracing* Konsentrik (SRBK) merupakan sistem struktur yang elemen *bracing* diagonalnya bertemu pada satu titik serta sistem ini merupakan pengembangan dari sistem portal tak berpengaku. Sistem Rangka *Bracing* Konsentrik dikembangkan sebagai sistem penahan gaya lateral dan memiliki tingkat kekakuan yang cukup baik. Kekakuan sistem ini terjadi akibat adanya elemen pengaku yang berfungsi sebagai penahan gaya lateral yang terjadi pada struktur. Sistem ini penyerapan energinya dilakukan melalui pelelehan yang dirancang terjadi pada pelat buhul. Sistem ini daktilitasnya kurang begitu baik sehingga kegagalannya ditentukan oleh tekuk bresing. Rangka *bracing* konsentrik memiliki beberapa tipe, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.7 diantaranya *V Bracing*, *Inverted V Bracing*, *X Bracing*, *Diagonal Bracing*.



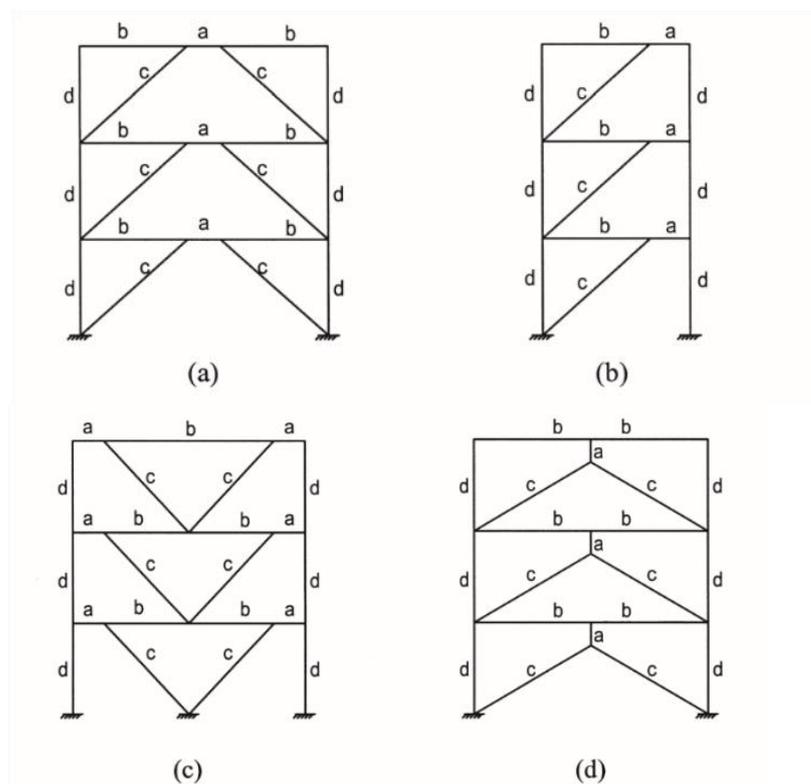
Gambar 3. 7 Tipe sistem rangka *bracing* konsentrik (SRBK)

Dalam SNI 03-1729-2002 Sistem Rangka *Bracing* Konsentrik (SRBK) dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian yaitu Sistem rangka *bracing* konsentrik biasa (SRBKB) dan Sistem rangka *bracing* konsentrik khusus (SRBKK).

2. Sistem Rangka *Bracing* Eksentrik (SRBE)

Struktur rangka bresing eksentrik (SRBE) merupakan sistem struktur yang elemen bresing diagonalnya tidak bertemu pada suatu titik, karena adanya elemen penghubung atau disebut dengan *link*.

Dalam SNI 03-1729-2002 Elemen *Link* merupakan elemen struktur yang direncanakan untuk berperilaku inelastis serta mampu untuk berdeformasi plastis yang besar, karena memikul momen lentur dan geser yang paling besar di antara komponen struktur lainnya. *Link* direncanakan untuk mendisipasi energi saat terjadi gempa kuat. Sistem Rangka *bracing* Eksentrik (SRBE) memiliki beberapa tipe seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8 berikut ini:



a = Link

b = beam segment outside of line

c = diagonal brace

d = column

Gambar 3. 8 Tipe sistem rangka *bracing* eksentrik (SRBE)

I. Sistem sambungan pada Struktur portal

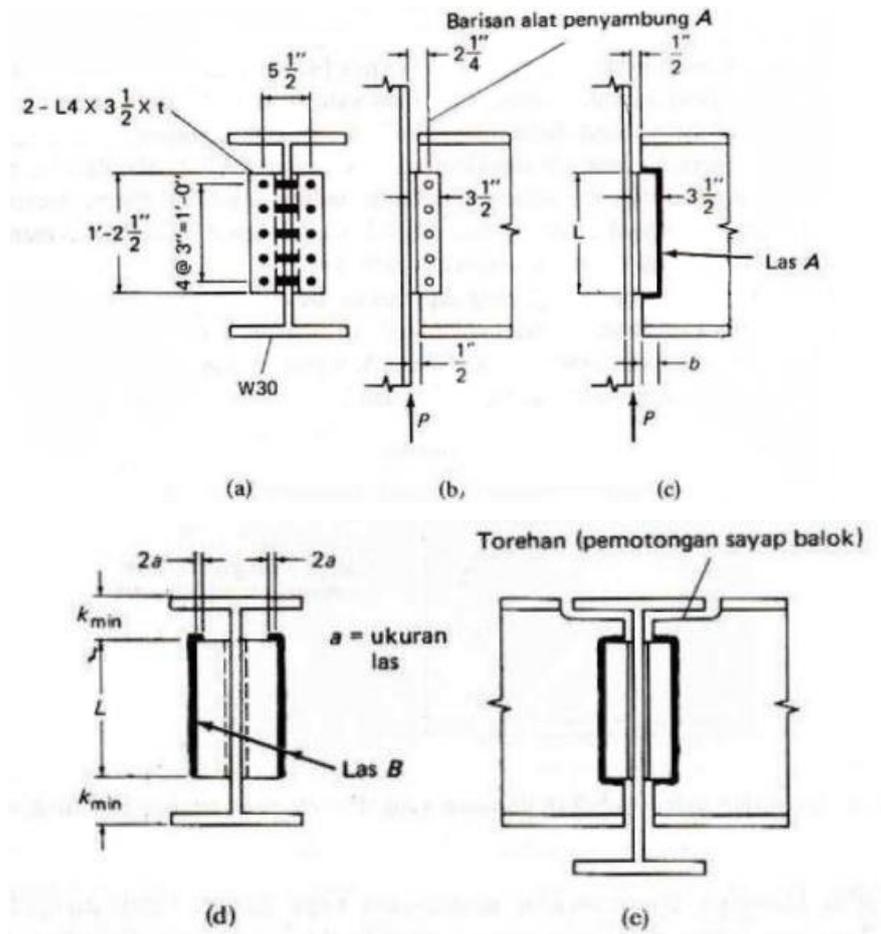
Setiap struktur adalah gabungan dari bagian-bagian tersendiri atau batang-batang yang harus disambung bersama dengan beberapa cara. Sambungan terdiri dari komponen sambungan (pelat pengisi, pelat buhul, pelat pendukung, dan pelat penyambung) dan alat pengencang (baut dan las).

Sambungan di dalam struktur baja merupakan bagian yang tidak bisa diabaikan begitu saja, karena kegagalan pada sambungan dapat mengakibatkan kegagalan struktur secara keseluruhan. Kegagalan dalam sambungan tersebut dapat mengakibatkan perubahan fungsi struktur bangunan dan yang paling berbahaya adalah keruntuhan pada struktur bangunan tersebut. Sehingga untuk mencegah hal itu maka kekuatan dan kekakuan sambungan tersebut harus baik. Secara umum sambungan memiliki fungsi untuk memindahkan gaya-gaya yang bekerja pada elemen-elemen struktur yang akan disambung.

Dalam SNI 1729:2015, desain sambungan untuk konstruksi baja dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu sambungan Sederhana dan Sambungan Momen.

1. Sambungan Sederhana

Sambungan sederhana merupakan sambungan yang mengabaikan adanya momen. Pada analisis struktur sambungan sederhana dianggap memungkinkan terjadinya rotasi relatif tidak terkekang antara elemen yang tersambung bercabang. Sambungan sederhana harus mempunyai kapasitas rotasi yang cukup untuk mengakomodasi rotasi perlu yang ditentukan melalui analisis struktur. Hubungan balok kolom yang menggunakan sambungan sederhana ditunjukkan pada Gambar 3.9



Gambar 3. 9 Sambungan sederhana
(Sumber : Salmon dkk, 1995)

2. Sambungan Momen

Sambungan momen dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu sambungan momen Tertahan Penuh (TP) dan sambungan momen Tertahan Sebagian (TS).

a. Sambungan Momen Tertahan Penuh (TP)

Sambungan momen tertahan penuh menyalurkan momen dengan rotasi yang boleh diabaikan antara komponen struktur yang tersambung. Pada analisis struktur, sambungan ini diasumsikan untuk tidak mengalami rotasi relatif. Suatu sambungan TP harus memiliki kekuatan dan kekakuan untuk mempertahankan sudut antara komponen struktur yang tersambung pada kondisi batas kekuatan.

b. Sambungan Momen Tertahan Sebagian (TS)

Sambungan momen tertahan sebagian mampu menyalurkan momen, tetapi rotasi antara komponen struktur yang tersambung tidak boleh diabaikan. Pada analisis struktur harus mencakup karakteristik respon gaya-deformasi sambungan. Elemen komponen sambungan TS kekuatan, kekakuan dan kapasitas deformasi yang cukup pada kondisi batas kekuatan.

J. Alat Penyambung Konstruksi Baja

Sambungan di dalam struktur baja merupakan bagian yang tidak bisa diabaikan begitu saja, karena kegagalan pada sambungan dapat mengakibatkan kegagalan struktur secara keseluruhan. Pada umumnya sambungan berfungsi untuk memindahkan gaya-gaya yang bekerja pada elemen-elemen struktur yang akan disambung, sambungan dibuat karena keterbatasan bahan yang tersedia serta kemudahan dalam pengangkutan

Jenis-jenis sambungan struktur baja yang digunakan yaitu berupa pengelasan serta sambungan yang menggunakan alat penyambung berupa paku keling (*rivet*) dan baut. Alat-alat sambung yang biasa digunakan dalam konstruksi baja adalah sebagai berikut :

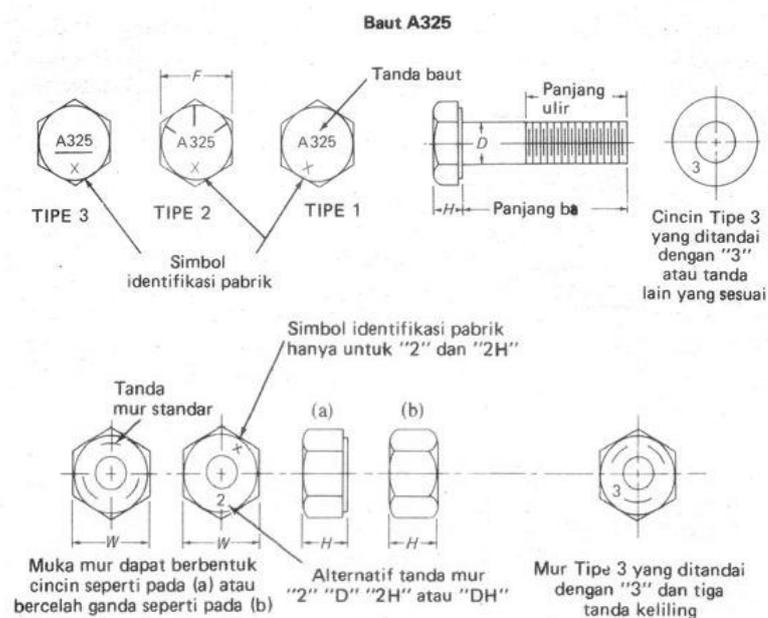
1. Baut

Baut adalah alat sambung dengan batang bulat dan berulir dimana salah satu ujungnya dibentuk kepala baut dan ujung yang lain dipasang mur/pengunci. Tipe baut dibagi menjadi dua yaitu baut tipe friksi dan tipe tumpu. Pada baut tipe friksi kekuatan baut didapat dari gesekan yang terjadi antara pelat atau batang yang disambung. Sedangkan untuk baut tipe tumpu kekuatan didapat dari adanya gaya tumpu pada bidang kontak antara baut dengan pelat yang disambung.

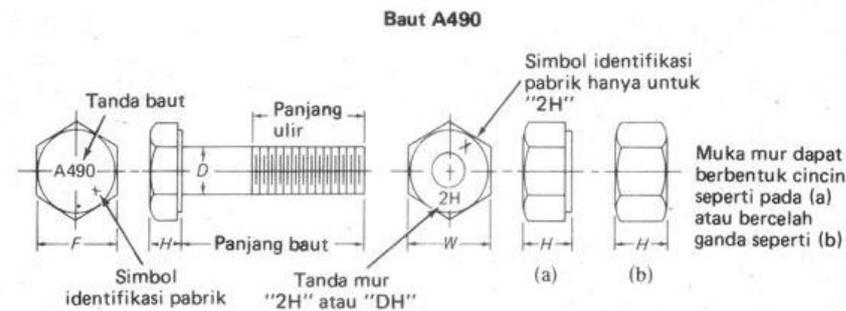
Menurut Salmon dkk, 1997. Baut yang umum digunakan dalam sambungan pada struktur baja adalah baut yang memiliki mutu tinggi. Dua

jenis utama baut mutu tinggi diantaranya adalah baut dengan tipe A325 dan A490. Baut ini memiliki kepala berbentuk segienam yang tebal dan digunakan dengan mur segienam yang setengah halus (*semifinished*) dan tebal seperti yang dapat ditunjukkan pada Gambar 3.10 . Bagian berulirnya lebih pendek dari pada baut non-struktural dan dapat dipotong atau digiling (*rolled*). Diameter baut kekuatan tinggi berkisar antara 1/2 dan 1 1/2 inci (3 inci untuk A449). Diameter yang paling sering digunakan pada konstruksi gedung adalah 3/4 inci dan 7/8 inci, sedang ukuran yang paling umum dalam perencanaan jembatan adalah 7/8 inci dan 1 inci.

Baut kekuatan tinggi dikencangkan (*tightened*) untuk menimbulkan tegangan tarik yang ditetapkan pada baut sehingga terjadi gaya jepit (*klem/clamping force*) pada sambungan. Oleh karena itu, pemindahan beban kerja yang sesungguhnya pada sambungan terjadi akibat adanya gesekan (*friksi*) pada potongan yang disambung. Sambungan dengan baut kekuatan tinggi dapat direncanakan sebagai tipe geser (*friction type*), bila daya tahan gelincir (*slip*) yang tinggi dikehendaki atau sebagai tipe tumpu (*bearing type*), bila daya tahan gelincir yang tinggi tidak dibutuhkan.



Gambar 3. 10 Dimensi untuk jenis baut mutu tinggi A325 dan A490
(Sumber : Salmon dkk, 1997)

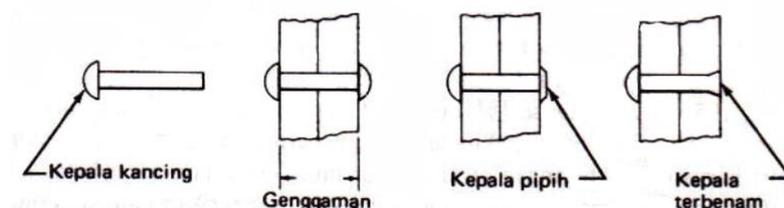


Gambar 3. 11 Lanjutan dimensi untuk jenis baut mutu tinggi A325 dan A490
(Sumber : Salmon dkk, 1997)

2. Paku keling

Menurut Salmon dkk, 1997. Paku keling dibuat dari baja batangan dan memiliki bentuk silinder dengan kepala di salah satu ujungnya. Baja paku keling adalah baja karbon sedang dengan identifikasi ASTM A502 Mutu I ($F_v = 28 \text{ ksi}$) (1190 MPa) dan Mutu 2 ($F_y = 38 \text{ ksi}$) (260 MPa), serta kekuatan leleh minimum yang ditetapkan didasarkan pada bahan baja batangan. Pembuatan dan pemasangan paku keling menimbulkan perubahan sifat mekanis.

Pengelasan (*riveting*) adalah metoda penyambungan yang dilakukan dengan memasukkan pasak logam yang duktail (*ductail*) ke dalam lubang pada potongan yang disambung. Pasak ini memiliki kepala di setiap ujung untuk mencegah terpisahnya sambungan. Jenis paku keling yang umum digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.12



Gambar 3. 12 Jenis paku keling
(Sumber : Salmon dkk, 1997)

Proses pemasangan paku keling berbeda dengan proses pemasangan paku pada umumnya karena dalam proses pemasangan ini membutuhkan

sekitar 4 atau 5 orang yang sudah berpengalaman. Prosesnya yaitu Pertama paku keling dipanasi hingga warnanya menjadi merah muda kemudian paku keling dimasukkan ke dalam lubang, dan kepalanya ditekan sambil mendesak ujung lainnya sehingga terbentuk kepala lain yang bulat. Selama proses ini, tangkai (*shank*) paku keling mengisi lubang (tempat paku dimasukkan) secara penuh atau hampir penuh, sehingga menghasilkan gaya jepit (klem). Namun, besarnya jepitan akibat pendinginan paku keling bervariasi dari satu paku keling ke lainnya, sehingga tidak dapat diperhitungkan dalam perencanaan. Paku keling juga dapat dipasang pada keadaan dingin tetapi akibatnya gaya jepit tidak terjadi karena paku tidak menyusut setelah dipasang.

3. Sambungan Las

Menyambung baja dengan las adalah menyambung dengan cara memanaskan baja hingga mencapai suhu lumer (meleleh) dengan ataupun tanpa bahan pengisi, yang kemudian setelah dingin akan menyatu dengan baik.

Menurut *Welding Handbook*, proses pengelasan adalah "proses penyambungan bahan yang menghasilkan peleburan bahan dengan pemanasannya hingga suhu yang tepat dengan atau tanpa pemberian tekanan dan dengan atau tanpa pemakaian bahan pengisi." Energi pembangkit panas dapat dibedakan menurut sumbernya: listrik, kimiawi, optis, mekanis, dan bahan semikonduktor. Panas digunakan untuk mencairkan logam dasar dan bahan pengisi agar terjadi aliran bahan (atau terjadi peleburan). Selain itu, panas dipakai untuk menaikkan daktilitas (*ductility*) sehingga aliran plastis dapat terjadi walaupun jika bahan tidak mencair; lebih jauh lagi, pemanasan membantu penghilangan kotoran pada bahan.

Proses pengelasan yang paling umum digunakan untuk mengelas baja struktural yaitu dengan memakai :

a. Las karbid (*Las otogen*)

Pengelasan yang menggunakan bahan pembakar dari gas oksigen (zat asam) dan gas *acetylene* (gas karbid). Dalam konstruksi baja las ini hanya

untuk pekerjaan-pekerjaan ringan atau konstruksi sekunder, seperti; pagar besi, teralis dan sebagainya.

b. Las listrik (*Las lumer*)

Pengelasan yang menggunakan energi listrik. Untuk pengelasannya diperlukan pesawat las yang dilengkapi dengan dua buah kabel, satu kabel dihubungkan dengan penjepit benda kerja dan satu kabel yang lain dihubungkan dengan tang penjepit elektrode (batang las).

Dari ketiga penyambungan tersebut, penyambungan dengan las adalah yang paling kaku tetapi memerlukan biaya yang relatif mahal dibandingkan dengan sambungan lainnya. Sedangkan sambungan dengan paku keling lebih kaku dibandingkan dengan sambungan baut.

K. Metode Elemen Hingga

1. Analisis Struktur dengan Metode Elemen Hingga

Untuk mengetahui suatu perilaku struktur dengan dimensi, properti bahan, dan jenis tumpuan tertentu dalam menahan beban yang terjadi, dapat didekati dengan pemodelan secara numerik dengan metode elemen hingga yang mana suatu struktur dibagi menjadi elemen – elemen kecil dengan bentuk geometri tertentu sesuai kasus yang terjadi. Di era komputerisasi seperti sekarang ini, telah banyak dikembangkan *software* berbasis metode elemen hingga yang dapat digunakan dengan cukup mudah. Adapun *software* yang dimaksud antara lain *software Adina, midas NFX, ANSYS, RFEM, Lusas, NASTRAN, LISA-FEA, ABAQUS*, dan lain – lain. Diharapkan dengan adanya *software* tersebut, permasalahan pemodelan suatu elemen struktur dengan metode elemen hingga dapat diselesaikan dengan mudah dan cepat. Hasil pemodelan suatu elemen struktur yang akurat dengan prinsip metode elemen hingga, akan memiliki derajat ketelitian yang jauh lebih baik jika dibandingkan dengan penyelesaian analisis dengan cara lain.

Persamaan umum dalam metode elemen hingga :

$$[K] \{U\} = \{F\} \quad \dots\dots\dots (3. 4)$$

dimana :

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

Secara umum, suatu struktur yang kontinu terdiri dari *material point* yang tak terhingga banyaknya, dan oleh karena itu struktur tersebut mempunyai derajat kebebasan *degree of freedom* yang tak terhingga banyaknya pula (Suhendro, 2000). Untuk mendekati suatu sistem yang kontinu dengan menggunakan suatu sistem yang berhingga (*finite*), maka dikembangkan metode *Rayleigh–Ritz* (1909). Metode *Rayleigh–Ritz* merupakan suatu metode pendekatan dimana suatu sistem yang kontinu menjadi suatu sistem yang memiliki derajat kebebasan yang berhingga. Metode ini dapat digunakan untuk analisis deformasi, stabilitas, perilaku non linier struktur, dan analisis dinamik.

Kesulitan utama yang timbul dalam pemakaian metode *Rayleigh–Ritz* adalah memilih fungsi – fungsi kontinu $\phi_1, \dots, \phi_n, \psi_1, \dots, \psi_n$, dan η_1, \dots, η_n pada persamaan, yang selanjutnya disebut *shape functions*.

$$\begin{aligned} u &= a_1 \cdot \phi_1(x,y,z) + a_2 \cdot \phi_2(x,y,z) + \dots\dots\dots + a_n \cdot \phi_n(x,y,z) \\ v &= b_1 \cdot \psi_1(x,y,z) + a_2 \cdot \psi_2(x,y,z) + \dots\dots\dots + b_n \cdot \psi_n(x,y,z) \quad \dots\dots\dots (3. 5) \\ w &= c_1 \cdot \eta_1(x,y,z) + a_2 \cdot \eta_2(x,y,z) + \dots\dots\dots + b_n \cdot \eta_n(x,y,z) \end{aligned}$$

Supaya Metode *Rayleigh–Ritz* dapat diaplikasikan pada analisis struktur dengan bentuk geometri yang tak teratur sekalipun, maka ada prinsip-prinsip yang harus dipenuhi antara lain sebagai berikut :

- a. Karena fungsi $u = u(x,y,z)$, $v = v(x,y,z)$, $w = w(x,y,z)$ adalah *continuous*, maka bila diamati variasinya pada elemen kecil yang merupakan bagian dari domain problem atau strukturnya, variasi tersebut cukup dekat untuk

dinyatakan dalam fungsi fungsi sederhana seperti konstan atau *polynomial* berorde rendah dalam x,y,z.

- b. Bila domain masalah strukturnya dibagi menjadi banyak sekali elemen – elemen kecil yang bentuk geometrinya cukup sederhana, maka dengan digunakan *polynomial* sederhana sudah memberikan hasil yang cukup teliti untuk mendekati fungsi *displacement* u, v, w pada masing masing elemen kecil tersebut.
- c. Jika *domain problem* atau strukturnya dibagi menjadi N elemen, maka energi potensial total (π) dari sistem tersebut merupakan jumlah dari energi potensial dari masing masing elemen (π_e) dengan persamaan sebagai berikut :

$$\pi = \sum_{e=1}^N \pi_e \quad \dots\dots\dots (3. 6)$$

- d. Berdasarkan prinsip – prinsip di atas dapat dipakai untuk memperoleh perkiraan yang dekat dari energi potensial total dengan cara menjumlah seluruh π_e yang dimiliki oleh masing–masing elemen. Selanjutnya, prinsip – prinsip di atas bersama – sama dengan prinsip metode matriks, akan dikombinasikan dan dikembangkan menjadi metode elemen hingga.

2. Jenis Elemen 3–*Dimensional Solid*

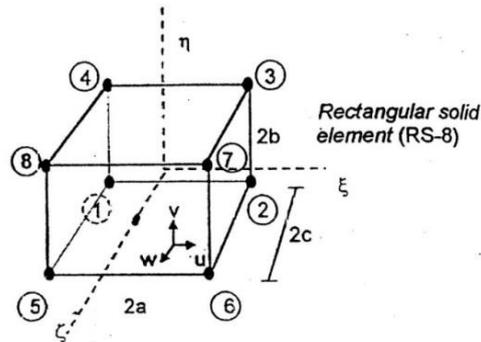
Dalam analisis struktur metode elemen hingga, elemen sangat mempengaruhi perhitungan, dalam penelitian ini *castellated beam* diidealisasikan sebagai elemen 3–*Dimensional Solid* dikarenakan mempunyai sayap yang lebar dan terbuat dari material solid baja.

Menurut Suhendro (2000), jenis elemen pada 3–*Dimensional solid* yang paling banyak digunakan adalah 3 macam yaitu :

a. *Element Rectangular Solid* (RS–8)

Merupakan jenis elemen *Hexahedral*, yang bentuk elemen ini seperti bata (*brick*) yang mempunyai titik nodal minimal 8 buah. Elemen ini mempunyai 3 *degree of freedom* pada setiap titik nodalnya, sehingga

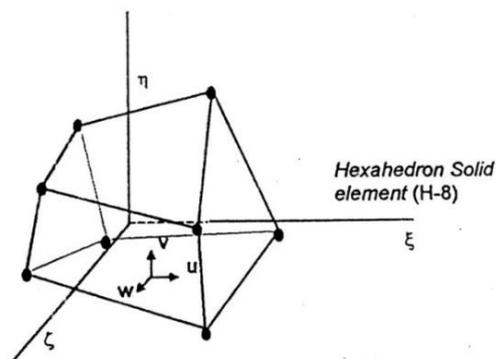
secara keseluruhan elemen ini mempunyai 24 *degree of freedom*. Pada pengaplikasiannya, elemen ini hanya digunakan untuk menganalisis bentuk struktur yang beraturan saja karena bentuknya yang menyerupai kubus. Gambar elemen ini dapat dilihat pada Gambar 3.13



Gambar 3. 13 *Element rectangular solid (RS-8)*
(Sumber: Suhendro, 2000)

b. *Elemen Hexahedron Solid (H-8)*

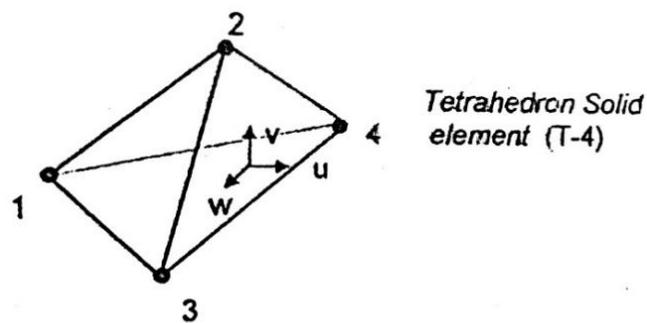
Merupakan jenis elemen *Hexahedral*, yang mana elemen ini merupakan pengembangan dari elemen *Rectangular Solid (RS-8)*, mempunyai 6 sisi (*hexahedron side*) tapi bentuknya tidak berbentuk kubus sempurna. Sama seeti halnya dengan elemen *Rectangular Solid*, maka elemen ini mempunyai 3 *degree of freedom* pada setiap nodalnya, sehingga setara keseluruhan elemen ini juga mempunyai 24 *degree of freedom*. Elemen ini digunakan untuk menganalisis bentuk struktur yang agak beraturan saja. Gambar elemen ini dapat dilihat pada Gambar 3.14



Gambar 3. 14 *Element hexahedron solid (H-8)*
(Sumber: Suhendro, 2000)

c. Elemen Tetrahedron Solid (T-4)

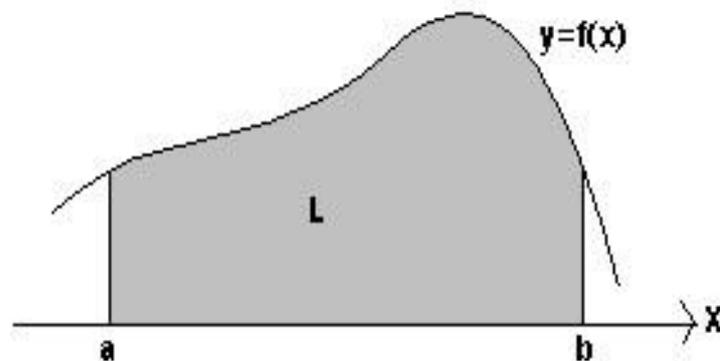
Elemen ini mempunyai 4 sisi, yang mana elemen ini baik digunakan untuk menganalisis struktur yang geometrinya tidak beraturan. Pada penelitian ini, elemen *Tetrahedron Solid* inilah yang digunakan untuk mendiskretisasi balok kastela yang geometrinya tidak teratur khususnya pada bagian sekitar bukaan. Adapun bentuk geometri dari elemen ini dapat dilihat pada Gambar 3.15



Gambar 3. 15 *Element tetrahedron solid (T-4)*
(Sumber: Suhendro, 2000)

L. Integrasi Numerik

Perhitungan integral adalah perhitungan dasar yang digunakan dalam kalkulus, dalam banyak keperluan. Integral ini secara definitif digunakan untuk menghitung luas daerah yang dibatasi oleh fungsi $y = f(x)$ dan sumbu x (Triatmojo, 2010). Perhatikan pada Gambar 3.16 berikut



Gambar 3. 16 Integral suatu fungsi

Luas daerah yang diarsir L tersebut dapat dihitung dengan :

$$I = \int_a^b f(x) dx \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

Pada persamaan (3.8) yang dimaksud dengan integral adalah nilai total atau luasan yang dibatasi oleh fungsi $f(x)$ dan sumbu x , serta antara batas $x=a$ dan $x=b$. Dalam integral analitis, Persamaan (3.9) dapat diselesaikan menjadi :

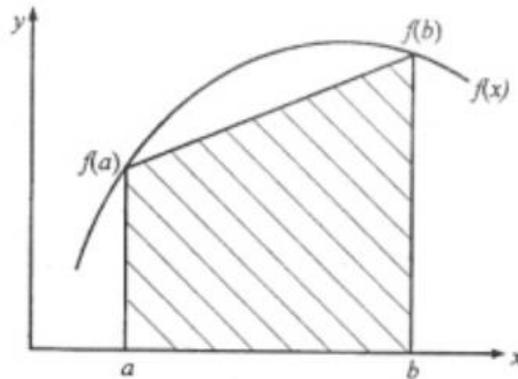
$$\int_a^b f(x) dx = [F(x)]_a^b = F(b) - F(a) \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

Metode integral numerik merupakan integral tertentu yang didasarkan pada perhitungan perkiraan. Hitungan perkiraan tersebut dilakukan dengan mendekati fungsi yang diintegrasikan dengan fungsi polynomial yang diperoleh berdasarkan data yang telah tersedia. Bentuk paling sederhana adalah apabila tersedia dua titik data yang dapat dibentuk fungsi polynomial order satu yang merupakan garis lurus (linier).

1. Metode Integral Trapezoida

Pada metode trapezoida ini setiap bagian dinyatakan sebagai trapezium. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.17 luasan bidang di bawah fungsi $f(x)$ antara batas $x=a$ dan $x=b$ didekati oleh luas satu trapezium yang terbentuk oleh garis lurus yang menghubungkan $f(a)$ dan $f(b)$ dan sumbu x serta antara $x=a$ dan $x=b$. Pendekatan ini dilakukan dengan satu pias (Trapezium). Menurut rumus geometri, luas trapezium adalah lebar kali tinggi rerata, yang berbentuk :

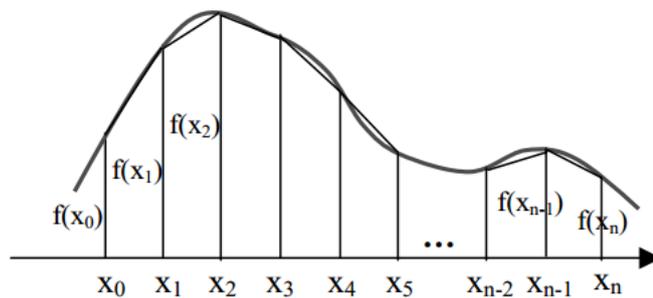
$$I = (b - a) \frac{f(a)+f(b)}{2} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$



Gambar 3. 17 Metode trapesium satu pias
(Sumber : Triatmojo, 2010)

Pada Gambar 3.17 terlihat bahwa penggunaan garis lurus untuk mendekati garis lengkung menyebabkan terjadinya kesalahan sebesar luasan yang tidak diarsir.

Dari penjelasan diatas dapat diketahui bahwa pendekatan dengan menggunakan metode satu pias (trapesium) dapat menimbulkan kesalah sebesar luasan yang tidak diarsir. Untuk mengurangi kesalahan yang terjadi maka kurva lengkung didekati oleh sejumlah garis lurus, sehingga terbentuk banyak pias seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.18. Luas bidang adalah jumlah dari luas beberapa pias tersebut, semakin kecil pias yang digunakan maka hasil yang didapat semakin teliti.



Gambar 3. 18 Metode trapesium banyak pias
(Sumber : Triatmojo, 2010)

Bata-batas pias diberi notasi :

$$x_0 = a, x_1, x_2, \dots, x_n = b \dots\dots\dots(3. 10)$$

Integral total dapat ditulis dalam bentuk :

$$I = \int_{x_0}^{x_1} f(x)dx + \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx + \dots + \int_{x_{n-1}}^{x_n} f(x)dx \dots\dots\dots(3. 11)$$

Kemudian Substitusi persamaan (3.10) ke dalam persamaan (3.11) dan akan didapat persamaan :

$$I = \Delta x \frac{f(x_1)+f(x_0)}{2} + \Delta x \frac{f(x_2)+f(x_1)}{2} + \dots + \Delta x \frac{f(x_n)+f(x_{n-1})}{2} \dots\dots\dots(3. 12)$$

M. Analisis Beban Gempa

Metode analisis untuk mengetahui distribusi vertikal gaya gempa yaitu analisis statik ekuivalen, analisis dinamik riwayat waktu (*time history*), dan analisis dinamik ragam respon spektra. Perbedaan antara analisis dinamik dengan statik ekuivalen yaitu sebagai berikut:

1. Analisis statik ekuivalen
 - a. Lebih praktis
 - b. Penyederhanaan dari beban gempa dinamik, gaya horizontal F bekerja pada pusat massa bangunan dan bersifat statik
 - c. Hanya memperhitungkan kontribusi dari *mode* ke-1
 - d. Hanya cocok untuk bangunan yang cenderung kaku (bangunan rendah)
 - e. Pengaruh gempa rencana pada bangunan regular (ketinggian tidak lebih dari 40 m atau 10 tingkat) dapat ditinjau sebagai pengaruh beban gempa statik ekuivalen. (Ketentuan SNI 1726-2002 dan SNI 1726-2012)

2. Analisis dinamik
 - a. Sangat rumit (tidak praktis)
 - b. Butuh banyak waktu
 - c. Lebih mendekati kondisi sesungguhnya
 - d. Pengaruh gempa rencana pada bangunan irregular (ketinggian > 40 m atau 10 tingkat) harus ditinjau sebagai pengaruh beban dinamik. (Ketentuan SNI 1726-2002 dan SNI 1726-2012)

Analisis statik ekuivalen adalah salah satu metode menganalisis struktur gedung terhadap pembebanan gempa dengan menggunakan beban gempa nominal statik ekuivalen. Menurut Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung (SNI 03-1726-2002), analisis statik ekuivalen dapat dilakukan pada struktur gedung beraturan dimana struktur gedung ditetapkan sebagai struktur gedung beraturan. Sedangkan untuk struktur gedung tidak beraturan, maka pengaruh gempa rencana harus ditinjau sebagai pengaruh pembebanan gempa dinamik dimana analisisnya harus dilakukan berdasarkan analisis respon dinamik. Pada SNI 1726:2012, syarat-syarat perencanaan struktur bangunan gedung dan non gedung tahan gempa yang ditetapkan dalam standar ini tidak berlaku untuk bangunan sebagai berikut :

- a. Struktur bangunan dengan sistem struktur yang tidak umum atau yang masih memerlukan pembuktian tentang kelayakannya;
- b. Struktur jembatan kendaraan lalu lintas (jalan raya dan kereta api), struktur reaktor energi, struktur bangunan keairan dan bendungan, struktur menara transmisi listrik, serta struktur anjungan pelabuhan, anjungan lepas pantai dan struktur penahan gelombang.

Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan untuk menghitung static ekuivalen :

1. Menghitung berat total struktur (W_t)

Berat total struktur bangunan dihitung dengan memperhitungkan semua komponen bangunan yang ada di atasnya termasuk berat sendiri struktur (balok, kolom, dan lain-lain), beban mati, beban hidup, dan seluruh elemen vertikal yang membebani pada setiap struktur bangunan di atasnya.

Tabel 3. 2 Berat sendiri material bangunan
(Sumber: Setiawan, A. 2008)

No	Material	Berat Satuan
1.	Baja	7850 kg/m ³
2.	Beton	2200 kg/m ³

Tabel 3. 3 Lanjutan berat sendiri material bangunan
(Sumber: Setiawan, A. 2008)

No	Material	Berat Satuan
3.	Beton Bertulang	2400 kg/m ³
4.	Kayu (kelas 1)	1000 kg/m ³
5.	Pasir (kering udara)	1600 kg/m ³

Tabel 3. 4 Beban hidup pada lantai gedung
(Sumber: setiawan, A. 2008)

No	Kegunaan Bangunan	Berat
1.	Lantai dan tangga rumah tinggal sederhana	125 kg/m
2.	Lantai sekolah, ruang kuliah, kantor, toko, toserba, restoran, hotel, asrama, dan rumah sakit	250 kg/m
3.	Lantai ruang olahraga	400 kg/m
4.	Lantai pabrik, bengkel, gudang, perpustakaan, ruang arsip, toko buku, ruang mesin, dan lain-lain	400 kg/m
5.	Lantai gedung parkir bertingkat, untuk lantai bawah	800 kg/m

2. Klasifikasi Bangunan

Berdasarkan pasal 4.1.2 SNI 1726:2012, Untuk berbagai kategori resiko struktur bangunan dan non gedung sesuai Tabel 1 pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan I_e menurut Tabel 2. Khusus untuk struktur bangunan dengan kategori risiko IV, jika dibutuhkan pintu masuk untuk operasional dari struktur yang bersebelahan, maka struktur bangunan yang bersebelahan tersebut harus sesuai dengan desain kategori risiko IV.

Tabel 3. 5 Kategori resiko bangunan gedung dan non gedung untuk beban gempa (SNI 1726:2012, Tabel 2)

Jenis pemanfaatan	Kategori resiko
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan b. Fasilitas sementara c. Gudang penyimpanan d. Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I
<p>Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Perumahan b. Rumah toko dan rumah kantor c. Pasar d. Gedung perkantoran e. Gedung apartemen/ rumah susun f. Pusat perbelanjaan/ mall g. Bangunan industry h. Fasilitas manufaktur Pabrik 	II
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Bioskop b. Gedung pertemuan c. Stadion d. Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat e. Fasilitas penitipan anak f. Penjara g. Bangunan untuk orang jompo 	III

Tabel 3. 6 Lanjutan kategori resiko bangunan gedung dan non gedung untuk beban gempa (SNI 1726:2012, Tabel 2)

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
<p>Gedung dan non gedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Pusat pembangkit listrik biasa b. Fasilitas penanganan air c. Fasilitas penanganan limbah d. Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	III
<p>Gedung dan non gedung yang ditunjukkan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Bangunan-bangunan monumental b. Gedung sekolah dan fasilitas Pendidikan c. Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat d. Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat e. Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya 	IV

Tabel 3. 7 Lanjutan kategori resiko bangunan gedung dan non gedung untuk beban gempa (SNI 1726:2012, Tabel 2)

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
f. Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat g. Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat h. Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.	IV

Tabel 3. 8 Faktor keutamaan gempa (SNI 1726:2012, Tabel 2)

Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,5

3. Menentukan taksiran waktu gempa alami (T) secara empiris

Dalam pedoman SNI 1726:2012 perencanaan ketahanan gempa untuk rumah dan gedung disebutkan bahwa untuk keperluan analisis pendahuluan struktur dan pendimensian dari unsur-unsurnya, waktu geter alami (T_1 dalam detik) struktur gedung berupa portal tanpa unsur-unsur pengaku tanpa simpangan dapat ditentukan dengan rumus pendekatan sebagai berikut :

$$T = Ct (h_n)^x \dots\dots\dots(3. 13)$$

dengan :

h_n ketinggian struktur dalam (m), di atas dasar sampai tingkat tertinggi struktur, dan koefisien C_t dan x ditentukan dari Tabel 15 dalam SNI 1726-2012

Tabel 3. 9 Nilai parameter periode pendekatan C_t dan x
(SNI 1726-2012, Tabel 15)

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen dimana rangka memikul 100 persen gaya gempa yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya gempa:		
Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

4. Wilayah Gempa dan Respon Spektrum

Parameter spektrum respon kota Yogyakarta berdasarkan acuan pada http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011. Dari website puskim tersebut didapatkan nilai faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik (S_s) dan periode 1 detik (S_1). Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v). Parameter spektrum respons percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) Yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan perumusan berikut ini:

$$S_{MS} = F_a \times S_s \quad \dots\dots\dots(3. 14)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \quad \dots\dots\dots(3. 15)$$

Nilai Koefisien F_a dan F_v didapat dari Tabel 4 dan Tabel 5 pada SNI 1726:2012 pasal 6.2,

Tabel 3. 10 Koefisien situs, F_a (SNI 1726:2012, Tabel 4)

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T=0,2$ detik, S_s				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s \leq 0,5$	$S_s \leq 0,75$	$S_s \leq 1,0$	$S_s \leq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	SS^b				

Tabel 3. 11 Koefisien situs, F_v (SNI 1726:2012, Tabel 4)

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa MCE_R terpetakan pada periode 1 detik, S_1				
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 \leq 0,2$	$S_1 \leq 0,3$	$S_1 \leq 0,4$	$S_1 \leq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF	SS^b				

Parameter percepatan spektral desain untuk perioda pendek, S_{DS} dan pada peroda 1 detik S_{D1} , harus ditentukan melalui persamaan sebagai berikut :

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} \quad \dots\dots\dots(3. 16)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} \quad \dots\dots\dots(3. 17)$$

5. Perhitungan Koefisien Respon Seismik

Koefisien respon seismic atau C_S , harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut :

$$C_S = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots(3. 18)$$

Keterangan.

S_{DS} : parameter respon spektral percepatan deain pada periode pendek

R : Faktor modifikasi respon dalam Table 9 (SNI 1726-2012)

I_e : Faktor keutamaan gempa

Nilai C_S yang dihitung sesuai dengan persamaan 3.18 tidak perlu melebihi berikut ini :

$$C_S = \frac{S_{DS}}{T_a\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots(3. 19)$$

C_S harus tidak kurang dari

$$C_S = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \dots\dots\dots(3. 20)$$

6. Perhitungan Geser Dasar Seismik

Dalam (SNI 1726-2002 dan 1726-2012) disebutkan bahwa struktur bangunan gedung beraturan dapat direncanakan terhadap pembebanan gempa nominal akibat pengaruh gempa rencana dalam arah masing-masing sumbu utama denah struktur tersebut yaitu berupa beban nominal statik ekuivalen. Maka dapat dirumuskan gaya geser dasar menurut persamaan sebagai berikut:

$$V = \frac{C \cdot I}{R} \cdot W_t \text{ atau } V = C_S \times W_t \dots\dots\dots(3. 21)$$

dengan :

V = gaya geser dasar gempa

C = koefisien gempa dasar

R = koefisien reduksi gempa

W_t = berat total struktur

I = factor keutamaan struktur

7. Distribusi Gaya Gempa (F_i)

Dalam SNI 176-2012 pasal 7.8.3 tentang distribusi vertikal gaya gempa yang menyatakan bahwa, gaya gempa lateral (F_x) (kN) yang timbul di semua tingkat ditentukan berdasarkan persamaan berikut

$$F_x = C_{vx} \times V \quad \dots\dots\dots(3. 22)$$

dan

$$C_{vx} = \frac{W_x \cdot h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot h_i^k} \quad \dots\dots\dots(3. 23)$$

atau,

$$F_x = \frac{W_x \cdot h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot h_i^k} \times V \quad \dots\dots\dots(3. 24)$$

Keterangan :

C_{vx} = Faktor distribusi vertical

V = gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur, dinyatakan dalam kilonewton (kN)

W_i dan W_x = bagian berat seismic efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x

h_i dan h_x = tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x , dinyatakan dalam meter (m)

k = eksponen yang terkait dengan perioda struktur sebagai berikut:
 untuk struktur yang mempunyai periode sebesar 0,5 detik atau kurang, maka nilai $k = 1$, untuk struktur yang mempunyai periode sebesar 2,5 detik atau lebih, maka nilai $k = 2$, untuk struktur yang mempunyai periode sebesar 0,5 detik dan 2,5 detik, maka nilai k harus sebesar 2 atau harus ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2.

8. Kontrol Periode Fundamental Struktur T

Waktu getar alami fundamental struktur gedung beraturan dalam arah masing-masing sumbu utama dapat ditentukan dengan rumus *Rayleigh* sebagai berikut :

$$T_I = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i d_i^2}{g \sum_{i=1}^n F_i d_i}} \dots\dots\dots (3. 25)$$

dengan :

W_i = bagian berat seismic efektif total (W) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat ke i

d_i = merupakan simpangan horizontal lantai pada tingkat ke i

F_i = merupakan gaya horizontal lantai pada tingkat ke i

g = percepatan gravitasi 981 cm/detik².