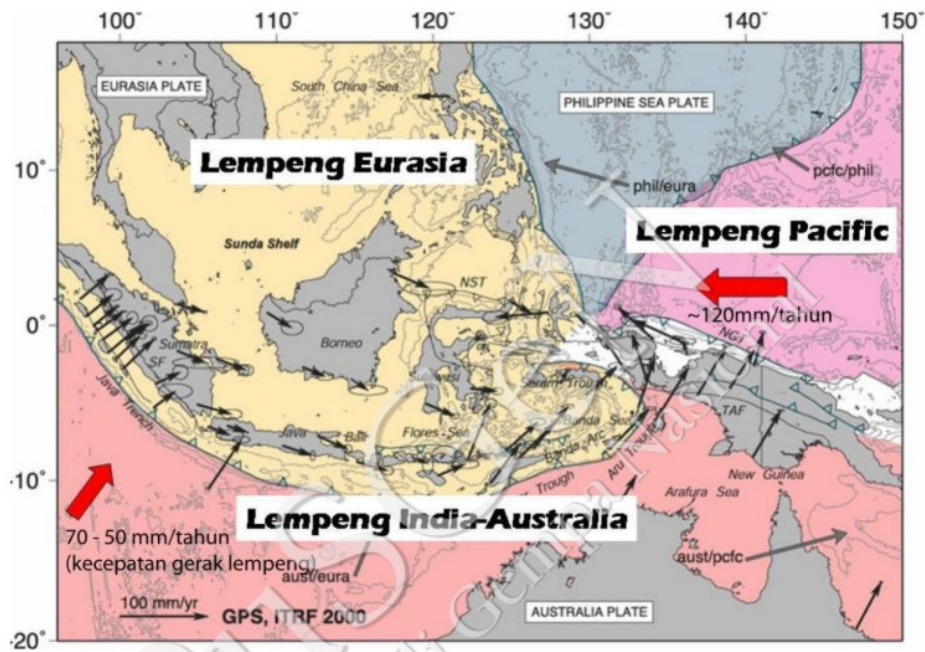


BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Gempa Bumi

Menurut Hidayat & Widiyansantoso (1997), gempa bumi adalah bencana alam yang terjadi secara tiba-tiba dan menghancurkan semua yang ada di Bumi, termasuk manusia, harta, dan benda lainnya. Mengingat bahwa Indonesia terdiri dari pertemuan tiga lempeng tektonik yang membentuk jalur gempa bumi dan jalur vulkanik, oleh karena itu Indonesia sering menjadi sasaran gempa bumi. Berikut merupakan peta wilayah tektonik Indonesia yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Peta Tektonik Indonesia

Sumber: Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN), 2017

Sebagai akibat dari proses tektonik dan vulkanik yang terjadi, gempa bumi sering terjadi di sebagian besar wilayah Indonesia, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Zona subduksi aktif yang terletak di bagian barat hingga timur Indonesia adalah salah satu sumber gempa bumi yang jelas. Selain itu, sisa energi dari tumbukan antar lempeng akan menyebabkan sesar di daratan atau lautan di beberapa pulau dan laut Indonesia.

3.1.1 Jenis Gempa Bumi Berdasarkan Penyebabnya

Gempa bumi dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis berdasarkan faktor penyebab terjadinya. Klasifikasi ini penting untuk memahami mekanisme terjadinya gempa serta dampaknya terhadap struktur bangunan dan lingkungan sekitarnya (Mahyar dkk, 2023).

1. Gempa Tektonik

Gempa tektonik merupakan jenis gempa yang disebabkan oleh pergerakan dan interaksi antar lempeng tektonik. Pergerakan ini dapat berupa tumbukan (*konvergen*), pergeseran (*transform*), maupun pemisahan (*divergen*). Akumulasi tegangan yang terjadi pada batas lempeng akan tersimpan dalam jangka waktu tertentu, hingga akhirnya dilepaskan secara tiba-tiba dalam bentuk energi gempa.

Gempa tektonik merupakan jenis gempa yang paling dominan terjadi di dunia, khususnya di wilayah yang berada pada pertemuan lempeng, seperti Indonesia yang terletak pada pertemuan lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Jenis gempa ini umumnya memiliki magnitudo besar dan berpotensi menimbulkan kerusakan yang signifikan.

2. Gempa Vulkanik

Gempa vulkanik adalah gempa yang terjadi akibat aktivitas gunung api, terutama pergerakan magma di dalam perut bumi. Pergerakan magma tersebut menyebabkan tekanan pada batuan di sekitarnya sehingga menimbulkan retakan dan getaran.

Gempa vulkanik biasanya terjadi sebelum, selama, atau setelah letusan gunung api. Intensitas gempa ini cenderung lebih kecil dibandingkan gempa tektonik, namun dapat menjadi indikator penting dalam memprediksi aktivitas erupsi gunung berapi.

3. Gempa Runtuhan

Gempa runtuh terjadi akibat runtuhnya lapisan batuan atau tanah, seperti pada gua, terowongan, atau daerah pertambangan. Proses runtuh ini menghasilkan getaran yang relatif kecil dan bersifat lokal. Gempa jenis ini umumnya tidak menimbulkan dampak yang luas, namun tetap perlu diperhatikan terutama pada daerah dengan aktivitas pertambangan atau kondisi geologi yang tidak stabil.

4. Gempa Tumbukan

Gempa tumbukan disebabkan oleh jatuhnya benda langit, seperti meteorit atau asteroid, ke permukaan bumi. Energi tumbukan yang sangat besar dapat menimbulkan gelombang kejut yang menyerupai gempa bumi. Meskipun demikian, kejadian gempa tumbukan sangat jarang terjadi sehingga kontribusinya terhadap aktivitas kegempaan global relatif kecil.

5. Gempa Buatan

Gempa buatan merupakan gempa yang disebabkan oleh aktivitas manusia, seperti peledakan bahan peledak, kegiatan pertambangan, pembangunan bendungan besar, maupun uji coba nuklir. Meskipun umumnya memiliki skala kecil, gempa buatan tetap dapat mempengaruhi kondisi geologi lokal dan dalam beberapa kasus dapat memicu terjadinya gempa yang lebih besar.

3.1.2 Jenis Gempa Bumi Berdasarkan Kedalaman Hiposentrum

Selain berdasarkan penyebabnya, gempa bumi juga diklasifikasikan berdasarkan kedalaman hiposentrum, yaitu titik sumber gempa di dalam bumi. Kedalaman hiposentrum berpengaruh terhadap besarnya energi yang sampai ke permukaan serta tingkat kerusakan yang ditimbulkan.

Hiposentrum merupakan titik awal terjadinya gempa yang berada di dalam kerak bumi, sedangkan titik di permukaan bumi yang tepat berada di atas hiposentrum disebut episentrum. Semakin dekat hiposentrum dengan

permukaan, maka energi yang dilepaskan akan semakin besar dirasakan di permukaan.

1. Gempa Dangkal

Gempa dangkal merupakan gempa yang memiliki kedalaman kurang dari 60 km dari permukaan laut rata-rata (*Mean Sea Level*). Gempa ini umumnya menimbulkan kerusakan yang paling besar karena energi gempa belum banyak mengalami pelemahan saat mencapai permukaan (Duha dkk, 2023).

2. Gempa Menengah

Gempa menengah terjadi pada kedalaman antara 60 km hingga 300 km. Getaran yang dihasilkan masih dapat dirasakan dengan cukup kuat, namun dampak kerusakannya tidak sebesar gempa dangkal (Duha dkk, 2023).

3. Gempa Dalam

Gempa dalam merupakan gempa yang terjadi pada kedalaman lebih dari 300 km di bawah permukaan laut rata-rata. Energi gempa pada kedalaman ini telah banyak teredam sebelum mencapai permukaan, sehingga umumnya tidak menimbulkan kerusakan yang signifikan (Duha dkk, 2023).

3.1.3 Getaran Tanah Selama Gempa Bumi

Ketika gelombang seismik merambat dari bidang patahan yang bergerak, terjadi interaksi berbagai jenis gelombang, yang dapat menggerakkan tanah secara vertikal dan horizontal. Akibat berat dan isi bangunan, struktur biasanya dirancang untuk menahan gaya gelombang vertikal yang signifikan. Selain itu, mereka biasanya diperkuat dengan standar keamanan tertentu untuk menahan gaya vertikal tambahan dari gempabumi.

Perencanaan bangunan pada daerah rawan gempa bumi harus memperhitungkan besarnya percepatan tanah (akselerasi) yang

ditimbulkan akibat gempa. Ketika gelombang seismik merambat melalui tanah, bangunan akan mengalami getaran baik secara vertikal maupun horizontal. Tingkat perubahan kecepatan gerakan tersebut dinyatakan dalam bentuk akselerasi, yang umumnya dinyatakan dalam satuan gravitasi (g), dengan nilai percepatan gravitasi sebesar $9,8 \text{ m/detik}^2$ atau setara dengan $1,0 \text{ g}$ (Husein, 2015).

Besarnya nilai akselerasi sangat berpengaruh terhadap tingkat kerusakan yang terjadi pada bangunan. Pada akselerasi sekitar $0,1 \text{ g}$, bangunan dengan kualitas konstruksi yang kurang baik dapat mengalami kerusakan yang signifikan. Sementara itu, pada akselerasi sekitar $0,2 \text{ g}$, kondisi tersebut tidak hanya berdampak pada struktur bangunan, tetapi juga mempengaruhi kemampuan manusia untuk mempertahankan keseimbangan, sehingga seseorang akan mengalami kesulitan untuk berdiri tegak, menyerupai kondisi berada di atas kapal kecil yang diterpa gelombang besar.

Konsep perioda dan frekuensi tidak hanya berlaku pada sistem mekanik, tetapi juga pada formasi geologi dan struktur bangunan. Perioda merupakan waktu yang dibutuhkan suatu sistem untuk menyelesaikan satu siklus getaran, sedangkan frekuensi menyatakan jumlah siklus yang terjadi dalam satu detik. Dalam konteks bangunan, perioda getaran dipengaruhi oleh jumlah lantai dan karakteristik material penyusunnya. Secara umum, perioda alami bangunan dapat diperkirakan sebesar $0,1 \text{ detik per lantai}$, sehingga bangunan satu lantai memiliki perioda sekitar $0,1 \text{ detik}$, sedangkan bangunan 30 lantai dapat mencapai sekitar $3 \text{ detik per siklus getaran}$.

Selain jumlah lantai, jenis material konstruksi juga mempengaruhi nilai perioda. Material yang bersifat lebih fleksibel, seperti baja dan kayu, cenderung memiliki perioda yang lebih panjang dibandingkan material yang lebih kaku seperti beton dan pasangan bata. Di sisi lain, kondisi geologi permukaan juga memiliki pengaruh terhadap karakteristik getaran.

Batuan keras umumnya memiliki perioda alami yang lebih pendek, sekitar 0,5 detik, sedangkan sedimen lunak yang belum terlitifikasi dapat memiliki perioda lebih panjang, bahkan melebihi 2 detik per siklus.

3.2 Struktur Baja

Baja adalah logam Paduan yang terdiri dari besi (Fe) dan karbon (C), dengan karbon biasanya kurang dari 2,11% beratnya. Fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur pengeras dengan mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*) atom besi. Unsur paduan lain yang biasa ditambahkan selain karbon adalah mangan (*manganese*), krom (*chromium*), vanadium, dan nikel. Dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur paduan lainnya, berbagai jenis kualitas baja bisa didapatkan. 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*). 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, yaitu:

1. Struktur rangka (*framed structure*), yang elemennya bisa terdiri dari batang tarik, kolom, balok dan batang yang mengalami gabungan lenturan dan beban aksial.
2. Struktur gantung (*suspension*), yang sistem pendukung utamanya mengalami tarikan aksial yang dominan.
3. Struktur selaput (*sheel*), yang tegangan aksialnya dominan.

3.2.1 Material Baja

Menurut ASM Handbook Committee (1990), baja dapat diklasifikasikan berdasarkan komposisi kimianya menjadi baja karbon dan baja paduan. Adapun klasifikasi tersebut dijelaskan sebagai berikut.:

1. Baja Karbon (*Carbon Steel*)

Baja karbon merupakan baja yang tersusun terutama dari besi (Fe) dan karbon (C). Karbon berperan sebagai unsur pengeras yang efektif dan ekonomis, sehingga sebagian besar baja hanya mengandung karbon dengan sedikit unsur paduan lainnya. Perbedaan kadar karbon dalam baja menjadi dasar pengklasifikasian baja karbon. Berdasarkan kandungan karbonnya, baja karbon dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

a. Baja karbon rendah (*low carbon steel*)

Baja karbon rendah adalah baja dengan kandungan karbon kurang dari 0,3%. Jenis baja ini memiliki sifat mudah dibentuk, mudah dikerjakan, dan mudah dilas. Selain itu, baja ini memiliki keuletan dan ketangguhan yang tinggi, namun kekerasan dan ketahanan ausnya relatif rendah. Baja karbon rendah banyak digunakan untuk pembuatan bodi kendaraan, struktur bangunan, pipa, jembatan, kaleng, dan pagar.

b. Baja karbon menengah (*medium carbon steel*)

Baja karbon menengah mengandung karbon antara 0,3% hingga 0,6%. Baja ini memiliki kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan baja karbon rendah, namun lebih sulit dibentuk dan dilas. Baja karbon menengah juga dapat dikeraskan melalui proses perlakuan panas (*quenching*). Umumnya digunakan untuk komponen yang membutuhkan kekuatan lebih tinggi seperti poros, rel kereta api, roda gigi, pegas, dan baut.

c. Baja karbon tinggi (*high carbon steel*)

Baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon antara 0,6% hingga 1,7%. Baja ini memiliki kekuatan tarik dan kekerasan yang tinggi serta ketahanan aus yang baik, namun keuletannya rendah sehingga cenderung lebih getas. Baja karbon tinggi banyak digunakan untuk pembuatan alat perkakas seperti palu, gergaji, pegas, serta kawat dan kabel baja.

2. Baja Paduan

Baja paduan adalah baja yang mengandung satu atau lebih unsur tambahan selain karbon, seperti nikel (Ni), kromium (Cr), mangan (Mn), molibdenum (Mo), silikon (Si), dan unsur lainnya. Penambahan unsur paduan bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik baja, seperti kekuatan, kekerasan, keuletan, serta ketahanan terhadap korosi dan suhu tinggi. Kombinasi unsur tertentu dapat menghasilkan sifat khusus, misalnya paduan Ni dan Cr yang dapat meningkatkan kekuatan dan ketangguhan baja.

Berdasarkan kadar unsur paduannya, baja paduan diklasifikasikan menjadi:

a. Baja paduan rendah (*low alloy steel*)

Baja paduan rendah merupakan baja dengan total unsur paduan kurang dari 2,5% berat (wt%). Baja ini memiliki peningkatan kekuatan dan ketahanan dibandingkan baja karbon, namun tetap ekonomis dan mudah diproses.

b. Baja paduan menengah (*medium alloy steel*)

Baja paduan menengah memiliki kandungan unsur paduan antara 2,5% hingga 10% berat (wt%). Baja ini menunjukkan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan baja paduan rendah, terutama dalam hal kekuatan dan ketahanan terhadap kondisi tertentu.

c. Baja paduan tinggi (*high alloy steel*)

Baja paduan tinggi merupakan baja dengan kandungan unsur paduan lebih dari 10% berat (wt%). Baja jenis ini memiliki sifat khusus, seperti ketahanan korosi yang tinggi, ketahanan panas, dan kekuatan yang sangat baik. Salah satu contoh baja paduan tinggi adalah baja tahan karat (*stainless steel*).

Dalam perencanaan struktur baja, SNI 1729:2002 mengambil beberapa sifat- sifat mekanik dari material baja yang sama yaitu:

Modulus Elastisitas, E = 200.000 MPa

Modulus Geser, G = 80.000 MPa

Angka Poison = 0,30

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

Sedangkan berdasarkan tegangan leleh dan tegangan putusnya, SNI 1729:2002 mengklasifikasikan mutu dan material baja menjadi 5 kelas mutu, sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Sifat-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

Sumber: SNI 1729:2002

3.2.2 Jenis Baja Profil

Bentuk penampang profil baja merupakan salah satu faktor penting dalam perencanaan struktur karena mempengaruhi kekuatan dan kekakuan elemen struktur. Secara umum, profil baja dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk penampang dan proses pembuatannya.

1. Berdasarkan bentuk (model profil baja)

Model profil baja merupakan bentuk penampang dari elemen baja yang digunakan dalam struktur. Bentuk penampang ini sangat mempengaruhi kekuatan, kekakuan, serta fungsi elemen struktur.

Beberapa model profil baja yang umum digunakan antara lain sebagai berikut:

a. Profil I atau H (*Wide Flange*)

Profil ini memiliki bentuk menyerupai huruf I atau H dengan dua sayap (*flange*) dan satu badan (*web*). Profil ini memiliki kapasitas

menahan momen lentur yang besar sehingga banyak digunakan sebagai balok dan kolom pada struktur bangunan.

b. Profil Kanal (*C-Channel*)

Profil kanal berbentuk huruf C dan umumnya digunakan sebagai elemen sekunder seperti balok anak, gording, atau rangka atap. Profil ini lebih ringan dibandingkan profil I sehingga cocok untuk beban yang tidak terlalu besar.

c. Profil Siku (*Angle / L*)

Profil siku berbentuk huruf L dan biasanya digunakan sebagai elemen pengaku (*bracing*) atau rangka batang. Profil ini efektif dalam menahan gaya tarik maupun tekan.

d. Profil T (WT/ST)

Profil T merupakan hasil pemotongan profil I atau H sehingga berbentuk huruf T. Profil ini digunakan pada elemen tertentu seperti balok sekunder atau bagian struktur yang membutuhkan penampang tidak simetris.

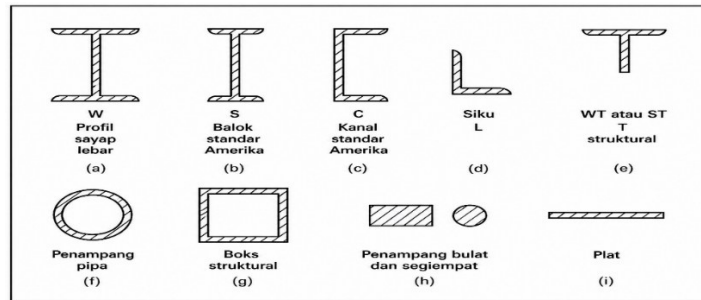
e. Profil Hollow (Pipa, Kotak, Persegi Panjang)

Profil hollow memiliki penampang tertutup, seperti pipa (*circular*), kotak (*square*), dan persegi panjang (*rectangular*). Profil ini memiliki kekakuan yang baik terhadap berbagai arah dan sering digunakan pada kolom, rangka ringan, serta struktur arsitektural.

2. Berdasarkan proses pembuatan

a. *Hot rolled shapes*

Profil semacam ini dibentuk dengan cara blok-blok baja yang panas diproses melalui rol-rol dalam pabrik. *Hot rolled shapes* ini mengandung tegangan residu (*residual stress*). Jadi sebelum batang dibebanipun sudah ada residual stress yang berasal dari pabrik. Metode giling panas ini menghasilkan berbagai jenis penampang baja, seperti siku, *Wide Flange*, *T*, *H-Beam* dengan berbagai jenis ukuran serta ketebalan.

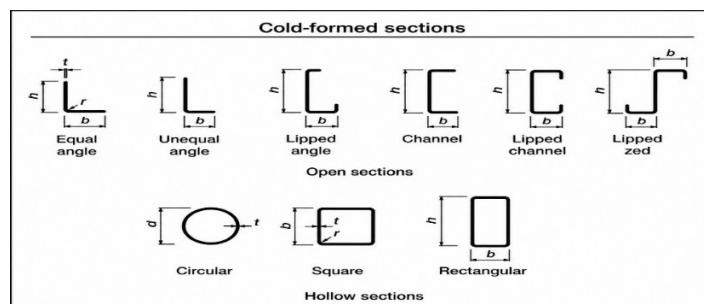


Gambar 3. 2 Tipe Penampang Baja Canai Panas (*Hot Rolled Shapes*)

Sumber: Ariestadi (2013)

b. *Cold Formed Shapes*

Pembentukan dengan pendinginan (*cold-forming*) adalah metode lain yang digunakan untuk membuat komponen-komponen baja dalam jumlah yang besar. Dalam proses pembentukan profil ini, lembaran baja tipis datar yang telah dihasilkan dari proses penggilingan dengan pemanasan dilipat atau dibengkokkan dalam keadaan dingin untuk membentuk penampang melintang struktur. Metode bentukan dingin dapat digunakan untuk menghasilkan penampang dengan ketebalan tipis, seperti *Lip Channel*, *Z-section* atau pada pembuatan penampang baja ringan. Tebal pelat yang dibentuk menjadi profil di sini tebalnya kurang dari 3/16 inch. Profil macam ini ringan dan sering disebut sebagai *Light Gage Cold Form Steel*.



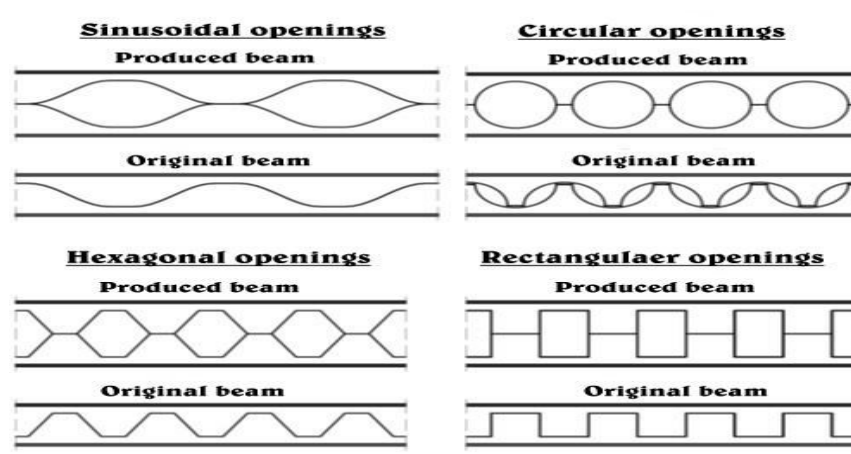
Gambar 3. 3 Tipe Penampang Baja Canai Dingin (*Cold Formed Shapes*)

Sumber: Ariestadi (2013)

3. *Castellated Beam (Honeycomb)*

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.

Castellated beam 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*).



Gambar 3. 4 Bentuk Bukaan pada *Castellated Beam*

Sumber: Diolah dari Internet

Dengan adanya pemotongan pada bagian web, terjadi peningkatan tinggi penampang profil sehingga momen inersia penampang juga meningkat. Hal ini berdampak pada meningkatnya kapasitas momen atau kekuatan lentur balok. *Castellated beam* telah terbukti efisien

untuk bentang panjang (lebih dari 8 meter) dengan pembebanan sederhana, yang perencanaannya dikontrol oleh kapasitas momen dan lendutan. Selain itu, *castellated beam* memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta perawatan yang relatif mudah.

3.2.3 Base Plate

Base plate merupakan pelat baja yang digunakan sebagai elemen penghubung antara kolom baja dengan pondasi beton. *Base plate* berfungsi untuk mendistribusikan beban dari kolom secara merata ke pondasi, sehingga tegangan yang terjadi pada beton tidak melebihi kapasitas yang diizinkan. Selain itu, base plate juga berfungsi sebagaiudukan kolom agar tetap stabil dan menjaga posisi kolom selama proses konstruksi.

Dalam penggunaannya, base plate biasanya dilengkapi dengan baut angkur (*anchor bolt*) yang berfungsi untuk mengikat kolom ke pondasi serta menahan gaya tarik dan geser. Ketebalan dan ukuran *base plate* direncanakan berdasarkan besar beban yang bekerja, seperti gaya aksial, momen, dan gaya geser. Untuk memastikan kontak yang baik antara base plate dan pondasi, biasanya digunakan *grout* sebagai lapisan pengisi.

3.2.4 Sambungan

Sambungan dapat dinyatakan sebagai komponen fisik yang secara mekanis mengikat elemen struktur dan terkonsentrasi pada lokasi pengikatan terjadi. Hal ini penting dalam meneruskan gaya momen dari elemen struktur ke elemen pendukung. Sendi didefinisikan sebagai penghubung dan zona interaksi antara anggota terhubung dan panel zona dari *web* kolom. Sambungan untuk struktur baja *hot – rolled* dibagi menjadi sambungan baut dan sambungan las. Sementara untuk baja *cold – formed*, ada sembilan jenis sendi yang umum digunakan, yaitu baut, *self – tapping screws*, pin, pengelasan ditempat, *puddle welding*, *clenching*, *self – piercing rivets*, dan paku.

1. Sambungan Baut

Penggunaan baut pada struktur baja dapat mempercepat proses pelaksanaan dan tidak memerlukan kemampuan tinggi bagi pekerja dibanding dalam sambungan rivet dan las. Hal ini menyebabkan struktur baja dengan sambungan baut lebih ekonomis. Menurut Ariestadi (2013), ada beberapa jenis sambungan baut, diantaranya:

a. Baut mutu tinggi

Dua jenis utama baut kekuatan (mutu) tinggi ditunjukkan oleh ASTM sebagai A325 dan A490. Baut ini memiliki kepala segienam yang tebal dan digunakan dengan mur segienam yang setengah halus (*semifinished*) dan tebal. Bagian berulirnya lebih pendek dari pada baut non-struktural, dan dapat dipotong atau digiling (*rolled*).

Baut A325 terbuat dari baja karbon sedang yang diberi perlakuan panas dengan kekuatan leleh sekitar 81 sampai 92 ksi (558 sampai 634 MPa) yang tergantung pada diameter. Baut A490 juga diberi perlakuan panas tetapi terbuat dari baja paduan (*alloy*) dengan kekuatan leleh sekitar 115 sampai 130 ksi (793 sampai 896 MPa) yang tergantung pada diameter. Baut A449 kadang-kadang digunakan bila diameter yang diperlukan berkisar dari 1/2 inci sampai 3 inci, dan juga untuk baut angkur serta batang bulat berulir. 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.

b. Paku keling

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 1 ($F_v = 28$ ksi) (1190 MPa) dan Mutu 2 ($F_y = 38$ ksi) (260 MPa), serta kekuatan leleh minimum yang ditetapkan didasarkan pada bahan baja batangan. Pembuatan dan pemasangan paku keling menimbulkan perubahan sifat mekanis.

c. Baut hitam

Baut ini dibuat dari baja karbon rendah yang diidentifikasi sebagai ASTM A307, dan merupakan jenis baut yang paling murah. Namun, baut ini belum tentu menghasilkan sambungan yang paling murah karena banyaknya jumlah baut yang dibutuhkan pada suatu sambungan. Pemakaiannya terutama pada struktur yang ringan, batang sekunder atau pengaku, anjungan (platform), gording, rusuk dinding, rangka batang yang kecil dan lain-lain yang bebannya kecil dan bersifat statis. Baut ini juga dipakai sebagai alat penyambung sementara pada sambungan yang menggunakan baut kekuatan tinggi, paku keling, atau las. Baut hitam (yang tidak dihaluskan) kadangkadang disebut baut biasa, mesin, atau kasar, serta kepala dan murnya dapat berbentuk bujur sangkar.

2. Sambungan las

Proses pengelasan merupakan proses penyambungan dua potong logam dengan pemanasan sampai keadaan plastis atau cair, dengan atau tanpa tekanan. Sambungan las terdiri dari lima jenis dasar dengan berbagai macam variasi dan kombinasi. Kelima jenis dasar ini adalah sambungan sebidang (*butt*), lewatan (*lap*), tegak (*T*), sudut, dan sisi.

a. Sambungan Sebidang

Sambungan sebidang dipakai terutama untuk menyambung ujung-ujung plat datar dengan ketebalan yang sama atau hampir sama. Keuntungan utama jenis sambungan ini ialah menghilangkan eksentrisitas yang timbul pada sambungan lewatan tunggal.

b. Sambungan Lewatan

Sambungan lewatan merupakan jenis yang paling umum. Sambungan ini mempunyai dua keuntungan utama:

- 1) Mudah disesuaikan. Potongan yang akan disambung tidak memerlukan ketepatan dalam pembuatannya bila dibanding dengan jenis sambungan lain. Potongan tersebut dapat digeser

untuk mengakomodasi kesalahan kecil dalam pembuatan atau untuk penyesuaian panjang.

- 2) Mudah disambung. Tepi potongan yang akan disambung tidak memerlukan persiapan khusus dan biasanya dipotong dengan nyala (api) atau geseran. Sambungan lewatan menggunakan las sudut sehingga sesuai baik untuk pengelasan di bengkel maupun di lapangan. Potongan yang akan disambung dalam banyak hal hanya dijepit tanpa menggunakan alat pemegang khusus. Kadang-kadang potongan potongan diletakkan ke posisinya dengan beberapa baut pemasangan yang dapat ditinggalkan atau dibuka kembali setelah dilas.
- 3) Keuntungan lain sambungan lewatan adalah mudah digunakan untuk menyambung plat yang tebalnya berlainan.

c. Sambungan Tegak

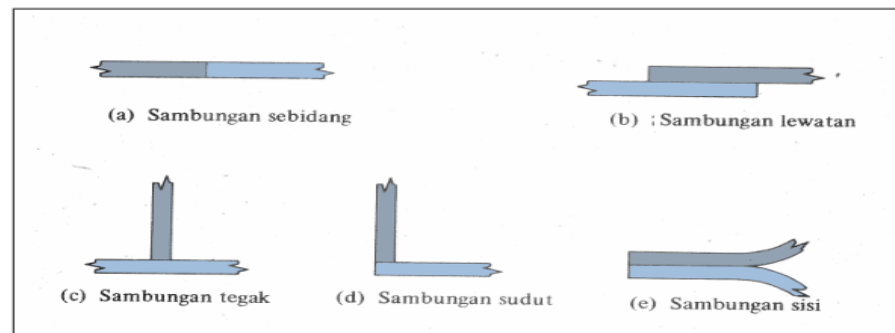
Jenis sambungan ini dipakai untuk membuat penampang bentukan (*built-up*) seperti profil *T*, profil *I*, gelagar plat (*plat girder*), pengaku tumpuan atau penguat samping (*bearing stiffener*), penggantung, konsol (*bracket*). Umumnya potongan yang disambung membentuk sudut tegak. Jenis sambungan ini terutama bermanfaat dalam pembuatan penampang yang dibentuk dari plat datar yang disambung dengan las sudut maupun las tumpul.

d. Sambungan Sudut

Sambungan sudut dipakai terutama untuk membuat penampang berbentuk boks segi empat seperti yang digunakan untuk kolom dan balok yang memikul momen puntir yang besar.

e. Sambungan Sisi

Sambungan sisi umumnya tidak struktural tetapi paling sering dipakai untuk menjaga agar dua atau lebih plat tetap pada bidang tertentu atau untuk mempertahankan kesejajaran (*alignment*) awal.



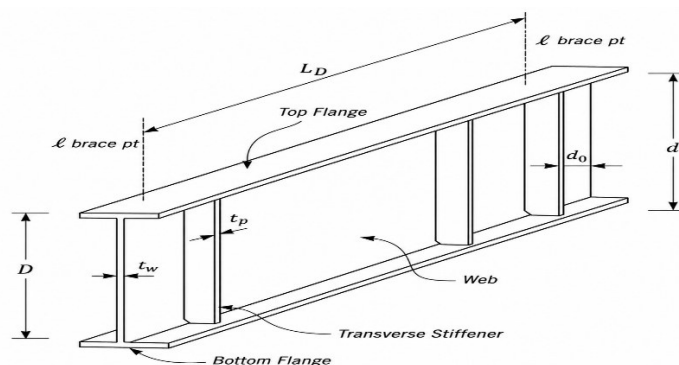
Gambar 3. 5 Jenis Samungan Las

Sumber: Ariestadi (2013)

3.2.5 Pengaku (*Stiffener*)

Stiffener merupakan pelat pengaku yang dipasang pada elemen balok baja, terutama di daerah tumpuan atau pada lokasi beban terpusat, ketika badan profil (*web*) tidak memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan reaksi atau beban tersebut. Kondisi ini umumnya berkaitan dengan potensi kegagalan seperti leleh lokal pada badan (*web local yielding*), tekuk lokal (*web local buckling*), dan *web crippling* (Siregar dkk. 2020).

Pemasangan *stiffener* bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan badan balok, serta membantu dalam membentuk jalur gaya (*load path*) selama terjadinya tekuk pada pelat badan. Selain itu, *stiffener* juga berfungsi untuk menyalurkan gaya tekan dari badan balok ke elemen lainnya secara lebih efektif. Pada daerah *flens* tekan, pengelasan *stiffener* berperan dalam meningkatkan stabilitas elemen serta menjaga posisi *stiffener* tetap tegak lurus terhadap badan balok.

Gambar 3. 6 Ilustrasi *Stiffner*

Sumber: Diolah dari Internet

3.3 Komponen Respon Struktur

Menurut Chopra (2020), respons dinamik struktur adalah respons suatu sistem struktur terhadap beban yang berubah terhadap waktu, yang dipengaruhi oleh sifat dinamik struktur, yaitu massa, kekakuan, dan redaman.

3.3.1 Kekakuan (*Stiffness*)

Suatu struktur harus memiliki kekakuan yang cukup agar pergerakannya dapat dibatasi. Kekakuan struktur dapat dievaluasi melalui simpangan antar lantai (*drift*), di mana semakin kecil simpangan yang terjadi maka struktur tersebut semakin kaku. Terdapat perbedaan antara *displacement* dan *drift*, di mana *displacement* merupakan simpangan suatu lantai terhadap dasar struktur, sedangkan *drift* adalah selisih simpangan antara dua lantai yang berurutan. Secara matematis, *drift* dihitung sebagai selisih *displacement* antar lantai, sedangkan *drift ratio* diperoleh dari perbandingan *drift* terhadap tinggi lantai.

Berdasarkan SNI 1726:2019, simpangan antar lantai dibatasi untuk memenuhi kinerja struktur. Pada batas layan, simpangan antar lantai tidak boleh melebihi $0,03/R$ kali tinggi lantai atau 30 mm (diambil nilai terkecil), yang bertujuan untuk mencegah kerusakan non-struktural dan menjaga kenyamanan penghuni. Selain itu, pada batas ultimit, simpangan antar lantai dibatasi sebesar 0,02 kali tinggi lantai untuk mencegah keruntuhan struktur.

Kekakuan struktur dipengaruhi oleh sifat material dan dimensi elemen, khususnya modulus elastisitas dan momen inersia. Meskipun material dengan kekuatan tinggi cenderung memiliki kekakuan yang lebih besar, hubungan keduanya tidak selalu linier. Selain itu, material yang terlalu kaku cenderung bersifat getas, sehingga diperlukan keseimbangan antara kekakuan dan daktilitas dalam perencanaan struktur tahan gempa.

3.3.2 Kekuatan (*Strength*)

Persyaratan kekuatan struktur mencakup seluruh elemen utama bangunan, seperti pelat, balok, kolom, dan dinding geser (*shear wall*). Evaluasi

kekuatan dilakukan dengan mempertimbangkan perilaku masing-masing elemen struktur. Pada elemen kolom, pemeriksaan kekuatan dilakukan menggunakan diagram interaksi antara gaya aksial dan momen lentur (*P–M interaction diagram*). Nilai gaya aksial ultimit (P_u) dan momen ultimit (M_u) hasil analisis kemudian diplot pada diagram tersebut untuk menentukan kondisi keruntuhan. Apabila titik tersebut berada di bawah kurva kondisi seimbang (*balanced condition*), maka kolom mengalami kegagalan tarik, sedangkan jika berada di atas kurva seimbang, maka terjadi kegagalan tekan (Manguki dkk. (2021)).

Pada elemen balok dan pelat, pemeriksaan kekuatan dilakukan dengan membandingkan kapasitas momen lentur penampang terhadap momen akibat beban yang bekerja. Suatu elemen dinyatakan aman apabila kapasitas momen lebih besar daripada momen yang terjadi, baik pada kondisi tarik maupun tekan. Sementara itu, pada dinding geser (*shear wall*), dalam beberapa pendekatan analisis, elemen ini dapat diasumsikan berperilaku menyerupai kolom pendek, sehingga evaluasi kekuatannya juga dapat dilakukan menggunakan diagram interaksi gaya aksial dan momen. Dengan demikian, seluruh elemen struktur harus memenuhi persyaratan kekuatan untuk menjamin keamanan dan kestabilan bangunan terhadap beban yang bekerja.

3.3.3 Daktilitas (*Ductility*)

Daktilitas merupakan salah satu faktor penting dalam perencanaan bangunan tahan gempa. Daktilitas adalah kemampuan struktur untuk mengalami deformasi inelastik tanpa langsung runtuh serta mampu menyerap energi gempa. Oleh karena itu, setiap elemen struktur perlu memiliki daktilitas yang cukup agar mampu menahan beban luar dengan baik. Struktur dengan daktilitas tinggi dapat menyerap energi lebih besar dibandingkan struktur yang daktilitasnya rendah. Selain itu, struktur yang daktail tidak langsung runtuh secara tiba-tiba, sehingga masih memberikan

waktu bagi penghuni untuk menyelamatkan diri (Laksono & Ujianto, 2023).

Berdasarkan SNI 1726:2019, daktilitas berkaitan dengan kemampuan struktur untuk tetap berdeformasi setelah melewati batas elastis. Daktilitas dapat dilihat dari hubungan tegangan–regangan hasil pengujian material. Pada kolom, daktilitas dibagi menjadi dua, yaitu daktilitas kurvatur dan daktilitas perpindahan. Daktilitas kurvatur berkaitan dengan kemampuan penampang berdasarkan dimensi dan tulangan, sedangkan daktilitas perpindahan merupakan perbandingan antara perpindahan ultimit dan perpindahan saat leleh.

3.4 Pembebanan Struktur Bangunan

Sebuah struktur dirancang untuk mampu menahan beban-beban yang bekerja. Beban adalah gaya yang bekerja pada struktur bangunan. Saat dirancang, beban dibagi menjadi dua arah yaitu arah vertikal (gravitasi) dan beban arah horizontal (lateral). Beban vertikal terdiri dari beban mati (*dead load*), beban hidup (*live load*), dan beban air hujan. Beban horizontal terdiri dari beban gempa (*earthquake*), angin (*wind load*), tekanan tanah, dan air tanah.

3.4.1 Beban Gravitasi

1. Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati adalah berat seluruh komponen elemen struktural bangunan yang terdiri atas pelat, balok, kolom, dan dinding struktural. Beban mati akan di hitung secara otomatis oleh *software* ETABS v22 dengan berat jenis material.

Tabel 3. 2 Berat Sendiri Bahan Bangunan

No	Bahan bangunan	Besar beban (Kg/m ³)
1	Baja	7850
2	Batu alam	2600
3	Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	1500
4	Batu karang (berat tumpuk)	700
5	Besi pecah	1450

Tabel 3.2 Berat Sendiri Bahan Bangunan (Lanjutan)

6	Besi tulang	7250
7	Beton	2200
8	Beton bertulang	2400
9	Kayu (kelas I)	1000
10	Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	1650
11	Pasangan bata merah	1700
12	Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200
13	Pasangan batu cetak	2200
14	Pasangan batu karang	1450
15	Pasir (kering udara sampai lembab)	1600
16	Tanah lempung dan lanau (kering udara sampai lembab)	1700
17	Pasir (jenuh air)	1800
18	Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1850
19	Tanah lempung dan lanau (basah)	2000
20	Timah hitam	1140

Sumber: PPURG 1987

2. Beban Mati Tambahan (*Super Imposed Dead Load*)

Beban mati tambahan yaitu berat komponen nonstruktural seperti arsitektural, mekanikal, elektrikal, dan plumbing yang terdapat pada struktur bangunan. Beban mati tambahan yang akan digunakan adalah berdasarkan SNI 1727:2020.

Tabel 3. 3 Berat Sendiri Komponen Gedung

No	Material	Berat (Kg/m ²)
1	Adukan, per sm tebal	
	- dari semen	21
	- dari kapur, semen merah atau tras	17
2	Aspal, termasuk bahan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14
3	Dinding pasangan bata merah	
	- Satu bata	450
	- Setengah bata	250
4	Dinding pasangan batako bertulang	
	- Tebal dinding 20 cm (HB 20)	200
	- Tebal dinding 10 cm (HB 10)	120

Tabel 3. 3 Berat Sendiri Komponen Gedung (Lanjutan)

5	Tanpa lubang:	
	- Tebal dinding 15 cm	300
	- Tebal dinding 10 cm	200
	Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk-rusuknya tanpa penggantung langit-langit atau pengaku), terdiri dari:	
	- Semen asbes (eternity dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimum 4 mm	11
	- Kaca, dengan tebal 3-5 mm	10
6	Penutup atas sirap dengan reng dan usuk/kaso, per m ² atap	40
7	Penutup atas seng gelombang (BJLS-25) tanpa gording	10
8	Lantai kayu sederhana dengan balok kayu, tanpa langit-langit dengan bentang maksimum 5 m dan untuk beban hidup maksimum 200 kg/m ²	40
9	Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak minimum 0,80 m	7
10	Penutup atap genteng dengan reng dan usuk/kaso per m ² bidang atap	50
11	Penutup lantai dari ubin semen Portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	11
12	Penutup lantai dari ubin semen Portland, terasp dan beton, dengan adukan, per cm tebal	24

Sumber: SNI 1727:2020

3. Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup ialah semua beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan suatu gedung, dan ke dalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah, mesin-mesin serta peralatan yang tidak merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung dan dapat diganti selama masa hidup dari gedung itu, sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai dan atap tersebut.

Tabel 3. 4 Beban Hunian

Hunian atau Penggunaan	Beban Hidup (kN/ m ²)
Koridor di atas lantai pertama	3,83
Atap datar, berbubung dan lengkung	0.96
Ruang pertemuan	4,79
Beban tangga	4,79
Ruang pasien	1,92
Labolatorium	2,87
Lobi	4,79

Sumber: SNI 1727:2020

4. Beban Air Hujan (*Rain Load*)

Beban air hujan (R) adalah beban yang diakibatkan oleh genangan air di atap bangunan. Perhitungan besar beban hujan pada SNI 1727:2020 menggunakan rumus berikut:

$$R = 0.0098 \times (d_s + d_h) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

R = beban air hujan pada atap yang tidak melendut

d_s = kedalaman air pada atap yang tidak melendut meningkat masuk ke lubang sistem drainase sekunder apabila sistem drainase primer tertutup

d_h = tambahan kedalaman air pada atap yang tidak melendut di atas lubang masuk sistem drainase sekunder pada aliran air rencana

3.4.2 Beban Lateral

Beban lateral biasanya terdiri dari beban gempa, angin, ledakan, dan getaran mesin. Beban gempa adalah beban yang disebabkan oleh aktivitas gempa tektonik dan vulkanik yang menyebabkan gaya geser horizontal pada permukaan tanah.

1. Beban Angin

Beban angin adalah semua beban yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang disebabkan oleh selisih dalam tekanan udara.

Penentuan beban angin dapat dilakukan dengan cara menganggap adanya tekanan positif dan tekanan negatif (hisap), yang bekerja tegak lurus pada bidang –bidang yang ditinjau. Besarnya tekanan positif dan tekanan negatif dinyatakan dalam kg/m^2 .

Besarnya beban angin yang bekerja pada struktur bangunan tergantung dari kecepatan angin, letak geografis, kerapatan massa udara, bentuk struktur bangunan dan kekakuan struktur, serta ketinggian bangunan. Bangunan yang berada pada lintasan angin, akan menyebabkan angin berbelok atau bisa berhenti. Akibatnya, energi kinetik dari angin akan berubah menjadi energi potensial, yang berupa tekanan atau hisapan pada struktur bangunan.

Kecepatan angin yang direncanakan biasanya didasarkan pada periode ulang 50 tahun. Kecepatan angin akan meningkat seiring dengan ketinggian struktur bangunan di atas tanah. Tekanan angin yang bekerja pada struktur bangunan dapat diukur dalam gaya statis ekuivalen.

- Tekanan tiup angin harus diambil minimal 25kg/m^2 .
- Tekanan tiup angin dilaut dan ditepi laut sampai 5km dari pantai, harus diambil minimal 40kg/m^2 .

Adapun langkah-langkah perencanaan perhitungan beban angin berdasarkan SNI 1727:2020 dengan metode sebagai berikut:

- a. Menentukan kecepatan angin dasar, V
Kecepatan angin dasar, V , yang digunakan dalam menentukan beban angin desain pada bangunan gedung dan struktur lain harus ditentukan dari instansi yang berwenang, sesuai dengan kategori risiko bangunan dan struktur.
- b. Faktor arah angin, K_d
Berdasarkan SNI 1727:2020, faktor arah angin, K_d , harus ditentukan dari tabel 26.6-1. Faktor arah angin ini hanya akan

dimasukkan apabila kombinasi beban yang disyaratkan dalam pasal 27 sampai pasal 30 digunakan untuk desain. Pengaruh arah angin dalam menentukan beban angin sesuai dengan pasal 31 harus didasarkan pada analisis rasional dari kecepatan angin yang sesuai dengan persyaratan Pasal 26.5.3 dan Pasal 31.4.3.

Tabel 3. 5 Faktor Arah Angin, K_d

Tipe struktur	Keterangan	Faktor arah angin, K_d
Bangunan gedung	SPGAU	0.85
	Komponen & Klading (K&K)	0.85
Atap lengkung		0.85
Kubah berbentuk bundar		1.0
Cerobong, tangki dan struktur yang sama	Persegi	0.90
	Segi enam	0.95
	Bundar	1.0
	Segi delapan	1.0
Dinding solid yang berdiri bebas, peralatan bagian atap, dan panel petunjuk solid yang berdiri bebas serta panel petunjuk terikat		0.85
Panel petunjuk terbuka dan rangka terbuka bidang tunggal		0.85
Rangka batang menara	Segitiga/persegi/persegi panjang	0.85
	Penampang lainnya	0.95

Sumber: SNI 1727:2020

c. Menentukan kategori eksposur

Berdasarkan SNI 1727:2020, eksposur dibagi menjadi beberapa kategori, yaitu:

1) Eksposur B

Eksposur B: Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata kurang dari atau sama dengan 30 ft (9,1m), Eksposur B berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh Kekasaran Permukaan B, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 1.500 ft (457m). Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata lebih besar dari 30 ft (9,1m), Eksposur B berlaku bilamana Kekasaran Permukaan B berada dalam arah melawan angin untuk jarak lebih besar dari 2.600 ft (792 m) atau 20 kali tinggi bangunan atau struktur, pilih yang terbesar.

2) Eksposur C

Eksposur C berlaku untuk semua kasus di mana Eksposur B atau Eksposur D tidak berlaku.

3) Eksposur D

Eksposur D berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh Kekasaran Permukaan D, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 5.000 ft (1.524m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar. Eksposur D juga berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah dekat dari situs dalam arah melawan angin adalah B atau C, dan situs yang berada dalam jarak 600 ft (183 m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar, dari kondisi Eksposur D sebagaimana ditentukan dalam kalimat sebelumnya.

d. Menentukan faktor topografi, K_{zt}

Menurut SNI 1727-2013 pada pasal 26.8.2 dijelaskan bahwa faktor topografi mempengaruhi efek peningkatan kecepatan angin, hal ini dimasukkan dalam perhitungan beban angin desain dengan menggunakan faktor K_{zt} , jika kondisi situs dan lokasi gedung dan

struktur bangunan lain tidak memenuhi kondisi yang disyaratkan maka $K_{zt} = 1,0$.

e. Menentukan koefisien tekanan internal, GC_{pi}

Koefisien tekanan internal (GC_{pi}) digunakan untuk memperhitungkan pengaruh tekanan angin di dalam bangunan. Nilai ini ditentukan berdasarkan klasifikasi ketertutupan bangunan sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Kriteria klasifikasi dan nilai koefisien tekanan internal disajikan pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Sistem Penahan Gaya Angin Utama dan Komponen

Klasifikasi ketertutupan	Kriteria untuk klasifikasi ketertutupan	Tekanan internal	Koefisien tekanan internal (GC_{pi})
Bangunan tertutup	$A_o < 0,01A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Sedang	$\pm 0,18$
Bangunan tertutup sebagian	$A_o > 1,1A_{oi}$ dan $A_o >$ terkecil dari $0,01A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Tinggi	$\pm 0,55$
Bangunan terbuka sebagian	Bangunan yang tidak sesuai dengan klasifikasi tertutup, tertutup sebagian, atau terbuka	Sedang	$\pm 0,18$
Bangunan terbuka	Setiap dinding minimal terbuka 80%	Diabaikan	0,00

Sumber: SNI 1727:2020

f. Menentukan koefisien tekanan eksternal, C_p

Untuk menentukan koefisien tekanan eksternal, C_p berdasarkan SNI 1727:2020 dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3. 7 Koefisien Tekanan Eksternal, C_p

Permukaan	L/B	C_p	Digunakan dengan
Dinding di sisi angin datang	Seluruh nilai	0.8	q_z
Dinding di sisi angin pergi	0-1	-0.5	q_h
	2	-0.3	
	≥ 4	-0.2	
Dinding tepi	Seluruh nilai	-0.7	q_h

Sumber: SNI 1727:2020

2. Beban Gempa

Beban gempa adalah beban yang bekerja pada struktur akibat pergerakan tanah yang disebabkan oleh gempa bumi, yang dapat memengaruhi stabilitas dan keamanan struktur. Berdasarkan SNI 1726:2019, gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan peluang terlampaui sebesar 2% dalam kurun waktu 50 tahun. Pembahasan mengenai beban gempa akan diuraikan lebih lanjut dalam penelitian ini.

3.5 Kombinasi Beban

Kombinasi pembebanan dilakukan untuk menentukan kondisi beban paling kritis yang mungkin terjadi selama masa layan struktur gedung. Seluruh komponen struktur baja pada penelitian ini direncanakan berdasarkan metode *Load and Resistance Factor Design (LRFD)* dengan merujuk pada ketentuan SNI 1727:2020.

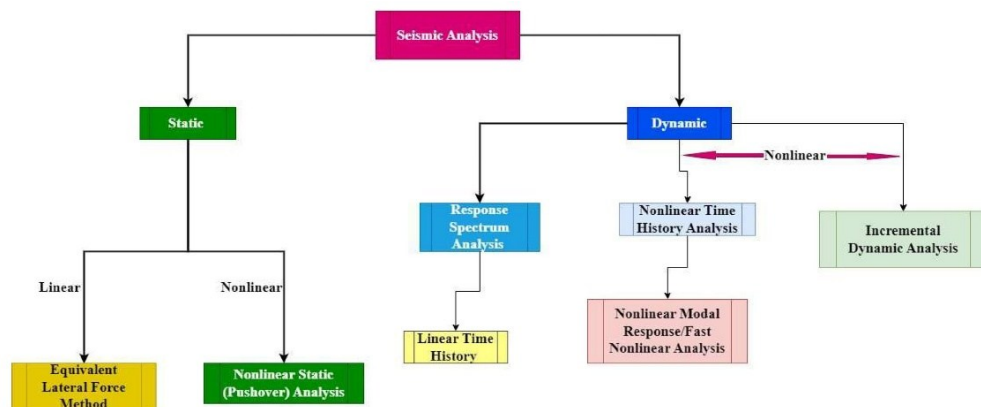
Tabel 3. 8 Beban Kombinasi LRFD

Kombinasi Beban	Beban Utama
1,4D	D
1,2D + 1,6L + 1,5 (L_r atau R)	L
1,2D + 1,6 (L_r atau R) + (1,0L atau 0,5W)	(L_r atau R)
1,2D + 1,0W + 1,0L + 0,5 (L_r atau R)	W
1,2D + 1,0E + 1,0L	E
0,9D + 1,0W	W
0,9D + 1,0E	E

Sumber: SNI 1727:2020

3.6 Analisis Beban Gempa

Secara umum ada 2 cara untuk menganalisis beban gempa, yaitu analisis statik dan analisis dinamik. Berikut merupakan penjelasan dari masing-masing analisis:



Gambar 3. 7 Diagram Metode Analisis Gempa

Sumber: Kuria, K.K.; Kegyes-Brassai, O.K.

3.6.1 Analisis Statik

Analisis statik dilakukan dengan menggunakan analisis linear statik ekuivalen dan *non linear static (pushover) analysis*.

1. Linier statik ekuivalen

Metode linier statik ekuivalen merupakan metode analisis gempa yang paling sederhana, di mana beban gempa direpresentasikan sebagai gaya lateral statik yang bekerja pada struktur. Metode ini banyak digunakan karena kemudahannya, namun memiliki keterbatasan dalam memprediksi respons struktur secara akurat, terutama untuk struktur kompleks dan kondisi gempa kuat.

2. *Non linear static (pushover)*

Pushover analysis merupakan metode analisis statik nonlinier yang dilakukan dengan memberikan beban lateral secara bertahap hingga mencapai target *displacement*. Metode ini digunakan untuk mengevaluasi kapasitas dan kinerja struktur terhadap beban gempa dengan mempertimbangkan perilaku inelastik. Dibandingkan metode

linier statik, *pushover analysis* memberikan hasil yang lebih realistis, namun masih memiliki keterbatasan dalam menangkap pengaruh mode tinggi dan respons dinamik secara penuh.

3.6.2 Analisis Dinamik

Analisis dinamik secara sederhana dapat didefinisikan sebagai perubahan waktu. Beban dinamik adalah setiap beban yang besarnya, arahnya atau posisinya berubah menurut waktu. Demikian juga, respons struktur terhadap beban dinamik, yaitu lendutan dan tegangan yang dihasilkan, juga perubahan waktu, atau sifat dinamik.

Analisis dinamik dapat dilakukan dengan beberapa metode, diantaranya analisis respons spektrum (*response spectrum analysis*), analisis riwayat waktu (*time history analysis*) dan *incremental dynamic analysis*.

1. Respons Spektrum

Analisis respons spektrum dilakukan dengan menggunakan spektrum respons gempa rencana yang diperoleh dari parameter percepatan gempa wilayah. Metode ini mempertimbangkan pengaruh beberapa ragam getar (*mode shape*) struktur sehingga hasil yang diperoleh lebih mendekati kondisi sebenarnya dibandingkan analisis statik.

2. Riwayat Waktu Linier (*Linear Time History*)

Analisis riwayat waktu linier merupakan metode analisis dinamik yang digunakan untuk menentukan respons struktur terhadap beban gempa secara berkelanjutan sebagai fungsi dari waktu. Dalam metode ini, struktur diberikan beban berupa rekaman percepatan tanah (*ground motion*) yang diinput detik demi detik (*time-step*) ke dalam model struktur.

Karakteristik utama dari analisis linier ini adalah asumsi bahwa seluruh komponen struktur berperilaku dalam rentang elastis linier. Artinya, parameter kekakuan (K) dan redaman (C) struktur dianggap konstan selama durasi pembebanan berlangsung, tanpa mempertimbangkan

terjadinya degradasi kekuatan atau pembentukan sendi plastis pada elemen struktur.

3. Riwayat Waktu Nonlinier (*Non Linear Time History*)

Non-Linear Time History Analysis (NLTHA) merupakan metode analisis dinamik yang paling akurat dalam mensimulasikan respons struktur terhadap beban gempa kuat. Berbeda dengan analisis linier, NLTHA mempertimbangkan perilaku inelastis material, di mana elemen struktur diizinkan untuk melewati batas lelehnya (*yielding*) dan mengalami deformasi permanen.

Namun demikian, ketersediaan data riwayat gempa asli di Indonesia masih terbatas dan tidak mudah diperoleh untuk keperluan analisis dinamik secara detail. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan data rekaman gempa yang telah tersedia dari berbagai sumber, kemudian dilakukan proses penyesuaian (*matching*) terhadap kondisi lokasi penelitian.

4. *Incremental Dynamic*

Incremental Dynamic Analysis (IDA) adalah metode analisis parametrik yang digunakan untuk mengestimasi kapasitas struktur secara menyeluruh terhadap beban gempa. Metode ini melibatkan serangkaian analisis riwayat waktu nonlinier (*NLTHA*) dengan menggunakan satu atau lebih rekaman gempa (*ground motion*), di mana setiap rekaman diskalakan secara bertahap pada beberapa tingkat intensitas hingga mencapai kondisi keruntuhan struktur (*global instability*).

Prinsip kerja utama IDA adalah menghubungkan antara *Measure of Intensity (IM)*, seperti *Peak Ground Acceleration (PGA)* atau *Spectral Acceleration (Sa)*, dengan *Damage Measure (DM)*, seperti *Maximum Interstory Drift Ratio*. Hasil dari analisis ini digambarkan dalam bentuk kurva IDA, yang memberikan gambaran kontinu mengenai perubahan respons struktur seiring dengan meningkatnya intensitas gempa.

3.7 Respons Spektrum

Respons spektrum merupakan metode pendekatan untuk menentukan nilai percepatan tanah dasar dengan menggunakan nilai maksimum akibat gempa yang berpotensi terjadi berdasarkan data riwayat gempa sebelumnya. Metode ini dinyatakan dalam bentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara periode getar struktur dengan respons yang dihasilkan. Respons struktur tersebut dapat berupa perpindahan, kecepatan, maupun percepatan. Ketentuan mengenai analisis respons spektrum telah diatur dalam SNI 1726:2019.

3.7.1 Menentukan Kategori Risiko Gedung

Pengkategori risiko pada struktur gedung dilakukan untuk mengidentifikasi seberapa penting sebuah bangunan terhadap keselamatan penghuninya serta operasional bangunan saat dan setelah gempa terjadi. SNI 1726:2019 membagi bangunan ke dalam empat kategori risiko, yang didasarkan pada konsekuensi dari kegagalan struktur terhadap keselamatan jiwa manusia dan fungsi penting bangunan.

Tabel 3. 9 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non gedung untuk Beban Gempa

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: - Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor	II

Tabel 3. 9 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non gedung untuk Beban Gempa (Lanjutan)

- Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat perbelanjaan/ mall - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik	
Gedung dan non gedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo 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: - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi 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.	III

Tabel 3. 9 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non gedung untuk Beban Gempa (Lanjutan)

Gedung dan non gedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah ibadah - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat - Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat 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
--	----

Sumber: SNI 1726:2019

3.7.2 Menentukan Faktor Keutamaan Gempa

Faktor keutamaan gempa merupakan suatu koefisien yang digunakan untuk memperbesar nilai gempa rencana. Pembesaran nilai gempa rencana ini bertujuan untuk meningkatkan tingkat keamanan struktur, sehingga bangunan mampu menahan beban gempa dengan periode ulang yang lebih panjang serta mengurangi kemungkinan kerusakan yang terjadi. Nilai faktor keutamaan berdasarkan tingkat risiko gempa disajikan pada Tabel 3.10.

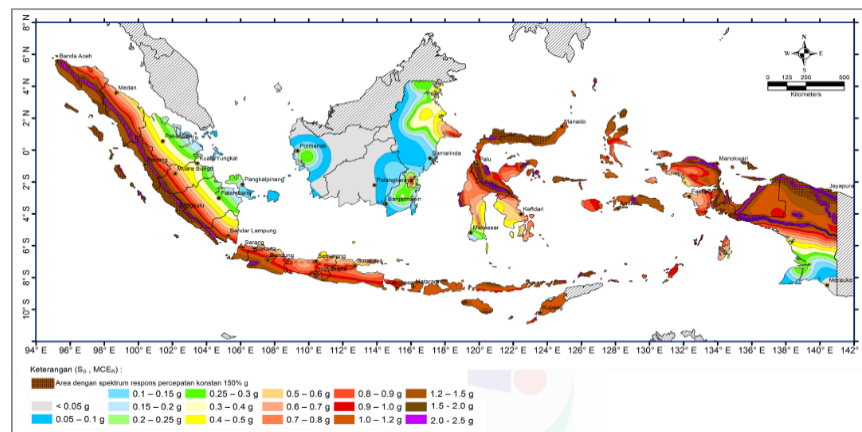
Tabel 3. 10 Faktor Keutamaan Gempa

Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

Sumber: SNI 1726:2019

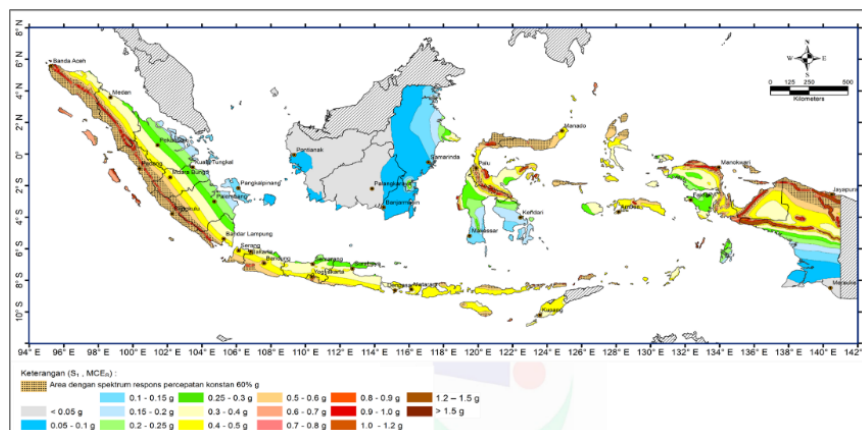
3.7.3 Menentukan Parameter Percepatan Respons Spektral

Parameter percepatan respons spektral periode pendek, S_s , dan percepatan pada periode satu detik, S_1 , harus ditetapkan sesuai dengan nilainya masing-masing dengan mengacu pada peta gerak tanah seismik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8, Gambar 3.9, dan Gambar 3.10.



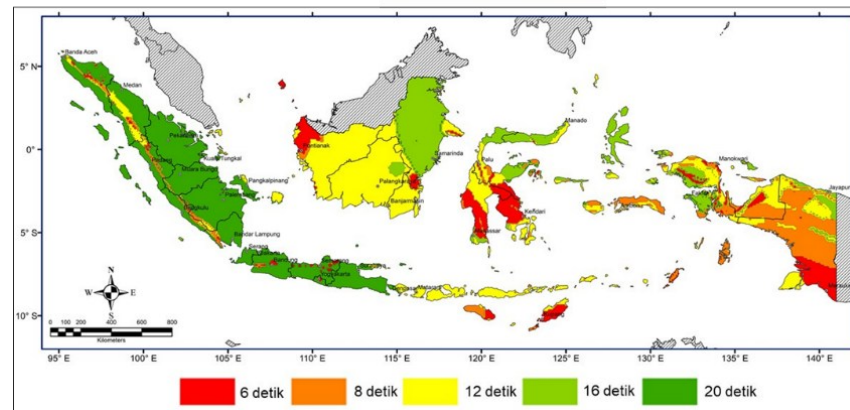
Gambar 3. 8 Parameter percepatan respons spektral pada periode pendek

Sumber: SNI 1726:2019



Gambar 3. 9 Parameter percepatan respons spektral pada periode 1 detik

Sumber: SNI 1726:2019



Gambar 3. 10 Peta transisi periode panjang (TL) wilayah Indonesia
Sumber: SNI 1726:2019

3.7.4 Menentukan Klasifikasi Situs

Salah satu parameter kriteria desain yang menggunakan faktor amplifikasi pada bangunan adalah klasifikasi situs. Klasifikasi situs ini digunakan saat menentukan kriteria desain seismik bangunan di permukaan tanah atau nilai amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah. Untuk suatu situs, klasifikasi harus dilakukan terlebih dahulu. SNI 1726:2019 menjelaskan klasifikasi situs menjadi kelas SA, SB, SC, SD, SE, atau SF. Klasifikasi ini digambarkan secara rinci dalam Tabel 3.11.

Tabel 3. 11 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	v_s (m/detik)	N atau N_{ch}	S_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$. 3. Kuat geser niralir, $S_u < 25$ kPa		

Tabel 3. 11 Klasifikasi Situs (Lanjutan)

SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)
---	--

Sumber: SNI 1726:2019

3.7.5 Menentukan Koefisien Situs

SNI 1726:2019 menetapkan faktor amplifikasi seismik dengan periode 0,2 detik dan 1 detik untuk mengukur respons spektral percepatan gempa MCER di permukaan tanah. Persamaan berikut digunakan untuk menghitung respons spektral percepatan gempa:

$$S_{MS} = S_s \times F_a \dots\dots\dots (2)$$

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

Keterangan:

S_{MS} = Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek,

S_{M1} = Parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik

S_s = Parameter respons spektral percepatan gempa terpetakan untuk periode pendek

S_1 = Parameter respons spektral percepatan gempa terpetakan untuk periode 1,0 detik

F_a = koefisien situs periode pendek

F_v = koefisien situs periode 1 detik

Koefisien situs untuk periode pendek (F_a) dapat dilihat pada Tabel 3.12 dan koefisien situs untuk periode 1 detik (F_v) dapat dilihat pada Tabel 3.13.

Tabel 3. 12 Koefisien Situs, F_a

Kelas situs	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R) Terpetakan pada Periode Pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 3. 13 Koefisien Situs, F_v

Kelas situs	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCE_R) Terpetakan pada Periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber: SNI 1726:2019

3.7.6 Menentukan Parameter Percepatan Spektral Desain

Selanjutnya dilakukan penentuan percepatan spektral desain (S_{DS} dan S_{D1}) dengan memperhitungkan risiko target. Nilai percepatan spektral desain dihitung menggunakan rumus sesuai ketentuan dalam SNI 1726:2019.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \dots\dots\dots (4)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \dots\dots\dots (5)$$

Periode getar transisi struktur dihitung untuk mengetahui respons dinamis utama bangunan saat mengalami beban gempa. Nilai periode ini dapat ditentukan menggunakan persamaan empiris pada SNI 1726:2019.

$$T_0 = 0,2 \times \frac{S_{D1}}{S_{Ds}} \dots\dots\dots (6)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{Ds}} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

T_s = Periode transisi spektrum respons desain.

T_0 = Periode transisi awal pada kurva spektrum respons desain.

3.7.7 Menentukan Spektrum Respons Desain

Nilai percepatan spektral desain (S_{Ds} dan S_{D1}) membentuk spektrum respons desain yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan gaya gempa rencana pada struktur. Persamaan untuk memperoleh kurva respons spektrum beserta ketentuannya adalah sebagai berikut:

1. Untuk $T < T_0$, spektrum respons percepatan desain S_a menggunakan persamaan:

$$S_a = S_{Ds} (0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0}) \dots\dots\dots (8)$$

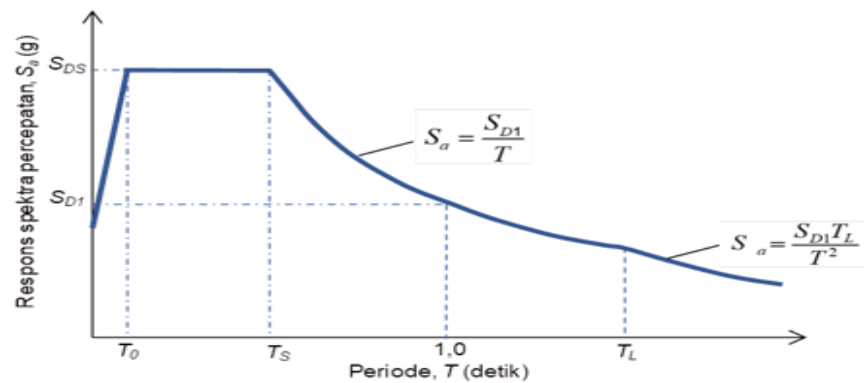
2. Untuk $T < T_0 < T_s$, spektrum respons percepatan desain sama dengan S_{Ds} , dan untuk $T > T_s$, S_a menggunakan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \dots\dots\dots (9)$$

3. Untuk $T > TL$, maka S_a menggunakan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1} \times TL}{T^2} \dots\dots\dots (10)$$

Hasil dari perhitungan respons spektrum desain akan menghasilkan kurva respons spektrum seperti pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Kurva Spektrum Respons Desain

Sumber: SNI 1726:2019

3.7.8 Menentukan Kategori Desain Seismik (KDS)

Penentuan Kategori Desain Seismik (KDS) dilakukan berdasarkan nilai percepatan spektral desain S_{DS} dan S_{D1} serta kategori risiko bangunan sesuai ketentuan SNI 1726:2019. KDS digunakan untuk menentukan tingkat tuntutan desain seismik terhadap struktur, termasuk ketentuan detailing, sistem struktur yang diperbolehkan, serta persyaratan daktilitas minimum. Semakin tinggi nilai huruf pada kategori risiko menunjukkan tuntutan ketahanan gempa yang semakin besar pula. Penentuan tersebut bisa dilihat lebih jelas pada Tabel 3.14 dan Tabel 3.15.

Tabel 3. 14 Kategori Desain Seismik Percepatan Periode Pendek

Nilai S_{DS}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	C	D
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 3. 15 Kategori Desain Seismik Percepatan Periode 1 Detik

Nilai S_{D1}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

Sumber: SNI 1726:2019

3.7.9 Pemilihan Sistem Struktur dan Parameter Sistem

Koefisien modifikasi respons adalah rasio antara beban gempa maksimum yang disebabkan oleh gempa rencana pada struktur bangunan elastik dan beban gempa nominal yang disebabkan oleh gempa rencana pada struktur gedung daktail. Koefisien modifikasi respons mempengaruhi perilaku dinamis struktur bangunan saat mengalami beban gempa. Sebelum memulai perencanaan, nilai koefisien ini harus diketahui. Penentuan nilai koefisien modifikasi respons (R), faktor kuat lebih sistem (Ω_0), dan faktor pembesaran defleksi (C_d) dilakukan berdasarkan Tabel 3.16 yang dikutip dari SNI 1726:2019.

Tabel 3. 16 Faktor R , C_d , dan Ω_0 Untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 ^k	TI ^k	TI ^k
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI ^l	TI ^l	TI ^l
5. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI

Tabel 3.16 Faktor R, Cd, dan Ω_0 Untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik
(Lanjutan)

7. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
3. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
4. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	6	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
E. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen menengah mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus ^p	6	2½	5	TB	TB	10	TI	TI
2. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	5½	2½	4½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing biasa	3½	2½	3	TB	TB	TI	TI	TI

Sumber: SNI 1726:2019

3.7.10 Gaya Geser Dasar Seismik

Geser dasar seismik (V) dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan menggunakan persamaan:

$$V = C_s \times W \dots\dots\dots (11)$$

Untuk perhitungan koefisien respons seismik (C_s), ditentukan sesuai dengan persamaan:

$$C_s = \frac{S_{Ds} \times I_e}{R} \dots\dots\dots (12)$$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e} \right)} \dots\dots\dots (13)$$

$$C_s = \frac{S_{D1} \times T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e} \right)} \dots\dots\dots (14)$$

Untuk perhitungan koefisien respons seismik maksimum dengan ketentuan, jika $T \leq T_L$ maka koefisien respons seismik (C_s) menggunakan persamaan (13), dan jika $T \geq T_L$, maka koefisien respons seismik (C_s) menggunakan persamaan (14).

3.7.11 Periode Fundamental

Perioda fundamental struktur, T , tidak boleh melebihi hasil koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dan perioda fundamental pendekatan, T_a yang ditentukan. Sebagai alternatif pada pelaksanaan metode untuk menentukan perioda fundamental struktur T , diizinkan secara langsung menggunakan periode bangunan pendekatan T_u .

$$T_{a, \min} = C_t \times H_n^x \dots\dots\dots (15)$$

Dengan:

H_n = Ketinggian Struktur

C_t = Koefisien struktur

x = Eksponen struktur

Tabel 3. 17 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100% gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik:		
• 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

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 3. 18 Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

Sumber: SNI 1726:2019

Dalam menentukan periode fundamental (T), nilai periode hasil analisis program (T_c) harus dibatasi berdasarkan periode pendekatan (T_a) sesuai dengan SNI 1726:2019. Nilai periode yang digunakan harus memenuhi $T_a \leq T \leq C_u \times T_a$.

Jika, $T_c > (C_u \times T_a)$, maka digunakan:

$$T = C_u \times T_a \dots\dots\dots (16)$$

Jika, $T_a \leq T_c \leq C_u \times T_a$, maka digunakan:

$$T = T_c \dots\dots\dots (17)$$

Jika $T_c < T_a$, maka:

$$T = T_a \dots\dots\dots (18)$$

Sebagai alternatif diizinkan untuk menentukan periode fundamental pendekatan (T_a), dalam detik, dari persamaan berikut untuk struktur dengan ketinggian tidak melebihi 12 tingkat di mana sistem pemikul gaya seismik terdiri dari rangka pemikul momen yang seluruhnya beton atau seluruhnya baja dan rata-rata tinggi tingkat sekurang-kurangnya 3 m.

$$T_a = 0,1 N \dots\dots\dots (19)$$

Keterangan:

T_a = Periode fundamental pendekatan

N = Jumlah lantai

3.8 Analisis Metode Riwayat Waktu Nonlinier (*Non Linear Time History*)

Analisis respons riwayat waktu merupakan salah satu metode analisis dinamik, di mana model matematis struktur dikenakan riwayat waktu gempa. Riwayat tersebut dapat berupa:

1. Rekaman gempa hasil pencatatan sebenarnya, atau
2. Gempa tiruan yang disimulasikan.

Respons struktur kemudian ditentukan berdasarkan riwayat percepatan tanah yang digunakan sebagai input. Data percepatan permukaan tanah *PGA* (*Peak Ground Acceleration*) biasanya disajikan dalam bentuk akselerogram, yaitu grafik hubungan antara percepatan tanah terhadap waktu selama gempa berlangsung. Akselerogram ini menjadi parameter utama dalam perancangan maupun analisis struktur.

Gaya gempa masukan ditentukan dari nilai percepatan maksimum permukaan tanah (*PGA*) yang diperoleh dari rekaman gempa (Said dkk. 2023). Penentuan percepatan tanah puncak harus dilakukan melalui studi spesifik situs, dengan mempertimbangkan pengaruh amplifikasi lokal. Nilai percepatan tanah puncak yang telah dikoreksi disebut *PGAm* (*Peak Ground Acceleration modified*).

Berdasarkan SNI 1726:2019 analisis *time history* dapat digunakan untuk menunjukkan kekuatan, kekakuan, dan daktilitas dalam menahan gempa maksimum dengan kinerja yang dapat diterima. Pada analisis *time history*,

beban gempa yang dimasukkan ke dalam program analisis struktur adalah rekaman gerak tanah yang telah dicocokkan dengan respons spektral target pada daerah lokasi struktur yang akan dianalisis. Beban harus mencakup efek horizontal dan juga vertikal bila diperlukan.

Pencocokan rekaman gerak tanah dengan respons spektral membutuhkan data gempa berupa data percepatan terhadap waktu dan respons spektral pada daerah objek. Pada SNI 1726:2019 dan SNI 8899:2020 dijelaskan persyaratan untuk analisis riwayat waktu nonlinier mengenai penentuan batas periode bawah adalah T_{lower} atau $20\% T_{mode2}$, sedangkan untuk batas atasnya adalah $2 T_{upper}$. Batas kecocokan minimal pada hasil pencocokan tidak boleh kurang dari 110% spektrum target. Proses pencocokan dilakukan secara 2 arah pada masing-masing arah orthogonal.

T_{lower} = periode getar pada saat 90 % partisipasi massa aktual telah terpenuhi pada masing-masing respons dua arah ortogonal.

Model matematika yang digunakan untuk menghitung T_{lower} tidak boleh memperhitungkan torsi tak terduga dan harus memperhitungkan efek P -delta.

T_{upper} = nilai yang lebih besar di antara dua nilai periode getar fundamental ortogonal.

Model matematika yang digunakan untuk menghitung T_{upper} tidak boleh memperhitungkan torsi tak terduga dan harus memperhitungkan efek P -delta.

3.8.1 Percepatan Puncak Muka Tanah

Percepatan puncak permukaan tanah (*peak ground acceleration*) harus diambil dengan level gempa probabilitas terlampaui sebesar 2% selama 50 tahun umur struktur bangunan (SNI 1726: 2019). Nilai PGA dapat diperoleh dari peta Hazard Gempa Indonesia sesuai koordinat lokasi gedung yang ditinjau.

3.8.2 Penskalaan *Ground Motion*

Pemilihan dan penskalaan rekaman percepatan tanah (*ground motion*) dilakukan untuk memastikan bahwa energi gempa yang digunakan dalam analisis *non linear time history* merepresentasikan tingkat bahaya gempa pada lokasi penelitian. Berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019, rekaman gempa yang dipilih harus dikalibrasi sehingga memiliki spektrum respons yang sesuai dengan spektrum respons desain elastis di lokasi yang ditinjau. Prosedur penskalaan dilakukan dengan menyesuaikan ordinat spektra dari masing-masing rekaman gempa asli (*ground motion*) terhadap spektrum target pada rentang periode yang dominan bagi struktur. Rentang periode yang ditinjau dalam proses matching ini ditetapkan berdasarkan periode fundamental struktur (T), dengan batasan bawah sebesar $0,2T$ dan batasan atas sebesar $1,5T$. Penentuan nilai T secara empiris didasarkan pada karakteristik ketinggian atau jumlah lantai bangunan untuk mendapatkan estimasi awal periode vibrasi struktur.

Nilai periode fundamental (T) yang diperoleh secara empiris tersebut selanjutnya akan dibandingkan dengan nilai periode hasil analisis ragam (*modal analysis*) pada perangkat lunak. Perbandingan ini dilakukan untuk memvalidasi kekakuan model struktur yang telah dibuat. Berdasarkan SNI 1726:2019, nilai periode struktur hasil analisis harus memenuhi batasan periode maksimum yang diizinkan untuk memastikan bahwa gaya geser dasar desain tetap berada pada batas konservatif. Nilai T yang telah divalidasi inilah yang kemudian digunakan sebagai parameter utama dalam menentukan rentang koordinat penskalaan (*scaling*) rekaman gempa, guna menjamin keakuratan input beban dinamik pada tahap analisis selanjutnya.

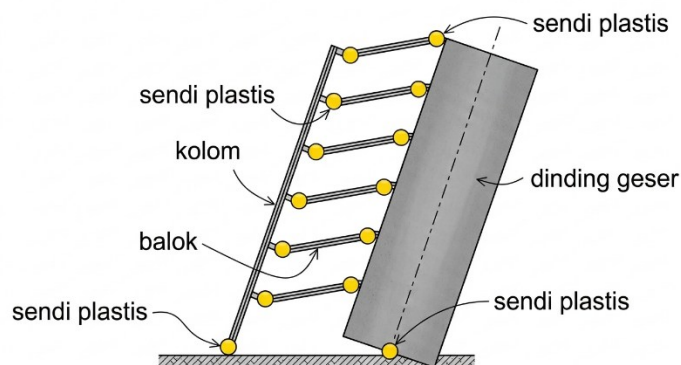
3.8.3 Sendi Plastis (*Plastic Hinge*)

Sendi plastis merupakan kondisi pada elemen struktur yang mengalami deformasi inelastis akibat tercapainya kapasitas plastis material. Pembentukan sendi plastis menunjukkan bahwa elemen struktur telah

melewati batas elastis, namun masih mampu menahan beban melalui mekanisme rotasi plastis. Oleh karena itu, sendi plastis bukan merupakan indikasi kegagalan langsung, melainkan mekanisme disipasi energi yang diharapkan dalam struktur tahan gempa.

Dalam perencanaan struktur bangunan gedung, diterapkan konsep kolom kuat–balok lemah (*strong column–weak beam*), dimana sendi plastis diharapkan terbentuk terlebih dahulu pada balok. Dengan demikian, apabila struktur mengalami beban gempa, keruntuhan yang terjadi bersifat bertahap dan tidak menyebabkan kegagalan struktur secara tiba-tiba.

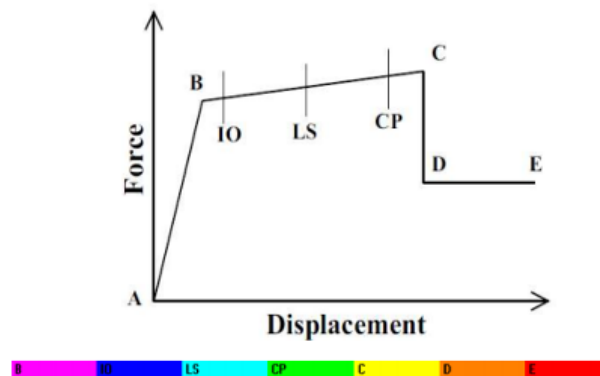
Struktur bangunan yang direncanakan harus memiliki sifat daktil agar mampu mengalami deformasi yang cukup besar tanpa mengalami keruntuhan. Ketika elemen struktur mencapai kondisi plastis, akan terbentuk daerah rotasi inelastis yang dikenal sebagai sendi plastis.



Gambar 3. 12 Mekanisme Keruntuhan Ideal Struktur Bangunan dengan Sendi Plastis

Sumber: Diadaptasi dari Hesa.co.id

Berdasarkan FEMA 356, perilaku sendi plastis diklasifikasikan ke dalam beberapa tingkat kinerja yang menggambarkan tingkat kerusakan dan kemampuan struktur dalam menahan beban setelah mengalami deformasi inelastis.



Gambar 3. 13 Performa Level Kinerja Struktur
Sumber: CSI

Pada software ETABS v22, perilaku sendi plastis pada elemen ditunjukkan dengan berbagai warna, berikut ini penjelasan mengenai warna sendi plastis berdasarkan kondisinya.

Tabel 3. 19 Keterangan Warna Sendi Plastis

Ket.	Simbol	Penjelasan
B		Menunjukkan batas leleh yang kemudian diikuti terjadinya pelelehan pertama pada struktur.
IO		Terjadi kerusakan kecil (tidak berarti pada struktur dan kekakuan struktur hampir sama saat sebelum terjadinya gempa).
LS		Terjadi kerusakan mulai dari kecil hingga sedang pada struktur dan kekakuan struktur berkurang tetapi masih mempunyai ambang yang cukup besar terhadap keruntuhan.
CP		Terjadi kerusakan yang parah pada struktur sehingga kekuatan dan kekakuan berkurang banyak.
C		Batas maksimum gaya geser masih mampu ditahan gedung.
D		Terjadi degradasi kekuatan struktur besar sehingga kondisi struktur tidak stabil dan hampir runtuh.
E		Kondisi struktur sudah tidak mampu menahan gaya geser dan runtuh.

Kondisi sendi plastis ditinjau pada dua tahap. Tahapan pertama dimulai dari peristiwa terjadinya keruntuhan pada struktur akibat rekaman gempa asli. Analisis pada tahap pertama akan menunjukkan mekanisme keruntuhan bangunan dan jumlah sendi plastis yang terjadi pada tiap elemen struktur. Tahapan kedua menunjukkan kondisi sendi plastis pada seluruh elemen struktur saat dibebani rekaman gempa sintesis. Kondisi sendi plastis yang ditinjau terbagi atas sendi plastis pada balok dan sendi plastis pada dinding geser (Rahmantyo & Andayani, 2019).

Secara umum, ASCE 41-13 memberikan batasan *drift* indikatif untuk struktur rangka baja bangunan gedung sebagai berikut.

Tabel 3. 20 Batasan *Drift* untuk Struktur Baja

	<i>Immediate Occupancy (IO)</i>	<i>Life Safety (LS)</i>	<i>Collaps Prevention (CP)</i>
Batas <i>Interstory Drift</i>	≤ 0.007 s/d 0,01	$\leq 0,02$ s/d 0,025	$\leq 0,05$

Sumber: ASCE 41-13

3.8.4 Parameter Redaman (*Damping*)

Redaman (*damping*) pada struktur merupakan salah satu properti yang menentukan respon dinamis struktur tersebut. Perhitungan koefisien redaman dari sebuah matrik redaman berdasarkan dimensi struktur, ukuran elemen-elemen struktur dan material yang dipergunakan adalah tidak praktis. Oleh karena itu, redaman umumnya dinyatakan dengan nilai numerik berupa rasio redaman modal. Rasio redaman ini sudah cukup untuk menganalisis sistem *linear* dengan redaman klasik. Matrik *damping* biasanya diperlukan apabila melakukan analisis sistem *linear* dengan redaman tidak klasik (*non-classically damping*) serta analisis struktur *non-linear*.

1. Estimasi Rasio Redaman Modal

Jika struktur yang telah berdiri dievaluasi keamaannya terhadap gempa, maka properti struktur yang penting seperti massa, kekakuan dan juga redaman struktur tersebut idealnya didapatkan secara

eksperimen. Namun hal seperti ini jarang dilakukan karena alasan biaya dan juga waktu. Untuk struktur baru yang sedang direncanakan, propertinya sudah jelas belum dapat diukur. Rasio redaman modal suatu struktur seharusnya diestimasi menggunakan data dari struktur yang mirip. Data-data tentang damping yang terkumpul, tidak dapat digunakan secara langsung dalam analisis maupun desain terhadap beban gempa karena data yang didapat dari hasil tes dengan gaya yang memiliki amplitudo rendah tidak dapat mewakili respon struktur akibat gempa kuat yang menyebabkan struktur tersebut berdeformasi sampai batas-batas inelastisnya.

Idealnya, data redaman yang didapat dari pencatatan getaran gempa dari beberapa struktur dengan berbagai tipe struktur seperti gedung, jembatan, dam dan sebagainya yang menggunakan material seperti baja, beton bertulang, beton prategang, *masonry*, kayu dan sebagainya. Data-data tersebut akan memberikan dasar untuk mengestimasi rasio redaman untuk mengevaluasi keamanan gempa struktur yang telah berdiri atau untuk mendesain struktur baru.

Tabel 3.21 menyajikan nilai rasio redaman yang direkomendasikan untuk dua tingkat respons struktur, yaitu:

- a. tingkat tegangan kerja, yaitu kondisi ketika tegangan tidak melebihi $1/2$ tegangan leleh; dan
- b. tingkat tegangan pada saat atau mendekati titik leleh, di mana perilaku inelastis mulai berkembang.

Tabel 3. 21 Nilai Damping yang Direkomendasikan

Level Tegangan	Tipe dan Kondisi Struktur	Rasio Redaman (%)
Tegangan kerja ($\leq 1/2$ tegangan leleh)	Baja dilas, beton prategang, beton bertulang (retak kecil)	2 – 3
	Beton bertulang dengan retak sedang	3 – 5
	Baja dengan sambungan baut/keling, struktur kayu dengan sambungan paku atau baut	5 – 7
Pada atau sedikit di bawah tegangan leleh	Baja dilas, beton prategang (tanpa kehilangan prategang total)	5 – 7
	Baja prategang tanpa tegangan sisa	7 – 10
	Beton bertulang	7 – 10
	Baja dengan sambungan baut/keling, struktur kayu dengan sambungan baut	10 – 15
	Struktur kayu dengan sambungan paku	15 – 20

Sumber: Diadaptasi dari Newmark & Hall (1982)

Berdasarkan tabel tersebut, nilai redaman yang lebih besar umumnya digunakan untuk struktur biasa (*ordinary structures*), sedangkan nilai yang lebih kecil digunakan untuk struktur khusus (*special structures*) yang direncanakan memiliki daktilitas dan kapasitas disipasi energi yang lebih baik.

Sebagian besar peraturan bangunan (*building codes*) tidak secara eksplisit mempertimbangkan variasi redaman akibat perbedaan material maupun tingkat nonlinieritas struktur. Oleh karena itu, dalam analisis gempa berbasis spektrum respons, umumnya digunakan rasio

redaman konstan sebesar 5% terhadap redaman kritis sebagai pendekatan praktis. Hal ini sejalan dengan ketentuan dalam SNI 1726:2019 yang menggunakan redaman 5% sebagai dasar dalam penyusunan spektrum respons desain.

2. *Rayleigh Damping*

Dalam analisis dinamik struktur, redaman umumnya dimodelkan menggunakan pendekatan *Rayleigh damping*, yang merupakan kombinasi dari redaman yang bergantung pada massa (*mass-proportional*) dan kekakuan (*stiffness-proportional*). Secara matematis, matriks redaman dinyatakan sebagai:

$$C = a_0 M \text{ dan } C = a_1 K \dots\dots\dots (20)$$

di mana a_0 dan a_1 adalah konstanta redaman yang masing-masing berkaitan dengan kontribusi massa dan kekakuan.

Untuk memahami pembentukan Rayleigh damping, terlebih dahulu ditinjau masing-masing komponennya.

a. *Mass-proportional damping*

Untuk sistem dengan *mass-proportional damping*, matriks redaman dinyatakan sebagai:

$$C_n = a_0 \cdot M_n \dots\dots\dots (21)$$

Rasio redaman modal untuk mode ke-n diberikan oleh:

$$\xi_n = \frac{a_0}{2} \times \frac{1}{\omega_n} \dots\dots\dots (22)$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa rasio redaman berbanding terbalik dengan frekuensi alami struktur. Nilai a_0 dapat ditentukan berdasarkan rasio redaman pada suatu mode tertentu, misalnya:

$$a_0 = 2\xi_i \omega_i \dots\dots\dots (23)$$

b. *Stiffness-proportional damping*

Untuk *stiffness-proportional damping*, matriks redaman dinyatakan sebagai:

$$C_n = a_1 \omega_n^2 M_n \dots\dots\dots (24)$$

Rasio redaman modalnya adalah:

$$\xi_n = \frac{a_1}{2} \omega_n \dots\dots\dots (25)$$

Berbeda dengan kasus sebelumnya, rasio redaman pada model ini berbanding lurus dengan frekuensi alami struktur. Nilai a_1 dapat ditentukan dari:

$$a_1 = \frac{2\xi_j}{\omega_j} \dots\dots\dots (26)$$

c. Kombinasi *rayleigh damping*

Baik *mass-proportional* maupun *stiffness-proportional damping* secara terpisah tidak cukup merepresentasikan kondisi redaman struktur yang sebenarnya. Oleh karena itu, digunakan kombinasi keduanya yang dikenal sebagai *Rayleigh damping*, yaitu:

$$C = a_0 M + a_1 K \dots\dots\dots (27)$$

Rasio redaman untuk mode ke-n dari sistem tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$\xi_n = \frac{a_0}{2} \times \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \dots\dots\dots (28)$$

Koefisien a_0 dan a_1 dapat ditentukan dengan menyelesaikan sistem persamaan simultan berdasarkan dua mode getar, yaitu mode ke-i dan ke-j, dengan rasio redaman ξ_i dan ξ_j , serta frekuensi alami ω_i dan ω_j yang telah diketahui.

Persamaan (28) untuk kedua mode tersebut dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (29)$$

Selanjutnya, nilai a_0 dan a_1 dapat diperoleh dari penyelesaian sistem persamaan tersebut:

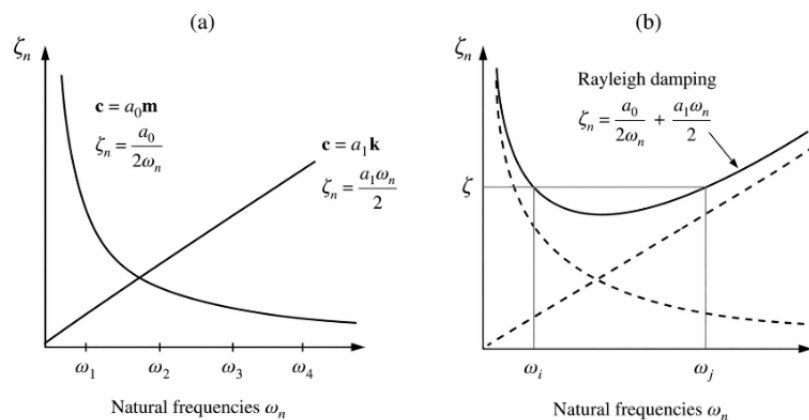
$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \begin{pmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -1/\omega_j & 1/\omega_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{pmatrix} \dots\dots\dots (30)$$

Apabila kedua mode dianggap memiliki rasio redaman yang sama, yaitu $\xi_i = \xi_j = \xi$, maka nilai konstanta a_0 dan a_1 dapat disederhanakan menjadi:

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i - \omega_j} \text{ dan } a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \dots\dots\dots (31)$$

Matriks redaman kemudian dapat ditentukan menggunakan Persamaan (26), sedangkan rasio redaman untuk mode lainnya dapat dihitung menggunakan Persamaan (27).

Dalam penerapannya, nilai ω_i biasanya diambil dari frekuensi alami mode pertama, sedangkan ω_j diambil dari frekuensi mode yang lebih tinggi yang masih memberikan kontribusi signifikan terhadap respons dinamik struktur.



Gambar 3. 14 Variasi Rasio Redaman Modal dengan Frekuensi Alami; (a) *Mass-Proportional Damping* dan *Stiffness-Proportional Damping*; (b) *Rayleigh Damping*

Sumber: Chopra, 2020

3.9 Parameter Respons Struktur

Parameter respons struktur digunakan untuk mengevaluasi perilaku struktur akibat pembebanan gempa, khususnya dalam analisis *Non Linear Time History Analysis (NLTHA)*. Parameter yang ditinjau meliputi perpindahan (*displacement*), simpangan antar lantai (*interstory drift*), serta parameter respons lainnya yang mencerminkan kinerja struktur terhadap beban gempa.

3.9.1 Perpindahan Total (*Displacement*)

Perpindahan atau *displacement* adalah besarnya pergeseran linear pusat massa suatu lantai dari titik awal (posisi diam) akibat beban lateral gempa. Dalam analisis riwayat waktu, nilai *displacement* diperoleh secara deterministik pada setiap langkah waktu (*time step*). Untuk mendapatkan nilai perpindahan desain inelastis yang sebenarnya, nilai dari analisis elastis harus diamplifikasi menggunakan rumus sesuai SNI 1726:2019:

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_e}{I_e} \dots\dots\dots (32)$$

Keterangan:

δ_x = defleksi yang terjadi pada tingkat x (mm)

C_d = faktor amplifikasi defleksi

δ_e = defleksi disyaratkan pada lokasi ditentukann dari analisis elastis

I_e = faktor keutamaan gempa

3.9.1 Simpangan Antar Lantai (*Interstory Drift*)

Simpangan antar lantai merupakan selisih perpindahan (*displacement*) antara dua lantai yang berdekatan. Parameter ini sangat krusial untuk mengecek kinerja elemen non-struktural (seperti dinding dan kaca) serta stabilitas struktur secara keseluruhan. Simpangan antar lantai desain (Δ) dihitung dari selisih perpindahan desain (δ_x) pada tingkat yang berurutan:

$$\Delta = \delta_x - \delta_{x-1} \dots\dots\dots (33)$$

Nilai Δ yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan batasan simpangan antar tingkat izin (Δa) sesuai pada SNI 1726:2019, yang disajikan pada Tabel 3.22 berikut:

Tabel 3. 22 Simpangan Antar Tingkat Izin

Struktur	Kategori risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	$0,025 h_{sx}$	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$

Sumber: SNI 1726:2019

3.9.2 Base Shear (Gaya Geser Dasar)

Base shear atau gaya geser dasar merupakan akumulasi dari seluruh gaya lateral inersia yang bekerja pada tiap lantai gedung yang disalurkan ke fondasi. Besarnya gaya geser dasar mencerminkan intensitas beban gempa yang diserap oleh struktur; di mana struktur dengan kekakuan dan massa yang lebih besar cenderung menghasilkan *base reaction* yang lebih tinggi. Dalam analisis ini, nilai yang ditinjau adalah nilai absolut maksimum dari total reaksi perletakan selama durasi gempa berlangsung, yang selanjutnya digunakan untuk proses penskalaan (*scaling*) terhadap prosedur gaya lateral ekuivalen.

Berdasarkan SNI 1726:2019, gaya geser dasar dinamik ($V_{dinamik}$) yang dihasilkan harus divalidasi terhadap gaya geser statis ekuivalen (V_{statis}). Jika nilai gaya geser dasar dinamik kurang dari 100% gaya geser dasar statis

ekivalen, maka seluruh parameter respons struktur harus dikalikan dengan faktor skala sebagai berikut:

$$FS = \frac{V_{statis}}{V_{dinamik}} \dots\dots\dots (34)$$

Penskalaan ini bertujuan untuk memastikan bahwa gaya gempa yang digunakan dalam analisis memenuhi batas minimum yang disyaratkan oleh standar keamanan bangunan gedung.

3.9.3 Pengaruh P-delta

Efek sekunder berupa geser dan momen pada elemen-elemen struktur, yang disebabkan oleh aksi beban-beban vertikal yang dipicu oleh perpindahan horizontal struktur yang dihasilkan dari berbagai kondisi pembebanan. Pengaruh P-delta pada geser tingkat dan momen, gaya dan momen elemen struktur yang dihasilkan, dan simpangan antar tingkat yang diakibatkannya tidak perlu diperhitungkan bila koefisien stabilitas (θ) seperti yang ditentukan oleh Persamaan 51 berikut atau kurang dari 0,10.

$$\theta = \frac{P_x \Delta I_e}{V_x h_{sx} C_d} \dots\dots\dots (35)$$

Koefisien stabilitas tidak boleh melebihi θ_{max} yang ditentukan sebagai berikut:

$$\theta_{max} = \frac{0,5}{\beta C_d} \leq 0,25 \dots\dots\dots (36)$$

Keterangan:

P_x = beban desain vertikal total pada dan di atas tingkat-x

Δ = simpangan antar tingkat desain

I_e = faktor keutamaan gempa

V_x = gaya geser seismik yang bekerja antara tingkat x dan x-1

h_{sx} = tinggi tingkat di bawah tingkat x

C_d = faktor amplifikasi defleksi

Apabila koefisien stabilitas (θ) bernilai antara 0,10 hingga θ_{max} , maka simpangan dan gaya-gaya pada elemen struktur harus dikalikan dengan

faktor amplifikasi sebesar $1/(1-\theta)$ Namun, jika θ melebihi θ_{max} , maka struktur harus dirancang ulang karena dianggap tidak stabil secara geometri.