

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Baja

Baja merupakan salah satu bahan konstruksi yang banyak digunakan setelah beton. Material yang berbahan dasar logam ini mempunyai banyak kelebihan, khususnya kekuatan dan kecepatan pengerjaan sehingga banyak diminati sebagai bahan konstruksi, baik struktur bangunan maupun jembatan. Material baja untuk sebagai elemen struktural diklasifikasikan berdasarkan komposisi kimianya, sifat tariknya, dan metode pembuatannya seperti baja karbon (*carbon steel*), baja kekuatan tinggi rendah aluminium (*high-strength low-alloy*) HSLA, baja karbon dengan perlakuan panas (*heat-treated carbon steel*), dan baja aluminium konstruksi perlakuan panas (*heat-treated constructional alloy steel*). Dasar klasifikasi ini akan sangat memengaruhi sifat-sifat mekanis baja sebagai bahan konstruksi (Arifi, E. & Setyowulan, D., 2020).

Kekuatan material baja dalam menerima beban sangat ditentukan oleh sifat mekanisnya. Sifat mekanis suatu bahan adalah kemampuan bahan tersebut dalam memberikan perlawanan terhadap beban yang bekerja pada bahan tersebut. Sifat mekanis material baja struktural yang diperlukan dalam perencanaan meliputi tegangan leleh, tegangan putus (tegangan ultima), modulus elastisitas, modulus geser, nisbah poisson, serta koefisien pemuaian (Arifi, E. & Setyowulan, D., 2020).

Tabel 2. 1 Sifat Mekanis Baja Struktural Berdasarkan Mutu Baja

Jenis Baja	Tegangan Putus Minimum, f_u (MPa)	Tegangan Leleh Minimum, f_y (MPa)	Peregangan 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)

Berdasarkan SNI 1729-2002, sifat mekanis dari beberapa jenis mutu baja yang beredar di pasaran dijelaskan dalam Tabel 2.1. Nilai tegangan leleh (f_y) dan tegangan putus

(f_u) tidak boleh melebihi nilai yang diberikan pada Tabel 2.1. Nilai dari sifat mekanis yang lainnya diberikan pada Tabel 2.2 (Arifi, E. & Setyowulan, D., 2020).

Tabel 2. 2 Sifat Mekanis Baja Struktural Secara Umum

Sifat Mekanis	Simbol	Nilai	Satuan
Modulus Elastisitas	E	200.000	MPa
Modulus geser	G	80.000	MPa
Nisbah Poisson	μ	0,3	
Koefisien Pemuaian	α	12×10^{-6}	/oC

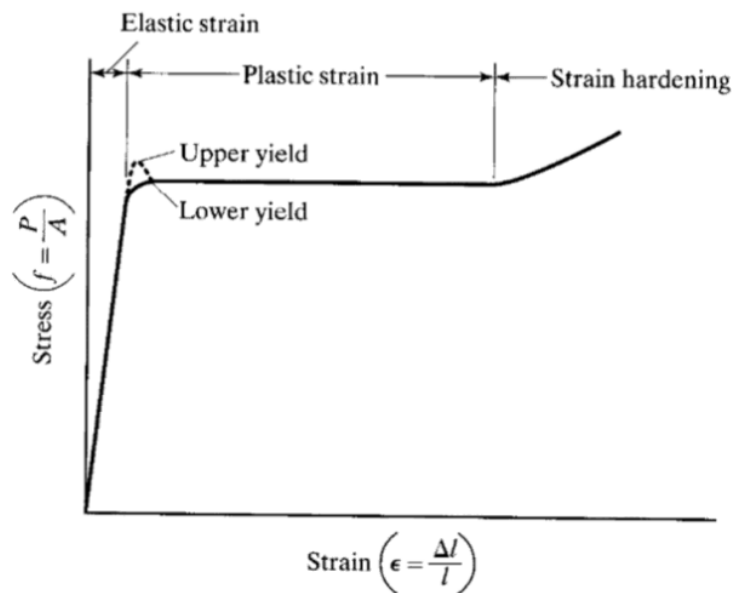
(Sumber SNI 1729-2002)

Untuk material baja yang tidak dilengkapi dengan spesifikasinya (tidak teridentifikasi), yang bebas dari cacat yang merugikan, hanya boleh digunakan untuk komponen struktur yang kerusakannya tidak akan mereduksi kekuatan struktur (Arifi, E. & Setyowulan, D., 2020). Menurut (Arifi, E. & Setyowulan, D., 2020) Pemilihan baja sebagai elemen struktur pada bangunan didasarkan pada beberapa keunggulan yang dimiliki oleh material tersebut, diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. Baja mempunyai kekuatan yang tinggi sehingga dapat mengurangi ukuran struktur yang secara langsung akan mengurangi berat struktur secara keseluruhan.
- b. Material penyusun baja lebih seragam dibandingkan dengan beton.
- c. Tingkat elastisitas yang tinggi dan sesuai dengan hukum Hooke. Selain itu, momen inersia dari baja akan dapat dihitung secara akurat.
- d. Daktilitas yang cukup tinggi, dimana daktilitas adalah kemampuan material dalam menahan deformasi yang besar tanpa terjadinya keruntuhan dengan tegangan tarik yang tinggi. Pada pengujian tarik, daktilitas diperoleh dari presentase perpanjangan dibagi dengan panjang *gage* atau persen penurunan dari luasan.
- e. Kekerasan (*toughness*) adalah kemampuan dari material untuk menyerap energy dalam jumlah besar. Struktur baja merupakan material yang kuat karena memiliki kekuatan dan daktilitas yang tinggi. Ketika suatu baja dibebani sampai mengalami deformasi yang besar, tetap akan bisa menahan gaya yang besar. Karakteristik ini sangat penting karena baja dapat mengalami deformasi yang besar selama fabrikasi dan ereksi tetapi tidak mengalami kerusakan.

- f. Mudah dipasang atau digabungkan dengan struktur yang sudah ada sehingga mempercepat waktu pelaksanaan konstruksi.

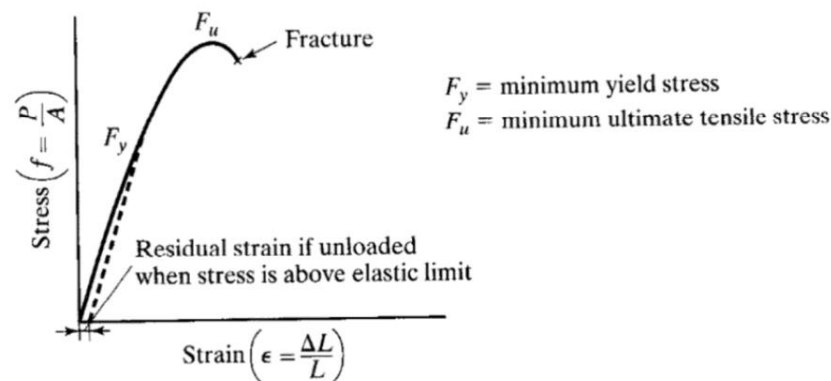
Pemahaman tentang karakteristik/sifat dari material akan sangat diperlukan agar dapat memahami perilaku dari struktur baja. Diagram tegangan-regangan akan dapat memberikan informasi berharga untuk memahami bagaimana perilaku baja pada kondisi tertentu. Sifat tarik dari baja biasanya ditentukan berdasarkan uji tarik pada benda uji yang berukuran kecil yang sesuai dengan prosedur di ASTM. Perilaku baja pada pengujian tersebut terkait erat dengan perilaku dari batang baja struktural yang mengalami beban statis. Uji tekan pada baja struktural jarang dipakai karena titik leleh dan modulus elastisitas yang diperoleh dari pengujian tarik dan tekan mempunyai nilai yang hamper sama. Diagram tersebut digambarkan pada Gambar 2.1 yang merupakan grafik hubungan tegangan-regangan baja tipikal untuk baja struktural dengan kadar karbon rendah pada temperature ruang. Berdasarkan grafik tersebut, terdapat beberapa kondisi di antaranya adalah elastis, plastis, dan *strain-hardening* (Arifi, E. & Setyowulan, D., 2020).



Gambar 2. 1 Grafik Tegangan-Regangan Baja Tipikal untuk Baja Struktural dengan Kadar Karbon Rendah pada Temperatur Ruang
(Sumber McCornac & Csernak, 2012)

Batas elastis (*elastic limit*) merupakan kondisi pada saat tegangan maksimum dapat ditahan oleh material tanpa mengalami deformasi tetap atau dapat kembali ke bentuk

awalnya. Pada kondisi tersebut berlaku hukum Hooke, dimana perbandingan antara tegangan terhadap regangan dalam batas elastisnya disebut dengan modulus elastisitas (*Young's modulus E*), dimana nilainya sekitar 29×10^3 ksi untuk semua struktur baja, kecuali pada kondisi khusus. Adapun tegangan pada keadaan dimana terjadi perpanjangan (*elongation*) atau regangan yang besar tanpa peningkatan tegangan disebut dengan tegangan leleh (*yield stress*). Tegangan leleh merupakan sifat baja yang sangat penting untuk diketahui karena akan digunakan sebagai dasar perencanaan suatu struktur baja. Regangan pada saat sebelum terjadinya tegangan leleh disebut regangan elastis (*elastic strain*), sedangkan regangan yang terjadi sesudahnya tanpa penambahan tegangan disebut regangan plastis (*plastic strain*). Regangan plastis biasanya bernilai antara 10 sampai dengan 15 kali regangan elastisnya. Setelah terjadi regangan plastis, maka akan timbul *strain-hardening* yaitu kondisi dimana terjadi penambahan tegangan untuk menghasilkan regangan. Karena regangan yang terjadi sudah sangat besar, maka kondisi ini jarang dipakai sebagai acuan perencanaan dari *engineer*. Untuk baja getas (*brittle steel*), digram tegangan-regangannya diperlihatkan pada Gambar 2.2 (Arifi, E. & Setyowulan, D., 2020).



Gambar 2. 2 Grafik Tegangan-Regangan Baja Getas (Brittle Steel) Tipikal
(Sumber McCormac & Csernak, 2012)

2.2 Konsep Perencanaan Struktur Baja

Terdapat dua konsep analisis struktur baja, yaitu konsep ASD (*Allowable Stress Design*) dan LRFD (*Load and Resistance Factor Design*). Konsep ASD merupakan perencanaan berdasarkan tegangan kerja yang mengacu pada perencanaan elastis, dimana semua tegangan yang terjadi di bawah tegangan izin. LRFD merupakan perencanaan berdasarkan beban terfaktor yang memperhitungkan kondisi batas, yaitu kondisi

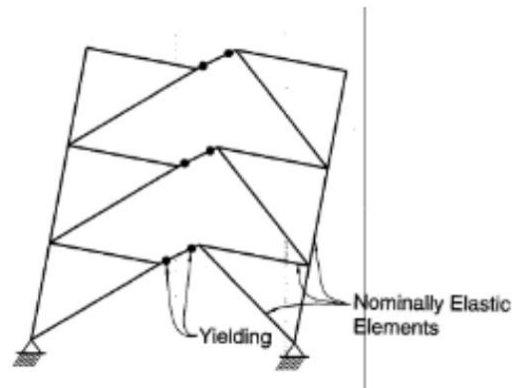
maksimum yang dapat diberikan suatu penampang yang berada di luar batas elastis (inelastis). Selain itu juga memperhitungkan tegangan ultima baja (f_u). Pada SNI 1729-2020 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Baja Struktural, desain struktur baja dengan menggunakan ASD disebut dengan Desain Kekuatan Izin (DKI), sedangkan desain struktur baja dengan menggunakan LRFD diistilahkan sebagai Desain Faktor Beban dan Ketahanan (DFBT) (Arifi, E. & Setyowulan, D., 2020).

Perbedaan mendasar antara ASD dan LRFD adalah pada ASD, kekuatannya menggunakan kekuatan izin atau faktor keamanan. Pada LRFD, beban yang digunakan adalah beban ultima, dimana beban yang bekerja dikalikan dengan faktor beban sehingga menghasilkan beban yang lebih besar dari beban yang diterima struktur. Selain faktor beban, pada LRFD juga menggunakan faktor ketahanan yang besarnya ditentukan oleh jenis gaya yang bekerja, apakah batang mengalami gaya tarik, tekan, lentur, atau geser (Arifi, E. & Setyowulan, D., 2020).

Terdapat beberapa jenis portal baja tahan gempa, secara umum terdapat dua jenis portal baja tahan gempa yaitu *Braced Frame* dan *Momen Resisting Frames*. Masing-masing jenis ini memiliki karakteristik yang berbeda. Sistem rangka pemikul momen mempunyai kemampuan menyerap energi yang baik, tetapi memerlukan adanya simpangan antar lantai yang cukup besar supaya timbul sendi-sendi plastis pada balok yang akan menyerap energi gempa. *Concentrically Braced Frames* (CBF) adalah sistem yang tidak sama seperti *Special Momen Frame* (SMF), sistem ini memiliki penahan gaya lateral dengan karakteristik kekakuan elastik yang tinggi. Kekakuan yang tinggi diperoleh dari diagonal *brace* yang menahan gaya lateral pada struktur *frame* yang meningkatkan aksi gaya dalam aksial dan aksial lentur yang kecil (Saputra, A.W., 2020). *Eccentrically Braced Frames* (EBF) merupakan struktur baja penahan gaya lateral yang merupakan gabungan antara konsep daktilitas dan disipasi energi yang baik dari desain *Special Momen Frames* (SMF) dengan karakteristik kekakuan elastik yang tinggi dari desain *Concentrically Braced Frames* (CBF). EBF mengkombinasikan banyak keuntungan individu dari sistem kerangka konvensional, secara spesifik, EBF memiliki elastisitas tinggi, respons inelastik stabil pada muatan lateral siklis, daktilitas dan kapasitas disipasi energi yang besar (Bruneau, 1998).

Konsep desain EBF sederhana dengan membatasi aksi inelastis pada link, dan mendesain kerangka disikat link untuk mempertahankan tegangan maksimum yang dapat diberikan oleh link. Desain menggunakan strategi ini harus memastikan bahwa link bertindak sebagai sekering seismik daktil dan melindungi integritas dari kerangka seismik di

sekitarnya. Elemen link merupakan konsep utama sebagai bagian yang akan rusak sedangkan elemen lain diharapkan tetap berada dalam kondisi elastis. Kelelahan yang terjadi pada elemen link dapat berupa kelelahan geser atau kelelahan lentur. Tipe kelelahan ini tergantung pada panjang link tersebut (Saputra, A.W., 2020).



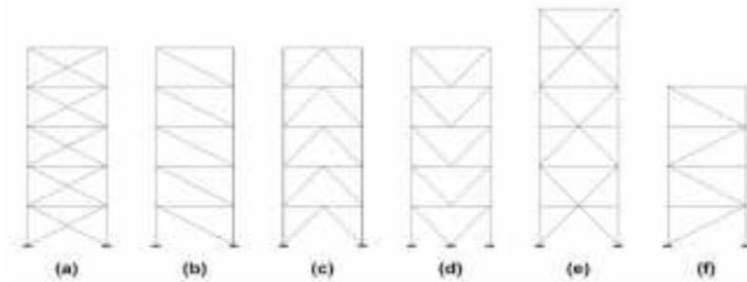
Gambar 2. 3 Eccentrically Braced Frames (EBF)
(Sumber AISC *Seismic Design Manual*)

2.3 Sistem Rangka Bresing

Rangka Bresing menurut SNI 1729-2020 pada dasarnya adalah sistem rangka batang vertikal yang memberikan ketahanan terhadap gaya lateral dan memberikan kestabilan sistem struktur. Terdapat dua sistem rangka bresing yaitu Sistem Rangka Bresing Konsentrik dan Sistem Rangka Bresing Eksentrik.

2.3.1 Sistem Rangka Bresing Konsentrik

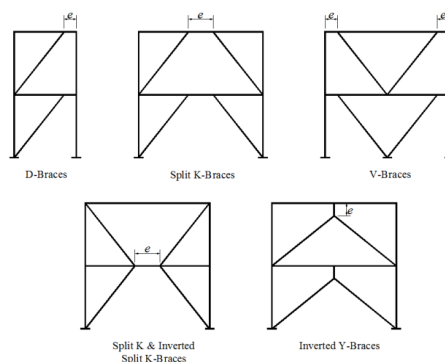
Sistem Rangka Bresing Konsentrik merupakan rangka bresing yang elemen-elemen strukturnya difungsikan utamanya untuk menahan gaya-gaya aksial menurut SNI 1726-2020. Sistem Rangka Bresing Konsentrik (SRBK) merupakan sistem struktur yang elemen bresing diagonalnya bertemu di satu titik. Sistem Rangka Bresing Konsentrik dikategorikan sebagai Sistem Rangka Bresing Konsentrik Biasa (SRBKB) atau Sistem Rangka Bresing Konsentrik Khusus (SRBKK). Sistem Rangka Bresing Konsentrik Khusus (SRBKK) diharapkan dapat mengalami deformasi inelastik yang cukup besar akibat gaya gempa rencana. SRBKK memiliki daktilitas yang lebih tinggi daripada tingkat daktilitas SRBKB mengingat penurunan kekuatannya yang lebih kecil pada saat terjadinya tekuk pada bresing tekan (Widnyana, I.N.S., & Sana, I.G., 2018). Sistem rangka bresing konsentrik memiliki beberapa tipe seperti pada Gambar 2.4



Gambar 2. 4 Tipe-tipe Bresing Konsentrik
(Sumber AISC 2010)

2.3.2 Sistem Rangka Bresing Eksentrik

Sistem struktur *Eccentrically Braced Frame* (EBF) merupakan sistem yang membatasi perilaku inelastik hanya terjadi pada balok *link* yang berada diantara dua pengekang eksentrik, sedangkan bagian balok luar, kolom, dan pengekang diagonal tetap elastik selama beban seismik bekerja. Oleh karena itu, sistem *Eccentrically Braced Frame* (EBF) dapat memenuhi tingkat daktilitas yang tinggi seperti *Moment Resisting Frame* (MRF), dan juga dapat memberikan tingkat kekakuan elastis yang tinggi seperti *Concentrically Braced Frame* (CBF) (Rafael, J.W.M. & Suswanto, B., 2017) . Beberapa tipe bresing dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2. 5 Tipe-tipe Bresing Eksentrik
(Sumber Rafael, J.W.M. & Suswanto, B., 2017)

Link dalam EBF dibentuk dari *offset* pada sambungan *braces* pada balok atau *braces* yang berbatasan dengan kolom sehingga selama beban seismik bekerja *link* menjadi aktif dan mengalami pelelehan. Atau dengan kata lain *link* berfungsi sebagai sekering daktil

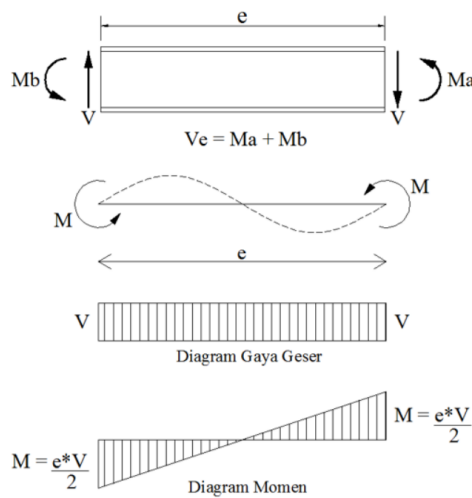
selama pembebanan gempa sehingga *link* akan mengalami rotasi inelastik sedangkan komponen lainnya dari EBF tetap elastik. *Link* berperilaku sebagai balok pendek dengan gaya geser yang bekerja berlawanan arah pada kedua ujungnya sehingga momen yang dihasilkan pada kedua ujung balok mempunyai besar dan arah yang sama (Rafael, J.W.M. & Suswanto, B., 2017).

Penelitian yang dilakukan oleh Musmar menunjukkan bahwa sistem EBF dengan pelelehan geser (*shear link*) lebih stabil dan menunjukkan daktilitas yang lebih dibandingkan *link* yang mengalami pelelehan lentur. Hal ini disebabkan gaya geser internal yang terjadi konstan sepanjang *link* dan pelelehan pada bagian *web* berlangsung sepanjang bidang *web* dari *link*. Analisa numerik yang dilakukan oleh Hashemi terhadap rangka EBF dengan kriteria *link* panjang menunjukkan bahwa pelelehan pada balok *link* disebabkan karena gaya lentur. Penyerapan energi pada bagian sayap penampang lebih sedikit dibandingkan dengan kondisi *link* geser dikarenakan terjadinya *premature buckling* pada bagian sayap dari balok *link*. Untuk mengurangi hal ini maka dapat dikontrol penempatan pengaku badan pada balok *link* walaupun tidak terlalu efisien karena adanya pengaruh torsi (Rafael, J.W.M. & Suswanto, B., 2017).

Pada penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa sistem rangka baja yang menggunakan bresing eksentrik dengan desain konfigurasi *split K* mempunyai sifat daktilitas yang jauh lebih baik dibanding dengan konfigurasi lainnya (Manope, Manalip, & Ointoe, 2019). Desain rangka baja *split K* memiliki kelebihan yaitu sistemnya tidak langsung berhubungan dengan elemen kolom sehingga mengurangi resiko runtuh pada elemen kolom akibat beban horizontal dan dapat memperkecil kemungkinan runtuhnya struktur elemen penting terlebih dahulu. (Sulistiani, E., 2022)

2.4 Link

Link Beam merupakan elemen balok pendek yang direncanakan mengalami kelelehan lebih awal pada saat bekerjanya beban lateral pada struktur. Pada bagian link ini bekerja gaya geser (*shear*) pada kedua ujung link dengan besar yang sama dan arah yang berlawanan. Gaya geser yang bekerja tersebut mengakibatkan momen pada kedua ujung link dengan besar dan arah yang sama (Saputra, A.W., 2020).



Gambar 2. 6 Gaya yang bekerja pada link

(Sumber Engelhart dan Popov, 1988; Becker dan M.Isler, 1996)

Pemeriksaan kelangsingan penampang *link*

Untuk sayap :

$$\lambda_r = 0,30 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \dots\dots\dots (2.4.a)$$

Untuk badan :

$$\lambda_r = 0,30 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \left(2,33 - \frac{P_u}{\phi_b p_y} \right) > 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \dots\dots\dots (2.4.b)$$

Kapasitas momen penampang:

$$M_n = Z_x \cdot F_y \dots\dots\dots (2.4.c)$$

Kapasitas geser penampang:

$$V_n = 0,6 \times F_y \times A_w \times R_y \dots\dots\dots (2.4.d)$$

2.4.1 Panjang Link Beam

Link beam bekerja sekering gempa yang bersifat daktail, menyerap energi gempa yang masuk ke dalam bangunan. Panjang dari elemen link akan menentukan mekanisme leleh dan kegagalan ultima yang terjadi pada elemen link. Secara umum terdapat 2 jenis link berdasarkan panjang linknya, yaitu link geser (*short link*) dan link lentur (*long link*) ketentuan mengenai panjang link menurut SNI 1729-2015 adalah sebagai berikut:

- link geser (*short link*) : $e \leq \frac{1,6 Mp}{V_p} \dots\dots\dots (2.4.e)$

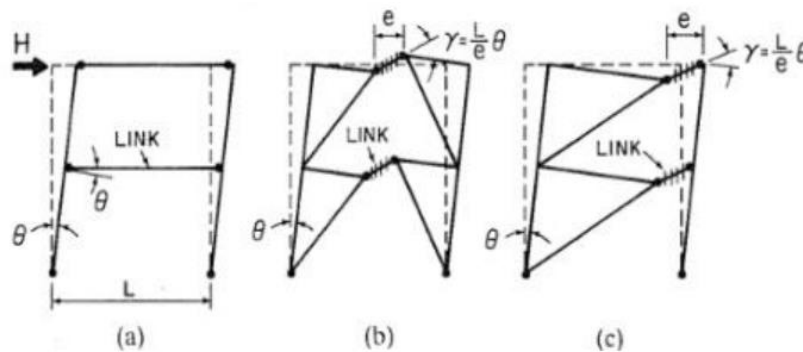
- link medium (*intermediate link*) : $\frac{1,6 Mp}{V_p} \leq e \leq \frac{2,6 Mp}{V_p} \dots\dots\dots (2.4.f)$

- link lentur (*long link*) : $e \geq \frac{2,6 Mp}{Vp}$ (2.4.g)

2.4.2 Sudut Rotasi Link

Sudut rotasi *link beam* adalah sudut inelastis antara *link beam* dan balok di samping *link* ketika besarnya total *story drift* sama dengan besarnya desai *story drift*, Δ . Sudut rotasi *link beam* seharusnya tidak melebihi nilai berikut :

- 0,08 radian untuk panjang link $e \leq \frac{1,6 Mp}{Vp}$
- 0,02 radian untuk panjang link $e \geq \frac{2,6 Mp}{Vp}$
- Interpolasi linier antara 0,08-0,02 radian jika panjang link $\frac{1,6 Mp}{Vp} \leq e \leq \frac{2,6 Mp}{Vp}$



Gambar 2. 7 Sudut Rotasi Link Beam
(Sumber Engelhart dan Popov, 1988)

2.4.3 Pengaku Link

Tekuk geser (*short buckling*) yang terjadi pada *link* menyebabkan konsentrasi tegangan pada bagian tegangan pada bagian *web* dari *link*, *web* melengkung dapat menyebabkan penurunan kekuatan yang signifikan. Elemen balok *link* dapat diberikan tambahan pengaku badan (*web stiffeners*) yang berfungsi untuk menunda terjadinya tekuk pada bagian badan dan meningkatkan kapasitas rotasi elemen *link*. Pada *short link*, terjadinya tekuk merupakan keruntuhan pada *link* karena kerusakan pada bagian badan dapat terjadi segera setelah proses tekuk (Kasai dan Popov, 1986). Pada *intermediate link*, ketidakstabilan berubah dari tekuk geser pada bagian badan menjadi tekuk pada bagian sayap dan tekuk torsi-lateral. Tahanan pada tekuk torsi-lateral ini dapat ditahan dengan penempatan *stiffener* di dekat ujung *link*. Pada *long link*, penempatan pengaku juga dibutuhkan pada bagian di luar

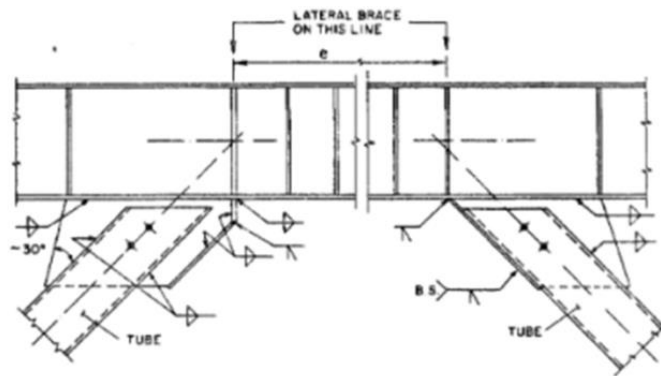
link, yaitu pada bagian pertemuan atau hubungan dengan elemen *bracing*. Kegagalan pada *long link* menyerupai *intermediate link* yaitu terjadi tekuk di bagian sayap yang berhubungan dengan *bracing*. Dengan demikian pengaku badan (*web stiffener*) pada balok *link* berfungsi sebagai penahan tekuk local dan meningkatkan kapasitas rotasi dari *link*. Kapasitas rotasi dan penempatan pengaku badan pada *link* juga tergantung pada panjang *link* seperti ditunjukkan pada Tabel 2.3 (Rafael, J.W.M. & Suswanto, B., 2017).

Tabel 2. 3 Klasifikasi Jarak Pengaku Antara (*intermediate stiffeners*) dan Kapasitas Rotasi *Link*

No	Panjang Link	Jenis Link	Rotasi	Jarak Pengaku Maksimum
1	$\frac{1,6 Mp}{Vp}$	Geser murni	0.08	30tw – d/5
			< 0.02	52tw – d/5
2	$\frac{1,6 Mp}{Vp} \leq e \leq \frac{2,6 Mp}{Vp}$	Dominan geser		(b1 + b2) ≥ (bf – 2tw) dan ts ≥ 0,75tw atau 10 mm (yang terbesar)
3	$\frac{2,6 Mp}{Vp} \leq e \leq \frac{5 Mp}{Vp}$	Dominan lentur	0.02	1.5 bf dari tiap ujung link
4	$e > \frac{5 Mp}{Vp}$	Lentur murni		Tidak membutuhkan pengaku antara

(Sumber AISC 2010)

Penyerapan energi terjadi pada bagian *web* dari balok *link* ketika gaya geser bekerja pada balok, serta penempatan pengaku yang tepat di bagian *web* mendukung kondisi *strain hardening*. Bagian *flanges* dari balok *link* dan pengaku tidak memiliki peran dalam penyerapan energi tetapi dapat membantu bagian *web* dari balok *link* untuk berfungsi lebih baik dan keruntuhannya daktail. Pengaku tidak mempengaruhi kekuatan elastis dan periode struktur tetapi meningkatkan kekakuan plastis dari rangka tersebut. Untuk kondisi balok *link* geser, pengaruh dari ketebalan *web* lebih besar dibandingkan dengan *flanges* dan pemilihan ketebalan yang lebih tipis membuat desain menjadi lebih ekonomis. Di satu sisi, dengan peningkatan panjang *link* memiliki hubungan yang berlawanan dengan ketebalan *flange* sehingga memberikan pengaruh terhadap kinerja balok *link* tersebut (Hashemi, 2011).

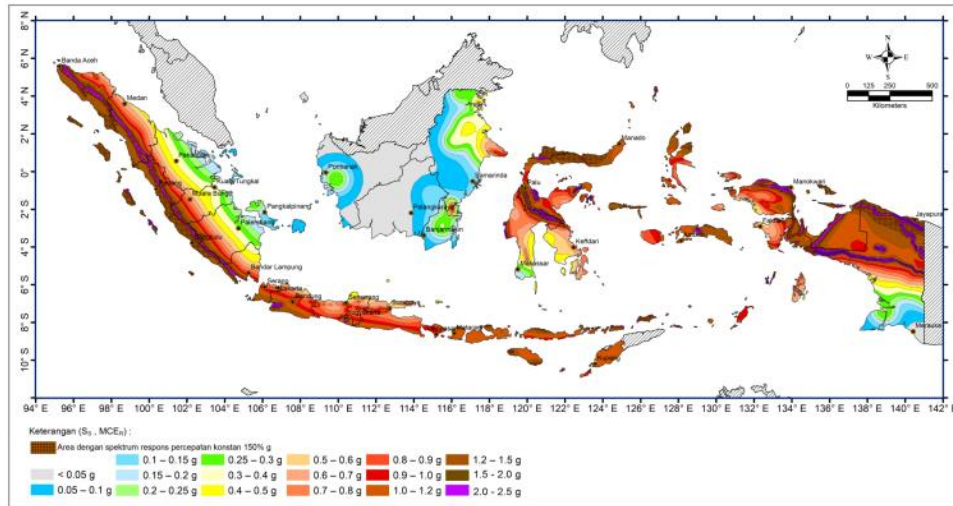


Gambar 2. 8 Detailing pada Balok Link
(Sumber Rafael, J.W.M. & Suswanto, B., 2017)

2.5 Gempa

Wilayah Indonesia termasuk wilayah dengan intensitas tinggi terhadap terjadinya gempa bumi karena letak geografis wilayah Indonesia yang berada diantara tiga lempeng besar dunia yang selalu aktif dan bergerak, yaitu lempeng Eurasia, lempeng Pasifik, dan lempeng Indo-Australia. Gempa bumi adalah getaran asli dari dalam bumi, bersumber di dalam bumi yang kemudian merambat ke permukaan bumi akibat rekahan bumi pecah dan bergeser dengan keras. Penyebab gempa bumi dapat berupa dinamika bumi (tektonik), aktivitas gunung api, akibat meteor jatuh, longsor (di bawah muka air laut), ledakan bom nuklir di bawah permukaan. Gempa bumi tektonik merupakan gempa bumi yang paling umum terjadi merupakan gempa getaran yang dihasilkan dari peristiwa pematahan batuan akibat benturan dua lempeng secara perlahan-lahan yang akumulasi energi benturan tersebut melampaui kekuatan batuan. (Nur, A.M., 2010)

Gempa memiliki sifat yang berulang sehingga gempa memiliki sebuah siklus yang diketahui sebagai siklus gempa. Gempa rencana harus ditinjau dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung dan nongedung serta berbagai bagian dan peralatannya secara umum yang ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2%. Peta gempa yang berdasarkan pada SNI 1726-2019 dengan periode ulang 50 tahun membagi Indonesia menjadi 6 wilayah gempa sebagaimana dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Peta Wilayah Gempa Indonesia
(Sumber : SNI 1726-2019)

Dilihat dari peta wilayah gempa diatas, Kota Bandung merupakan wilayah dengan resiko gempa tinggi dengan parameter gerak tanah S_s 1,2 – 1,5 g. Struktur geologi di Jawa Barat pada dasarnya dipengaruhi oleh aktivitas tumbukan Lempeng Indo-Australia yang menunjam di bawah Lempeng Eurasia. Akibat dari adanya aktivitas tumbukan lempeng ini menghasilkan elemen tektonik utama di Jawa Barat berupa palung, busur luar non vulkanik, cekungan depan busur, jalur magmatisma, cekungan belakang busur, dan Paparan Sunda. Daerah selatan Jawa Barat adalah kawasan rawan gempa bumi karena daerah tersebut dekat dengan jalur cincin api dan adanya beberapa sesar aktif yang melewati daerah tersebut, seperti Sesar Cimandiri, Sesar Baribis, dan Sesar Lembang. Daerah ini adalah wilayah Kepulauan Indonesia yang letaknya berada pada zona pertemuan antara lempeng Eurasia dan Indo-Australia yang bergerak ke utara bertumbukan dengan lempeng Eurasia yang relatif diam (Haryanto, 2006).

Berdasarkan SNI 2847-2019 tujuan desain bangunan tahan gempa adalah untuk mencegah terjadinya kegagalan struktur atau kerusakan struktur yang mengakibatkan kehilangan korban jiwa, dengan tiga kriteria standar yaitu, ketika terjadi gempa kecil tidak terjadi kerusakan sama sekali, ketika terjadi gempa sedang, diperbolehkan terjadi kerusakan arsitektural tetapi bukan merupakan kerusakan struktural, ketika terjadi gempa kuat, diperbolehkan terjadinya kerusakan struktural dan nonstruktural. Oleh sebab itu, perencanaan bangunan struktur tahan gempa harus dapat memperhitungkan dampak dari gaya lateral yang bersifat siklis (bolak-balik) yang dialami oleh struktur selama terjadinya

gempa bumi. Untuk memikul gaya lateral yang dialami oleh bangunan, struktur harus dapat memiliki daktilitas yang memadai di daerah *joint* atau elemen struktur tahan gempa seperti bresing (pengaku) atau dinding geser (*shear wall*) (Almufid & Lukiyono, 2015).

Bangunan dapat dikatakan sebagai bangunan tahan gempa yaitu apabila bangunan tersebut sudah memenuhi syarat periode getar struktur dan simpangan antar lantai. Periode getar alami yang terjadi pada struktur tidak boleh lebih dari periode getar alami maksimum. Simpangan antar lantai yang terjadi tidak boleh melebihi simpangan antar lantai maksimum atau simpangan izin. Jika simpangan antar lantai dan periode getar struktur sudah memenuhi syarat maka bangunan tersebut termasuk dalam bangunan tahan gempa.

2.6 Faktor Keutamaan Gempa dan Kategori Risiko Struktur Bangunan

Untuk berbagai kategori risiko struktur bangunan gedung dan nongedung sesuai dengan Tabel 2.4 pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan gempa I_e menurut tabel 2.5. Khusus untuk struktur bangunan dengan kategori risiko IV, bila dibutuhkan pintu masuk untuk operasional dari struktur bangunan yang bersebelahan, maka struktur bangunan yang bersebelahan tersebut harus didesain sesuai dengan kategori risiko IV.

Tabel 2. 4 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: <ul style="list-style-type: none"> - Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, 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: <ul style="list-style-type: none"> - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat perbelanjaan/ mall 	II

<ul style="list-style-type: none"> - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik 	
<p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan nongedung, 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"> - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan nongedung 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 nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bagunan-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 	IV

<ul style="list-style-type: none"> - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap 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 <p>Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	
---	--

(Sumber SNI 1726-2019, Tabel 3)

Tabel 2.5 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, Tabel 4)

2.7 Klasifikasi Situs

Klasifikasi suatu situs memberikan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan. Dalam perumusan kriteria desain seismik suatu bangunan di permukaan tanah atau penentuan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu situs, maka situs tersebut harus diklasifikasikan terlebih dahulu. Profil tanah di situs harus diklasifikasikan sesuai dengan tabel 2.6 berdasarkan profil tanah lapisan 30 m paling atas. Penetapan kelas situs harus melalui penyelidikan tanah di lapangan dan di laboratorium.

Tabel 2.6 Klasifikasi Situs

Klasifikasi Situs	\bar{v}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{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

	<p>Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralir $\bar{S}_u < 25$ kPa
<p><i>SF</i> (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)</p>	<p>Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitive, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) <p>Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{S}_u < 50$ kPa</p>

CATATAN: N/A = tidak dapat dipakai

(Sumber SNI 1726-2019 Tabel 5)

2.8 Pembebanan Struktur

Beban merupakan gaya atau aksi lainnya akibat berat seluruh bahan bangunan, penghuni dan barang-barang yang dimilikinya, efek lingkungan, perbedaan pergerakan, dan gaya kekangan akibat perubahan dimensi. Beban-beban yang bekerja meliputi beban mati, beban hidup, beban angin, beban hujan, beban gempa, dan beban khusus. Berikut pengertian beberapa jenis beban yang bekerja berdasarkan SNI 1727-2020:

- a. Beban mati merupakan berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang, termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, *finishing*, kledning gedung dan komponen arsitektural dan struktural lainnya seperti peralatan layan terpasang lain termasuk berat derek dan sistem pengangkut material.
- b. Beban hidup diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir, atau beban mati.
- c. Beban angin merupakan beban yang bekerja pada struktur suatu bangunan akibat tekanan dari gerakan angin. Beban ini dipengaruhi oleh lokasi dan ketinggian struktur.
- d. Beban hujan merupakan beban struktur bangunan yang berasal dari air hujan. Beban ini bekerja pada bagian atap struktur bangunan

- e. Beban gempa merupakan semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa.
- f. Beban khusus adalah semua beban bekerja pada gedung atau bagian gedung yang terjadi akibat selisih suhu, pengangkatan dan pemasangan, penurunan pondasi, susut, gaya-gaya tambahan yang berasal dari beban hidup

Untuk pembebanan pada bangunan gedung bertingkat banyak, sangat tidak mungkin pada saat yang sama semua lantai memikul beban yang maksimum secara simultan. Oleh karena itu diijinkan untuk mereduksi beban untuk keperluan perencanaan elemen-elemen struktur dengan memperhatikan pengaruh dari kombinasi pembebanan dan penempatan beban hidup. Untuk memastikan bahwa suatu struktur bangunan dapat bertahan selama umur rencananya maka pada proses perancangan struktur perlu dilakukan peninjauan pada beberapa kombinasi pembebanan yang mungkin terjadi pada struktur (Aries & Arief, 2017). Komponen struktural dan nonstruktural dan sambungan-sambungannya harus memiliki kekuatan yang memadai untuk menahan kombinasi beban yang berlaku pada SNI 1727-2020 Pasal 2.3 dari standar ini tanpa melebihi kondisi batas kekuatan yang berlaku untuk material konstruksi. Berikut adalah kombinasi *ultimate* sesuai SNI 1727-2020 Pasal 2.3.1

1. Kombinasi 1 = $1,4D$
2. Kombinasi 2 = $1,2D + 1,6L + 0,5(L_r \text{ atau } S \text{ atau } R)$
3. Kombinasi 3 = $1,2D + 1,6(L_r \text{ atau } S \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$
4. Kombinasi 4 = $1,2D + 1,0W + L + 0,5(L_r \text{ atau } S \text{ atau } R)$
5. Kombinasi 5 = $1,2D \pm 1,0E + L$
6. Kombinasi 6 = $0,9D + 1,0W$
7. Kombinasi 7 = $0,9D + 1,0E$

Keterangan :

D	=	Beban mati
L	=	Beban hidup
L_r	=	Beban hidup atap
S	=	Beban salju
R	=	Beban hujan
W	=	Beban angin
E	=	Beban gempa

2.9 Menentukan Respon Spektrum

Respon spektrum adalah suatu spektrum yang disajikan dalam bentuk kurva antara periode struktur T, dengan respon-respon maksimum berdasarkan rasio redaman dan gempa tertentu (Utami, 2010). Terdapat beberapa tahapan untuk menentukan respon spektrum.

2.9.1 Koefisien-koefisien Situs dan Parameter-parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-tertarget (MCE_R)

Sesuai dengan SNI 1726-2019 untuk penentuan respons spektral percepatan gempa MCE_R di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik. 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 respons spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan perumusan berikut ini:

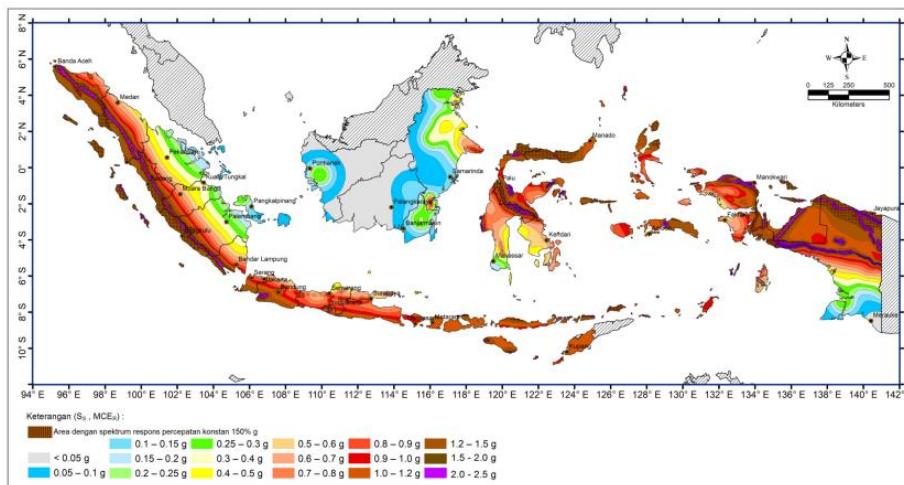
$$S_{MS} = F_a \times S_s \dots\dots\dots (2.9.a)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \dots\dots\dots (2.9.b)$$

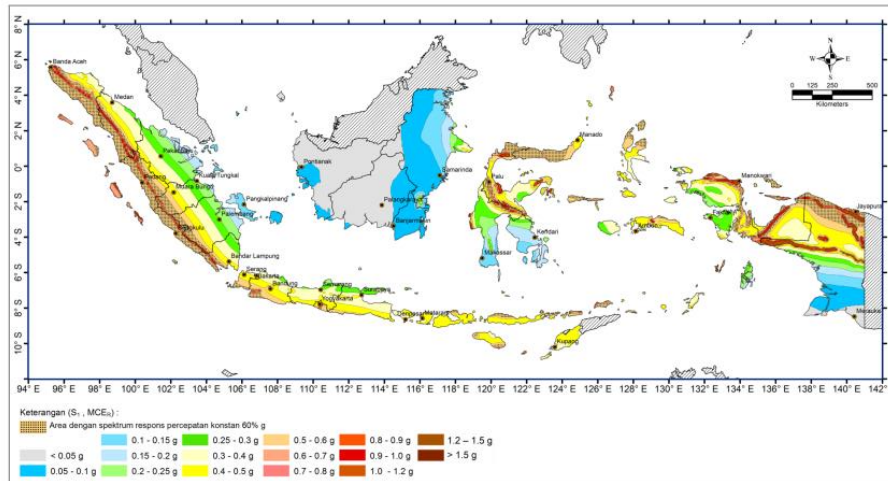
Keterangan:

S_s = Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek

S₁ = Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1,0 detik



Gambar 2. 10 Peta Wilayah Gempa Indonesia dengan Parameter Gerak Tanah S_s
(Sumber SNI 1726-2019, Gambar 15)



Gambar 2. 11 Peta Wilayah Gempa Indonesia dengan Parameter Gerak Tanah S_I
(Sumber SNI 1726-2019, Gambar 16)

Dengan koefisien situs F_a dan F_v mengikuti Tabel 2.7 dan Tabel 2.8

Tabel 2. 7 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)					

CATATAN:

(a) SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs spesifik

(Sumber SNI 1726-2019, Tabel 6)

Tabel 2. 8 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)					

CATATAN:

(a) SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs spesifik

(Sumber SNI 1726-2019, Tabel 7)

2.9.2 Parameter Percepatan Spektral Desain

Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek, S_{DS} dan pada periode 1 detik, S_{D1} harus ditentukan melalui perumusan berikut ini:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \dots\dots\dots (2.9.c)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \dots\dots\dots (2.9.d)$$

2.9.3 Spektrum Respons Desain

Bila spektrum respons desain diperlukan oleh tata cara ini dan prosedur gerak tanah dari spesifik-situs tidak digunakan, maka kurva spektrum respons desain harus dikembangkan dengan mengikuti ketentuan:

1. Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain, S_a , harus diambil dari persamaan;

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \dots\dots\dots (2.9.e)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a , sama dengan S_{DS} ;

3. Untuk periode lebih besar dari T_s tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L , respons spektral percepatan, S_a , diambil berdasarkan persamaan;

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \dots\dots\dots (2.9.f)$$

4. Untuk periode lebih besar dari T_L , respon spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan persamaan;

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \dots\dots\dots (2.9.g)$$

Keterangan:

S_{DS} = Parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek

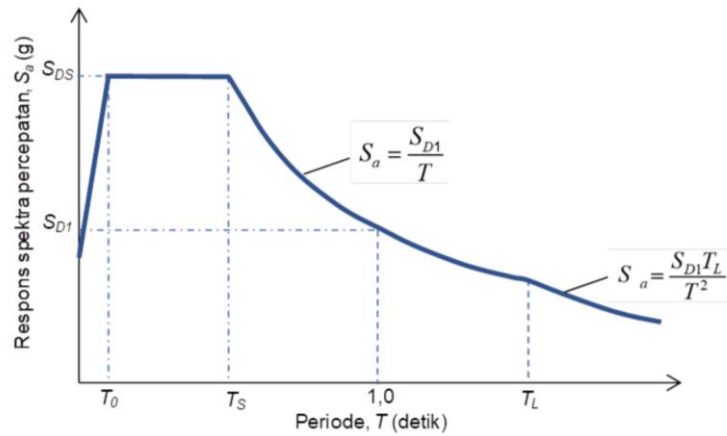
S_{D1} = Parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik

T = Periode getar fundamental struktur

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots\dots\dots (2.9.h)$$

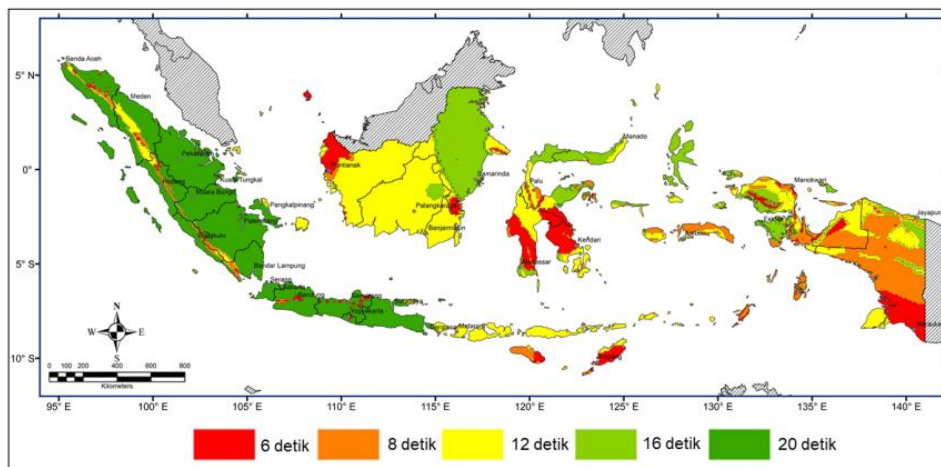
$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots\dots\dots (2.9.i)$$

T_L = Peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 yang nilainya diambil dari Gambar 2.13



Gambar 2. 12 Spektrum Respons Desain

(Sumber SNI 1726-2019, Gambar 3)



Gambar 2. 13 Peta Transisi Periode Panjang, T_L , Wilayah Indonesia

(Sumber SNI 1726-2019, Gambar 20)

2.10 Kategori Desain Seismik

Berdasarkan SNI 1726-2019 pada Pasal 6.5, struktur harus ditetapkan memiliki suatu kategori desain seismik yang mengikuti pasal ini. Struktur dengan kategori risiko I, II, atau III yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada periode 1 detik, S_1 , lebih besar dari atau sama dengan 0,75 harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik E. Struktur yang berkategori risiko IV yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada periode 1 detik, S_1 , lebih besar dari atau sama dengan 0,75 harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik F. Semua struktur lainnya harus ditetapkan kategori desain seismiknya berdasarkan kategori risikonya dan parameter respons spektral percepatan desainnya, S_{DS} dan S_{D1} . Masing-masing bangunan dan struktur harus ditetapkan ke dalam kategori desain seismik yang lebih parah, dengan mengacu pada Tabel 2.9 dan Tabel 2.10, terlepas dari nilai periode fundamental getaran struktur, T .

Tabel 2. 9 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada 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 8)

Tabel 2. 10 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada 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, Tabel 9)

2.11 Pembebanan Gempa Ekuivalen

Getaran gempa bumi akan menimbulkan gaya lateral pada dasar struktur berupa gaya geser dasar bangunan dan akan terdistribusi pada tiap lantai bangunan sebagai gaya lateral tingkat (Faizah, R., 2015).

2.11.1 Gaya Dasar Seismik

Gaya geser dasar seismik, V, dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$V = C_s \times W \dots\dots\dots (2.11.a)$$

Dimana:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.11.b)$$

Keterangan:

- C_s = Koefisien respons seismik
- W = berat total gedung
- S_{DS} = Parameter percepatan spektrum respons desain dalam rentang periode pendek
- R = Koefisien modifikasi respons
- I_e = Faktor keutamaan gempa

Nilai C_s yang dihitung sesuai dengan persamaan 2.12.b tidak perlu melebihi berikut ini:

Untuk T ≤ T_L

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.11.c)$$

Untuk T > T_L

$$C_s = \frac{S_{D1}T_L}{T^2\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.11.d)$$

C_s, harus tidak kurang dari

$$C_s = 0,044S_{DS} \times I_e \geq 0,01 \dots\dots\dots (2.11.e)$$

Sebagai tambahan, untuk struktur yang berlokasi di daerah di mana S₁ sama dengan atau lebih besar dari 0,6g, maka C_s harus tidak kurang dari:

$$C_s = \frac{0,5S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.11.f)$$

2.11.2 Penentuan Periode

Periode fundamental struktur, T , dalam arah yang ditinjau harus diperoleh menggunakan sifat struktur dan karakteristik deformasi elemen pemikul dalam analisis yang teruji. Periode fundamental struktur, T , tidak boleh melebihi hasil perkalian koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dari Tabel 2.9 dan periode fundamental pendekatan, T_a . Sebagai alternatif dalam melakukan analisis untuk menentukan periode fundamental struktur, T , diizinkan secara langsung menggunakan periode bangunan pendekatan, T_a , yang dihitung sesuai dengan persamaan 2.7.g.

Tabel 2. 11 Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

Parameter Percepatan Respon 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, Tabel 17)

Periode fundamental pendekatan (T_a) dalam detik, harus ditentukan dari persamaan berikut:

$$T_a = C_t \times h_n^x \dots\dots\dots (2.12.g)$$

Keterangan:

h_n adalah ketinggian struktur (m) di atas dasar sampai tingkat tertinggi struktur, dan koefisien C_t dan x ditentukan dari Tabel 2.13

Tabel 2. 12 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 18)

2.11.3 Distribusi Vertikal Gaya Gempa

Gaya seismik lateral, F_x , (kN) di semua tingkat harus ditentukan dari persamaan berikut:

$$F_x = C_{vx} \times V \dots\dots\dots (2.11.h)$$

dan

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \dots\dots\dots (2.11.i)$$

Keterangan:

- C_{vx} = Faktor distribusi vertikal
- V = Gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur (kN)
- w_i dan w_x = Bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau ditenankan pada tingkat i atau x
- h_i dan h_x = tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x (m)
- k = eksponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai sebagai berikut:
 untuk struktur dengan $T \leq 0,5$ detik, $k = 1$
 untuk struktur dengan $T \geq 2,5$ detik, $k = 2$
 untuk struktur dengan $0,5 < T < 2,5$ detik, $k = 2$ atau ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

2.11.4 Distribusi Horizontal Gaya Gempa

Geser tingkat desain seismik di semua tingkat, V_x (kN), harus ditentukan dari persamaan berikut:

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \dots\dots\dots (2.11.j)$$

Keterangan:

F_i merupakan bagian dari geser dasar seismik (V) pada tingkat ke- i (kN)

Geser tingkat desain seismik, V_x (kN), harus didistribusikan pada berbagai elemen vertikal sistem pemikul gaya seismik di tingkat yang ditinjau berdasarkan pada kekakuan lateral relatif elemen pemikul vertikal dan diafragma.

2.11.5 Batasan Simpangan Antar Lantai

Penentuan simpangan antar lantai desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di atas dan bawah tingkat yang ditinjau. Defleksi pusat massa di tingkat-x (δ_x) (mm) harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\delta_x = \frac{C_d \times \delta_{xe}}{I_e} \dots\dots\dots (2.11.k)$$

Keterangan:

C_d = Faktor pembesaran simpangan lateral

δ_x = Simpangan di tingkat-x yang disyaratkan pada pasal ini, yang ditentukan dengan analisis elastik

I_e = Faktor keutamaan gempa

Berdasarkan SNI 1726-2019 Simpangan antar lantai desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar lantai izin (Δ_a) yang didapatkan dengan menggunakan rumusan tabel berdasarkan Tabel 2.14

Tabel 2. 13 Simpangan Antar Tingkat Izin Δ_a

Struktur	Kategori Risiko		
	I dan 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 lantai 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}

Catatan: h_{sx} adalah tinggi tingkat di bawah tingkat-x

(Sumber SNI 1726-2019, Tabel 20)

2.12 Defleksi Lateral

Besarnya simpangan horizontal (*drift*) perlu dipertimbangkan untuk kinerja batas layan struktur dan kinerja batas ultimit. Simpangan pada sruktur dapat dinyatakan dalam bentuk *Drift Indeks*. Rumusan untuk mengetahui besaran *drift* adalah:

$$\text{Drift indeks} = \frac{\Delta}{h} \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan:

Δ = Besar defleksi maksimum yang terjadi (m)

h = Ketinggian struktur portal (m)

2.13 Konstruksi Komposit

Struktur komposit merupakan struktur yang terdiri dari dua material atau lebih dengan sifat bahan yang berbeda dan bentuk satu kesatuan sehingga menghasilkan sifat gabungan yang lebih baik untuk memikul beban tekan dan lentur. Struktur komposit antara beton dan baja merupakan struktur yang memanfaatkan kelebihan dari beton dan baja yang bekerja bersama-sama sebagai satu kesatuan. Kelebihan tersebut yaitu beton kuat terhadap tekan dan baja kuat terhadap tarik. Struktur baja komposit dalam aplikasinya dapat merupakan elemen dari bangunan, baik sebagai kolom, balok, dan pelat. Struktur balok komposit terdiri dari dua tipe yaitu balok komposit dengan penghubung geser dan balok komposit yang diselubungi beton. Kolom komposit dapat merupakan tabung atau pipa baja yang di dalamnya dicor beton atau baja profil yang diselimuti beton dengan tulangan longitudinal dan diikat dengan tulangan transversal. Pada struktur pelat komposit digunakan pelat beton yang bagian bawahnya diperkuat dengan dek baja bergelombang (Widiarsa dan Deskata, 2007).

Sistem struktur komposit terbentuk akibat interaksi antara komponen struktur baja dan beton yang karakteristik dan dasar masing-masing bahan dimanfaatkan secara optimal. Karakteristik penting yang dimiliki oleh struktur baja adalah kekuatan tinggi, modulus elastisitas tinggi, serta daktilitas tinggi. Sedangkan karakteristik penting yang dimiliki oleh beton adalah ketahanan terhadap api, mudah dibentuk dan murah (Kim, 2005).

2.13.1 Sistem Pelaksanaan Komposit

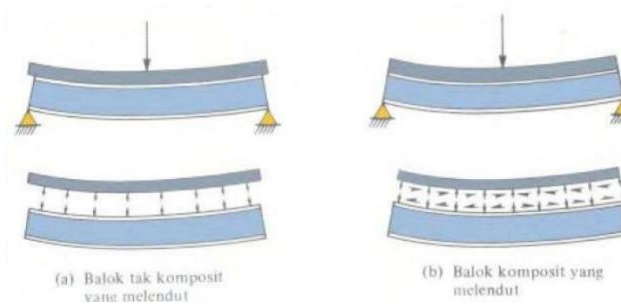
Terdapat 2 metode pelaksanaan yang digunakan saat pelaksanaan di lapangan yang nantinya metode yang digunakan akan mempengaruhi perencanaan pembebanan konstruksi komposit. Berikut metode pelaksanaan konstruksi komposit:

1. *Shored construction* adalah komposit dengan metode pelaksanaan dengan menggunakan bekisting dan perancah atau penopang. Semua beban baik beban pelat beton maupun beban balok baja didukung oleh bekisting selama pengerjaan pengecoran hingga beton mampu menerima beban bekerja atau telah mencapai usia 28 hari.

2. *Unshored construction* adalah komposit dengan metode pelaksanaan konstruksi tanpa menggunakan perancah atau penopang sehingga berat baja, berat beton yang dicor di atas baja serta beban bekisting yang dibutuhkan hanya dipikul oleh baja itu sendiri. Pada kondisi beton belum mampu menerima beban bekerja maka bekisting beton dan beban bekerja secara keseluruhan bertumpu pada balok baja. Apabila beton telah mampu menerima beban bekerja dan mempunyai kekuatan yang cukup maka struktur komposit dapat menjadi satu kesatuan.

2.13.2 Aksi Komposit

Aksi komposit terjadi apabila dua batang struktural pemikul beban, seperti pelat beton dan balok baja sebagai penyangganya, dihubungkan secara menyeluruh dan mengalami defleksi sebagai satu kesatuan. (Widiarsa dan Deskita, 2007).



Gambar 2. 14 Perbandingan Balok yang Melendut Dengan dan Tanpa Aksi Komposit
(Sumber Setiawan, Agus, 2008)

2.13.3 Lebar Efektif Balok Komposit

Konsep lebar efektif dilakukan terhadap elemen yang mengalami distribusi tegangan yang tidak seragam. Besarnya lebar efektif dari suatu komponen struktur komposit dapat ditentukan dengan:

1. Untuk balok interior

$$b_{\text{Eff}} \leq \frac{L}{4} \dots\dots\dots (2.13.a)$$

$$b_{\text{Eff}} \leq \frac{b_o}{2} \dots\dots\dots (2.13.b)$$

Keterangan:

L = Panjang bentang

b_o = bentang antar balok

2. Untuk balok eksterior

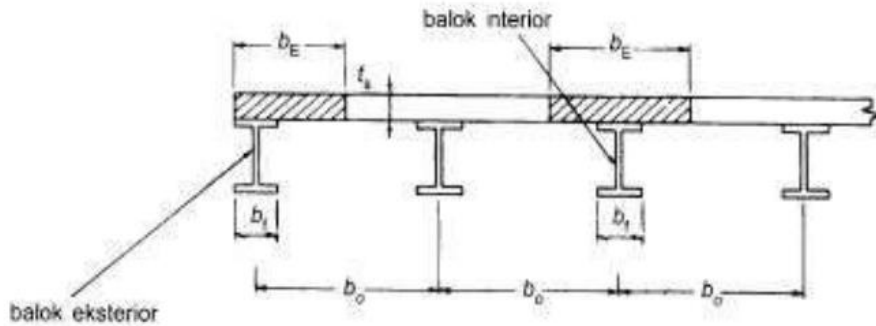
$$b_{\text{Eff}} \leq \frac{L}{8} + \text{jarak pusat balok ke tepi pelat} \dots\dots\dots (2.13.c)$$

$$b_{\text{Eff}} \leq \frac{b_o}{2} + \text{jarak pusat balok ke tepi pelat} \dots\dots\dots (2.13.d)$$

Keterangan:

L = Panjang bentang

b_o = bentang antar balok



Gambar 2. 15 Lebar Efektif Balok Komposit

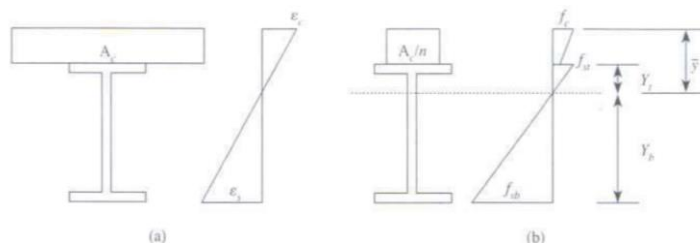
(Sumber Setiawan, Agus, 2008)

2.13.4 Tegangan Komposit

Komposit merupakan balok heterogen maka transformasi penampang untuk menghitung tegangan penampang beton ditransformasi menjadi baja dengan asumsi efeknya sama dengan beton dengan perumusan sebagai berikut:

$$\frac{f_c}{E_c} = \frac{f_s}{E_s} \dots\dots\dots (2.13.e)$$

$$f_s = \frac{f_c}{E_c} E_s = n \cdot f_c \dots\dots\dots (2.13.e)$$



Gambar 2. 16 (a) Diagram Regangan Balok Komposit (b) Diagram Tegangan Balok Komposit dengan Penampang Tertransformasi

2.14 *Building Connection*

Sambungan merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari sebuah struktur baja. Sambungan berfungsi untuk menyalurkan gaya-gaya dalam seperti momen, aksial, dan geser antar komponen struktur yang disambung. Keadaan sebuah struktur baja untuk bekerja dengan mekanisme yang direncanakan sangat bergantung oleh keandalan sambungan. Sambungan digunakan pada gedung bertingkat berupa sambungan balok dengan kolom, balok dengan balok, dan alat sambung yang dapat digunakan berupa baut dan las. (Fauzi, 2014). Berdasarkan perilaku sambungan struktur dibedakan menjadi:

1. Sambungan kaku / *Rigid connection*

Deformasi titik kumpul harus sedemikian rupa sehingga tidak terlalu berpengaruh terhadap distribusi gaya maupun terhadap deformasi keseluruhan struktur.

2. Sambungan semi kaku / *Semi rigid connection*

Pada sambungan semi kaku, perhitungan kekakuan, penyebaran gaya, dan deformasinya harus menggunakan analisis mekanika yang hasilnya didukung oleh percobaan eksperimental/

3. Sambungan sendi / *Simple connection*

Sambungan sendi harus dapat berubah bentuk agar memberikan rotasi yang diperlukan pada sambungan. Sambungan tidak boleh mengakibatkan momen lentur terhadap komponen struktur yang disambung. Detail sambungan harus mempunyai kemampuan rotasi yang cukup. Sambungan harus dapat memikul gaya reaksi yang bekerja pada eksentrisitas yang sesuai dengan detail sambungannya.

Terdapat 2 macam sambungan pada konstruksi baja yaitu sambungan baut dan sambungan las.

2.14.1 Sambungan Baut

Baut adalah alat sambung dengan batang bulat dan berulir, salah satu ujungnya dibentuk kepala baut (umumnya bentuk kepala segi enam) dan ujung lainnya dipasang mur/pengunci. Dalam pemakaian di lapangan, dapat digunakan untuk membuat konstruksi sambungan tetap, sambungan bergerak, maupun sambungan sementara yang dapat dibongkar atau dilepas kembali. Salah satu penyebab tidak efisiennya perencanaan struktur baja adalah jauhnya nilai masing-masing model keruntuhannya karena salah satu faktor yang berpengaruh adalah jarak antar baut dan jarak tepi baut. Menurut Segui (2012), kegagalan

sambungan sederhana antar elemen baja dalam bangunan struktur baja terjadi di elemen batang tarik, elemen pelat buhul, maupun elemen baut pada sistem sambungan sederhana (Kesna, M.T.H., 2019). Keuntungan sambungan baut antara lain:

- Konstruksi sambungan dapat dibongkar pasang
- Dapat dipakai untuk menyambung dengan jumlah tebal baja $> 4d$ (tidak seperti paku keling yang dibatasi maksimum $4d$).
- Dengan menggunakan jenis baut mutu tinggi akan dapat digunakan untuk konstruksi berat atau jembatan
- Pemasangan atau penyetulan di lapangan jauh lebih mudah

Perencanaan kuat geser baut adalah V_d , dimana faktor ketahanan ϕ adalah 0,75 maka kuat geser nominal adalah:

$$V_d = \phi f \times r_l \times f_u^b \times A_b \dots\dots\dots(2.14.a)$$

Keterangan:

- V_d = Kekuatan baut
- ϕf = Faktor reduksi
- r_l = 0,5 untuk baut tanpa ulir pada bidang geser dan 0,4 untuk baut dengan ulir pada bidang geser
- f_u^b = Tegangan tarik putus baut
- A_b = Luas bruto penampang baut pada daerah tak berulir

Kuat tumpu rencana bergantung pada yang terlemah dari baut atau komponen pelat yang disambung. Apabila jarak lubang tepi terdekat dengan sisi pelat dalam arah kerja gaya lebih besar daripada 1,5 kali diameter lubang, jarak antar lubang lebih besar daripada 3 kali diameter lubang, dan ada lebih dari satu baut dalam arah kerja gaya, maka kuat rencana tumpu dapat dihitung sebagai berikut:

$$R_d = \phi_f \times R_n = 2,4 \times \phi_f \times d_b \times t_p \times f_u \dots\dots\dots(2.14.b)$$

Kuat tumpu yang didapat dari perhitungan di atas berlaku untuk jenis lubang baut. Sedangkan untuk lubang baut selot panjang tegak lurus arah kerja gaya berlaku persamaan berikut:

$$R_d = \phi_f \times R_n = 2,0 \times \phi_f \times d_b \times t_p \times f_u \dots\dots\dots(2.14.c)$$

Keterangan:

- ϕ_f = 0,75 faktor reduksi kekuatan untuk fraktur

- d_b = Diameter baut nominal pada daerah tak berulir
- t_p = Tebal pelat
- f_u = Tegangan tarik putus yang terendah dari but atau pelat

Kekuatan suatu baut yang memikul gaya terfaktor, R_u harus memenuhi:

$$R_u \leq \phi R_n \dots\dots\dots (2.14.d)$$

Keterangan:

- R_n = Kekuatan nominal baut
- ϕ = Faktor reduksi kekuatan

Jarak antar pusat lubang pengencang tidak boleh kurang dari 3 kali diameter nominal pengencang. Jarak minimum dari pusat pengencang ke tepi pelat atau pelat sayap profil harus memenuhi spesifikasi dalam Tabel 2.14.

Tabel 2. 14 Jarak Tepi Minimum

Tepi dipotong dengan tangan	Tepi dipotong dengan mesin	Tepi profil bukan hasil potongan
1,75 d_b	1,50 d_b	1,25 d_b

Dengan d_b adalah diameter nominal baut pada daerah tak berulir

(Sumber SNI 1729-2002, Tabel 13.4-1)

Jarak antara pusat pengencang tidak boleh melebihi 15 t_p (tebal pelat lapis tertipis di dalam sambungan), atau 200 mm. pada pengencang yang tidak perlu memikul beban terfaktor dalam daerah yang tidak mudah berkarat, jaraknya tidak boleh melebihi 32 t_p atau 300 mm. pada baris luar pengencang dalam arah gaya rencana, jaraknya tidak boleh melebihi (4 t_p + 100 mm) atau 200 mm.

2.14.2 Sambungan Las

Berdasarkan SNI 1729-2002, jenis las yang ditentukan adalah las tumpul, las sudut, pengisi, atau tersusun. Las tumpul dikategorikan menjadi 2 yaitu las tumpul penetrasi penuh dan las tumpul penetrasi sebagian. Las tumpul penetrasi penuh adalah las tumpul dimana terdapat penyatuan antara las dan bahan induk sepanjang kedalaman penuh sambungan. Las tumpul penetrasi sebagian adalah las tumpul dimana kedalaman penetrasi lebih kecil daripada kedalaman penuh sambungan. Ukuran las adalah jarak antara permukaan luar las

(tidak termasuk perkuatannya) terhadap kedalaman penetrasinya yang terkecil. Khusus sambungan antara dua bagian yang membentuk T atau siku, ukuran las penetrasi penuh adalah tebal bagian yang menumpu. Tebal rencana las ditetapkan sebagai berikut:

- a. Las tumpul penetrasi penuh: tebal rencana las untuk las tumpul penetrasi penuh adalah ukuran las
- b. Las tumpul penetrasi sebagian: tebal rencana las untuk las tumpul penetrasi sebagian ditetapkan sesuai dengan ketentuan dibawah ini:
 - sudut antara bagian yang disambung $\leq 60^\circ$
 satu sisi: $t_l = (d - 3)$ mm
 dua sisi: $t_l = (d_3 + d_4 - 6)$ mm
 - sudut antara bagian yang disambung $> 60^\circ$
 satu sisi: $t_l = d$ mm
 dua sisi: $t_l = (d_3 + d_4)$ mm

dengan d adalah kedalaman yang dipersiapkan untuk las (d_3 dan d_4 adalah nilai untuk tiap sisi las).

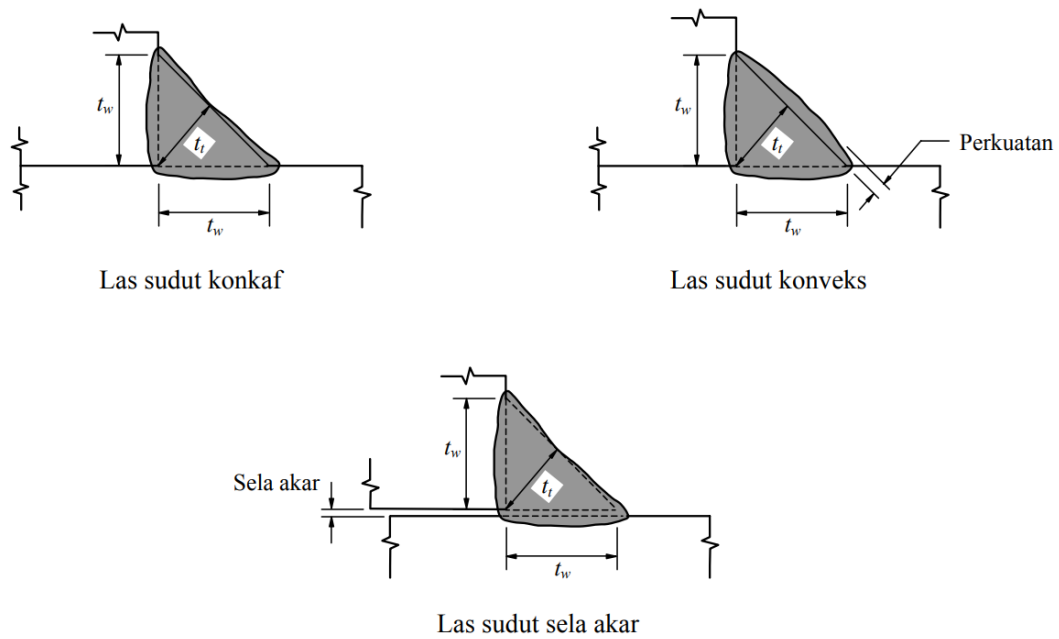
Kuat las tumpul penetrasi penuh ditetapkan sebagai berikut:

- a) bila sambungan dibebani dengan gaya tarik atau gaya tekan aksial terhadap luas efektif maka,
 - $\phi_y R_{nw} = 0,9t_t f_y$ (bahan dasar) (2.14.e)
 - $\phi_y R_{nw} = 0,9t_t f_{yw}$ (las) (2.14.f)
- b) bila sambungan dibebani dengan gaya geser terhadap luas efektif maka,
 - $\phi_y R_{nw} = 0,9t_t (0,6f_y)$ (bahan dasar) (2.14.e)
 - $\phi_y R_{nw} = 0,8t_t (0,6f_{uw})$ (las) (2.14.f)

Keterangan:

ϕ_y = 0,9 adalah faktor reduksi kekuatan saat leleh
 f_y, f_u = adalah tegangan leleh dan tegangan tarik putus

Ukuran las sudut ditentukan oleh panjang kaki. Panjang kaki harus ditentukan debagai panjang t_{w1}, t_{w2} , dari sisi yang terletak sepanjang kaki segitiga yang terbentuk dalam penampang melintang las yang dapat dilihat pada Gambar 2.17 kecuali bila ukuran las tidak boleh melebihi tebal bagian yang tertipis dalam sambungan.



Gambar 2. 17 Ukuran las sudut
(Sumber SNI 1729-2002)

Ukuran minimum las sudut sepanjang tepi bisa dilihat pada Tabel 2.15

Tabel 2. 15 Ukuran minimum las sudut

Tebal bagian paling tebal, t (mm)	Tebal minimum las sudut, t_w (mm)
$t \leq 7$	3
$7 < t \leq 10$	4
$10 < t \leq 15$	5
$15 < t$	6

(Sumber SNI 1729-2002)

Ukuran maksimum las sudut sepanjang tepi komponen yang disambung adalah:

- untuk komponen dengan tebal kurang dari 6,4 mm diambil setebal komponen
- untuk komponen dengan tebal 6,4 mm atau lebih diambil 1,6 mm kurang dari tebal komponen kecuali jika dirancang agar memperoleh tebal rencana las tertentu.

Las sudut yang memikul gaya terfaktor per satuan panjang las, R_u harus memenuhi:

$$R_u \leq \phi R_{nw} \dots\dots\dots (2.14.g)$$

Dengan,

$$\phi_f R_{nw} = 0,75 t_t (0,6 f_{uw}) \text{ (las) } \dots\dots\dots(2.14.h)$$

$$\phi_f R_{nw} = 0,75 t_t (0,6 f_u) \text{ (bahan dasar) } \dots\dots\dots(2.14.i)$$

dengan $\phi_f = 0,75$ faktor reduksi kekuatan saat fraktur

Keterangan:

f_{uw} = Tegangan tarik putus logam las, MPa

f_u = Tegangan tarik putus bahan dasar, MPa

t_t = Tebal rencana las, mm

Las pengisi (las sudut di sekeliling lubang bulat atau selot) kuat nominalnya sama dengan kuat las sudut dan ukuran minimumnya sama dengan yang berlaku untuk las sudut. Las pengisi dalam bentuk lubang terisi dengan metal las memikul gaya geser terfaktor, R_u harus memenuhi:

$$R_u \leq \phi R_{nw} \dots\dots\dots (2.14.j)$$

Dengan,

$$\phi_f R_{nw} = 0,75 (0,6 f_{uw}) A_w \dots\dots\dots (2.14.k)$$

Keterangan:

ϕ_f = 0,75 adalah faktor reduksi kekuatan saat fraktur

f_{uw} = Tegangan tarik putus logam las, MPa

Las pengisi hanya boleh digunakan untuk menyalurkan geser dalam sambungan tumpuk atau untuk mencegah tekuk dari bagian yang bertumpuk atau untuk menyambung bagian komponen dari komponen struktur tersusun.

2.15 Sambungan Geser

Gaya geser horizontal yang timbul antara slab beton dengan balok baja selama pembebanan harus ditahan agar penampang komposit bekerja secara monolit, atau dengan kata lain agar terjadi interaksi antara slab beton dengan balok baja. Untuk menjamin adanya lekatan antara pelat beton dengan balok baja maka harus dipasang alat penyambung geser mekanis (*shear connector*) di atas balok yang berhubungan dengan slab beton. Slab *connector* berfungsi menahan atau menghindari terangkatnya slab beton sewaktu dibebani (Pujianto, 2010). Terdapat 2 jenis penghubung geser yaitu jenis paku dan kanal. Kuat nominal satu penghubung geser jenis paku yang ditanam di plat beton massif adalah:

$$Q_n = 0,5 A_{SC} \sqrt{f_c' E_c} \leq A_{SC} f_u \dots\dots\dots (2.15.a)$$

Keterangan:

A_{SC} = Luas penampang penghubung geser jenis paku (mm^2)

f_u = Tegangan putus penghubung geser jenis paku, MPa

Q_n = Kuat nominal geser untuk penghubung geser, N

Kuat nominal satu penghubung geser kanal yang ditanam di dalam pelat beton massif adalah:

$$Q_n = 0,3 (t_f + 0,5t_w) L_c \sqrt{f_c' E_c} \dots\dots\dots (2.15.b)$$

Keterangan:

L_c = Panjang penghubung geser kanal (mm)

t_f = tebal pelat sayap (mm)

t_w = tebal pelat badan (mm)

Kuat desak beton

$$C_{max} = 0,85 f_c' \times b_{Eff} \times t_s \dots\dots\dots (2.15.c)$$

Kuat tarik baja

$$T_{max} = A_s \times f_y \dots\dots\dots (2.15.d)$$

Berdasarkan kedua persamaan tersebut di atas dapat dipilih hasil nilai yang terbesar sehingga menghasilkan jumlah alat sambung geser yang lebih banyak. Banyaknya alat sambung geser yang dibutuhkan ditentukan dengan perumusan sebagai berikut:

$$N = \frac{C_{max}}{Q_n} \times \frac{T_{max}}{Q_n} \dots\dots\dots (2.15.e)$$

2.16 Komponen Struktur Balok Kolom

Pada komponen struktur efek gaya aksial dan momen lentur tidak dapat diabaikan salah satunya, keduanya harus dipertimbangkan dalam perhitungan perencanaan komponen struktur yang disebut sebagai komponen balok kolom. Pada struktur statis tak tentu umumnya sering dijumpai elemen balok-kolom ini (Setiawan, 2008). Komponen struktur yang mengalami momen lentur dan gaya aksial harus direncanakan untuk memenuhi ketentuan sebagai berikut:

Untuk $\frac{N_u}{\phi N_n} \geq 0,2$ (dominan aksial)

$$\frac{N_u}{\phi N_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1 \dots\dots\dots (2.16.a)$$

Untuk $\frac{N_u}{\phi N_n} < 0,2$ (dominan lentur)

$$\frac{N_u}{2\phi N_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1 \dots\dots\dots (2.16.a)$$

Dengan $\phi = 0,85$ untuk N_n , dan $\phi = 0,90$ untuk M_n

2.16.1 Amplifikasi Momen Untuk Struktur Bergoyang

Besarnya momen lentur terfaktor pada struktur bergoyang dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

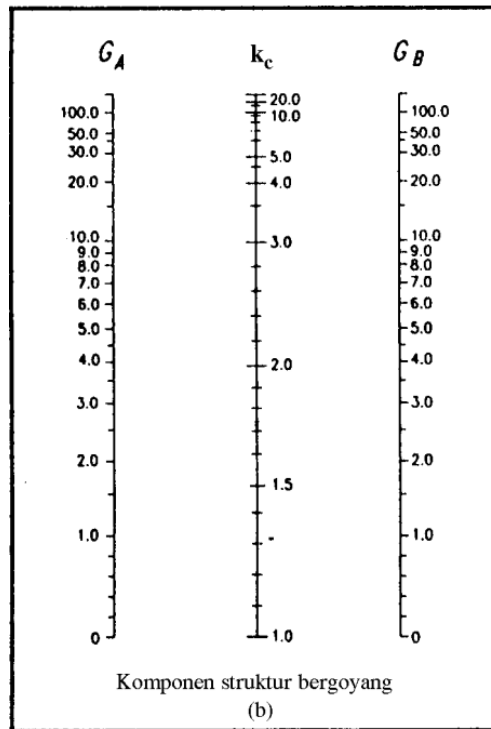
$$M_u = \delta_b \cdot M_{ntu} + \delta_s \cdot M_{ltu} \dots\dots\dots (2.16.c)$$

Dengan momen lentur terfaktor orde pertama yang diakibatkan oleh beban-beban yang dapat menimbulkan goyangan:

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \left(\frac{\sum N_u}{\sum N_{crs}} \right)} \dots\dots\dots (2.16.d)$$

Garis terputus menunjukkan diagram kolom tertekuk	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Nilai k_c teoritis	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Nilai k_c yang dianjurkan untuk kolom yang mendekati kondisi ideal	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Kode ujung	<ul style="list-style-type: none"> Jepit Sendi Roll tanpa putaran sudut Ujung bebas 					

Gambar 2. 18 Nilai k_c untuk Kolom dengan Ujung-ujung yang Ideal
(Sumber SNI 1729-2002)



Gambar 2. 19 Nilai k_c untuk Komponen Struktur Bergoyang
(Sumber SNI 1729-2002)

2.16.2 Amplifikasi Momen Untuk Struktur Tidak Bergoyang

Besarnya momen lentur yang terfaktor untuk komponen struktur tidak bergoyang dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$M_u = \delta_b \cdot M_{ntu}$$

Dengan M_{ntu} adalah momen lentur orde pertama yang diakibatkan oleh beban-beban yang tidak menimbulkan goyangan

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \left(\frac{N_u}{N_{crb}}\right)} \geq 1,0 \dots\dots\dots (2.16.e)$$

Keterangan:

N_u = Gaya aksial terfaktor pada kolom

N_{crb} = Beban kritis elastic kolom

Untuk struktur tidak bergoyang tanpa beban transversal :

$$C_m = 0,6 - 0,4 \beta_m < 1,0 \dots\dots\dots (2.16.f)$$

Dengan :

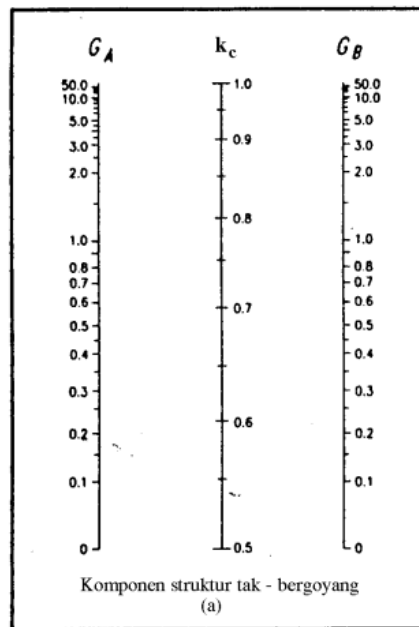
$$\beta_m = \frac{M_1}{M_2} \dots\dots\dots (2.16.g)$$

Untuk struktur tidak bergoyang dengan beban transversal

$C_m = 1$ (untuk ujung sederhana)

$C_m = 0,85$ (untuk ujung kaku)

β_m adalah perbandingan momen terkecil dan terbesar yang bekerja di ujung-ujung komponen struktur. Bernilai positif bila komponen struktur tertlentur dengan kelengkungan yang berbalik tanda dan bernilai negative bila kelengkungan searah tanda.



Gambar 2. 20 Nilai k_c untuk Komponen Struktur Tidak Bergoyang
(Sumber SNI 1729-2002)

2.17 Pengertian Pondasi

Setiap bangunan pasti memiliki pondasi yang berfungsi untuk menopang bangunan tersebut. Secara umum, pondasi adalah suatu struktur yang terletak di permukaan atau di dalam lapisan tanah, yang berfungsi sebagai landasan dan juga untuk menyalurkan beban-beban yang bekerja, gaya-gaya luar seperti beban gravitasi, gempa bumi dan lain-lain. Disamping itu, tidak boleh terjadi penurunan melebihi batas yang diijinkan. Pondasi bangunan dapat dibedakan menjadi dua yaitu pondasi dangkal (*shallow foundation*) dan pondasi dalam (*deep foundation*), tergantung dari letak tanah kerasnya dan perbandingan kedalaman dengan lebar pondasi. Pondasi dangkal dapat digunakan jika lapisan tanah kerasnya terletak dekat dengan permukaan tanah. Suatu pondasi termasuk kategori pondasi dangkal apabila $D/B < 4$ atau 5. Sedangkan untuk pondasi dalam dapat digunakan jika lapisan tanah keras berada

jauh dari permukaan tanah. Suatu pondasi dapat dikatakan pondasi dalam apabila $D/B \geq 4$ atau 10 (Syafei, M.I.G., 2016).

2.18 Perencanaan Pondasi Tiang Pancang

Pondasi tiang pancang (*pile foundation*) adalah suatu bagian dari struktur yang digunakan untuk menerima dan menyalurkan beban dari struktur atas ke tanah yang memiliki daya dukung pada kedalaman tertentu. Pemakaian tiang pancang dipergunakan untuk suatu pondasi bangunan apabila tanah dasar di bawah bangunan tersebut tidak mempunyai daya dukung (*bearing capacity*) yang cukup untuk memikul berat bangunan dan bebannya, atau apabila tanah keras yang mana mempunyai daya dukung yang cukup untuk memikul berat bangunan dan bebannya terletak sangat dalam (Sardjono, H.S., 1984).

Bila pemakaian pondasi tiang pancang telah ditetapkan, maka dimensi dan panjang tiang pancang perlu dihitung berdasarkan pada beban yang berasal dari bagian konstruksi di atas tanah dengan mempertimbangkan gaya aksial dan momen pada tiang yang diijinkan. Berikut langkah-langkah perencanaan pondasi tiang pancang berdasarkan hasil uji sondir ditentukan dengan perumusan:

1. Tahanan Ujung (*End Bearing Pile*)

Tiang pancang dihitung berdasarkan tahanan ujung serta memindahkan beban yang diterima ke lapisan tanah keras yang berada di bawahnya. Persamaan untuk menentukan daya dukung tanah terhadap tiang adalah:

$$Q_{\text{tiang}} = \frac{A_{\text{tiang}} \times P}{n_1} \dots\dots\dots (2.18.a)$$

Kemampuan tiang terhadap kekuatan bahan ditentukan dengan perumusan berikut:

$$P_{\text{tiang}} = \text{bahan} \times A_{\text{tiang}} \dots\dots\dots (2.18.b)$$

Keterangan:

- Q_{tiang} = Daya dukung keseimbangan tiang (kN)
- A_{tiang} = Luas permukaan tiang (m)
- P = Nilai conus hasil sondir (kN/m)
- n_1 = 3 (faktor keamanan)
- P_{tiang} = Kekuatan yang diijinkan pada tiang pancang (kg)
- Bahan = Tegangan tekan ijin bahan tiang (kg/cm)

2. Tahanan Gesekan (*Friction Pile*)

Apabila pemancangan tiang hingga lapisan tanah keras sulit dilaksanakan dikarenakan letaknya yang sangat dalam, dapat dipergunakan tiang pancang dengan daya dukung berdasarkan dengan perletakan antara tiang dengan tanah (*cleef*).
Persamaan daya dukung yang diijinkan terhadap tiang adalah:

$$Q_{\text{tiang}} = \frac{JHP \times O}{n_2} \dots\dots\dots (2.18.c)$$

Keterangan:

Q_{tiang} = Daya dukung keseimbangan tiang (kN)

O = Keliling tiang pancang (m)

JHP = Total *friction* (kN/m)

n_2 = 5 (faktor keamanan)

3. Tahanan Ujung dan Tahanan Gesekan (*End Bearing and Friction Pile*)

Apabila perhitungan tiang pancang didasarkan terhadap ujung dan hambatan pelekat, maka persamaan daya dukung yang diijinkan adalah:

$$Q_{\text{tiang}} = \frac{A_{\text{tiang}} \times A}{n_1} + \frac{JHP \times O}{n_2} \dots\dots\dots (2.18.d)$$

Keterangan:

Q_{tiang} = Daya dukung keseimbangan tiang (kN)

O = Keliling tiang pancang (m)

JHP = Total *friction* (kN/m)

4. Daya Dukung Tiang Pancang

a. Berdasarkan Hasil SPT

Perencanaan daya dukung tiang pancang berdasarkan hasil sondir ditentukan dengan perumusan:

$$P_{\text{tiang}} = \frac{40 \times A \times N_i}{n} \dots\dots\dots (2.18.e)$$

Keterangan:

N_i = Nilai SPT pada kedalaman i (kg/cm^2)

A = Luas penampang tiang pancang (cm^2)

n = Angka keamanan (2-3)

b. Berdasarkan Kekuatan Bahan

Perencanaan daya dukung tiang pancang berdasarkan kekuatan bahan ditentukan dengan perumusan:

$$P_{\text{tiang}} = \sigma_h \times A_{\text{tiang}} \dots\dots\dots (2.18.f)$$

$$\sigma_{\text{bahan}} = 0,33 \times f_c' \dots\dots\dots (2.18.g)$$

Keterangan:

P_{tiang} = Kekuatan pikul tiang yang diijinkan

σ_{bahan} = Tegangan tekan tiang terhadap penumbukan

A_{tiang} = Luas penampang tiang pancang

5. Perhitungan Jarak Tiang Pancang Berdasarkan Dirjen Bina Marga Departemen PU sebagai berikut:

$$S1 \geq 2,5 D \dots\dots\dots (2.18.h)$$

$$S1 \geq 3 D \dots\dots\dots (2.18.i)$$

Keterangan:

S = Jarak antar tiang

D = Diameter tiang

6. Merencanakan Jumlah Kebutuhan Tiang Pancang

Perencanaan jumlah tiang pancang ditentukan dengan perumusan:

$$n = \frac{\sum V}{\eta \times P_{\text{tiang}}} \dots\dots\dots (2.18.j)$$

7. Kontrol Tiang Pancang

Kontrol tiang pancang ditentukan dengan perumusan:

$$P_{\text{tiang}} = \frac{C_n \times A}{n_1} + \frac{JHP \times \text{keliling}}{n_2} \dots\dots\dots (2.18.k)$$

$$P_o = \frac{\sum V}{n} \pm \frac{(M_x \times X_{\text{maks}})}{\sum x^2} \pm \frac{(M_y \times Y_{\text{maks}})}{\sum y^2} \dots\dots\dots (2.18.l)$$

$$P_{o\text{maks}} = \frac{\sum V}{n} \pm \frac{(M_x \times X_{\text{maks}})}{\sum x^2} \pm \frac{(M_y \times Y_{\text{maks}})}{\sum y^2} < P_{\text{group}} \dots\dots\dots (2.18.m)$$

Keterangan:

$P_{o\text{maks}}$ = Beban maksimum tiang

- ΣV = Gaya aksial yang terjadi
- ΣMy = Momen yang bekerja tegak lurus sumbu y
- ΣMx = Momen yang bekerja tegak lurus sumbu x
- X_{maks} = Jarak tiang arah sumbu x terjauh
- Y_{maks} = Jarak tiang arah sumbu y terjauh
- ΣX^2 = Jumlah kuadrat X
- ΣY^2 = Jumlah kuadrat Y

8. Daya Dukung Pondasi Kelompok

Perencanaan daya dukung pondasi kelompok menurut Converse Labarre ditentukan dengan perumusan:

$$P_{O_{min}} \geq P_{group} = \eta \times P_{tiang} \dots\dots\dots (2.18.n)$$

$$Efisiensi (\eta) = 1 - \text{arc tg} \frac{D}{S} \times \frac{m(n-1)+n(m-1)}{m-(n \times 90)} \dots\dots\dots (2.18.o)$$

Keterangan:

- D = Diameter tiang pancang
- S = Jarak antar tiang pancang (as ke as)
- m = Jumlah tiang pancang dalam 1 kolom
- n = Jumlah tiang pancang dalam 1 baris

Cek Kekuatan:

$$P_{O_{maks}} \geq P_{ijin} \times \eta \dots\dots\dots (2.18.p)$$

2.19 Perencanaan *Pile Cap*

Tebal poer direncanakan dengan mempertimbangkan persyaratan panjang penyaluran dari kolom dan tiang pancang. Pengaruh geser pondasi yang terjadi dengan tulangan maksimum perlu diperhatikan dan dibatasi besarnya. Langkah-langkah perencanaan *pile cap* ditentukan sebagai berikut:

1. Panjang penyaluran

Adanya tulangan dalam bor *pile* maka diperlukan panjang penyaluran tulangan yang secara langsung dapat menentukan panjang dari bor *pile* yang akan dipakai pada perencanaan. Panjang penyaluran dapat ditentukan dengan rumusan yang mengacu

pada peraturan SK SNI 2002. Penyaluran batang ulir dalam kondisi tekan harus memenuhi persyaratan berikut:

$$l_{db} = < 200 \text{ mm atau } l_{db} = 0,4 \times d_b \times f_y \dots\dots\dots (2.19.a)$$

Keterangan:

- d_b = Diameter nominal batang tulangan (mm)
- f_y = Kekuatan leleh tulangan yang disyaratkan (MPa)

2. Geser pons

Tujuan geser pons adalah untuk mengetahui tebal *pile cap* apakah cukup kuat atau tidak untuk menahan beban terpusat yang terjadi. Bidang kritis pada perhitungan geser pons dianggap tegak lurus bidang pelat yang terletak pada jarak 0,5d dari keliling beban reaksi terpusat tersebut, dimana d adalah tinggi efektif pelat. Berikut merupakan kuat geser yang disumbangkan beton diambil terkecil dengan ditentukan melalui perumusan berikut:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \lambda \times \sqrt{f_c'} \times b_o \times d \dots\dots\dots (2.19.b)$$

$$V_c = 0,33\lambda \times \sqrt{f_c'} \times b_o \times d \dots\dots\dots (2.19.c)$$

Keterangan:

- f_c' = Kuat tekan beton yang disyaratkan (MPa)
- b_o = Keliling penampang kritis pada *pile cap* $2(b_{kolom} + d) + 2(h_{kolom} + d)$
- d = Diameter tiang (cm)
- β = Rasio sisi panjang terhadap sisi pendek kolom, beban terpusat atau daerah reaksi

a. Kolom tidak bertumpu pada *pile*

Maka P yang diperhitungkan adalah P kolom ditentukan dengan perumusan:

$$t = \frac{P}{4h(h+B)} \dots\dots\dots (2.19.d)$$

$$t_{ijin} = 0,65 \sqrt{f_c'} \dots\dots\dots (2.19.e)$$

Maka, perhitungan harus memenuhi persyaratan berikut:

$$t < t_{ijin} \dots\dots\dots (2.19.f)$$

b. Kolom tertumpu pada *pile*

Maka P yang diperhitungkan adalah P tiang pancang yang ditentukan dengan perumusan berikut:

$$t = \frac{P}{\pi h (h+D)} \dots\dots\dots (2.19.g)$$

$$t_{ijin} = 0,65 \sqrt{fc'} \dots\dots\dots (2.19.h)$$

Maka, perhitungan harus memenuhi persyaratan berikut:

$$t < t_{ijin} \dots\dots\dots (2.19.i)$$

3. Momen lentur

Momen lentur *pile cap* merupakan momen lentur yang dihasilkan dari besarnya beban yang dipikul dikalikan dengan jarak tegak lurus dari tengah *pile* menuju titik kritis akibat pembebanan dalam hal berikut adalah titik di muka kolom. Besarnya beban yang dipikul merupakan jumlah *pile* dibawah pengaruh area lentur dikalikan dengan daya dukung *pile*. Sehingga perhitungan besarnya beban total yang dipikul *pile cap* ditentukan dengan perumusan berikut:

$$P_u = \Sigma_{pile} \times Q_u \dots\dots\dots (2.19.j)$$

Keterangan:

P_u = Beban *ultimate* (N)

Σ_{pile} = Jumlah *pile* dibawah pengaruh lentur

Q_u = Daya dukung *ultimate* 1 *pile* (N)

Cara perhitungan untuk masing-masing momen lentur ditentukan dengan perumusan:

$$M_{u1} = P_{u1} \left(\frac{kD}{2} - \frac{b_c}{2} \right) \dots\dots\dots (2.19.k)$$

$$M_{u2} = P_{u2} \left(\frac{kD}{2} - \frac{b_c}{2} \right) \dots\dots\dots (2.19.l)$$

Keterangan:

M_{u1} = Momen lentur kritis pertama (Nmm)

M_{u2} = Momen lentur kritis kedua (Nmm)

$P_{u1,2}$ = Beban ultima (N)

k = Variabel jarak *pile cap* (2-3)

D = Diameter *pile* (mm)

b_c = Lebar kolom (mm)

2.20 Penurunan Tiang Pancang

Tiang pancang dibebani tiang akan mengalami pemendekan dan tanah disekitarnya akan mengalami penurunan (Hardiyatmo, 2010). Selain adanya kegagalan kuat daya dukung tanah, pada setiap proses penggalian selalu dihubungkan dengan perubahan keadaan tegangan dalam tanah. Perubahan tegangan pasti akan disertai dengan perubahan bentuk. Pada umumnya hal ini menyebabkan penurunan pada pondasi tiang pancang (Hardiyatmo, 1996).

1. Penurunan tiang tunggal

Perkiraan penurunan tiang tunggal dapat ditentukan dengan persamaan:

a. Untuk tiang apung atau friksi

$$S = \frac{P \times I}{E_s \times D} \dots\dots\dots (2.20.a)$$

$$I = I_o \times R_k \times R_h \times R_u \dots\dots\dots (2.20.b)$$

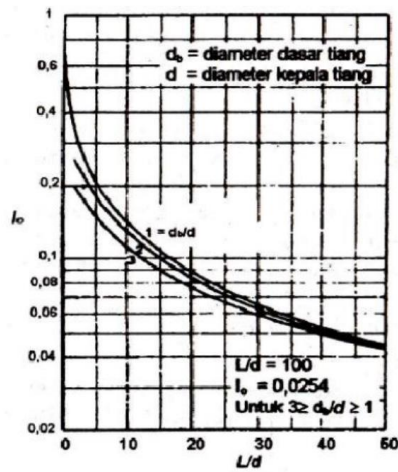
b. Untuk tiang dukung ujung

$$S = \frac{P \times I}{E_s \times D} \dots\dots\dots (2.20.a)$$

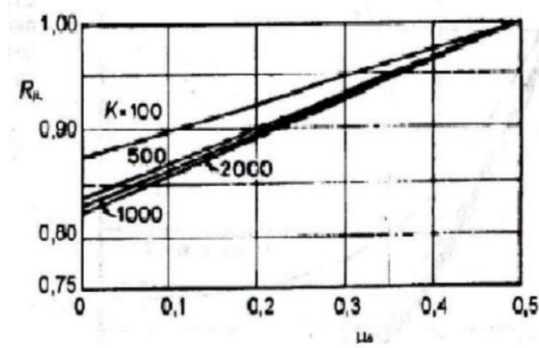
$$I = I_o \times R_k \times R_b \times R_u \dots\dots\dots (2.20.b)$$

Keterangan:

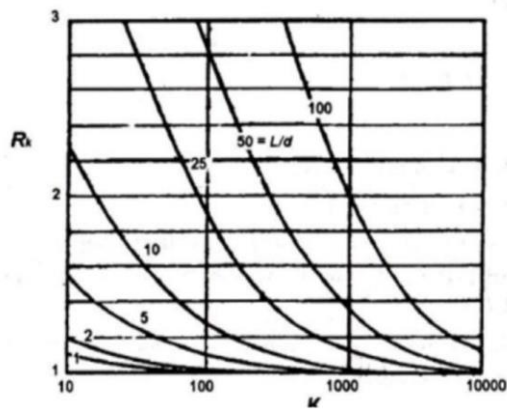
- S = Penurunan untuk tiang tunggal (cm)
- P = Beban yang bekerja (kg)
- I_o = Faktor pengaruh penurunan untuk tiang yang tidak mudah mampu mampat
- R_k = Faktor koreksi kemudahmampatan tiang
- R_u = Faktor koreksi angka poisson μ
- R_b = Faktor koreksi kekuatan lapis pendukung
- D = Lebar atau diameter tiang pancang (cm)



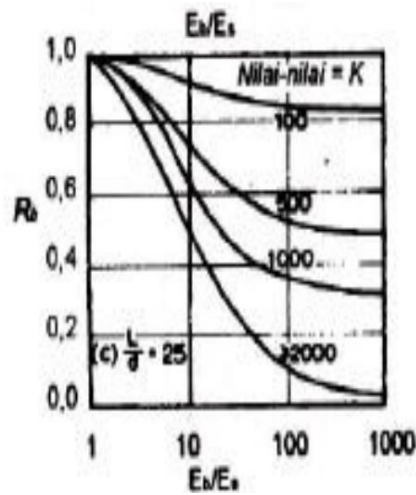
Gambar 2. 21 Faktor Penurunan I_0
(Sumber Hardiyatmo, 2010)



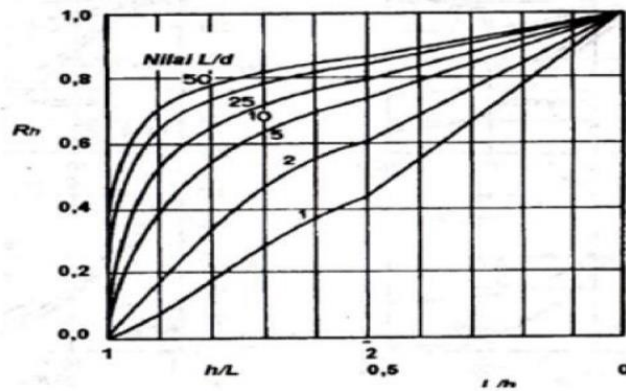
Gambar 2. 22 Faktor Penurunan R_u
(Sumber Hardiyatmo, 2010)



Gambar 2. 23 Faktor Penurunan R_k
(Sumber Hardiyatmo, 2010)



Gambar 2. 24 Faktor Penurunan R_b
(Sumber Hardiyatmo, 2010)



Gambar 2. 25 Faktor Penurunan R_h
(Sumber Hardiyatmo, 2010)

2. Penurunan tiang kelompok

Hubungan penurunan antara tiang tunggal dan kelompok tiang dapat ditentukan dengan perumusan:

$$S_g = S \times \frac{(4B+3)^2}{(B+4)^2} \dots\dots\dots (2.20.c)$$

Keterangan:

- S_g = Penurunan kelompok tiang (mm)
- B = Lebar kelompok tiang (mm)
- S = Penurunan tiang tunggal (mm)

3. Penurunan yang diizinkan

Apabila penurunan yang terjadi pada suatu bangunan berjalan lambat dalam frekuensi waktu yang cukup lama, maka semakin besar kemungkinan struktur untuk menyesuaikan diri terhadap penurunan yang terjadi tanpa adanya kerusakan struktur oleh pengaruh rangkak (*creep*). Karena penurunan maksimum dapat diprediksi dengan adanya ketetapan yang memadai, umumnya dapat diadakan hubungan antara penurunan maksimum. Persyaratan perbandingan penurunan yang aman yaitu $S_{Total} \leq S_{Izin}$ ditentukan dengan perumusan:

$$S_{Izin} = 10\%D \dots\dots\dots (2.20.d)$$

Keterangan:

D = Lebar atau diameter tiang pancang (cm)

Penurunan izin pada kelompok tiang dapat ditentukan dengan perumusan:

$$S_{Izin} = \frac{L}{250} \dots\dots\dots (2.20.e)$$

Keterangan:

L = Kedalaman tiang pancang (m)