

## BAB II

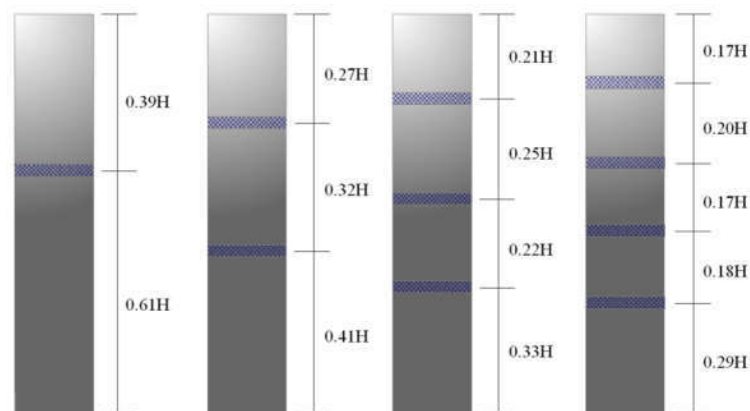
### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

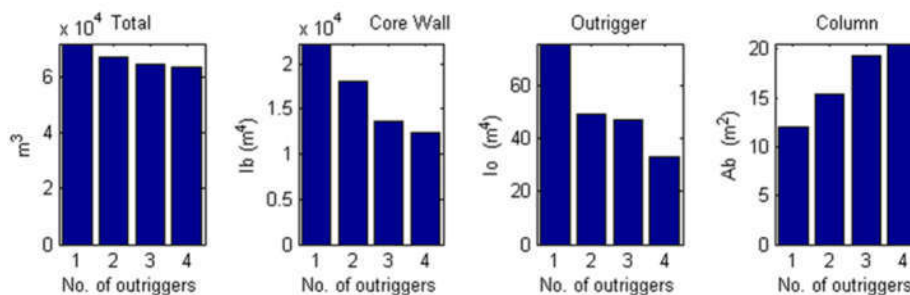
Suatu penelitian memerlukan dukungan keterkaitannya dengan kerangka pikiran dan hasil-hasil penelitian yang telah ada, untuk mendukung teori yang akan digunakan, sehingga didapat informasi hingga kajian dari beberapa referensi sebagai berikut :

##### 2.1.1. Penelitian terdahulu

(Park. dkk., 2016) menyebutkan bahwa “*Genetic Algorithm Based Minimum Weight Design of an Outrigger System for High-Rise Buildings*” dengan tujuan pengoptimalan metode algoritma genetik untuk meminimalkan volume struktur terhadap *outrigger*, *core wall*, struktur utama bangunan, dan lokasi optimal penempatan *outrigger*. Metodologi yang dipakai dengan memodelkan bangunan, dengan ketinggian + 400 m, lebar 50 m, sedangkan dimensi *outrigger* sekitar 2 lantai yaitu 8 m, dengan nilai ketebalan *outrigger* diwakili oleh variable  $X$ , dengan empat macam model penempatan *outrigger* sesuai ilustrasi pada gambar 2.1, dibandingkan berdasarkan keterkaitan jumlah *outrigger* dan volume struktur dari bangunan. Hasil penelitian menunjukkan sesuai pada gambar 2.2, bahwa peningkatan jumlah *outrigger* dapat mengurangi efek volume struktur yang dipasang dengan sistem *outrigger*.



Gambar 2.1 Visual keempat model penempatan dari *outrigger* di ketinggian gedung +400 m (Park. dkk., 2016).

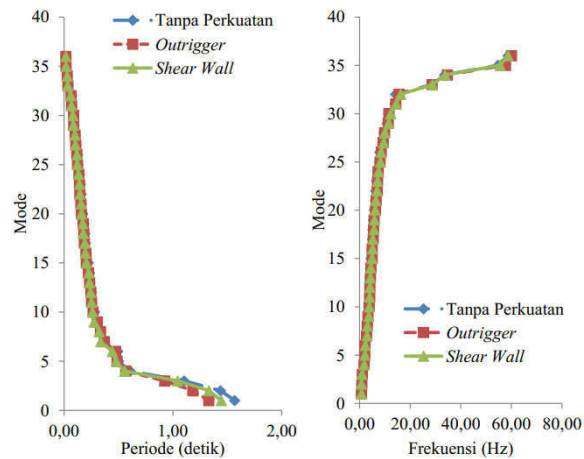


Gambar 2.2 Grafik perubahan volume untuk model struktural sehubungan dengan jumlah *outrigger* (Park. dkk., 2016).

Menurut (Pratama, 2018) tentang “*Desain Ulang Gedung dengan Penambahan Outrigger dan Shear wall pada Proyek Hotel El Royale Malioboro*”, untuk mendapatkan struktur yang paling efisien serta mampu menahan beban gempa desain sesuai peraturan peta gempa 2017, akan ditambah perkuatan struktur dengan sistem *outrigger* pada lantai 5 - 6 dari 10 lantai. Pemodelan menggunakan *software* SAP2000 dengan penambahan struktur *outrigger-shear wall*, dan tanpa perkuatan berdasarkan gambar perencana, mengecek analisis berdasarkan periode alami, partisipasi massa, gaya geser dasar (*base shear*), gaya geser antar lantai (*story shear*), dan simpangan (*drift ratio*). Hasil penelitian ini membuktikan bahwa dengan penambahan sistem *outrigger* dan *shearwall* dapat menghasilkan rasio kebutuhan penulangan bertambah pada balok dan kolom yang tertuang dalam dalam tabel 2.1, serta rasio pengecekan analisis berkurang setelah penambahan struktur *outrigger-shear wall* yang tertuang dalam tabel 2.2-2.3, dan pada gambar 2.3-2.6.

Tabel 2.1 Hasil perbandingan kontrol analisis keamanan, setelah diberi perkuatan *outrigger* dan *shear wall* terhadap kontrol eksisting gedung tanpa perkuatan (Pratama, 2018)

Kontrol analisis keamanan struktur gedung	<i>Outrigger</i>	<i>Shear wall</i>
Periode getar alami	- 15,21	- 7,85
<i>Base shear</i>	+ 13,45	+ 17,61
<i>Story shear</i>	+ 46,53	+ 29,09
<i>Drift ratio</i>	- 96,31	- 23,47
Kebutuhan tulangan balok	+ 100,00	+ 50,00
Kebutuhan tulangan kolom	+ 27,27	0,00



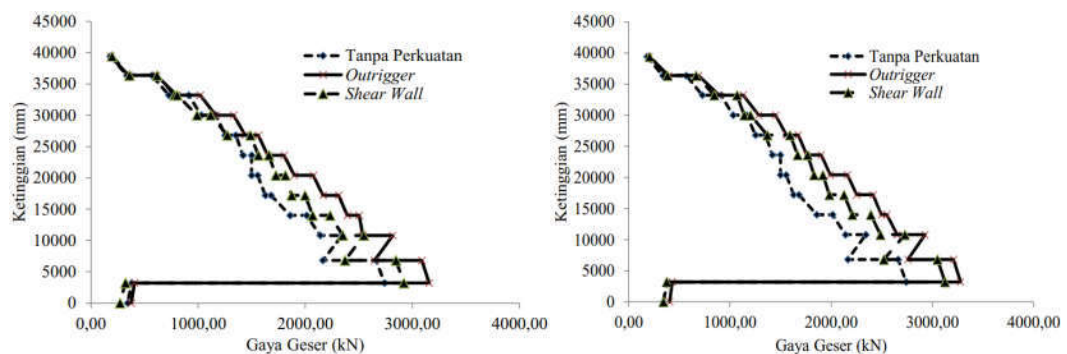
Gambar 2.3 Grafik perbandingan nilai periode dan frekuensi struktur (Pratama, 2018).

Tabel 2.2 Perbandingan nilai *base shear* struktur tanpa perkuatan dengan struktur perkuatan *outrigger* (Pratama, 2018)

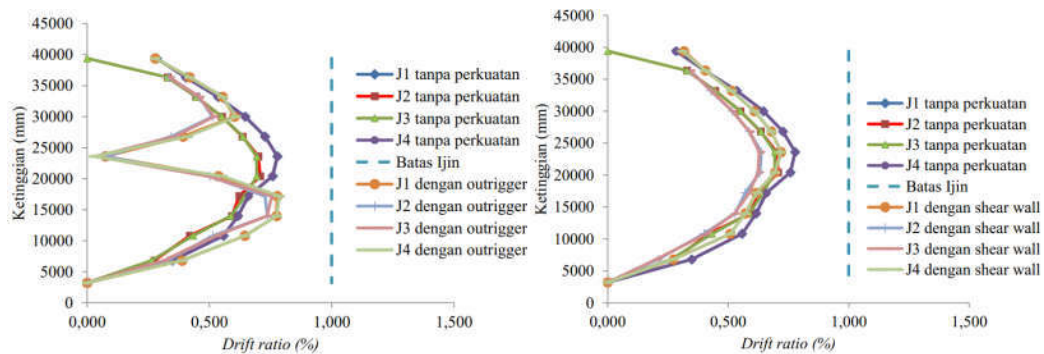
Arah	Tanpa Perkuatan		<i>Outrigger</i>		Kenaikan	
	V Dinamik (kN)	V Statik (kN)	V Dinamik (kN)	V Statik (kN)	V Dinamik %	V Statik %
X	3040,974	1845,579	3511,485	2185,187	15,472	18,401
Y	3197,383	1984,383	3630,360	2456,992	13,542	23,816

Tabel 2.3 Perbandingan nilai *base shear* struktur tanpa perkuatan dengan struktur perkuatan *shear wall* (Pratama, 2018)

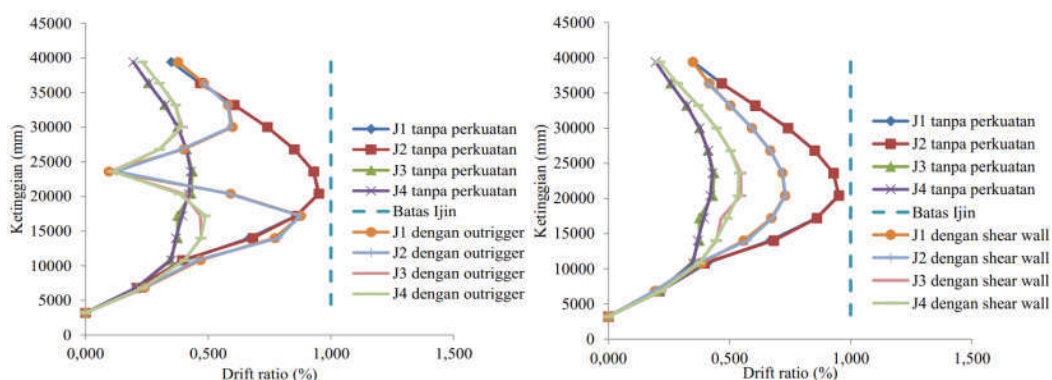
Arah	Tanpa Perkuatan		<i>Shear wall</i>		Kenaikan	
	V Dinamik (kN)	V Statik (kN)	V Dinamik (kN)	V Statik (kN)	V Dinamik %	V Statik %
X	3040,974	1845,579	3570,537	2014,690	17,414	9,163
Y	3197,383	1984,383	3760,394	2187,828	17,608	10,252



Gambar 2.4 Grafik perbandingan gaya geser lantai akibat beban gempa dinamik arah X (kiri) dan Y(kanan) (Pratama, 2018).



Gambar 2.5 Grafik *drift ratio* arah X pada struktur tanpa perkuatan dan dengan perkuatan *outrigger* (Pratama, 2018).



Gambar 2.6 Grafik *drift ratio* arah Y pada struktur tanpa perkuatan dan dengan perkuatan *shear wall* (Pratama, 2018).

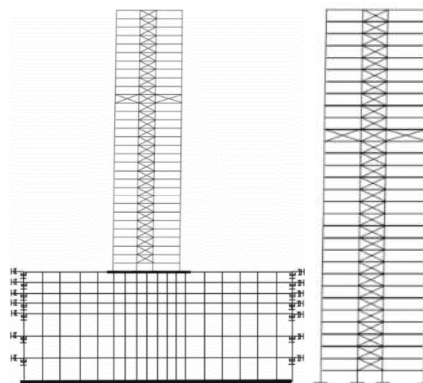
(Hardiman. dkk., 2017) menyebutkan bahwa dengan “*Kinerja Sistem Struktur Outrigger dan Belt-Wall pada Gedung Tinggi Akibat pembebanan Gempa*”, untuk membatasi *displacement* lateran dan memperkecil risiko keruntuhan akibat beban gempa, membutuhkan kekakuan bangunan yang berasal dari sistem penahan lateral yang tepat, yaitu dengan sistem *outrigger* dan *belt-wall* dengan menganalisis kinerja sistem *outrigger* dan *belt-wall* akibat beban gempa, dampak pada lokasi pemasangan, dan tingkat kinerja struktur. Metode penelitian menggunakan pemodelan program ETABS, dengan tahapan *input* ada tiga model yaitu sistem *open frame* sistem awal kronologi perencanaan, sistem *shearwall frame* pada gedung eksisting, dan sistem *composite outrigger* dan *belt-wall* yang dipasang pada tiga lokasi yaitu pada lantai 1/3 H pada lantai 17, 2/3 H pada lantai 34, 3/3 H pada atap. Tahapan analisis meliputi pemodelan gedung 53 lantai di Kota Semarang dengan sistem terkomputerisasi 3D, pemodelan sistem ganda menggunakan sistem rangka pemikul momen khusus dan sistem penahan lateral. Analisis berdasarkan

kontrol struktur dari berat struktur, gempa dinamik response spektrum, besarnya *dispacemnet*, simpangan antar lantai terkait syarat batas kinerja struktur, tingkat kinerja berdasarkan *Applied Tecnology Counci-40*, serta efisiensi berat total struktur. Tahap *output* adalah membandingkan kinerja antara model ketiga tahap *input* berdasarkan tahapan analisis. Hasil yang didapat, sistem *outrigger* dan *belt-wall* menghasilkan efisiensi sebesar 9,70 % terwujud pada berkurangnya massa stuktur atau berat total struktur terhadap sistem *shearwall frame* hingga bermuara pada perancangan struktur yang ekonomis, dan berdasarkan *Applied Tecnology Counci-40* termasuk kategori *Immediate Ocupancy*, yaitu apabila terkena gempa maka struktur bangunan aman, risiko korban jiwa dari kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti dan dapat segera difungsikan kembali, serta menghasilkan efektivitas kinerja yang baik sebesar 17,70 % memenuhi syarat kontrol kinerja struktur dan dinyatakan aman terhadap gempa.

(Pesik. dkk., 2018), dengan “*Respons Dinamis Bangunan Bertingkat Banyak dengan Variasi Tata Letak Outrigger*”, untuk meningkatkan kekakuan lateral dalam menahan beban gempa, pada bangunan tingkat tinggi, ada beberapa sistem dan metode perencanaan seperti *moment resisting frames*, *shear wall-frame system*, *core and outrigger system*, *framed tubes*, *tube in tube*, *bundled tube*, *truss systems*, namun dalam penelitian ini dipilih sistem *core* dan *outrigger system*, dikarenakan sistem ini dianggap paling efektif untuk bangunan dengan ketinggian 40 lantai, dibandingkan dengan sistem yang hanya menggunakan *core* atau *shear wall-frame system*. Pemodelan menggunakan gedung dengan denah ukuran 49 m x 49 m, kemudian struktur dianalisis beban gempa dinamis respons spektrum dan *equivalent static load*, secara 3D menggunakan *software* Etabs, membandingkan kelima model, dengan penempatan *outrigger* pada lokasi optimum ; pada  $\frac{1}{4}$  dari ketinggian bangunan,  $\frac{1}{2}$  dari ketinggian bangunan,  $\frac{3}{4}$  dari ketinggian bangunan, pada model *cap truss* di lantai atas, dan struktur tanpa *outrigger*, berdasarkan kontrol partisipasi massa, periode getar struktur, nilai akhir respons spektrum, batas simpangan. Hasil dari pemodelan kelima lokasi ketinggian optimum, didapatkan model dengan perbandingan simpangan antar lantai, model yang nilai terkecil pada

lokasi penambahan *outrigger* di  $\frac{1}{2} h$ , dan  $\frac{3}{4} h$  dapat mereduksi simpangan terbesar 12,27%.

(Tavakoli. dkk., 2019) membuktikan “*Seismic Performance of Outrigger–Belt Truss System Considering Soil–Structure Interaction*”, untuk mempertimbangkan interaksi tanah struktur disekitar gedung yang dihasilkan adanya sisa lapisan tanah ketika terjadinya gempa, maka dicari lokasi terbaik dari sistem *outrigger belt-truss*. Pemodelan gedung 30 lantai dengan ketinggian antar lantai 3,2 m, yang menggunakan program *software* SAP2000, kemudian akan dibandingkan antara pemodelan *fixed base system*/tanpa memodelkan adanya dari struktur tanah, dengan pemodelan dengan interaksi struktur tanah berlapis SSI yang dimodelkan dua dimensi dengan formulasi *plane strain* pada SAP2000 seperti pada gambar gambar 2.7, analisis tanah yang dikenai beban gempa akan digunakan *open source software finite element software* dengan memasukan sifat-sifat dan jenis elemen tanah, untuk kedua pemodelan akan dibedakan lagi berdasarkan material baja, kurva tegangan regangan dengan membedakan antara *elastic* dan *in-elastic*. Pembebanan gempa menggunakan analisis dinamik percepatan el centro, dan penentuan lokasi terbaik dari *outrigger* dan *belt-truss*. Pemodelan lokasi penempatan *outrigger* dan *belt-truss* dari bawah ke atas gedung pada keempat model, dicari parameter minimum dari perpindahan maksimum atap, gaya geser dasar, dan *overturning* momen. Hasil yang didapat berupa tabel 2.4 yang menyebutkan bahwa model SSI dengan karakteristik material baja yang *elastic* optimal berdasarkan *overturning moment* dan *base shear* nilai-nilai yang didapatkan lebih rendah dari model yang lain.



Gambar 2.7 Metode pemodelan tanah SSI dengan *plane strain*, dan pemodelan *fixed base system* (Tavakoli. dkk., 2019).

Tabel 2.4 Hasil lokasi optimum penempatan *outrigger* dan *belt-truss* (Tavakoli. dkk., 2019)

Model	<i>Fixed Base System</i>		<i>Soil–Structure Interaction</i>	
	<i>Elastic</i>	<i>In-elastic</i>	<i>Elastic</i>	<i>In-elastic</i>
<i>Max roof displacement</i>	0,47	0,27	0,53	0,33
<i>Base shear</i>	0,67	0,83	0,67	0,43
<i>Overturning moment</i>	0,83	0,83	0,77	0,80

(Kim, Han Soo, 2017) “*Optimum Design of Outriggers in a Tall Building by Alternating Nonlinear Programming*” untuk mendesain lokasi *optimum* dari *outrigger* di sebuah gedung dengan menggunakan program *alternating nonlinear programming*, memecahkan beberapa integral *nonlinear* dengan menggunakan kuadratik *piecewise* yang berfungsi untuk memperoleh kendala turunan, kemudian dianalisis menggunakan diskrit dan analisis *finite element*. Pemodelan gedung dengan ketinggian jumlah lantai 80, menggunakan beberapa variasi jumlah *outrigger* dari ketinggian 0,312-0,685 H. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa jumlah *outrigger* meningkat dan volume struktur gedung akan menurun, namun kinerja dari *outrigger* akan tetap sama ketika jumlah *outrigger* ada dua dan satu *outrigger*, untuk lokasi optimal dari *outrigger* agak lebih tinggi yang diusulkan dengan teori analisis.

(Kamgar, Reza. Reza Rahgozar, 2017) menyebutkan “*Determination of Optimum Location for Flexible Outrigger Systems in Tall Buildings with Constant Cross Section Consisting of Framed Tube, Shear Core, Belt Truss and Outrigger System Using Energy Method*”, dengan memaksimalkan energi regangan yang terjadi antara *outrigger* dan *belt-truss* berdasarkan bahan material yang dipakai pada struktur *outrigger* dan *belt-truss*, kekakuan aksi kolom luar yaitu jarak antara kolom dengan pusat momen dari penempatan *outrigger* dan *belt-truss* ke *core wall* untuk mendapatkan ketinggian dari *outrigger* dan *belt-truss* berdasarkan persamaan turunan yang dihasilkan dari memaksimalkan energi regangan. Analisis dilakukan dengan tiga jenis pembebanan lateral terpusat pada penempatan *outrigger* dan *belt-truss*, merata pada seluruh ketinggian bangunan, distribusi segitiga sepanjang ketinggian lantai yang beban terbesar berada bagian bawah gedung. Hasil yang didapat berupa ketinggian *outrigger* dan *belt-truss* yang menyimpulkan dari ketiga pembebanan lateral, menghasilkan tidak ada pola hasil angka yang seragam, maka

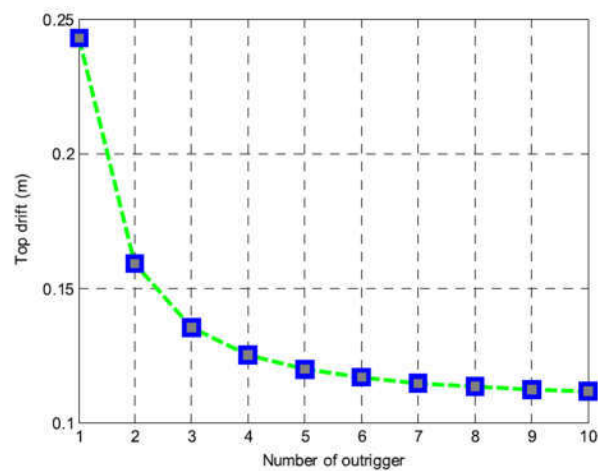
di ambil hasil dari pola distribusi pembebanan merata pada ketinggian *outrigger* dan *belt-truss* dari ketinggian gedung adalah  $h = 0,441$ ,  $h = 49$ ,  $h = 0,667$  lebih optimum berdasarkan hasil pembebanan distribusi segitiga yang dianggap hanya fokus terkonsentrasi dibagian atas struktur.

Menurut (Faimun. dkk., 2017) “*Desain Modifikasi Struktur Gedung Apartemen Gunawangsa Tidar Surabaya Menggunakan Struktur Beton Bertulang dengan Sistem Outrigger dan Belt-Truss*”, untuk mengatasi masalah struktur yang langsing, simpangan yang terjadi akibat beban lateral cenderung berlebih, berdasarkan ketinggian apartemen yang memiliki ketinggian + 115 m dan mempunyai 37 lantai, maka diperlukan sistem *outrigger* dan *belt-truss* untuk mempertahankan dimensi elemen struktur, agar menghindari pembesaran elemen struktur akibat masalah struktur yang langsing. Pemodelan menggunakan program bantu dengan data apartemen dimodifikasi menjadi 50 lantai dengan mempunyai ketinggian + 178.5 m, kemudian sistem *outrigger* dan *belt-truss* dipasang pada lantai 22, dianalisis kontrol struktur berdasarkan berat sendiri, respons ragam, periode struktur dan skala gempa, simpangan antar lantai. Hasil analisis diperoleh balok *outrigger* dengan dimensi 400 x 2000 mm dan balok *belt-truss* dengan dimensi yang sama dapat mengurangi nilai simpangan antar lantai arah Y yang melebihi batas izin, nilai daktilitas kolom *outrigger* dengan program bantu *extract* sebesar 6,76 lebih besar dari koefisien reduksi gempa sebesar 5 yang berarti koefisien gempa dapat terpenuhi.

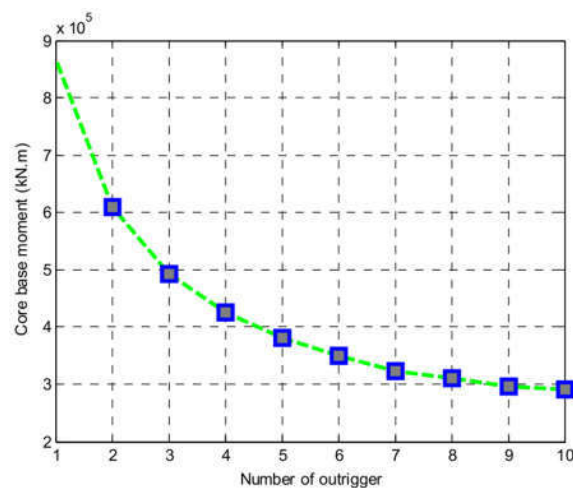
(Chen, Yue. Zhenya Zhang, 2017) membuktikan dengan “*Analysis of Outrigger Numbers and Locations in Outrigger Braced Structures Using A Multiobjective Genetic Algorithm*” sebuah gedung bertingkat tinggi rentan terhadap pembeban horizontal seperti beban angin, yang mengakibatkan rotasi dan momen lentur pada dinding geser serta deformasi lateral bangunan. Metodologi penelitian ini menggunakan bangunan gedung untuk kantor, yang memiliki ketinggian + 260 m, 65 lantai dengan tinggi antar lantai ke lantai 4 m, dimensi ukuran horizontal 50,8 m x 43,3 m, sistem *outrigger* ketebalan dimensi 800 mm yang menggunakan profil baja, dianalisis menggunakan program bantu matlab dengan penerapan algoritma genetika *multi-objective* yaitu mencari solusi yang mendekati solusi yang optimal dari lokasi dan jumlah optimal dengan mempertimbangkan banyak tujuan antara



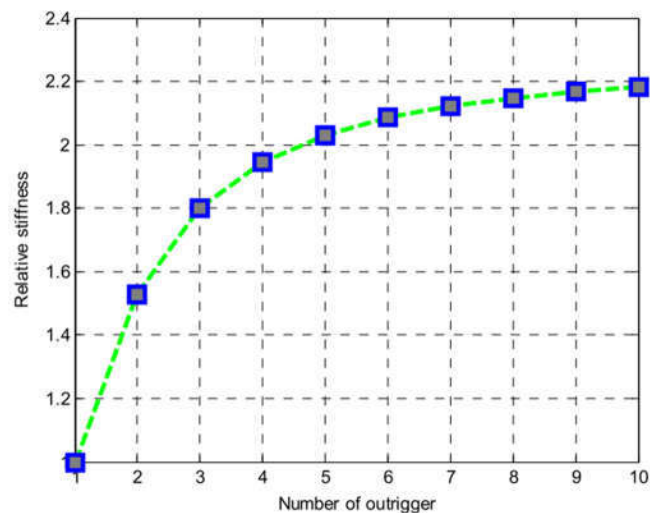
lain *top drift*, *core base moment*, *relative stiffness*. Hasil penerapan ini berupa Gambar 2.8 – 2.10, dengan kesimpulan bahwa dari sistem *outrigger* dapat menguatkan struktur dengan mempertimbangkan jumlah *outrigger* maksimum empat buah, karena jika lebih dari empat buah *outrigger*, sudah tidak efektif terhadap tujuan dari penerapan algoritma, jadi untuk contoh kesimpulan diambil kasus dalam jumlah dua *outrigger* yang berbeda lokasi berdasarkan hasil yang optimal untuk 1 dan dua *outrigger*, berada pada 81 m, 117 m a 135 m, 250 m diukur dari atas puncak bangunan.



Gambar 2.8 Grafik simpangan lantai atap berdasarkan jumlah *outrigger* (Chen, Yue. Zhenya Zhang, 2017).



Gambar 2.9 Grafik *moment core base moment* berdasarkan jumlah *outrigger* (Chen, Yue. Zhenya Zhang, 2017).



Gambar 2.10 Grafik kekakuan relatif dari struktur berdasarkan jumlah *outrigger* (Chen, Yue. Zhenya Zhang, 2017).

(Gultom, 2017) menyebutkan bahwa dengan “*Desain Penampang dan Sambungan Outrigger pada Bangunan Gedung 40 Lantai Berdasarkan SNI 1726:2012 dan SNI 7860:2015*” untuk mengurangi momen yang berlebih terjadi pada *core wall*, kolom, dan dinding inti, maka gedung berlantai 40 dengan ketinggian + 140,5 m, dimodelkan dalam empat model ; model pertama didesain dengan struktur menggunakan rangka baja dan beton komposit pemikul khusus tipe *Concrete Filled Steel Tube*, model ke-dua dengan struktur menggunakan rangka baja dan beton komposit pemikul khusus dengan sistem ganda *core wall* dan *outrigger* di letakan pada sisi arah Y bangunan, model ke-tiga dengan struktur menggunakan rangka baja dan beton komposit pemikul khusus dengan sistem ganda *core wall* dan *outrigger* di letakan pada sisi arah X bangunan, dan model ke-empat dengan struktur menggunakan rangka baja dan beton komposit pemikul khusus dengan sistem ganda *core wall* dan *outrigger* di letakan pada dua sisi arah X dan Y bangunan, keempat model dianalisis menggunakan program ETABS versi.16, berdasarkan perbandingan gaya geser, perbandingan gaya geser gedung tiap lantai, gaya geser analisis respons spektrum, nilai simpangan, pengaruh efek P-delta, dan kekakuan tingkat gedung, diperoleh hasil dalam tabel tabel 2.5 yang dipilih berdasarkan model keempat dengan pemasangan *outrigger* di tiga bagian pada ketinggian lantai yaitu pada lantai 9-11, 24-26, 38-*roof* didapatkan perbandingan dengan nilai simpangan yang paling terkecil dari ketiga mode, kebutuhan penampang profil yang lebih kecil, dan model ke-empat tidak terlalu

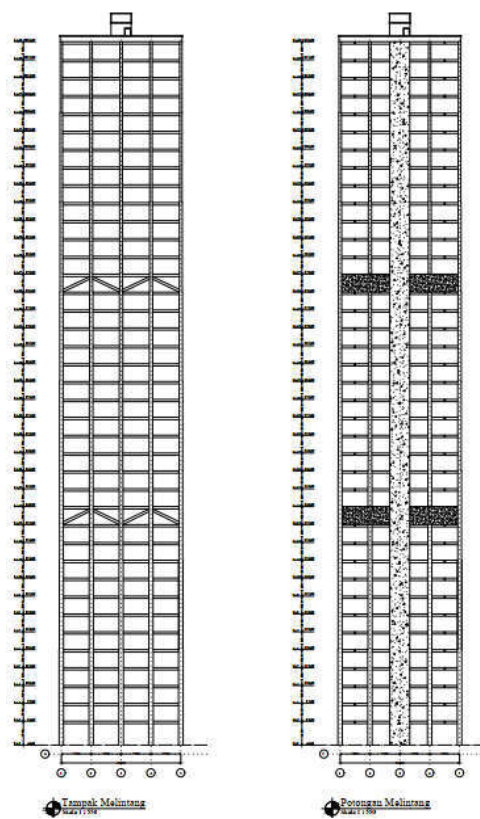
menyerap gaya lateral jika dibandingkan dengan tiga model lainnya tetapi telah masuk kriteria peraturan SNI 1726-2012 yaitu di mana rangka momen harus mampu menahan paling sedikit 25 % gaya gempa desain, maka untuk model empat mempunyai persentasi penahan gaya gempa arah X dan Y dengan metode respons spektrum yang melebihi 25 %. Pada sambungan batang *outrigger* ke balok induk WF menggunakan pelat dengan mutu profil BJ 41, dengan tegangan leleh  $F_y$  250 Mpa, tegangan *ultimate* 410 Mpa, serta modulus elastisitas 200000 Mpa. Baut tipe tumpu D19 mm, mutu ASTM A354. Sambungan las sudut pada pelat buhul  $E_{100x}$  mempunyai kuat tarik kawat las  $F_{nw} = 4100 \text{ kg/cm}^2 = 402 \text{ Mpa}$  pada profil kolom baja komposit CFT dengan tebal rencana  $t_e = 1 \text{ cm}$ .

Tabel 2.5 Hasil analisis profil desain (Gultom, 2017)

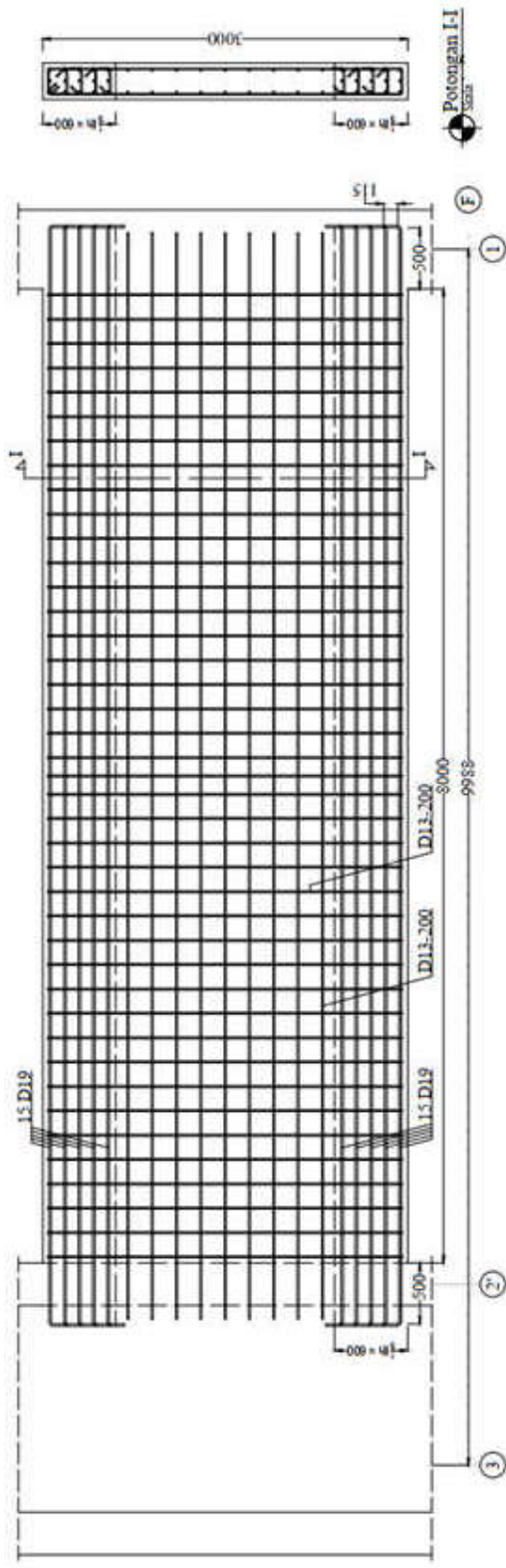
Profil desain	Ukuran mm per		
	Lantai 1 - 15	Lantai 16 - 30	Lantai 31 - 40
Tebal pelat lantai	20 cm		
Tebal pelat lantai atap	15 cm		
Kolom komposit baja beton CFT	1200.1200.80.80	1100.1100.80.80	1000.1000.80.80
Mega kolom komposit baja beton CFT	1300.1900.100.100	1200.1900.100.100	1100.1900.100.100
Balok induk baja WF	933.423.24.42,7	927.422.22,5.39,5	920.421.21,5.36,6
Balok anak baja WF		539.332.14,9.25	
<i>Outrigger WF</i>		933.424.24.42,7	

(Christianto. dkk., 2017) menyebutkan “*Desain Modifikasi Struktur Apartemen Puncak Dharma Husada Surabaya dengan Kombinasi Shear Wall dan Outrigger System*” studi kasus di Apartemen Dharma Husada berkapasitas 40 lantai, bertujuan untuk meningkatkan kekakuan keseluruhan bangunan sehingga dapat mereduksi dimensi balok, kolom, dan mengurangi periode serta simpangan pada bangunan. Metode yang digunakan adalah pemodelan *pre elementary design* dari perencanaan menggunakan aplikasi SAP2000, kemudian pemodelan struktur *outrigger* dan *belt-truss* ditempatkan pada lantai 13-14 dan lantai 26-27, lalu kontrol terhadap struktur yang dimodelkan sebelum dan sesudah yang ditambahkan

sistem struktur *outrigger* dan *belt-truss*, kemudian dibandingkan berdasarkan berat sendiri bangunan, jumlah respons ragam, periode struktur dan skala gempa, simpangan bangunan (*drif*), distribusi vertikal dan horizontal, pengaruh P-Delta. Struktur pemodelan dianalisis meliputi analisis gaya dalam, kontrol penampang, perencanaan sambungan, kontrol kekuatan. Hasil dari analisis struktur berupa dimensi *outrigger*, *belt-truss* dan dimensi reduksi balok dan kolom, beserta hubungan balok dan kolom yang tercantum dalam gambar 2.11 – 2.17 merupakan hasil desain elemen struktur *belt-truss* dan *outrigger*, dengan adanya sistem struktur *outrigger* mengalami perbedaan dan menjauhi kriteria dari batas izin untuk kesemua kontrol struktur.

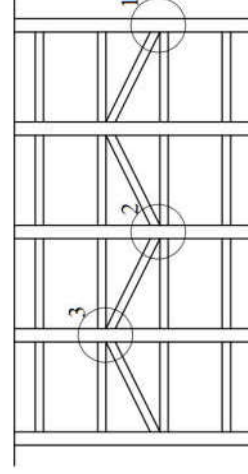


Gambar 2.11 Tampak melintang dari hasil desain penempatan *outrigger* dan *belt-truss* (Christianto. dkk., 2017).

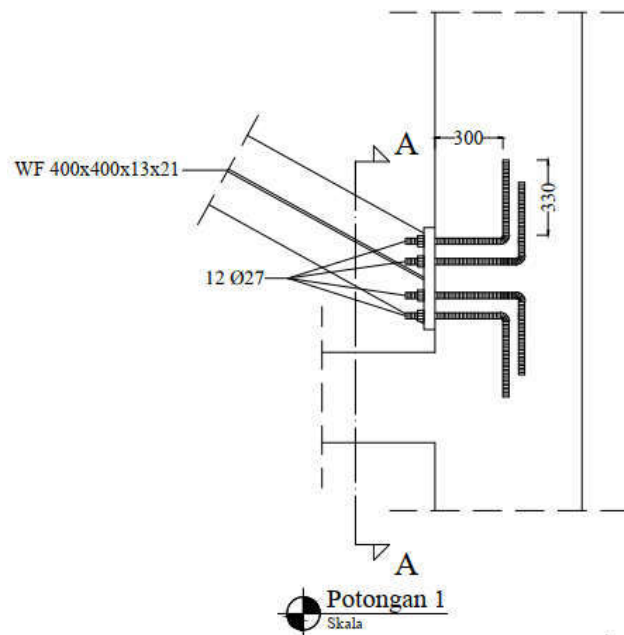


Detail Tulangan *Outtrigger* As. F. 1-2'

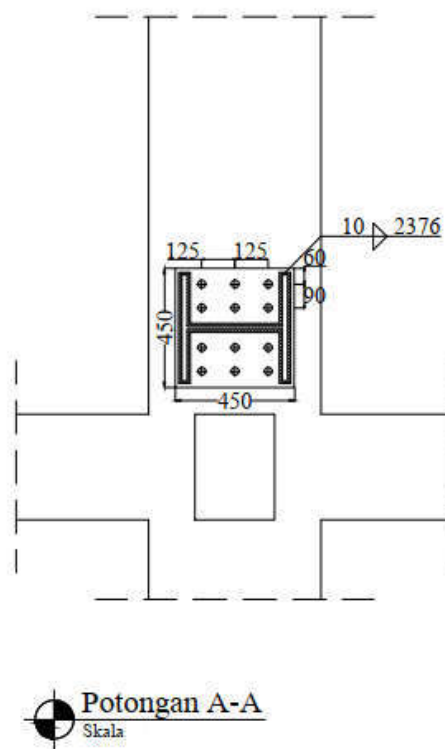
Gambar 2.12 Hasil desain dari detail tulangan *outrigger* (Christianto. dkk., 2017).



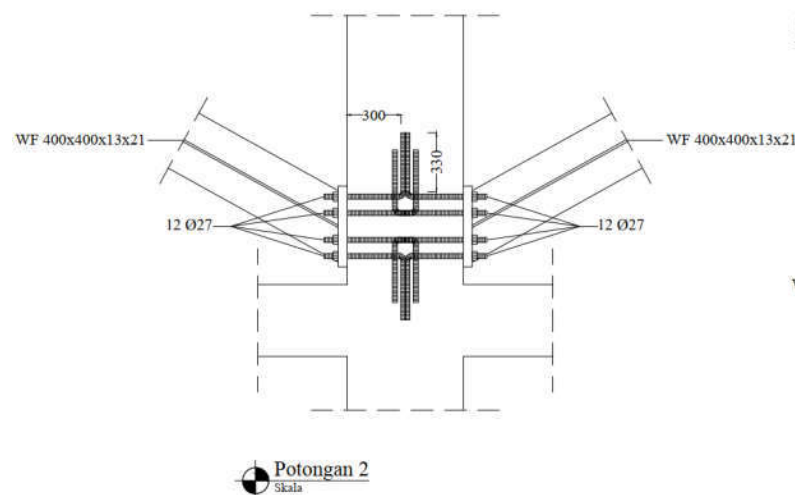
Gambar 2.13 Tampak potongan melintang hasil penempatan dari desain *belt-truss* beserta potongan detail 1, 2, 3 (Christianto. dkk., 2017).



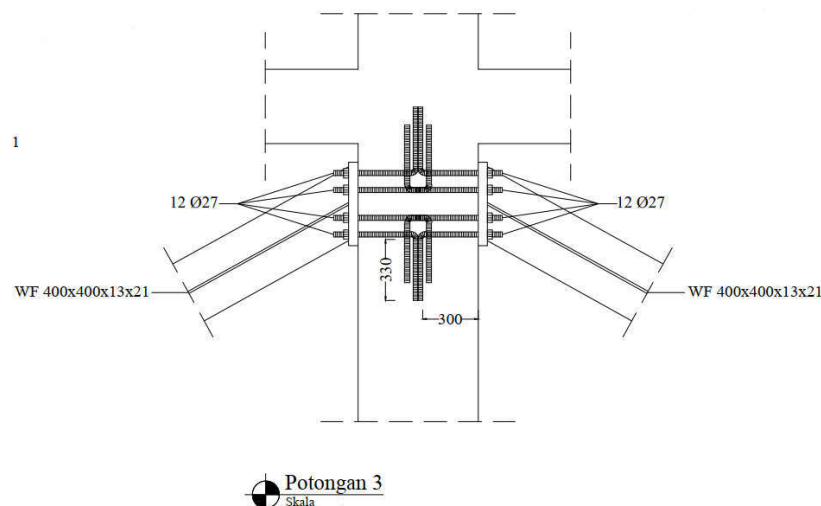
Gambar 2.14 Hasil desain dari *belt-truss* potongan melintang detail 1, beserta detail potongan A-A (Christianto. dkk., 2017).



Gambar 2.15 Hasil desain dari *belt-truss* potongan 1 detail A-A (Christianto. dkk., 2017).



Gambar 2.16 Hasil desain dari *belt-truss* potongan melintang dari detail 2 (Christianto. dkk., 2017).

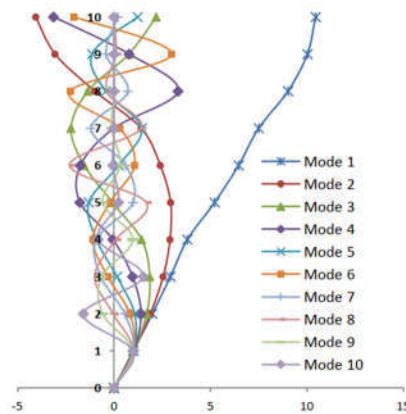


Gambar 2.17 Hasil desain dari *belt-truss* potongan melintang dari detail 3 (Christianto. dkk., 2017).

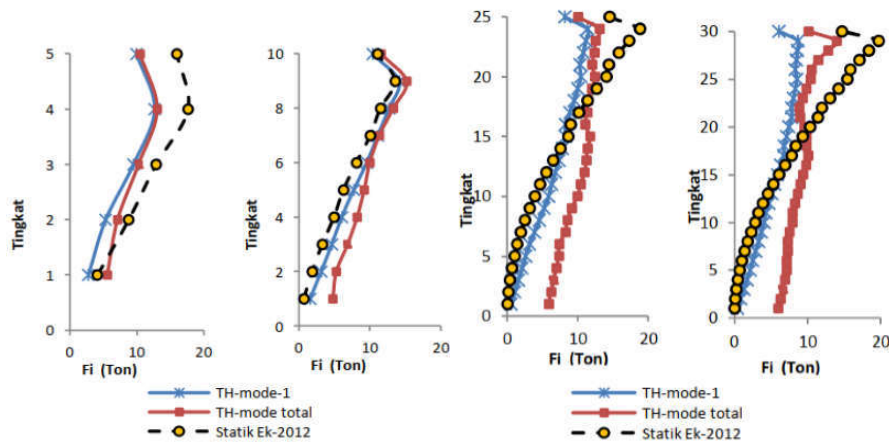
(Faizah, 2015) membuktikan dengan “*Studi Perbandingan Pembebanan Gempa Statik Ekuivalen dan Dinamik Time History pada Gedung Bertingkat di Yogyakarta*”, untuk meneliti keakuratan perhitungan pembebanan gempa statik ekuivalen pada struktur gedung bertingkat tinggi dengan membandingkan hasil analisis dinamik *time history* dan analisis statik ekuivalen, yang berupa gaya lateral dinamik *time history* mode *deformasi shape* kesatu saja, gaya lateral dinamik *time history* mode lengkap, gaya lateral statik ekuivalen, dan gaya geser dari kedua pembebanan gempa. Metodologi dengan memodelkan gedung bertingkat di daerah Yogyakarta dengan jumlah lantai bervariasi antara lain 5, 10, 15, 20, 25, 30.

Kemudian menentukan dimensi balok dan kolom secara proporsional ditentukan *trial dan eror* menggunakan *software* SAP2000, Pembebanan gempa berdasarkan pembebanan gempa analisis statik ekuivalen sesuai SNI 1726-2012, dan pembebanan gempa analisis dinamik *time history* yang menggunakan akselerogram gempa Yogyakarta 2006. Analisa menggunakan program bantu Matlab dengan menghitung  $a$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $g$ ,  $Z$ , untuk menghitung ( $F_i$ ) gaya geser lateral tingkat, dan ( $V$ ) gaya geser dasar, lalu mengecek perbedaan diketinggian 5, 10, 15, 20, 25, 30 lantai, menggunakan mode pertama dan mode total akibat gempa *time history*, dan akibat gempa statik ekuivalen. Dari hasil analisis didapat mode *shape* pada gambar 2.18 memiliki pola gerak membesar akibat gempa *time history* mode pertama, sedangkan mode lain mempunyai bentuk merata disetiap ketinggian lantai. Untuk perbandingan pola distribusi gaya lateral tingkat pada gambar 2.19 (sebelah kiri) dengan jumlah lantai 5 tingkat, gaya lateral tingkat akibat gempa statik ekuivalen lebih besar, ketimbang gaya lateral tingkat akibat *time history* semua *mode shape* dan *time history mode shape* pertama, sedangkan gambar 2.19 (kanan) dengan jumlah lantai 10 tingkat, gaya lateral tingkat akibat gempa *time history* semua *mode shape* lebih besar ketimbang gaya lateral tingkat akibat statik ekuivalen dan *time history* untuk mode pertama. Pada gambar 2.20 dengan jumlah tingkat 25 dan 30 tingkat memiliki nilai gaya lateral tingkat akibat *time history* semua mode yang besar, setelah lebih dari 15 tingkat (semakin tinggi) cenderung mengecil tapi nilainya hampir merata pada pengurangannya dan semakin membesar sedikit dibarengi dengan jumlah tingkat, dan gaya statik ekuivalen menjadi lebih besar. Pada gambar 2.21 untuk perbandingan gaya geser dasar untuk ketinggian 5 tingkat memiliki gaya geser dasar akibat statik ekuivalen yang lebih besar, namun untuk lebih dari 5 tingkat gaya geser akibat *time history* mode total lebih besar. Hasil pemodelan gempa statik ekuivalen pada struktur 5 tingkat dinilai akurat, karena memberikan persyaratan yang lebih besar dalam perancangan struktur, jika dibandingkan dengan pembebanan gempa dinamik *time history*. Hasil pemodelan pembebanan gempa statik ekuivalen pada struktur 10 tingkat atau lebih dinilai tidak akurat karena memberikan persyaratan yang lebih kecil, dalam perancangan struktur yang hanya meninjau dari memperhitungkan massa saja, jika dibandingkan dengan pembebanan gempa dinamik.



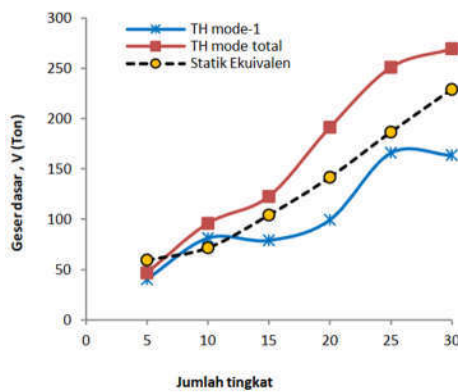


Gambar 2.18 Mode shape struktur 10 tingkat (Faizah, 2015).



Gambar 2.19 Gaya lateral tingkat dari struktur 5 dan 10 tingkat, (kiri) (Faizah, 2015).

Gambar 2.20 Gaya lateral tingkat dari struktur 25 dan 30 tingkat (kanan) (Faizah, 2015).



Gambar 2.21 Perbandingan gaya geser dasar statik ekuivalen dan dinamik *time history* (Faizah, 2015).

### **2.1.2. Perbedaan penelitian penulis dengan penelitian terdahulu**

Perbedaan antara keduanya terletak pada kontrol stuktur yang tidak selengkap yang dilakukan penulis seperti periode getar alami, simpangan, gaya geser. Selain itu untuk mendapatkan penempatan struktur dari *outrigger* dan *belt-truss* digunakan penelitian terdahulu yang rasional (yang hasilnya bisa dilakuakn dengan orang yang berbeda namun hasilnya mendekati sama dengan penelitian terdahulu), cara yang dipakai penelitan terdahulu masih manual dan lama, yaitu menggunakan cara membandingkan simpangan yang terbesar dari beberapa tingkat, baru diberi penempatan *outrigger* dan *belt-truss*, sedangkan penulis memakai persamaan ketinggian optimum dari hasil persamaan yang didapat penelitian terdahulu.

Perbedaan untuk penggunaan pembebanan dari penelitian untuk desain beban gempa menggunakan pendekatan desain beban gempa respons spektrum, dalam penelitian yang dilakukan penulis menggunakan desain pendekatan beban gempa *time history*. Penggunaan material dari sistem *outrigger* dan *belt-truss* ada yang memakai baja dikedua sistem *outrigger* dan *belt-truss* dan ada yang memakai beton untuk dikedua sistem *outrigger* dan *belt-truss*, dalam penelitian penulis menggunakan material dari *belt-truss* memakai baja dan *outrigger* memakai beton bertulang agar lebih fleksibel dalam hal pelaksanaan, kekuatan, dan arsitektur.

## **2.2. Dasar Teori**

### **2.2.1. Bangunan tinggi**

Pembangunan gedung bertingkat sudah dilaksanakan sejak zaman purba, Kerajaan Romawi pada abad ke-sembilan belas, kepadatan penduduk menyebabkan timbul bangunan tinggi seperti dinding penahan beban setinggi 10 lantai yang menggunakan bahan dari batu, akan tetapi keterbatasan sistem struktur dari jenis ini, adalah bertambahnya tinggi bangunan yang membuat ketebalan dinding dan berat yang berbanding langsung dengan sifat gravitasi. Efek penggunaan sistem struktur pada zaman dahulu, merupakan munculnya Gedung Home Insurance Building (Chicago) pada 1885 yang mencapai 55 meter, berupa sistem struktur memakai kontruksi baja, sedangkan perkembangan struktur beton relatif lambat dan baru berkembang pesat pada 1950, hingga pada tahun 2010 gedung tertinggi.

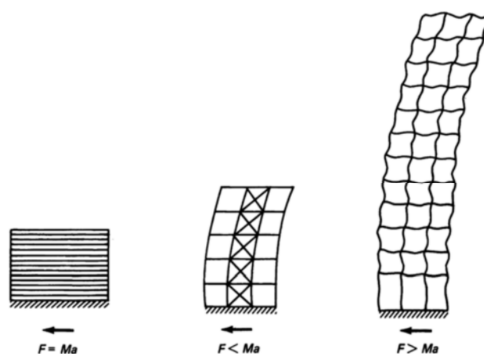
Burj Khalifa (Dubai) yang mencapai ketinggian 828 m. Penyebutan bangunan tinggi dibedakan berdasarkan ketinggian bangunan, jika memiliki ketinggiannya 23-150 m untuk bangunan tinggi, dan untuk gedung pencakar langit jika memiliki ketinggiannya lebih dari 150 m.

a. Bangunan terhadap beban angin dan gempa

(Dewobroto, Menyongsong Era Pembangunan Gedung Super Tinggi dan Mega Tinggi di Indonesia, 2012), permasalahan dinamik saat terjadinya gempa di tanah menyebabkan kerusakan seperti impact atau tumbukan atau tekan seperti angin, dan untuk permasalahan penambahan massa bangunan menimbulkan gaya inersia dari massa bangunan akibat percepatan tanah dan efek P- $\Delta$ , sehingga terjadinya tambahan momen akibat adanya deformasi yang relatif besar.

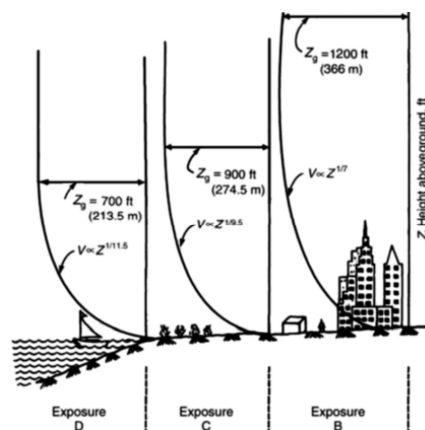
Besarnya gaya inersia ( $F$ ) selama gerakan gempa di tanah tergantung dari massa bangunan ( $m$ ), akselerasi tanah ( $a$ ), kondisi tanah di bawah fondasi. Berbanding lurus sesuai dengan hukum Newton dalam persamaan 2.1 dan ilustrasi gambar 2.22, yang menjelaskan, jika  $F = m \times a$  maka, bangunan dan tanah pada fondasi sangat kaku atau biasanya bangunan yang memiliki tingkat rendah, sebaliknya jika deformasinya terlalu kecil maka cenderung mengurangi besarnya gaya inersia yang timbul  $F < m \times a$ , untuk bangunan yang memiliki ketinggian yang tinggi relatif fleksibel, dan akan menerima gerakan percepatan tanah dalam waktu yang lama sehingga menghasilkan gaya inersia lebih besar  $F > m \times a$ , ketika periode getarnya berdekatan dengan gelombang tanah.

$$F = m \times a \dots\dots\dots(2.1)$$



Gambar 2.22 Skematik gaya gempa terhadap angin dan gempa (Dewobroto, Menyongsong Era Pembangunan Gedung Super Tinggi dan Mega Tinggi di Indonesia, 2012).

Hubungan perilaku bangunan dan pergerakan tanah akibat gempa, ditentukan oleh pengaruh respons struktur yang sebagian besar parameter yang digunakan adalah massa, kekakuan dan pengaruh dari perilaku fondasi, jenis dan tipe bangunan. Bangunan yang semakin tinggi dapat mengakibatkan terjadinya gaya gempa relatif kecil dibandingkan bangunan yang rendah, tetapi pengaruh angin berbeda dengan gempa yang semakin tinggi bangunan kecepatan angin juga bertambah sesuai gambar 2.23.



Gambar 2.23 Profil kecepatan angin di berbagai daerah dan ketinggian (Dewobroto, Menyongsong Era Pembangunan Gedung Super Tinggi dan Mega Tinggi di Indonesia, 2012).

Angin menyebabkan getaran, bunyi-bunyi yang akan dirasakan oleh penghuni, dan ayunan lampu hingga pintu. Jika bangunan berayun sendiri maka penghuninya juga akan merasakan vertigo dan disortasi yang menyebabkan bangunan tidak nyaman dihuni, dan dipengaruhi oleh lingkungan dan konfigurasi lahan di sekitar bangunan.

Saat aliran angin menerjang halangan, sebagai bidang horizontal dan bervariasi besarnya terhadap ketinggian. Aliran bergerak dan menyamping sembari berpusar dinamakan *spiral vortices*, yang menekan bidang tegak lurus angin utama. Jika *spiral vortices* yang terjadi bergetaran tegak lurus arah angin (deformasi arah tegak lurus dan searah angin utama) akibatkan kecepatan angin bertambah sembari sifat angin turbulen (tidak *linear*) pada kejadiannya secara bergantian disebut *vortex-shedding*.

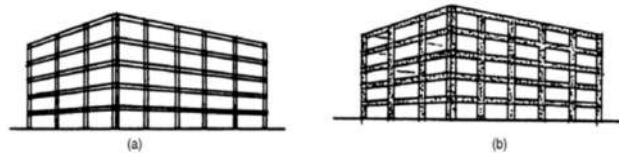
Akibat beban gempa dan angin yang terjadi tidak menentu, dikarenakan hukum alam dan mempunyai efek yang sama ketika terjadi pada struktur bangunan yaitu pembebanan arah lateral, sehingga mengakibatkan penyebab perencanaannya

didominasi oleh pembebanan vertikal ketimbang horizontal, sehingga diperlukan sistem struktur penahan lateral yang diharapkan berperilaku elastis (beban hilang, deformasi juga hilang).

b. Sistem struktur penahan beban lateral menurut (Dewobroto, Menyongsong Era Pembangunan Gedung Super Tinggi dan Mega Tinggi di Indonesia, 2012) sebagai berikut :

1. Sistem struktur dengan jumlah lantai

Sistem struktur yang biasa digunakan pada bangunan yang mempunyai ketinggian relatif tidak tinggi. Untuk menambah kekakuan pada pelat lantai dengan cara teknik prategang pada pelat lantai, penebalan pada puncak kolom (*flat slab*), dan lantai terbuka (*free space*). Contoh dari sistem struktur ini pada gambar 2.24.



Gambar 2.24 Macam-macam struktur dengan jumlah lantai (a) *stell rigid frame*, (b) *RC rigid frame* (Dewobroto, Menyongsong Era Pembangunan Gedung Super Tinggi dan Mega Tinggi di Indonesia, 2012).

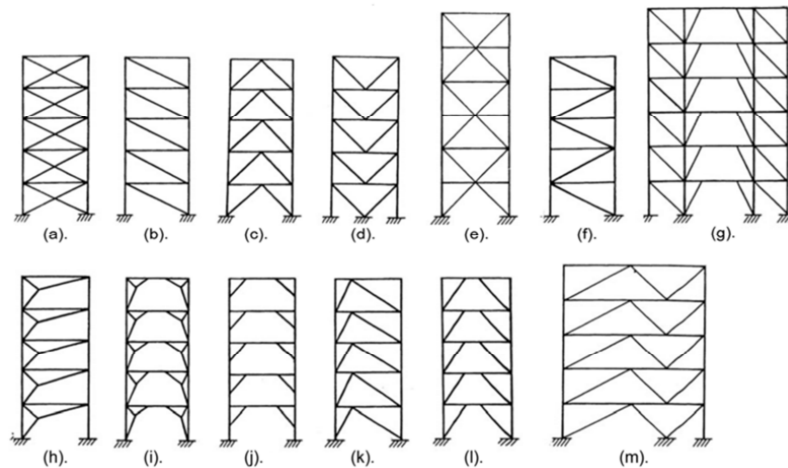
2. Sistem *rigid frame*

Sistem *rigid* atau portal memperdayakan kekakuan ujung-ujung kolom bebas (*no restraint*) dengan menghubungkannya balok kaku, kaku tidaknya balok tergantung dari parameter tinggi penampang balok. Sistem *rigid frame* tidak seperti gaya yang didapat pada sisi tekan dan sisi tarik akibat deformasi geser dan momen lentur pada kolom, namun untuk mengoptimalkan keefektivan komponen balok yang dibuat kaku pada kedua ujung-ujungnya, maka harus adanya penambahan sistem hubungan balok dan kolom diujung-ujung *joint*. Sistem ini cocok untuk bangunan gedung di bawah 25 lantai.

3. Sistem *braced frame*

Penggunaan sistem *braced frame* populer digunakan pada struktur baja, dengan tujuan untuk mekanisme pengalihan gaya-gaya lateral ke fondasi, dapat dibedakan berdasarkan konfigurasi sebagai *concentric brace*

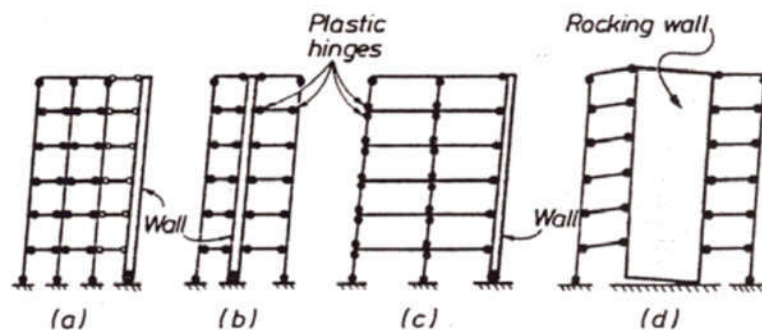
*frame* (CBF) rangka pada gambar 2.25 (a-f) dalam bentuk segitiga yang memanfaatkan kekakuan aksial elemen-elemen batang dan konfigurasi *eccentric brace frame* (EBF) dalam bentuk rangka pada gambar 2.26 (g-l) yang berperilaku sebagai balok lentur.



Gambar 2.25 Macam-macam sistem rangka dengan batang diagonal (Dewobroto, Menyongsong Era Pembangunan Gedung Super Tinggi dan Mega Tinggi di Indonesia, 2012).

#### 4. Sistem ganda, kombinasi *braced / wall*

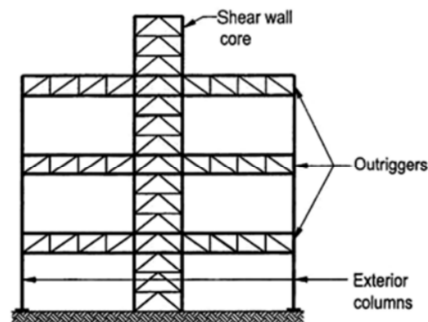
Kombinasi beban lateral dari sistem *rigid frame* yang mengakibatkan adanya deformasi geser dan beban lateral dari sistem *brace frame* atau dinding geser (*shear wall*), akan bedeformasi lentur, maka kombinasi sistem keduanya disatukan dengan diagram yang kaku, sehingga dapat memikul gaya geser dari pengaruh respons dinamik dan terbentuklah sendi plastis saat gempa yang terjadi pada setiap ujung balok atau ujung kolom gambar 2.26.



Gambar 2.26 Mekanisme disipasi energi terhadap gempa (Dewobroto, Menyongsong Era Pembangunan Gedung Super Tinggi dan Mega Tinggi di Indonesia, 2012).

#### 4. Sistem *outrigger* dan *belt-truss*

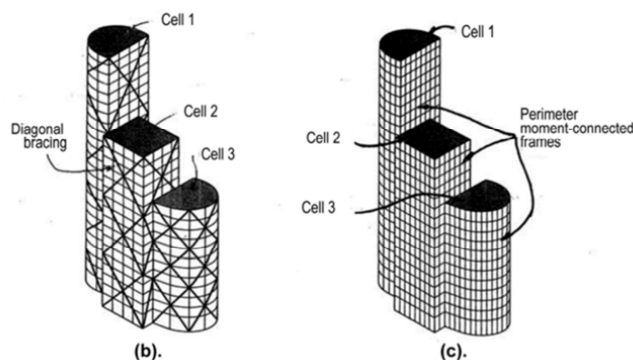
Pada bangunan tinggi, kolom ditengah bangunan tidak efektif dalam menyumbang kekakuan pada sistem lateral, yang hanya berfungsi sebagai beban gravitasi ke fondasi. Maka untuk memberdayakan kolom pada bagian tepi bangunan dibuat *outrigger*, dan *belt truss* pada gambar 2.27.



Gambar 2.27 Sistem *outrigger* (Dewobroto, Menyongsong Era Pembangunan Gedung Super Tinggi dan Mega Tinggi di Indonesia, 2012).

#### 6. Sistem *frame-tube*

Sistem struktur ruang 3D yang memanfaatkan keseluruhan perimeter luar bangunan, yang ditempatkan pada kolom secara rapat dan kaku sebagai struktur penahan lateral yang dapat menahan gaya lateral dan menyebarkan tegangan aksial secara merata. Sistem *frame-tube* dapat terbagi ke dalam bentuk dan bahanya sistem *truss-tube* sistem yang terbuat dari bahan baja, dengan adanya penambahan *brace frame* gambar 2.28 (b) dan sistem *bundled-tube* sistem dengan bentuk struktur tabung baik penempatan di atas bangunan dan struktur yang melingkar pada bangunan gambar 2.28 (c).



Gambar 2.28 Sistem *brace frame* (b) dan sistem *bundled-tube* (c) (Dewobroto, Menyongsong Era Pembangunan Gedung Super Tinggi dan Mega Tinggi di Indonesia, 2012).

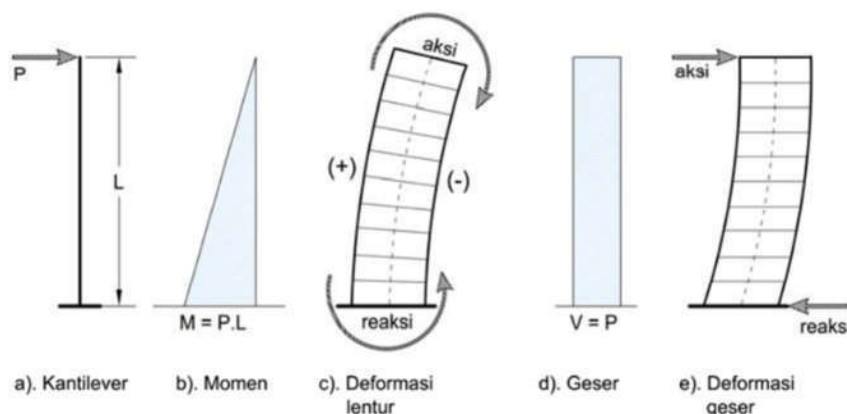
Berdasarkan pengaruh beban dan contoh struktur sistem penahan lateral, maka untuk struktur penahan lateral yang dianggap paling efektif dan digunakan pada ketinggian lantai 34 adalah sistem *outrigger* dan *belt-truss*.

- c. Sistem *outrigger* dan *belt-truss* menurut (Dewobroto, Menyongsong Era Pembangunan Gedung Super Tinggi dan Mega Tinggi di Indonesia, 2012)

Bangunan tinggi diibaratkan seperti kolom langsing atau kantilever akibat perilaku lentur yang dominan, adanya gaya tarik dan gaya tekan di sisi perimeter luar pada gambar 2.29, maka perlu satu kesatuan sistem struktur yang menyatukan elemen-elemen struktur vertikal yang berada pada tepi luar, dengan sistem *belt-truss* dan untuk meningkatkan kekakuan lateral maka diperlukan lengan yang terikat pada *core wall* hingga kolom terluar yang diletakan pada salah satu lantai terhadap ketinggian gedung, yang berhubungan dengan *belt-truss* dengan sistem *outrigger* ilustrasi gambar 2.30.

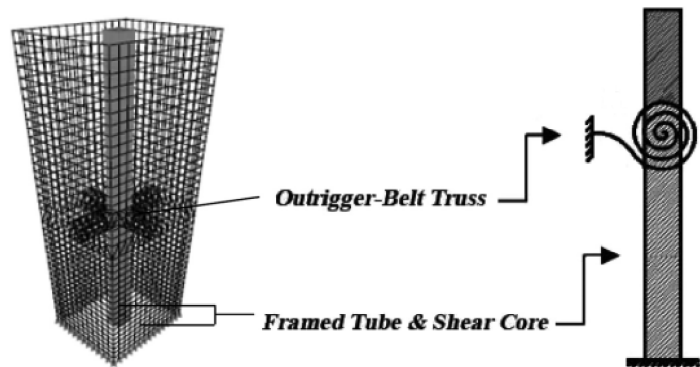
Penggunaan sistem *outrigger* dan *belt-truss* pada gambar 2.31, dapat untuk memberdayakan dimensi bangunan seoptimal, mengurangi simpangan yang terjadi akibat beban gempa, dan tekanan angin pada gambar 2.32.

Penempatan dan jumlah dari *outrigger* dan *belt-truss* tergantung dari nilai besarnya lendutan yang dapat direduksi, terhadap perilaku lentur sebelum dan sesudah diberikan sistem *outrigger* dan *belt-truss*.

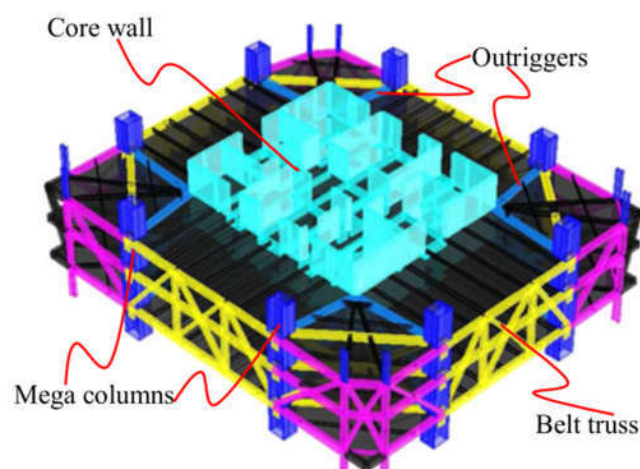


Gambar 2.29 Perilaku kolom kantilever terhadap lateral pusat (Dewobroto, Menyongsong Era Pembangunan Gedung Super Tinggi dan Mega Tinggi di Indonesia, 2012).

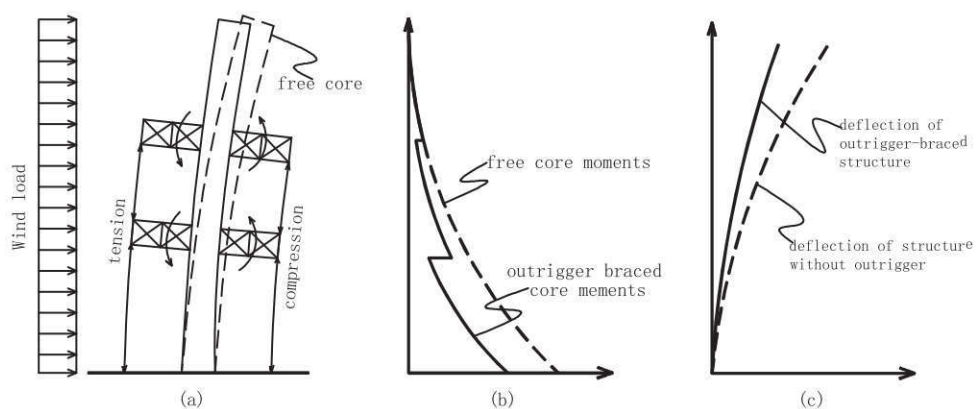




Gambar 2.30 Sistem *outrigger* dan *belt-truss* (Reza & Reza, 2017).



Gambar 2.31 Ilustrasi sistem *outrigger* (Yue & Zhenya, 2017).



Gambar 2.32 Kinerja struktur *outrigger* dan *belt-truss* (Yue & Zhenya, 2017).

### 2.2.2. Pembebanan

Tingkat keamanan dari struktur gedung, ketika semua jenis beban bekerja, dapat ditahan oleh struktur gedung, yang menjadikannya kokoh, aman, dan memiliki durabilitas yang direncanakan. Perencanaan pembebanan yang

membebani struktur gedung, mengacu pada (Departemen Pekerjaan Umum, PPPURG 1987), (BSN, SNI 1726-2012), (BSN, SNI 1727-2013), dan (BSN, SNI 2847-2013), meliputi beban struktur sendiri yang sudah dihitung otomatis dengan bantuan pemodelan *software* yang dipakai, dan beban lain yang dihitung manual berdasarkan kondisi sesungguhnya di lapangan. Beban yang akan diinput ke pemodelan *software*, yang dipakai antara lain sebagai berikut :

a. Beban mati tambahan

Berat semua bagian dari konstruksi gedung yang membebani struktur masih berdiri, yang bersifat tetap dan layan termasuk segala unsur tambahan seperti mesin. Nilai-nilai beban mati diambil, berdasarkan (Departemen Pekerjaan Umum, PPPURG 1987 pada tabel 1).

b. Beban hidup

Beban yang terjadi akibat penghuni atau pengguna suatu gedung, dan barang-barang yang dapat dipindahkan, yang mengakibatkan perubahan pada beban-beban lantai dan atap, dan tidak termasuk beban konstruksi serta beban lingkungan seperti beban angin, beban hujan, beban gempa. Khusus beban pada atap, berasal dari beban hujan baik genangan maupun tekanan jatuh butiran air atau energi kinetik. Besarnya beban hidup diambil, berdasarkan (Departemen Pekerjaan Umum, PPPURG 1987 pada tabel 2) atau (BSN, SNI 1727-2013 pada tabel 4-1).

c. Beban angin

Aksi angin pada bangunan tinggi bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti bentuk permukaan daratan, sehingga dapat mempengaruhi kecepatan angin, arah angin, dan perilaku angin. Beban yang terjadi karena selisih tekanan udara, dapat merubuhkan suatu struktur. Beban angin menganggap adanya angin tekanan positif, angin hisap negatif, dan angin tepi yang terjadi ketika adanya turbulen. Ketiga anggapan beban angin, bekerja secara tegak lurus pada bidang-bidang yang ditinjau. Langkah-langkah analisis beban angin sebagai berikut :

1. Menentukan kategori risiko bangunan, berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013 pada tabel 1.51), melalui tabel 2.6 dengan parameter penggunaan atau pemanfaatan fungsi gedung dan struktur.

Tabel 2.6 Kategori risiko bangunan dan struktur lainnya untuk beban banjir, angin, salju, gempa, dan es

Penggunaan atau Pemanfaatan Fungsi Bangunan Gedung dan Struktur	Kategori Risiko
Bangunan gedung dan struktur lain yang merupakan risiko rendah untuk kehidupan manusia dalam kejadian kegagalan.	I
Semua bangunan gedung dan struktur lain kecuali mereka terdaftar dalam Kategori Risiko I, III, dan IV.	II
Bangunan gedung dan struktur lain, kegagalan yang dapat menimbulkan risiko besar bagi kehidupan manusia, tidak termasuk dalam Kategori Risiko IV, dengan potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi substansial dan atau gangguan massa dari hari-ke-hari kehidupan sipil pada saat terjadi kegagalan. (termasuk, namun tidak terbatas pada, fasilitas yang manufaktur, proses, menangani, menyimpan, menggunakan, atau membuang zat-zat seperti bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan peledak) yang mengandung zat beracun atau mudah meledak di mana kuantitas material melebihi jumlah ambang batas yang ditetapkan oleh pihak yang berwenang dan cukup untuk menimbulkan suatu ancaman kepada publik jika dirilis.	III
Bangunan gedung dan struktur lain yang dianggap sebagai fasilitas penting. Bangunan gedung dan struktur lain, kegagalan yang dapat menimbulkan bahaya besar bagi masyarakat. (termasuk, namun tidak terbatas pada, fasilitas yang memproduksi, memproses, menangani, menyimpan, menggunakan, atau membuang zat-zat berbahaya seperti bahan bakar, bahan kimia berbahaya, atau limbah berbahaya) yang berisi jumlah yang cukup dari zat yang sangat beracun di mana kuantitas melebihi jumlah ambang batas yang ditetapkan oleh pihak yang berwenang dan cukup menimbulkan ancaman bagi masyarakat jika dirilis. Bangunan gedung dan struktur lain yang diperlukan untuk mempertahankan fungsi dari Kategori Risiko IV struktur lainnya	IV

- Menentukan kecepatan angin dasar (V), dengan parameter lokasi bangunan, sumber kecepatan angin dapat diambil dari situs <https://www.bps.go.id>, atau dari (Departemen Pekerjaan Umum, PPPURG 1987 pasal 2.1.3.2 ayat 1-2) atau (BSN, SNI 1727-2013 pasal 27.1.5).

3. Menentukan parameter-parameter beban angin, sebagai berikut :
- a) Faktor arah angin ( $K_d$ ), berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013 tabel 26.6-1) melalui tabel 2.7, dengan parameter tipe struktur.

Tabel 2.7 Faktor arah angin,  $K_d$ 

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin, $K_d$
Bangunan Gedung	
Sistem Penahan Beban Angin Utama	0.85
Komponen dan Klading Bangunan Gedung	0.85
Atap Lengkung	0.85
Cerobong asap, Tangki, dan Struktur yang sama	
Segi empat	0.9
Cerobong asap, Tangki, dan Struktur yang sama	
Segi enam	0.95
Bundar	0.95
Dinding pejal berdiri bebas dan papan reklame pejal berdiri bebas dan papan reklame terikat	0.85
papan reklame terbuka dan kerangka kisi	0.85
Rangka batang menara	
Segi tiga, segi empat, persegi panjang	0.85
Penampang lainnya	0.95

- b) Kategori eksposur, berdasarkan (BSN 2013, SNI 1727-2013 pasal 26.7.2-3) melalui tabel 2.8, dengan paramater letak kekasaran permukaan dan ketinggian.

Tabel 2.8 Persyaratan eksposur

Tipe Kekasaran Permukaan Tanah	Kategori Eksposur
Daerah perkotaan dan pinggiran kota, daerah berhutan, dengan jarak penghalang yang berdekatan	B
Daerah terbuka seperti dataran dan padang rumput dengan penghalang tersebar memiliki tinggi umumnya kurang dari 9,1 m	C
Area datar, tidak terhalang dan permukaan air seperti berisi lumpur halus	D

- c) Faktor topografi ( $K_{zt}$ ), berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013 pada pasal 26.8) menyatakan kondisi lokasi gedung tidak berada pada, atas bukit, dan tebing curang maka dapat mengambil  $K_{zt} = 1$ , sebaliknya jika berada pada atas bukit, dan tebing maka  $K_{zt}$  dapat dihitung dengan persamaan 2.2.

$$K_{zt} = (1 + K_1 \times K_2 \times K_3)^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

Untuk parameter  $K_1$  ditentukan melalui tabel 2.9, dengan parameter eksposur dan bentuk bukit.

Tabel 2.9 Tabel parameter untuk peningkatan kecepatan di atas bukit dan tebing

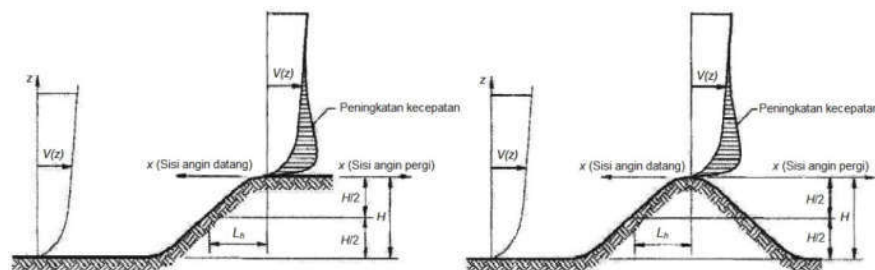
Bentuk bukit	$K_1/(H/L_h)$ Eksposur			$\gamma$	$\mu$	
	B	C	D		Sisi angin datang dari puncak	Sisi angin pergi dari puncak
Bukit memanjang 2D (atau lembah dengan negatif H dalam $K_1/(H/L_h)$ )	1.3	1.5	1.55	3	1.5	1.5
Tebing 2 D	0.75	0.85	0.95	2.5	1.5	4
Bukit simetris 3-D	0.95	1.05	1.15	4	1.5	1.5

Untuk parameter  $K_2$  ditentukan dari persamaan 2.3

$$K_2 = 1 - \frac{|X|}{\mu \times L_h} \dots\dots\dots (2.3)$$

Parameter  $K_3$  ditentukan dari persamaan 2.4

$$K_3 = e^{\frac{-\gamma z}{L_h}} \dots\dots\dots (2.4)$$



Gambar 2.33 Keterangan parameter pengali  $K_{zt}$  pada tebing dan bukit memanjang 2-D atau bukit simetris 3-D.

- d) Faktor efek tiupan angin (G), berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013 pada pasal 26.9.1), menyatakan bahwa faktor efek tiupan angin untuk suatu bangunan boleh diambil sebesar 0,85.
- e) Koefisien tekanan internal ( $GC_{pi}$ ), berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013 pada tabel 26.11-1) melalui tabel 2.10 dengan paramater klasifikasi ketertutupan.

Tabel 2.10 Tabel sistem penahan beban angin pada koefisien tekanan internal

Klasifikasi Ketertutupan	( $GC_{pt}$ )
Bangunan gedung terbuka	0
Bangunan gedung tertutup sebagian	0.55 -0.55
Bangunan gedung tertutup	0.18 -0.18

\*Keterangan = Nilai positif dan negatif pada  $GC_{pi}$ , menandakan tekanan yang bekerja menuju dan menjauhi dari permukaan internal.

- 4. Menghitung koefisien eksposur tekanan velositas ( $K_z$ ), berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013 pada tabel 27.3-1) melalui persamaan 2.5 dan persamaan 2.6.

$$K_z = 2,01 \times \left(\frac{z}{z_g}\right)^{\frac{2}{a}} \text{ untuk } 15 \text{ ft} \leq z \leq z_g \dots\dots\dots (2.5)$$

$$K_z = 2,01 \times \left(\frac{15}{z_g}\right)^{\frac{2}{a}} \text{ untuk } z \leq 15 \text{ ft} \dots\dots\dots (2.6)$$

Untuk parameter pendukung  $K_z$ , berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013 pada tabel 26.1-1) melalui tabel 2.11, dengan paramater ketinggian bangunan di atas level tanah, dan tipe eksposur.

Tabel 2.11 Konstanta eksposour daratan

Eksposur	$\alpha$	$Z_g$ (metrik)
B	7	365.76
C	9.5	274.32
D	12	213.36

4. Menentukan koefisien tekanan eksternal ( $C_p$ ), berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013 pada gambar 27.4-3) melalui tabel 2.12, dengan parameter permukaan bangunan.

Tabel 2.12 Koefisien tekanan dinding

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

5. Menghitung tekanan velositas ( $q$  atau  $q_i$ ), berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013 pada pasal 27.3-1) melalui persamaan 2.7.

$$q_z = 0.613 \times K_z \times K_{zt} \times K_d \times V^2 \dots\dots\dots (2.7)$$

6. Menghitung tekanan angin ( $p$ ), berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013 pada persamaan 27.4-1) melalui persamaan 2.8.

$$p = q \times G \times C_p - q_i \times GC_{pi} \dots\dots\dots (2.8)$$

d. Beban hujan

Atap harus dirancang mampu menahan beban dari semua air hujan yang terkumpul apabila sistem drainase primer untuk bagian tersebut tertutup ditambah lagi beban merata yang disebabkan oleh kenaikan air di atas lubang masuk sistem drainase sekunder pada aliran rencananya, berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013 pada pasal 8) melalui persamaan 2.9.

$$R = 0,0098 \times (d_s + d_h) \dots\dots\dots (2.9)$$

e. Beban gempa

Beban yang bekerja dari gerakan tanah (lempeng bumi), yang terjadi pada pada lokasi tertentu dan menyebar ke segala arah secara tiba-tiba (gelombang gempa). Pengaruh gaya gempa dapat ditentukan dengan desain beban gempa berupa analisis statik ekuivalen dan analisis dinamik seperti *response spectrum*, dan *time history*.

Berdasarkan penelitian (Faizah, 2015) bahwa desain beban gempa untuk gedung yang memiliki lantai lebih dari 5 tingkat, lebih akurat dengan pembebanan gempa dinamik *time history* dengan memperhatikan perbandingan antar response struktur dari gedung tersebut.

1. Riwayat waktu (*time history*)

Riwayat waktu adalah cara mendeskripsikan gerak tanah (*ground motion*) berupa *acceleration*, *velocity*, *displacement*, untuk menentukan reponse dinamik struktur bangunan gedung yang berperilaku *linear* atau *nonlinear*, di mana response dinamik setiap interval waktu dihitung dengan metode integrasi bertahap.

Rambatan gelombang gempa yang melalui zat padat maupun cair disebabkan oleh adanya gangguan di dalam kerak bumi seperti patahan, atau ledakan, semua gelombang gempa dideteksi oleh pencatat gempa baik seismograf maupun *eccelerograph*, data dalam rekaman ini menjadi data primer dalam analisis *time history*.

Analisis riwayat waktu yang dipakai adalah riwayat waktu *linear* karena sangat cocok untuk analisis struktur yang tidak beraturan terhadap pengaruh gempa rencana, dan untuk memuaskan kinerja saat terjadinya gempa agar memperkirakan perilaku keruntuhan bangunan saat gempa menyebabkan elastisitas, yang akan terjadi platifikasi di beberapa tempa akibat beban gempa besar. Mengingat gerakan tanah akibat gempa di suatu lokasi sulit diperkirakan dengan tepat, maka sebagai *input* gempa dapat didekati tanah yang disimulasikan.

2. Prosedur response riwayat waktu *linear* harus memenuhi persyaratan berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pada pasal 11) sebagai berikut :

- a) Persyaratan analisis.

Respons riwayat waktu *linear* harus terdiri dari analisis model matematis suatu struktur untuk menentukan responsnya melalui metode integrasi numerik terhadap kumpulan riwayat percepatan gerak tanah yang kompatibel dengan spektrum respons desain untuk situs yang bersangkutan.



b) Pemodelan.

Model matematika struktur harus dibuat untuk tujuan penentuan gaya elemen struktur dan perpindahan struktur yang dihasilkan dari beban yang diterapkan dan semua perpindahan yang dikenakan atau pengaruh P-delta.

Pada bangunan bertingkat tinggi selain menggunakan desain beban gempa *time history*, diperlukan kestabilan lateral yang tergantung pada kekakuan balok dan kolom yang disambung secara kaku.

Kondisi efek P-delta ketika kolom menerima beban aksial dan beban lateral seperti beban angin dan beban gempa, maka elemen kolom mengalami kondisi melentur akibat defleksi lateral dan vertikal.

(Imran & Ediansjah, Perencanaan Dasar Struktur Beton Bertulang, 2014) P-delta dipengaruhi oleh koefisien stabilitas dari beban vertikal, simpangan antar lantai, gaya geser sesmik.

Model harus menyertakan kekakuan dan kekuatan elemen yang signifikan terhadap distribusi gaya dan deformasi dalam struktur dan merepresentasikan distribusi massa dan kekakuan secara spasial.

c) Gerakan tanah.

Paling sedikit ada tiga pergerakan tanah, dalam analisis dua dimensi dan tiga dimensi. Untuk mendekati interpretasi pemodelan dengan struktur real, maka analisis yang digunakan adalah analisis tiga dimensi.

Untuk setiap pasang komponen gerak tanah horisontal, suatu spektrum SRSS harus dibuat dengan mengambil nilai SRSS, dari spektrum respons dengan 5% faktor redaman untuk komponen-komponen gerak tanah yang telah diskalakan (di mana faktor skala yang sama harus digunakan untuk setiap komponen dari suatu pasangan gerak tanah).

Penskalaan sedemikian rupa sehingga nilai rata-rata komponen normal patahan tidak kurang dari parameter-parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget ( $MCE_R$ ) untuk rentang perioda dari  $0,2T - 1,5T$ .

### 3. Analisa riwayat waktu (*time history*)

Gempa bumi diukur dengan alat seismometer atau seismograf, dengan skala ukuran kekuatan gempa richter, atau SR yang didefinisikan sebagai logaritma dari amplitudo maksimum yang diukur dalam satuan mikrometer ( $\mu\text{m}$ ). Alat ini terdiri dari tiga bagian jarum, benda stationer (massa stationer), dan pita. Ketika terjadinya gempa, jarum dan benda stationer terletak tetap, karena ujung jarum menempel pada pita roll maka ujung jarum yang akan menggambarkan gempa pada pita tersebut, pita ini yang disebut dengan seismograf. Macam-macam seismograf ada dua yaitu horizontal yang berfungsi mencatat getaran bumi pada arah mendatar. Seismograf vertikal yang mencatat getaran arah gempa vertikal.

Taraf pembebanan gempa nominal dalam analisis dinamik *time history*, percepatan muka tanah asli dari gempa masukan, harus diskala ke taraf pembebanan gempa nominal tersebut. Mendekati spektrum respons desain berdasarkan lokasi bangunan dan rentang periode dari  $0.2T-1,5T$ , ( $T$ ) fleksibilitas struktur dari fungsi kekakuan dan massa (Faizah, 2015).

(BSN, SNI 1726-2012 pada pasal 7.8.2) menyatakan bahwa periode fundamental struktur harus diperoleh menggunakan properti struktur dan karakteristik deformasi elemen penahan dalam analisis yang teruji. Sebagai alternatif pada pendekatan  $T$ , maka  $T$  di hitung dengan  $T_a$  melalui persamaan 2.10.

$$T_a = C_t \times h_n^x \dots\dots\dots (2.10)$$

Untuk parameter pendukung  $C_t$  dan  $x$  di dapat dari tabel 2.13.

Tabel 2.13 Nilai parameter periode pendekatan  $C_t$  dan  $x$

Tipe Struktur	$C_t$	$x$
Rangka baja pemikul momen	0.0725 <sup>a</sup>	0.8
Rangka beton pemikul momen	0.0466 <sup>a</sup>	0.9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0.0731 <sup>a</sup>	0.8
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0.0731 <sup>a</sup>	0.8
Semua sistem struktur lainnya	0.0488 <sup>a</sup>	0.8

Parameter T dapat ditentukan dari beberapa pendekatan misalnya T dari analisis bantuan *software*  $T_c$ , dan T diisyaratkan maksimal  $C_u \times T_a$ , maka untuk pembandingan dari penentuan T yang dipakai sebagai berikut

Jika  $T_c > C_u \times T_a$  maka T yang digunakan  $C_u \times T_a$

Jika  $T_a < T_c < C_u \times T_a$  maka T yang digunakan  $T_c$

Jika  $T_c < T_a$  maka digunakan  $T_a$

Penentuan periode getar struktur umumnya menggunakan metode analisis modal dan prinsip mekanika struktur, namun untuk mekanika struktur tidak bisa digunakan, karena struktur tersebut sebelumnya, belum selesai dirancang, maka T yang diambil adalah T dengan bantuan *software* yaitu  $T_c$ .

Untuk parameter  $C_u$  di dapat dari tabel 2.14, yang digunakan untuk T pendekatan maksimum yang diperbolehkan jika menggunakan  $T_a \times C_u$ .

Tabel 2.14 Nilai parameter periode pendekatan  $C_u$

Parameter percepatan respons spektra 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

Faktor skala gempa dilakukan ketika analisis spektrum respon desain, dengan mengubah *acceleration* menjadi spektra desain gempa masukan dengan bantuan software Seismosignal, kemudian diskala dan dibandingkan antara spektrum respon desain dan berbagai spektrum respon gempa masukan, selanjutnya dipilih spektrum respon maksimum dari tiap ragam. Desain faktor skala gempa berdasarkan *append ix-a* (Erol & Anil, 2010) melalui persamaan 2.11.

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{A} \times A}{\sum_{i=1}^n A \times A} \dots\dots\dots (2.11)$$

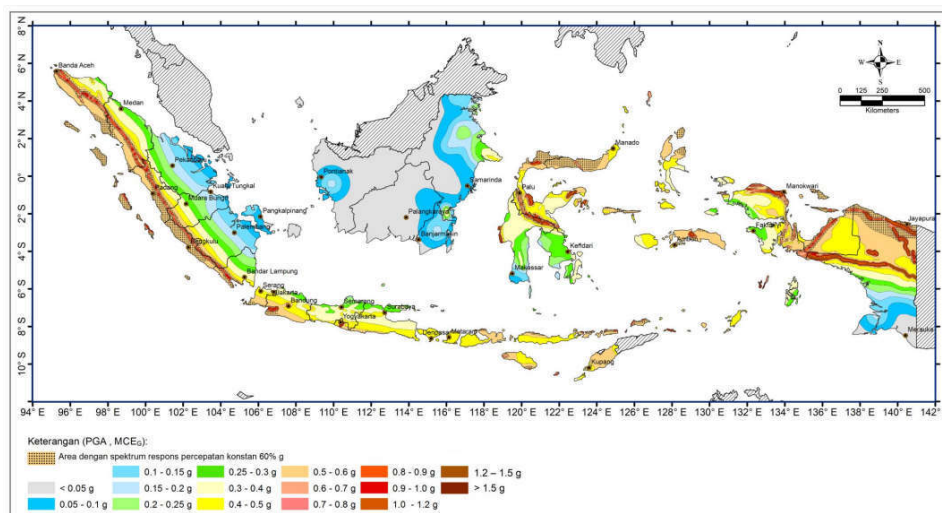
Pengaruh gempa rencana pada taraf pembebanan gempa nominal, juga mengakibatkan percepatan tanah puncak PGA, berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pada pasal 6.7.3) menyatakan percepatan puncak yang telah disesuaikan terhadap pengaruh situs, digunakan untuk evaluasi likuifaksi, serakan lateral, penurunan seismik, dan masalah geoteknik lainnya seperti kehilangan kekuatan tanah. Analisis percepatan tanah puncak melalui persamaan 2.12.

$$PGA_M = F_{PGA} \times PGA \dots \dots \dots (2.12)$$

Untuk parameter  $F_{PGA}$  berdasarkan tabel 2.15, dan untuk nilai PGA diperoleh dari (BSN, SNI 1726-2012 pada tabel 2.34).

Tabel 2.15 Koefisien situs parameter  $F_{PGA}$

Kelas Situs	PGA $\leq 0.1$	PGA = 0.2	PGA = 0.3	PGA = 0.4	PGA = 0.5	PGA $\geq 0.6$
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	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
SD	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1
SE	2.4	1.9	1.6	1.4	1.2	1.1
SF	SS					



Gambar 2.34 PGA gempa maksimum yang dipertimbangkan rata-rata geometrik (MCE<sub>G</sub>) wilayah Indonesia (Irsyam, et al., 2017 pada halaman 356).

Sehingga nilai percepatan puncak menjadi, dalam persamaan 2.13, untuk parameter  $I_e$  berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pada tabel 1), dan parameter R berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pada tabel 9) melalui tabel 2.16.

$$A = \frac{A_0 \times I_e}{R} \dots\dots\dots (2.13)$$

Tabel 2.16 Kategori risiko bangunan gedung dan non gedung untuk beban gempa dan faktor keutamaan gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, seperti gudang penyimpanan.	I	1
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, seperti perumahan, pasar.	II	1
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan gangguan masal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, seperti bioskop, pembangkit listrik.	III	1.25
Gedung dan non gedung yang ditunjukkan sebagai fasilitas yang penting, yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat, seperti gedung sekolah, rumah sakit.	IV	1.5

#### 4. Spektrum respon desain

Spektrum respons desain diperlukan oleh analisis *time history* untuk menskalakan dan membandingkan spektrum respon gempa masukan, maka kurva spektrum respons desain harus mengacu pada ketentuan berikut :

##### a) Koefisien situs dan kelas situs.

Lapisan tanah di lokasi bangunan, dapat dikategorikan menjadi beberapa kelas situs dari kelas A-F melalui tabel 2.17. Besarnya koefisien situs dilakukan berdasarkan hasil pengujian tahanan penetrasi standar lapangan rata-rata ( $\bar{N}$ ), untuk tanah kohesi berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pasal 5.4.2) melalui persamaan 2.14.

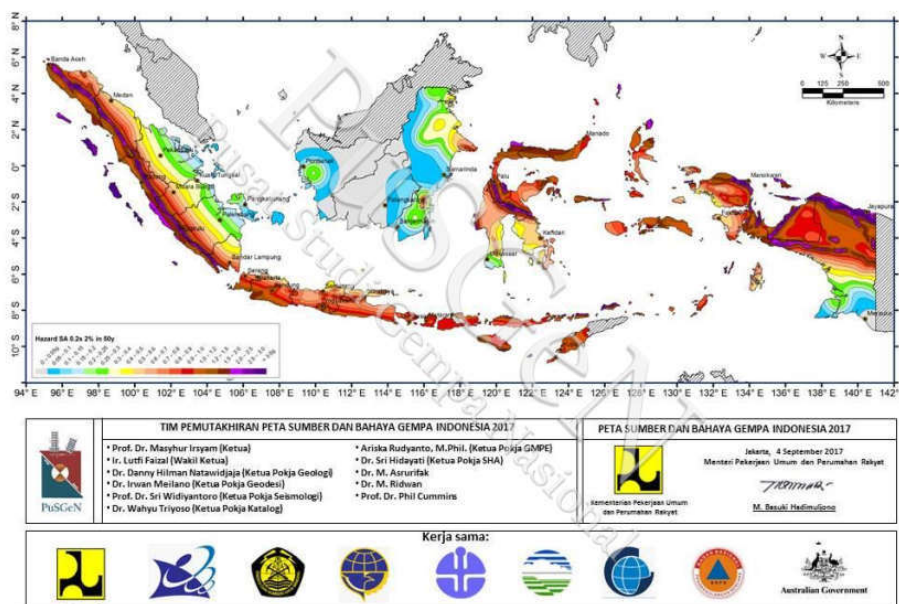
$$\bar{N} = \frac{\sum_{j=1}^n d_i}{\sum_{j=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \dots\dots\dots (2.14)$$

Tabel 2.17 Klasifikasi situs untuk  $\bar{N}$

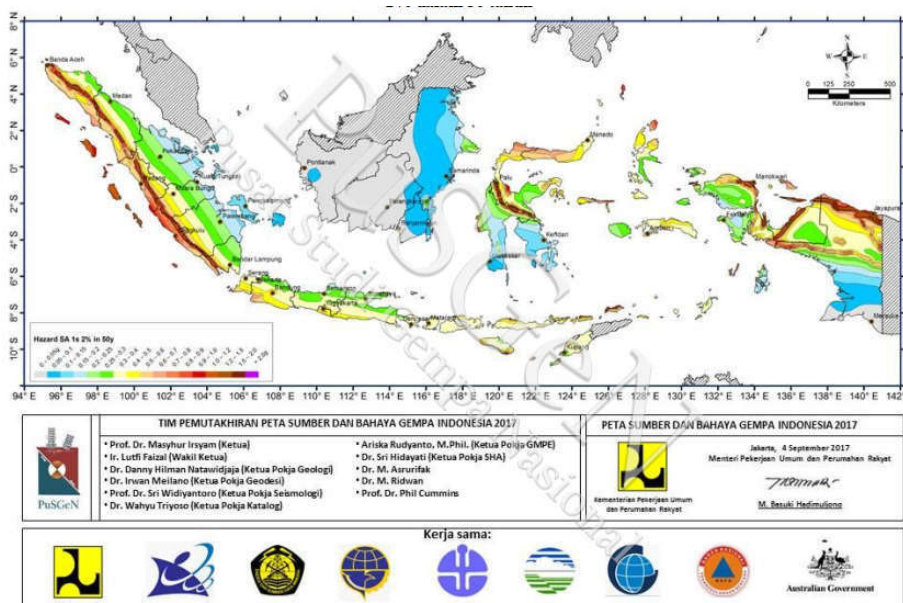
Kelas Situs	$\bar{N}$
SA (batuan keras)	N/A
SB (batuan)	N/A
SC (batuan keras, sangat padat dan batuan lunak)	> 50
SD (batuan sedang)	15 - 50
SE (tanah lunak)	< 15
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik)	Rawan dan berpotensi gagal

b) Parameter  $S_1$  dan  $S_s$ .

Peta percepatan batuan dasar periode pendek 0,2 detik ( $S_s$ ) berdasarkan (Irsyam, et al., 2017 pada halaman 357) melalui gambar 2.35, dan percepatan batuan dasar untuk periode 1 detik ( $S_1$ ) berdasarkan (Irsyam, et al., 2017 pada halaman 358) melalui gambar 2.36. Kesemuanya untuk probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun, dengan rendaman 5%.



Gambar 2.35 Peta percepatan batuan dasar periode pendek, ( $S_s$ ).



Gambar 2.36 Peta percepatan batuan dasar periode 1 detik, ( $S_1$ ).

c) Parameter  $F_a$  dan  $F_v$ .

Koefisien situs merupakan suatu faktor ampifikasi seismik yang dipakai untuk menentukan respons spektral percepatan gempa bumi. Koefisien situs  $F_a$  merupakan faktor amplifikasi getaran yang terkait percepatan pada getaran periode pendek, berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pasal 6.2) melalui tabel 2.18. Koefisien situs  $F_v$  merupakan faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode 1 detik, berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pasal 6.2) melalui tabel 2.19.

Tabel 2.18 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					

Tabel 2.19 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
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)					

## d) Parameter percepatan respons spektral.

Kombinasi parameter dasar pergerakan tanah dan faktor amplikasi adalah  $S_{MS}$  parameter percepatan pada periode pendek dan  $S_{M1}$  parameter percepatan pada periode 1 detik. Analisis  $S_{MS}$  dan  $S_{M1}$  berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pasal 6.2) melalui persamaan 2.15 dan persamaan 2.16.

$$S_{MS} = F_a \times S_s \dots\dots\dots (2.15)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \dots\dots\dots (2.16)$$

## e) Parameter percepatan respons spektral desain.

Analisis  $S_{DS}$  dan  $S_{D1}$  berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pasal 6.3) melalui persamaan 2.17 dan persamaan 2.18.

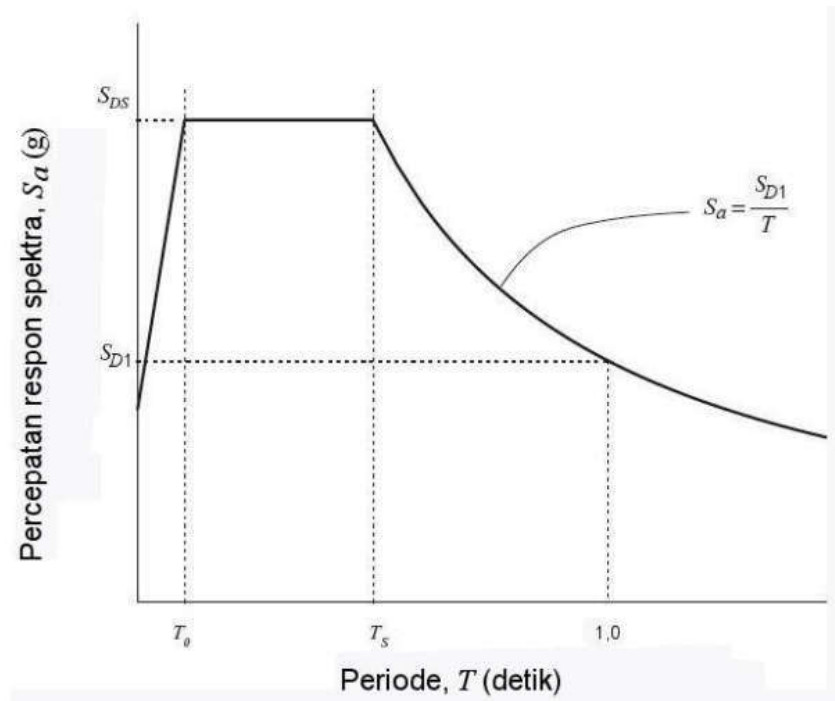
$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} \dots\dots\dots (2.18)$$

## f) Spektrum respons desain.

Spektrum respons desain mempunyai tiga segmen, yang dapat dibentuk berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pada gambar 2) melalui gambar 2.37.





Gambar 2.37 Bentuk dasar respons spektra desain.

Tiga segmen spektrum respons desain sebagai berikut :

- 1) Segmen garis lurus menanjak antara periode  $T = 0 \leq T < T_0$ .

$$S_a = S_{DS} \times \left( 0,4 + 0,6 \times \frac{T}{T_0} \right) \dots\dots\dots (2.19)$$

$$S_a = S_{DS} \times 0,4 \dots\dots\dots (2.20)$$

$$T_0 = 0,2 \times \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots\dots\dots (2.21)$$

- 2) Segmen percepatan konstan antara  $T = T_0$  dan  $T = T_s$  ( $S_a = S_{DS}$ ).

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots\dots\dots (2.22)$$

- 3) Segmen kecepatan konstan menurun untuk periode  $T > T_s$ :

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \dots\dots\dots (2.23)$$

- g) Kategori desain seismik

Semua jenis struktur harus ditentukan kategori desain seismik, dengan penetapan KDS-nya berdasarkan parameter percepatan respons spektral desain  $S_{DS}$  dan  $S_{D1}$ . Struktur dengan risiko gempa paling kecil dikategorikan ke dalam KDS A, sedangkan struktur dengan tingkat risiko gempa tinggi dikategorikan ke dalam KDS F. Berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pada pasal 6.5) melalui tabel 2.20

Tabel 2.20 Koefisien situs KDS

Parameter		KDS	
Nilai $S_{DS}$	Nilai $S_{D1}$	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0.167$	$S_{D1} < 0.167$	A	A
$0.167 \leq S_{DS} < 0.33$	$0.067 \leq S_{D1} < 0.133$	B	C
$0.33 \leq S_{DS} < 0.55$	$0.133 \leq S_{D1} < 0.20$	C	D
$0.50 \leq S_{DS}$	$0.20 \leq S_{D1}$	D	D

f. Kombinasi pembebanan

Setiap komponen struktur harus dirancang mampu memikul beban yang lebih besar, dari pada beban layan, guna memberikan jaminan keamanan terhadap struktur. Konsep perencanaan berbasis kekuatan atau LRFD yang menetapkan besarnya keamanan, terhadap kondisi beban ekstrem selama masa pakai struktur. Maka konsep persyaratan desain menjadi ke dalam persamaan 2.24 yaitu :

$$\text{Kuat rencana} \geq \text{Kuat perlu} \dots\dots\dots (2.24)$$

1. Kuat rencana atau kuat nominal

Kuat nominal adalah kemampuan komponen struktur untuk menerima beban yang dihitung berdasarkan ketentuan dengan asumsi metode perencanaan sebelum dikalikan dengan nilai faktor reduksi ( $\phi$ ) kekuatan yang sesuai.

2. Kuat perlu

Elemen struktur didesain untuk memikul nilai maksimum dari berbagai kombinasi beban terfaktor ( $U$ ), yang diperoleh dengan menghasilkan suatu faktor beban yang harus membatasi kegagalan struktur secara tiba-tiba, terhadap beban layan nominal. Kuat perlu mempertimbangkan faktor beban sesuai jenis beban yang bersangkutan seperti beban mati dapat diestimasikan secara akurat, maka faktor beban dipilih lebih kecil dari pada beban hidup karena beban hidup memiliki derajat ketidakpastian yang lebih tinggi dari pada beban mati.

Berdasarkan persyaratan dalam (BSN, SNI 1727-2013, pasal 4.2.2 dan pasal 7.4.2) besarnya kuat perlu, yang harus dipertimbangkan sebagai kondisi paling kritis, harus dipikul oleh elemen struktur melalui persamaan 2.25-2.31.

$$U = 1,4 D \dots\dots\dots (2.25)$$

$$U = 1,2 D + 1,6 L + 0,5 R \dots\dots\dots (2.26)$$

$$U = 1,2 D + 1,6 R + L \dots\dots\dots (2.27)$$

$$U = 1,4 D + 1,0 W + L + 0,5 R \dots\dots\dots (2.28)$$

$$U = (1,2 D + 0,2 S_{DS}) D \pm \rho (Q_E = E_h \pm E_v) + L \dots\dots\dots (2.29)$$

$$U = 0,9 D + 1,0 W \dots\dots\dots (2.30)$$

$$U = (0,9 - 0,2 S_{DS}) D \pm \rho (Q_E = E_h \pm E_v) + 1,6 H \dots\dots\dots (2.31)$$

Untuk parameter redundansi berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013, pasal 7.3.4) maka untuk KDS A, B, C, sebesar 1,00 dan untuk KDS D, E, F sebesar 1,30.

### 2.2.3. Response struktur

#### a. Partisipasi massa struktur

Analisis dilakukan untuk menentukan ragam getar alami untuk struktur, berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pasal 7.3.4) menyatakan analisis harus menyertakan jumlah respon ragam, yang memenuhi minimal 90% pada massa aktual dalam masing-masing arah horizontal ortogonal dari respons yang ditinjau oleh model, dengan metode superposisi menggunakan kombinasi kuadrat lengkap (*Complete Quadratic Combination/CQC*).

#### b. Waktu getar alami (*periode fundamental*)

Periode getar struktur merupakan waktu yang dibutuhkan untuk menempuh satu putaran lengkap, dari suatu getaran ketika terganggu dari posisi kesimbangan statis dan kembali ke posisi aslinya. Periode ini bergantung pada besarnya massa dan kekakuan struktur.

Waktu getar alami struktur gedung (T) setelah dirancang dengan pasti dapat dikontrol defleksi/selisish perubahan geser akibat beban geser gempa pada gedung tiap lantai dengan arah sumbu X dan sumbu Y, dengan selisihnya kurang dari 15 %. Waktu getar alami kontrol menggunakan rumus T rayleigh berdasarkan (BSN, SNI 1727-2013, pasal 10.2.5) melalui persamaan 2.32.

$$T = 2 \pi x \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n F_i x \delta_i^2}{g x \sum_{i=1}^n F_i x \delta_i}} \dots\dots\dots (2.32)$$

c. Gaya geser

Gaya geser dasar seismik adalah total dari gaya lateral gempa yang diterima setiap lantainya, dari seluruh gaya lateral akibat gempa yang diterima oleh bangunan gedung yang sedang ditinjau. Penggunaan gaya geser dasar untuk mengontrol apakah gaya gempa yang dimasukkan dengan menggunakan *time history* sudah sesuai dengan persyaratan (BSN, SNI 1726-2012 pada pasal 7.8.4.2)

1. Gaya geser dasar (*base shear*)

Analisis gaya geser ditentukan berdasarkan persamaan berikut

- a) Gaya dasar seismik (V), dalam arah yang ditetapkan, berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pasal 7.8.1) melalui persamaan 2.33.

$$V = C_s \times W \dots\dots\dots (2.33)$$

- b) Koefisien respons seismik ( $C_s$ ), berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pasal 7.8.1.1) melalui persamaan 2.34.

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.34)$$

Nilai  $C_s$  tidak boleh kurang dari persamaan 2.35, dan persamaan 2.36.

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \times \left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.35)$$

$$C_s = 0,044 S_{DS} \times I_e \geq 0,01 \dots\dots\dots (2.36)$$

Untuk daerah yang memiliki lokasi pada daerah dengan nilai  $S_1$  sama dengan atau lebih besar dari 0,6 g, nilai  $C_s$  tidak boleh kurang dari persamaan 2.37.

$$C_s = \frac{0,5 \times S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.37)$$

- c) Berat seismik efektif (W), harus menyertakan seluruh beban mati dan beban lainnya seperti beban hidup total yang membebani struktur, melalui persamaan 2.38.

$$W = \gamma \times \text{Volume} \dots\dots\dots (2.38)$$

Pemeriksaan presentase antara *base shear* yang dihasilkan oleh SPRK dan shearwall dari masing-masing kombinasi pembebanan gempa total yang memikul 25% dengan cara menjumlahkan reaksi perletakan SRPK dan reaksi perletakan *shearwall* untuk kombinasi pembebanan gempa,

kemudian dibandingkan presentasinya. Untuk nilai gaya geser dasar maksimum yang telah diskalakan kurang dari 85 % ( $0.85 V_s < V_d$ ) dari *base shear* statik maksimum maka harus mencari faktor skala gempa baru dengan mengalikan skala gempa masukan dengan, persamaan 2.39 berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pasal 7.8.4.1).

$$\text{Faktor skala} = 0,85 \times \frac{V_s}{V_d} \dots \dots \dots (2.39)$$

## 2. Gaya geser antar lantai (*story shear*)

Pendistribusi gaya geser dasar ke semua tingkat menjadi gaya lateral ekivalen, yang dibagi menjadi :

a) Distribusi vertikal gaya gempa, yang besarnya ditentukan berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pasal 7.8.3) melalui persamaan 2.40.

$$F_x = C_{vx} \times V \dots \dots \dots (2.40)$$

Untuk parameter  $C_{vx}$  besarnya dihitung melalui persamaan 2.41.

$$C_{vx} = \frac{W_x \times h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i \times h_i^k} \dots \dots \dots (2.41)$$

Untuk parameter  $k$  ditentukan berdasarkan periode struktur, sebagai berikut :

$K = 1$ , untuk struktur dengan  $T \leq 0,5$  detik.

$K = 2$ , untuk struktur dengan  $T \geq 2.5$  detik.

$K =$  interpolasi antara  $K = 1$  sampai  $K = 2$ , untuk struktur dengan  $T 0,5 < T < 2.5$  detik.

b) Distribusi horizontal gaya gempa, yang besarnya ditentukan berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pasal 7.8.4) melalui persamaan 2.42.

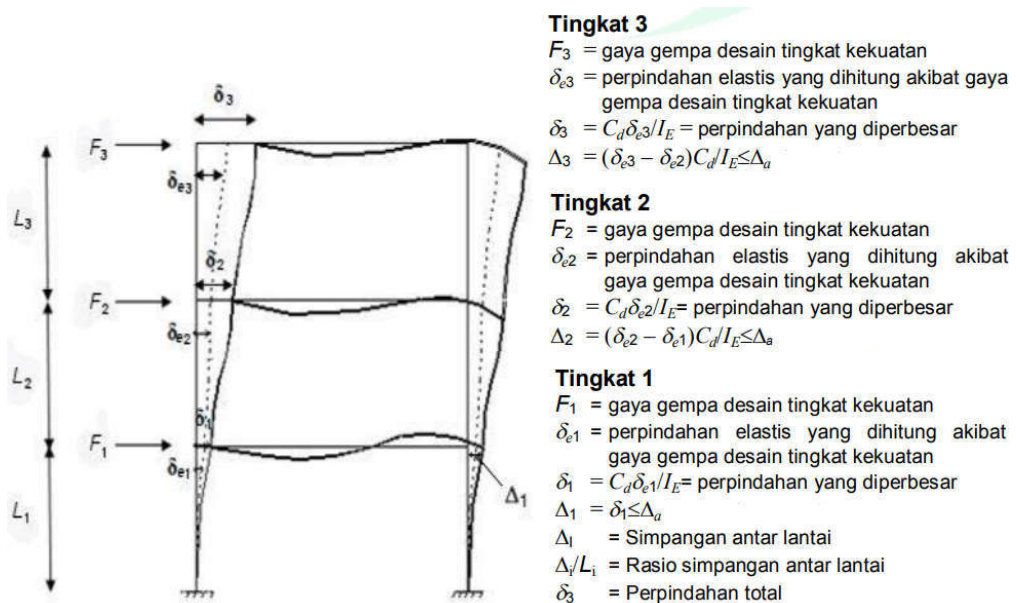
$$V_x = \sum_{i=1}^n F_i \dots \dots \dots (2.42)$$

Pendistribusian tergantung pada fleksibilitas diafragma yang berupa atap, lantai, membran, atau sistem bresing. Jenis-jenis diafragma dikategorikan menjadi diafragma fleksibel apabila defleksi maksimum diafragma pada arah bidang yang dihitung akibat beban lateral adalah lebih besar dari dua kali simpangan antar lantai rata-rata di tingkat yang ditinjau, sedangkan dikategorikan diafragma kaku distribusi gaya lateral

di masing-masing tingkat harus memperhitungkan pengaruh momen torsi bawaan.

d. Simpangan

Pemeriksaan simpangan struktur digunakan untuk menjamin stabilitas struktur, mencegah kerusakan elemen-elemen nonstruktural, serta untuk menjamin kenyamanan pengguna bangunan. Penentuan simpangan antar lantai desain harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau, pada gambar 2.38. Apabila pusat massa tidak terletak segaris dalam arah vertikal, maka untuk menghitung defleksi di dasar tingkat berdasarkan proyeksi vertikal dari pusat massa tingkat di atasnya.



Gambar 2.38 Penentu simpangan antar lantai (BSN, SNI 1726-2012 pada gambar 5).

Prosedur analisis simpangan antar lantai sebagai berikut :

Defleksi pusat dari massa di tingkat x ( $\delta_x$ ), berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pada pasal 7.8.6) melalui persamaan 2.43.

$$\delta_x = \frac{C_d \times (\delta_{xe}(2) - \delta_{xe}(1))}{I_e} \dots\dots\dots (2.43)$$

Simpangan anatar lantai memiliki batasan, antara simpangan antar tingkat desain, tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin, berdasarkan (BSN, SNI 1726-2012 pada pasal 7.12) melalui tabel 2.21.

Tabel 2.21 Simpangan antar lantai izin

Struktur	Kategori risiko		
	I dan II	III	IV
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.	$0.025 h_{sx}^C$	$0.020 h_{sx}$	$0.015 h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata	$0.010 h_{sx}$	$0.010 h_{sx}^C$	$0.010 h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0.007 h_{sx}$	$0.007 h_{sx}$	$0.007 h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0.020 h_{sx}$	$0.015 h_{sx}$	$0.010 h_{sx}$

#### 2.2.4. Perancangan struktur

Perancangan struktur adalah campuran antara seni, ilmu pengetahuan, rasa atau *feeling* yang dikombinasikan dengan seorang ahli struktur mengenai perilaku struktur dengan dasar-dasar pengetahuan dalam statika dan mekanika bahan, dan analisis struktur, untuk menghasilkan suatu struktur yang ekonomis, memperkecil risiko keruntuhan selama masa layannya, dan mengetahui dimensi struktur.

##### a. Perancangan *outrigger*

Elemen struktur *outrigger* didesain menggunakan balok tinggi (*deep beam*) sesuai (BSN, SNI 2847-2013, pada pasal 10.7) yaitu komponen struktur yang dibebani pada salah satu mukanya (sisi atas balok) dan ditumpu pada muka yang berlawanan, sehingga terbentuk lintasan serat tekan antara beban dan tumpuan, melalui gambar 2.39, akibat tegangan tarik dan tekan maka dibutuhkan tulangan tarik hingga  $1/5$  tinggi balok.

Contoh dari struktur balok tinggi antara lain adalah balok bentang pendek dan beban berat, dinding vertikal dengan beban gravitasi, dinding geser, pelat lantai yang dikenai beban horizontal. Balok tinggi mempunyai persyaratan sebagai berikut :

1. Bentang bersih ( $\ell_n$ ) sama dengan atau kurang dari empat kali tinggi komponen struktur keseluruhan ( $\ell_n \leq 4 h$ ).
2. Daerah dengan beban terpusat dalam jarak  $2h$  dari muka tumpuan.
3. Luas minimum tulangan tarik lentur, tidak boleh kurang dari  $A_{Smin}$ , sesuai (BSN, SNI 2847-2013, pada persamaan 10-3) melalui persamaan 2.44 dan tidak boleh lebih kecil dari persamaan 2.45.

$$A_{Smin} = \frac{0,25 \times \sqrt{F_c'} }{F_y} \times b_w \times d \dots\dots\dots (2.44)$$

$$A_{Smin} = \frac{1,4 \times b_w \times d}{F_y} \dots\dots\dots (2.45)$$

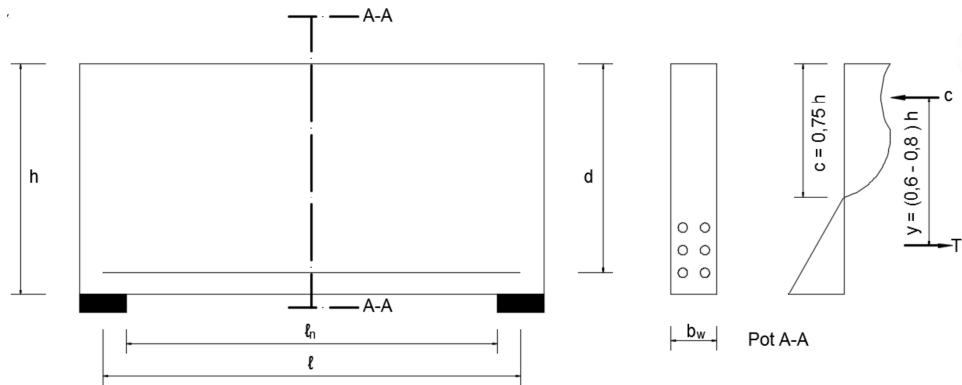
4. Kuat geser perlu ( $V_u$ ), tidak boleh lebih besar dari yang diisyaratkan (BSN, SNI 2847-2013, pada pasal 11.7.3) melalui persamaan 2.46.

$$V_u = \phi \times 0,83 \times \sqrt{F_c'} \times b_w \times d \dots\dots\dots (2.46)$$

5. Tulangan yang terdistribusi total sepanjang dua muka sisi balok tinggi, tidak boleh melebihi tulangan geser yaitu luas tulangan geser yang tegak lurus terhadap sumbu longitudinal balok  $A_v$  melalui persamaan 2.47 dan luas tulangan geser yang paralel terhadap sumbu longitudinal balok  $A_{vh}$  melalui persamaan 2.48, kedua distribusi tulangan sepanjang dari tidak boleh ambil yang lebih kecil dari  $d/5$  dan 300 mm.

$$A_v = 0,0025 \times b_w \times s_1 \dots\dots\dots (2.47)$$

$$A_{vh} = 0,0025 \times b_w \times s_2 \dots\dots\dots (2.48)$$



Gambar 2.39 Balok tinggi (Setiawan, 2016)

Pada gambar 2.39, distribusi tegangan elastis pada tengah bentang, analisis balok tinggi cukup kompleks, dan dapat dilakukan menggunakan metode *strut* dan



tie atau metode element hingga, namun Metode penyederhanaan metode dalam desain sesuai ketentuan persamaan berikut (Setiawan, 2016) :

1. Lokasi penampang kritis, penampang kritis ditetapkan sejarak  $x$  dari muka tumpuan  $\ell_n$ .
  - a) Untuk balok memikul beban merata,  $x = 0,15 x \ell_n$ .
  - b) Untuk balok memikul beban terpusat,  $x_1 = 0,5 x \alpha_1$  (dari tumpuan kiri),  $x_2 = 0,5 x \alpha_2$  (dari tumpuan kanan). Untuk parameter  $x$  tidak boleh melebihi tinggi efektif balok,  $d$ .
2. Kuat geser beton ( $V_c$ ), kuat geser yang disumbangkan oleh beton untuk struktur yang dikenai geser dan lentur dapat dihitung sesuai (BSN, SNI 2847-2013, pada pasal 11.21.1.1) melalui persamaan 2.49.

$$V_c = 0,17 x \lambda x \sqrt{F_c'} x b_w x d \dots\dots\dots (2.49)$$

Untuk parameter  $\lambda$ , ditentukan berdasarkan sebagai berikut

$\lambda = 0,75$  untuk beton ringan semua bahan.

$\lambda = 0,85$  untuk beton ringan pasir.

$\lambda =$  interpolasi antara  $K = 0.85$  sampai  $K = 1$ , dengan fraksi volume beton mengandung agregat halus normal dan campuran agregat kasar ringan dan normal.

$\lambda = 1$  untuk beton normal.

3. Kuat geser tulangan ( $V_s$ ), kuat geser yang disediakan oleh tulangan geser, dari sesuai (BSN, SNI 2847-2013, pada pasal 11.4.7.2) melalui persamaan 2.50, maka akan kesulitan untuk memperkirakan parameter  $A_v$ , sehingga untuk mencari  $V_s$  dengan mempertimbangkan kuat geser terfaktor dan nominal  $\emptyset (V_n = V_c + V_s) \geq V_u$ .

$$V_s = \frac{A_v x F_{yt} x d}{s} \dots\dots\dots (2.50)$$

4. Menentukan kebutuhan tulangan, sesuai ketentuan berikut :
  - a) Menentukan kebutuhan jumlah lapis dalam layer baja tulangan vertikal dan horizontal minimum.  
Paling sedikit dua lapisan apabila gaya geser terfaktor pada penampang, melebihi ketentuan sesuai (BSN, SNI 2847-2013, pada pasal 21.9.2.2) melalui persamaan 2.51.

$$0,17 \times A_{cv} \times \lambda \times \sqrt{F_c'} \dots\dots\dots (2.51)$$

- b) Menentukan kuat geser dinding yang diperlukan.

Kuat geser nominal dinding struktural, berdasarkan (BSN, SNI 2847-2013, pada pasal 21.9.4.1) melalui persamaan 2.52.

$$V_n = A_{cv} \times (\alpha_c \times \lambda \times \sqrt{F_c'} + \rho_t \times F_y) \dots\dots\dots (2.52)$$

Untuk parameter  $\alpha_c$ , ditentukan berdasarkan sebagai berikut :

$$\alpha_c = 0,25 \text{ untuk } h_w/\ell_w \leq 1,5.$$

$$\alpha_c = 0,17 \text{ untuk } h_w/\ell_w \geq 2.$$

$\alpha_c$  = interpolasi antara  $\alpha_c = 0,17$  sampai  $\alpha_c = 0,25$  dengan  $h_w/\ell_w \leq 1,5$  antara  $h_w/\ell_w \geq 2$ .

5. Menentukan *special boundary element* (komponen batas khusus) sesuai (Imran & Hendrik, Perencanaan Lanjut Struktur Beton Bertulang, 2014)

- a) Berdasarkan pendekatan tegangan, *special boundary element* (KBK) diperlukan apabila tegangan tekan maksimum akibat kombinasi momen dan gaya aksial terfaktor yang bekerja pada penampang dinding geser melebihi  $0,2 F_c'$  sesuai persamaan 2.53.

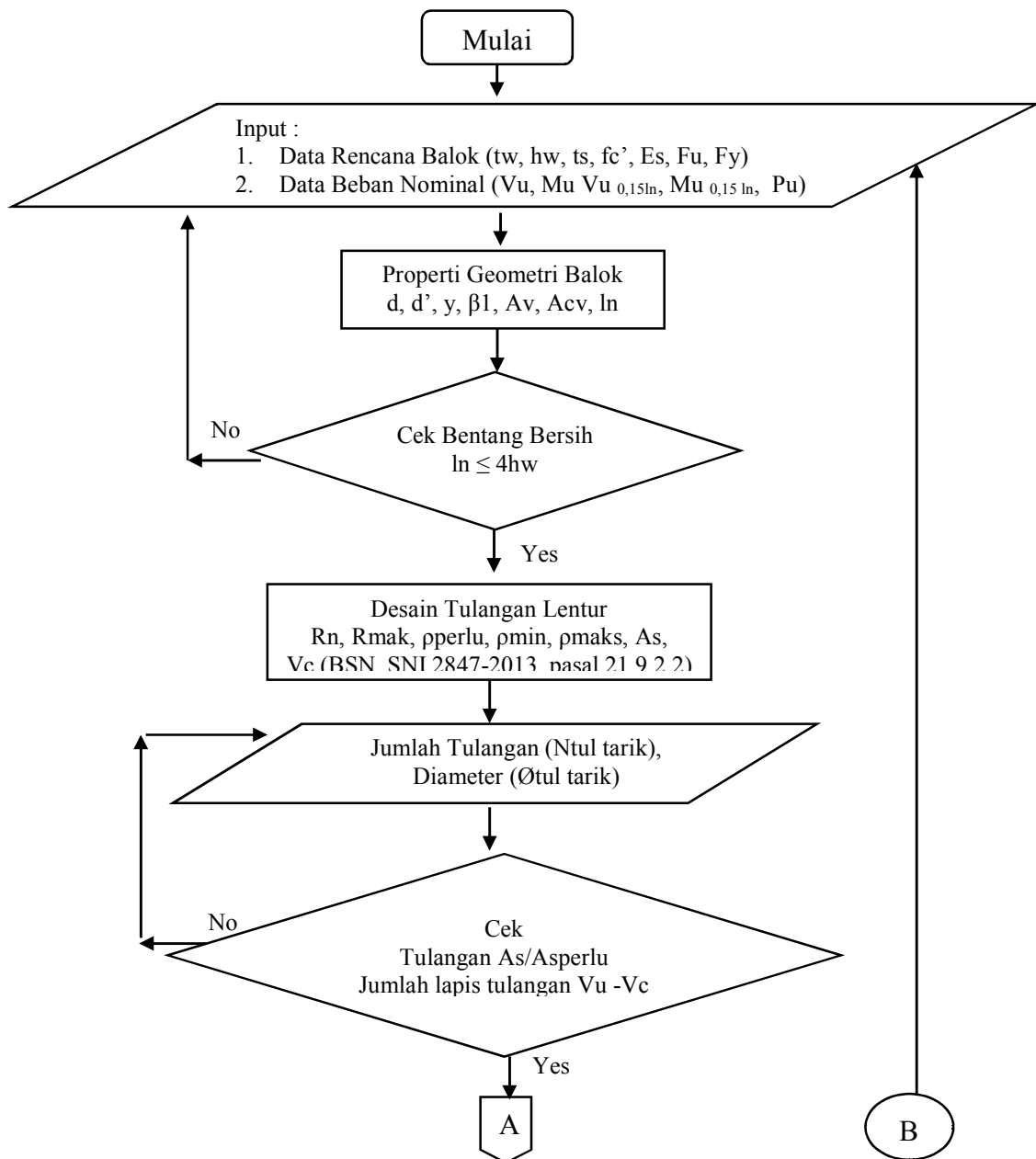
$$\frac{P_u}{A_g} + \frac{M_u \times y}{I} > 0,2 f_c' \dots\dots\dots (2.53)$$

- b) Berdasarkan pendekatan perpindahan, *special boundary element* (KBK) diperlukan apabila jika jarak  $c$  (sumbu netral) dari serat terluar zona tekan lebih besar dari yang diisyaratkan (BSN, SNI 2847-2013, pada pasal 21.9.6.2) melalui persamaan 2.54.

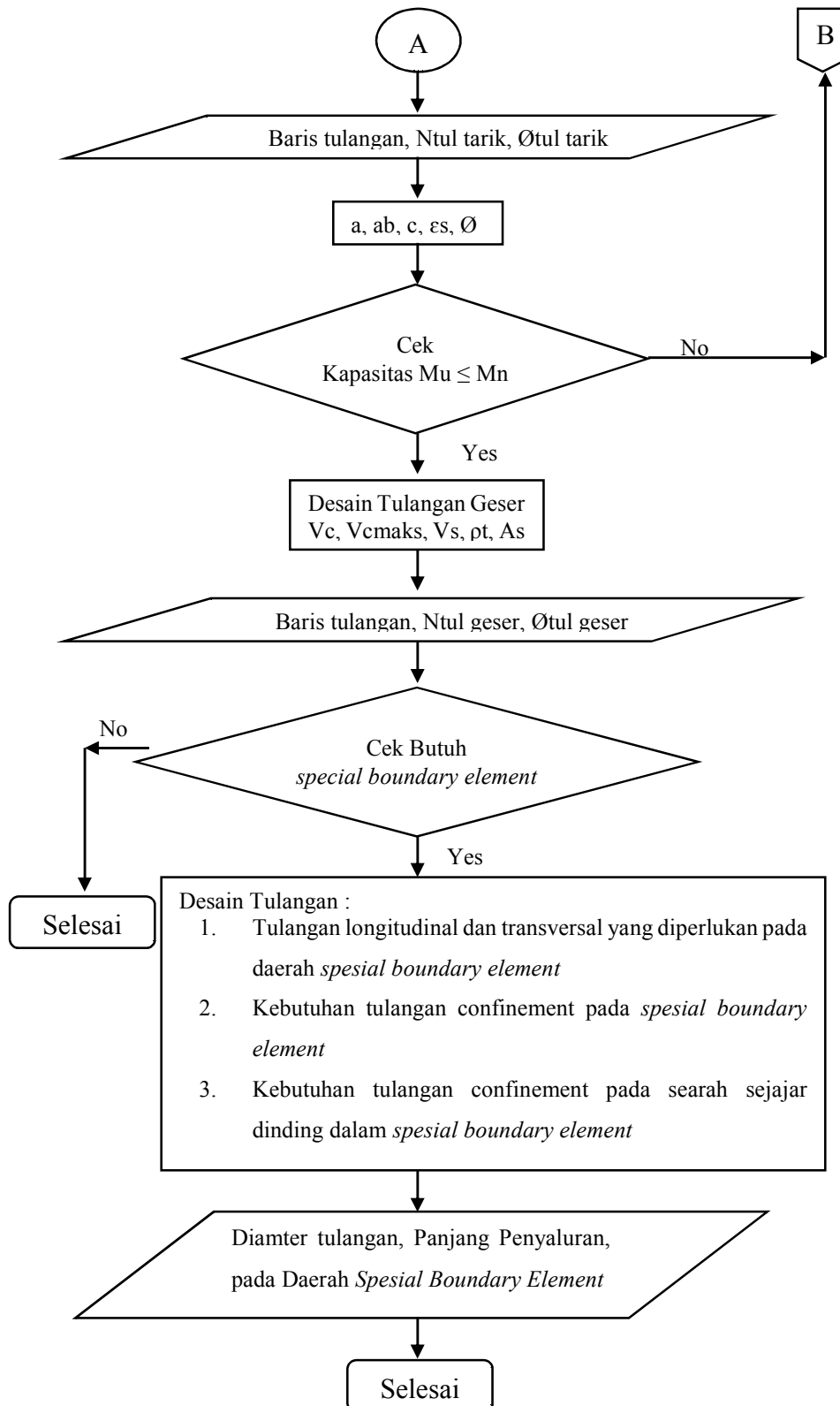
$$C \geq \frac{\ell_w}{600 (\delta_u / h_w)} \dots\dots\dots (2.54)$$

Di mana  $\delta_u / h_w \geq 0,007$

Adapun langkah-langkah untuk analisis *outrigger* ditunjukkan pada gambar 2.40



Gambar 2.40 Diagram alir perencanaan balok *outrigger*.



Gambar 2.40 Diagram alir perencanaan balok *outrigger* (-lanjutan).

b. Perancangan *belt-truss*

Elemen struktur *belt-truss* didesain menggunakan rangka baja yang difungsikan sebagai sistem bresing, element *belt-truss* hanya didesain menerima gaya tarik dan tekan. Batang tekan dan batang tarik didesain, untuk komponen struktur yang memikul beban tekan atau tarik, tepat pada titik berat penampang atau dengan terdapat adanya eksentrisitas oleh ketidak-lurusan batang atau ketidaktepatan pembebanan, juga kekakangan dari tumpuan yang menimbulkan momen, jika momen yang relatif kecil, sehingga dapat diabaikan maka prosedur desainnya sebagai berikut :

1. Batang tarik

Menurut (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016), konsep perancangan batang tarik adalah hubungan bagian sambungan dan bagian tengah elemen batang bersifat seri, seperti untaian kalung yang terdiri dari berbagai komponen kecil. Bagian paling lemah akan menentukan kekuatan.

Strategi pembesaran bagian sambungan dapat menyebabkan efek melemahnya penampang, hingga timbulnya konsentrasi tegangan pada kondisi inelastis akan mungkin terjadi pada bagian lainnya. Adanya konsentrasi tegangan yang nilainya lebih besar beberapa kalinya, dapat diatasi dengan adanya tegangan leleh  $F_y$  dari material daktail, hal ini menyebabkan redistribusi tegangan gaya ke bagian lubang belum leleh.

Konsep perencanaan batas (LRFD) menyebabkan elemen dapat diperbadayakan sampai kondisi tegangan maksimum  $F_u$ , dengan adanya *strain hardening* pada elemen material. Maka untuk perilaku keruntuhan tidak sama antara  $F_u$  dan  $F_y$ , yang diberikan oleh faktor ketahanan tarik.

- a) Kuat tarik nominal, berdasarkan (BSN, SNI 1729-2015, pada pasal D2) diambil nilai yang terkecil dari dari dua tinjauan batas keruntuhan yang terjadi pada persamaan 2.55 dan persamaan 2.56.

- 1) Kuat tarik penampang utuh terhadap leleh.

$$P_n = F_y \times A_g \dots\dots\dots (2.55)$$

Untuk parameter  $\phi_t$  leleh = 0,9.

- 2) Kuat tarik penampang berlubang.

$$P_n = F_u \times A_e = F_u \times A_n \times u \dots\dots\dots (2.56)$$

Untuk parameter  $\phi_t$  leleh = 0,75.

- b) Luas penampang, salah satu kinerja batang tarik ditentukan oleh efektifitas kuat penampang yang diwakili oleh tiga kondisi luasan, yaitu  $A_g$ ,  $A_n$ ,  $A_e$ , dan kinerja sambungan yang harus mempunyai kekuatan lebih dibandingkan batang tariknya. Pengaruh dari ketiga luasan dan kinerja sambungan tersebut, sebagai berikut :

1) Pengaruh lubang dan cara penyambungan

Keterkaitan luasan penampang, tergantung dari sistem sambungan yang diungkapkan sebagai berikut :

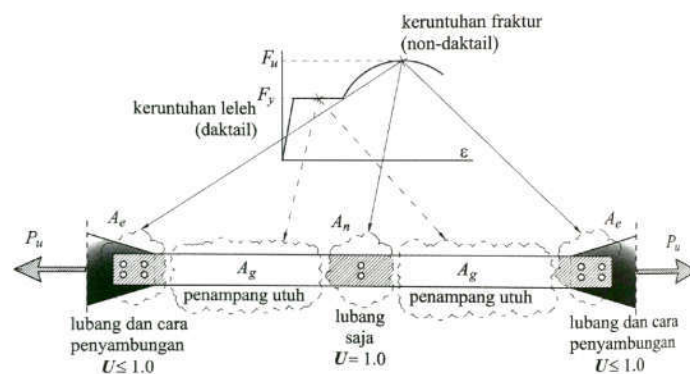
a. Reduksi luas penampang.

Untuk sambungan yang memakai baut atau lubang, ada luas penampang utuh atau gross, ( $A_g$ ). Ada luas penampang netto ( $A_n$ ) yaitu luasan setelah memperhitungkan pengaruh lubang.

Untuk sambungan las, tidak memerlukan lubang, maka sambungannya lebih baik dibandingkan baut yaitu  $A_n = A_g$ .

b. Efektifitas sambungan.

Akibat adanya kemudahan pelaksanaan atau keterbatasan alat sambungannya, bidang permukaan penampang batang tarik pada sambungan tidak bisa meratakan aliran tegangan yang disebut dengan faktor *shear lag*, sesuai gambar 2.41.



Gambar 2.41 Balok tinggi (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

Luas penampang batang tarik setelah memperhitungkan pengaruh *shear-lag* disebut luas penampang efektif, sesuai (BSN,

SNI 1729-2015, pada pasal D2, halaman 28) melalui persamaan 2.57.

$$A_e = A_n \times U \dots\dots\dots (2.57)$$

Untuk parameter U, berdasarkan (BSN, SNI 1729-2015, pada tabel D3.1) melalui tabel 2.22.

Tabel 2.22 Faktor *shear lag* untuk sambungan pada komponen struktur tarik

Kasus	Deskripsi Elemen	Faktor <i>Shear lag</i> , U	Contoh	
1	Semua komponen struktur tarik dimana beban tarik disalurkan secara langsung ke setiap dari elemen profil melintang melalui sarana penyambung atau las-las (kecuali seperti dalam Kasus 4, 5 dan 6)	$U = 1,0$		
2	Semua komponen struktur tarik, kecuali pelat dan PSB, dimana beban tarik disalurkan ke beberapa tetapi tidak semua dari elemen profil melintang melalui sarana penyambung atau las longitudinal atau melalui las longitudinal dalam kombinasi dengan las transversal. (Secara alternatif, untuk W, M, S dan HP, Kasus 7 dapat digunakan. Untuk baja siku, Kasus 8 dapat digunakan)	$U = 1 - \bar{X} / l$		
3	Semua komponen struktur tarik dimana beban tarik hanya disalurkan melalui las transversal ke beberapa tetapi tidak semua dari elemen profil melintang.	$U = 1,0$ dan $A_n$ = luas dari elemen yang disambung langsung		
4	Pelat dimana beban tarik disalurkan melalui hanya las longitudinal.	$l \geq 2w \dots U = 1,0$ $2w > l \geq 1,5w \dots U = 0,87$ $1,5w > l \geq w \dots U = 0,75$		
5	PSB Bundar dengan sebuah pelat buhul konsentris tunggal	$l \geq 1,3D \dots U = 1,0$ $D \leq l < 1,3D \dots U = 1 - \bar{X} / l$ $\bar{X} = D / \pi$		
6	PSB Persegi	Dengan sebuah pelat buhul konsentris tunggal	$l \geq H \dots U = 1 - \bar{X} / l$ $\bar{X} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B + H)}$	
		Dengan dua sisi pelat buhul	$l \geq H \dots U = 1 - \bar{X} / l$ $\bar{X} = \frac{B^2}{4(B + H)}$	
7	Bentuk W, M, S atau HP atau T memotong dari bentuk-bentuk ini (Jika U dihitung dalam Kasus 2, nilai yang lebih besar diizinkan untuk digunakan).	Dengan sayap disambungkan dengan 3 atau lebih sarana penyambung per baris di arah pembebanan	$b_f \geq 2/3d \dots U = 0,90$ $b_f < 2/3d \dots U = 0,85$	
		Dengan badan disambungkan dengan 4 atau lebih sarana penyambung per baris di arah pembebanan	$U = 0,70$	
8	Siku tunggal dan ganda (Jika U dihitung dalam Kasus 2, nilai yang lebih besar diizinkan untuk digunakan).	Dengan 4 atau lebih sarana penyambung per baris di arah pembebanan	$U = 0,80$	
		Dengan 3 sarana penyambung per baris di arah pembebanan (Dengan lebih sedikit dari 3 sarana penyambung per baris di arah pembebanan, gunakan Kasus 2).	$U = 0,60$	

$l$  = panjang sambungan, in. (mm);  $w$  = lebar pelat, in. (mm);  $\bar{X}$  = eksentrisitas sambungan, in. (mm);  $B$  = lebar keseluruhan dari komponen struktur PSB persegi, diukur 90° terhadap bidang dari sambungan, in. (mm);  $H$  = tinggi keseluruhan dari komponen struktur PSB persegi, diukur pada bidang sambungan, in. (mm)

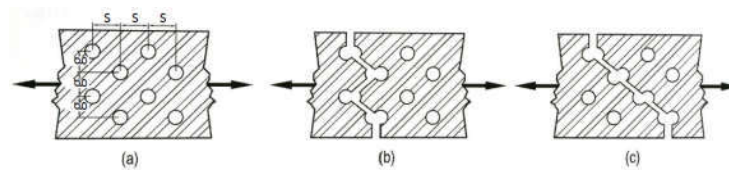
2) Diameter lubang baut – real dan imajiner.

Untuk menghindari risiko pelemahan akibat pembuatan lubang, yang prosesnya terjadi pada tahap fabrikasi maka dipilih tindakan konservatif dalam memperhitungkan luas penampang netto dari, lubang baut sebagai berikut :

- a. Diameter baut,  $d$ .
- b. Lubang baut nominal adalah diameter lubang real terpasang, besarnya tergantung diameter baut, yang dibuat dibengkel,  $d+2$ .
- c. Diameter lubang imajiner untuk perhitungan dengan luas penampang netto,  $d+2+2$ .

3) Lubang-lubang berpola *staggered*.

Jika jumlah baut-bautnya banyak, penempatan lubang dapat memakai pola *staggered* atau zigzag ilustrasi pada gambar 2.42 agar dengan luasan yang sama, dapat memuat lebih banyak baut sehingga menghemat ruang.



Gambar 2.42 Kemungkinan keruntuhan pada lubang berpola *staggered* (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

Untuk mencari luas penampang  $A_n$  terkecil pada potongan dengan lubang terbanyak yang bisa terjadi, pada gambar 2.42. panjang bersih dihitung dari tinggi penampang bersih dikurangi jumlah lubang (yang terdapat pada jalur potongan), ditambah pengaruh diagonal jarak  $s$  dan  $g$ , sesuai (BSN, SNI 1729-2015, pada pasal 3b) melalui persamaan 2.58.

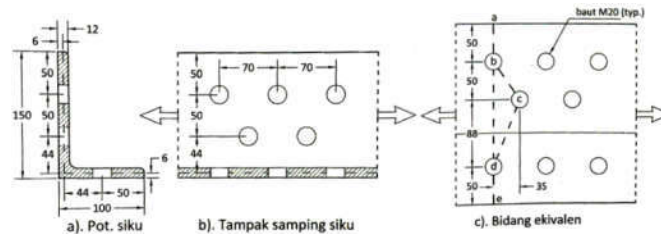
$$\frac{s^2}{4 \times g} \dots \dots \dots (2.58)$$

4) Pola *staggered* tidak sebidang.

Pemasangan sambungan bautnya, juga berpola *staggered* pada bentuk profil bukan pelat datar. Untuk perhitungan perlu dibuat



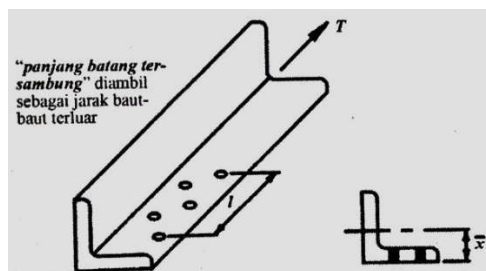
bidang ekivalen berdasarkan pada garis berat elemen profil atau bidang ditengah tebal masing-masing elemen profilnya, contoh pada gambar 2.43.



Gambar 2.43 Pola *staggered* pada profil tidak sebidang (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

5) Faktor *shear-lag* dan efektivitas sambungan

*Shear-lag* dibuat untuk mengantisipasi adanya ketidaksempurnaan sambungan sesuai tabel 2.22. Untuk memahami parameter  $x$  dan  $l$  dalam menentukan faktor *shear lag*, pada gambar 2.44 khusus untuk parameter  $x$  di mana jarak titik berat elemen tidak tersambung terhadap permukaan sambungannya. Sedangkan  $l$  adalah jarak panjang batang tersambung.



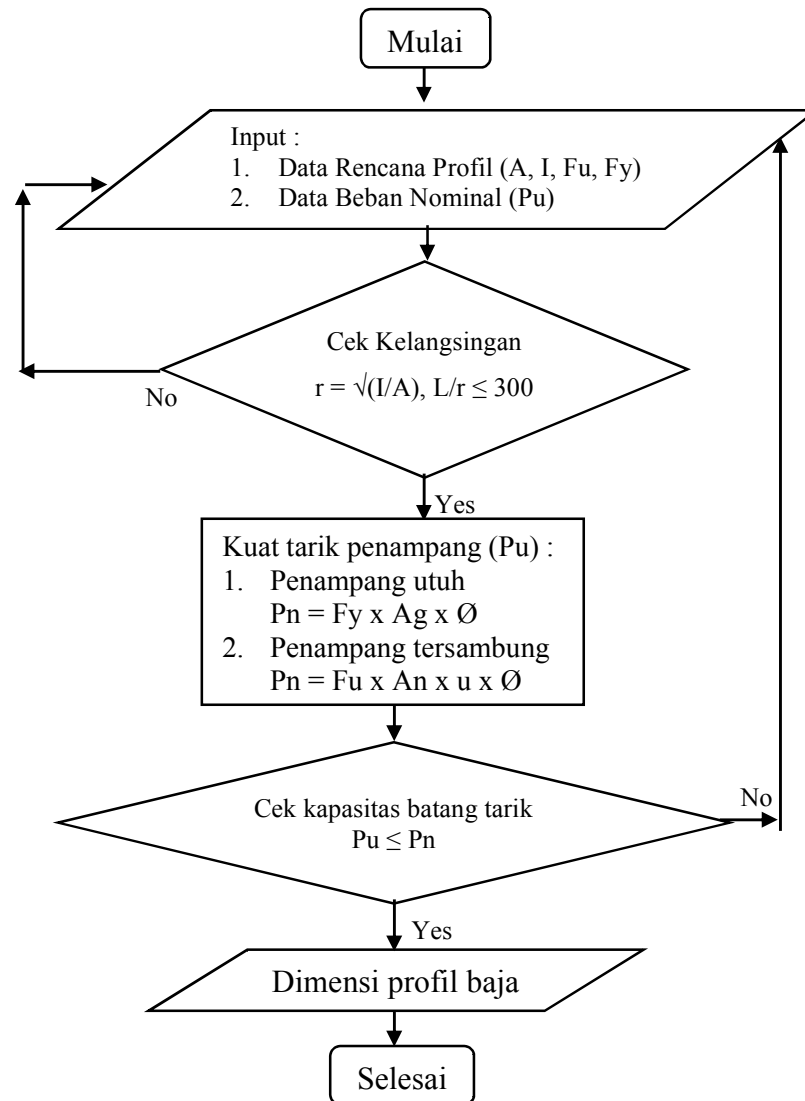
Gambar 2.44 Jarak  $l$  dan  $x$  sebagai panjang batang tersambung (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

6) Batas kelangsingan

Dimensi batang tarik bisa sangat langsing, karena tidak mengantisipasi tekuk tetapi hanya disarankan tidak boleh melebihi ketentuan (BSN, SNI 1729-2015, pada pasal D1) melalui persamaan 2.59.

$$\frac{L}{r} \leq 300 \dots\dots\dots (2.59)$$

Adapun langkah-langkah untuk analisis batang tarik ditunjukkan pada gambar Gambar 2.45.



Gambar 2.45 Diagram alir perencanaan batang tarik.

## 2. Batang tekan

Menurut (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016), parameter material  $F_y$  yang menentukan dalam perencanaan batang tekan karena  $F_u$  tidak pernah tercapai. Umumnya batang tekan ditempatkan pada konfigurasi geometri berbentuk segitiga atau konfigurasi bentuk fisik, agar tetap stabil. Parameter geometri yang menentukan terdiri dari :

- a) Luas penampang (A).
- b) Pengaruh bentuk penampang terhadap kekakuan lentur ( $I_{min}$ ).

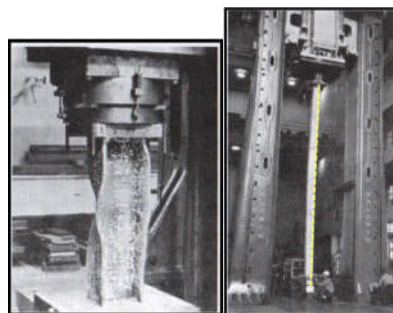
- c) Panjang batang dan kondisi pertambatan atau tumpuan yang diwakili oleh panjang efektif (KL).

Ketigannya dari parameter geometri yang menentukan perencanaan batang tekan, dapat diringkas menjadi rasio atau faktor kelangsingan batang yang menjadi indikator parameter perencanaan yang penting, untuk batas kinerja sekaligus perilaku ( $KL/r_{min}$ ), dan tidak boleh melebihi 200, di mana parameter  $r_{min}$  adalah radius grasi  $r_{min} = \sqrt{I_{min}/A}$ .

Kolom pendek (tidak langsing) berperilaku seperti batang tarik yaitu kekuatannya ditentukan oleh luas penampang, bentuk tidak berpengaruh. Kolom ini tidak mengalami tekuk, jika dibebani aksial tekan tanpa eksentrisitas, yang mengakibatkan tegangan bertambah dan dapat mencapai kondisi leleh sehingga batang memendek.

Kolom langsing kekuatannya ditentukan oleh luas, momen inersia dan beban kritis yang menyebabkan tekuk, dan tidak tergantung dari mutu material. Kolom ini jika dibebani aksial tekan tanpa eksentrisitas, sebelum leleh bisa mengalami tekuk yaitu keadaan perpindahan lateral seperti lentur balok, yang besar pada kondisi konstan.

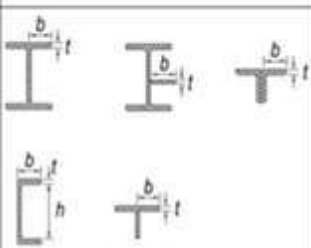

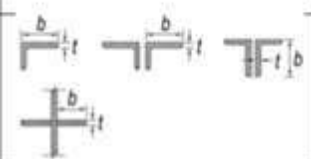


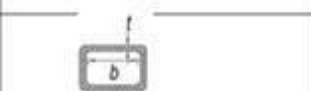


Keruntuhan tekuk umumnya terjadi pada kondisi tegangan yang relatif rendah, di bawah tegangan leleh, (kondisi elastis). Pada gambar 2.44 kiri terjadi tekuk lokal karena profil penampang relatif langsing dan panjang kolomnya pendek yang menyebabkan tekuk pada elemen penampang. Pada gambar 2.46 kanan terjadi tekuk global karena elemen profilnya relatif tebal dan batang kolomnya langsing yang menyebabkan tekuk global yang sifatnya menyeluruh.




Gambar 2.46 Fenomena tekuk (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

Supaya struktur optimal, rasio tekuk lokal harus dihindari, untuk memisahkan penampang tidak langsing dan langsing, dengan mengevaluasi rasio lebar-tebal ( $b/t$ ) berdasarkan (BSN, SNI 1729-2015, pada tabel B4.1a) melalui tabel 2.23, pada tiap elemen penampang perlu ditinjau, jika nilai batas rasio  $b/t$  tidak melebihi batas  $\lambda_r$  maka penampang diklasifikasikan tidak langsing (ideal), dan sebaliknya penampang langsing.

Tabel 2.23 Rasio tebal terhadap lebar untuk klasifikasi elemen pada batang tekan aksial

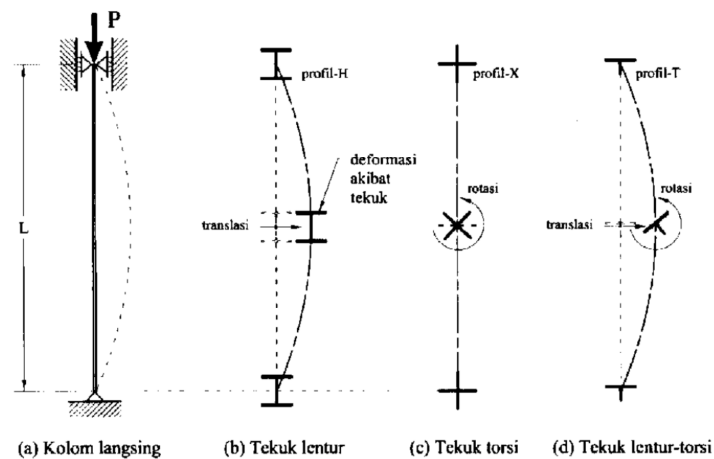
	Kasus	Deskripsi elemen	Rasio tebal-terhadap-lebar	Batasan rasio tebal-terhadap-lebar	Contoh
Elemen tanpa pengaku	1	Sayap dari Profil I canal panas, pelat yang diproyeksikan dari profil I canal panas; kaki berdiri bebas dari sepasang siku disambung dengan kontak menerus, sayap dari kanal, dan sayap dari T	$b/t$	$0,56\sqrt{E/F_y}$	
	2	Sayap dari profil I tersusun dan pelat atau kaki siku yang diproyeksikan dari profil I tersusun	$b/t$	$0,64\sqrt{\frac{k_c E^{(a)}}{F_y}}$	
	3	Kaki dari siku tunggal, kaki dari siku ganda dengan pemisah, dan semua elemen tak-diperkaku lainnya	$b/t$	$0,45\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	4	stem dari T	$b/t$	$0,75\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Elemen tanpa pengaku	5	badan dari profil I simetris ganda dan kanal	$b/t$	$1,49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	6	dinding PSB persegi dan boks dari ketebalan merata	$b/t$	$1,40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	7	Pelat penutup sayap dan pelat diafragma antara deretan sarana penyambung atau las	$b/t$	$1,40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	8	Semua elemen diperkaku lainnya	$b/t$	$1,49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Tabel 2.23 Rasio tebal terhadap lebar untuk klasifikasi elemen pada batang tekan aksial (-lanjutan)

Elemen Batang	9	PSB bulat	$D/t$	$0,11 \frac{E}{F_y}$	
$k_c = \frac{4}{\sqrt{ht_w}}$ tetapi tidak boleh diambil kurang dari 0,35 maupun lebih besar dari 0,76 untuk tujuan perhitungan.					
$F_t = 0,7F_y$ untuk lentur sumbu major dari badan kompak dan nonkompak komponen struktur profil I tersusun $S_x/S_{xc} \geq 0,7$ ; $F_t = F_y S_x/S_{xc} \geq 0,5F_y$ untuk lentur sumbu major dari badan kompak dan nonkompak komponen struktur profil I tersusun dengan $S_x/S_{xc} < 0,7$ .					
$M_p$ = momen pada leleh serat terluar. $M_o$ = momen lentur plastis, kip-in. (N-mm) $E$ = modulus elastis baja = 29 000 ksi (200 000 MPa) $F_y$ = tegangan leleh minimum yang disyaratkan, ksi (MPa)					

Perilaku tekuk menjadi penyebab keruntuhan batang tekan, tekuk hanya terjadi pada elemen langsing dan yang memikul gaya tekan. Kondisi tekuk terjadi ketika elemen struktur mengalami deformasi tertentu, seperti terjadinya kehilangan kekakuan, dan terjadi pada keseluruhan penampang. Bentuk penampang mempengaruhi perilaku tekuk, ada tidaknya fenomena tekuk seperti gambar 2.47 antara lain :

- 1) Tekuk lentur atau *flexural buckling* (FB).
- 2) Tekuk torsi *torsional buckling* (TB).
- 3) Tekuk lentur torsi *flexural torsional buckling* (FTB).



Gambar 2.47 Bentuk penampang dan perilaku tekuk (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

Faktor kelangsingan merupakan tinjauan terhadap tekuk lentur, hampir semua elemen kolom mengalami tekuk lentur, namun jika kekakuan torsi penampang relatif kecil maka tekuk torsi akan terjadi terlebih dahulu.

Cara mudah untuk membayangkan kapasitas tekuk adalah dengan radius girasi  $r_{min}$ , yang dapat digunakan untuk menghitung radius girasi ekivalen terhadap tekuk torsi. Tekuk berpengaruh terhadap penampang elemen struktur mempunyai simetri lipat simetri ganda dan simetri tunggal.

Simetri ganda, pusat berat (c.g) berhimpit dengan pusat geser (c.s), sehingga untuk menunjukkan perilaku tekuk dengan membandingkan  $r_t$  sesuai persamaan 2.60 terhadap  $r_x$  atau  $r_y$  maka nilai  $r$  yang terkecil akan menunjukkan fenomena tekuk mana yang terjadi lebih dahulu, tekuk torsi atau tekuk lentur.




$$r_t = \sqrt{\frac{C_w + 0,04 x j x (KL)^2}{I_{ps}}} \dots\dots\dots (2.60)$$

Simetri tunggal, pusat berat (c.g) dan pusat geser (c.s) tidak berhimpit sehingga ada dua fenomena tekuk yang terjadi pada sumbu yang berbeda, tekuk lentur terhadap sumbu non-simetri atau tekuk lentur-torsi terhadap sumbu simetri penampangnya, untuk menunjukkan perilaku tekuk dengan membandingkan  $r_{tb}$  sesuai persamaan 2.61 terhadap  $r_x$  atau  $r_y$  maka nilai  $r$  yang terkecil akan menunjukkan fenomena tekuk mana yang terjadi lebih dahulu, tekuk lentur atau tekuk lentur-torsi






$$r_{tb} = \left(1 - \frac{y_0^2}{r_{ps}^2}\right) x r_{tb}^2 - (r_y^2 + r_t^2) x r_{tb}^2 + r_y x r_t^2 = 0 \dots\dots\dots (2.61)$$

Untuk mempermudah menentukan perilaku tekuk dari pengaruh bentuk penampang dan faktor kelangsingan, maka sesuai ketentuan (BSN, SNI 1729-2015, pada tabel E1.1) melalui tabel 2.24 mengklasifikasikan perilaku tekuk.

Tabel 2.24 Pemilihan perilaku tekuk terhadap bentuk penampang

Penampang Melintang	Tanpa Elemen Langsing		Dengan Elemen Langsing	
	Penampang pada Bab E	Keadaan Batas	Penampang pada Bab E	Keadaan Batas
	E3 E4	FB TB	E7	LB FB TB
	E3 E4	FB FTB	E7	LB FB FTB
	E3	FB	E7	LB FB

Tabel 2.24 Pemilihan perilaku tekuk terhadap bentuk penampang  
(lanjutan)

Penampang Melintang	Tanpa Elemen Langsing		Dengan Elemen Langsing	
	Penampang pada Bab E	Keadaan Batas	Penampang pada Bab E	Keadaan Batas
	E3	FB	E7	LB FB
	E3 E4	FB FTB	E7	LB FB FTB
	E6 E3 E4	FB FTB	E6 E7	LB FB FTB
	E5		E5	
	E3	FB	N/A	N/A
Bentuk tidak smetris selain siku tunggal	E4	FTB	E7	LB FTB

FB = tekuk lentur, TB = tekuk torsi, FTB = tekuk torsi-lentur, LB = tekuk lokal

Konsep perencanaan tekuk  $P_{cr}$ , dirumuskan oleh Leonard Euler tahun 1744, sesuai persamaan 2.62, dengan menghubungkan parameter geometri ( $L$ ,  $A$ ,  $I$ ), material ( $E$ ), dan beban aksial ( $P$ ), pada tinjauan kolom ideal batang lurus sempurna, pada gambar 2.48.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L^2} \dots \dots \dots (2.62)$$



Gambar 2.48 Model kolom ideal dari Euler (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

Konsep kolom ideal digunakan untuk mengevaluasi kolom dengan kondisi tumpuan lain, dengan cara membuat konversi panjang kolom real ( $L$ ) menjadi kolom efektif ( $KL$ ) dengan  $k$  adalah faktor konversinya sesuai tabel 2.25, maka dengan panjang efektif rumus tekuk Euler dapat dipakai dengan parameter  $L$  diganti  $KL$  untuk penyesuaian kondisi tumpuan.

Tabel 2.25 Konsep panduan efektif dan daya dukung kolom (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016)

Bentuk tekuk kolom diperlihatkan sebagai garis putus-putus	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Nilai K teoritis	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Rekomendasi nilai K untuk desain jika kondisi ideal hanya berupa pendekatan	0.65	0.8	1.2	1.0	2.1	2.0
Notasi kondisi ujung						

Rumus tekuk euler hanya dapat memprediksi kolom pada kondisi elastis, yaitu kondisi tegangan sebelum mencapai batas proporsionalnya, maka perlu evaluasi dalam format tegangan hingga mencapai tegangan kritis kritis sesuai persamaan 2.63.

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{P_{cr}}{A \times (KL)^2} = \frac{\pi^2}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \dots \dots \dots (2.63)$$

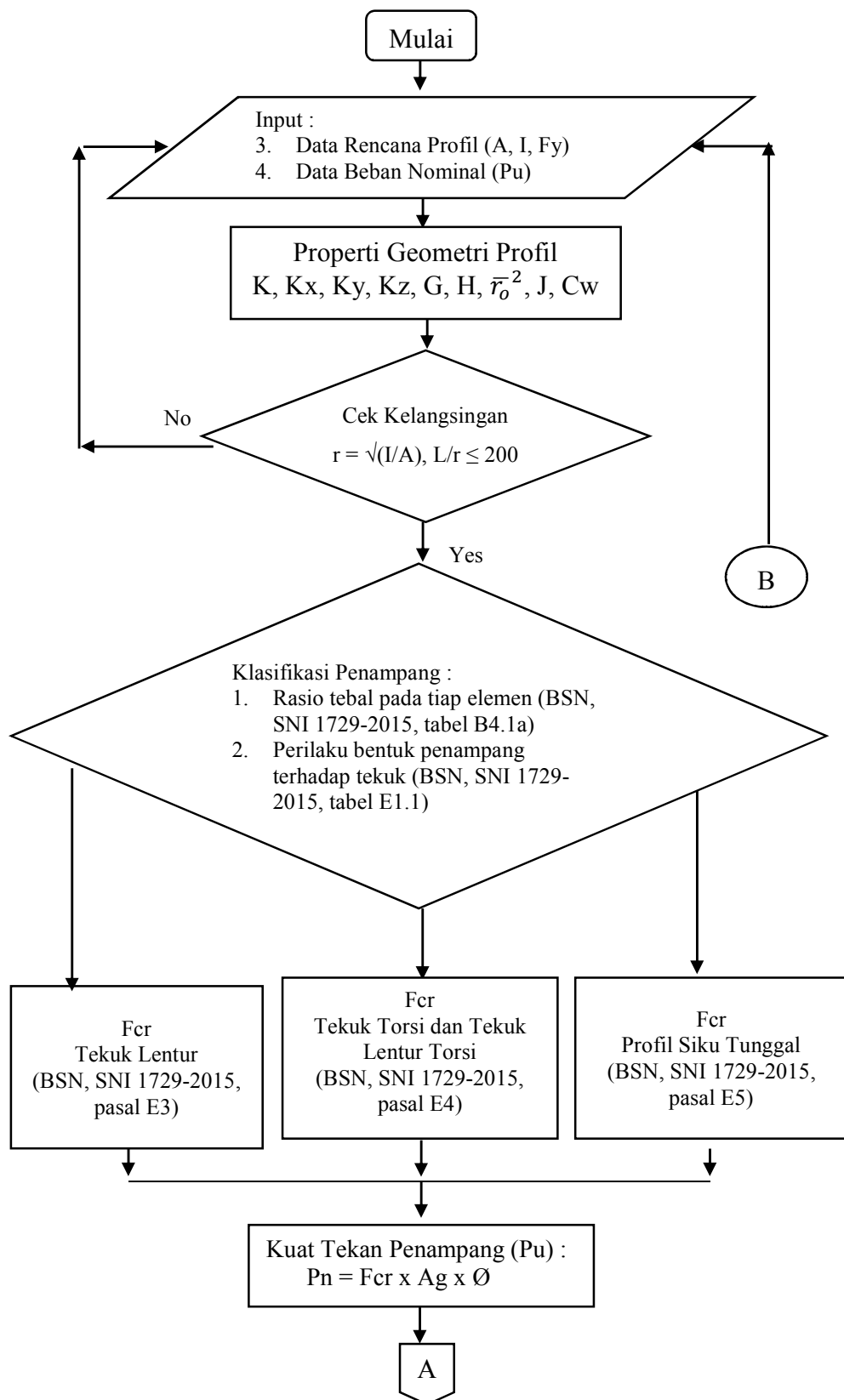
Dasar menentukan kuat tekan nominal perencanaan baja sesuai persamaan 2.64, adalah luas penampang utuh atau gross ( $A_g$ ) dijadikan konstan dengan variable pengali tegangan kritis ( $F_{cr}$ ).

$$P_n = F_{cr} \times A_g \dots \dots \dots (2.64)$$

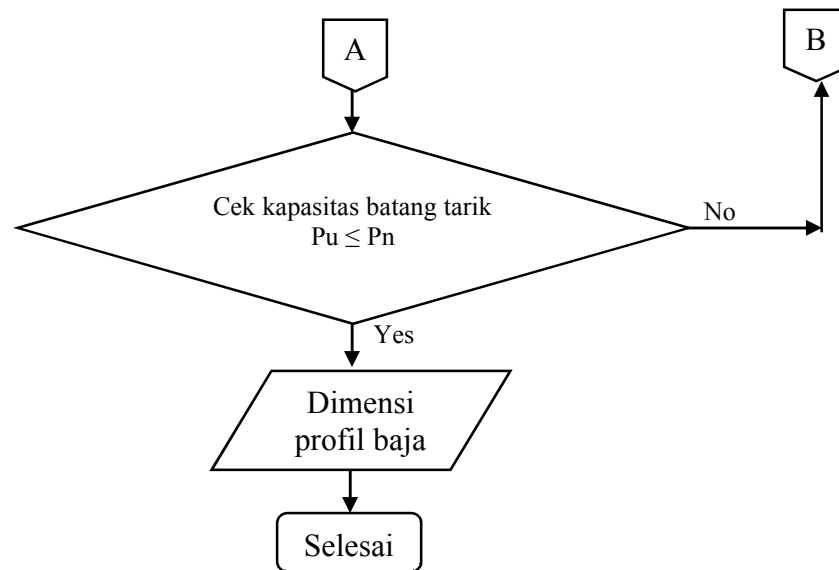
Tegangan kritis dihitung berdasarkan perilaku terkuk, yang tentunya berbeda-beda dalam menentukan besarnya  $F_{cr}$ . Kondisi tegangan ini terjadi ketika sumbu aksial batang diberi beban tekan hingga mencapai kondisi kritis (kondisi sesaat sebelum batang mengalami tekuk atau beban aksial maksimum yang mampu ditahan penampang).

Adapun langkah-langkah untuk analisis batang tekan ditunjukkan pada gambar 2.49





Gambar 2.49 Diagram alir perencanaan batang tekan.



Gambar 2.49 Diagram alir perencanaan batang tekan (-lanjutan).

### 3. Sambungan *belt-truss* dengan kolom

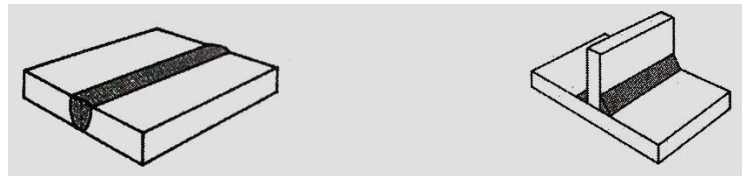
Elemen struktur sambungan *belt-truss* dengan kolom eksterior didesain menggunakan sambungan tipe *simple connector*, yang terdiri dari elemen profil *belt-truss*, pelat landas, dan angkur. Untuk menghubungkan elemen *belt-truss* dengan elemen kolom yang terbuat dari beton, maka akan dipakai pelat landas dengan sistem pengankuran dan untuk menghubungkan elemen *belt-truss* dengan pelat landas memakai sambungan las.

Untuk mengalihkan gaya momen internal dari suatu komponen struktur ke komponen lain, sehingga pembebanan dapat diteruskan ke kolom, perlu dibutuhkan sambungan yang direncanakan minimal sama atau lebih besar dari gaya internal yang terjadi atau sekuat profil yang disambung. Jenis-jenis alat sambung bermacam-macam ada baut, paku keling, dan las. Karena sambungan las sangat murah, kekuatannya lebih baik, dan dapat dikontrol di bawah mutu yang tepat.

#### a) Sambungan las.

Sambungan las merupakan penyambungan logam yang relatif sempurna, seakan-akan menjadi satu-kesatuan, oleh karena itu sambungan las salah satu cara yang dapat dipakai menyambung pada elemen profil tertutup. Proses penyambungan las dengan membuat

bagian yang disambung melebur menjadi satu kesatuan dengan bahan pengisi (kawat las atau *electrode*). Pemasangan las memiliki banyak variasi terhadap keperluan pelaksanaannya, seperti pada gambar 2.47 antara lain :



Gambar 2.50 Jenis las ditinjau dari segi pemasangannya  
(Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

1) Las tumpul.

Las tumpul pada gambar 2.50 kiri, bisa dikerjakan pada bagian penampang langsung, kedua ujung elemen melebur dan tersambung menjadi satu-kesatuan.

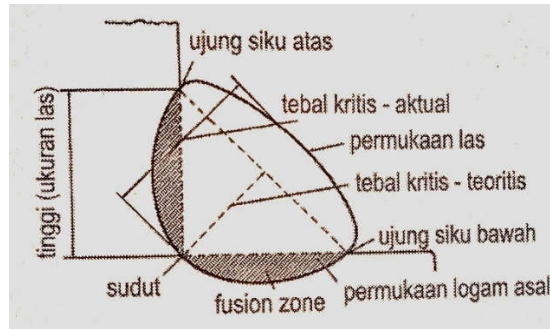
2) Las sudut.

Las sudut pada gambar 2.50 kanan, orientasi las yang tidak langsung karena las sudut berada diluar, menyebabkan tegangan internal las menyebabkan tegangan geser, yang kapasitasnya lebih rendah dibandingkan tegangan tarik, maka pemilihan sambungan las sudut, perlu direncanakan (dihitung) terlebih dahulu, apakah ketebalan las mencukupi.

Menentukan ukuran las sudut dan tebal minimum suatu pelat maka berdasarkan (BSN, SNI 1729-2015, pada tabel J2.4) melalui tabel 2.26 memberikan ukuran minimum las sudut pada suatu ketebalan pelat, dan untuk petunjuk praktis cukup disediakan las sudut minimal 75% dari ketebalan pelat, seperti gambar 2.51.

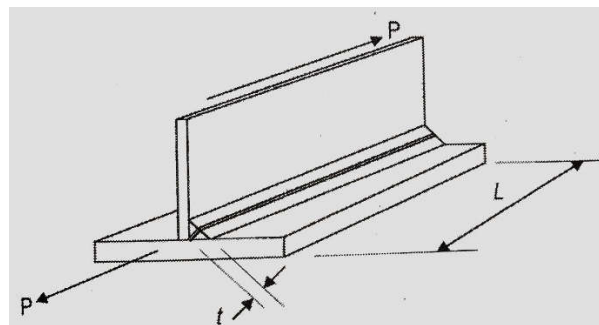
Tabel 2.26 Tinggi las sudut minimum

Tebal Pelat Sambung Terkecil	Las Sudut Minimum
$\leq 6$ mm	3 mm
6 mm - 13 mm	5 mm
13 mm -19 mm	6 mm
$> 19$ mm	8 mm



Gambar 2.51 Karakter penampang las sudut (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

Prinsip perhitungan las, yang terpenting penampang las sudut yang dilas dapat berbentuk segitiga dari tinggi segitiga atau tebal kritis (garis putus-putus pada gambar 2.51). Pada gambar 2.52 parameter untuk mencari tegangan geser, sesuai ketentuan (BSN, SNI 1729-2015, pada pasal J.2-3) melalui persamaan 2.65.



Gambar 2.52 Dimensi las sudut untuk perhitungan tegangan geser (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

$$R_n = F_{nw} \times A_{we} \dots \dots \dots (2.65)$$

Untuk parameter  $F_{nw}$  berdasarkan kuat tarik kawat las, sebagai berikut :

E60<sub>xx</sub>, untuk  $F_{EXX} = 430$  Mpa.

E70<sub>xx</sub>, untuk  $F_{EXX} = 490$  Mpa.

E80<sub>xx</sub>, untuk  $F_{EXX} = 550$  Mpa.

E60<sub>xx</sub>, untuk  $F_{EXX} = 430$  Mpa.

Untuk parameter  $A_{we}$  adalah luas penampang efektif, pada gambar 2.52 parameter  $A_{we}$  adalah  $A_{we} = t \times L$ .

b) Sambungan baja ke beton.

(Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016) *Base-plate* merupakan pelat landas yang didesain untuk transfer gaya tekan dan momen dari struktur baja, yang relatif lebih kuat ke struktur beton, yang lemah tanpa menimbulkan kerusakan.

Detail base-plate tergantung gaya yang diahlikan, jika gaya tekan maka butuh pelat landas, agar tegangan beton dibawahnya relatif kecil akibat beban terpusat, sehingga gaya tekan perlu didistribusikan merata dengan pelat landas yang tebal.

Detail base-plate untuk mengalihkan momen, agar tidak terangkatnya base-plate dan untuk mengatasi gaya friksi pada pelat landas maka perlu angkur baut.

a. Base-plate

Untuk memodelkan tegangan beton yang terjadi di bawah pelat landas, yang memikul gaya tekan dan momen, ada dua pendekatan yaitu bentuk tegangan segitiga (berdasarkan kondisi elastis) dan bentuk tegangan persegi (berdasarkan kondisi batas, ultimate). Untuk perencanaan kondisi batas menghasilkan pelat landas yang lebih tipis  $\pm 2/3$  dari perencanaan kondisi elastis. Maka untuk menghindari keruntuhan base-plate akibat terjadinya lentur pada pelat yang relatif kecil sehingga pendekatan metode segitiga dinilai yang paling efektif.

1. Kuat tumpu beton.

Gaya aksial tekan diteruskan base-plate ke beton sesuai kriteria (BSN, SNI 1729-2015, pada pasal J8) melalui persamaan 2.66.

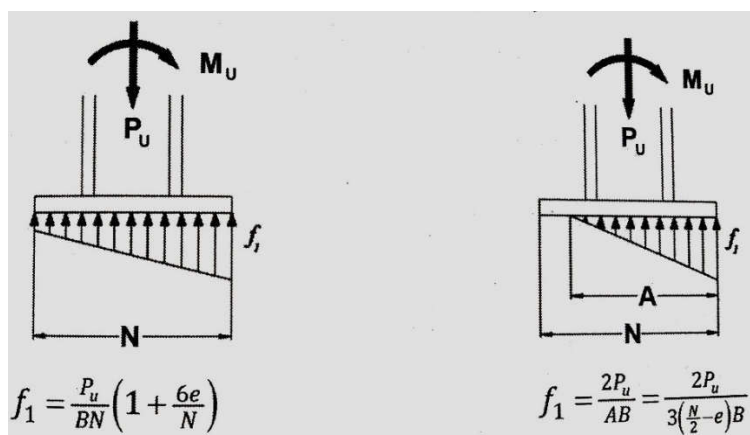
$$P_p = 0,85 \times F_c' \times A_1 \times \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 \times F_c' \times A_1 \dots\dots\dots(2.66)$$

Untuk parameter  $\sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$  diambil 1

2. Tekan konsentris.

Pada gambar 2.53, dimensi pelat landas (B x N) harus dipilih agar beton dibawahnya tidak rusak, yang bertumpu langsung

pada beton, sesuai persamaan 2.67, sehingga kuat perlu pada pelat landas dapat ditentukan dengan persamaan 2.68.



Gambar 2.53 Base-plate terhadap beban tekan konsentris  
(Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

$$f_p = \frac{P_u}{B \times N} \leq f_{p\text{maks}} \dots\dots\dots (2.67)$$

$$M_{pl} = \frac{1}{2} \times f_p \times l^2 \dots\dots\dots (2.68)$$

Untuk parameter  $l^2$  ditentukan berdasarkan persamaan 2.69 untuk parameter  $m$ , persamaan 2.70 untuk parameter  $n$ , persamaan 2.71 untuk parameter  $\lambda n'$ , dari ketiga parameter di atas ditentukan  $l^2$  yang paling kecil.

$$m = \frac{N - 0,95 \times d}{2} \dots\dots\dots (2.69)$$

$$n = \frac{B - 0,8 \times b_f}{2} \dots\dots\dots (2.70)$$

$$\lambda n' = \frac{1}{4} \times \lambda \times \sqrt{d \times b_f} \dots\dots\dots (2.71)$$

$$\lambda = \frac{2 \times \sqrt{X}}{1 + \sqrt{1 - X}} \leq 1 \dots\dots\dots (2.72)$$

$$X = \left( \frac{4 \times d \times b_f}{(d + b_f)^2} \right) \times \frac{P_u}{\phi_c \times P_p} \dots\dots\dots (2.73)$$

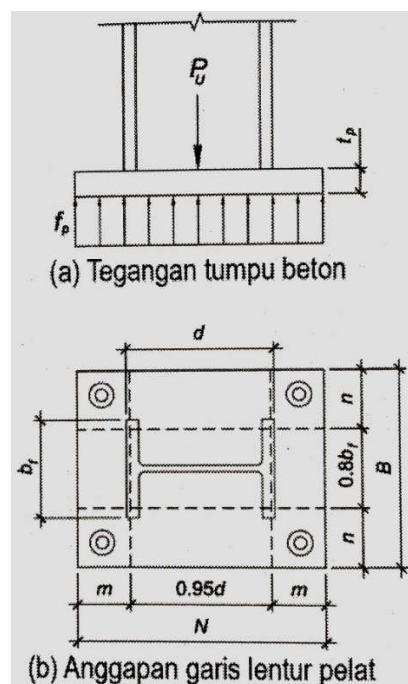
Untuk kondisi batas leleh, tebal minimum pelat landas sesuai persamaan 2.74.

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4 \times M_{pl}}{\phi \times f_y}} \dots\dots\dots (2.74)$$

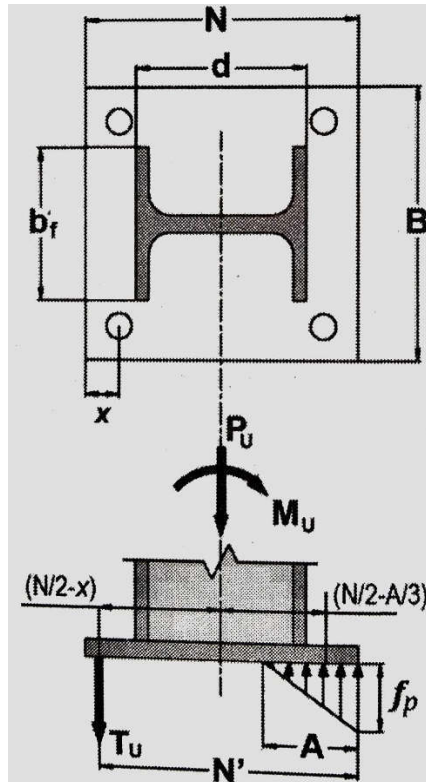
3. Tegangan beton persegi dengan momen besar disertai angkur.

Pendekatan tegangan tumpu beton, pada kondisi elastis (segitiga) dipilih karena memberikan gambaran rasional tentang efek eksentrisitas ( $e$ ), yang mengakibatkan tegangan maksimum dan minimum terhadap gaya tekan  $P_u$  pada base-plate pada gambar 2.54. Tegangan tarik pada beton dianggap tidak bekerja, untuk menghindari gaya guling yang disebabkan oleh eksentrisitas dan gaya  $P_u$  yang besar, maka dipasang baut angkur agar menahan gaya tarik sebesar  $T_u$  seperti pada gambar 2.55.

Mencari parameter  $T_u$  dan  $A$  dipergunakan keseimbangan vertikal dan momen dengan persamaan 2.76, untuk mencari  $A$  yang kemudian dilakukan pengecekan dengan menggunakan persamaan 2.77.



Gambar 2.54 Distribusi tegangan segitiga akibat eksentrisitas kecil (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).



Gambar 2.55 Distribusi tegangan segitiga akibat eksentrisitas besar (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

$$T_u + P_u = \frac{1}{2} \times f_p \times A \times B \dots\dots\dots (2.75)$$

$$P_u \times \left(\frac{N}{2} - xx\right) + M_u = \frac{1}{2} \times f_p \times A \times B \times \left(N - xx - \frac{A}{3}\right) \dots\dots\dots (2.76)$$

$$A = \frac{f' \pm \sqrt{f'^2 - \frac{2}{3} \times f_b \times B \times (P_u \times A' + M_u)}}{\frac{1}{3} \times f_b \times B} \dots\dots\dots (2.77)$$

Untuk parameter f' sesuai persamaan 2.78

$$f' = \frac{1}{2} \times f_b \times B \times (N - xx) \dots\dots\dots (2.78)$$

Untuk parameter A' sesuai persamaan 2.79

$$A' = \frac{N}{2} - xx \dots\dots\dots (2.79)$$

Nilai parameter  $A \leq N'$ , tetapi kalau tidak memenuhi maka ukuran pelat landasan tidak mencukupi, gaya tarik baut angkur sesuai persamaan 2.80.

$$T_u \geq \frac{1}{2} \times f_p \times A \times B - p_u \dots\dots\dots (2.80)$$



b. Baut angkur

Pemasangan baut angkur untuk base-plate adalah keharusan. Menurut (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016) untukantisipasi gaya tarik atau geser tak terduga akibat gempa dan angin, minimum pemasangan angkur baut adalah empat baut. Jenis angkur berdasarkan cara pemasangannya terdapat dua cara : yaitu cor ditempat dan pasca pasang. Kedua jenis baut tersebut memiliki pola keruntuhan masing-masing terhadap gaya tarik dan geser.

Berdasarkan pola keruntuhan, maka kondisi batas perlu dievaluasi untuk perencanaan baut angkur sebagai berikut :

1. Kuat baut angkur terhadap tarik.

Kuat tarik rencana baut angkur,  $N_{sa}$ , ditentukan dari mutu bahan material dan dimensi fisik, yang dihitung melalui persamaan 2.81.

$$N_{sa} \geq A_{se,N} \times f_{uta} \dots\dots\dots (2.81)$$

Untuk parameter  $A_{se,N}$  dapat dihitung berdasarkan nilai terkecil dari persamaan 2.82 dan persamaan 2.83.

$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \times \left( d_a - \frac{0,9784}{n_t} \right)^2 \dots\dots\dots (2.82)$$

$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \times (d_a - 0,9382 \times P)^2 \dots\dots\dots (2.83)$$

2. Kuat jebol beton terhadap tarik (*breakout*).

Kuat jebol nominal terhadap tarik dari baut angkur kelompok, dapat dihitung melalui persamaan 2.84.

$$N_{cbg} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \times \Psi_{ec,N} \times \Psi_{ed,N} \times \Psi_{c,N} \times \Psi_{cP,N} \times N_b \dots\dots\dots (2.84)$$

Untuk parameter pendukung  $N_{cbg}$  sebagai berikut :

- a) Luas proyeksi kerusakan beton pada baut angkur tunggal, melalui persamaan 2.85 dengan syarat  $C_{a1} < 1,5h_{ef}$  dan  $S_1 < 3 h_{ef}$ .

$$A_{nc} = (C_{a1} + S_1 + 1,5h_{ef}) \times ((C_{a2} + S_2 + 1,5h_{ef})) \dots\dots (2.85)$$

- b) Bentuk keruntuhan beton, dihitung melalui persamaan 2.86.

$$A_{nco} = 9h_{ef}^2 \dots\dots\dots (2.86)$$

- c) Faktor modifikasi kuat tarik baut angkur kelompok dengan beban yang eksentrisitas, dihitung melalui persamaan 2.87.

$$\Psi_{ec,N} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2e/n}{3 \times h_{ef}}\right)} \leq 1,0 \dots\dots\dots (2.87)$$

- d) Faktor modifikasi untuk memperhitungkan pengaruh baut angkur dibagian pinggir fondasi, dapat dihitung melalui persamaan 2.88.

$$\Psi_{ed,N} = 0,7 + 0,3 \frac{C_{a, \min}}{1,5 \times h_{ef}} \leq 1,0 \dots\dots\dots (2.88)$$

- e) Pengaruh beban kerja terhadap kuat tekan tarik baut angkur.

$\Psi_{c,N} = 1$  untuk keadaan terjadi keretakan saat pemasangan

$\Psi_{c,N} = 1,25$  untuk keadaan tidak terjadi keretakan saat pemasangan

$\Psi_{c,N} = 1,45$  untuk keadaan cor ditempat

- f) Tegangan tarik belah pada baut angkur, pasca pasang pada beton polos, dapat dihitung melalui persamaan 2.89.

$$\Psi_{cp,N} = \left( \frac{C_{a, \min}}{C_{ac}} \leq \frac{15 \times h_{ef}}{C_{ac}} \right) \leq 1,0 \dots\dots\dots (2.89)$$

- g) Kuat dasar jebol untuk baut angkur kepala segi enam dan cor ditempat di mana  $280 \text{ mm} \leq h_{ef} \leq 635 \text{ mm}$ , dapat dihitung melalui persamaan 2.90.

$$N_b = 3,9 \times \lambda_a \times \sqrt{f_c'} \times h_{ef}^{\frac{5}{3}} \dots\dots\dots (2.90)$$

3. Kuat cabut baut angkur dari beton (*pullout*).

Kuat cabut rencana terhadap gaya tarik, untuk baut cor ditempat pasca pasang bertarik, tidak lebih besar dari persamaan 2.91.

$$N_{pn} = \Psi_{c,p} \chi N_p \dots\dots\dots (2.91)$$

Untuk kuat cabut tarik untuk baut angkur L dan J angkur tipe cor ditempat, dapat dihitung melalui persamaan 2.92.

$$N_p = 4,05 f_c' \dots\dots\dots (2.92)$$

4. Kuat ambrol muka samping beton terhadap tarik (*blowout*)

Kuat ambrol muka samping (*side face blowout*) rencana beton terhadap tarik, diisyaratkan evaluasi jika  $h_{ef} > 2,5 C_{a1}$  dan spasi

antar angkur kurang dari 6  $C_{a1}$ , maka kuat nominal angkur kelompok yang aman terhadap ambrol samping diambil tidak melebihi, melalui persamaan 2.93.

$$N_{sbg} = \left(1 + \frac{S}{6 \times C_{a1}}\right) \times N_{sb} \dots\dots\dots(2.93)$$

Untuk parameter  $N_{sb}$  jika baut angkur yang dipasang pada posisi pinggir fondasi melebihi  $h_{ef} > 2,5$  maka untuk mencari  $N_{sbg}$  cukup dengan  $N_{sb}$  melalui persamaan 2.94.

$$N_{sb} = 13 \times C_{a1} \times \sqrt{A_{brg}} \times \lambda_a \times \sqrt{F_c'} \dots\dots\dots(2.94)$$

5. Kuat baut angkur terhadap geser

Kuat baut angkur terhadap geser, tergantung dari bahan material dan dimensinya, melalui persamaan 2.95.

$$V_{sa} = 0,60 \times A_{Se,v} \times F_{uta} \dots\dots\dots(2.95)$$

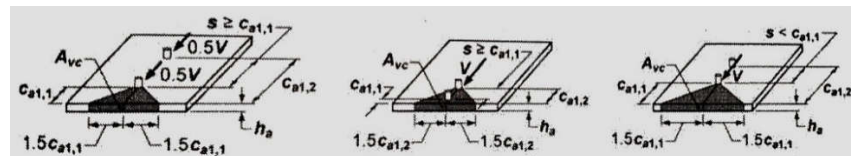
6. Kuat jebol beton terhadap geser (*breakout*)

Kuat jebol beton rencana, terhadap geser dari baut angkur kelompok, dihitung melalui persamaan 2.96.

$$V_{cbg} = \frac{A_{vc}}{A_{vco}} \times \Psi_{ec,v} \times \Psi_{ed,v} \times \Psi_{c,v} \times \Psi_{h,v} \times V_b \dots\dots\dots(2.96)$$

Untuk parameter pendukung  $V_{cbg}$ , sebagai berikut :

- a) Luas proyeksi kerusakan beton terhadap geser dari baut angkur tunggal atau kelompok, melalui persamaan 2.97 dan untuk ilustrasi parameter luas proyeksi kerusakan beton melalui gambar 2.56.

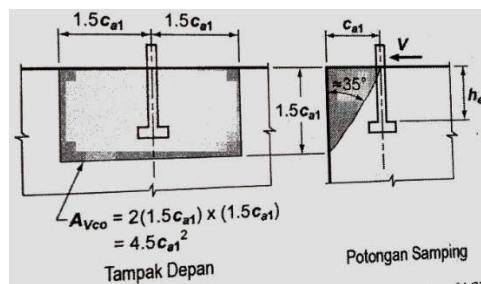


Gambar 2.56 Ilustrasi luas proyeksi kerusakan dari baut angkur (Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

$$A_{vc} = (2 \times 1,5 \times C_{a1,1} + S_2) \times 1,5 \times C_{a1,1} \dots\dots\dots(2.97)$$

- b) Luas proyeksi kerusakan beton terhadap geser dari baut angkur tunggal, untuk perhitungan dan dipengaruhi dari posisi baut pinggir atau pojokan, spasi dan ketebalan,

dihitung melalui persamaan 2.102, untuk ilustrasi parameter luas kerusakan beton melalui gambar 2.98.



Gambar 2.57 Ilustrasi luas proyeksi maksimum  
(Dewobroto, Struktur Baja Edisi ke-2, 2016).

$$A_{vco} = 4,5 \times C_{a1}^2 \dots\dots\dots (2.98)$$

- c) Faktor modifikasi kuat geser baut angkur kelompok dengan beban yang eksentrisitas, dihitung melalui persamaan 2.99.

$$\Psi_{ec,v} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2e/n}{3 \times C_{a1}}\right)} \leq 1,0 \dots\dots\dots (2.99)$$

- d) Faktor modifikasi untuk memperhitungkan pengaruh baut angkur dibagian pinggir fondasi, dihitung melalui persamaan 2.100.

$$\Psi_{ed,v} = 0,7 + 0,3 \frac{C_{a2}}{1,5 \times C_{a1}} \leq 1,0 \dots\dots\dots (2.100)$$

- e) Pengaruh beban kerja terhadap kuat geser baut angkur  
 $\Psi_{c,v} = 1$  untuk keadaan terjadi keretakan saat pemasangan  
 $\Psi_{c,v} = 1,4$  untuk keadaan tidak terjadi keretakan saat pemasangan

$\Psi_{c,v} = 1,2$  untuk keadaan tulangan yang terdapat pada fondasi hanya tulangan memanjang

- f) Faktor modifikasi kuat geser baut angkur, jika dipasang pada elemen beton dengan tebal  $h_a \leq C_{c1}$ , dapat dihitung melalui persamaan 2.101.

$$\Psi_{h,v} = \sqrt{\frac{1,5 \times C_{a1}}{h_a}} \geq 1,0 \dots\dots\dots (2.101)$$

- g) Kuat dasar jebol terhadap gaya geser dari baut angkur tunggal pada beton yang telah mengalami retak, dapat

dihitung melalui dua persamaan dan dipilih nilai yang terkecil dari kedua persamaan 2.102 dan persamaan 2.103.

$$V_b = 0,6 \times \left(\frac{l_e}{d_a}\right)^{0,2} \times \sqrt{d_a} \times \lambda_a \times \sqrt{f_c'} \times C_{a1}^{1,5} \dots\dots\dots(2.102)$$

$$V_b = 3,7 \times \lambda_a \times \sqrt{f_c'} \times C_{a1}^{1,5} \dots\dots\dots(2.103)$$

7. Kuat ambrol muka samping beton terhadap geser (*blowout*)

Kuat beton rencana baut angkur kelompok, dihitung melalui persamaan 2.104.

$$V_{cpg} = K_{cp} \times N_{cp} \dots\dots\dots(2.104)$$

Untuk parameter  $K_{cp}$  berdasarkan ketebalan  $h_{ef}$

$$K_{cp} = 1 \text{ untuk } h_{ef} < 65 \text{ mm} \qquad K_{cp} = 2 \text{ untuk } h_{ef} > 65 \text{ mm}$$

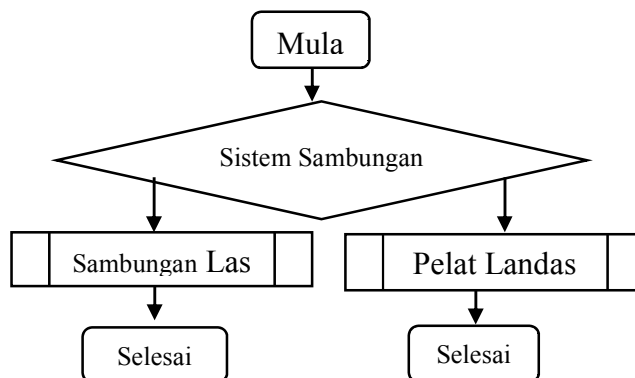
Untuk parameter  $K_{cp}$  berdasarkan ketebalan  $h_{ef}$

8. Interaksi gaya tarik dan gaya geser

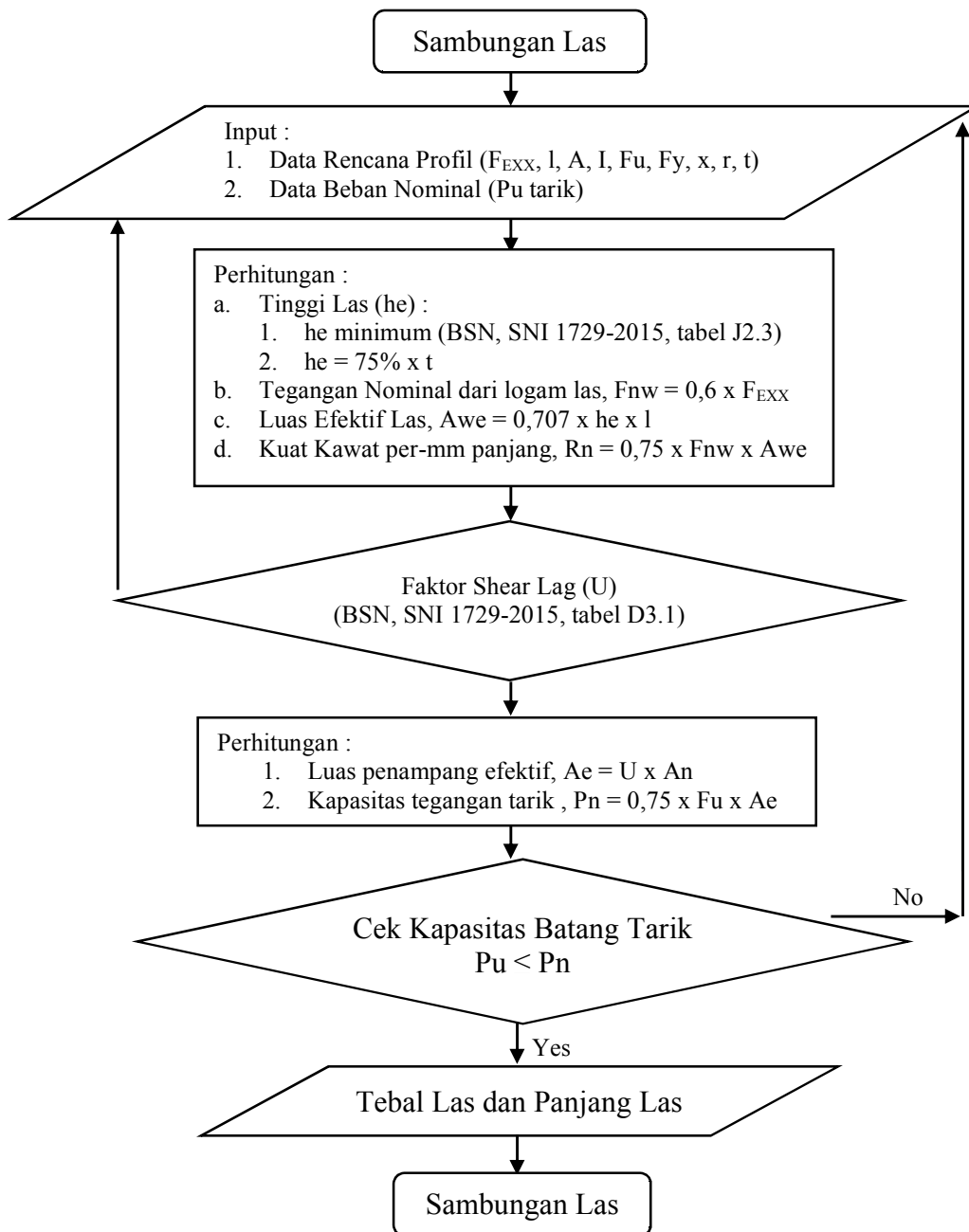
Gaya tarik dan geser bisa terjadi sekaligus, kedua gaya tersebut mempunyai rasio gaya perlu dibandingkan kuat rencannya lebih kecil dari 20%, maka gaya yang lain bisa bekerja secara maksimum tanpa terjadi interaksi keduanya. Rasio gaya perlu dapat dihitung melalui persamaan 2.105.

$$\frac{N_{ua}}{\phi N_n} + \frac{V_{ua}}{\phi V_n} \leq 1,2 \dots\dots\dots(2.105)$$

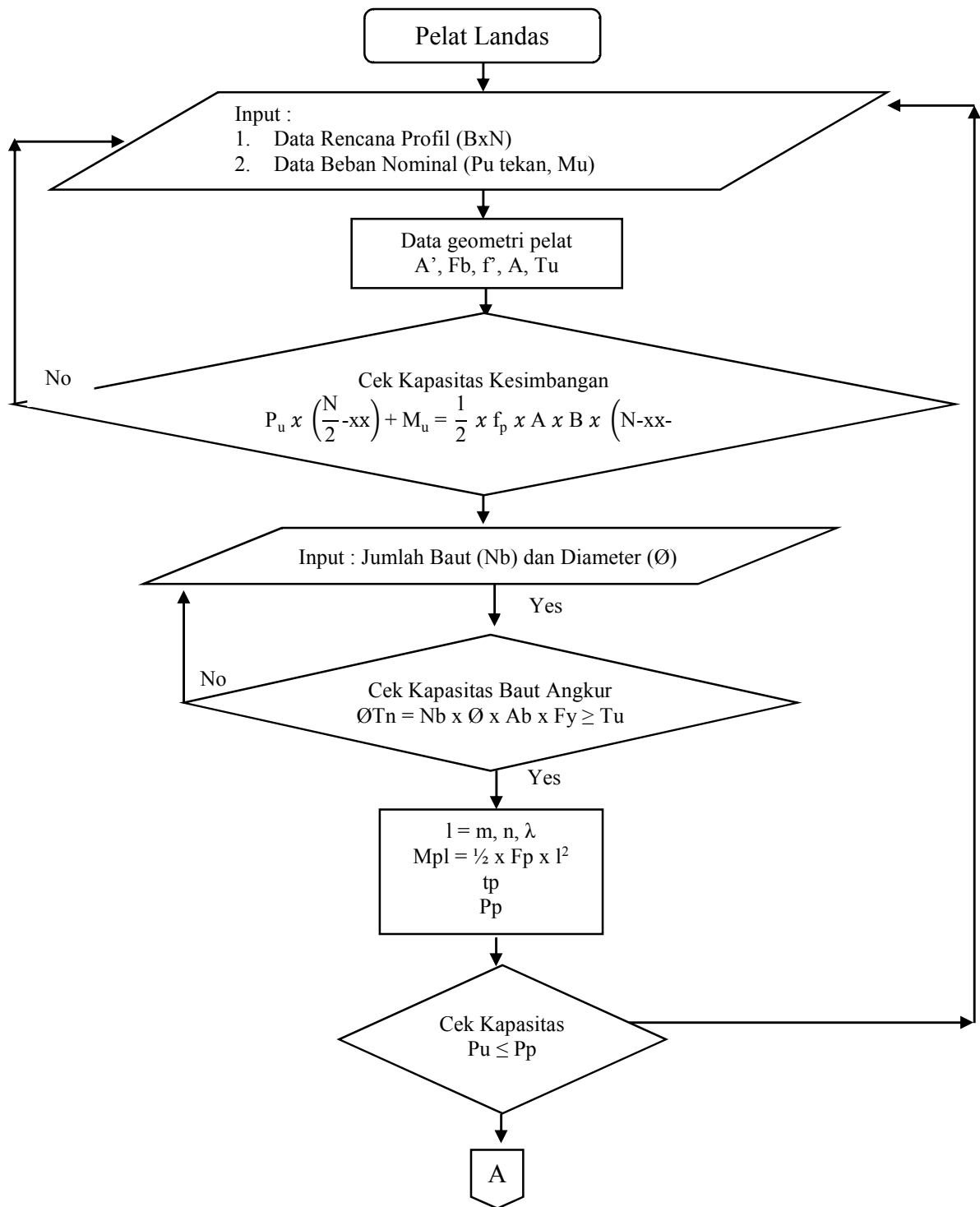
Adapun langkah-langkah untuk analisis sambungan *belt-truss* dengan kolom ditunjukkan pada gambar 2.58.



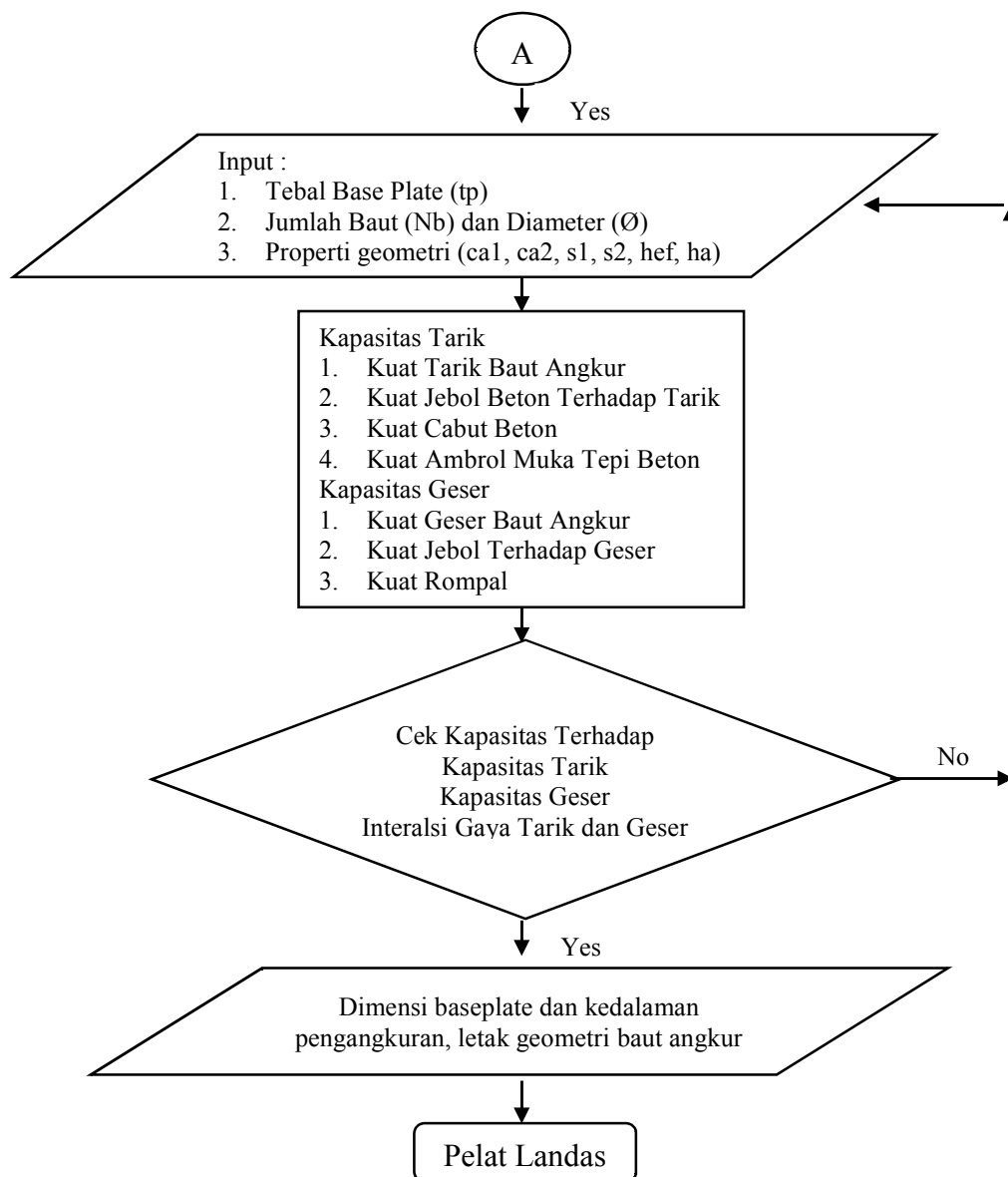
Gambar 2.58 Diagram alir perencanaan sambungan *belt-truss*.



Gambar 2.58 Diagram alir perencanaan batang tarik (-lanjutan).



Gambar 2.58 Diagram alir perencanaan batang tarik (-lanjutan).



Gambar 2.58 Diagram alir perencanaan batang tarik (-lanjutan).