

Terbit online pada laman web jurnal : <http://jurnal.sttp-yds.ac.id>
SAINSTEK
(e-Journal)

| ISSN (Print) 2337-6910 | ISSN (Online) 2460-1039 |



Pengaruh Klasifikasi Kelas Situs Menurut SNI 1726-2019 Terhadap Keruntuhan Progresif Pada Struktur Gedung Tidak Beraturan

Raja Syarif S^a, Zulfikar Djauhari^b, Ridwan^c

^a Universitas Riau, Kampus Bina Widya Jl. HR. Soebrantas KM 12,5, Pekanbaru, 28293, Indonesia

^b Universitas Riau, Kampus Bina Widya Jl. HR. Soebrantas KM 12,5, Pekanbaru, 28293, Indonesia

^c Universitas Riau, Kampus Bina Widya Jl. HR. Soebrantas KM 12,5, Pekanbaru, 28293, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 19 Agustus 2021

Revisi Akhir: 25 November 2021

Diterbitkan Online: 15 Desember 2021

KATA KUNCI

Keruntuhan progresif, struktur tidak beraturan, DCR, BMR, *Robustness Indicator*

KORESPONDENSI

Telepon: +62 823-8621-1343

E-mail: raja.syarif5793@student.unri.ac.id

ABSTRACT

Seiring perkembangan teknologi konstruksi gedung, pembangunan gedung bertingkat dengan struktur tidak beraturan semakin bertambah demi memenuhi aspek estetika gedung maupun akibat keterbatasan lahan. Bentuk struktur tidak beraturan ini berpengaruh terhadap keruntuhan progresif gedung. Selain aspek desain, pada perencanaan gedung beban gempa harus direncanakan dengan peraturan baru yang berlaku yaitu SNI 1726-2019. Salah satu perubahan yang terjadi pada SNI 1726-2019 adalah klasifikasi kelas situs. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh klasifikasi kelas situs terhadap keruntuhan progresif struktur gedung tidak beraturan. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis elemen struktur berupa kolom dan balok sebelum dan sesudah menghilangkan salah satu kolom struktur berpedoman pada *General Services Administration (GSA)* dengan beban gempa yang bekerja beban gempa statik ekuivalen pada keempat klasifikasi kelas situs yaitu SB (Batuan), SC (Tanah keras), SD (Tanah sedang) dan SE (Tanah lunak). Pemeriksaan kekuatan struktur menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga untuk mengetahui nilai *Demand Capacity Ratio (DCR)*, *Bending Moment Ratio (BMR)* dan *Robustness Indicator (R)*. Struktur dikatakan mengalami keruntuhan progresif apabila nilai DCR > 1,5. Dari hasil analisis diketahui nilai DCR dari kelas situs SB ke kelas situs SE mengalami kenaikan sedangkan nilai BMR mengalami penurunan. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa keruntuhan progresif tidak terjadi pada keempat kasus kegagalan kolom dan perbedaan kelas situs terhadap gaya aksial dan momen, namun terjadi terhadap gaya geser. Nilai *Robustness Indicator (R)* yang didapat mendekati sama dengan satu ($R \approx 1$), nilai tersebut mengindikasikan bahwa penyaluran beban berjalan dengan normal.

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dasawarsa terakhir, perkembangan teknologi konstruksi gedung bertingkat semakin meningkat beriringan dengan banyaknya pembangunan gedung struktur tidak beraturan. Gedung struktur tidak beraturan menjadi pilihan dikarenakan untuk memenuhi aspek estetika agar bangunan gedung tidak monoton pada bentuk persegi maupun persegi panjang dan juga akibat adanya keterbatasan lahan. Bentuk struktur gedung yang tidak beraturan ini sangat berpengaruh terhadap

keruntuhan bangunan gedung dibandingkan struktur yang beraturan.

Keruntuhan progresif (*progressive collapse*) merupakan suatu keruntuhan diakibatkan oleh keruntuhan dari satu atau lebih elemen struktur yang menyebabkan keruntuhan beruntun dari elemen sebelahnya sehingga dapat mengakibatkan keruntuhan pada sebagian besar atau keseluruhan dari struktur tersebut [1]. Keruntuhan progresif biasanya terjadi karena faktor seperti gempa, ledakan atau kebakaran, ini berlanjut dengan keruntuhan berantai pada elemen struktur lainnya hingga keruntuhan total bangunan. Salah satu contoh keruntuhan progresif

adalah keruntuhan gedung Plasco di Tehran yang disebabkan karena kebakaran elemen struktur gedung berupa balok, kolom, pelat lantai maupun dinding serta perencanaan ketahanan gempa untuk struktur gedung berpengaruh terhadap keruntuhan progresif yang terjadi [2]. Oleh karena itu struktur harus didesain sesuai dengan peraturan yang berlaku terutama peraturan baru. Peraturan baru yang ditetapkan pemerintah terkait perencanaan struktur bangunan gedung yaitu SNI 2847-2019 tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan dan SNI 1726-2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. Salah satu perubahan terjadi pada SNI 1726-2019 yang merupakan revisi SNI 1726-2012 adalah pada klasifikasi kelas situs, nilai koefisien situs mengalami perubahan dengan perubahan signifikan terjadi pada kelas situs SE (tanah lunak) [3].

Seiring perkembangan teknologi konstruksi gedung, semakin banyak gedung bertingkat yang dibangun dengan beragam bentuk struktur. Salah satu bentuk struktur gedung yaitu struktur tidak beraturan yang dimana struktur ini memperhatikan aspek desain agar gedung tidak monoton pada bentuk persegi maupun persegi panjang. Selain memperhatikan aspek desain, pada perencanaan gedung perlu diperhatikan juga aspek lainnya seperti beban gravitasi dan beban gempa karena gedung bertingkat tersebut berpotensi mengalami keruntuhan gedung akibat kelebihan beban gravitasi maupun beban gempa, bahkan dapat menyebabkan keruntuhan secara progresif [4].

Pada perencanaan struktur gedung, beban gempa yang direncanakan menyesuaikan kondisi tanah di lapangan dimana gedung akan dibangun, jika kondisi tanah di lapangan dikategorikan tanah sedang maka menurut SNI 1726-2019 diklasifikasikan pada kelas situs SD. Struktur gedung yang dibangun dengan beban gempa kelas situs SD belum tentu sesuai apabila dibangun pada kondisi kelas situs SB maupun kelas situs SE walaupun pada kota yang sama. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan kelas situs yang berbeda untuk struktur gedung dan respon spektral kota yang sama untuk mengetahui pengaruhnya terhadap keruntuhan progresif gedung. Pada Penelitian ini gedung dengan struktur tidak beraturan dianalisis untuk mengetahui keruntuhan elemen struktur akibat penambahan beban gravitasi dan beban gempa dengan cara menghilangkan salah satu elemen pada struktur gedung tersebut.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Keruntuhan Progresif

Keruntuhan progresif (progressive collapse) merupakan suatu keuntuhan diakibatkan oleh keruntuhan dari satu atau lebih elemen struktur yang menyebabkan keruntuhan

beruntun dari elemen sebelahnya sehingga dapat mengakibatkan keruntuhan pada sebagian besar atau keseluruhan dari struktur tersebut [5]. Menurut Sunamy et al (2014), keruntuhan progresif dimulai ketika satu atau lebih elemen pembawa beban vertikal (biasanya kolom) dihilangkan. Ketika kolom dihilangkan, (disebabkan oleh tabrakan kendaraan, kebakaran, gempa bumi, kejadian berbahaya akibat manusia atau alam) berat bangunan (beban gravitasi) dialihkan ke kolom yang berdekatan pada kolom yang dihilangkan pada struktur.

Jika kolom yang berdekatan tersebut tidak dirancang dengan baik untuk menahan dan mendistribusikan kembali tambahan beban gravitasi yang sebagian strukturnya gagal, elemen pembawa beban vertikal struktur akan terus gagal hingga beban tambahan stabil. Akibatnya sebagian besar struktur bisa runtuh, menyebabkan kerusakan yang lebih besar daripada dampak awal. Keruntuhan progresif terjadi ketika suatu struktur memiliki pola pembebanan atau kondisi batas yang berubah sedemikian rupa sehingga elemen struktur dibebani melebihi kapasitas yang direncanakan [6].

2.2. Struktur Gedung Tidak Beraturan

Struktur gedung diklasifikasikan sebagai struktur beraturan dan tidak beraturan. Pengklasifikasian struktur gedung tidak beraturan pada konfigurasi ketidakberaturan horizontal yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur Gedung

No	Tipe Dan Penjelasan Ketidakberaturan
1a	Ketidakteraturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar lantai tingkat maksimum, torsi yang dihitung termasuk tak terduga, di sebuah ujung struktur melintang terhadap sumbu lebih dari 1,2 kali simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur.
1b	Ketidakteraturan torsi berlebihan didefinisikan ada jika simpangan antar lantai tingkat maksimum, torsi yang dihitung termasuk tak terduga, di sebuah ujung struktur melintang terhadap sumbu lebih dari 1,4 kali simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur.
2	Ketidakteraturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua proyeksi denah struktur dari sudut dalam lebih besar dari 15 persen dimensi denah struktur dalam arah yang ditentukan.
3	Ketidakteraturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat diafragma dengan diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50 persen daerah diafragma bruto yang melingkupinya, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50 persen dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.
4	Ketidakteraturan pergeseran melintang terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran melintang terhadap bidang elemen vertikal.
5	Ketidakteraturan sistem nonparalel didefininisikan ada jika elemen penahan gaya lateral vertikal tidak paralel atau simetris terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama

Sumber: SNI 1726-2019

2.3. Pembebanan Struktur

Beban mati dan beban hidup yang diberikan pada struktur sesuai ketentuan yang tercantum dalam SNI 1727-2013 tentang Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Bangunan Lain [7] sedangkan beban gempa diberikan sesuai ketentuan yang tercantum dalam SNI 1726-2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung [3].

2.3.1. Beban Mati

Menurut SNI 1727-2013, Beban mati adalah berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang, termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, finishing, klading gedung dan komponen arsitektural dan struktural lainnya serta peralatan lain terpasang lain termasuk berat keran

2.3.2. Beban Hidup

Menurut SNI 1727-2013, Beban hidup adalah beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir atau beban mati.

2.3.3. Beban Gempa

Beban gempa menurut PPURG 1987 adalah semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa tersebut. Dalam hal ini pengaruh gempa pada struktur gedung dapat ditentukan berdasarkan suatu analisa dinamik, yang dimaksud dengan beban gempa disini adalah gaya-gaya didalam struktur tersebut yang terjadi oleh gerakan tanah akibat gempa itu

2.4. Klasifikasi Kelas Situs

Kelas situs harus diklasifikasikan berdasarkan SNI 1726-2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, sebelum dirumuskan kriteria desain seismik suatu bangunan ataupun amplifikasi besaran percepatan gempa yang ditinjau dari batuan dasar sampai ke permukaan tanah. Pengklasifikasian kelas situs tersebut berdasarkan profil tanah yang kemudian disesuaikan dengan Tabel 2.6 di bawah. Kelas situs tersebut antara lain SA (tanah keras), SB (batuan), SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak), SD (tanah sedang), SE (tanah lunak) dan SF (tanah khusus). Pengklasifikasian dan penetapan kelas situs harus dilakukan oleh otoritas yang berwenang atau ahli geoteknik bersertifikat dengan melakukan penyelidikan tanah di lapangan dan juga di laboratorium. Parameter yang diukur minimal dua dari tiga parameter seperti yang tercantum pada Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi Situs

Kelas Situs	V (m/detik)	N atau N	S (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 - 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 - 750	>50	>100
SD (tanah sedang)	175 - 350	15 - 50	50 - 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50

Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3m tanah dengan karakteristik sebagai berikut :

1. Indeks plastisitas, PI > 20
2. Kadar air, w>40%
3. Kuat geser niralir su <25 kPa

SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti

Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut:

- Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah
- Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan H >3 m)

Sumber : SNI 1726-2019

2.5. Analisis Keruntuhan Progresif

Analisis keruntuhan progresif biasanya dilakukan dengan pendekatan *threat independent*, yaitu dengan menyederhanakan respon dari struktur. Respon struktur pada pendekatan ini dihitung dengan menghilangkan elemen pemikul beban (kolom) secara instan. Apabila elemen pemikul beban (kolom) dihilangkan, maka beban yang dipikul akan didistribusikan ke kolom lain yang berdekatan dengan kolom yang dihilangkan, jika kolom ini tidak mampu juga menahan dan mendistribusikan beban maka akan terjadi kegagalan terhadap sebagian maupun keseluruhan struktur. Pada penelitian ini analisis keruntuhan progresif berpedoman pada *General Service Administration* (2003) .

2.5.1. Pedoman GSA 2003

The U.S. General Service Administration (GSA) atau Administrasi Layanan Umum Amerika Serikat mengembangkan “*Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects*” untuk memastikan bahwa potensi terjadinya keruntuhan progresif dapat diketahui dalam desain, perencanaan dan konstruksi gedung baru dan proyek renovasi besar. Pedoman ini awalnya dirilis pada November 2000 dengan fokus utama struktur beton bertulang. Tujuan pedoman ini untuk membantu dalam mengurangi potensi keruntuhan progresif pada gedung

kantor pemerintahan, membantu dalam menilai potensi keruntuhan progresif pada gedung kantor pemerintahan yang sudah ada dan membantu dalam proses pengembangan potensi peningkatan fasilitas jika diperlukan [8].

Menurut pedoman ini analisis dilakukan dengan cara menghilangkan kolom pada lantai satu bangunan. Kolom yang dihilangkan tersebut diasumsikan sebagai kolom yang mengalami kegagalan. Lokasi yang disarankan pada pedoman ini dalam menghilangkan kolom adalah sebagai berikut:

1. Menghilangkan kolom eksterior bangunan, tiga lokasi yang disarankan yaitu:
 - a. Kolom di tengah atau di dekat sisi pendek bangunan
 - b. Kolom di tengah atau di dekat sisi panjang bangunan
 - c. Kolom di sudut bangunan
2. Menghilangkan kolom interior bangunan

Selain itu, Pedoman ini juga menyarankan agar beban vertikal di bawah ini diterapkan pada saat menilai potensi keruntuhan progresif. Beban vertikal yang dimaksud dibedakan untuk analisis statis dan dinamis seperti berikut ini.

1. Pembebanan analisis statis

Untuk tujuan analisis statis, beban vertikal berikut harus diterapkan pada struktur yang sedang diselidiki:

$$\text{Beban} = 2(DL+0,25LL) \quad (1)$$

2. Pembebanan analisis dinamis

Untuk tujuan analisis dinamis, beban vertikal berikut harus diterapkan pada struktur yang sedang diselidiki:

$$\text{Beban} = DL+0,25LL \quad (2)$$

dengan :

DL = beban mati

LL = beban hidup

2.5.2. Demand Capacity Ratio

Besaran dan distribusi kebutuhan kapasitas struktur ditunjukkan dengan nilai *Demand Capacity Ratio* (DCR) atau kebutuhan kapasitas rasio. Perbandingan nilai DCR nantinya akan digunakan untuk mengidentifikasi elemen struktur yang berpotensi mengalami keruntuhan. Nilai DCR dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$DCR = Q_{UD}/Q_{CE} \quad (3)$$

Dengan Q_{UD} adalah gaya dalam komponen struktur (momen, gaya aksial, geser dan kombinasi gaya) yang diperoleh dari analisis linear elastis, sedangkan Q_{CE} adalah perkiraan kekuatan dari komponen (momen, gaya aksial, geser dan kombinasi gaya). Nilai Demand Capacity Ratio (DCR) yang dibolehkan sesuai dengan pedoman GSA (2003) untuk elemen struktur adalah sebagai berikut:

1. $DCR < 2,0$ untuk konfigurasi struktural beraturan dan khusus.

2. $DCR < 1,5$ untuk konfigurasi struktural yang tidak beraturan.

2.5.3. Bending Moment Ratio

Bending moment ratio (BMR) atau perbandingan momen lentur merupakan perbandingan antara momen saat elemen struktur masih utuh dengan momen setelah menghilangkan kolom bangunan. Melalui perbandingan ini dapat diketahui besaran nilai peningkatan momen pada balok maupun kolom ketika menghilangkan kolom struktur. Nilai BMR dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$BMR = M_{damaged}/M_{intact} \quad (4)$$

Dengan $M_{damaged}$ adalah momen setelah menghilangkan kolom struktur dan M_{intact} adalah momen saat elemen struktur utuh.

2.5.4. Robustness Indicator

Robustness indicator (R) merupakan ketahanan batas dari suatu struktur. Nilai dari *Robustness indicator* ini harus sama nilainya dengan 1 sehingga struktur tersebut masih bisa memberikan jalur beban alternatif. Apabila nilai dari *robustness indicator* ini lebih besar dari pada 1 maka struktur tidak bisa lagi bekerja secara normal dalam penyaluran beban [4]. Nilai *robustness indicator* ini dihitung berdasarkan gaya geser dasar yang terjadi akibat beban lateral. Nilai R dihitung berdasarkan persamaan berikut.

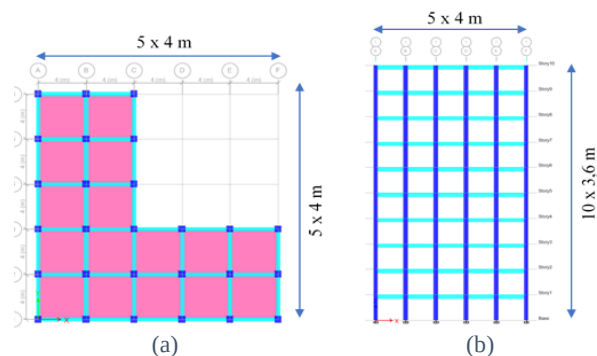
$$R = V_{damaged}/V_{intact} \quad (5)$$

Dengan $V_{damaged}$ adalah gaya geser saat menghilangkan kolom struktur dan V_{intact} adalah gaya geser saat elemen struktur masih utuh.

3. METODOLOGI

3.1. Sistem dan Geometri Struktur Gedung

Struktur gedung yang ditinjau dalam penelitian ini adalah struktur gedung tidak beraturan yang memiliki tinggi antar lantai 3,6 m dan terdiri 10 lantai, maka tinggi gedung adalah 36 m dengan bentang antar kolom struktur sepanjang 4 m dan luas lantai bangunan 256 m² [9]. Tampak atas dan tampak depan pada struktur gedung tidak beraturan dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



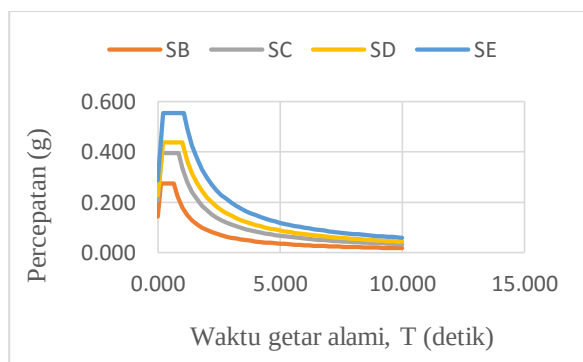
Gambar 1. Struktur Bangunan Gedung: (a) Tampak Atas dan (b) Tampak Depan

3.2. Data Struktur dan Respon Spektra

- Data struktur sebagai berikut.
Fungsi gedung : Umum/Perkantoran
Jenis struktur : Beton bertulang
Letak wilayah: Pekanbaru
Jarak antar kolom : 4 m
Luas bangunan : 256 m²
- Beton struktural dengan karakteristik:
Kuat tekan beton, $f_c' = 24,9$ MPa
Modulus elastisitas beton,
 $E_c = 23452952,91$ kN/m²
Angka poisson, $\nu = 0,2$
Modulus geser, $G = 9772063,713$ kN/m²
Tegangan leleh tulangan utama,
 $F_{yc} = 400$ MPa
Tegangan leleh geser,
 $f_{ys} = 240$ MPa
Mass per unit volume = 24 kN/m³
- Parameter efektifitas momen inersia kondisi penampang retak (*crack*) menurut SNI 2847-2019
Balok = 0,35 I_g
Kolom = 0,70 I_g
Pelat lantai = 0,25 I_g
- Respon spektra untuk kota Pekanbaru dengan beragam kelas situs dapat dilihat pada Tabel 3 dan grafik respon spektra dapat dilihat pada Gambar 2.

Parameter	Kelas Situs			
	SB	SC	SD	SE
F _a	0,90	1,30	1,43	1,82
F _v	0,80	1,50	1,96	2,65
S _{MS}	0,411	0,594	0,656	0,832
S _{M1}	0,269	0,504	0,660	0,893
S _{DS}	0,274	0,396	0,437	0,555
S _{D1}	0,179	0,336	0,440	0,595
T ₀	0,131	0,170	0,201	0,215
T _s	0,654	0,849	1,007	1,073

Tabel 3. Respon Spektral Kota Pekanbaru



Gambar 2. Respon Spektra Desain untuk Kota Pekanbaru

3.3. Analisis Gaya Dalam

Analisis gaya-gaya dalam yang bekerja pada pemodelan struktur bangunan pada Tugas Akhir ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak (*software*) elemen hingga yaitu dengan langkah awal pemberian beban-beban dan

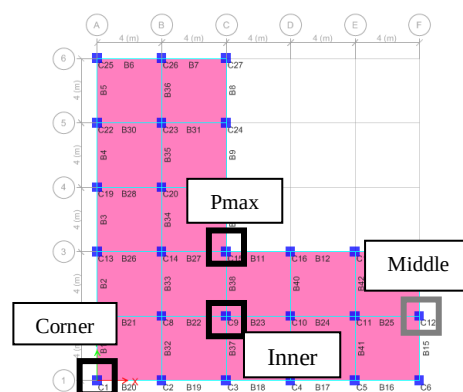
kombinasi beban yang bekerja pada struktur. Analisis yang digunakan yaitu analisis statik linier dengan pembebanan gempa statik ekuivalen. Untuk hasil dan pengolahan data dilakukan dengan mengolah hasil keluaran perangkat lunak (*software*) elemen hingga berupa tabel untuk gaya-gaya dalam pada elemen yang ditinjau berupa gaya aksial, momen dan gaya geser.

3.4. Analisis Keruntuhan Progresif

Analisis yang dilakukan untuk mengetahui potensi keruntuhan progresif dari gedung bertingkat struktur tidak beraturan adalah dengan menghilangkan kolom struktur berpedoman pada metode GSA dan juga melihat tipe keruntuhan progresif yang terjadi secara visual pada pemodelan struktur gedung. Pada pedoman GSA lokasi yang disarankan untuk menghilangkan kolom adalah sebagai berikut:

- Menghilangkan kolom eksterior bangunan, tiga lokasi yang disarankan yaitu:
 - Kolom di tengah atau di dekat sisi pendek bangunan
 - Kolom di tengah atau di dekat sisi panjang bangunan
 - Kolom di sudut bangunan
- Menghilangkan kolom interior bangunan

Kegagalan elemen pada struktur diasumsikan dengan cara menghilangkan kolom sesuai dengan lokasi yang disarankan di atas, maka pada penelitian ini menghilangkan kolom eksterior dilakukan pada kolom sudut (*corner column*), kolom tengah (*middle column*) dan kolom dengan nilai P terbesar (*P max column*) serta menghilangkan kolom interior yaitu kolom dalam (*inner column*) yang terletak pada lantai 1. Lokasi kolom yang diasumsikan mengalami kegagalan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Lokasi Kolom yang Diasumsikan Mengalami Kegagalan

Setelah menghilangkan kolom struktur kemudian dilakukan perhitungan nilai *Demand Capacity Ratio* (DCR), *Bending Moment Ratio* (BMR) dan *Robustness Indicator* (R). Hasil dari perhitungan DCR, BMR dan R tersebut kemudian dibandingkan dengan setiap kelas situs yang ditinjau.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Gaya-gaya Dalam pada Struktur

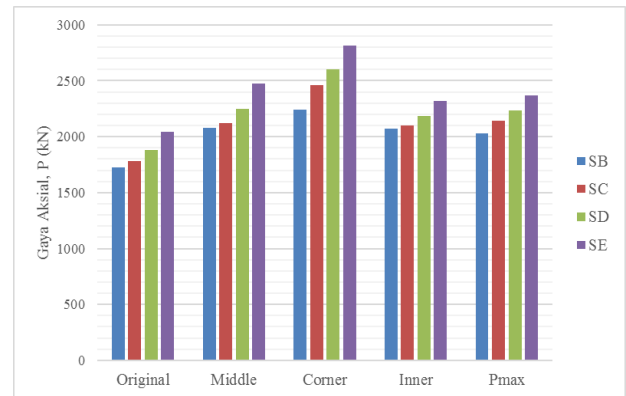
Gaya-gaya dalam yang ditinjau berupa gaya aksial, gaya geser dan gaya momen dapat digunakan untuk menganalisis kekuatan struktur akibat dihilangkannya satu atau beberapa bagian komponen kolom berdasarkan metode GSA. Komponen kolom yang dihilangkan tersebut yaitu kolom tengah struktur (*middle column*), kolom sudut struktur (*corner column*), kolom dalam struktur (*inner column*) dan kolom dengan nilai P terbesar (*P max column*). Hasil gaya-gaya dalam terbesar pada kolom terjadi pada kelas situs SE yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Gaya-Gaya Dalam Kolom Struktur dengan Gaya Aksial

1. Sebelum menghilangkan kolom (Asli)					
Pembebanan	Kolom	P ₁ (KN)	M ₂ (KN-m)	M ₃ (KN-m)	
GSA	C15	-2636,482	0,490	0,490	
Gravitasi	C15	-1824,230	1,723	1,723	
Gempa	C5	-2040,670	-239,874	36,023	
2. Menghilangkan kolom tengah struktur					
Pembebanan	Kolom	P ₂ (KN)	M ₂ (KN-m)	M ₃ (KN-m)	P2/P1
GSA	C11	-3081,133	2,731	-24,162	1,169
Gravitasi	C11	-2187,065	1,906	-16,165	1,199
Gempa	C6	-2472,103	-147,601	189,990	1,211
3. Menghilangkan kolom sudut struktur					
Pembebanan	Kolom	P ₃ (KN)	M ₂ (KN-m)	M ₃ (KN-m)	P3/P1
GSA	C2	-3136,186	-16,171	31,988	1,190
Gravitasi	C2	-2138,213	-10,419	21,958	1,172
Gempa	C2	-2817,451	-214,597	-51,177	1,381
4. Menghilangkan kolom dalam struktur					
Pembebanan	Kolom	P ₃ (KN)	M ₂ (KN-m)	M ₃ (KN-m)	P4/P1
GSA	C15	-3147,474	31,424	0,479	1,194
Gravitasi	C15	-2194,276	24,124	1,718	1,203
Gempa	C3	-2322,459	-238,777	38,083	1,138
5. Menghilangkan kolom Pmax					
Pembebanan	Kolom	P ₃ (KN)	M ₂ (KN-m)	M ₃ (KN-m)	P5/P1
GSA	C9	-3061,209	-32,101	0,155	1,161
Gravitasi	C9	-2194,122	-22,225	0,252	1,203
Gempa	C16	-2371,170	232,528	-48,330	1,162

Terbesar pada Kelas Situs SE

Berdasarkan Tabel 4 di atas, gaya aksial terbesar yang terjadi akibat beban gempa terdapat pada skenario menghilangkan kolom sudut yaitu sebesar -2817, 451 kN. Gaya-gaya dalam kolom pada kelas situs SE tersebut jika dibandingkan dengan kelas situs lainnya maka gaya aksial (P) pada kolom untuk pembebanan GSA dan gravitasi tidak mengalami peningkatan, namun mengalami peningkatan untuk pembebanan Gempa. Peningkatan tersebut dan perbandingannya sebelum dan sesudah menghilangkan kolom pada setiap kelas situs dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Perbandingan Nilai Gaya Aksial tiap Kelas Situs

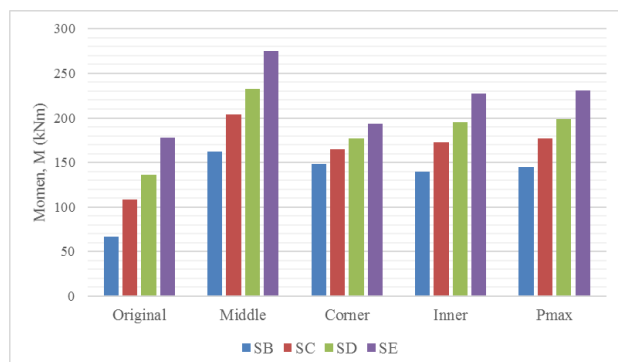
Hasil gaya-gaya dalam terbesar pada balok terjadi pada kelas situs SE yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 5. Gaya-Gaya Dalam Balok Struktur dengan Gaya Momen dan Geser Terbesar pada Kelas Situs SE

1. Sebelum menghilangkan kolom (Asli)					
Pembebanan	Lantai	Balok	V ₂ (KN)	M ₃ (KN-m)	
GSA	9	B10	59,905	-35,082	
Gravitasi	9	B10	41,116	-23,874	
Gempa	3	B6	-128,866	-177,558	
2. Menghilangkan kolom tengah struktur					
Pembebanan	Lantai	Balok	V ₂ (KN)	M ₃ (KN-m)	M2/M1
GSA	1	B14	153,273	-186,577	5,318
Gravitasi	1	B14	105,035	-126,938	5,317
Gempa	2	B15	-188,267	-275,093	1,549
3. Menghilangkan kolom sudut struktur					
Pembebanan	Lantai	Balok	V ₂ (KN)	M ₃ (KN-m)	M3/M1
GSA	1	B1	161,152	-209,563	5,973
Gravitasi	1	B1	109,725	-143,271	6,001
Gempa	2	B1	142,005	-193,524	1,090
4. Menghilangkan kolom dalam struktur					
Pembebanan	Lantai	Balok	V ₂ (KN)	M ₃ (KN-m)	M4/M1
GSA	1	B22	-129,790	-162,500	4,632
Gravitasi	1	B22	-99,862	-121,167	5,075
Gempa	2	B37	-157,521	-227,541	1,282
5. Menghilangkan kolom Pmax					
Pembebanan	Lantai	Balok	V ₂ (KN)	M ₃ (KN-m)	M5/M1
GSA	1	B10	144,805	-174,472	4,973
Gravitasi	1	B27	-100,897	-122,612	5,136
Gempa	2	B10	163,132	-231,204	1,302

Berdasarkan Tabel 5 di atas, gaya momen terbesar yang terjadi akibat beban gempa terdapat pada skenario menghilangkan kolom tengah yaitu sebesar -275,093 kNm. Gaya-gaya dalam balok pada kelas situs SE tersebut jika dibandingkan dengan kelas situs lainnya maka gaya momen pada balok untuk pembebanan GSA dan gravitasi tidak mengalami peningkatan, namun mengalami peningkatan untuk pembebanan Gempa. Peningkatan tersebut dan perbandingannya sebelum dan sesudah

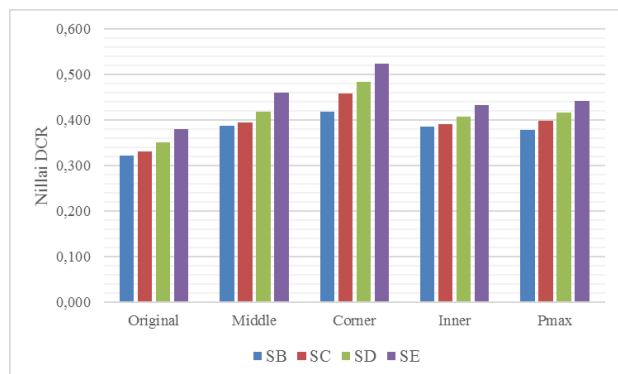
menghilangkan kolom pada setiap kelas situs dapat dilihat pada Gambar 5.



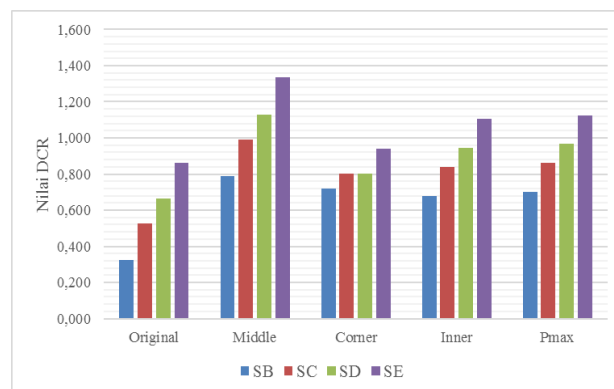
Gambar 5. Perbandingan Nilai Momen Tiap Kelas Situs

4.2. Demand Capacity Ratio (DCR)

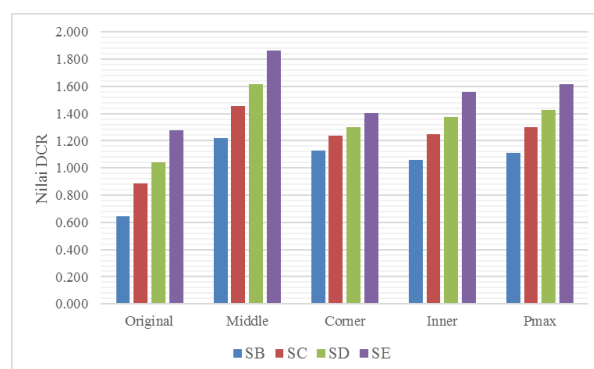
Proses Analisis DCR dilakukan sebelum menghilangkan kolom struktur dan setelah menghilangkan kolom struktur. Data-data hasil analisis gaya-gaya dalam berupa P, M dan V dibandingkan dengan nilai ϕM_n , ϕP_n dan ϕV_c . Struktur aman dari keruntuhan progresif apabila nilai $DCR < 1,5$ sesuai dengan pedoman GSA (2003). Hasil perbandingan nilai DCR setiap kelas situs dan peningkatan yang terjadi disajikan dalam bentuk grafik dan dapat dilihat pada Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 6. Perbandingan Nilai DCR pada Kolom Terhadap Gaya Aksial



Gambar 7. Perbandingan Nilai DCR pada Balok Terhadap Gaya Momen



Gambar 8. Perbandingan Nilai DCR pada Balok Terhadap Gaya Geser

4.3. Bending Moment Ratio (BMR)

Bending Moment Ratio (BMR) didapat dari membandingkan momen saat menghilangkan kolom (*Moment Damaged*) dengan momen saat struktur masih utuh (*Moment Intact*). Menggunakan nilai perbandingan tersebut akan dilihat variasi peningkatan momen yang terjadi pada balok maupun kolom. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Kegagalan Kolom	Kelas Situs			
	SB	SC	SD	SE
Pmax	1,381	1,037	1,026	1,026
Tengah	1,183	1,048	1,037	1,042
Dalam	1,315	1,011	1,011	1,011
Sudut	1,351	1,038	1,029	1,022

Tabel 6. Nilai BMR pada Kolom Akibat Beban Gempa

Tabel 7. Nilai BMR pada Balok Akibat Beban Gempa

Kegagalan Kolom	Kelas Situs			
	SB	SC	SD	SE
Pmax	2,152	1,629	1,458	1,302
Tengah	2,419	1,875	1,703	1,549
Dalam	2,083	1,589	1,429	1,282
Sudut	2,204	1,518	1,294	1,090

Berdasarkan Tabel 6 dan Tabel 7 terjadi penurunan nilai BMR dari kelas situs SB ke kelas situs SE dengan penurunan terbesar untuk kolom terjadi pada kegagalan kolom Pmax dari 1,381 (SB) menjadi 1,026 (SE) dan pada balok terjadi pada kegagalan kolom sudut dari 2,204 (SB) menjadi 1,090 (SE).

4.4. Robustness Indicator

Robustness Indicator (R) merupakan nilai untuk melihat ketahanan batas pada suatu struktur. Nilai R dilihat dari perbandingan gaya geser seismik setelah kegagalan kolom (*V damaged*) dengan gaya geser seismik sebelum kegagalan kolom (*V intact*). Nilai R harus mendekati sama dengan 1 agar struktur dapat memberikan alternatif penyaluran beban. Nilai *Robustness Indicator* dapat dilihat pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Nilai Robustness Indicator

Kelas Situs	Kegagalan Kolom	<i>V Intact</i> kN	<i>V Damaged</i> kN	R
SB	Corner	564,096	556,863	0,98718
	Inner	564,096	556,899	0,98724
	Middle	564,096	556,881	0,98721
	Pmax	564,096	556,899	0,98724
SC	Corner	1057,680	1044,626	0,98766
	Inner	1057,680	1044,694	0,98772
	Middle	1057,680	1044,660	0,98769
	Pmax	1057,680	1044,694	0,98772
SD	Corner	1384,645	1365,737	0,98634
	Inner	1384,645	1365,826	0,98641
	Middle	1384,645	1365,782	0,98638
	Pmax	1384,645	1365,826	0,98641
SE	Corner	1871,953	1845,371	0,98580
	Inner	1871,953	1845,491	0,98586
	Middle	1871,953	1845,431	0,98583
	Pmax	1871,953	1845,491	0,98586

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga untuk mengetahui pengaruh klasifikasi kelas situs terhadap keruntuhan progresif pada struktur gedung tidak beraturan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Terjadi peningkatan gaya aksial dan momen dari kelas situs SB ke kelas situs SE. Peningkatan terbesar dari keempat kasus kegagalan kolom terjadi pada kegagalan kolom sudut dari -2243,499 kN (SB) menjadi -2817,451 kN (SE) dan untuk momen terjadi pada kegagalan kolom tengah dari -162,5527 kNm (SB) menjadi -275,093 kNm (SE).
2. Keruntuhan progresif tidak terjadi pada struktur dari keempat kasus kegagalan kolom dan perbedaan kelas situs terhadap gaya aksial dan momen, namun

keruntuhan terjadi terhadap gaya geser karena nilai $DCR > 1,5$. Keruntuhan tersebut terjadi pada kelas situs SD dan kelas situs SE dengan nilai DCR terbesar terjadi pada kegagalan kolom tengah kelas situs SE sebesar 1,863.

3. Nilai BMR mengalami penurunan dari kelas situs SB ke kelas situs SE pada pembebanan gempa. Penurunan terbesar untuk kolom terjadi pada kegagalan kolom Pmax dari 1,381 (SB) menjadi 1,026 (SE) dan pada balok terjadi pada kegagalan kolom sudut dari 2,204 (SB) menjadi 1,090 (SE).
4. Nilai R (*Robustness Indicator*) yang didapat akibat perbedaan kelas situs dan kegagalan kolom mendekati sama dengan 1 ($R \approx 1$), maka hal ini mengindikasikan bahwa struktur masih mampu memberikan alternatif penyaluran beban (penyaluran beban berjalan normal) meskipun terjadinya kegagalan kolom.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, beberapa saran untuk dipergunakan pada penelitian lanjutan yang berkaitan yaitu:

1. Dapat dilakukan analisis lebih lanjut untuk jenis bangunan yang bervariasi dan pada daerah dengan intensitas gempa yang lebih tinggi atau pada daerah yang sering menjadi pusat terjadinya gempa di Indonesia.
2. Analisis struktur dapat dilakukan dengan menghilangkan lebih dari satu buah kolom atau dilakukan pada kolom yang letaknya di lantai 2 dan seterusnya.
3. Penelitian lanjutan yang berkaitan dapat melakukan analisis dengan pedoman-pedoman lainnya yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] U. Starossek, "Progressive Collapse of Structures World Trade Center — September 11, 2001," *Eng. Struct.*, vol. 29, no. December, pp. 2302–2307, 2007.
- [2] H. Yavari, M. S. Ghobadi, and M. Yakhchalian, "Progressive collapse potential of different types of irregular buildings located in diverse seismic sites," *Heliyon*, vol. 5, no. 1, p. e01137, 2019.
- [3] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 1726:2019," *Tata Cara Perenc. Ketahanan Gempa Untuk Strukt. Bangunan Gedung dan Non Gedung*, no. 8, p. 254, 2019.
- [4] D. Fazrian, Z. Djauhari, and Ridwan, "Keruntuhan Progresif Gedung Beraturan," *J. Tek. Sipil*, vol. 14, no. 3, pp. 161–169, 2017.
- [5] U. Starossek, *Progressive Collapse of Structures*. Jerman: thomas telford, 2009.
- [6] S. L. Sunamy, "of Engineering Progressive Collapse Analysis of a," no. 2013, pp. 93–98, 2014.
- [7] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 1727-2013,"

Beban Minim. untuk Peranc. Bangunan Gedung dan Strukt. Lain, p. 196, 2013.

- [8] GSA, "Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines," *Buildings*, no. June, p. 119, 2003.
- [9] A. Yolanda, Z. Djauhari, and Ridwan, "Keruntuhan Progresif Gedung Struktur Beraturan dan Tidak Beraturan," *J. Tek. Sipil*, vol. 4, no. 2, pp. 1–13, 2017.