

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

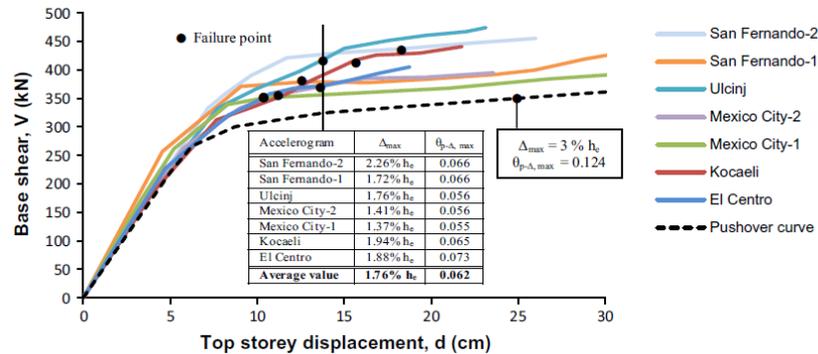
Menurut referensi yang didapatkan penulis, penelitian tentang studi numerik tingkat kekuatan bangunan struktur beton bertulang dengan variasi penampang horizontal belum pernah dilakukan sebelumnya. Dalam penulisan laporan tugas akhir ini, penulis mendapatkan informasi dari beberapa jurnal yang akan dijelaskan pada paragraf berikut ini.

2.1.1 Penelitian Terdahulu tentang Kekakuan Struktur

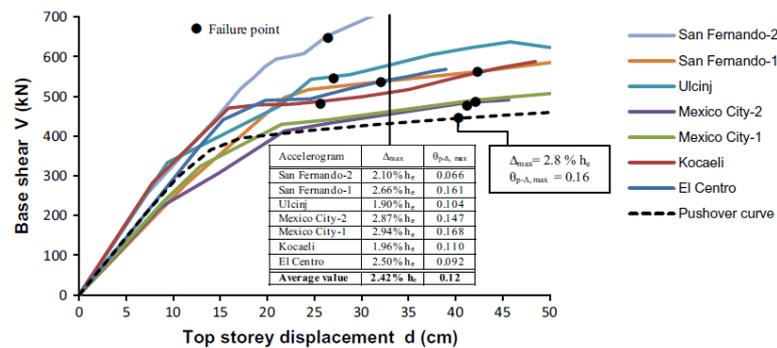
Weningtyas, (2017) melakukan tentang sambungan balok-kolom pada beton pracetak untuk mengetahui nilai daktilitas, disipasi energi, kekakuan, tegangan regangan, dan pola retak, sehingga didapatkan hasil sambungan yang efisien dan efektif untuk diaplikasikan di lapangan. Penelitian ini menggunakan dua buah benda uji sambungan eksterior pada tengah bentang, yaitu BU-1 sambungan balok persegi panjang dan kolom persegi dan BU-2 sambungan balok T dan kolom persegi. Penelitian dilakukan dengan permodelan menggunakan *software* ABAQUS CAE 6.11-2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas beban lateral maksimum sebesar 40 kN dan BU-2 mempunyai kapasitas beban lateral maksimum sebesar 100 kN. Sehingga dalam aplikasi bisa tidak disarankan untuk digunakan pada gedung yang memiliki gaya geser yang melebihi pengujian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekakuan yang dimiliki BU-1 sebesar 0,460 kN/mm dan BU-2 sebesar 1,015 kN/mm.

Louzai & Abed, (2014) melakukan penelitian tentang perilaku struktur beton bertulang bertingkat banyak dengan perbandingan 3 lantai, 7 lantai, dan 9 lantai untuk melihat perilaku struktur akibat adanya nilai gempa yang diberikan. Komparasi dilakukan dengan membandingkan metode analisis *pushover* non-linier statis dan metode analisis inkremental non-linier dinamik dengan menggunakan 7 catatan gempa yang pernah terjadi sebelumnya. Struktur bangunan ini dimodelkan dengan menggunakan batuan *software* SAP2000. Hasil penelitian ini dapat dilihat berupa grafik *pushover* dan inkremental Berdasarkan hasil penelitian yang

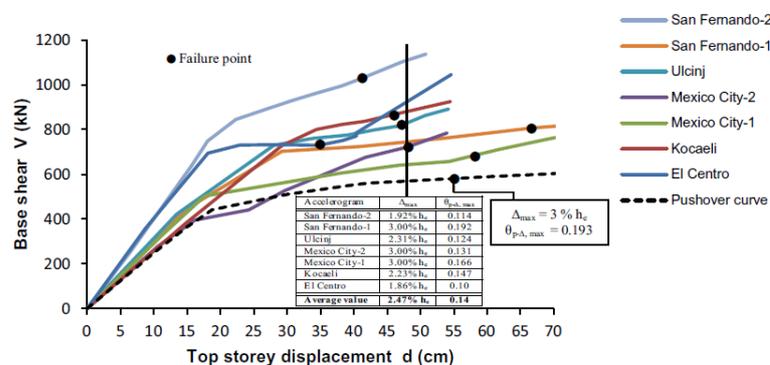
dilakukan maka didapatkan nilai daktilitis pada metode analisis *pushover* untuk bangunan 3 lantai sebesar 3,72, 6 lantai sebesar 2,8 dan 9 lantai 3,07 serta hasil untuk metode analisis inkremental dinamis untuk bangunan 3 lantai sebesar 2,32, 6 lantai sebesar 2,43 dan 9 lantai sebesar 2,48



Gambar 2. 1 Kurva hubungan *base shear* dan *top storey displacement* pada struktur 3 lantai (Louzai & Abed, 2014)



Gambar 2. 2 Kurva hubungan *base shear* dan *top storey displacement* pada struktur 6 lantai (Louzai & Abed, 2014)



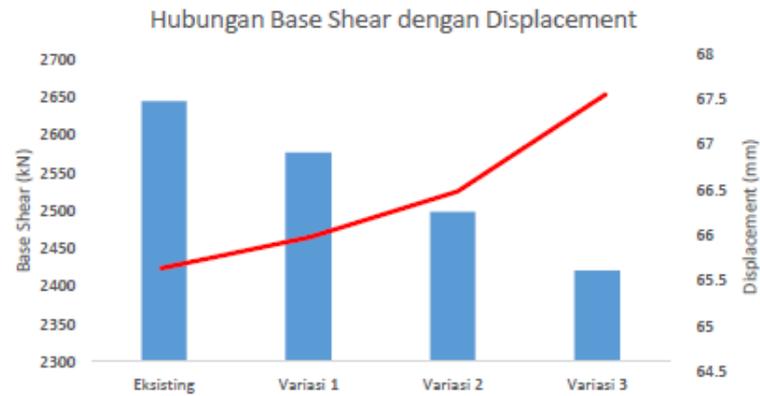
Gambar 2. 3 Kurva hubungan *base shear* dan *top storey displacement* pada struktur 9 lantai (Louzai & Abed, 2014)

2.1.2 Penelitian Terdahulu tentang Variasi Struktur

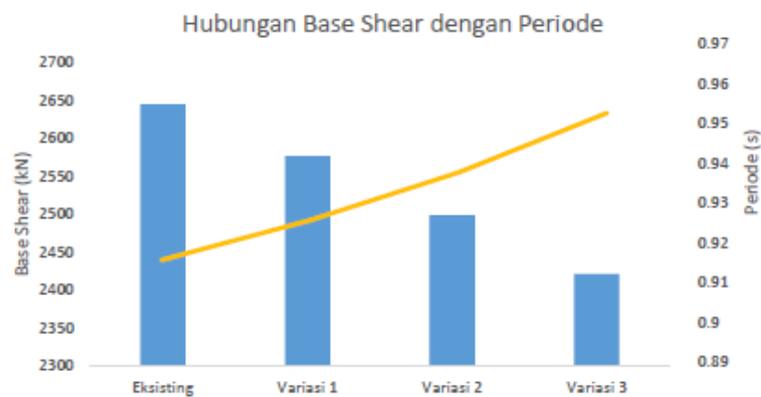
Pramesti, (2018) melakukan pemodelan dengan bantuan *software* untuk mengetahui perilaku bangunan tidak beraturan horizontal dengan variasi dimensi kolom terhadap gempa. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui variasi dimensi kolom pada perilaku struktur bangunan tidak beraturan horizontal sistem non paralel terhadap beban gempa. Penelitian dilakukan dengan memodelkan 4 tipe variasi bangunan dengan mengubah ukuran dimensi kolom. Besar perubahan dilakukan dengan pengecilan dimensi kolom maksimal yang diberikan sebesar 150 mm pada seriap sisinya. Pengecilan dibuat merata dari tiap variasi dengan penurunan angka 50 mm seperti pada tabel 2.1. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengecilan dimensi kolom pada bangunan yang tidak beraturan horizontal sistem non paralel menurunkan kekakuan bangunan sehingga memperkecil gaya dalam struktur, memperbesar periode getar struktur, memperkecil gaya geser dasar, memperbesar simpangan total dan simpangan antar tingkat dengan simpangan total rata-rata yang besar terhadap perilaku bangunan dari arah sumbu X dan sumbu Y sebesar 104,05%. Bangunan dengan variasi pengecilan dimensi kolom dengan tidak beraturan sistem non paralel akan menurunkan ketahanan bangunan terhadap beban gempa dan menghasilkan perilaku bangunan yang mempunyai perbedaan ketahanan bangunan yang sangat besar dari sumbu X dan sumbu Y.

Tabel 2. 1 Variasi pemodelan struktur (Pramesti, 2018)

Jenis Kolom	Pemodelan	Dimensi Kolom (mm)			Lokasi kolom
		<i>Basement</i> s.d Lt.3	Lt.5, s.d Lt.7	Lt.8	
K1	<i>Eksisting</i>	1000 × 1000	900 × 900	800 × 800	Disisi terluar bangunan
	Variasi 1	950 × 950	850 × 850	750 × 750	
	Variasi 2	900 × 900	800 × 800	700 × 700	
	Variasi 3	850 × 850	750 × 750	650 × 650	
K2	<i>Eksisting</i>	1250 × 1250	1000 × 1000	800 × 800	Dipusat bangunan
	Variasi 1	1200 × 1200	950 × 950	750 × 750	
	Variasi 2	1150 × 1150	900 × 900	700 × 700	
	Variasi 3	1100 × 1100	850 × 850	650 × 650	



Gambar 2. 4 Hubungan *base shear* dan *displacement* (Pramesti, 2018)



Gambar 2. 5 Hubungan *base shear* dan periode (Pramesti, 2018)

Rolita Sitorus, (1996) melakukan penelitian efek perubahan massa dan kekakuan terhadap respons struktur bangunan ditinjau dengan analisa statis ekuivalen dan analisa dinamik berdasarkan pedoman perencanaan ketahanan gempa untuk rumah dan gedung SKB 101.3.53.1987. Penelitian menggunakan bangunan perkantoran 5 lantai dengan ketinggian antar lantai 3,6 m. Metode yang digunakan adalah analisis statis ekuivalen dan analisis respons spektrum berdasarkan peraturan gempa PPKGURG 1987. Penelitian ini menggunakan program SAP 90. Pada penelitian ini dilakukan perubahan massa yang dimulai dari penambahan massa di lantai 1 sampai lantai 4 sebesar 10% - 30% sedangkan penambahan massa pada lantai atap dari 31% - 74%. Selain itu dilakukan perubahan kekakuan bangunan dengan mengubah nilai dari mutu beton yaitu nilai elastisitas (E) pada tiap lantai. Perubahan yang terjadi yaitu pada lantai 1 sampai lantai 4 sebesar 10% - 41%, sementara perubahan pada lantai atap sebesar 2% - 8,2%.

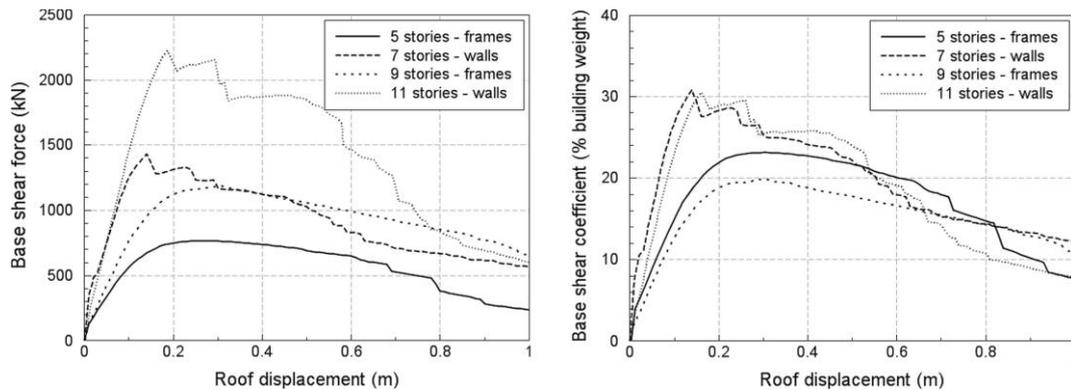
Pavel, (2018) melakukan penelitian terhadap beton bertulang yang dirancang dalam kondisi seismik dengan pendekatan tertentu. Dalam penelitian digunakan bangunan 5-11 lantai. Penilaian keruntuhan dilakukan dengan analisis sejarah waktu (*time-history*) dengan hasil keruntuhan rata-rata per tahun terjadi 4×10^{-4} hingga 10^{-5} yang ditinjau sesuai dengan kerangka beton bertulang. Di antara empat struktur beton bertulang yang dianalisis, dua terdiri dari kerangka, sementara dua lainnya memiliki dinding struktural untuk melawan gaya laten yang dipaksakan. Dua struktur rangka RC masing-masing terdiri lima lantai dan sembilan lantai, sedangkan struktur dinding struktural RC masing-masing memiliki tujuh lantai dan sebelas lantai. Periode kembali rata-rata aksi seismik yang terkait dengan batas minimal adalah 40 tahun untuk SLS ($PGA \approx 0,14$ g) dan 225 tahun untuk ULS ($PGA = 0,30$ g). Hasilnya menunjukkan bahwa tingkat keruntuhan bangunan untuk empat model struktur yang dianalisis berada dalam kisaran 4×10^{-4} hingga 10^{-5} centimeter, dengan nilai terkecil pada bangunan tujuh lantai (dengan dinding struktural) dan nilai terbesar tanpa dinding adalah struktur sembilan lantai (*frame*).

Tabel 2. 2 Dimensi model struktur (Pavel, 2018)

No. Jumlah Lantai	Dimensi Elemen Struktur (cm)		
	Kolom	Balok	Dinding
5 Lantai	50 x 50	25 x 50	-
7 Lantai	50 x 50	25 x 50	200 x 30
9 Lantai	65 x 65	30 x 60	-
11 Lantai	50 x 50	30 x 60	200 x 30

Tabel 2. 3 Koefisien korelasi dan parameter kurva kapasitas (Pavel, 2018)

No. Jumlah Lantai	Rata-rata tingkat keruntuhan	Kuat Lentur	Koefisien Korelasi	
			Lendutan Kuat Lentur	Pemindahan <i>Ultimate</i>
5 Lantai	4,9 x 10	0,266	-0.377	0.438
7 Lantai	3,36 x 10	0,506	-0.224	0.724
9 Lantai	9,97 x 10	0,397	-0.433	0.613
11 Lantai	7,79 x 10	0,342	-0.297	0.563



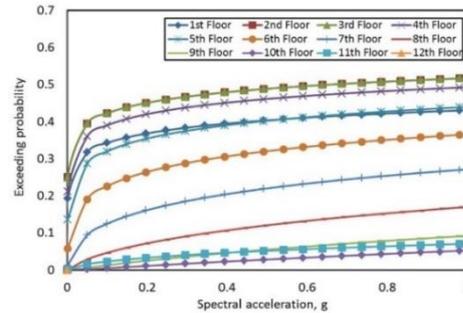
Gambar 2. 6 Kurva *base shear force* dan *roof displacement* untuk ke empat model (Pavel, 2018)

2.2.2 Penelitian Terdahulu tentang Percepatan Aliran Gempa

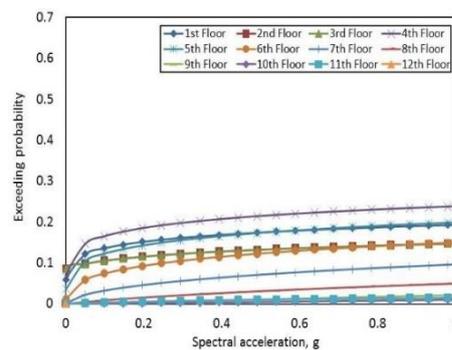
Seo, dkk. (2015) melakukan penelitian mengenai evaluasi seismik terhadap beton bertulang dengan dinding geser. Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui rasio *drift* yang terjadi pada struktur sehingga didapatkan kerentanan seismik struktur dengan menggunakan rasio dari analisis sejarah waktu berdasarkan ketentuan FEMA yang digunakan. Penelitian dilakukan dengan bantuan *software SAP2000* berdasarkan desain seismik berpedoman pada FEMA dan kode seismik bangunan menggunakan *Los Angeles Tall Building Structural Design Council (LATBSDC)*. ketentuan beban hidup yang diberikan sebesar 958 kN/m^2 dan beban hidup pada atap sebesar 2394 kN/m^2 . Beban gempa yang diberikan dengan percepatan respons gempa adalah $2,028 \text{ g}$ untuk periode singkat dan $0,753 \text{ g}$ untuk periode 1 detik. Berdasarkan penelitian dapat diketahui bahwa terdapat perbedaan antara distribusi maksimum yang terjadi dengan adanya analisis respons spektrum dan analisis *time-history* non linier yaitu dapat dilihat pada gambar 2.5 dan 2.6.

Tabel 2. 4 Beban dimanis berdasarkan analisis *time-history* (Seo, dkk, 2018)

Earthquake	Country	Occurrence	PGA (g)	Time Step (s)	Scale Factor
Chi-Chi	Taiwan	1999	0.41	0.005	1.02
Erzican	Turkey	1992	0.49	0.005	1.12
Imperial Valley	USA	1979	0.43	0.005	0.86
Kobe	Japan	1995	0.65	0.010	0.62
Northridge	USA	1994	0.63	0.005	0.68
San Fernando	USA	1971	1.16	0.010	0.67
Tabas	Iran	1978	0.81	0.020	0.55

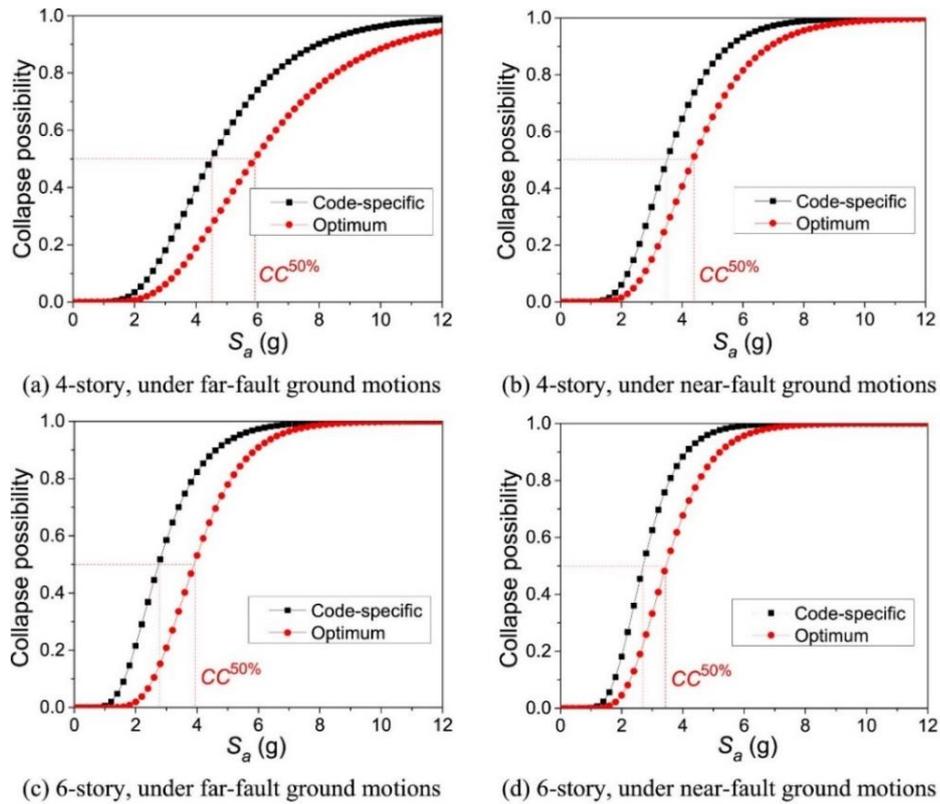


Gambar 2. 7 Hubungan *exceeding probability* dan *spectral acceleration* pada *drift* rasio longitudinal: *immediate occupancy* (Sumber: Seo, dkk, 2018)

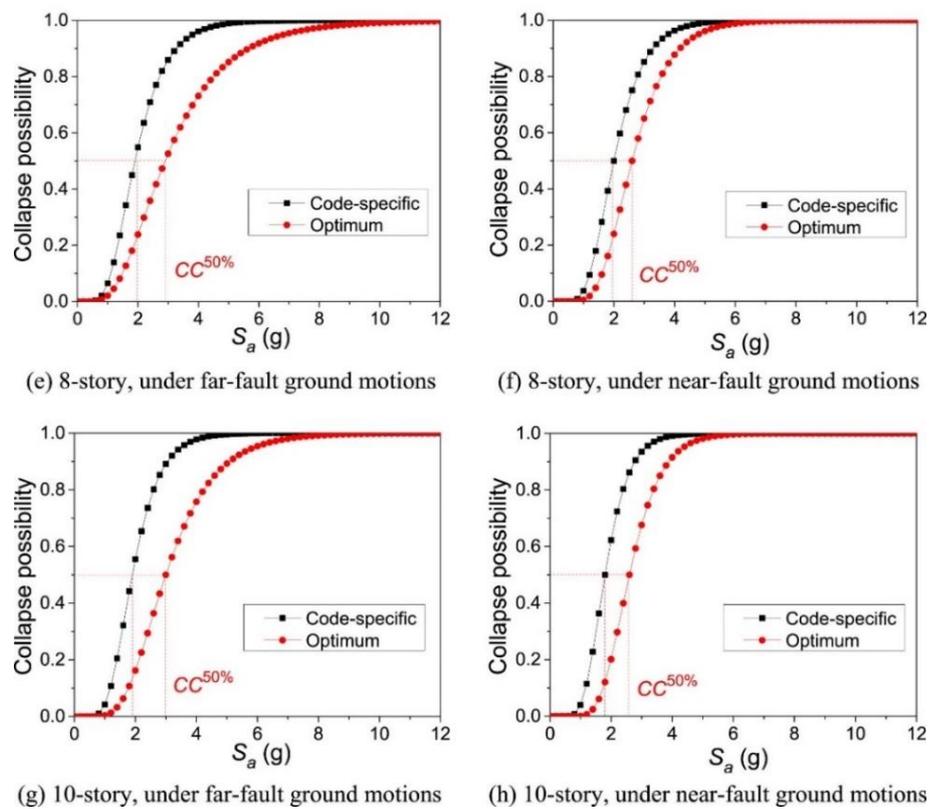


Gambar 2. 8 Hubungan *exceeding probability* dan *spectral acceleration* pada *drift* rasio longitudinal: *immediate occupancy* (Seo, dkk, 2018)

Li, dkk. (2016) melakukan penelitian tentang optimasi bangunan bertingkat tinggi pada kapasitas runtuh untuk desain seismik. Penelitian ini dilakukan akibat pola distribusi yang sering kali digunakan dalam desain struktural adalah distribusi gaya lateral seismik yang tidak terlalu relevan dengan keadaan sesungguhnya di lapangan, sehingga dalam penelitian ini dilakukan desain struktural dengan pola gaya lateral optimal yang didasarkan pada konsep distribusi kerusakan seragam. Analisis yang dilakukan adalah para metrik sistematis agar dapat diketahui pengaruh berbagai parameter gerakan tanah dan parameter struktural serta pola gaya lateral optimal. Bangunan yang dimodelkan dibuat dalam bentuk bangunan geser serta kolom dimodelkan sebagai pegas elasto-plastis yang akan menunjukkan apabila adanya deformasi geser bila struktur mengalami gaya lateral. Pemodelan dilakukan dengan bantuan *software* OpenSees. Hasil penelitian ini menunjukkan adanya perbandingan kapasitas tahan runtuh dari struktur yang dirancang menggunakan metode yang diusulkan dan spesifik kode menunjukkan bahwa pengurangan kemungkinan runtuh mencapai kisaran 23,75-44,18% untuk kerangka RC 4 hingga 10 lantai.



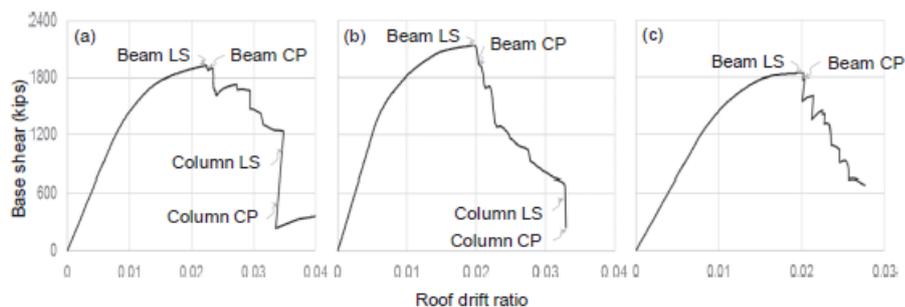
Gambar 2. 9 Percepatan getaran struktur (Li, dkk. 2016)



Gambar 2. 10 Percepatan getaran struktur (Li, dkk. 2016)

2.2.3 Hubungan Perpindahan dan Gaya Geser Dasar

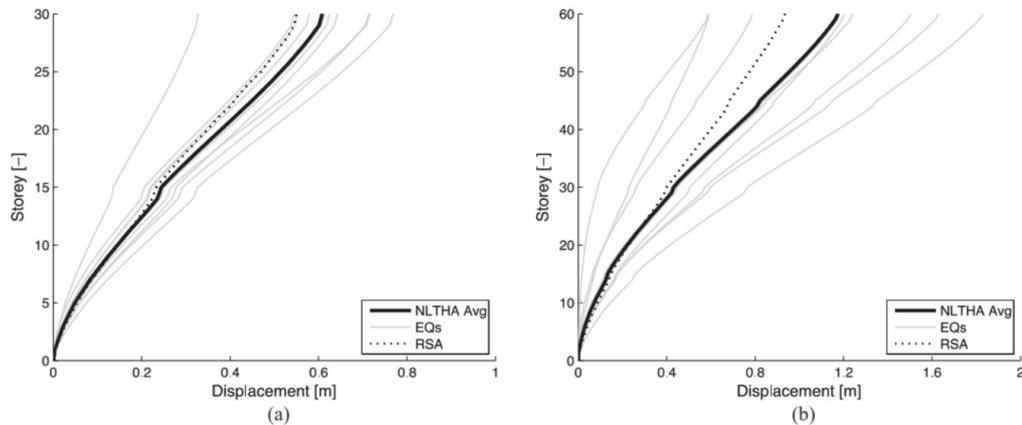
Sattar (2018) melakukan penelitian untuk mengevaluasi konsistensi antara pendekatan desain seismik preskriptif dan berbasis kinerja untuk bangunan kerangka momen beton yang diperkuat. Penelitian ini bertujuan agar adanya kesinambungan antara peraturan ASCE / SEI 7-10 dan ASCE / SEI 41 sebagai peraturan terbaru dalam kinerja desain seismik. Penelitian dilakukan dengan membandingkan bangunan berlantai 4 dan berlantai 8 dengan menggunakan peraturan ASCE 7 dengan ketinggian 5,5 meter pada lantai dasar dan 4,3 meter pada lantai atas dengan beban mati yang diterima struktur sebesar 3648,3 N/m serta lantai dan atap menerima beban sebesar 0,72 MPa dan 0,48 MPa. Beban hidup pada lantai dan atap masing-masing adalah 2,39 MPa dan 1,44 MPa. Selain mempertimbangkan desain kapasitas ASCE 7 peneliti juga menggunakan ACI 318 untuk mendesain struktur. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja bangunan kerangka beton bertulang yang dirancang sesuai persyaratan dalam ASCE 7 tidak serta merta memenuhi kinerja yang disyaratkan oleh ASCE 41 adapun hasil penelitian dapat dilihat pada gambar 2 untuk menunjukkan hasil analisis kurva *pushover* dan Gambar 2. Menunjukkan rotasi dan momen yang diterima akibat adanya gempa El Centro yang diberikan terhadap struktur.



Gambar 2. 11 Analisis *pushover* pada arah E-W dari (a) 4 lantai; (b) ELF yang dirancang 8 lantai; (c) bingkai dirancang RSA 8 lantai (Sattar, 2018)

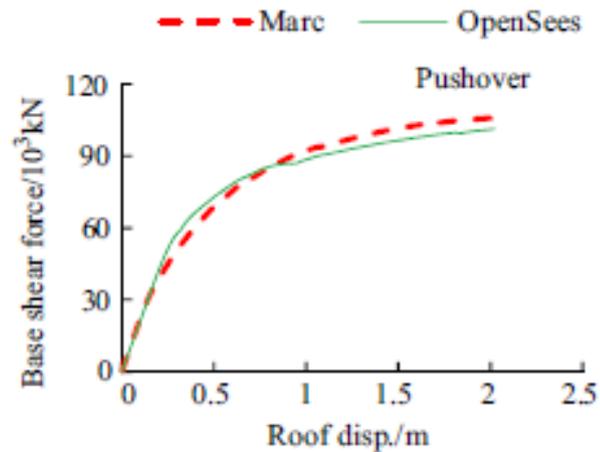
Brunesi, dkk. (2016) melakukan penelitian tentang analisis seismik pada bangunan tingkat berulang tinggi dengan tambahan mega-core. Penelitian dilakukan untuk melihat perilaku bangunan terhadap analisis gempa sejarah waktu dan analisis respons spektrum sehingga dapat diketahui besarnya puncak akselerasi pada tiap lantai, momen lentur dan geser, kurva perpindahan dan rasio beban seismik. Penelitian dilakukan dengan memodelkan dua bangunan tingkat tinggi

dengan jumlah lantai sebanyak 30 lantai dan 60 lantai. Bentuk dari pemodelan dapat dilihat pada Gambar 2.11. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan untuk perpindahan yang terjadi di puncak struktur yaitu 0,61 meter dan 1,17 meter untuk HR-01 dan HR-02 dengan perpindahan yang dihasilkan oleh pengujian dengan perpindahan puncak dalam kasus yang paling tinggi yaitu 0,77 meter dan 1,83 meter.



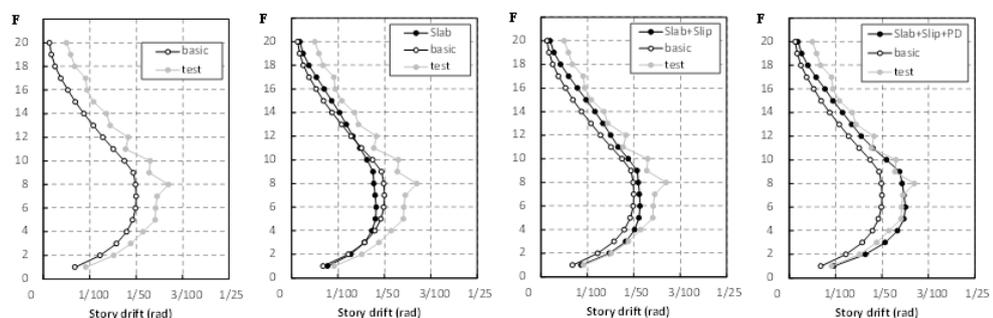
Gambar 2. 12 Perpindahan tiap lantai (a) HR-01 dan (b) HR-02
(Brunesi, dkk. 2016)

Lu, dkk. (2015) melakukan penelitian tentang elemen dinding geser yang dilakukan analisis non linier pada bangunan tingkat tinggi. Penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan model elemen dinding geser baru dengan model konstatatif dengan didasarkan pada metode elemen hingga. Penelitian dilakukan dengan bantuan *software OpenSees* untuk melakukan analisis seismik non linier serta menggunakan ABAQUS dan LS-DYNA untuk analisis *non linier* kapasitas seismik bangunan yang bertujuan menyediakan pedoman untuk desain praktis. Simulasi dilakukan dengan memodelkan struktur dengan tinggi 141,8 meter dengan elemen multi-layer dan teknik penonaktifan elemen untuk simulasi runtuhnya bangunan-bangunan super tinggi yang disebabkan oleh gempa yang denahnya dapat dilihat pada Gambar 2.16. Hasil penelitian ini menunjukkan besarnya perpindahan yang dialami puncak struktur yaitu sebesar 1,791 meter untuk arah X dan 1,580 untuk arah Y serta hasil ini juga digunakan dalam informasi yang sangat penting untuk memvalidasi rasionalitas dan akurasi simulasi ini.

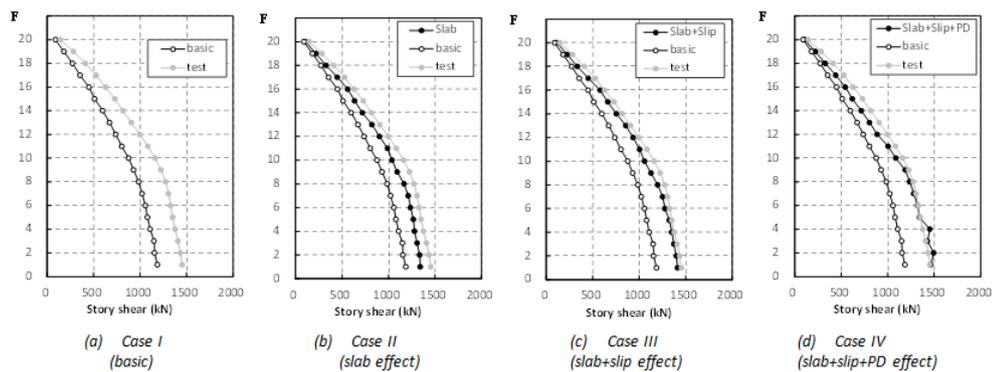


Gambar 2. 13 Hubungan *base shear force* dan *roof displacement* (Lu, dkk. 2015)

Saito (2016) melakukan analisis terhadap perilaku bangunan tingkat tinggi akibat adanya pergerakan tanah dalam waktu yang lama. Penelitian dengan melakukan simulasi bangunan bertingkat 37 lantai dengan melakukan analisis sejarah waktu (*time history*) pada struktur tersebut. Penelitian dilakukan dengan bantuan software STERA 3D dengan melakukan 4 analisis pada struktur tersebut, yaitu: Analisis Kasus I adalah kasus "*Basic*" dengan efek lempengan 10% dari panjang balok, tidak ada perilaku slip, dan tidak ada efek P-Delta. Analisis Kasus II adalah kasus "*Slab*" dengan efek *slab* penuh, tidak ada perilaku slip, dan tidak ada efek P-Delta. Analisis kasus *slab* mempertimbangkan efek slab penuh, sehingga penyimpangan pada tiap lantai menjadi lebih kecil dari kasus "*Basic*", akan tetapi kemampuan geser pada tiap lantai meningkat. Analisis Kasus III adalah kasus "*Slab + Slip*" dengan efek slab penuh, perilaku slip, dan tidak ada efek P-Delta. Analisis Kasus IV adalah kasus "*Slab + Slip + PD*" dengan efek slab penuh, perilaku slip, dan efek P-Delta. Hasil dari penelitian dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 14 Hubungan nilai *story drift* pada tiap kasus (Saito, 2016)



Gambar 2. 15 Hubungan nilai *story shear* pada tiap kasus (Saito, 2016)

2.1.3 Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Penelitian ini akan meneliti mengenai studi numerik tingkat kekuatan bangunan struktur beton bertulang dengan variasi penampang horizontal. Model penampang horizontal yang digunakan yaitu model kotak, L, dan U. Terdapat beberapa perbedaan penelitian ini dengan perbedaan sebelumnya mengenai kekuatan struktur beton bertulang dengan variasi penampang.

Tabel 2. 5 Perbedaan penelitian terdahulu dan penelitian sekarang

No.	Penelitian	Perbedaan komposisi yang dipakai pada Penelitian	
		Terdahulu	Sekarang
Studi numerik sambungan			
1	balok kolom beton bertulang pracetak eksterior dengan variasi penampang balok menggunakan beban statik (Weningtyas, 2017)	Digunakan sambungan kolom balok beton bertulang dengan beban statis pada pembebanan lateral	Digunakan beban statis untuk melakukan pembebanan lateral dan dinamis dengan gempa El Centro dan Kobe
2	Analisa perilaku bangunan tidak beraturan horizontal dengan variasi dimensi kolom terhadap gempa (Pramesti, 2018)	Digunakan variasi bangunan dilakukan dengan mengubah ukuran dimensi kolom secara bertahap untuk	Digunakan variasi bentuk bangunan secara total dengan berfokus pada bentuk model

No.	Penelitian	Perbedaan komposisi yang dipakai pada Penelitian	
		Terdahulu	Sekarang
3	Efek perubahan massa dan kekakuan terhadap respons struktur bangunan ditinjau dengan analisa statis ekuivalen dan analisa dinamik berdasarkan pedoman perencanaan ketahanan gempa untuk rumah dan gedung SKB 101.3.53.1987 (Rolita Sitorus,1996))	Digunakan pembebanan dengan pedoman perencanaan ketahanan gempa untuk rumah dan gedung	Digunakan beban statis untuk melakukan pembebanan lateral dan dinamis dengan gempa El Centro dan Kobe
4	Evaluasi runtuh seismik sederhana dari struktur beton bertulang yang diperkuat dengan kode di Bucharest, Rumania (Pavel, 2018)	Penilaian keruntuhan dilakukan dengan analisis sejarah waktu (<i>time-history</i>) dengan hasil keruntuhan rata-rata per tahun terjadi 4×10^{-4} hingga 10^{-5} yang ditinjau sesuai dengan kerangka beton bertulang	Digunakan beban statis untuk melakukan pembebanan lateral dan dinamis dengan gempa El Centro dan Kobe
5	Evaluasi faktor perilaku seismik struktur rangka beton bertulang berdasarkan analisis komparatif antara pushover statis nonlinier dan analisis dinamik inkremental (Louzai & Abed, 2014)	Pemodelan dilakukan dengan membuat variasi struktur secara vertikal	Digunakan beban statis untuk melakukan pembebanan lateral dan dinamis dengan gempa El Centro dan Kobe dan pemodelan difokuskan pada penampang horizontal

No.	Penelitian	Perbedaan komposisi yang dipakai pada Penelitian	
		Terdahulu	Sekarang
6	Evaluasi kinerja seismik dari struktur rangka momen bertulang momen bertulang bertulang multistrik dengan dinding geser (Seo, dkk., 2015)	Digunakan pembebanan gempa dengan model respons spektrum dengan beberapa gempa	Digunakan pembebanan gempa dengan <i>time history</i> untuk mendapatkan nilai paling nyata pada keadaan sesungguhnya
7	Desain seismik optimal untuk bangunan bertingkat untuk meningkatkan kapasitas tahan runtuh (Li, dkk., 2016)	Digunakan gempa seismik sebagai beban lateral pada model penelitian	Digunakan pembebanan gempa dengan <i>time history</i> untuk mendapatkan nilai paling nyata
8	Mengevaluasi konsistensi antara pendekatan desain seismik dan kinerja untuk bangunan kerangka momen beton yang diperkuat (Sattar, 2018)	Digunakan model bangunan bertingkat rendah dengan beban seismik	Digunakan bangunan bertingkat tinggi pembebanan gempa dengan <i>time history</i> untuk mendapatkan nilai paling nyata
9	Analisis seismik bangunan bertingkat mega-core bertulang tinggi (Brunesi, dkk., 2016)	Digunakan variasi bangunan bertingkat tinggi mega-core dengan metode respons spektrum dan sejarah waktu	Digunakan bangunan bertingkat tinggi pembebanan gempa dengan <i>time history</i> untuk mendapatkan nilai paling nyata
10	Elemen dinding geser untuk analisis seismik nonlinear dari bangunan super tinggi menggunakan OpenSees (Lu, dkk., 2015)	Digunakan bangunan bertingkat tinggi dengan menggunakan program OpenSees	Digunakan bangunan bertingkat tinggi dengan menggunakan program STERA 3D

Berdasarkan Tabel diatas dapat disimpulkan bahwa penelitian dengan judul “Studi Numerik Tingkat Kekuatan Bangunan Struktur Beton Bertulang dengan Variasi Penampang Horizontal” merupakan penelitian yang murni dan belum pernah ada yang melakukannya sebelumnya.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Struktur Bangunan

Sistem struktur dibagi menjadi dua bagian yaitu sistem vertikal dan sistem horizontal. Sistem vertikal mencakup sistem struktur lateral yang dapat meningkatkan nilai kekakuan dan kekuatan komponen vertikal. Sistem penampang horizontal mencakup pengaku-pengaku horizontal atau horizontal *bracing* berupa lantai dan sistem *deck framing* yang biasa disebut dengan diafragma horizontal. (Majore, 2015). Dalam SNI 1726:2012, telah ditentukan sistem dan sub-sistem dari struktur gedung terdapat 7 klasifikasi. Klasifikasi sistem dan sub sistem seperti berikut ini.

a. Sistem Dinding Penumpu

Sistem struktur yang tidak memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Sistem dinding penumpu ini hanya menggunakan satu buah sistem untuk setiap beban yang dipikul Sistem ini beban gravitasinya dipikul oleh dinding penumpu dan sistem *bracing*. Sedangkan beban lateral akibat gaya gempa dipikul oleh dinding geser atau rangka *bracing* (SNI 1726:2012).

b. Sistem Ganda

Sistem struktur dengan rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Beban lateral yang diakibatkan oleh gempa dipikul oleh sistem rangka pemikul momen dan dinding geser. Selain itu, gaya gempa pada sistem ini juga bisa dipikul oleh rangka pemikul momen dan rangka *bracing*. Rangka pemikul momen harus direncanakan secara terpisah mampu memikul sekurang-kurangnya 25% dari seluruh beban lateral yang bekerja. Kedua sistem harus direncanakan untuk memikul secara bersama-sama seluruh beban lateral gempa, dengan memperhatikan interaksi keduanya (SNI 1726:2012).

c. Sistem Interaksi Dinding Geser dan Rangka

Sistem struktur ini menggunakan kombinasi dinding geser dan sistem rangka beton bertulang biasa. Penggunaan beton bertulang dalam konstruksi gedung sudah umum dilakukan. Salah satu kekurangannya adalah bervariasinya kuat tekan beton yang sangat dipengaruhi oleh jenis, kualitas, dan komposisi material pembentuknya (agregat, semen dan air), serta cara pengerjaannya. Oleh sebab itu, kontrol kualitas beton biasanya cukup ketat baik dalam proses pengadukannya, pengecorannya serta perawatan setelah dicor (SNI 1726:2012).

d. Sistem Kolom Kantilever

Sistem struktur penahan gaya gempa, di mana gaya lateral yang diakibatkan oleh gempa disalurkan ke kolom. Kolom berperilaku sebagai kolom kantilever yang terjepit di bagian dasar gedung. Kolom kantilever adalah kolom yang salah satu tumpuannya adalah jepit, sementara ujung yang lain bebas. Pada sistem ini, kolom harus dirancang kuat dalam menahan gaya gempa, karena kolom merupakan satu-satunya penahan gaya gempa (SNI 1726:2012).

e. Sistem Rangka Gedung

Sistem struktur dengan rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Sistem rangka ruang adalah pengembangan dari sistem struktur rangka batang dengan penambahan rangka batang ke arah tiga dimensi. Struktur rangka ruang adalah komposisi dari batang-batang yang masing-masing berdiri sendiri, memikul gaya tekan atau gaya tarik yang sentris dan dikaitkan satu sama lain dengan sistem tiga dimensi atau ruang. Pada sistem rangka gedung, beban lateral 16 yang diakibatkan oleh gempa dipikul dinding geser ataupun oleh rangka *bresing* (SNI 1726:2012).

f. Sistem Rangka Pemikul Momen

Sistem Rangka Pemikul Momen (*Moment Resisting Frame*) ini terbagi menjadi 3, yaitu SRPMB (Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa), SRPMM (Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah), dan SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus). SRPMB merupakan sistem yang memiliki deformasi inelastik dan tingkat daktilitas yang paling kecil tapi memiliki kekuatan yang besar. SRPMM adalah suatu metode perencanaan struktur sistem rangka pemikul momen yang menitik beratkan kewaspadaannya terhadap kegagalan struktur akibat keruntuhan geser. SRPMB adalah komponen struktur yang mampu

memikul gaya akibat beban gempa dan direncanakan untuk memikul lentur (SNI 1726:2012).

g. Struktur Tipe Bandul Terbalik

Suatu struktur kantilever langsing yang lebih dari 50% massa strukturnya terpusat di puncak struktur, dan stabilitas puncak strukturnya ditentukan oleh kekangan rotasi terhadap puncak elemen kantilever. Kolom pendukung pada sistem ini harus didesain terhadap momen lentur yang dihitung didasar kolom yang ditentukan dengan menggunakan prosedur yang terdapat pada SNI 1726:2012 point 7.8. Kolom pendukung harus bervariasi secara seragam hingga momen di puncak yang besarnya sama dengan setengah momen lentur yang dihitung di dasar kolom (SNI 1726:2012).

2.2.2 Struktur Bangunan Tidak Beraturan

Menurut SNI 1726:2012, struktur gedung dapat diklasifikasikan sebagai bangunan beraturan dan tidak beraturan. Kriteria ini harus berdasarkan pada konfigurasi horizontal dan vertikal dari struktur bangunan gedung.

a. Ketidakberaturan Horizontal

Struktur bangunan gedung dapat mempunyai satu atau lebih ketidakberaturan horizontal jika memenuhi syarat-syarat yang akan dijelaskan. Ketidakberaturan horizontal menurut SNI 1726:2012 dapat diklasifikasi sebagai berikut ini.

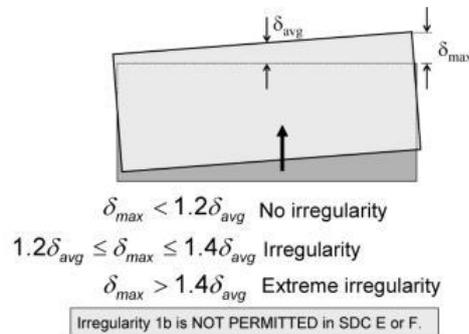
1) Ketidakberaturan Torsi

Ketidakteraturan torsi menurut SNI terdapat dua buah klasifikasi ketidakberaturan torsi berdasarkan simpangan antar lantai tingkatnya, yaitu ketidakberaturan torsi, dan ketidakberaturan torsi berlebihan.

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. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur dimana diafragmanya kaku atau setengah kaku.

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

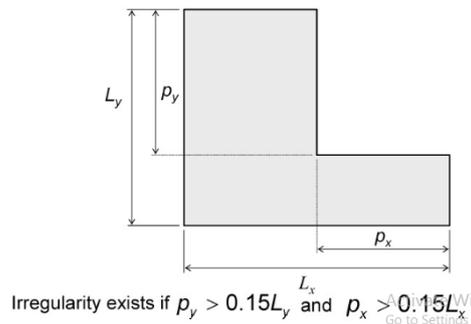
simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratkan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur dimana diafragma kaku atau setengah kaku.



Gambar 2. 16 Ketidakberaturan torsi (Indarto, 2013)

2) Ketidakberaturan Sudut Dalam

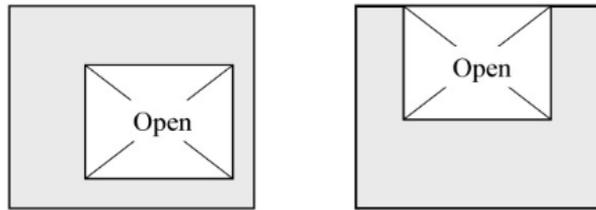
Ketidakberaturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua proyeksi denah struktur dari sudut dalam lebih besar dari 15 persen dimensi denah struktur dalam arah yang ditentukan.



Gambar 2. 17 Ketidakberaturan sudut dalam (Indarto, 2013)

3) Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

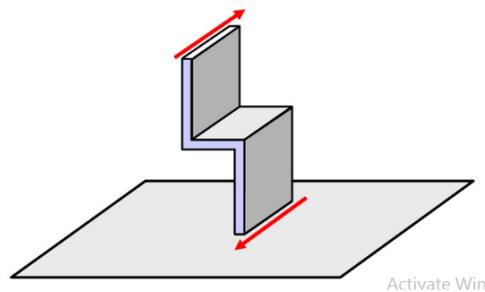
Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat diafragma dengan diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50 persen daerah diafragma bruto yang melingkupinya, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50 persen dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.



Gambar 2. 18 Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma
(Indarto, 2013)

4) Ketidakberaturan Pergeseran Melintang Terhadap Bidang

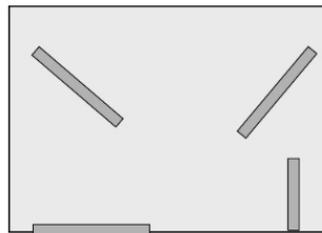
Ketidakteraturan pergeseran melintang terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran melintang terhadap bidang elemen vertikal.



Gambar 2. 19 Ketidakberaturan pergeseran melintang terhadap bidang
(Indarto, 2013)

5) Ketidakberaturan Sistem Nonparalel

Ketidakteraturan sistem nonparalel didefinisikan ada jika elemen penahan gaya lateral vertikal tidak paralel atau simetris terhadap sumbu-sumbu orthogonal utama sistem penahan gaya gempa.



Gambar 2. 20 Ketidakberaturan sistem nonparalel (Indarto, 2013)

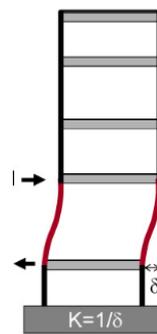
b. Ketidakberaturan Vertikal

Struktur bangunan gedung dapat mempunyai satu atau lebih ketidakberaturan vertikal jika memenuhi syarat-syarat yang akan dijelaskan. Ketidakberaturan vertikal menurut SNI 1726:2012 dapat diklasifikasi sebagai berikut.

a. Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak

Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak menurut SNI terdapat dua buah klasifikasi kekakuan lateralnya, yaitu ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak dan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berlebihan. Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat di mana kekakuan lateralnya kurang dari 70 persen kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 persen kekakuan rata-rata tiga tingkat di atas nya.

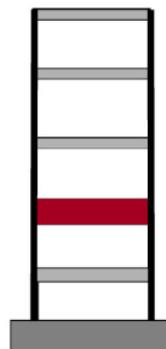
Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berlebihan didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat dimana kekakuan lateralnya kurang dari 60 persen kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 persen kekakuan rata-rata tiga tingkat di atas nya.



Gambar 2. 21 Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (Indarto, 2013)

b. Ketidakberaturan Berat (Massa)

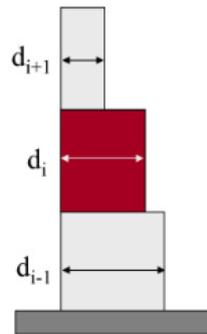
Ketidakberaturan berat (massa) didefinisikan ada jika massa efektif semua tingkat lebih dari 150 persen massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.



Gambar 2. 22 Ketidakberaturan berat (Indarto, 2013)

c. Ketidakberaturan Geometri Vertikal

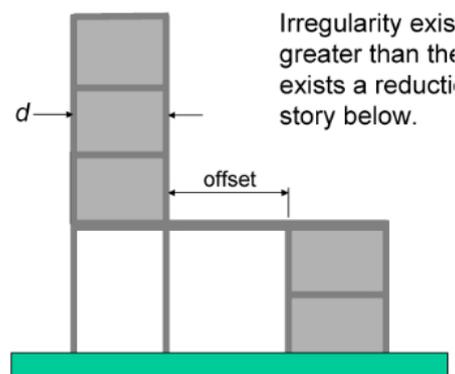
Ketidakberaturan geometri vertikal didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem penahan gaya gempa di semua tingkat lebih dari 130 persen dimensi horizontal sistem penahan gaya gempa tingkat di dekatnya.



Gambar 2. 23 Ketidakberaturan geometri vertikal (Indarto, 2013)

d. Diskontinuitas Arah Bidang dalam Ketidakberaturan Elemen Penahan Gaya Lateral Vertikal

Diskontinuitas arah bidang dalam ketidakberaturan elemen penahan gaya lateral vertikal didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen penahan gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen penahan di tingkat di bawahnya.



Gambar 2. 24 Diskontinuitas arah bidang dalam ketidakberaturan elemen penahan gaya lateral vertikal (Indarto, 2013)

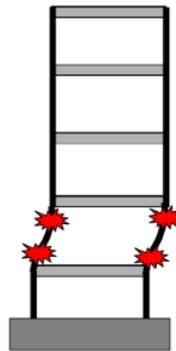
7. Diskontinuitas dalam Ketidakberaturan Kuat Lateral Tingkat

Diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat menurut SNI terdapat dua buah klasifikasi kekakuan lateralnya, yaitu diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat dan

diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat yang berlebihan.

Diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat didefinisikan ada jika kuat lateral tingkat kurang dari 80 persen kuat lateral tingkat di atasnya. Kuat lateral tingkat adalah kuat lateral total semua elemen penahan seismik yang berbagi geser tingkat untuk arah yang ditinjau.

Diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat yang berlebihan didefinisikan ada jika kuat lateral tingkat kurang dari 65 persen kuat lateral tingkat di atasnya. Kuat tingkat adalah kuat total semua elemen penahan seismik yang berbagi geser tingkat untuk arah yang ditinjau.



Gambar 2. 25 Diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat (Indarto, 2013)

2.2.3 Kekakuan

Kekakuan elastik didefinisikan sebagai kemiringan kurva beban-simpangan atau kurva *envelope* pada beban saat $0,4P_{peak}$. Kemiringan garis digunakan untuk menentukan dan mengetahui bagian elastis kurva. Hal ini juga digunakan untuk menemukan parameter seperti daktilitas, P_{yield} , dan Δ_{yield} . Kekakuan elastik didapat menggunakan persamaan berikut ini.

$$K_e = \frac{0,4P_{peak}}{\Delta 0,4P_{peak}} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan:

- K_e = kekakuan elastik (kN/mm)
- P_{peak} = beban pada saat $0,4P_{peak}$
- ΔP_{peak} = simpangan pada saat beban $0,4P_{peak}$

Besarnya kuat geser yang terjadi pada dinding merupakan besarnya beban ultimit terhadap satuan bentang panjang dinding yang dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$S_u = \frac{P_u}{b} \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan:

S_u = kuat geser,

P_u = beban geser *ultimit*, dan

b = lebar dinding yang dikenai beban.

Beban pada saat kondisi leleh dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$P_{yield} = \Delta u - \sqrt{\Delta u^2 - \frac{2A}{K_e}} \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan:

P_{yield} = beban pada kondisi leleh (kN),

A = luas sesuai beban-simpangan yang diamati (kNmm), dan

K_e = kekakuan elastik (kN/mm).

Simpangan leleh dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$\Delta_{yield} = \frac{P_{yield}}{K_e} \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan:

Δ_{yield} = simpangan leleh (mm),

K_e = kekakuan elastik (kN/mm), dan

P_{yield} = beban pada kondisi leleh (kN).

2.2.4 Gaya Geser Dasar

Gaya geser dasar merupakan penyederhanaan getaran gempa bumi yang bekerja pada dasar bangunan. Gaya geser dasar selanjutnya digunakan sebagai gaya gempa rencana yang harus ditinjau dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung. Gaya geser dasar pada struktur gedung beraturan dapat ditentukan dengan metode statik ekuivalen, sedangkan untuk struktur gedung tidak beraturan ditinjau dengan metode dinamik (Cornelis, Bunganaen, & Uumbu Tay, 2014).

Gaya geser dasar akan didistribusikan secara vertikal sepanjang tinggi struktur sebagai gaya horizontal tingkat yang bekerja pada masing-masing tingkat

bangunan. Dengan menjumlahkan gaya horizontal pada tingkat-tingkat yang ditinjau dapat diketahui gaya geser tingkat yaitu gaya geser yang terjadi pada dasar tingkat yang ditinjau. Akibat dari gaya yang terjadi pada tingkat-tingkat tersebut maka akan mengakibatkan terjadinya perpindahan dan simpangan pada tingkat-tingkat tersebut (Cornelis, Bunganaen, & Umbu Tay, 2014).

2.2.5 Perpindahan tingkat (*story displacement*)

Perpindahan adalah simpangan suatu lantai yang diukur dari dasar lantai. Menurut SNI 1726:2012 pasal 7.8.6, penentuan simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau.

Menurut SNI 1726:2012, bagi struktur yang dirancang untuk kategori desain seismik yang memiliki ketidakberaturan horizontal torsi, simpangan antar lantai desain (Δ), harus dihitung sebagai selisih terbesar dari defleksi titik-titik atas dan di bawah tingkat yang letaknya segaris secara vertikal di sepanjang salah satu bagian tepi struktur. Simpangan dinyatakan dalam bentuk *drift indeks*. *Drift* indeks dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Drift Indeks} = \frac{\Delta}{H}$$

Keterangan :

Δ = besar defleksi maksimum yang terjadi 43, dan

H = ketinggian struktur.

2.2.6 Simpangan antar tingkat (*story drift*)

Respons struktur bangunan saat terjadi gempa dapat dilihat dengan adanya simpangan antar tingkat (*story drift*) pada bangunan. Simpangan *drift* adalah simpangan suatu lantai yang diukur dari dasar lantai di bawahnya.

Menurut SNI 1726:2012 pasal 7.8.6, penentuan defleksi di dasar tingkat (δx) boleh ditinjau Apabila pusat massa tidak terletak segaris dalam arah vertikal, diizinkan untuk menghitung berdasarkan proyeksi vertikal dan pusat massa di tingkat atasnya. sesuai pada Gambar 2.21. Defleksi pusat massa di tingkat (δx) harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut :

$$\delta x = \frac{c_d \delta_{xe}}{I_e} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan:

C_d = faktor amplikasi defleksi,

δ_{xe} = defleksi pada lokasi yang disyaratkan pada analisis elastis, dan

I_e = faktor keutamaan gempa.

2.2.7 Percepatan Gempa

Setiap gempa yang terjadi akan menimbulkan satu nilai percepatan tanah pada suatu tempat. Nilai percepatan tanah yang biasa diperhitungkan pada perencanaan bangunan yaitu percepatan tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA). Semakin besar nilai percepatan tanah maka semakin besar pula risiko gempa bumi yang akan terjadi. Pengukuran percepatan tanah dilakukan secara empiris dengan pendekatan dari beberapa rumus yang diturunkan dari magnitude gempa atau data intensitas.

Massinai dkk. (2016) menyatakan bahwa percepatan tanah maksimum adalah nilai percepatan terbesar pada permukaan yang pernah terjadi di suatu wilayah dalam periode waktu tertentu akibat getaran gempa. Dampak dari gempa bumi yang dialami suatu lokasi dapat dipahami dengan menggunakan data PGA.

Persamaan empiris yang menghubungkan antara PGA dengan intensitas gempa bumi adalah sebagai berikut:

$$PGA = \exp\left(\frac{I-0,7}{2}\right) \dots \dots \dots (2.6)$$

dengan:

I = $I_0 \exp^{-b\Delta}$,

Δ = jarak episentrum,

b = 0,00051,

I_0 = intensitas sumber gempa = 1,5 (M-0,5), dan

I = intensitas pada jarak episentrum (stasiun pengamatan).

Parameter getaran gelombang gempa yang dicatat oleh seismograf adalah simpangan kecepatan dalam satuan kine (cm/dt), simpangan dalam satuan mikrometer, dan percepatan dalam satuan gal atau cm/dt^2 . Parameter yang terpenting dalam seismologi teknik atau *earthquakes engineering* adalah nilai percepatan tanah. Nilai percepatan tanah dapat dihitung langsung oleh seismograf khusus atau disebut juga *strong motion seismograph* atau *accelerograf*, tetapi

jaringan *accelerograf* tidak lengkap dalam segi periode waktu maupun tempatnya, maka perhitungan empiris sangat perlu dibuat.

Kapojos dkk. (2015) menyatakan untuk keperluan bangunan tahan gempa, harga percepatan tanah dapat dihitung dengan cara pendekatan dari data historis gempa bumi. Beberapa persamaan pendekatan tersebut antara lain:

Rumusan Donovan

$$a = \frac{5600 \exp^{0.5M}}{(R+25)^{1.32}} \dots \dots \dots (2.8)$$

dengan:

a = percepatan,

M = magnitudo,

R = jarak hiposentrum (Km),

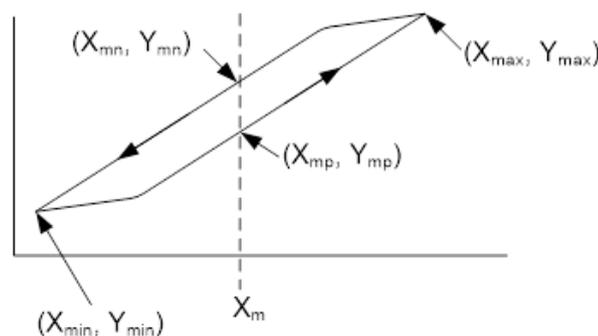
$$R = \sqrt{\Delta^2 + h^2} \dots \dots \dots (2.9)$$

Δ = jarak episentrum (Km), dan

h = kedalaman sumber gempa (Km)

2.2.8 Histerisis Energi

Kurva hysteretic loop yang dihasilkan dari pengujian dengan pembebanan bolak-balik merupakan hubungan antara beban (load) dan simpangan (displacement). Hubungan ini menunjukkan kapasitas dan perilaku struktur dalam menerima dan menahan beban pada tiap siklusnya. Semakin datar hysteretic loop yang terjadi pada tiap siklus menunjukkan semakin rendahnya kekakuan geser yang terjadi akibat beban luar. Selain itu dari kurva hysteretic loops dapat diketahui kandungan energi yang diserap maupun yang lepas oleh masing-masing struktur pada setiap siklusnya. Energi Hysteresis merupakan luasan total dari kurva tertutup (bentuk daun) pada hysteretic loops yang diambil pada setiap siklusnya.



Gambar 2. 26 Kurva Histerisis