

PERBANDINGAN KURVA KAPASITAS (*PUSHOVER CURVE*) BANGUNAN GEDUNG DENGAN VARIASI MUTU BANGUNAN

Cut Nella Asyifa¹, Adrian Ulza², Luthfi Chaliqi Taufiq³

^{1,3}) Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111

²) TDMRC, Universitas Syiah Kuala

Jl. Hamzah Fansuri No. 8, Darussalam Banda Aceh 23111,

*)email: cutnellaasyifa@usk.ac.id

Diterima : 17 April 2023

Direvisi : 10 Mei 2023

Disetujui : 13 Mei 2023

Diterbitkan : 31 Mei 2023

Abstract: Indonesia is one of the areas that is classified as prone to geological disasters, especially earthquakes. Based on records from the Geological Agency from 2000 to 2021, there have been 5 to 26 earthquakes that have resulted in fatalities, and building damage, where one of the affected buildings is an office building. Structural capacity is one of the most important aspects to find out how the maximum capacity that a building structure can withstand. The basic concept in structural planning is to create an effective and efficient structure. This is influenced by how big (efficient) the modeling of the structure with the difference in quality and dimensions is planned. Differences in quality and dimensions will cause differences in the capacity of the building structure. The typology of office buildings obtained from survey results in 3 regions, namely Aceh, Kepulauan Riau, and Palembang City and also based on engineering judgment considerations to categorize the type of structural buildings from Type 1 (Poor), Type 2 (Good), and Type 3 (Best). This analysis was conducted using SAP2000 to obtain a comparison of the differences in structural capacity values of Type 1 (Poor), Type 2 (Good), and Type 3 (Best) buildings with variations of 2 and 3 floors. It is hoped that it can be taken into consideration by the government and the private sector in planning the planned structure. A comparison of the capacity curves in the x and y directions on the 2nd-floor model shows a different percentage of 3% while the 3rd-floor model is 8,85%. Based on the percentage difference, it shows that there is no significant difference that occurs. Based on the comparison of capacity curves, the x and y directions for the 2 and 3-story models show the greatest energy dissipation value, namely in the 2-story structure type 3 (Best), and the smallest energy dissipation value, namely in the 3-story structure type 1 (Poor). The percentage difference in the energy dissipation value of the two structures reaches 79%. This shows the significance of the difference in energy dissipation values for dimensional changes and number of floor increases.

Keywords : pushover curve, office building, quality variation, SAP2000

Abstrak: Indonesia merupakan salah satu wilayah yang tergolong rawan akan bencana geologi, khususnya gempa bumi. Berdasarkan catatan dari Badan Geologi sejak tahun 2000 hingga 2021, telah terjadi 5 hingga 26 kejadian gempa bumi yang mengakibatkan terjadinya korban jiwa, kerusakan bangunan, di mana salah satu bangunan yang terkena dampak adalah gedung perkantoran. Kapasitas struktur merupakan salah satu aspek terpenting untuk mengetahui bagaimana kapasitas maksimum yang mampu ditahan struktur bangunan. Konsep dasar dalam perencanaan struktur adalah menentukan elemen struktur yang efektif dan efisien. Hal ini dipengaruhi oleh seberapa besar (efisien) pemodelan struktur dengan mengamati perbedaan mutu dan dimensi elemen struktur yang direncanakan. Perbedaan mutu dan dimensi ini akan menyebabkan perbedaan kapasitas struktur bangunan. Tipologi gedung perkantoran yang diperoleh dari hasil survei pada tiga wilayah, yaitu Aceh, Kepulauan Riau, dan Kota Palembang; dan juga dari pertimbangan *engineering judgement* mengkategorikan tipe struktur bangunan sebagai Tipe 1 (*Poor*), Tipe 2 (*Good*), dan Tipe 3 (*Best*). Analisis ini dilakukan dengan menggunakan SAP2000 untuk mendapatkan perbandingan perbedaan nilai kapasitas struktur bangunan dengan variasi 2 dan 3 lantai dari Tipe 1 (*Poor*), Tipe 2 (*Good*), dan Tipe 3 (*Best*). Sehingga diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan pemerintah dan swasta dalam perencanaan struktur yang direncanakan. Perbandingan kurva kapasitas arah x dan arah y pada model bangunan 2 dan 3 lantai menunjukkan persentase perbedaan berturut-turut sebesar 3% dan 8,85%. Berdasarkan perbandingan kurva kapasitas, arah x dan arah y untuk model 2 dan 3 lantai menunjukkan nilai disipasi energi terbesar yaitu

pada struktur 2 lantai Tipe 3 (*Best*) dan nilai disipasi energi terkecil yaitu pada struktur 3 lantai Tipe 1 (*Poor*). Persentase perbedaan selisih nilai disipasi energi dari kedua struktur mencapai 79%. Hal ini menunjukkan perbedaan nilai disipasi energi terhadap perubahan dimensi dan peningkatan jumlah lantai.

Kata kunci : kurva kapasitas, gedung kantor, variasi mutu, SAP2000

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu wilayah yang tergolong rawan akan bencana geologi, khususnya gempa bumi. Hal ini disebabkan posisi Indonesia yang terletak di antara empat lempeng tektonik yaitu lempeng benua Eurasia, Lempeng Samudra Indo-Australia, Lempeng Samudra Pasifik, dan Lempeng Laut Philipina yang aktif berinteraksi yang mengakibatkan terbentuknya cekungan muka, cekungan belakang, jalur magmatik, pola struktur geologi dan sumber gempa bumi [1]. Berdasarkan catatan dari Badan Geologi sejak tahun 2000 hingga 2021 telah terjadi 5 hingga 26 kejadian gempa bumi yang mengakibatkan terjadinya korban jiwa, kerusakan bangunan, kerusakan lingkungan dan kerugian harta benda. Untuk digarisbawahi bahwa tujuan utama dari rancang bangunan adalah untuk meminimalkan korban jiwa saat kejadian bencana alam ekstrim seperti gempa bumi. Hal ini sejalan dengan penjelasan [2] bahwa bangunan tidak dirancang dengan tujuan eksplisit untuk mengurangi kerusakan dan mencegah kehilangan fungsi okupansi ketika terjadi risiko gempa bumi, melainkan jikapun itu terjadi, hal berikut merupakan nilai tambah, di samping tujuan awal yaitu untuk untuk memprioritaskan keselamatan jiwa.

Pada praktiknya, struktur bangunan tahan gempa didesain secara preskriptif dengan merujuk acuan baku dan normatif, yang umumnya disebut dengan standar bangunan (*building code*) tentang ketentuan-ketentuan minimum yang harus diikuti oleh insinyur bangunan. Standar desain bangunan tahan gempa di Indonesia merujuk pada standar SNI 1726:2019 [3], sedangkan standar beban minimum merujuk pada SNI 1727:2020 [4] yang keduanya diadopsi dari ASCE 7-16 [5]. Kemudian, tata cara desain struktur beton bertulang merujuk pada SNI 2847:2019 [6] yang diadopsi dari ACI 318-14 [7]. Standar ACI 318-14 menitikberatkan filosofi desain keadaan batas (*Limit State Design, LSD*) dalam level komponen struktural untuk memenuhi keadaan batas ultimit (*Ultimate Limit States, ULS*) dan keadaan batas layan (*Serviceability Limit States, SLS*). Di sisi lain, metode desain dalam ASCE 7-16 salah satunya menggunakan pendekatan beban dan faktor tahanan

(*Load and Resistance Factor Design, LRFD*) yang hampir memiliki kesamaan dengan LSD. Perbedaannya, filosofi desain ASCE lebih merujuk pada level kinerja bangunan secara keseluruhan dengan mengikutsertakan metode probabilistik untuk mengakomodir ketidakpastian pembebanan dan material bangunan. Secara ringkas, baik ASCE 7-16 dan ACI 318-14 dianggap menggunakan basis desain preskriptif, sekalipun faktanya keduanya juga membahas konsep desain berbasis kinerja (*Performance-Based Design, PBD*).

PBD adalah pendekatan perancangan struktur yang menekankan pada pencapaian level kinerja tertentu yang merupakan alternatif dari desain berbasis preskriptif. Perancangan didasarkan pada evaluasi level kinerja yang diinginkan, sambil memastikan bahwa struktur tersebut aman dan memenuhi standar perancangan yang berlaku. Salah satu metode dalam prosedur PBD pada saat pertama kali dikembangkan [8] adalah merujuk pada metode beban dorong nonlinier (*nonlinear static pushover*) untuk menghasilkan kurva kapasitas (*capacity curve*). Menurut penelitian [9], analisis statis *pushover nonlinear* adalah salah satu cara yang dilakukan untuk mengetahui pola beban lateral statis tertentu dalam suatu arah yang ditingkatkan secara bertahap sampai mencapai kondisi keruntuhan. Aspek terpenting dalam perencanaan struktur menggunakan prosedur PBD adalah fiturnya untuk mengevaluasi kinerja struktur bangunan secara keseluruhan, berupa kapasitas dan daktilitas akibat beban lateral seismik, sehingga desain yang optimal dapat diperoleh. Beberapa pengembangan varian kurva kapasitas untuk mengevaluasi kinerja seismik bangunan dalam desain PBD di antaranya adalah *Capacity Spectrum Method* [8], *N2 Method* [10]; *Modal Pushover Method* [11]; *Equivalent Linearization Method* [12] dan [13], dan *Displacement Coefficient Method* [14]. Penggunaan PBD juga tidak hanya dilakukan untuk evaluasi kinerja seismik, namun juga dapat digunakan untuk evaluasi kinerja bangunan akibat beban tsunami [15].

Kebutuhan arsitektural, pemilihan konfigurasi sistem struktur, preferensi pemilihan mutu material penyusun komponen struktural, ketentuan minimum pada standar bangunan saat bangunan dirancang, serta kualitas pelaksanaan konstruksi adalah

beberapa hal yang dapat mempengaruhi ragam variabilitas kapasitas struktur secara utuh sebagai sebuah sistem struktur bangunan. Ketentuan standar bangunan juga memberikan persyaratan khusus yang mengatur pemilihan mutu material dan preferensi dalam mendesain komponen struktur. Sebagai contoh, sebagaimana pada SNI 2847:2019 mensyaratkan kuat tekan beton struktural minimum sebesar 21 MPa, ataupun ketentuan khusus yang direfleksikan oleh Kementerian Pekerjaan Umum [6], bahwa penggunaan baja tulangan ulir mulai diwajibkan untuk digunakan pada tulangan utama maupun tulangan sengkang pengikat. Ketentuan pada standar termutakhir berikut memberikan persyaratan yang lebih ketat jika dibandingkan dengan standar sebelumnya. Hal ini, tentunya memberikan perbedaan karakteristik berupa variasi mutu material, maupun dimensi komponen struktur yang digunakan, di mana secara normatif bahwa bangunan baru akan memiliki kinerja yang lebih baik.

Survei yang dilaksanakan di tiga provinsi yang ada di Indonesia menunjukkan terdapat tiga karakteristik bangunan yang umumnya digunakan. Karakteristik ini terbagi menjadi Tipe 1 (*Poor*), Tipe 2 (*Good*) dan Tipe 3 (*Best*) dengan rata-rata 2 dan 3 lantai. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan kurva kapasitas struktur 2 dan 3 lantai untuk 3 tipe mutu dan dimensi tersebut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pembangunan gedung.

2. METODE PENELITIAN

Survei Bangunan Gedung Perkantoran

Lingkup penelitian ini berupa tipologi gedung perkantoran yang diperoleh dari hasil survei pada tiga wilayah, yaitu Aceh, Kepulauan Riau, dan Kota Palembang. Pengembangan tipologi bangunan dilakukan dengan metode *Rapid Visual Survey* (RVS) dengan menggunakan formulir survei *KoboToolbox*, dan dengan prosedur yang merujuk pada studi [16]. Error! Reference source not found. menunjukkan karakteristik hasil RVS pada gedung perkantoran untuk daerah Aceh, Kota Palembang, dan Kepulauan Riau.

Gedung Perkantoran Daerah Aceh



(a) Dimensi kolom gedung perkantoran daerah aceh



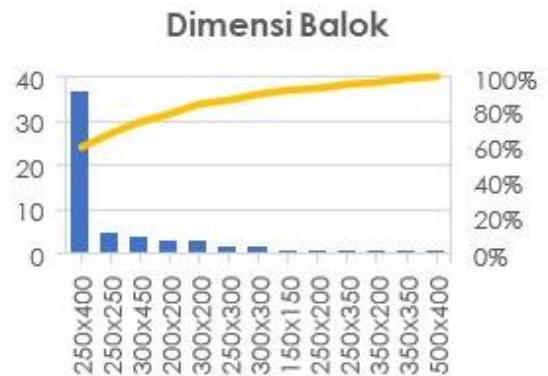
(b) Dimensi balok gedung perkantoran daerah aceh



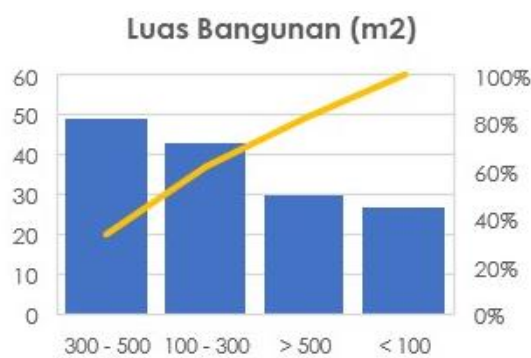
(c) Bentuk bangunan gedung perkantoran daerah aceh



(d) Jumlah lantai gedung perkantoran daerah aceh



(g) Dimensi balok gedung perkantoran kota Palembang

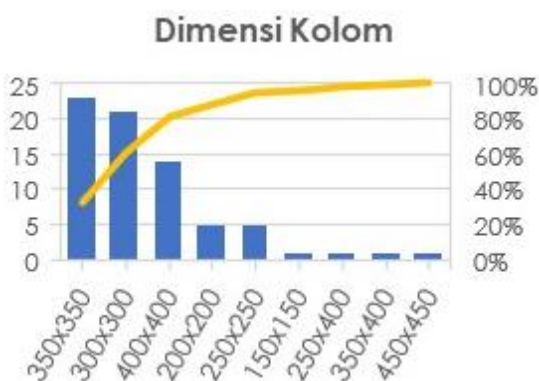


(e) Luas bangunan gedung perkantoran daerah aceh



(h) Jumlah lantai gedung perkantoran kota Palembang

Gedung Perkantoran Kota Palembang



(f) Dimensi kolom gedung perkantoran kota Palembang



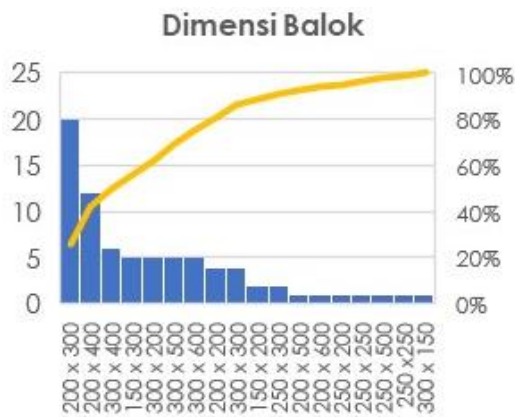
(i) Bentuk bangunan gedung perkantoran kota Palembang



(j) Luas bangunan gedung perkantoran kota Palembang



(k) Dimensi kolom gedung perkantoran kepulauan riau



(l) Dimensi balok gedung perkantoran kepulauan riau



(m) Jumlah lantai gedung perkantoran kepulauan riau



(n) Luas bangunan gedung perkantoran kepulauan riau

Gambar 1 Karakteristik tipologi gedung perkantoran untuk daerah Aceh, Kota Palembang, dan Kepulauan Riau

Penentuan tipologi bangunan gedung yang digunakan tidak terbatas pada nominal atau frekuensi tertinggi pada kurva histogram pada Error! Reference source not found., namun juga berdasarkan pertimbangan *engineering judgement* untuk mengkategorikan tipe bangunan struktur dari Tipe 1 (*Poor*), Tipe 2 (*Good*), dan Tipe 3 (*Best*). Pada studi ini, dua tipologi bangunan berupa bangunan gedung yang terdiri dari 2 dan 3 lantai, dengan beserta tiga variasi tipe mutu bangunan (*poor*, *good*, dan *best*). Data hasil survei ini digunakan sebagai pertimbangan untuk melakukan analisis perbedaan kapasitas bangunan ketika terkena gempa. Gambar detail kolom dan balok dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Tipe Kolom	Tipe 1 (Poor)	Tipe 2 (Good)	Tipe 3 (Best)
Dimensi	300 x 300	400 x 400	500 x 500
Tulangan	8Ø16	12Ø16	12Ø19
Sengkang	Ø10-150	Ø10-150	Ø10-150
Tipe Balok	Tipe 1 (Poor)	Tipe 2 (Good)	Tipe 3 (Best)
Dimensi	250 x 400	250 x 400	300 x 500
Tulangan Atas	5Ø16	5Ø19	5Ø19
Tulangan Bawah	3Ø16	3Ø19	3Ø19
Sengkang	Ø10-150	Ø10-150	Ø10-150

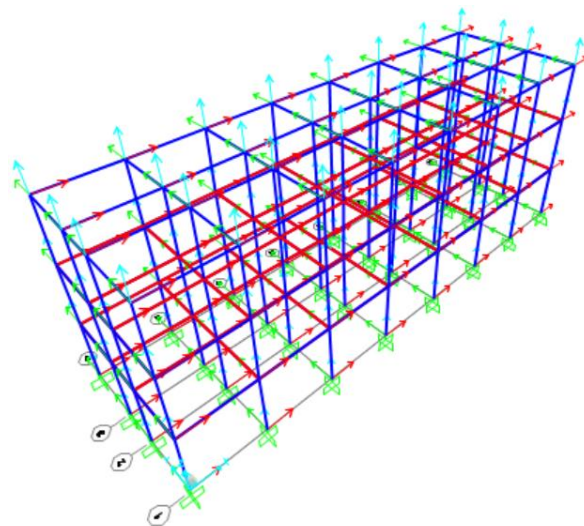
* Semua jarak dalam satuan milimeter

Gambar 2. Detail pendimensian struktur kolom dan struktur balok

Pada penelitian ini terdapat tiga tipe mutu bangunan yang digunakan, yaitu Tipe 1 (*Poor*) dengan nilai $f'c$ 21 MPa, Tipe 2 (*Good*) dengan $f'c$ 21 MPa, dan Tipe 3 (*Best*) dengan nilai $f'c$ 25 MPa. Setiap masing-masing tipe digunakan untuk gedung dengan 2, dan 3 lantai. Tipe 1 merepresentasikan bangunan yang memiliki defisiensi desain struktur bangunan dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), contohnya di mana ketentuan kolom-kuat-balok-lemah tidak terpenuhi. Kemudian, Tipe 2 mengadopsi desain yang memenuhi ketentuan SRPMK. Terakhir, Tipe 3 merupakan variasi tambahan yang memiliki tipologi pendimensian struktur yang jauh lebih baik daripada Tipe 1 dan Tipe 2. Dapat diringkas bahwa ketiga model struktur berikut memiliki konfigurasi *layout* yang tipikal, namun memiliki variasi dalam hal mutu kuat tekan beton dan pendimensian struktur balok dan struktur kolom.

Pemodelan dan Analisis Struktur

Model struktur untuk tipologi gedung perkantoran yang akan dievaluasi pada lingkup penelitian ini diberikan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Pemodelan struktur gedung

Standar Nasional Indonesia (SNI 1727-2020) tentang Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain mendefinisikan beban sebagai gaya atau aksi lainnya yang diperoleh dari berat seluruh bahan bangunan, penghuni, barang-barang yang ada di dalam bangunan gedung, efek lingkungan, selisih perpindahan, dan gaya kekangan akibat perubahan dimensi. Pembebanan yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari beban mati (*dead load*), dan beban hidup (*live load*). Beban mati yang digunakan pada penelitian ini berasal dari berat sendiri struktur yang terdiri dari beban kolom, balok, pelat lantai dan dinding. Beban hidup yang digunakan merujuk pada Standar Nasional Indonesia (SNI 1727-2020) untuk penggunaan gedung perkantoran.

Menurut penelitian [17] struktur gedung yang mengalami pembebanan pada kondisi tertentu menyebabkan terjadinya sendi plastis (*plastic hinge*) pada balok dan kolom. Sendi plastis merupakan bentuk ketidakmampuan elemen struktur balok dan kolom menahan gaya dalam. Pemodelan sendi plastis pada balok dan kolom pada SAP2000 adalah perbandingan momen dengan rotasi. FEMA 356 [18] menyebutkan bahwa sendi plastis untuk penampang balok, dan kolom harus menunjukkan kekuatan, kekakuan dan perpindahan. Selain itu juga harus menggambarkan interaksi pada kolom dan balok pada portal beton bertulang.

Pada penelitian ini, respon plastisitas komponen struktural (struktur kolom dan struktur balok) dimodelkan dengan model penampang *fiber* [19] dengan jumlah diskritisasi tertentu, di mana hasil komputasi momen-kurvatur dengan metode *fiber* memiliki nominal yang tidak jauh berbeda dengan

momen-kurvatur dengan integrasi langsung. Penggunaan model penampang *fiber* memiliki keunggulan dalam komputasi numerik yang umumnya dapat menghasilkan hasil yang konvergen jika dibandingkan dengan sendi plastis konvensional. Sebagai informasi tambahan, model diskrit untuk penampang beton terkekang (*confined*), dan tidak terkekang (*unconfined*) merujuk pada model Mander [20] dan [21] sedangkan model diskrit untuk penampang baja tulangan merujuk pada model Park dan Paulay [22].

Menurut SNI 1726-2002, analisis non linier statis maupun dinamis dapat dilakukan dengan menggunakan metode *pushover*. Analisis *pushover* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis struktur secara linier maupun nonlinier, di mana pengaruh beban rencana terhadap struktur gedung dianggap sebagai beban-beban statik yang menangkap pada pusat massa masing-masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara bertahap sampai keadaan melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) di dalam struktur gedung. Kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk elastoplastis yang besar sampai mencapai kondisi di ambang keruntuhan.

Menurut penelitian [23], hasil akhir dari metode *pushover* adalah kurva kapasitas struktur (*capacity curve*) yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan (*roof displacement*). Analisis *pushover* juga memperlihatkan secara visual perilaku struktur pada saat kondisi elastis, plastis dan sampai terjadinya keruntuhan pada elemen-elemen strukturnya.

SAP2000 adalah perangkat lunak dari *Computer and Structure, Inc.* untuk menganalisis dan mendesain struktur. SAP2000 memiliki sistem yang terintegrasi untuk memodelkan, menganalisis, mendesain dan mengoptimalkan suatu struktur. SAP2000 sering digunakan untuk struktur umum seperti bangunan, stadion, pabrik, *tower*, struktur lepas lantai, dan lainnya. Dalam analisis struktur khususnya perhitungan mekanika gaya, dua metode yang se-ring saat ini digunakan adalah Metode Matriks dan Metode Elemen Hingga. Kedua metode ini mewakili analisis struktur *modern* menggantikan metode-metode konvensional. Analisis struktur *modern* menggunakan model diskrit untuk mempresentasikan sistem struktur yang sebenarnya. Dengan cara ini sistem struktur terbagi menjadi bagian-bagian kecil yang dinamakan elemen yang dibatasi dua *joint* sebagai ujungnya. Menurut penelitian [24], penyelesaian analisis struktur

berbasis komputer dilakukan dengan membagi model menjadi elemen-elemen formulasi matematis dari suatu model struktur yang dianggap sebagai representasi yang paling mendekati sifat struktur *real*.

3. HASIL PEMBAHASAN

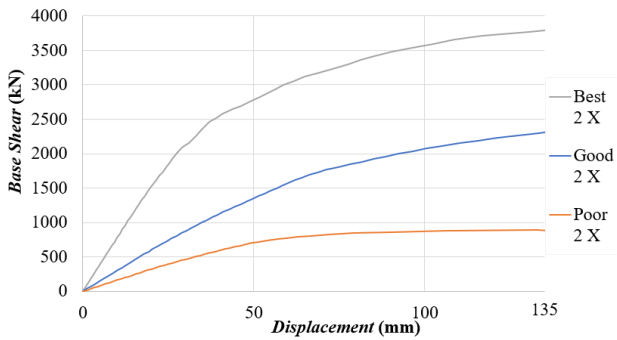
Analisis Struktur

Kategori tipe bangunan gedung yang didapatkan berdasarkan hasil survey untuk daerah Aceh, Kota Palembang, Kepulauan Riau dan pertimbangan *engineering judgement* untuk membangun model tipologi bangunan [16]. Analisis struktur yang dilakukan yaitu dengan memberikan beban arah x, dan arah y untuk mendapatkan kapasitas struktur Tipe 1 (*Poor*), Tipe 2 (*Good*), dan Tipe 3 (*Best*) untuk 2 dan 3 lantai. Kontrol dalam analisis kapasitas ini merupakan nilai *displacement* yang terjadi pada salah satu *joint* bagian atas struktur. Analisis struktur dilakukan dengan menggunakan *software* SAP2000. Kurva kapasitas yang dianalisis merupakan kurva hubungan antara *base shear* dan *displacement* pada struktur. Pembatasan nilai *displacement* yang digunakan berdasarkan persyaratan *drift* yang ada dalam SNI 1726-2019 yaitu 0,015 dari ketinggian struktur. Sehingga pembatasan *displacement* pada struktur 2 lantai sebesar 135 mm dan 200 mm pada struktur 3 lantai. Nilai energi disipasi didapatkan dengan mencari luasan dibawah kurva kapasitas yang dibatasi oleh besaran *displacement* untuk struktur 2 dan 3 lantai.

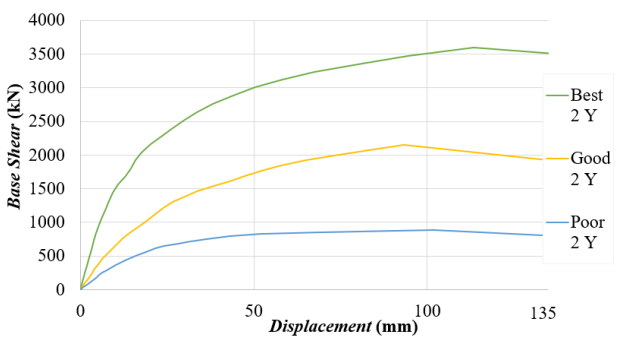
Perbandingan Kurva Kapasitas Model 2 Lantai Arah x dan y

Perbandingan kurva kapasitas arah x dari Tipe 1, Tipe 2, dan Tipe 3 untuk struktur 2 lantai menunjukkan bahwa struktur yang memiliki nilai kapasitas yang tertinggi adalah struktur Tipe 3 (*Best*). Nilai energi disipasi yang dihasilkan dari Tipe 1, 2, dan 3 berturut-turut sebesar 142274,79 kNmm; 355322,80 kNmm; dan 624436,5 kNmm. Perbandingan kurva kapasitas arah x model 2 lantai dapat dilihat pada **Gambar 4**.

Perbandingan kurva kapasitas arah y dari Tipe 1, Tipe 2, dan Tipe 3 untuk bangunan 2 lantai menunjukkan bahwa struktur yang memiliki nilai kapasitas yang tertinggi arah y adalah struktur Tipe 3 (*Best*). Nilai energi disipasi yang dihasilkan dari Tipe 1, 2, dan 3 berturut-turut sebesar 149778,7 kNmm; 346016,3 kNmm; dan 614252,3 kNmm. Perbandingan kurva kapasitas arah y model 2 lantai dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 4. Perbandingan kurva kapasitas model 2 lantai arah x



Gambar 5. Perbandingan kurva kapasitas model 2 lantai arah y

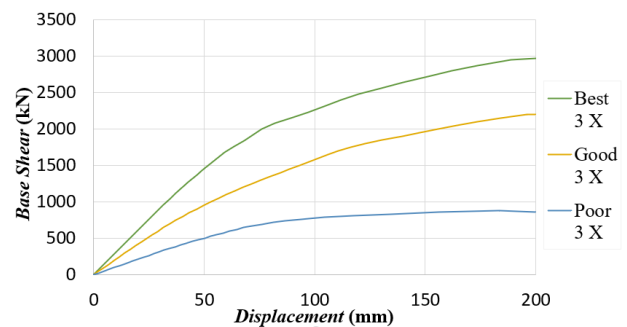
Perbandingan nilai disipasi energi arah x, dan arah y menunjukkan Tipe 1 nilai disipasi arah y lebih besar jika dibandingkan dengan arah x, pada Tipe 2 dan 3 lantai nilai disipasi energi arah x lebih besar jika dibandingkan dengan arah y. Persentase selisih antara arah x, dan arah y pada Tipe 1 sebesar 5%, Tipe 2 sebesar 2,6%, dan Tipe 3 sebesar 1,6%. Berdasarkan persentase perbedaan tersebut dapat disimpulkan untuk model 2 lantai rata-rata persentase perbedaan yang terjadi sekitar 3%. Persentase perbedaan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Persentase perbedaan energi disipasi arah x dan arah y model 2 lantai

2 Lantai Tipe	Energi Disipasi (kNmm)		Nilai Maksimum	Persentase Selisih Antara x dan y (%)
	Arah x	Arah y		
1 (Poor)	142274,8	149778,7	Arah Y	5,0
2 (Good)	355322,8	346016,3	Arah X	2,6
3 (Best)	624436,5	614252,3	Arah X	1,6

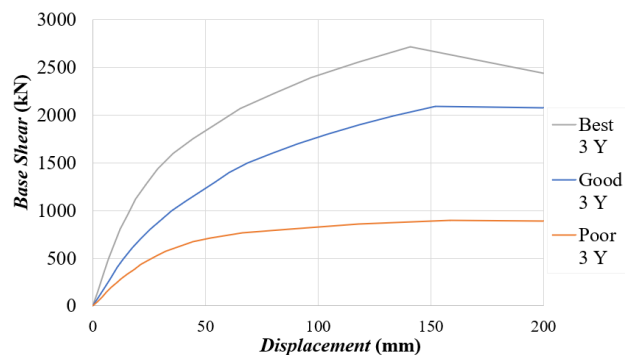
Perbandingan Kurva Kapasitas Model 3 Lantai Arah x dan y

Perbandingan kurva kapasitas arah x dari Tipe 1, Tipe 2, dan Tipe 3 untuk 3 lantai menunjukkan bahwa struktur yang memiliki nilai kapasitas yang tertinggi arah x adalah struktur Tipe 3 (*Best*). Nilai energi disipasi yang dihasilkan dari Tipe 1, 2, dan 3 berturut-turut sebesar 131070,52 kNmm; 284206,45 kNmm; dan 402770,89 kNmm. Perbandingan kurva kapasitas arah x model 3 lantai dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan kurva kapasitas model 3 lantai arah x

Perbandingan kurva kapasitas arah y dari Tipe 1, Tipe 2, dan Tipe 3 untuk 3 lantai menunjukkan bahwa struktur yang memiliki nilai kapasitas yang tertinggi arah y adalah struktur Tipe 3 (*Best*). Nilai energi disipasi yang dihasilkan dari Tipe 1, 2, dan 3 berturut-turut sebesar 148602,2 kNmm; 314644,02 kNmm; dan 424381,98 kNmm. Perbandingan kurva kapasitas arah y model 3 lantai dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan kurva kapasitas model 3 lantai arah y

Perbandingan nilai disipasi energi arah x, dan arah y menunjukkan pada setiap tipe menunjukkan nilai disipasi arah y lebih besar jika dibandingkan

dengan arah x. Persentase selisih antara arah x, dan arah y pada Tipe 1 sebesar 11,8%, Tipe 2 sebesar 9,7%, dan Tipe 3 sebesar 5%. Berdasarkan persentase perbedaan tersebut dapat disimpulkan untuk model 3 lantai terdapat perbedaan dengan rata-rata 8,85%. Persentase perbedaan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Persentase perbedaan energi disipasi arah x dan arah y model 3 lantai

3 Lantai Tipe	Energi Disipasi (kNmm)		Nilai Maksimum	Persentase Selisih Antara x dan y (%)
	Arah x	Arah y		
1 (Poor)	131070,5	148602,2	Arah Y	11,8
2 (Good)	284206,4	314644,0	Arah Y	9,7
3 (Best)	402770,9	424382,0	Arah Y	5,0

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Secara keseluruhan untuk struktur 2, dan 3 lantai baik arah x, dan arah y menunjukkan nilai energi disipasi terbesar yaitu pada Tipe 3 (Best). Hal ini selaras dengan mutu dan dimensi yang digunakan, di mana Tipe 3 merupakan tipe dengan karakteristik paling baik. Perbandingan kurva kapasitas arah x, dan arah y pada model 2 lantai menunjukkan persentase perbedaan sebesar 3% sedangkan model 3 lantai sebesar 8,85%. Hal ini kemungkinan disebabkan perbedaan jumlah lantai dan juga konfigurasi struktur arah x, dan arah y yang tidak terlalu besar. Perbandingan kurva kapasitas arah x, dan arah y struktur 2, dan 3 lantai menunjukkan nilai disipasi energi terbesar yaitu pada struktur 2 lantai Tipe 3 (Best), dan nilai disipasi energi terkecil yaitu pada struktur 3 lantai Tipe 1 (Poor). Persentase perbedaan selisih nilai disipasi energi dari kedua struktur mencapai 79%. Hal ini menunjukkan perbedaan nilai disipasi energi terhadap perubahan dimensi dan peningkatan lantai.

Saran

Saran pada penelitian selanjutnya yaitu untuk meneliti aspek-aspek lainnya yang mempengaruhi kapasitas struktur.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. B. Minster dan T. H. Jordan. 1978. *Present-day plate motions*. J Geophys Res, vol. 83, no. B11, p. 5331. doi: 10.1029/JB083iB11p05331.
- [2] Fema P-749. 2022. *Earthquake-resistant design concepts an introduction to seismic provisions for new buildings second edition*. [Online]. Available: www.ATCouncil.org SNI:1726-19. 2019. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung dan Non-Gedung.
- [3] SNI 1727:2020. 2020. Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain.
- [4] ASCE/SEI 7-16. 2016. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers (ASCE). doi: 10.1016/B978-0-7234-5558-5.00006-3.
- [5] SNI:2847-19. 2019. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.
- [6] ACI 318M-14. 2014. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary (ACI 318RM-14)*. American Concrete Institute (ACI).
- [7] S. A. Freeman, J. P. Nicoletti, and J. B. Tyrrell. 1975. *Evaluation of Existing Buildings for Seismic Risk - A Case Study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington*, in *Proceedings of the U.S. Conference on Earthquake Engineers, EERI*, Berkeley. pp. 113-122.
- [8] S. K. Wiyono dan E. Yuwono, 2011. Evaluasi kinerja struktur baja dengan sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) yang didesain berdasarkan SNI 03-1729-2002 di wilayah 6 peta gempa Indonesia. Universitas Kristen Petra. Surabaya.
- [9] P. Fajfar dan P. Gašperšič, 1996. *The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings*. *Earthq Eng Struct Dyn*. doi: 10.1002/(SICI)1096-9845(199601)25:1<31::AID-EQE534>3.0.CO;2-V.
- [10] A. K. Chopra dan R. K. Goel. 2003. *A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Unsymmetric-Plan Buildings: Theory and Preliminary Evaluation*.
- [11] A. C. Guyader dan W. D. Iwan. 2006. *Determining Equivalent Linear Parameters for Use in a Capacity Spectrum Method of Analysis*. *Journal of Structural Engineering*.

- ASCE, vol. 132, pp. 59–67.
- [13] FEMA 440. 2005. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Washington, D.C: Dipersiapkan oleh Applied Technology Council (ATC-55 Project) untuk Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- [14] ASCE/SEI 41-17. 2017. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE). doi: 10.1061/9780784414859.
- [15] M. Baiguera, T. Rossetto, I. N. Robertson, dan C. Petrone. 2021. *A Procedure for Performing Nonlinear Pushover Analysis for Tsunami Loading to ASCE 7*. *Journal of Structural Engineering*, vol. 148, no. 2, pp. 1–32. doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0003256.
- [16] R. Gentile, C. Galasso, Y. Idris, I. Rusydy, dan E. Meilianda. 2019. *From rapid visual survey to multi-hazard risk prioritisation and numerical fragility of school buildings*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 19, no. 7, pp. 1365–1386. doi: 10.5194/nhess-19-1365-2019.
- [17] N. R. Afandi, 2010. *Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Beton Dengan Analisis Pushover Menggunakan Program SAP 2000 (Studi Kasus : Gedung Rumah Sakit di Surakarta)*. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta, Surakarta, 2010.
- [18] FEMA 356. 2000. *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, D.C: Dipersiapkan oleh American Society of Civil Engineers (ASCE), dan dipublikasi oleh Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- [19] E. Spacone, F. C. Filippou, dan F. F. Taucer. 1996. *Fibre Beam-Column Model For Non-Linear Analysis Of R/C Frames: Part I. Formulation*, *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 25, no. 7, pp. 711–725. doi: 10.1002/(SICI)1096-9845(199607)25:7<711::AID-EQE576>3.0.CO;2-9.
- [20] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, dan R. Park. 1988. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).
- [21] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, dan R. Park. 1988. Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, vol. 114, no. 8, pp. 1827–1849. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1827).
- [22] R. Park dan T. Paulay. 1975. *Reinforced Concrete Structures*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. doi: 10.1002/9780470172834.
- [23] U. Nurdianti. 2013. *Studi Keandalan Struktur Gedung Tinggi tidak Beraturan Menggunakan Pushover Analysis pada Tanah Medium*. Jurusan Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanudin, Makasar.
- [24] W. Dewobroto. 2007. *Aplikasi Rekayasa Konstruksi dengan SAP2000*. Elex Media Komputindo.