

EVALUASI KINERJA STRUKTUR PADA DESAIN STRUKTURAL GEDUNG RUMAH SAKIT DENGAN METODE *PUSHOVER*

Structure Performance Evaluation of the Design of a Hospital Building Using the Pushover Method

Seto Ditosurya Aranta, Inggar Septhia Irawati

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada
Jalan Grafika 2 Yogyakarta, Indonesia

Surel: setodito@mail.ugm.ac.id; inggar_septhia@ugm.ac.id

Diterima : 6 Januari 2025

; Disetujui : 25 Maret 2025

Abstrak

Desain struktur gedung rumah sakit rawat inap 10 lantai di Kota Magelang telah selesai dilakukan dengan metode analisis linear dinamik. Mempertimbangkan bahwa Indonesia termasuk negara yang rawan terhadap gempa maka evaluasi kinerja struktur hasil desain penting untuk dilakukan. Dengan mempertimbangkan fungsi bangunan untuk rumah sakit dan saat ini masih dalam tahap desain maka tujuan evaluasi ini untuk mengetahui apakah target kinerja Immediate Occupancy dan Life Safety tercapai untuk level seismik BSE-1N dan BSE-2N. Evaluasi kinerja kemudian dilakukan berdasarkan ASCE 41-17 dengan menggunakan metode nonlinear statik. ASCE 41-17 ini dirujuk dalam penyusunan rancangan SNI tentang Evaluasi dan Rehabilitasi Seismik untuk Bangunan Gedung Eksisting. Pemodelan geometri struktur menggunakan pemodelan hasil desain. Pemodelan tersebut kemudian dilengkapi dengan parameter nonlinear, yang terdiri dari parameter nonlinear material, nonlinear penampang, dan nonlinear elemen. Arah beban lateral pushover pada analisis ini terbagi menjadi 4 arah, yaitu X positif, X negatif, Y positif, dan Y negatif. Berdasarkan hasil analisis diketahui bahwa kinerja struktur tidak memenuhi persyaratan ASCE 41-17 baik pada level seismik BSE-1N maupun BSE-2N. Berdasarkan hasil pengecekan nilai rasio kekuatan elastis perlu terhadap nilai rasio kekuatan maksimum, direkomendasikan untuk melanjutkan analisis dengan menggunakan metode nonlinear dinamik.

Kata Kunci: *Evaluasi kinerja, kinerja struktur, struktur beton bertulang, nonlinear statik analisis, gedung rumah sakit*

Abstract

The structural design of a 10-story inpatient hospital building in Magelang has been completed using the dynamic linear analysis method. Considering that Indonesia is an earthquake-prone country, it is essential to evaluate the structural performance of the design results. This evaluation aims to determine whether the target performance of Immediate Occupancy and Life Safety has been achieved for seismic levels BSE-1N and BSE-2N, respectively. Performance evaluation was then performed using static nonlinear methods based on ASCE 41-17, referred for the draft of the Indonesia Standard Code for Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. Structural geometry modeling uses results from the previous design steps. Then, the modeling is assigned material nonlinear parameters, cross-sectional nonlinearity, and element nonlinearity. The direction of the pushover lateral load in this analysis is divided into 4 directions, i.e., positive X, negative X, positive Y, and negative Y. Based on the results of the analysis, it is known that the structural performance does not meet the requirements of ASCE 41-17 at both BSE-1N and BSE-2N seismic levels. Based on the results of checking the requirement ratio of the elastic strength demand to yield strength toward the maximum strength ratio, it is recommended that the analysis be continued using the dynamic nonlinear method.

Keywords: *Performance evaluation, structural performance, reinforced concrete structure, nonlinear static analysis, hospital*

PENDAHULUAN

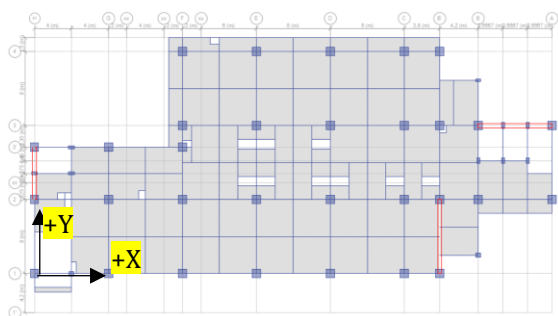
Dalam dunia rekayasa konstruksi, desain struktur beton bertulang tahan gempa bertujuan untuk

menghasilkan bangunan yang kuat, aman, dan nyaman (Sarasanty dan Arifin, 2022; Sunarso et al., 2023). Metode yang biasa digunakan dalam tahap awal desain adalah metode analisis *linear* baik

analisis *linear* statik maupun analisis *linear* dinamik (Syahputra et al., 2021; Rifai et al., 2022). Dalam analisis ini, material dianggap bersifat elastis dan besarnya deformasi hasil desain dibatasi dengan deformasi maksimal yang diijinkan. Hasil desain struktur beton bertulang menggunakan analisis *linear* berupa dimensi elemen struktur lengkap dengan penulangannya sedemikian sehingga struktur tersebut mampu menahan beban-beban yang bekerja seperti beban gravitasi, angin, dan gempa (Dewi et al., 2023). Kelebihan menggunakan analisis *linear* pada tahap awal desain adalah proses pemodelan dan analisis struktur yang sangat sederhana. Dampak positifnya adalah proses *running* lebih singkat jika analisis dilakukan dengan perangkat lunak.

Meskipun analisis *linear* dapat menghasilkan struktur yang kuat dalam menerima respon beban yang ada, namun analisis tersebut belum mampu mengetahui kinerja dari suatu struktur ketika struktur menerima beban yang secara bertahap meningkat hingga struktur mengalami keruntuhan. Kinerja struktur tersebut dapat diketahui ketika analisis dilakukan menggunakan analisis *nonlinear* (Pangestu dan Pratama, 2021; Aulia et al., 2022). Analisis ini penting untuk dilakukan mengingat Indonesia merupakan negara yang rawan terhadap gempa (Prismastanto, 2019; Anam et al., 2020; Nurrohmat et al., 2020; Usman et al., 2021).

Kinerja struktur secara umum dibagi menjadi beberapa level, meliputi *Operational* (OP), *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP) (Sweiga, 2023). Masing-masing level kinerja tersebut menjelaskan kondisi kerusakan elemen struktural maupun non struktural yang harus dicapai setelah menerima gaya gempa yang terjadi. Penetapan level kinerja tersebut bergantung kepada kategori risiko bangunan, level risiko seismik, dan status bangunan (ASCE 41-17 2017).



Gambar 1 Tipikal Denah Struktur Rumah Sakit

Sumber: DED-2023

Mempertimbangkan latar belakang tersebut, analisis *nonlinear* pada tahap desain yang bertujuan

untuk melakukan evaluasi kinerja struktur hasil dari suatu proses desain sangat penting untuk dilakukan, khususnya untuk bangunan-bangunan penting, contohnya seperti bangunan rumah sakit.

Evaluasi kinerja pada tahap desain ini sangat jarang dilakukan. Evaluasi ini masih banyak dilakukan pada bangunan-bangunan eksisting yang sudah terbangun (Adhitama et al., 2022; Arima et al., 2023). Pada dokumen ASCE 41:17, yang diacu dalam penyusunan rancangan dokumen SNI tentang Evaluasi Gempa dan Rehabilitasi Bangunan Eksisting (RSNI XXXX:202X), menjelaskan juga tentang prosedur untuk mengevaluasi bangunan baru dengan menggunakan analisis *nonlinear*. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja struktur hasil desain bangunan rumah sakit 10 lantai di Kota Magelang yang sebelumnya sudah dirancang sedemikian rupa dengan analisis *linear* dinamik respon spektrum.

METODE

Acuan Yang Digunakan

Standar/acuan yang digunakan untuk evaluasi desain struktur bangunan ini antara lain:

1. ASCE 7-16, "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structure". ASCE ini juga diacu oleh SNI 1726:2019, "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung".
2. ASCE 41-17, "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings". ASCE ini dirujuk dalam penyusunan rancangan dokumen RSNI XXXX:202X, "Evaluasi Gempa dan Rehabilitasi Bangunan Eksisting".

Deskripsi Gedung

Deskripsi bangunan mengacu pada data-data *Detail Engineering Design* (DED) gedung rumah sakit rawat inap yang berada di Kota Magelang. Gedung ini direncanakan memiliki tinggi 40,05-meter dengan 9 lantai ditambah 1 lantai *basement*. Denah struktur gedung rumah sakit ini dapat dilihat pada Gambar 1.

Material yang digunakan adalah beton bertulang 29,05 MPa dan baja tulangan ulir BJTS 420 MPa. Hasil desain struktur gedung rumah sakit ini terdapat 8 tipe balok induk dan 5 tipe kolom yang dapat dilihat pada Tabel 1 hingga Tabel 2.

Dengan mempertimbangkan bahwa evaluasi kinerja dilakukan terhadap hasil desain *Detail Engineering Design* (DED), maka kriteria evaluasi *Basic Performance Objective Equivalent to New Building Standards* (BPN) digunakan dalam analisis.

Tabel 1 Dimensi Balok Tumpuan

Tipe Balok	TB1	TB2	B1	B2	B3	B4	B5	BA1
Dimensi	500x800	500x600	500x700	500x600	500x700	500x850	250x400	300x600
Tulangan atas	8D22	5D22	9D22	7D22	10D22	9D22	4D16	5D19
Tulangan bawah	8D22	5D22	5D22	7D22	8D22	5D22	3D16	3D19
Tulangan torsi	2D16	2D16	2D13	2D13	4D13	4D13	2D13	2D10
Sengkang	3D10-100	3D10-100	3D10-100	3D10-100	3D10-100	3D10-100	D10-100	D10-100
Selimut	75 mm	75 mm	40 mm	40 mm	40 mm	40 mm	40 mm	40 mm

Sumber: DED-2023

Tabel 2 Dimensi Kolom Tumpuan

Tipe Kolom	K1A	K1B	K2	K3	KL1
Dimensi	900x900	900x900	500x500	300x500	300x600
Tulangan	28D25	28D22	12D19	10D19	12D22
Sengkang	5D10-100	5D10-100	3D10-100	3D10-100	3D10-100
Selimut	50 mm	50 mm	40 mm	40 mm	40 mm

Sumber: DED-2023

Mengacu pada Tabel 3, target kinerja hasil desain struktur rumah sakit diharapkan memenuhi level kinerja *Immediate Occupancy* pada level bahaya seismik BSE-1N dan *Life Safety* pada level bahaya seismik BSE-2N (ASCE 41-17 2017 dan RSNI XXXX:202X).

Tabel 3 Target Kinerja Struktural BPON

Kategori risiko	BSE-1N	BSE-2N
I & II	<i>Life Safety</i>	<i>Collapse Prevention</i>
III	<i>Damage Control</i>	<i>Limited Safety</i>
IV	<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Life Safety</i>

Sumber: ASCE 41-17-2017

Beban Gempa

Berdasarkan ASCE 41-17 dan RSNI XXXX:202X, evaluasi kinerja hasil desain struktur bangunan rumah sakit harus dilakukan terhadap 2 level bahaya seismik yaitu BSE-1N dan BSE-2N. Beban gempa BSE-1N dan BSE-2N dihitung dengan menggunakan kala ulang yang berbeda, seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Kala ulang tersebut menentukan desain parameter periode pada respon spektra percepatan. Parameter periode respon spektra percepatan bangunan rumah sakit

Tabel 4 Kala Ulang Gempa

Level seismik	Kala ulang
BSE-1N	475 tahun (10%/50 tahun)
BSE-2N	2475 tahun (2%/50 tahun)

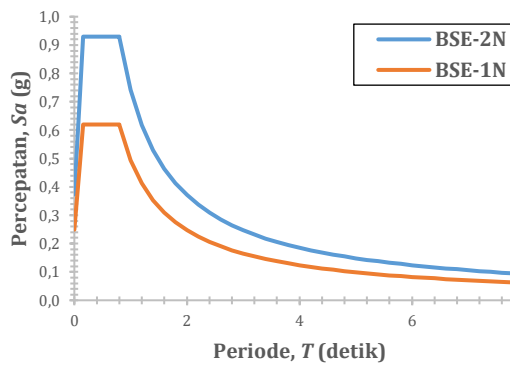
Sumber: ASCE 41-17 -2017

ditentukan dengan mempertimbangkan kelas situs tanah D yang besarnya diambil dari *website* Ciptakarya (rsa.ciptakarya.pu.go.id). Grafik respon spektra kemudian dibuat dengan formula yang dijelaskan pada ASCE 41-17 Pasal 2.4 RSNI XXXX:202X Pasal 2.4. Hasil perhitungan respon spektra untuk bangunan rumah sakit dapat dilihat pada Gambar 2 menyajikan beban gempa dengan level seismik BSE-1N dan BSE-2N.

Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur gedung rumah sakit rawat inap dibuat dengan menggunakan *software* ETABS. Secara umum, pemodelan dibagi menjadi 2 tahap yaitu pemodelan tahap desain dan pemodelan tahap evaluasi kinerja.

Pada tahap desain, analisis dilakukan dengan metode *linear* dinamik. Struktur fondasi dimodelkan sebagai tumpuan jepit. Hal tersebut karena fondasi direncanakan menggunakan fondasi dalam. Elemen dinding beton bertulang dan pelat lantai juga dimodelkan. Elemen batas khusus dinding geser yang berupa kolom pada ujung-ujungnya dimodelkan terpisah dengan menambahkan Pier Label pada *software* ETABS agar kedua komponen tersebut tetap menjadi satu kesatuan dinding geser. Dinding non struktural dimodelkan sebagai beban mati struktur. Gambar pemodelan struktur dengan ETABS pada tahap desain dapat dilihat pada Gambar 3. Warna merah pada Gambar 3 menunjukkan elemen dinding beton bertulang. Hasil analisis pada tahap ini berupa dimensi elemen struktur lengkap dengan penulangannya, yang kemudian dituangkan dalam gambar Detail

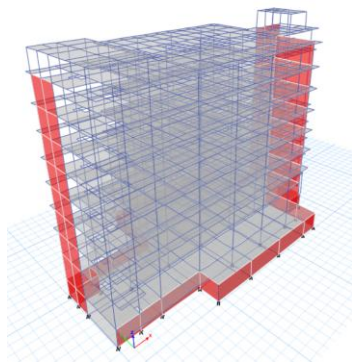


Gambar 2 Grafik Respon Spektrum

Sumber: ASCE 41-17 -2017

Engineering Design (DED). Analisis linear dinamik dan proses desain tidak dijabarkan pada artikel ini. karena artikel ini hanya fokus membahas tentang evaluasi kinerja struktur hasil desain menggunakan metode *nonlinear*.

Pada tahap evaluasi kinerja, pemodelan geometri struktur (dimensi struktur lengkap dengan penulangannya) menggunakan pemodelan pada tahap desain. Pemodelan tersebut kemudian dilengkapi dengan parameter *nonlinear*, yang terdiri dari parameter *nonlinear* material, *nonlinear* penampang (*moment-curvature*), dan *nonlinear* elemen (*moment-rotation*). Arah beban lateral *pushover* pada analisis ini terbagi menjadi 4 arah, yaitu X positif, X negatif, Y positif, dan Y negatif. Arah tersebut searah dengan sumbu global pada *software* ETABS sesuai dengan Gambar 1. Titik kontrol untuk mengetahui hubungan gaya lateral *pushover* dan *displacement* ditentukan pada *joint* di dekat pusat massa pada lantai teratas. *Load application* kemudian dilakukan dengan menggunakan *displacement control*. Berdasarkan ASCE 41-17 Pasal 7.4.3 dan RSNi XXXX:202X Pasal 7.4.3, analisis *pushover* dilakukan hingga *displacement* titik kontrol mencapai 150% dari targetnya. Pada kasus ini, target *displacement* terbesar yaitu pada target



Gambar 3 Overview Model 3D

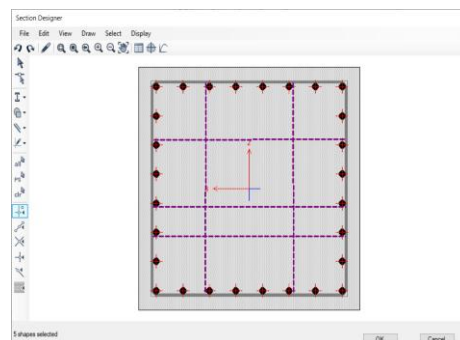
displacement untuk level kinerja *Life Safety*, yaitu 2% dari tinggi gedung.

Nonlinear Material

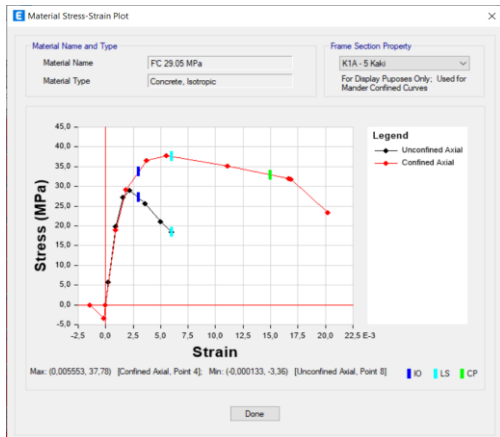
Sifat mekanika beton pada sebuah elemen struktur bergantung pada pengaturan sengkang yang diberikan. Semakin baik sengkang tidak hanya membuat sebuah elemen struktur menjadi lebih daktail, tetapi juga dapat meningkatkan nilai mutu beton, f'_{cc} (Mander et al., 1988). Konsep ini telah diakomodasi *software* ETABS dalam sebuah pemodelan *nonlinear* khususnya untuk elemen dengan material beton.

Input data yang diperlukan untuk memperoleh kurva tegangan-regangan *nonlinear* pada *software* ETABS adalah mutu beton dan tipe kurva tegangan-regangan. Kurva tegangan-regangan beton pada ETABS kemudian didefinisikan menggunakan tipe Mander. Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, dengan menggunakan tipe Mander, mutu beton akan dipengaruhi kekangan akibat penggunaan sengkang sehingga pendefinisian penampang melintang elemen struktur utama sangat penting untuk dilakukan. Salah satu hasil pendefinisian penampang melintang elemen struktur utama pada evaluasi ini dapat dilihat pada Gambar 4. Gambar tersebut menunjukkan bahwa pendefinisian penampang melintang kolom tipe K1A pada ETABS dilakukan dengan menggunakan *section designer*. Hal tersebut berlaku juga pada pendefinisian penampang melintang semua elemen struktural. Seluruh penampang melintang kolom utama dan balok induk didefinisikan pada ETABS menggunakan *section designer*. Dimensi penampang, tulangan longitudinal, dan tulangan sengkang didefinisikan dengan menggunakan *section designer*.

Contoh hasil pemodelan material *nonlinear* beton pada ETABS dengan tipe Mander dapat dilihat pada Gambar 5. Gambar tersebut merupakan kurva tegangan-regangan beton kolom tipe K1A dengan penampang melintang yang dapat dilihat pada Gambar 4.



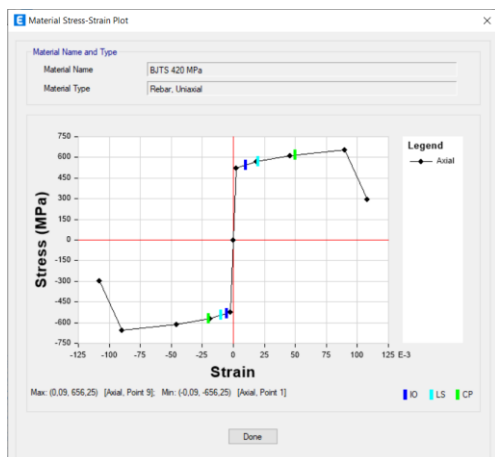
Gambar 4 Section Designer Kolom K1A



Gambar 5 Kurva Tegangan-Regangan Beton 29,05 MPa

Gambar 5 tersebut menunjukkan bahwa ketika efek kekangan tidak dipertimbangkan pada penampang, maka mutu beton akan sama dengan mutu yang di input dalam ETABS, dalam kasus ini 29,05 MPa. Namun, ketika 5 kaki sengkang kolom dipertimbangkan, maka mutu beton meningkat menjadi 37,87 MPa.

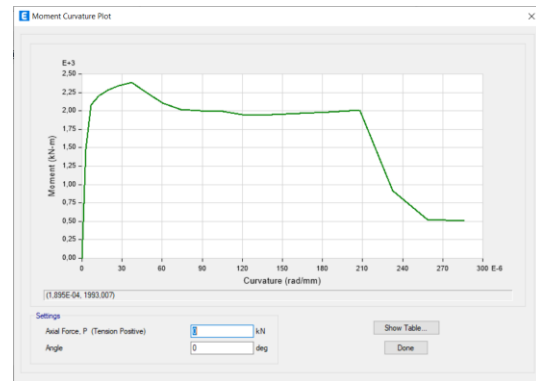
Sifat *nonlinear* material baja juga perlu didefinisikan pada *software* ETABS dalam evaluasi kinerja sebuah elemen struktural. Input data yang diperlukan pada model material baja adalah kuat leleh desain F_y , kuat ultimit desain F_u , kuat leleh *expected* F_{ye} , dan kuat ultimit *expected* F_{ue} . Dalam ASCE 41-17 Pasal 10.2.2 dan RSNI XXXX:202X Pasal 10.2.2, nilai konversi dari kuat desain ke kuat *expected* adalah 125% dari nilai kuat desain. Hasil pemodelan *nonlinear* baja ulir BJTS 420 MPa di ETABS dapat dilihat pada Gambar 6. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa nilai kuat leleh dan kuat ultimit baja menggunakan nilai kuat *expected*.



Gambar 6 Kurva Tegangan-Regangan Baja 420 MPa

Nonlinear Penampang (Moment-Curvature)

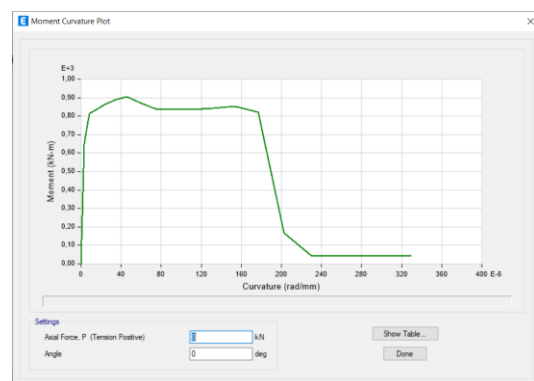
Pada analisis ini, kurva momen-kurvatur dibuat untuk setiap elemen struktur balok induk dan



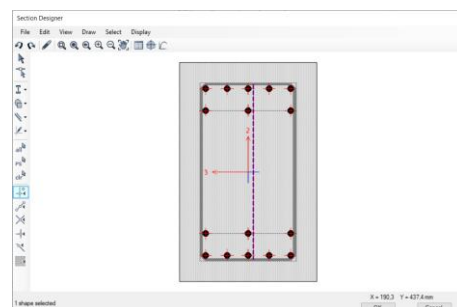
Gambar 7 Kurva Momen-Kurvatur Penampang K1A

kolom utama, sebagaimana tercantum dalam Tabel 1 dan Tabel 2, dengan menggunakan ETABS. Seperti dijelaskan sebelumnya, elemen struktur lengkap dengan tulangan longitudinal dan sengkang didefinisikan dengan menggunakan *section designer*. Pada model ETABS ini terdapat 5 kurva momen-kurvatur elemen kolom utama dan 8 kurva momen-kurvatur elemen balok induk. Kurva momen-kurvatur ini sangat penting untuk memahami perilaku struktural elemen-elemen tersebut pada saat dibebani.

Contoh hasil pemodelan momen-kurvatur pada ETABS untuk kolom utama K1A dan balok induk TB1 dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 8 Kurva Momen-Kurvatur Penampang TB1

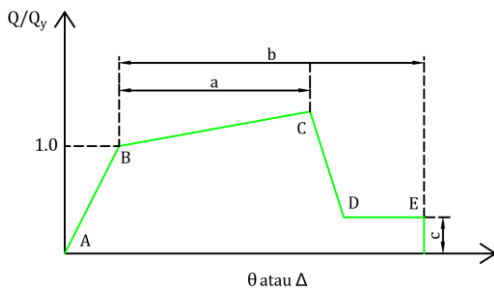


Gambar 9 Section Designer Penampang TB1

Penampang melintang kolom K1A dan balok TB1 yang telah didefinisikan pada *software* ETABS dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 9.

Non-linear Element (Moment-Rotation)

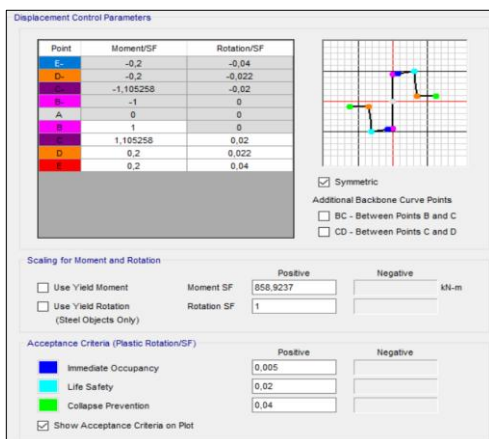
Momen-rotasi menggambarkan hubungan antara momen lentur dan rotasi pada setiap elemen struktur. Dalam ASCE 41-17 dan RSNI XXXX:202X, momen-rotasi disebut dengan istilah *backbone curve* (Gambar 10). Pada saat elemen masih dalam kondisi elastis, nilai rotasi meningkat secara proporsional terhadap momen lentur yang diterima. Namun pada saat momen tersebut mencapai titik tertentu, elemen mengalami deformasi plastis yang ditandai dengan penambahan rotasi yang yang besar tanpa adanya peningkatan momen. Pada kondisi tersebut, sendi plastis pada elemen akan terbentuk.



Gambar 10 Backbone Curve

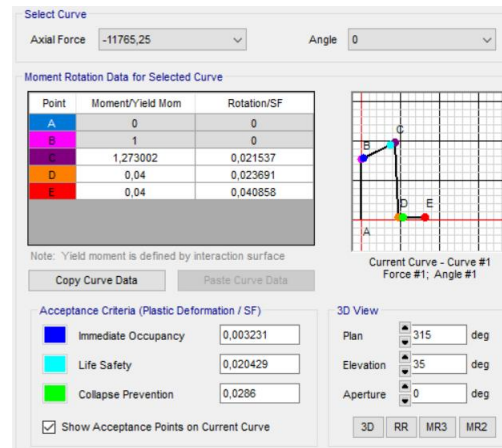
Sumber: ASCE 41-17 (2017)

Pada analisis ini, *backbone curve* balok dan kolom dimodelkan dengan menggunakan ETABS yang mengacu pada ASCE 41-17 Pasal 10.3 dan RSNI XXXX:202X Pasal 10.3. Dalam membuat *backbone curve* balok perlu memperhatikan konfigurasi tulangan, jarak tulangan sengkang, dan gaya geser yang terjadi pada elemen. Selain itu, beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam memodelkan *backbone curve* kolom adalah gaya aksial tekan rencana, gaya geser, dan konfigurasi sengkang. Sedangkan untuk



Gambar 11 Detail Backbone Curve Elemen TB1

memodelkan *backbone curve* element *shear wall* pada ETABS menggunakan *auto assign* yang sudah secara otomatis dihitung oleh ETABS. Hasil pemodelan *backbone curve* balok TB1 dan kolom K1A pada ETABS secara berurutan dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12.

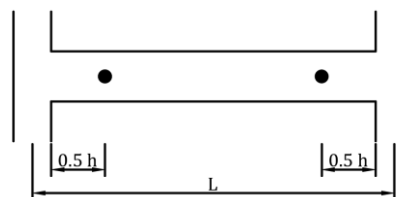


Gambar 12 Detail Backbone Curve Elemen K1A

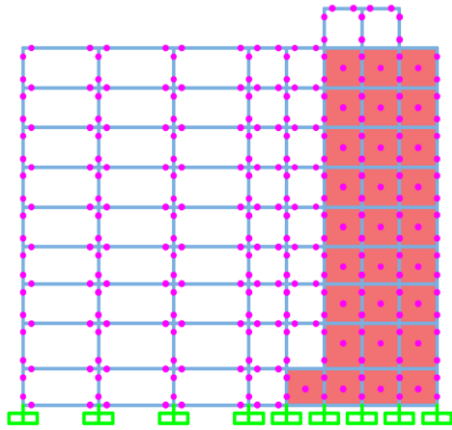
Sendi Plastis

Sendi plastis pada setiap elemen struktur seperti kolom, balok, dan *shear wall* harus dimodelkan secara *nonlinear* dikarenakan elemen balok, kolom, maupun *shear wall* sudah melebihi batas elastisnya ketika sendi plastis terjadi. Berdasarkan ASCE 41-17 Pasal 10.7.2 dan RSNI XXXX:202X Pasal 10.7.2, panjang sendi plastis pada elemen balok dan kolom ditentukan sebesar 0,5h (*h*=tinggi elemen), seperti yang diilustrasikan pada Gambar 13. Posisi sendi plastis didefinisikan pada seluruh elemen struktural, yang terdiri dari balok induk, kolom utama, dan *shear wall*. Perletakan sendi plastis untuk semua elemen tersebut dapat dilihat pada Gambar 14.

Tipe sendi plastis setiap elemen diklasifikasikan sesuai dengan pembebanan yang diterima. Sendi plastis elemen balok dengan pembebanan lentur didefinisikan pada ETABS menggunakan sendi plastis tipe M3. Pada elemen kolom yang mengalami gaya aksial dan lentur dua arah, tipe sendi plastis yang didefinisikan di ETABS menggunakan tipe P-M2-M3. Sendi plastis elemen *shear wall* pada ETABS didefinisikan menggunakan tipe *auto fiber* P-M3. Sendi plastis pada elemen batas khusus (kolom)



Gambar 13 Sketsa Perletakan Sendi Plastis



Gambar 14 Perletakan Sendi Plastis pada Gedung

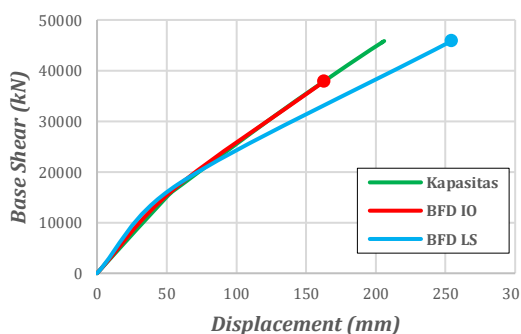
shear wall didefinisikan di ETABS menggunakan tipe *fiber* P-M2-M3. Hal tersebut dikarenakan elemen tersebut termasuk bagian dari komponen *shear wall*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

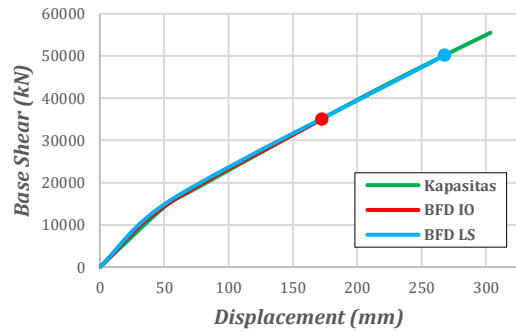
Kurva *Pushover*

Kurva *pushover* merupakan kurva hubungan antara *base shear* V dengan *roof displacement* δ . Kurva tersebut akan secara bertahap (*step by step*) terbentuk akibat adanya beban lateral *pushover* yang terjadi dan secara otomatis dihitung oleh software ETABS. Hasil *running software* dipilih menggunakan tipe *plotting* ASCE 41 yang sudah tersedia di ETABS. Tipe tersebut nantinya akan secara otomatis menghasilkan 2 jenis kurva *pushover*, yaitu kurva kapasitas (hijau) dan kurva *bilinear force-displacement* (merah dan biru), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15 hingga Gambar 18.

Kurva kapasitas akan berhenti ketika struktur sudah tidak bisa lagi menahan beban lateral yang diterima. Kurva *bilinear force-displacement* (BFD) warna merah dan warna biru menunjukkan



Gambar 15 Kurva *Pushover* Arah +X



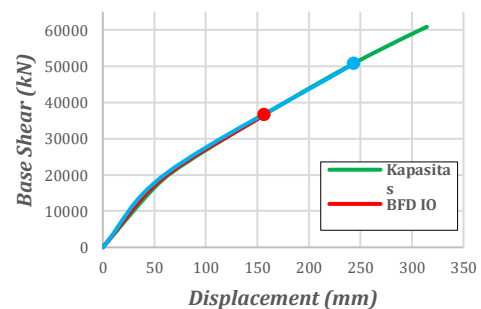
Gambar 16 Kurva *Pushover* Arah -X

hubungan *base shear* dan *displacement* yang terjadi ketika gedung tersebut masing-masing secara berurutan menerima beban gempa level seismik BSE-1N dan BSE-2N. Perbandingan antara kurva kapasitas dan kurva BFD kemudian digunakan untuk menilai gedung tersebut apakah dapat mencapai target kinerja yang disyaratkan ASCE 41-17 atau tidak.

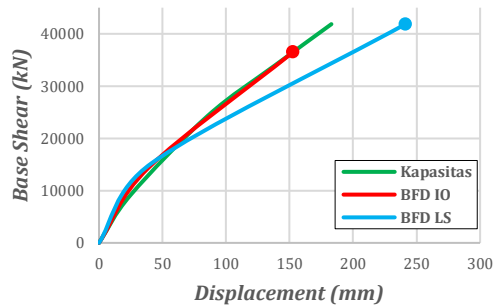
Berdasarkan Gambar 15 dan Gambar 18, dapat diketahui bahwa, pada level kinerja *Life Safety* LS kurva kapasitas (hijau) berhenti sebelum mencapai target *displacement* (kurva BFD warna biru) ketika struktur dibebani dengan gaya lateral *pushover* arah +X dan -Y. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3, gedung rumah sakit dengan kategori risiko IV harus mampu menahan gaya sampai pada target kinerja tersebut. Maka dari itu, struktur gedung ini belum sepenuhnya memenuhi target kinerja level struktur akibat adanya 2 kurva *pushover* yang tidak tercapai. Oleh karena itu, analisis dan optimasi lebih lanjut pada struktur tersebut perlu dilakukan dengan cara memperbesar dimensi atau memperbanyak tulangan longitudinal pada elemen sendi plastis.

Displacement

Perbandingan antara kapasitas displacement maksimal struktur, displacement yang harus tercapai akibat gempa (BSE-1N dan BSE-2N), dan syarat maksimal displacement gedung dapat



Gambar 17 Kurva *Pushover* Arah +Y



Gambar 18 Kurva Pushover Arah -Y

dilihat pada Tabel 5. Kapasitas displacement maksimal struktur gedung diambil dari perhitungan ETABS, yaitu secara berurutan dari kurva warna hijau Gambar 15 sampai Gambar 18.

Nilai syarat maksimal displacement gedung adalah sebesar 1% tinggi gedung untuk kinerja *Immediate Occupancy* dan 2% tinggi gedung untuk kinerja *Life Safety*. Tabel 5 menunjukkan bahwa displacement yang harus dicapai struktur gedung ketika dibebani gempa BSE-2N arah lateral gempa +X dan -Y tidak dapat tercapai.

Pada kedua arah tersebut, kapasitas displacement struktur lebih kecil daripada displacement yang terjadi akibat gempa BSE-2N. Pada arah lateral gempa -X dan +Y menunjukkan bahwa displacement yang harus dicapai ketika dibebani beban gempa BSE-1N dan BSE-2N sudah dapat dicapai oleh struktur gedung.

Sendi Plastis yang Terjadi

Jumlah sendi plastis yang terjadi pada struktur gedung akibat beban gempa BSE-1N dan BSE-2N dapat dilihat pada Tabel 6. Tabel tersebut menunjukkan bahwa struktur gedung rumah sakit pada arah gempa +X dan pada level seismik BSE-1N belum sepenuhnya mencapai level kinerja struktur yang disyaratkan ASCE 41-17 dan RSNI XXXX:202X, yaitu *Immediate Occupancy*. Hal tersebut dikarenakan terdapat 2 elemen yang sudah melebihi kinerja *Immediate Occupancy*. Namun untuk level seismik BSE-2N (*Life Safety*), nilai displacement yang terjadi akibat gempa BSE-2N melebihi kapasitas displacement struktur sehingga ETABS tidak bisa menampilkan sendi plastis sampai pada beban lateral gempa maksimal.

Tabel 6 menunjukkan pada arah gempa -X dan level seismik BSE-1N, level kinerja *Immediate Occupancy* juga tidak sepenuhnya tercapai. Hal tersebut dikarenakan terdapat 4 elemen yang melebihi target kinerja *Immediate Occupancy*. Pada gempa level seismik BSE-2N (*Life Safety*), gedung juga tidak sepenuhnya mencapai target kinerja *Life Safety*. Hal tersebut dikarenakan terdapat 4 elemen pada lokasi yang sama yang kinerjanya sudah melebihi *Life Safety*.

Pada arah gempa +Y baik itu level seismik BSE-1N maupun BSE-2N, gedung belum memenuhi kinerja struktur yang disyaratkan ASCE 41-17 dan RSNI XXXX:202X. Tabel 6 menunjukkan bahwa terdapat 3 elemen yang melebihi *Immediate Occupancy* pada

Tabel 5 Rekapitulasi Displacement

Pushover	Target kinerja	Displacement, δ mm			Keterangan
		Kapasitas struktur	Disp. kinerja	Syarat max	
+X	IO (BSE-1N)	206	162,9	400,5	Tercapai
	LS (BSE-2N)		254,3	801	Tidak tercapai
-X	IO (BSE-1N)	303	172,5	400,5	Tercapai
	LS (BSE-2N)		267,8	801	Tercapai
+Y	IO (BSE-1N)	315	156,9	400,5	Tercapai
	LS (BSE-2N)		243,6	801	Tercapai
-Y	IO (BSE-1N)	183	152,7	400,5	Tercapai
	LS (BSE-2N)		241,2	801	Tidak tercapai

Tabel 6 Jumlah Sendi Plastis

Pushover	Level seismik	Displacement, mm	Max. base shear, kN	Last step	Jumlah sendi plastis				Total
					<IO	IO-LS	LS-CP	>CP	
+X	BSE-1N (IO)	162,9	37953,5	12	1928	0	2	0	1930
	BSE-2N (LS)	254,3	45837,4		Tidak terbaca sampai beban maksimal				
-X	BSE-1N (IO)	172,5	35096,8	10	1926	2	2	0	1930
	BSE-2N (LS)	267,8	50163,9	10	1918	8	2	2	1930
+Y	BSE-1N (IO)	156,9	36601,5	11	1927	1	2	0	1930
	BSE-2N (LS)	243,6	50766,3	10	1924	4	2	0	1930
-Y	BSE-1N (IO)	152,7	36497,6	10	1927	2	1	0	1930
	BSE-2N (LS)	241,2	41850,8		Tidak terbaca sampai beban maksimal				

Tabel 7 Kriteria Penerimaan Pertama

Parameter	Pushover -X		Pushover Y	
	BSE-1N	BSE-2N	BSE-1N	BSE-2N
$\mu_{strength}$	5.332	7.281	4.585	6.316
μ_{max}	3.720	5.102	3.174	4.362
Cek	NOT OK	NOT OK	NOT OK	NOT OK

gempa BSE-1N dan terdapat 2 elemen yang melebihi *Life Safety* pada pada gempa BSE-2N.

Pada arah gempa -Y dan pada level seismik BSE-1N, gedung belum mencapai target kinerja *Immediate Occupancy* dikarenakan terdapat 3 elemen dengan

level kinerja melebihi *Immediate Occupancy*. Pada level seismik BSE-2N (*Life Safety*), nilai *displacement* yang terjadi melebihi kapasitas *displacement* struktur sehingga ETABS tidak bisa menampilkan sendi plastis sampai pada beban lateral gempa maksimal. Berdasarkan sendi plastis yang terjadi, secara umum struktur gedung belum memenuhi target kinerja pada level elemen dikarenakan masih terdapat beberapa elemen dengan level kinerja yang melebihi level kinerja yang disyaratkan ASCE 41-17 dan RSNI XXXX:202X.

Acceptance Criteria – Pushover Analysis

Sebuah desain struktur bangunan yang dievaluasi menggunakan analisis *nonlinear pushover* harus memenuhi 2 syarat yang diatur dalam ASCE 41-17 Pasal 7.3.2 dan RSNI XXXX:202X Pasal 7.3.2. Kedua syarat tersebut harus dipenuhi dan menjadi syarat utama dalam evaluasi kinerja struktur sebuah bangunan.

Syarat pertama adalah nilai rasio kekuatan elastis perlu, $\mu_{strength}$, harus kurang dari nilai rasio kekuatan maksimum, μ_{max} . Kedua nilai tersebut dihitung berdasarkan ASCE 41-17 Pasal 7.3.2 dan RSNI XXXX:202X Pasal 7.3.2. Namun, pada perhitungan ini, nilai $\mu_{strength}$ diambil dari hasil *running pushover* ETABS secara langsung. Kedua nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 7.

Berdasarkan Tabel 7, dapat disimpulkan bahwa struktur gedung rumah sakit rawat inap belum memenuhi persyaratan pertama. Menurut ASCE 41-17 dan RSNI XXXX:202X, apabila tidak memenuhi persyaratan tersebut maka disarankan untuk melakukan analisis lebih lanjut menggunakan metode Nonlinear Dynamic Procedure (NDP) dengan beban gempa *time history*. Syarat kedua adalah nilai gaya geser hasil dari

Tabel 8 Kriteria Penerimaan Kedua (Arah X)

Lantai	Base shear, kN					
	BSE-1N			BSE-2N		
	Model 1	Model 2	Cek	Model 1	Model 2	Cek
ATAP	2314.51	1962.61	OK	3471.82	2943.92	OK
8	3735.54	3422.18	OK	5603.33	5133.27	OK
7	4819.97	4640.53	OK	7229.96	6960.80	OK
6	5702.86	5621.72	OK	8554.31	8432.58	OK
5	6447.53	6367.33	OK	9671.32	9551.00	OK
4	7064.88	6887.77	OK	10597.33	10331.65	OK
3	7538.84	7204.24	OK	11308.26	10806.36	OK
2	7827.89	7349.21	OK	11741.88	11023.82	OK
1	7905.49	7356.05	OK	11858.18	11034.08	OK

Tabel 9 Kriteria Penerimaan Kedua (Arah Y)

Lantai	Base shear, kN					
	BSE-1N			BSE-2N		
	Model 1	Model 2	Cek	Model 1	Model 2	Cek
ATAP	2370.70	2040.04	OK	3556.12	3060.06	OK
8	3834.60	3494.94	OK	5751.93	5242.40	OK
7	4960.11	4699.32	OK	7440.14	7048.97	OK
6	5868.44	5661.27	OK	8802.68	8491.89	OK
5	6616.80	6387.02	OK	9925.23	9580.51	OK
4	7224.07	6891.28	OK	10836.10	10336.89	OK
3	7688.82	7198.77	OK	11533.21	10798.13	OK
2	7991.25	7344.64	OK	11986.90	11016.94	OK
1	8080.21	7365.04	OK	12120.35	11047.54	OK

analisis respon spektrum model 1 harus kurang dari 130% gaya geser model 2. Model 1 merupakan model dengan modal partisipasi massa 90% atau lebih sementara model 2 merupakan model dengan modal partisipasi massa hanya 2 ragam saja. Rekapitulasi perhitungan untuk melakukan cek terhadap syarat kedua dapat dilihat pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Berdasarkan tabel tersebut, struktur bangunan gedung rumah sakit rawat inap sudah memenuhi persyaratan kedua. Walaupun demikian berdasarkan ASCE 41-17 Pasal 7.3.2 dan RSNI XXXX:202X Pasal 7.3.2, dikarenakan salah satu syarat tidak terpenuhi maka analisis nonlinear dinamik direkomendasikan untuk dilakukan.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis *nonlinear pushover* diketahui bahwa gedung rumah sakit rawat inap belum memenuhi level kinerja yang disyaratkan ASCE 41-17 dan RSNI XXXX:202X. Kurva hubungan *base shear* dengan *displacement* menunjukkan bahwa *displacement* yang terjadi akibat gempa level seismik BSE-2N melebihi *displacement* maksimal yang mampu dicapai struktur. Selain itu, berdasarkan observasi terhadap terjadinya sendi plastis diketahui bahwa performa struktur tidak memenuhi persyaratan ASCE 41-17 dan RSNI XXXX:202X baik pada gempa level seismik BSE-1N maupun BSE-2N. Berdasarkan hasil pengecekan nilai rasio kekuatan elastis perlu terhadap nilai rasio kekuatan maksimum, direkomendasikan untuk melanjutkan analisis dengan menggunakan metode *nonlinear* dinamik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM atas dukungan fasilitas pada Laboratorium omputasi.

DAFTAR PUSTAKA

Adhitama, Yuliar Azmi, Bambang Supriyadi, Bambang Suhendro. (2022). Evaluasi Seismik Gedung Bertingkat Eksisting Menggunakan Prosedur ASCE 41-17. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil UNS*. Vol 6, No.1, 1-10.

Anam, Syaiful, Bantot Sutriyono, Retno Tri Murtiningrum. (2020). Studi Perbandingan Kinerja Gedung Beton Bertulang SRPMK 6 Lantai Dengan Menggunakan Metode Pushover dan Nonlinear Time History Analysis. *Jurnal "MITSU" Media Informasi Teknik Sipil UNIJA*. Vol 8, No.1, 33-41.

Arima, Redha R.M., Roni Sani Saputra, Masrilayanti, Ruddy Kurniawaran. (2023). Pushover Analysis of 6-Floors Irregular Building Structure (Case Study: Fave Hotel Building-Padang City, West Sumatra). *Educational Journal of History and Humanities*. 6(3), 859-871.

American Society Civil Engineering. (2017). ASCE Standard 41-17 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. United States of America: American Society of Civil Engineers.

American Society Civil Engineering. (2016). ASCE 7-16. 2016. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. United States of America: American Society of Civil Engineers.

Aulia, Diana Fika, Ignatius Sudarsono, Fauzia Mulyawati. (2022). Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat dengan Pemodelan Struktur (3D) Berdasarkan Analisis Statik Beban Dorong (Pushover Analysis). *Journal of Civil Engineering and Vocational Education*. Vol 9, No.3, 248-252.

Dewi, Hesty Auliya, Erno Widayanto, Ketut Aswatama Wiswamitra. (2023). Analisis Kinerja Struktur Gedung Bertingkat Menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) pada Pembangunan Rumah Susun Cakung Jakarta Timur. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Sipil*. Vol 17, No.3, 243-248.

Mander, J.B, M.J.N. Priestley, R. Park. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal Structure Engineering*. 114(8), 1804-1826.

Nurrohmat, Farhan, Ratna Widyawati, Fikri Alami. (2020). Evaluasi Bangunan Gedung Rumah Sakit Terhadap Beban Gempa dengan Menggunakan Metode Statik Ekuivalen. *JRSDD*. Vol 8, No.3, 295-404.

Pangestu, Saifulloh Fatah, dan Pratama M. Mirza Abdillah. (2021). Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat Menggunakan Pendekatan Desain Berbasis Kinerja (Studi Kasus: Gedung Pendidikan Rangka Beton Bertulang 7 Lantai). *Jurnal Analisis dan Kajian Bidang Teknik Sipil*. Vol 10, No.2, 91-100.

Pemerintah Kota Magelang. (2023). Perencanaan DED Gedung Rawat Inap RSUD Tidar Kota Magelang Tahun 2023. Pemerintah Kota Magelang.

Prismastanto, Novi. (2019). Metode Analisis Ragam Spektrum Respons Pada Struktur Gedung Bertingkat (Studi Kasus Hotel Tosan, Solo Baru). *Jurnal Media Komunikasi Dunia Ilmu Sipil*. Vol 1, No.1, 25-34.

- Rifai, Muhamad, Fikri Alami, Mohd Isneini, Masdar Helmi. (2022). Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat Dengan Analisis Time History (Studi Kasus: Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro). *JRSDD*. Vol 10, No.1, 99-114.
- Sarasanty, Diah, dan Zainul Arifin. (2022). Respons Spectrum Analysis Struktur Bangunan Tingkat Tinggi (Studi Kasus: Bangunan Rumah Susun Stasiun Tanjung Barat di Jakarta). *Jurnal Kacapuri*. Vol 5, No.1, 140-149.
- BSN. 2019. SNI 1726:2019-Tata Cara Perancangan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- BSN. 2020. SNI 1727:2020-Beban Desain Minimum dan Kriteria terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- BSN. 2019. SNI 2847:2019-Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Sunarso, Agus, Kusiman Joko, Reki Arbianto. (2023). Perencanaan Struktur Gedung Perkantoran Tujuh (7) Lantai di Kabupaten Karanganyar. *Journal of Civil Engineering and Infrastructure Technology*.
- Sweiga, Abadi Grafita Yans. (2023). Analisis Pushover pada Bangunan Rumah Sakit dengan Ketidakberaturan Vertikal Berdasarkan ASCE 41-17. Universitas Gadjah Mada.
- Syahputra, Ridho, Irwan, Ahmad Sumantri. (2021). Evaluasi Kinerja Struktur Pada Gedung Jamaliah Yayasan Syafiatulamaliyah Medan Berdasarkan SNI 1726:2019. *Buletin Utama Teknik*. Vol 17, No.1, 98-105.
- Usman, Arie Putra, Rosidawani, Sri Palta Mutmainna. (2021). Analisis Respons dan Kinerja Struktur Bangunan Gedung Menggunakan Pushover Analysis. *Jurnal Saintis*. Vol 21, No.2, 87-96.