

EVALUASI STRUKTUR GEDUNG MENGGUNAKAN ANALISIS BERBASIS KINERJA (*PERFORMANCE BASED EVALUATION*)

STUDI KASUS: BANGUNAN EKSISTING BETON BERTULANG PRACETAK

Dyah Kusumastuti¹, Mario Asneindra¹, Silvester Sandy Mulyadi¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jawa Barat, Indonesia

Email: dkusumastuti@gmail.com, asneindra@gmail.com, Silvester.sandy77@gmail.com

ABSTRAK

Evaluasi berbasis kinerja dilakukan pada bangunan beton bertulang pracetak 7 (tujuh) lantai yang terletak di daerah dengan tingkat kegempaan tinggi. Konstruksi bangunan ini terhenti pada lantai 4 (empat) sejak tahun 2015. Pada tahun 2021, bangunan ini dievaluasi untuk mengetahui kondisi eksisting struktur dan kelanjutan konstruksi bangunan hingga 7 (tujuh) lantai sesuai dengan desain awal. Desain awal bangunan difungsikan untuk Rumah Sakit dengan menggunakan peraturan gempa SNI 1726:2012. Mengingat peraturan gempa yang berlaku saat ini adalah SNI 1726:2019, maka bangunan ini perlu dievaluasi terhadap peraturan yang berlaku saat ini, baik untuk kondisi eksisting bangunan maupun rencana konstruksi bangunan hingga 7 (tujuh) lantai. Analisis dilakukan dengan metode analisis elastis sesuai SNI 1726:2019 dan analisis non-linear statik *pushover* pada kedua arah sumbu utama bangunan untuk mengetahui kinerja bangunan pada level gempa rencana (MCER). Berdasarkan FEMA 356, untuk kategori bangunan IV (Rumah Sakit) mensyaratkan level kinerja “*Life Safety*”. Analisis elastis menunjukkan bahwa desain bangunan 7 (tujuh) lantai tidak memenuhi persyaratan kekuatan dankekakuan karena beban gempa yang lebih tinggi sesuai SNI 1726:2019. Sedangkan, analisis non-linear statik *pushover* memperoleh hasil bahwa level kinerja bangunan melebihi persyaratan “*Life Safety*”.

Kata kunci: evaluasi berbasis kinerja, bangunan beton bertulang pracetak, analisis *pushover*

1. Pendahuluan

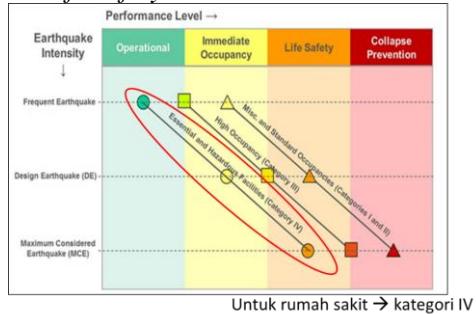
Suatu bangunan beton bertulang pracetak tujuh lantai direncanakan menggunakan peraturan gempa SNI 1726:2012 yang akan difungsikan sebagai Rumah Sakit. Pada tahap pembangunan, terjadi penghentian pekerjaan pada tahun 2015, sehingga pada saat ini bangunan baru terbangun sebanyak 4 lantai dan elemen yang terpasang masih bersifat rangka struktur saja. Pada tahun 2021, bangunan direncanakan untuk dilanjutkan konstruksinya hingga tujuh lantai.

Berdasarkan kondisi bangunan eksisting saat ini, dikhawatirkan dapat terjadi kerusakan pada elemen struktur eksisting yang tidak terlindungi dan diperlukan evaluasi kelayakan struktur eksisting maupun desain awal terhadap perubahan peraturan gempa SNI 1726:2019. Analisis struktur bangunan eksisting untuk 7 lantai dibagi menjadi 2 tahap, yaitu analisis elastis untuk mengetahui kekuatan struktur terhadap beban – beban yang bekerja sesuai dengan peraturan yang berlaku saat ini, dan analisis berbasis kinerja struktur untuk mengetahui perilaku struktur bangunan

terhadap beban gempa sesuai dengan peraturan gempa saat bangunan didesain dan peraturan gempa terbaru.

Analisis kinerja (*pushover*) dilakukan dengan memodelkan perilaku inelastik baik pada tingkat material, komponen ataupun elemen dari struktur bangunan tersebut. Setelah itu, dilakukan analisis statik nonlinear *pushover*, dengan cara mendorong gedung tersebut pada arah yang ditinjau sampai target perpindahan tercapai. Hasil analisis nonlinear statik (*pushover*) adalah kurva kapasitas dari struktur untuk masing-masing arah beban dorong yang diberikan. Berdasarkan hasil analisis *pushover* yang dilakukan akan diketahui *inelastic behavior* pada tingkat struktur. Setelah perilaku inelastik pada tingkat struktur diketahui, maka dapat ditentukan kinerja struktur bangunan tersebut terhadap level gempa yang ditinjau sesuai dengan faktor keutamanan struktur gedung tersebut. Kinerja struktur bangunan tersebut nantinya akan dibandingkan dengan target kinerja bangunan. Target kinerja bangunan berdasarkan FEMA 356 dapat dilihat pada Gambar 1. Untuk bangunan rumah sakit,

saat terjadi beban gempa desain (*design earthquake*), target kinerja yang diharapkan adalah *immediate occupancy*. Sedangkan untuk beban gempa 2500 tahun (*maximum considered earthquake*), target kinerja yang diharapkan adalah *life safety*.



Gambar 1. Target Kinerja Bangunan Berdasarkan FEMA 356

Pemodelan sendi plastis untuk analisis kinerja (*pushover*) dilakukan pada elemen-elemen yang diperkirakan akan mengalami plastisitas. Sendi plastis merepresentasikan perilaku nonlinear pada elemen-elemen tersebut dan dapat didefinisikan dalam bentuk gaya-perpindahan. Sendi plastis diberikan pada elemen-elemen utama dari struktur seperti balok induk dan kolom. Parameter pemodelan inelastik balok dan kolom mengacu pada ASCE 41-17 pada Tabel 1 dan 2. Sendi plastis yang diperoleh berupa kurva gaya vs perpindahan seeperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 1. Parameter Batas Pemodelan Inelastik Elemen Balok (ASCE 41-17)

Conditions	Modeling Parameters ^a			Acceptance Criteria ^a		
	Plastic Rotation Angle (radians)		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle (radians)		
	a	b		IO	LS	CP
Condition i. Beams controlled by flexure ^b						
$\frac{p_f}{p_{f,E}}$	Transverse reinforcement ^c	$\frac{V_d'}{b_w d \sqrt{f_{c,E}}}$				
<=0.0	C	$\leq 3 (0.25)$	0.025	0.05	0.010	0.025
<=0.0	C	$\geq 6 (0.5)$	0.02	0.04	0.005	0.02
>0.5	C	$\leq 3 (0.25)$	0.02	0.03	0.005	0.02
>0.5	C	$\geq 6 (0.5)$	0.015	0.02	0.005	0.015
<=0.0	NC	$\leq 3 (0.25)$	0.02	0.03	0.005	0.02
<=0.0	NC	$\geq 6 (0.5)$	0.01	0.015	0.0015	0.01
>0.5	NC	$\leq 3 (0.25)$	0.01	0.015	0.005	0.01
>0.5	NC	$\geq 6 (0.5)$	0.005	0.01	0.0015	0.005
Condition ii. Beams controlled by shear ^b						
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030	0.02	0.0015	0.01
Stirrup spacing $> d/2$			0.0030	0.01	0.0015	0.005
Condition iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span ^b						
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030	0.02	0.0015	0.01
Stirrup spacing $> d/2$			0.0030	0.01	0.0015	0.005
Condition iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint ^b			0.015	0.03	0.01	0.02
						0.03

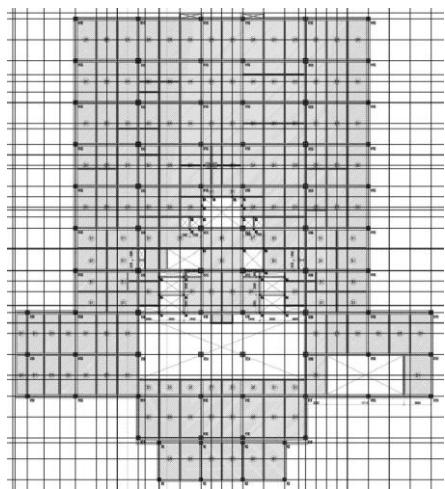
Tabel 2. Parameter Pemodelan dan Level Kinerja Kolom pada (ASCE 41-17)

Table 10-8. Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Columns Other Than Circular with Spiral Reinforcement or Seismic Hoops as Defined in ACI 318

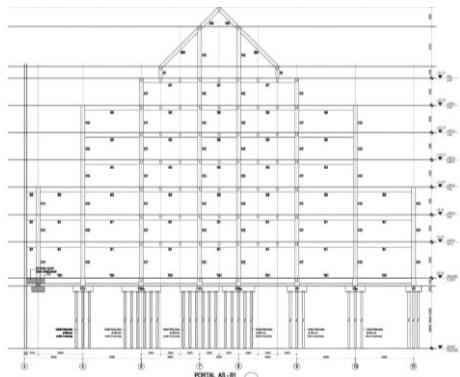
Plastic Rotation Angles, a and b (radians) Residual Strength Ratio, c	Modeling Parameters			Acceptance Criteria		
				Plastic Rotation Angle (radians)		
				Performance Level		
Columns not controlled by inadequate development or splicing along the clear height ^a	$a = \left(0.042 - 0.043 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{c,E}} + 0.63 p_t - 0.023 \frac{V_{yE}}{V_{Col(OE)}} \right) \geq 0.0$	$b = \frac{0.15 a}{\leq 0.005}$	$0.15 a$	$0.5 b^b$	$0.5 b^b$	$0.7 b^b$
For $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{c,E}} \leq 0.5$	$b = \frac{0.5}{5 + \frac{N_{UD}}{0.8 A_g f'_{c,E}} \frac{1}{p_t} \frac{f'_{c,E}}{f_{yE}}} - 0.01 \geq a^a$					
$c = 0.24 - 0.4 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{c,E}} \geq 0.0$						
Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height ^c	$a = \left(\frac{1}{8} p_t f_{yE} \right) \geq 0.0$	$b = \left(\frac{1}{8} p_t f_{yE} \right) \leq 0.025^d$	0.0	$0.5 b$	$0.5 b$	$0.7 b$
	$b = \left(0.012 - 0.085 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{c,E}} + 12 p_t^e \right) \geq a$	≤ 0.06				
	$c = 0.15 + 36 p_t \leq 0.4$					

2. Informasi Struktur Bangunan

Bangunan terletak di lokasi dengan potensi kegempaan tinggi. Sistem struktur yang digunakan adalah struktur beton bertulang pracetak. Mutu bangunan direncanakan menggunakan $f'_c = 29 \text{ MPa}$ (K-350) untuk elemen struktur kolom, balok dan pelat. Analisis hanya dilakukan untuk struktur atas, sehingga struktur bawah diasumsikan mampu menahan semua beban yang bekerja. Tipikal gambar denah dan potongan struktur bangunan 7 lantai dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Tipikal Denah Lantai



Gambar 4. Potongan Melintang

3. Pembebanan

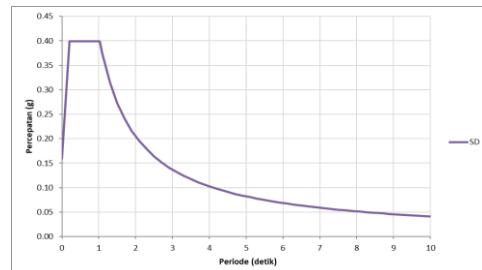
1.1 Beban Gravitasi

Beban gravitasi yang bekerja yaitu beban mati dan beban hidup. Beban – beban gravitasi yang bekerja:

- Beban mati pelat : 2.25 kN/m^2
- Beban mati dinding : 1.58 kN/m
- Beban hidup lantai 1–7 : 4.79 kN/m^2
- Beban hidup atap : 0.96 kN/m^2

1.2 Beban Gempa

Beban gempa yang digunakan mengacu pada peraturan gempa SNI 1726:2019. Berdasarkan peta gempa SNI 1726:2019, diperoleh nilai $S_S = 0.41\text{g}$ dan $S_I = 0.31\text{g}$ untuk lokasi bangunan yang dievaluasi dan termasuk dalam Kategori Desain Seismik (KDS) D. Fungsi bangunan direncanakan sebagai rumah sakit, sehingga termasuk dalam kategori resiko IV dengan faktor keutamaan gempa yang digunakan adalah 1.5. Spektra desain bangunan untuk kelas situs D dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Spektra Desain untuk Kelas Situs D

Kombinasi pembebalan yang digunakan adalah kombinasi pembebalan LRFD sesuai SNI 1726:2019 sebagai berikut:

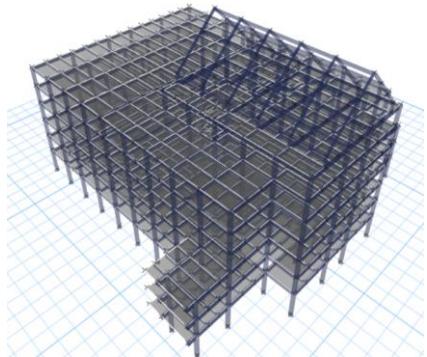
1. 1.4D
2. $1.2D + 1.6L + 0.5L_r$
3. $1.2D + 1.6L_r + L$
4. $1.2D + L + (0.2*S_{DS}*D \pm \rho(E_x \pm 0.3E_y))$
5. $1.2D + L + (0.2*S_{DS}*D \pm \rho(0.3E_x \pm E_y))$
6. $0.9D - (0.2*S_{DS}*D \pm \rho(E_x \pm 0.3E_y))$
7. $0.9D - (0.2*S_{DS}*D \pm \rho(0.3E_x \pm E_y))$

Nilai faktor redundansi yang digunakan adalah $\rho = 1.3$.

4. Analisis Struktur Bangunan 7 Lantai

Analisis kekuatan struktur gedung dilakukan dengan analisis linear elastik. Berdasarkan analisis linear elastik akan diketahui kekuatan dan kekakuan dari elemen struktur gedung. Pemeriksaan elemen-elemen struktur dilakukan dengan melihat besarnya gaya momen dan geser yang terjadi terhadap kapasitas elemen-elemen struktur tersebut. Pemeriksaan dilakukan terhadap kombinasi gravitasi dan kombinasi gempa (ultimit). Beban gempa yang digunakan dalam analisis merupakan beban gempa dinamik respon spektrum berdasarkan SNI 1726:2019 yang telah diskalakan ke 100% beban gempa statik. Analisis dilakukan dengan memodelkan struktur 3D menggunakan

software FEM (Gambar 6). Analisis yang dilakukan meliputi analisis elastis dan analisis kinerja (*pushover*).

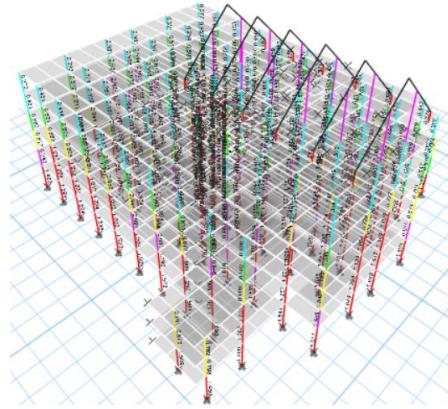


Gambar 6. Pemodelan Struktur 7 Lantai

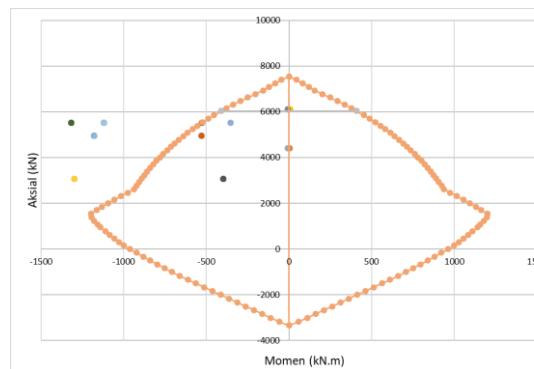
4.1 Analisis Elastis

Analisis elastis terhadap beban gempa SNI 1726:2019 menunjukkan bahwa beberapa kolom dan balok tidak mampu menahan

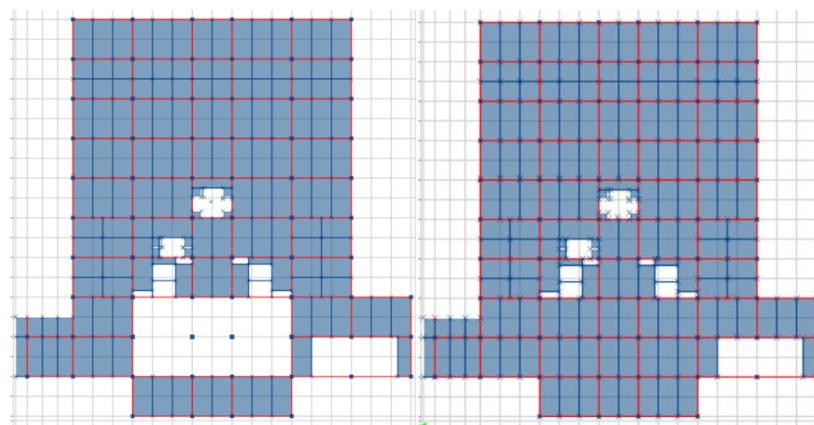
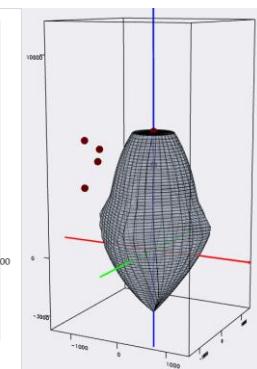
kombinasi beban gravitasi dan gempa yang bekerja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 sampai Gambar 9. Elemen kolom dan balok yang berwarna merah menandakan bahwa rasio gaya/kapasitas > 1.0 yang berarti gaya yang terjadi melebihi kapasitas.



Gambar 7. Rasio Aksial-Lentur Akibat Kombinasi Beban Gravitasi dan Gempa



Gambar 8. Diagram PMM Kolom



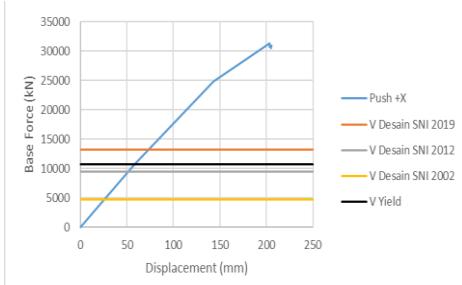
Gambar 9. Pemeriksaan Balok (a) Lantai 1 (b) Lantai 3-4

4.2 Analisis Kinerja (*pushover*)

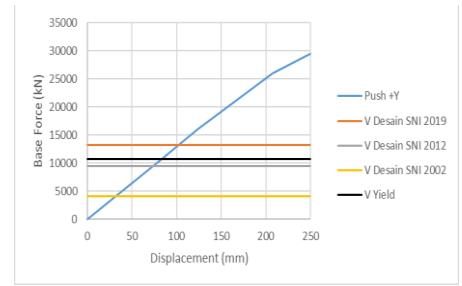
Berdasarkan analisis pushover pada Arah X dan Arah Y, di dapat kurva *pushover* pada masing-

masing arah seperti yang terlihat pada Gambar 10 dan Gambar 11. Pada kurva *pushover* diplot juga gaya geser desain untuk masing-masing peraturan gempa dan gaya geser leleh V_{yield} .

Apabila gaya geser leleh lebih kecil daripada gaya geser desain, maka struktur akan leleh sebelum mencapai gempa desain sehingga struktur menjadi tidak memadai. Idealnya kapasitas geser leleh harus lebih besar daripada gaya geser desain.



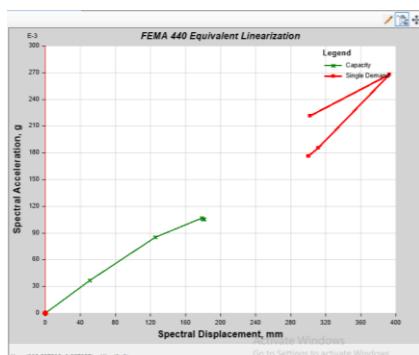
Gambar 10. Kurva Pushover Arah +X



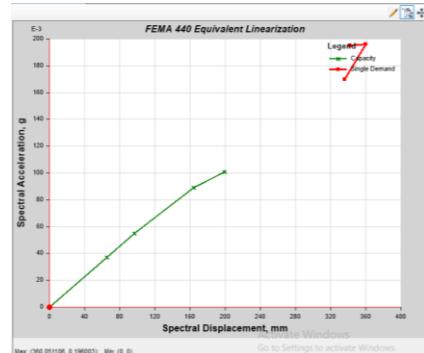
Gambar 11. Kurva Pushover Arah +Y

Berdasarkan hasil analisis *pushover* menggunakan metode *Equivalent Linearization*, untuk target gempa 2500 tahun sesuai dengan dan SNI 1726:2019 tidak terdapat *performance point*. Kondisi struktur sudah melebihi *Collapse Prevention*. Penentuan *performance point* seperti yang terlihat pada Gambar 12 dan Gambar 13. Hasil yang diperoleh ini belum memenuhi persyaratan pada level gempa kuat adalah *Life Safety* (LS).

Berdasarkan hasil analisis kekuatan dan kinerja (*pushover*) bangunan 7 lantai ini diperoleh hasil bahwa struktur bangunan tidak kuat dan tidak memenuhi persyaratan level kinerja sesuai dengan peraturan SNI 1726:2019 yang berlaku.



Gambar 12. Performance Point pada Arah X



Gambar 13. Performance Point pada Arah Y

5. Kesimpulan

Metode analisis yang digunakan dalam studi ini adalah analisis berbasis kinerja dengan bangunan gedung kategori IV yang mensyaratkan kinerja bangunan saat terjadi gempa besar adalah “*Life Safety*” untuk beban gempa SNI 1726:2019.

Hasil analisis menunjukkan bahwa desain bangunan beton bertulang pracetak 7 lantai yang didesain dengan peraturan gempa SNI 1726:2012 dan fungsi bangunan sebagai Rumah Sakit tidak memenuhi persyaratan untuk analisis elastis (kekuatan dan kekakuan) dan analisis berbasis kinerja terhadap beban gempa SNI 1726:2019.

Referensi

- American Society of Civil Engineers, ASCE 41-17, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, Virginia (2017)
- Badan Standardisasi Nasional, SNI 1726:2012, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, BSN, Jakarta (2012)
- Badan Standardisasi Nasional, SNI 1726:2019, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, BSN, Jakarta (2019)
- Badan Standardisasi Nasional, SNI 1727:2020, *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*, BSN, Jakarta (2020)
- Badan Standardisasi Nasional, SNI 1729:2020, *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, BSN, Jakarta (2020)
- Badan Standardisasi Nasional, SNI 2847:2019, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*, BSN, Jakarta (2019)