

ANALISIS *PUSHOVER* PADA STRUKTUR BETON DENGAN *EXTERNAL PRESTRESSING* UNTUK TRANSFER GAYA AKSIAL

Daniel Christianto¹, Christopher Felix², Maria Kevinia³, dan Vryscillia Marcella⁴

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1, Jakarta, Indonesia
danielc@ft.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1, Jakarta, Indonesia
Christopher.325180113@stu.untar.ac.id

³Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1, Jakarta, Indonesia
Maria.325180006@stu.untar.ac.id

⁴Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1, Jakarta, Indonesia
Vryscillia.325180005@stu.untar.ac.id

Masuk: 22-01-2022, revisi: 11-05-2022, diterima untuk diterbitkan: 12-05-2022

ABSTRACT

The addition of the number of floors in the existing building due to changes in the function of the building will affect the load carried by the existing foundation. Thus the consultant must re-check the effect of the added load on the existing building. It is impossible to add more foundation piles, thus there is need to transfer the axial force on the column. The building used as case is an existing earthquake resistance building designed according to standard of SK SNI T-15-1991-03 and SNI 1726-2002. The axial force was transferred using steel strand grade 270 ksi (1860 MPa), diameter 12,7 mm, with ASTM A416 standard. Five types of models used with the same load but the number of tendons and strand sizes are different. This retrofitted building will be reviewed for its effect on the SNI 1726-2019 earthquake using the pushover analysis method. The use of external prestressing resulted in a smaller response modification factor (R_{y1}) and effective period (T_e) compared to the existing building. External Prestressed also contributes to the stiffness of the existing building.

Keywords: existing building; axial force transfer; pushover analysis

ABSTRAK

Penambahan lantai pada bangunan eksisting akibat perubahan fungsi bangunan akan berpengaruh pada beban dipikul oleh pondasi yang sudah ada. Sehingga perencana bangunan tersebut harus melakukan pengecekan ulang pengaruh penambahan beban tersebut terhadap bangunan eksisting. Penambahan jumlah tiang pondasi tidak mungkin dilakukan sehingga perlu dilakukan pemindahan gaya aksial pada kolom. Bangunan yang digunakan untuk studi kasus adalah bangunan eksisting yang didesain dengan standar SK SNI T-15-1991-03 dan SNI 1726-2002. Gaya aksial kolom dipindahkan dengan tendon *strand* baja mutu 270 ksi (1860 MPa) ukuran 12,7 mm dengan standar ASTM A416. Digunakan lima jenis model dengan gaya *jacking* yang sama namun jumlah tendon dan ukuran *strand* berbeda-beda. Bangunan *retrofit* ini akan ditinjau pengaruhnya terhadap gempa SNI 1726-2019 dengan metode analisis *pushover*. Penggunaan Prategang eksternal menghasilkan nilai faktor modifikasi respon (R_{y1}) dan waktu getar efektif (T_e) lebih kecil dibandingkan dengan bangunan eksisting. Prategang eksternal juga memberikan sumbangan kekakuan pada bangunan eksisting.

Kata kunci: bangunan eksisting; pemindahan gaya aksial; analisis *pushover*

1. PENDAHULUAN

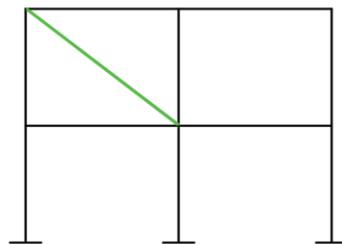
Setiap bangunan yang akan dibangun pasti dirancang sesuai dengan fungsi bangunan tersebut sesuai peraturan yang berlaku. Ada beragam fungsi bangunan dimulai dari fungsi sebagai tempat usaha, kegiatan sosial, keagamaan, hunian hingga fungsi khusus yang diatur pada Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 36 Tahun 2005 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 Tentang Bangunan Gedung. Bila terjadi kebutuhan ruang lebih pada lahan yang terbatas akibat perubahan fungsi bangunan, perlu dilakukan penambahan jumlah lantai pada bangunan yang sudah ada.

Penambahan lantai tersebut berpengaruh pada beban dipikul oleh pondasi yang sudah ada. Sehingga konsultan bangunan tersebut harus melakukan analisis ulang pengaruh penambahan beban tersebut terhadap bangunan eksisting.

Jika seluruh pondasi bangunan tidak dapat memikul semua beban yang ada maka bisa terjadi kegagalan pada pondasi yang bisa menyebabkan runtuhnya bangunan. Tidak mungkin menambah tiang pondasi pada bangunan eksisting ataupun melakukan perkuatan pada pondasi. Sehingga bila hal tersebut terjadi maka bangunan tersebut perlu didesain dan dibangun ulang.

Namun bagaimana jika gaya aksial kolom tengah saja yang melebihi daya dukung pondasinya. Bila bangunan tersebut dirancang dan dibangun ulang akan memakan waktu dan biaya yang sangat banyak atau terbilang tidak ekonomis. Sehingga perlu dilakukan transfer gaya dari kolom tengah ke kolom tepi yang menopang gaya lebih kecil daripada kolom yang ada di tengah. Transfer gaya ini dilakukan agar redistribusi gaya aksial kolom tersebut mampu dipikul oleh struktur pondasi.

Transfer gaya ini dapat dilakukan dengan menaikkan kekakuan kolom yang berpengaruh seperti pada konsep metode distribusi momen. Namun untuk mentransfer gaya aksial kolom penggunaan prategang eksternal lebih efektif. Dengan memasang tendon dari kolom tengah ke kolom tepi, tendon eksternal prestressed ini akan menyalurkan gaya aksial kolom tengah bawah ke kolom tepi atas. Pemasangan tendon ini dapat dilakukan seperti Gambar 1.

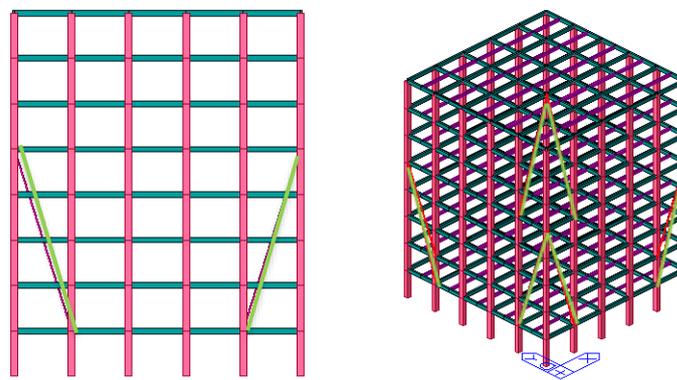


Gambar 1. Struktur prategang (warna hijau merupakan tendon).

Transfer gaya yang dilakukan ini akan berpengaruh kepada efek dinamis bangunan seperti respon bangunan terhadap gempa dan waktu getar bangunan. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis nonlinear untuk mengetahui efek dinamis bangunan ini. Nilai faktor reduksi gempa (R) untuk bangunan dengan tambahan *external prestressed* ini tidak dibahas secara spesifik dalam peraturan SNI 1726.

Struktur gedung yang digunakan untuk studi kasus adalah portal ruang 8 lantai dan dianggap sebagai bangunan eksisting berlokasi di Jakarta Barat. Pembebanan yang digunakan adalah beban mati, berat sendiri bangunan, dan beban hidup dan beban gempa. Untuk beban gempa, Respon Spektra diambil dari Desain Spektra Indonesia untuk wilayah Jakarta Barat dengan asumsi tanah sedang.

Prategang yang digunakan adalah prategang eksternal, dipasang pada lantai 2 di kolom tengah menumpu pada kolom tepi seperti pada Gambar 2 dengan asumsi bahwa gaya pada kolom tepi berlebih. Gaya prategang eksternal ini didesain untuk memindahkan gaya akibat gravitasi saja.



Gambar 2. Studi kasus bangunan 6 lantai (warna hijau merupakan tendon).

Steel strand

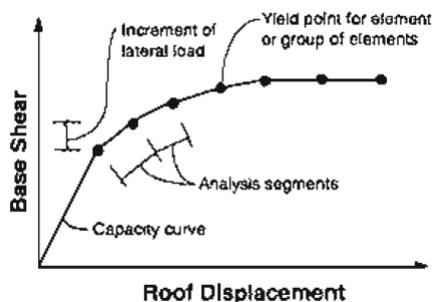
ASTM A-416 memberikan 2 kelas baja yang dapat digunakan sebagai *Steel Strand* yaitu 250 ksi dan 270 ksi (1724 MPa dan 1862 MPa). Kelas yang diberikan dibagi berdasarkan tegangan putus minimum baja yang terjamin (*Minimum Guaranteed Breaking Stress*). Baja spesifikasi ini dapat digunakan untuk sistem prategang *pre-tension* yang terikat

dan prategang *post-tension* terikat maupun tak terikat. Utaian yang terdiri dari 7 kawat baja ini memiliki kawat ditengah yang sedikit lebih besar daripada 6 kawat yang ada diluar dan tertutup rapat dalam bentuk *spiral helix* dengan jarak seragam (*uniform pitch helix*) antara 12 sampai 16 kali diameter nominal untaian. Setelah kawat diuntai kemudian dilakukan proses perlakuan panas (*heat treatment*) untuk menghasilkan properti mekanik yang diinginkan (Lin, 1981).

Analisis statik non-linier (*pushover analysis*)

Analisis statik nonlinier menurut Dewobroto (2005), merupakan prosedur analisis untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa, dikenal pula sebagai analisis *pushover* atau analisis beban dorong statik. Umumnya *Pushover Analysis* dilakukan dengan bantuan program untuk analisis bangunan tiga dimensi.

Analisis *pushover* dilakukan dengan melakukan simulasi beban gempa statik ekuivalen pada model bangunan pada titik berat bangunan di setiap lantai. Beban statik ekuivalen ini berbeda setiap lantainya. Pada lantai paling atas beban gempa ini nilainya paling kecil dan pada lantai pertama nilainya paling besar. Pada metode analisis ini, beban gempanya diperbesar terus menerus hingga bangunannya mengalami kelelahan pertama dan dilanjutkan sampai bangunan mencapai batas dimana deformasinya itu tidak dapat kembali seperti semula (*Plastic*). *Base shear* dan deformasi bangunan dicatat bersamaan dengan pembesaran beban gempa. Hasil pencatatan ini kemudian disajikan dalam bentuk kurva yang dikenal dengan sebutan *Capacity Curve* dimana sumbu x-nya adalah deformasinya dan sumbu y-nya adalah *base shear*-nya. Kurva ini dikenal dengan sebutan *capacity curve*. Kurva ini menggambarkan keadaan bangunan dan kapasitas nya sebelum terjadi keruntuhan (Arifin et al., 2015).

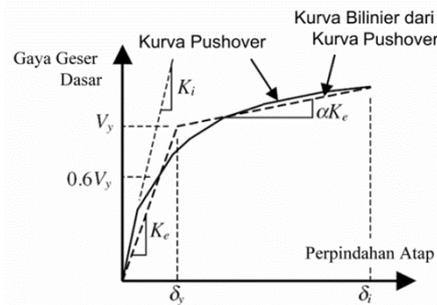


Gambar 3. *Capacity curve* (Sumber: Applied Technology Council, 1996)

Pushover Analysis dilakukan untuk mengetahui gaya maksimum yang kira kira dapat diterima oleh bangunan serta bagian mana dari struktur yang akan mengalami leleh terlebih dahulu. Bagian-bagian yang leleh pertama ini dapat diidentifikasi dan diberi perawatan khusus untuk menghindari kegagalan akibat gempa. Ada banyak penelitian yang menunjukkan bahwa analisis statik *pushover* ini memberikan hasil yang cukup baik dibandingkan dengan hasil analisis dinamik nonlinier, untuk digunakan pada bangunan regular dan tidak tinggi. (Dewobroto, 2005)

Waktu getar alami efektif

Umumnya analisis *eigen-value* digunakan untuk mencari waktu getar alami bangunan yang digunakan untuk mendapatkan perkiraan besaran gaya gempa yang dialami oleh bangunan. *Eigen-value* hanya menganalisis kondisi elastis dari bangunan, walaupun saat terjadi gempa kondisi bangunan tersebut berbeda yaitu bersifat in-elastis. Sehingga pada saat gempa maksimum, waktu getar alami yang didapat dari analisis *eigen-value* tidak akurat sehingga penggunaan analisis *pushover* yang memperhitungkan kondisi inelastik bangunan lebih sesuai untuk digunakan. Waktu getar alami bangunan yang memperhitungkan kondisi inelastik disebut sebagai waktu getar efektif, T_e . (Dewobroto, 2005)



Gambar 4. Waktu getar efektif pada kurva *pushover* (sumber: Dewobroto, 2005).

Untuk memperkirakan kekakuan efektif bangunan terhadap gaya lateral, K_e , dan kuat leleh bangunan, V_y , kurva *pushover* diubah menjadi kurva bilinear kemudian diambil. Kekakuan lateral efektif, K_e , dapat diambil pada kondisi elastis yaitu dari titik 0 hingga titik perpotongan kurva saat gaya geser dasarnya sebesar 60 % dari kuat leleh seperti pada Gambar 4. Titik perpotongan kekakuan lateral efektif saat kondisi elastis dan inelastis adalah kuat lelehnya. Proses ini pun perlu dilakukan melalui proses *Trial and error* (Dewobroto, 2005).

Dengan mengetahui kekakuan lateral efektif bangunan dan kekakuan awal bangunan, waktu getar efektif ini dapat dihitung dengan Persamaan 1.

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (1)$$

Dengan T_e : waktu getar efektif, T_i : Periode alami awal saat keadaan elastis, K_i : Kekakuan awal bangunan saat keadaan elastis, K_e : Kekakuan lateral efektif pada kondisi elastis

Target perpindahan

Gaya dan deformasi masing-masing komponen/elemen dihitung terhadap “perpindahan tertentu” pada titik kontrol, yang disebut “target perpindahan” dengan notasi δ_t , yang dianggap sebagai perpindahan maksimum yang akan terjadi pada saat bangunan dikenai gempa desain. Untuk mendapatkan perilaku struktural setelah kegagalan, analisis gaya dorong harus dilakukan untuk memplot kurva hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan lateral titik kontrol minimum 150% terhadap target perpindahan, δ_t (Dewobroto, 2005).

Persyaratan untuk membuat kurva *pushover* hingga 150% dari target perpindahan ini digunakan untuk mengidentifikasi perilaku bangunan di luar keadaan yang direncanakan. Seorang desainer harus memahami bahwa target perpindahan ini merupakan nilai rata-rata yang diambil dari beban gempa rencana. Sehingga Perkiraan target perpindahan menjadi kurang tepat untuk bangunan dengan kekuatan di bawah spektrum desain elastis. Meskipun data tersebut tidak didukung oleh data pada saat FEMA 356 ditulis, 150% dari target perpindahan diharapkan menjadi rata-rata perkiraan ditambah satu standar deviasi perpindahan bangunan dengan tahanan lateral lebih besar dari gaya spektral elastis 25% (Dewobroto, 2005).

Beban geser akibat gempa disimulasikan dalam pola tertentu sebagai gaya dorong dan dihitung secara bersamaan dengan kombinasi beban mati dan beban hidup setidaknya 25% dari persyaratan. Gaya dorong ini harus diterapkan pada pusat massa per lantai. FEMA 273 mengharuskan setidaknya dua pola pembebanan yang berbeda dilaporkan sebagai simulasi pembebanan seismik acak sehingga Anda dapat memberikan gambaran pola mana yang memiliki efek paling tidak menguntungkan. Beban juga harus diberikan secara bertahap dalam satu arah (secara monotonik) (Dewobroto, 2005).

Kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kinerja kondisi bangunan harus didasarkan pada gaya dan deformasi yang terjadi ketika perpindahan titik kontrol sama dengan perpindahan target, δ_t . Oleh karena itu, parameter target perpindahan sangat penting untuk perencanaan berbasis kinerja (Dewobroto, 2005).

Metode koefisien perpindahan

Displacement Factor Method (DCM) adalah metode utama yang termasuk dalam FEMA 273/356 untuk prosedur statik nonlinier. Metode ini diimplementasikan dengan memodifikasi respon elastik linier sistem SDOF (*Single Degrees of Freedom*) ekuivalen dengan koefisien, sehingga diperoleh perpindahan total alias target perpindahan maksimum. Untuk mendapatkan nilai perpindahan target bisa menggunakan benchmark FEMA 356 dan FEMA 440 yang merupakan penyempurnaan dari FEMA 356. Redaman diasumsi sebesar 5% dengan rumus sebagai berikut. (Nabhilla & Hayu, 2020)

Proses dimulai dengan menentukan waktu getar efektif, T_e , dengan mempertimbangkan kondisi inelastis. Waktu getaran alami yang efektif mencerminkan kekakuan linier dari sistem SDOF yang setara. Jika diplot pada spektrum respon elastis akan menunjukkan percepatan gerakan tanah saat gempa, yaitu percepatan maksimum, S_a , sebagai fungsi dari waktu getaran, T . Perendaman yang digunakan selalu 5%, yang merupakan nilai yang diharapkan. tingkat dalam struktur reaktif di daerah elastis. Puncak pergeseran spektrum elastis, S_d , berhubungan langsung dengan spektrum percepatan, S_a (Sudarman, 2014)

Hubungan ini dapat ditulis dalam Persamaan 2.

$$S_d = \frac{T_e^2}{4\pi^2} S_a \quad (2)$$

Dengan T_e : waktu getar alami efektif yang memperhitungkan kondisi inelastis

Selanjutnya target perpindahan pada titik kontrol δ_T , ditentukan dari Persamaan 3.

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g \quad (3)$$

dengan C_0 : Koefisien faktor bentuk, untuk merubah perpindahan spektral menjadi perpindahan atap, umumnya memakai faktor partisipasi ragam yang pertama (*first mode participation factor*) atau berdasarkan Tabel 3-2 dari FEMA 356, C_1 : Faktor modifikasi yang menghubungkan perpindahan inelastik maksimum dengan perpindahan yang dihitung dari respon elastik linier, C_2 : Koefisien untuk memperhitungkan efek “pinching” dari hubungan beban-deformasi akibat degradasi kekakuan dan kekuatan, berdasarkan Tabel 3-3 dari FEMA 356, C_3 : Koefisien untuk memperhitungkan pembesaran lateral akibat adanya efek P-delta. Untuk bangunan dengan kekakuan pasca leleh positif, maka nilai sebesar 1.0 harus digunakan. Untuk bangunan dengan kekakuan pasca leleh negatif, maka nilai C_1 akan dianalisis menurut persamaan (2-27), g : percepatan gravitasi 9,81 m/det²

Faktor modifikasi C_1 diatas bernilai 1,0 untuk $T_e \geq T_s$ dan untuk $T_e < T_s$ dicari dengan Persamaan 4.

$$C_1 = \frac{[1.0 + (R - 1) \frac{T_s}{T_e}]}{R} \quad (4)$$

dengan T_s : Waktu getar karakteristik yang diperoleh dari kurva respons spektrum pada titik dimana terdapat transisi bagian akselerasi konstan ke bagian kecepatan konstan, R : Rasio “kuat elastik perlu” terhadap “koefisien kuat leleh terhitung”.

Dimana nilai R dan C_3 ini dihitung dengan menggunakan Persamaan 5 dan Persamaan 6.

$$R = \frac{S_a}{v_y/W} C_m \quad (5)$$

$$C_3 = 1,0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{\frac{3}{2}}}{T_e} \quad (6)$$

dengan α : rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan elastik efektif, dimana hubungan gaya lendutan diidealisasikan sebagai kurva bilinear.

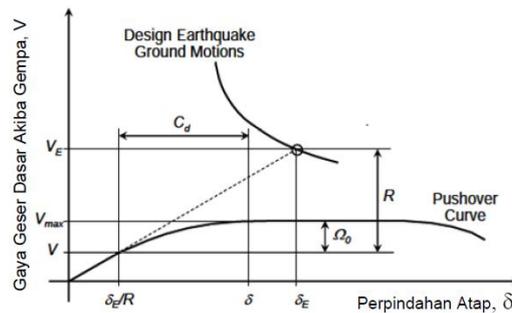
Faktor reduksi gempa (R)

Pada ASCE 7-10 Perhitungan besarnya faktor daktilitas struktur mengacu pada FEMA P-695 (2009). Untuk bisa melakukan perhitungan ulang faktor daktilitas perlu dilakukan analisis *pushover* dan mendapatkan kurva *pushover*. Kurva *pushover* seperti pada Gambar 5 menggambarkan perilaku struktur dalam kondisi elastik hingga mencapai kondisi inelastik saat struktur hampir mengalami keruntuhan. Bila struktur yang ditinjau tidak mengalami kondisi inelastik maka perhitungan faktor daktilitas sulit untuk dilakukan karena kurva $V-\delta$ masih berupa garis lurus. (Andy Prabowo, 2016)

Persamaan faktor modifikasi respon yang mengacu dalam FEMA P-625 (2009) dapat ditulis sebagai Persamaan 7.

$$R = \frac{V_E}{V} \quad (7)$$

dengan V_E : Beban gempa saat struktur berperilaku elastik penuh, V : Beban gempa rencana.

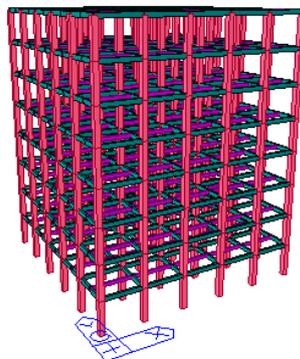


Gambar 5 Definisi faktor daktilitas struktur dari kurva $V-\delta$ (Sumber: Applied Technology Council, 2009).

2. DATA ANALISIS

Bangunan eksisting yang digunakan untuk analisis *pushover* berupa struktur beton bertulang yang telah didesain sebagai portal 3 dimensi dengan fungsi bangunan sebagai perkantoran dengan tinggi bangunan 32 meter dan luas bangunan 25 m². Struktur bangunan eksisting ini telah di desain dengan pembebanan mati, beban hidup, dan beban gempa SNI 1726-2002 untuk wilayah 3. Beban mati yang bekerja berupa beban sendiri pelat lantai, Beban plafon, Beban mekanikal dan elektrik, Beban ubin, Beban dinding, dan Beban spesi dimana nilai beban tersebut diambil dari Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983. Beban hidup diambil sesuai dengan fungsi bangunan diambil dari Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983. Kombinasi beban yang digunakan merupakan kombinasi beban metode ultimit. Dengan mutu balok beton dan kolom beton sebesar 30 MPa. Beban gempa digunakan untuk jenis tanah sedang dengan faktor modifikasi respon untuk beton bertulang penahan momen khusus (R) diambil 8,5 dan faktor kuat lebih sistem (Ω_0) sebesar 2,8. Bangunan masuk kedalam kategori risiko II dengan faktor keutamaan gempa (I_e) = 1 untuk Gedung umum seperti untuk perumahan, perniagaan dan perkantoran

Permodelan struktur



Gambar 6. Permodelan struktur.

Analisis struktur dilakukan dengan bantuan program Midas GEN oleh karena itu perlu dilakukan permodelan struktur pada program tersebut. Struktur yang digunakan (Gambar 6) adalah portal ruang 8 lantai yang didesain dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dengan tinggi lantai 4 meter. Dan jarak antar kolom 5 meter.

Permodelan pertama-tama diberikan beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Beban gempa diinput sebagai gaya statik ekuivalen dengan respon spektrum yang mengacu pada peraturan SNI 1726-2002. Kemudian permodelan tersebut di *run-Analysis* untuk mendapatkan gaya dalam dari setiap elemen balok dan kolom. Kemudian dicari penulangan balok dengan menggunakan standar SK SNI T-15-1991-03.

Transfer gaya

Gaya vertikal akibat beban gravitasi pada perletakan akan dipindahkan agar terdistribusi merata. Beban gravitasi yang diambil adalah kombinasi dari beban mati dan beban hidup. *External prestress* dimodelkan pada bangunan dengan mempertimbangkan sudut kemiringan *prestress* agar gaya *jacking* yang diinput akan menghasilkan gaya vertikal yang efektif. Proses transfer gaya ini dilakukan dengan mencari persamaan untuk menghitung gaya prategang yang dibutuhkan untuk mendistribusi gaya vertikal.

Pushover analysis

Langkah berikutnya yang dilakukan adalah melakukan analisis *pushover*. Proses dimulai dengan menentukan satu titik sebagai titik kontrol perpindahan kemudian menentukan waktu getar efektif, T_e . Kemudian waktu getar efektif ini diplot pada spektrum respon elastis untuk mendapatkan percepatan gerakan tanah saat gempa, yaitu percepatan maksimum, S_a , sebagai fungsi dari waktu getaran, T . Kemudian bangunan diberikan gaya gempa pada setiap lantainya hingga mencapai gempa rencana yaitu saat percepatan maksimum. Titik kontrol tadi kemudian dilihat perpindahannya, saat titik kontrol mencapai target perpindahan. Bila kekuatan gempa, perpindahan, dan elemen kritisnya sesuai dengan yang sudah memenuhi kriteria yang sudah ditetapkan maka evaluasi dapat dianggap memuaskan. Elemen elemen yang dievaluasi berjumlah banyak sehingga analisis ini menggunakan bantuan program Midas Gen dengan mengacu pada FEMA-356.

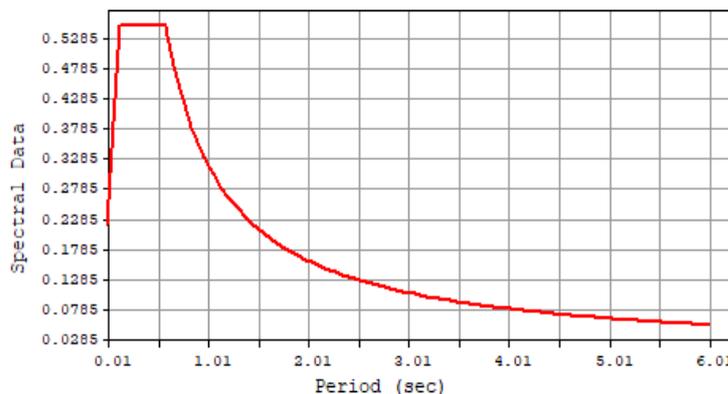
3. HASIL ANALISIS

Permodelan struktur

Pembebanan yang digunakan dalam desain bangunan dapat dilihat pada Tabel 1. Respons spektrum wilayah Jakarta dapat dilihat pada Gambar 7.

Tabel 1. Pembebanan Mati dan Hidup Tiap Lantai

Pembebanan Desain			
Lantai	LL	SDL	E
1-7	2,5 kN/m ²	4,25 kN/m ²	1479,994 kN
8	1 kN/m ²		



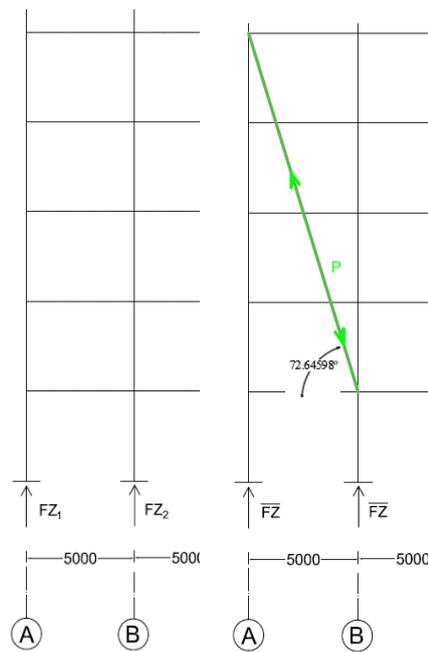
Gambar 7. Respon spektrum untuk Jakarta (SNI 1726-2002) wilayah 3.

Baja tulangan diasumsi sebagai tulangan ulir dengan mutu 400 MPa untuk tulangan lentur dan 240 MPa untuk sengkang. Jarak bersih dari tulangan ke tepi beton sebesar 40 mm untuk balok dan kolom.

External prestressing

External Prestressing ini digunakan dengan tujuan mendistribusi gaya aksial kolom tepi dan sudut dengan cara memindahkan gaya aksial pada kolom tepi ke kolom sudut. Gaya aksial yang dipindahkan merupakan gaya akibat beban gravitasi saja dengan kombinasi tegangan izin atau service load combination yaitu (DL) + LL. Gaya aksial kedua kolom dirata-ratakan (\bar{FZ}) dan dikurangi dengan gaya aksial kolom sudut untuk mendapatkan besar gaya aksial yang dipindahkan ($\bar{FZ} - FZ_2$). Tendon prategang dipasang dalam posisi miring seperti pada Gambar 8, sehingga $\bar{FZ} - FZ_2$ harus dikalikan dengan $1/\sin(\theta)$ dimana θ sebesar $72,64^\circ$ untuk mendapatkan besarnya gaya prategang efektif, P , yang diperlukan untuk memindahkan gaya aksial tersebut. Perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tendon *prestressed* yang digunakan merupakan 1x7 PC strand dengan standar ASTM A-416 *grade 270 low relaxation*. Berat jenis tendon sebesar 77,09 kN/m³ dengan *breaking stress*, f_u , sebesar 1860 MPa.



Gambar 8. Perhitungan untuk mencari gaya prategang (warna hijau merupakan letak tendon).

Tabel 2. Gaya Prategang Efektif yang Diperlukan untuk Mendistribusi Gaya Axial Kolom

FZ_1 (kN)	FZ_2 (kN)	$\overline{FZ} = \frac{(FZ_1+FZ_2)}{2}$	$\overline{FZ} - FZ_2$	Gaya Prategang Efektif P (kN)
1373,211	976,4079	1174,81	198,4017	207,8636
1348,654	976,4079	1162,531	186,1228	194,9992
1373,211	976,4079	1174,81	198,4017	207,8636
1348,654	976,4079	1162,531	186,1228	194,9992
1348,654	976,4079	1162,531	186,1228	194,9992
1373,211	976,4079	1174,81	198,4017	207,8636
1348,654	976,4079	1162,531	186,1228	194,9992
1373,211	976,4079	1174,81	198,4017	207,8636

Tabel 3 Ukuran Diameter dan Jumlah *Strand Prestressed* yang Digunakan

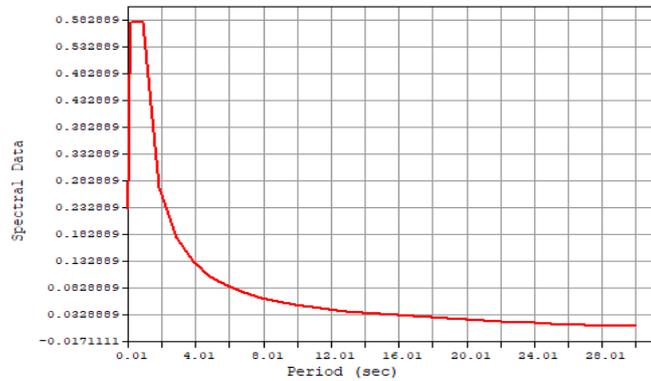
No Uji	Jumlah strand	Diameter nominal strand (mm)	Luas nominal strand (mm ²)	Luas total (mm ²)
1	2	12,7	98,7	197,4
2	8	12,7	98,7	789,6
3	10	12,7	98,7	987
4	12	12,7	98,7	1184,4
5	18	12,7	98,7	1776,6

No uji 5 didesain menahan 10% dari gaya gempa yang tidak diserap oleh bangunan (V_{DP}) yaitu nilai $V_E \cdot (1-1/R)$ ditambah dengan selisih gaya gempa perhitungan SNI 1726-2002 dengan SNI 1726-2019. No uji 2, 3, dan 4 didesain dengan memilih ukuran luas nominal total diantara no uji 5 dan no uji 1. Hilangnya gaya *prestressed* pada analisis

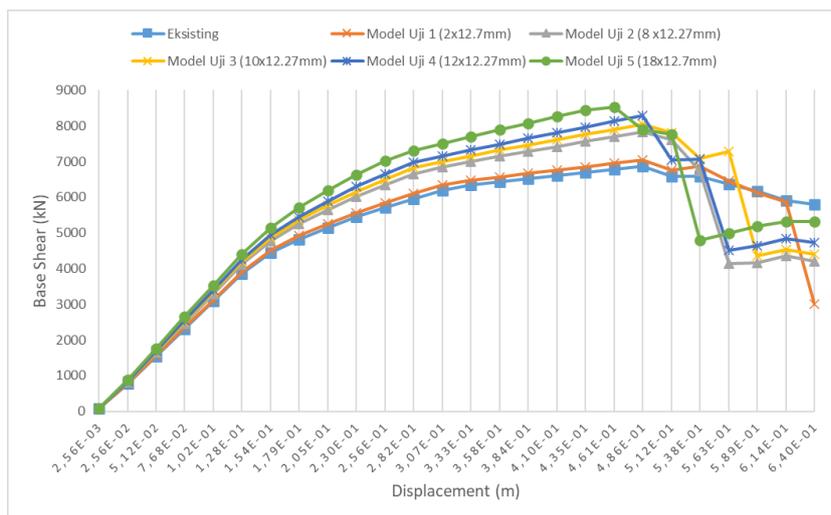
diabaikan, sehingga gaya yang diinput kedalam program adalah gaya yang diasumsi sudah mengalami pengurangan atau gaya prategang efektif.

Kurva pushover

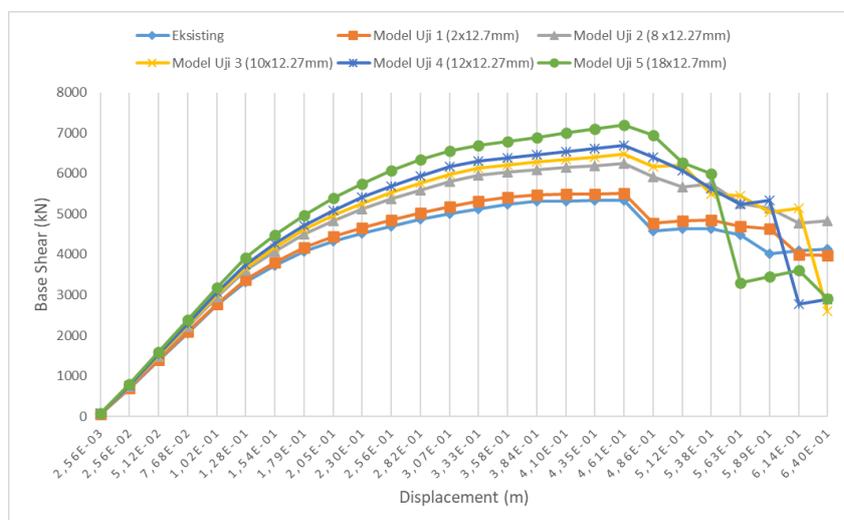
Performance point diambil dari titik perpotongan kurva kapasitas dengan respon spektrum. Respon spektrum yang digunakan merupakan respon spektrum wilayah Jakarta yang dihitung dengan mengacu pada SNI 1726-2019 (Gambar 9 sampai Gambar 11) dan hasil analisis diperlihatkan Tabel 4 dan Tabel 5.



Gambar 9. Respon spektrum untuk Jakarta.



Gambar 10. Pushover capacity (Base shear vs Roof Displacement) bangunan arah X.



Gambar 11. Pushover capacity (Base shear vs Roof Displacement) bangunan arah Y.

Tabel 4. *Performance Level* Bangunan

	<i>Base Shear</i> V_p (kN)		<i>Effective Period</i> T_e (sec)		<i>Roof Displacement</i> D_p (m)		<i>Performance Level</i>
	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	
	Eksisting	6291	5172	2,483	2,803	0,3246	
Uji No 1 (2 x 12,7 mm)	6421	5343	2,455	2,753	0,3234	0,3412	<i>Life Safety</i>
Uji No 2 (8 x 12,7 mm)	6902	5958	2,332	2,567	0,315	0,3325	<i>Life Safety</i>
Uji No 3 (10 x 12,7 mm)	7042	6121	2,298	2,52	0,3125	0,3297	<i>Life Safety</i>
Uji No 4 (12 x 12,7 mm)	7175	6277	2,266	2,476	0,31	0,3271	<i>Life Safety</i>
Uji No 5 (18 x 12,7 mm)	7484	6629	2,197	2,386	0,3042	0,3207	<i>Life Safety</i>

Keterangan: Nilai V_p , T_e , dan D_p diambil dari *performance point* hasil Analisis *pushover*

Tabel 5. *Base Shear* dan *Roof Displacement* Bangunan Saat Pertama Kali Mengalami *Yield*

	<i>Base Shear</i> V_{y1} (kN)		<i>Roof Displacement</i> D_{y1} (m)	
	Rx	Ry	Rx	Ry
	Eksisting	6036,53	5676,7	0,1024
Uji No 1 (2 x 12,7 mm)	5211,22	4747,3	0,128	0,128
Uji No 2 (8 x 12,7 mm)	4398,14	3909,15	0,128	0,128
Uji No 3 (10 x 12,7 mm)	4244,97	3746,76	0,128	0,128
Uji No 4 (12 x 12,7 mm)	4177,82	3675,39	0,128	0,128
Uji No 5 (18 x 12,7 mm)	4109,5	3602,72	0,128	0,128

Pengaruh *external prestressed* terhadap efek dinamis struktur

Penggunaan *External prestressed* memberikan pengaruh pada waktu getar bangunan alami dan efektif. Pada Tabel 6 memperlihatkan periode getar mode 1,2, dan 3 pada model uji No 1 (2 x 12,7 mm) menunjukkan nilai yang lebih kecil daripada periode getar eksisting. Begitupun untuk model uji No 2 (18 x 12,7 mm) dan seterusnya yang waktu getar mode 1 dan 2 lebih kecil daripada model uji sebelumnya dan eksisting.

Tabel 6. Periode Getar

Mode No	<i>Period (sec)</i>					
	Eksisting	Uji No 1	Uji No 2	Uji No 3	Uji No 4	Uji No 5
1	2,3284	2,3222	2,251	2,2308	2,2115	2,1669
2	2,2079	2,2036	2,1427	2,1254	2,1087	2,07
3	2,0191	1,9974	1,887	1,8571	1,8289	1,7658

Dari hasil analisis *pushover* waktu getar efektif model uji no 1 (2 x 12,7 mm) juga lebih kecil daripada waktu getar efektif (Tabel 7) bangunan eksisting. Begitupun model uji no 2 (18 x 12,7 mm) mempunyai waktu getar lebih kecil daripada uji no 1 (2 x 12,7 mm) dan eksisting.

Selain perubahan pada waktu getar bangunan, penggunaan *External Prestressed* juga memberikan sumbangan kekakuan pada bangunan. Kekakuan bangunan (Tabel 8) dapat dihitung dengan membagi gaya geser dasar saat bangunan mengalami *yield* pertama (V_{y1}) dengan simpangan atap saat *yield* pertama (D_{y1}).

Tabel 7. Waktu Getar Efektif

	T_e (sec)	
	Rx	Ry
Eksisting	2,483	2,803
Uji No 1 (2 x 12,7 mm)	2,455	2,753
Uji No 2 (8 x 12,7 mm)	2,332	2,567
Uji No 3 (10 x 12,7 mm)	2,298	2,52
Uji No 4 (12 x 12,7 mm)	2,266	2,476
Uji No 5 (18 x 12,7 mm)	2,197	2,386

Tabel 8. Kekakuan Bangunan

	K (kN/m)	
	Rx	Ry
Eksisting	30089,14	25923,44
Uji No 1 (2 x 12,7 mm)	30379,30	26307,97
Uji No 2 (8 x 12,7 mm)	32105,47	28146,25
Uji No 3 (10 x 12,7 mm)	32639,22	28713,98
Uji No 4 (12 x 12,7 mm)	33163,83	29271,56
Uji No 5 (18 x 12,7 mm)	34360,47	30540,23

Nilai faktor reduksi gempa (R) dan pola keruntuhan

Dari data *pushover*, nilai faktor reduksi gempa dapat dicari dengan membagi nilai gaya geser dasar dalam kondisi elastis dengan gaya geser dasar bangunan (V_e) saat pertama kali mengalami *yield* (V_{y1}). Nilai R melalui perhitungan tersebut dituliskan sebagai R_{y1} yang dapat dilihat pada Tabel 9 dan Tabel 10. Dari Tabel tersebut penggunaan prestressed menghasilkan nilai R yang lebih kecil. Semakin besar dan banyak *strand* yang digunakan semakin kecil juga nilai R nya. Nilai R yang mengecil mengartikan bahwa bangunan tersebut menjadi semakin elastis, semakin banyak gaya gempa yang diserap oleh bangunan sebelum berperilaku daktail.

Tabel 9. Nilai Faktor Reduksi Gempa (R_{y1}) Hasil Analisis dan Perhitungan

	R_{y1}	
	Rx	Ry
Eksisting	4,24	4,92
Uji No 1 (2 x 12,7 mm)	4,20	4,85
Uji No 2 (8 x 12,7 mm)	3,97	4,53
Uji No 3 (10 x 12,7 mm)	3,91	4,44
Uji No 4 (12 x 12,7 mm)	3,84	4,35
Uji No 5 (18 x 12,7 mm)	3,71	4,17

Dari hasil analisis pola keruntuhan bangunan eksisting, Bangunan eksisting tidak mengalami leleh pada kolom. Pada Model Uji no 1 (2 x 12,7 mm), kolom tidak mengalami leleh namun tendon *prestressed* mengalami leleh pada *step* ke 12. Pada Model Uji 2 (8 x 12,7 mm), Kolom tidak mengalami leleh dan tendon *prestressed* juga tidak mengalami leleh. Pada Model Uji 3 (10 x 15,24 mm), Kolom mengalami leleh pertama pada *step* ke 23. Pada model uji ini tendon *prestressed* juga tidak mengalami leleh. Pada Model Uji 4 (12 x 17.8 mm), kolom bangunan mengalami pelelehan pertama pada *step* ke 22 dengan kondisi perletakan hampir mengalami keruntuhan dan tendon tidak mengalami leleh.

Pada Model Uji 5 (18 x 12,7 mm), Kolom mengalami leleh pada step ke 20 setelah terjadi keruntuhan pada perletakan sedangkan tendon *prestressed* tidak mengalami leleh.

Tabel 10. *Pushover Step* saat elemen bangunan mengalami *Yield* Pertama (Y_1) dari Hasil Analisis *Pushover*

	Y_1 balok		Y_1 perletakan		Y_1 kolom		Y_1 tendon	
	<i>(Step)</i>		<i>(Step)</i>		<i>(Step)</i>		<i>(Step)</i>	
	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry	Rx	Ry
Eksisting	5	5	10	12	-	-	-	-
Uji No 1 (2 x 12,7 mm)	5	5	10	13	-	-	12	12
Uji No 2 (8 x 12,7 mm)	5	5	10	12	23	-	-	-
Uji No 3 (10 x 12,7 mm)	5	5	9	10	23	22	-	-
Uji No 4 (12 x 12,7 mm)	5	5	9	10	22	24	-	-
Uji No 5 (18 x 12,7 mm)	5	5	8	9	20	21	-	-

Pemilihan *external prestressed*

Dalam Studi Kasus ini, penggunaan *Prestressed* uji No. 2 paling cocok untuk digunakan karena pola keruntuhan dan daktilitas bangunan yang paling baik bila dibandingkan dengan model uji No. 3 hingga 7. Kolom pada uji No. 2 tidak mengalami pelelehan saat dianalisis *pushover* arah Y.

Model uji No. 1 kurang baik untuk digunakan karena didesain untuk memindahkan gaya dengan asumsi daya dukung kolom tepi tidak dapat menahan beban yang bekerja, sehingga tendon seharusnya tidak boleh mengalami leleh. Saat tendon mengalami leleh, gaya yang di-*Jacking* yang diberikan akan hilang mengakibatkan beban yang diterima pondasi akan melebihi daya dukungnya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan *External prestressing* memberikan sumbangan kekakuan pada bangunan. Besar kekakuan bangunan berbanding lurus dengan jumlah dan ukuran *prestressed* yang digunakan.
2. Faktor reduksi gempa yang dihasilkan berbanding terbalik dengan ukuran dan jumlah *strand prestressed* yang digunakan. Penggunaan *External prestressing* menyebabkan bangunan dapat menyerap gaya gempa lebih besar dibandingkan dengan bangunan eksisting.
3. Bangunan eksisting serta semua model uji berada pada level kinerja *Life Safety*.
4. Model Uji 2 (18 x 12,7 mm) dipilih dari ke 5 model uji dengan mutu *strand* 270 Ksi (1860 MPa) dengan luas penampang total 789,6 mm² dan Nilai R adalah 3,97 (arah X) dan 4,53 (arah Y).
5. Nilai R dari struktur eksisting tanpa prategang luar adalah 4,24 (sumbu X) dan 4,92 (sumbu Y).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT. Midasindo Teknik Utama yang telah memberikan fasilitas lisensi *software* Midas Gen sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures* (ASCE/SEI 7-16)
- Applied Technology Council. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors* (FEMA P695)
- Arifin, Z., Suyadi, & Sebayang, S. (2015). Analisis Struktur Gedung POP Hotel Terhadap Beban Gempa dengan Metode *Pushover Analysis*. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, 3(3), 427-440
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung* (SNI 1726)
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung* (SNI 1726)

- California Seismic Safety Commission. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1* (ATC 40)
- Dewobroto, W. (2005). *Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa*. Universitas Pelita Harapan
- Federal Emergency Management Agency & American Society of Civil Engineers. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings* (FEMA 356)
- Lin, T. Y., & Burns, N. H. (1981). *Design of Prestressed Concrete Structures* (3rd Edition). John Wileys & Sons, Inc, Canada
- Nabhilla, F. R., & Hayu, A. G. (2020). Analisis Perilaku Struktur Perkantoran Tahan Gempa. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, 6(2), 141-154
- Sudarman, Manalip, H., Windah, S. R., & Dapas, O. S. (2014). Analisis Pushover pada Struktur Gedung Bertingkat. *Jurnal Sipil Statik*, 2(4), 201-213