

DAMPAK BEBAN GEMPA TERHADAP BIAYA STRUKTUR KOLOM RUMAH TINGGAL BERTINGKAT

Rizki Budiman^{1*}

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia

*E-mail : rizki.budiman@uii.ac.id

Abstract

This study analyzes the impact of earthquake loads, represented by Peak Ground Acceleration (PGA), on the construction cost of reinforced concrete columns in two-story residential buildings in Indonesia. Using a numerical simulation approach, the research evaluates four PGA scenarios (0.0155g to 0.7172g) to assess their influence on column design specifications (dimensions, reinforcement) and associated costs. Results indicate that higher PGA values significantly increase internal forces, particularly bending moments (M_x and M_y), which rise up to 4.1 times at PGA 0.7172g compared to the lowest PGA (0.0155g). Axial forces show a more moderate increase. To resist these forces, column dimensions and reinforcement requirements escalate, with material upgrades (e.g., BJTS-420 steel) necessary for high-risk zones. Cost analysis reveals a near-linear relationship between PGA and construction costs, with a 1.94-fold increase at PGA 0.7172g, driven primarily by material expenses (63% of total costs). The study highlights the economic implications of seismic design, demonstrating that while higher PGA demands elevate initial costs, they are justified by enhanced structural safety and long-term risk reduction. These findings underscore the importance of performance-based design to optimize material use without compromising seismic resilience, providing actionable insights for policymakers and engineers in earthquake-prone regions.

Key Words : Peak Ground Acceleration (PGA), Seismic Design, Construction Cost, Reinforced Concrete Columns, Performance-Based Design

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat risiko gempa bumi yang tinggi di dunia. Indonesia secara geologis terletak di wilayah pertemuan beberapa lempeng tektonik aktif dunia, yang meliputi Lempeng Indo-Australia, Eurasia, Pasifik, dan Filipina. Kondisi tektonik ini menyebabkan Indonesia memiliki tingkat kerawanan tinggi terhadap aktivitas seismik, sebagaimana dinyatakan bahwa lokasi geografis Indonesia yang berada di antara lempeng aktif menjadikannya sangat rentan terhadap bencana gempa bumi (Erlangga *et al.*, 2023). Kondisi ini menjadikan Indonesia rawan terhadap kejadian gempa bumi, baik dalam skala kecil maupun besar, yang dapat terjadi sewaktu-waktu.

Dengan luas wilayah sekitar 1,9 juta km² dan lebih dari 17.000 pulau, risiko gempa bumi di Indonesia sangat bervariasi antar daerah. Melihat peta gempa di SNI 1726:2019 sebagian wilayah seperti pantai barat Sumatera, pesisir selatan Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Maluku, dan Papua memiliki risiko gempa yang tergolong tinggi hingga sangat tinggi. Sementara itu, daerah lain seperti Kalimantan dan sebagian wilayah pantai utara Jawa tergolong memiliki risiko gempa yang lebih rendah. Variasi risiko ini tentunya berdampak terhadap perencanaan dan desain struktur bangunan yang harus disesuaikan dengan tingkat ancaman gempa di masing-masing lokasi (Sutama *et al.*, 2024).

Gempa bumi dapat memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap kerusakan struktur bangunan, terutama pada bangunan rumah tinggal yang umumnya tidak dirancang untuk menahan beban gempa secara memadai. Dalam berbagai kejadian gempa di Indonesia, kerusakan dan kerugian terbesar sering kali terjadi pada rumah tinggal masyarakat. Sebagai contoh, pada gempa Bantul di DIY tahun 2006 dengan magnitudo 5,9 mengakibatkan sebanyak 5.760 korban jiwa dan kerusakan terhadap 388.757 unit rumah, di mana 187.474 unit di antaranya mengalami keruntuhan total. Estimasi total kerusakan dan kerugian akibat bencana tersebut mencapai nilai sebesar 29,1 triliun rupiah, dengan sektor rumah tinggal menyumbang sekitar 52,4% dari total kerusakan dan kerugian yang terjadi (Winarno & Fauziah, 2012). Peristiwa-peristiwa tersebut menunjukkan pentingnya peningkatan ketahanan struktur bangunan terhadap beban gempa, khususnya pada rumah tinggal bertingkat yang semakin banyak dibangun di kawasan urban.

Masyarakat umum sering kali mengenal gempa bumi berdasarkan skala magnitudo. Namun, dalam dunia rekayasa teknik sipil, parameter yang digunakan untuk merancang bangunan tahan gempa bukan dengan magnitudo, melainkan *Peak Ground Acceleration* (PGA), yaitu percepatan maksimum tanah akibat gempa pada suatu lokasi tertentu (UNDRR, 2023). PGA digunakan dalam perhitungan beban gempa untuk menentukan gaya lateral yang harus ditahan oleh struktur bangunan, sehingga lebih relevan dalam konteks desain teknik.

Studi ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi beban gempa, yang direpresentasikan dalam bentuk PGA, terhadap biaya konstruksi elemen struktur kolom pada rumah tinggal bertingkat. Studi ini dilakukan dengan merancang elemen kolom rumah tinggal untuk beberapa nilai PGA, mulai dari nilai kecil (representatif untuk wilayah risiko rendah) hingga nilai besar (untuk wilayah

risiko tinggi). Setiap desain kolom yang dihasilkan akan dianalisis dari sisi teknik (dimensi dan kebutuhan tulangan) serta dihitung biaya konstruksi kolom. Studi ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai seberapa besar kontribusi beban gempa terhadap peningkatan biaya struktur pada bangunan rumah tinggal, serta menjadi bahan pertimbangan dalam perencanaan bangunan di berbagai wilayah risiko gempa di Indonesia.

2. METODOLOGI

Studi ini menggunakan pendekatan numerik berbasis simulasi untuk mengevaluasi dampak variasi beban gempa terhadap biaya konstruksi elemen struktur kolom pada rumah tinggal bertingkat. Variasi beban gempa direpresentasikan oleh nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) berdasarkan data kegempaan di Indonesia. Penelitian ini mengkaji hubungan antara perubahan nilai PGA dengan perubahan spesifikasi teknis kolom (dimensi dan jumlah tulangan) serta implikasinya terhadap biaya konstruksi.

Variasi Beban Gempa

Dalam konteks manajemen risiko bangunan tahan gempa, dikenal beberapa parameter pengukur kekuatan gempa, yaitu skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI), skala magnitudo, dan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA). Skala MMI merupakan indikator kualitatif yang menggambarkan tingkat keparahan dampak gempa terhadap permukaan bumi, manusia, serta bangunan, dengan rentang nilai dari I (tidak terasa) hingga XII (kerusakan total) (UNDRR, 2023). Namun, karena sifatnya yang deskriptif dan bergantung pada persepsi manusia, skala ini sulit diaplikasikan secara kuantitatif dalam analisis struktur bangunan, mengingat tidak adanya pembuktian secara fisik yang dapat diverifikasi. Sementara itu, skala magnitudo

seperti *Moment Magnitude* menggambarkan total energi yang dilepaskan oleh sumber gempa, namun tidak memperhitungkan faktor-faktor lokal seperti jarak terhadap pusat gempa, kondisi geologi setempat, dan pengaruh amplifikasi tanah, sehingga kurang tepat dalam merepresentasikan intensitas getaran di permukaan tanah (Rafferty, 2024). Sebaliknya, nilai PGA merupakan parameter kuantitatif yang menunjukkan percepatan maksimum tanah di lokasi tertentu akibat suatu peristiwa gempa, dan secara langsung berkaitan dengan respons dinamis struktur bangunan. Oleh karena itu, standar desain bangunan tahan gempa seperti SNI 1726:2019 menggunakan PGA sebagai dasar dalam perhitungan gaya gempa rencana dan perancangan sistem

struktur, karena dianggap lebih akurat dan representatif. Nilai PGA umumnya dinyatakan dalam satuan g (percepatan gravitasi bumi, yaitu $9,81 \text{ m/s}^2$). Secara umum, PGA dengan nilai kurang dari 0,1g tidak menyebabkan kerusakan yang signifikan, nilai antara 0,3g hingga 0,8g berpotensi menimbulkan kerusakan sedang, sedangkan nilai lebih dari 0,8g dikategorikan sebagai gempa yang sangat merusak (UNDRR, 2023). Pada studi ini PGA dengan nilai 0,3g hingga 0,8g akan dipecah menjadi 2 subbagian yaitu 0,3g s.d. 0,5g dan 0,5g hingga 0,8g dan PGA diatas 0,8g tidak dianalisis. Tabel 1 menunjukkan variasi nilai PGA dan contoh daerah yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Variasi Beban Gempa (Nilai PGA) dan Contoh Daerah

Kode	Parameter	Potensi Kerusakan Struktur	Contoh Daerah	Nilai PGA
P1	$PGA \leq 0,10$	Tidak Ada	Merauke	0,0155
P2	$0,10 < PGA < 0,30$	Kecil	Palembang	0,148
P3	$0,30 < PGA \leq 0,50$	Sedang	Jakarta	0,3727
P4	$0,50 < PGA \leq 0,80$	Sedang ke Besar	Padang	0,7172

*Desain kolom mengikuti SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019, sehingga sistem struktur bangunan menyesuaikan.

Objek Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah struktur rumah tinggal dua lantai yang umum dijumpai di lingkungan perkotaan Indonesia. Bangunan dirancang menggunakan sistem struktur beton bertulang konvensional. Spesifikasi umum bangunan ditampilkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Objek Penelitian

No	Parameter	Keterangan
1	Fungsi Bangunan	Rumah Tinggal
2	Jumlah Lantai	2 Lantai
3	Luas Bangunan	109,75 m ²
4	Luas Lantai	218,01 m ²
5	Elemen Struktur	Beton Bertulang
6	Kelas Situs	D

Mutu beton yang digunakan adalah $f_c = 20,75 \text{ MPa}$ (K-250) sebagaimana tercantum dalam SNI 8140:2016. Mutu tulangan dirancang berdasarkan kebutuhan desain dengan menggunakan baja tulangan polos (BJTP 280) dan baja tulangan ulir (BJTS 420) sesuai RSNI 2052:2024.

Pembebanan

Perhitungan pembebanan struktur mengacu pada SNI 1727:2020 untuk beban mati dan hidup, serta SNI 1726:2019 untuk beban gempa. Kombinasi pembebanan yang digunakan mencakup kondisi-kondisi ekstrem sebagai berikut:

$$\text{Comb1} = 1,4D \quad (1)$$

$$\text{Comb2} = 1,2D + 1,6L \quad (2)$$

$$\text{Comb3} = zD \pm \rho E_x \pm 0,3\rho E_y + L \quad (3)$$

$$\text{Comb4} = zD \pm 0,3\rho E_x \pm \rho E_y + L \quad (4)$$

$$\text{Comb5} = bD \pm \rho E_x \pm 0,3\rho E_y \quad (5)$$

$$\text{Comb6} = bD \pm 0,3\rho E_x \pm \rho E_y \quad (6)$$

Keterangan:

D = beban mati

L = beban hidup

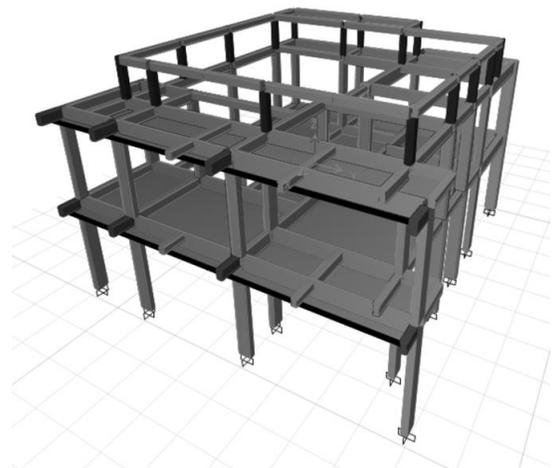
E_x, E_y = gaya gempa arah x dan y

ρ = faktor redundansi

z, b = faktor pengali terhadap beban gempa statik ekuivalen dan gaya dasar minimum sesuai SNI 1726:2019

Pemodelan

Setiap nilai PGA (*Peak Ground Acceleration*) yang berasal dari lokasi berbeda akan menghasilkan respons struktur yang berbeda pula. Oleh karena itu, pemodelan struktur harus disesuaikan dengan parameter seismik lokal yang spesifik. Oleh karena itu, setiap lokasi dengan nilai PGA tertentu memerlukan pemodelan struktur yang spesifik, yang biasanya dilakukan menggunakan perangkat lunak analisis struktur. Proses pemodelan ini mencakup pendefinisian sistem struktur, beban, kombinasi beban, serta kondisi batas yang sesuai dengan kondisi lapangan dan ketentuan desain gempa yang secara visual dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Model Struktur Rumah Tinggal 2 Lantai

Model struktur yang telah dibangun harus melalui tahap validasi untuk memastikan keakuratannya. Validasi dilakukan antara lain melalui:

1. Verifikasi periode getar fundamental bangunan, yang digunakan dalam perhitungan gaya geser dasar gempa, dan harus mencerminkan respons dinamis aktual bangunan (Mustika *et al.*, 2022).
2. Partisipasi Massa (*Mass Participation Ratio*): Model harus menunjukkan bahwa total partisipasi massa dalam arah-x dan arah-y (utama) mencapai setidaknya 90% (The Structural World, 2019).
3. Pemeriksaan konsistensi gaya lateral dengan menerapkan skala gaya berdasarkan persamaan 7:

$$\text{Skala Gaya} = \frac{9,81 \times I}{R} \quad (7)$$

di mana I adalah faktor pentingnya bangunan dan R adalah faktor reduksi respons struktur. Dalam hal ini, gaya geser dasar hasil analisis respons spektrum (dinamis) harus lebih besar atau setidaknya setara dengan gaya geser dasar dari metode statik ekuivalen, sebagaimana disyaratkan dalam standar seperti SNI 1726:2019 (Dona *et al.*, 2022).

Desain Struktur Kolom

Tujuan desain struktur kolom adalah untuk memastikan bahwa kolom memiliki kapasitas yang cukup dalam menahan beban aksial dan momen lentur tanpa mengalami kegagalan struktural. Hasil desain struktur kolom berupa mutu material, dimensi kolom, tulangan pokok, dan tulangan sengkang.

Dalam proses desain struktur kolom, perlu dilakukan evaluasi terhadap kombinasi pembebanan yang menghasilkan gaya internal maksimum pada elemen kolom. Berdasarkan hasil pemodelan struktur, enam kondisi pembebanan kritis dipilih untuk dianalisis lebih

lanjut. Kondisi-kondisi ini mencerminkan nilai maksimum dan minimum dari beban aksial (P), serta momen lentur dalam dua arah utama (M_x dan M_y), yang diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Aksial maksimum (P_{maks}).
2. Aksial minimum (P_{min}).
3. Momen-x maksimum (M_{xmaks}).
4. Momen-x minimum (M_{xmin}).
5. Momen-y maksimum (M_{ymaks}).
6. Momen-y minimum (M_{ymin}).

Untuk menilai kapasitas kolom terhadap kombinasi beban tersebut, digunakan metode perbandingan *capacity ratio* (CR), yaitu rasio antara beban yang bekerja terhadap kapasitas nominal elemen struktur. Suatu kolom dinyatakan aman secara struktural apabila $CR \leq 1,0$ (Ertanto *et al.*, 2015). Namun, agar desain bersifat ekonomis dan efisien, serta mengingat bahwa beban yang dianalisis sudah terfaktor (dikalikan dengan faktor keamanan), maka desain penampang kolom (baik dimensi maupun penulangan) diupayakan sedemikian rupa agar menghasilkan nilai CR mendekati 1. Hal ini memastikan penggunaan material yang optimal tanpa mengurangi aspek keselamatan struktur.

Analisis Biaya

Analisis biaya dilakukan berdasarkan hasil desain struktur kolom yang telah diperoleh dari tahap analisis sebelumnya, khususnya mencakup dimensi penampang dan kebutuhan luas penulangan. Untuk menjaga konsistensi dan memastikan bahwa nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) merupakan satu-satunya variabel bebas utama dalam kajian ini, maka beberapa variabel lainnya diseragamkan. Sebagai contoh, tinggi kolom ditetapkan konstan sebesar 3,5 meter dan harga satuan pekerjaan disamakan berdasarkan standar wilayah Yogyakarta.

Prosedur analisis biaya merujuk pada Surat Edaran Direktorat Jenderal Bina Konstruksi (SE-DJBK) No. 68 Tahun 2024. Tahapan analisis dilakukan sebagai berikut:

1. *Work Breakdown Structure* (WBS) untuk pekerjaan kolom. Pekerjaan struktur kolom diuraikan ke dalam empat komponen utama:
 - a. Pemasangan tulangan tulangan pokok,
 - b. Pemasangan tulangan sengkang,
 - c. Pemasangan dan pembongkaran bekisting kolom,
 - d. pengecoran beton struktural dengan mutu K-250.
2. Perhitungan volume pekerjaan. Volume dari masing-masing komponen pekerjaan dihitung berdasarkan hasil analisis struktur dan disesuaikan dengan satuan teknis yang berlaku, yaitu:
 - a. Tulangan dihitung dalam satuan kilogram (kg),
 - b. Bekisting dihitung dalam satuan meter persegi (m^2),
 - c. Beton dihitung dalam satuan meter kubik (m^3).
3. Penyeragaman harga satuan. Harga satuan untuk tiap komponen pekerjaan yang mencakup biaya tenaga kerja (upah), bahan/material, dan peralatan diseragamkan dengan mengacu pada standar harga wilayah Yogyakarta.
4. Metode perhitungan harga satuan. Analisis Harga Satuan (AHS) mengikuti ketentuan teknis dalam SE-DJBK No. 68 Tahun 2024, yang mencakup perhitungan komponen biaya langsung serta faktor efisiensi kerja.
5. Estimasi total biaya kolom. Total biaya pekerjaan struktur kolom untuk masing-masing nilai PGA dihitung secara akumulatif berdasarkan volume pekerjaan dan harga satuan yang telah ditetapkan.

Semua estimasi dilakukan untuk kolom dengan tinggi tetap 3,5 meter.

$$\text{Total biaya} = \text{Volume} \times \text{AHS} \quad (8)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Makna Bangunan Tahan Gempa

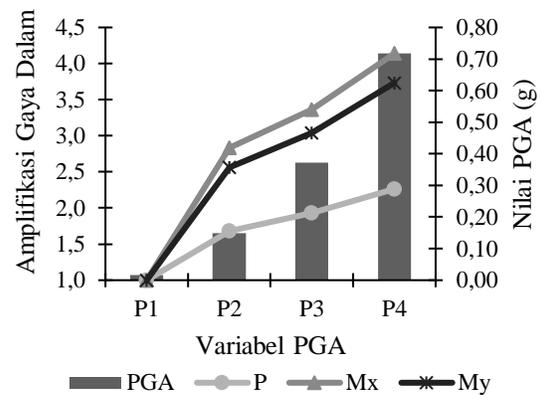
Menurut (Pawirodikromo, 2012), filosofi desain struktur bangunan terhadap beban gempa diklasifikasikan berdasarkan tingkat intensitas gempa yang dipertimbangkan dalam perencanaan. Studi ini berusaha untuk menerapkan prinsip-prinsip ini dalam analisis struktur kolom. Prinsip-prinsip perencanaan tersebut dapat dirinci sebagai berikut:

1. Untuk gempa dengan intensitas rendah dan frekuensi kejadian tinggi, struktur dirancang agar tetap berada dalam kondisi elastis tanpa mengalami kerusakan pada elemen struktural. Kerusakan minor pada elemen non-struktural masih dapat diterima sesuai batas toleransi desain.
2. Untuk gempa dengan intensitas sedang dan frekuensi kejadian menengah, struktur diperbolehkan mengalami kerusakan terbatas pada elemen struktural, namun masih dalam batas yang memungkinkan untuk dilakukan perbaikan secara teknis dan ekonomis.
3. Untuk gempa dengan intensitas tinggi dan frekuensi kejadian rendah, struktur diperkenankan mengalami kerusakan signifikan, namun harus tetap mempertahankan stabilitas global dan tidak mengalami keruntuhan menyeluruh (*total collapse*), guna memenuhi kriteria keselamatan minimum terhadap beban ekstrem.

Gaya Dalam Struktur Kolom

Gaya dalam yang bekerja umumnya terdiri dari gaya aksial, momen lentur, dan gaya geser.

Gaya aksial merupakan gaya tekan atau tarik yang bekerja sejajar dengan sumbu longitudinal kolom, umumnya berasal dari beban vertikal seperti beban mati, beban hidup, dan kombinasi keduanya. Selain itu, kolom juga menerima momen lentur akibat eksentrisitas beban atau pengaruh beban lateral, yang menyebabkan kolom mengalami pembengkokan. Di samping itu, gaya geser juga dapat timbul, terutama akibat beban horizontal seperti gempa, yang bekerja tegak lurus terhadap sumbu kolom. Ketiga jenis gaya ini saling berinteraksi dan memengaruhi kinerja kolom secara keseluruhan.



Gambar 2. Pengaruh PGA Terhadap Gaya Dalam Kolom

Hasil analisa gaya dalam yang ditunjukkan pada Tabel 3, Nilai PGA yang semakin besar akan memberikan dampak pembesaran gaya dalam pada struktur kolom rumah 2 lantai. Meskipun gaya gempa termasuk beban horizontal tetapi juga berdampak pada gaya aksial kolom dimana *slightly* membesar seiring dengan kenaikan nilai PGA.

Untuk memperjelas pengaruh nilai PGA terhadap gaya dalam struktur kolom dapat dilihat pada Gambar 2. Nilai PGA semakin besar, terjadi peningkatan signifikan terhadap momen lentur M_x dan M_y , di mana pada P4 (PGA = 0,72g), nilai M_x dan M_y masing-masing mencapai 4,1 dan 3,7 kali lipat dari kondisi awal (P1). Sementara itu, peningkatan gaya aksial P relatif lebih moderat, hanya naik dari 1,0 menjadi 2,3. Pola ini menunjukkan bahwa gaya dalam akibat momen lebih sensitif

terhadap perubahan nilai PGA dibandingkan gaya aksial.

Tabel 3. Gaya Dalam Maksimum Kolom

Kondisi		P1: $PGA \leq 0,10$		
No	Combo Beban	P (kN)	M_x (kN)	M_y (kN)
1A	P_{maks}	190,76	1,36	6,43
2A	P_{min}	-3,10	-0,50	-1,98
3A	M_{xmaks}	77,95	6,77	18,61
4A	M_{xmin}	29,05	-7,59	5,78
5A	M_{ymaks}	78,08	6,55	18,87
6A	M_{ymin}	180,12	-2,68	-13,58
Kondisi		P2: $0,10 < PGA < 0,30$		
No	Combo Beban	P (kN)	M_x (kN)	M_y (kN)
1B	P_{maks}	199,93	7,11	25,31
2B	P_{min}	-16,84	-2,69	-10,86
3B	M_{xmaks}	81,04	12,79	22,20
4B	M_{xmin}	22,94	-11,24	3,57
5B	M_{ymaks}	89,19	2,44	30,23
6B	M_{ymin}	113,17	-6,95	-34,30
Kondisi		P3: $0,30 < PGA \leq 0,50$		
No	Combo Beban	P (kN)	M_x (kN)	M_y (kN)
1C	P_{maks}	202,56	8,35	29,50
2C	P_{min}	-21,40	-3,42	-13,78
3C	M_{xmaks}	81,88	14,36	23,20
4C	M_{xmin}	21,36	-12,19	2,92
5C	M_{ymaks}	93,97	3,41	36,61
6C	M_{ymin}	111,06	-7,79	-40,86
Kondisi		P4: $0,50 < PGA \leq 0,80$		
No	Combo Beban	P (kN)	M_x (kN)	M_y (kN)
1D	P_{maks}	210,15	10,29	35,98
2D	P_{min}	-27,26	-4,36	-17,56
3D	M_{xmaks}	84,58	16,88	24,99
4D	M_{xmin}	19,51	-13,79	2,13
5D	M_{ymaks}	102,76	4,87	46,49
6D	M_{ymin}	110,11	-9,17	-51,05

Hal ini mengindikasikan bahwa beban gempa (yang direpresentasikan oleh PGA) memberikan kontribusi dominan terhadap gaya-gaya lateral dan momen lentur pada struktur kolom. Oleh karena itu, aspek desain

lentur perlu mendapat perhatian khusus dalam perencanaan struktur tahan gempa, seiring meningkatnya risiko percepatan tanah maksimum di lokasi tertentu.

Hasil Desain Struktur Kolom

Berdasarkan hasil analisis struktur, Tabel 4 *Capacity Ratio* (CR) menunjukkan kinerja kekuatan kolom terhadap enam kondisi beban kritis untuk empat kondisi percepatan tanah maksimum (PGA) yang berbeda, yaitu P1 hingga P4. Seluruh nilai CR berada di bawah atau sama dengan 1, yang menandakan bahwa kolom dalam keempat kondisi desain mampu menahan gaya ultimit yang bekerja. Khusus pada kondisi P1 dan P2, seluruh nilai CR jauh di bawah 1, yang berarti masih terdapat cadangan kekuatan struktur atau mutu material yang tersedia saat ini jauh lebih baik dalam menahan beban gempa rendah. Nilai CR yang mendekati 1 menunjukkan hasil desain yang lebih ekonomis terhadap beban rencana.

Tabel 4. *Capacity Ratio* (CR) Struktur Kolom

Kondisi Beban	<i>Capacity Ratio</i> (CR)			
	P1	P2	P3	P4
P_{maks}	0,36	0,76	0,82	0,81
P_{min}	0,34	0,71	0,61	0,56
M_{xmaks}	0,95	0,95	0,91	0,86
M_{xmin}	0,80	0,80	0,68	0,57
M_{ymaks}	0,94	0,95	0,89	0,85
M_{ymin}	0,58	1,00	1,00	0,96

Selanjutnya, Tabel 5 disajikan rincian dimensi dan penulangan hasil perhitungan berdasarkan kebutuhan kekuatan pada masing-masing kondisi PGA. Dimensi kolom bervariasi antara 150×300 mm hingga 200×350 mm, disesuaikan dengan peningkatan gaya dalam akibat tingginya nilai PGA. Rasio tulangan bervariasi dari 1,19% hingga 1,87%. Rasio tersebut masih berada dalam batas minimum dan maksimum yang disyaratkan SNI 2857:2019. Peningkatan dimensi kolom

serta penggunaan baja bertegangan lebih tinggi pada P3 dan P4 merupakan bentuk adaptasi desain terhadap pembesaran gaya dalam akibat peningkatan nilai PGA, sebagaimana disyaratkan dalam pendekatan desain berbasis performa (*performance-based design*). Sementara itu, tulangan sengkang pada tumpuan dan lapangan disesuaikan untuk

memenuhi kekakuan dan ketahanan terhadap gaya geser serta torsi, dengan jarak dan diameter yang dirancang lebih rapat pada bagian tumpuan. Mutu baja tulangan pokok menggunakan BJTP-280 dan BJTS-420, sedangkan tulangan sengkang menggunakan BJTP-280 secara konsisten, dengan mutu beton yang diseragamkan yaitu K-250.

Tabel 5. Geometri Desain Struktur Kolom

Kode	Dimensi	Tulangan Pokok	Tulangan Sengkang		Rasio Tulangan	Mutu Baja		Mutu beton
			Tumpuan	Lapangan		Pokok	Sengkang	
P1	150x300	8Ø12	Ø8-150	Ø8-150	1,87%	BJTP-280	BJTP-280	K-250
P2	200x300	8D12	Ø8-100	Ø8-150	1,40%	BJTS-280	BJTP-280	K-250
P3	200x325	6D13	Ø10-100	Ø10-150	1,19%	BJTS-420	BJTP-280	K-250
P4	200x350	8D13	D10-100	D10-150	1,47%	BJTS-420	BJTS-280	K-250

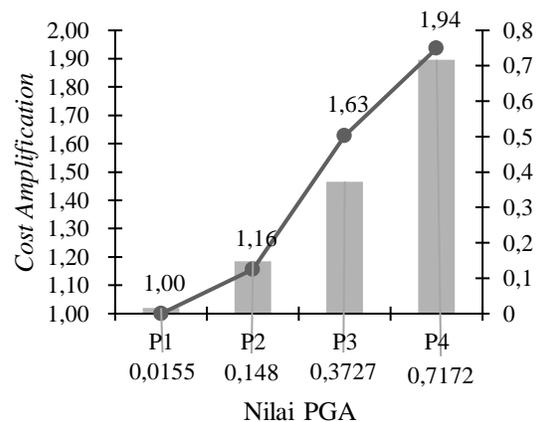
Analisis Biaya

Analisis biaya pada setiap variabel PGA didasarkan pada hasil desain struktur yang ditunjukkan pada Tabel 5 dengan memasukkan data baru berupa tinggi kolom sebesar 3,5 m. Biaya dihitung berdasarkan volume kebutuhan setiap item dan harga satuan (Analisis Harga Satuan/AHS) sesuai dengan standar SE-DJBK No. 68 Tahun 2024.

Tabel 6 menunjukkan pada kondisi PGA rendah (P1), total biaya pekerjaan mencapai Rp1.360.374,37 dengan komponen terbesar berasal dari pekerjaan bekisting. Seiring peningkatan PGA, terdapat kenaikan biaya secara bertahap pada setiap komponen pekerjaan, yang mencerminkan peningkatan volume kebutuhan material sebagai respons terhadap tuntutan kekuatan struktur yang lebih tinggi. Hal ini tampak pada P4, di mana total biaya pekerjaan mencapai Rp2.634.216,92 meningkat hampir dua kali lipat dibanding kondisi P1.

Peningkatan biaya paling signifikan terlihat pada item pekerjaan tulangan pokok. Pada P1, volume tulangan pokok sebesar 28,48 kg menghasilkan biaya Rp466.260,89 sedangkan pada P4 volume meningkat menjadi 33,28 kg

dengan total biaya Rp1.306.199,07. Hal ini juga disertai perubahan mutu baja dari BJTP-280 ke BJTS-420 pada PGA yang lebih tinggi, yang turut memengaruhi harga satuan. Pekerjaan tulangan sengkang dan beton menunjukkan tren serupa meskipun kontribusinya terhadap total biaya relatif lebih kecil.



Gambar 3. Hubungan PGA dan Biaya Pekerjaan

Berdasarkan hasil kajian Muzayanah, (2008), proporsi rata-rata biaya dalam pengelolaan sumber daya pada proyek konstruksi bangunan sederhana terdiri dari 63% untuk material, 25% untuk upah tenaga kerja, dan 12% untuk peralatan. Persentase

biaya material yang mendominasi menunjukkan bahwa komponen ini memiliki kontribusi signifikan terhadap total biaya konstruksi. Dalam konteks pembangunan rumah tinggal pada wilayah dengan tingkat risiko gempa tinggi, dominasi biaya material menjadi semakin relevan. Hal ini disebabkan oleh kebutuhan akan dimensi elemen struktur yang lebih besar serta mutu material yang lebih tinggi untuk memenuhi ketentuan keamanan seismik, yang pada akhirnya berdampak langsung terhadap peningkatan total biaya konstruksi.

Gambar 3 menyajikan hubungan antara peningkatan nilai percepatan tanah maksimum (PGA) terhadap biaya pekerjaan struktur kolom, yang direpresentasikan melalui parameter *Cost Amplification*. Nilai ini diperoleh dari perbandingan antara total biaya pekerjaan pada masing-masing kondisi PGA terhadap biaya dasar pada PGA terendah (P1).

Dari hasil tersebut, terlihat bahwa terdapat tren linier meningkat antara nilai PGA dan biaya pekerjaan. Saat nilai PGA meningkat dari 0,0155 (P1) menjadi 0,7172 (P4), *Cost*

Amplification meningkat dari 1,00 menjadi 1,94. Artinya, untuk kondisi percepatan tanah maksimum tertinggi, biaya pekerjaan hampir dua kali lipat dari biaya pada kondisi PGA terendah.

Kenaikan ini menunjukkan sensitivitas biaya struktur terhadap beban gempa, di mana kebutuhan material dan dimensi struktur meningkat seiring naiknya gaya seismik yang harus ditahan oleh elemen kolom. Oleh karena itu, nilai *Cost Amplification* dapat digunakan sebagai indikator awal dalam estimasi biaya struktur tahan gempa berdasarkan klasifikasi zona seismik suatu wilayah.

Peningkatan biaya konstruksi kolom akibat kenaikan PGA tidak hanya menjadi beban awal, tetapi juga investasi jangka panjang. Winarno dan Fauziah (2012) menunjukkan bahwa rasio manfaat-biaya penerapan kolom tahan gempa meningkat secara logaritmik ($Y=10,77 \times 1,026^x$), dengan manfaat 3,61 kali lebih besar setelah 50 tahun. Temuan ini sejalan dengan hasil studi ini di mana biaya kolom naik 1,94 kali pada PGA 0,7172g, namun diimbangi pengurangan risiko keruntuhan.

Tabel 6. Perbandingan Anggaran Biaya Kolom Berbagai Variabel PGA

No	Item Pekerjaan	Satuan	Volume	AHS (Rp)	Harga Pekerjaan (Rp)
A	P1: $PGA \leq 0,10$				1.360.374,37
1	Pek. Tulangan Pokok BJTP-280	kg	28,48	16.371,52	466.260,89
2	Pek. Tulangan Sengkang BJTP-280	kg	7,66	16.371,52	125.403,22
3	Pek. Bekisting	m ²	3,15	188.891,45	595.008,07
4	Pek. Beton K-250	m ³	0,16	1.102.871,05	173.702,19
B	P2: $0,10 < PGA < 0,30$				1.573.483,64
1	Pek. Tulangan Pokok BJTS-280	kg	28,48	17.717,92	504.606,36
2	Pek. Tulangan Sengkang BJTP-280	kg	10,76	16.371,52	176.154,28
3	Pek. Bekisting	m ²	3,50	188.891,45	661.120,08
4	Pek. Beton K-250	m ³	0,21	1.102.871,05	231.602,92
C	P3: $0,30 < PGA \leq 0,50$				2.215.037,83
1	Pek. Tulangan Pokok BJTS-420	kg	24,96	39.248,77	979.649,30
2	Pek. Tulangan Sengkang BJTP-280	kg	17,73	16.371,52	290.309,29
3	Pek. Bekisting	m ²	3,68	188.891,45	694.176,08
4	Pek. Beton K-250	m ³	0,23	1.102.871,05	250.903,16

No	Item Pekerjaan	Satuan	Volume	AHS (Rp)	Harga Pekerjaan (Rp)
D	P4: $0,50 < \text{PGA} \leq 0,80$				2.634.216,92
1	Pek. Tulangan Pokok BJTS-420	kg	33,28	39.248,77	1.306.199,07
2	Pek. Tulangan Sengkang BJTS-280	kg	18,66	17.717,92	330.582,37
3	Pek. Bekisting	m ²	3,85	188.891,45	727.232,08
4	Pek. Beton K-250	m ³	0,25	1.102.871,05	270.203,41

4. KESIMPULAN

Beberapa simpulan yang dapat diambil dari studi yang dilakukan ini sebagai berikut:

1. Nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) yang lebih tinggi menyebabkan peningkatan signifikan pada gaya dalam kolom, terutama momen lentur (M_x dan M_y). Pada PGA 0,7172g (P4), momen lentur meningkat hingga 4,1 kali lipat dibandingkan dengan PGA terendah (0,0155g).
2. Gaya aksial juga mengalami peningkatan, namun dengan tingkat kenaikan yang lebih moderat dibandingkan momen lentur.
3. Untuk menahan beban gempa yang lebih besar, dimensi kolom dan kebutuhan tulangan meningkat, serta Penggunaan material berkualitas lebih tinggi, seperti baja BJTS-420, diperlukan pada wilayah dengan risiko gempa tinggi untuk memastikan kekuatan dan keamanan struktur.
4. Biaya konstruksi kolom meningkat hampir dua kali lipat (1,94 kali) saat nilai PGA naik dari 0,0155g (P1) menjadi 0,7172g (P4).
5. Perencanaan struktur di wilayah dengan risiko gempa tinggi memerlukan pertimbangan biaya tambahan untuk memenuhi standar keamanan seismik.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada Universitas Islam Indonesia atas segala bentuk

bantuan dan dukungan yang telah diberikan sehingga studi ini dapat terlaksana dengan baik dan lancar.

REFERENSI

- Dona, M. T., Indra, S., & Priskasari, E. (2022). Beban Gempa dan Base Shear Menurut SNI 1726-2012 dan SNI 1726-2019 Pada Gedung Ilmu Keolahragaan (FIK) Universitas Negeri Malang. *Metaverse: Peluang Dan Tantangan Pendidikan Tinggi Di Era Industri 5.0*.
- Erlangga, W., Teguh, M., Makrup, L., Jafar, & Dagi Saputri, M. (2023). Analisis Aselerasi Riwayat Waktu pada Wilayah Spesifik di Yogyakarta dengan Sumber Gempa Subduksi Berdasarkan Peta Gempa 2002. *Teknisia*, 28(2), 90–101. <https://doi.org/10.20885/teknisia.vol28.iss2.art3>
- Ertanto, R., Giri, D., & Putra, D. (2015). Analisa Perbandingan Perilaku Struktur Pada Gedung dengan Variasi Bentuk Penampang Kolom Beton Bertulang. *Jurnal Ilmiah Elektronik Infrastruktur Sipil*.
- Mustika, R., Putra, R. R., & Fitria, R. (2022). Analisis Periode Getar Alami Bangunan Menggunakan Mikrotremor. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(2), 328–342. <https://doi.org/10.28932/jts.v18i2.5027>
- Muzayanah, Y. (2008). *Pemodelan Proporsi Sumber Daya Proyek Konstruksi*. Universitas Diponegoro.
- Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan* (Cetakan I). Pustaka Pelajar.
- Rafferty, J. P. (2024). *Moment Magnitude*. Britannica. <https://www.britannica.com/science/moment-magnitude>
- Sutama, A., Sepriansyah, V., & Angraini, D. D. (2024). Studi Komparatif Perilaku Struktur Gedung Beton Bertulang Dengan Variasi Geometri Kolom Persegi dan Kolom Bulat. *Bearing: Jurnal Penelitian dan Kajian Teknik Sipil*, 09(02), 64–69.

- The Structural World*. (2019). *3 Major Post Analysis Checks*.
<https://www.thestructuralworld.com/2019/01/16/3-major-post-analysis-checks-in-etabs/>
- UNDRR. (2023). *Ground Shaking (Earthquake)*.
UNDRR Website.
<https://www.undrr.org/understanding-disaster-risk/terminology/hips/gh0002>
- Winarno, S., & Fauziah, M. (2012). Rasio Manfaat-Biaya Pada Penerapan Elemen-Elemen Struktur Tahan Gempa Untuk Rumah Tinggal. *Jurnal Inovasi Dan Kewirausahaan*, *1*(3), 159–166.
<https://doi.org/10.20885/ajie.vol1.iss3.art3>