

PENERAPAN *MODIFIED PARTIAL CAPACITY DESIGN* (M-PCD) DENGAN ANALISIS STRUKTUR NONLINEAR PADA BANGUNAN SEDERHANA

Ruben Adicahya¹, Pamuda Pudjisuryadi², Dicksen Wiranata³ dan Nicolas Santoso⁴

^{1,2} Dosen Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

^{3,4} Mahasiswa Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

¹ ruben.adicahya@petra.ac.id, ² pamuda@petra.ac.id, ³ b11200142@john.petra.ac.id,

⁴ b11200076@john.petra.ac.id

ABSTRAK: *Modified partial capacity design* (M-PCD) adalah metode alternatif yang dapat digunakan untuk mendesain struktur bangunan, dimana mekanisme keruntuhan diperbolehkan hingga kondisi *partial side sway mechanism*. Dalam penelitian ini, diajukan modifikasi dalam perencanaan kolom elastis, dimana metode modifikasi inersia yang bertujuan untuk memodelkan kerusakan digantikan oleh metode analisis *nonlinear lumped plasticity approach*. Objek penelitian berfokus pada struktur bangunan sederhana yang didesain menggunakan metode modifikasi inersia dan metode *lumped plasticity approach*. Struktur akan diuji dengan *nonlinear dynamic procedure* (NDP) dengan level gempa *design basis earthquake* (DBE) dan *risk-targeted maximum considered earthquake* (MCE_R). Hasil uji menunjukkan mekanisme keruntuhan pada kedua metode telah memenuhi persyaratan level gempa DBE, namun tidak pada level gempa MCE_R . Untuk performa *drift*, kedua metode menunjukkan hasil yang memuaskan. Namun, dapat disimpulkan bahwa metode *lumped plasticity approach* memberikan hasil yang lebih memuaskan dibandingkan dengan metode modifikasi inersia apabila ditinjau dari level kerusakan sendi plastis.

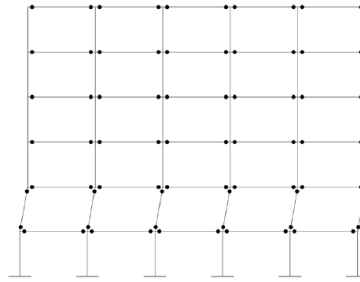
Kata kunci: *lumped plasticity approach*, *modified partial capacity design*, modifikasi inersia, *partial side sway mechanism*

ABSTRACT: *Modified partial capacity design* (M-PCD) is an alternative method to design building structures, where the collapse mechanism is allowed up to partial side sway mechanism. In this study, a modification is proposed in the elastic columns design, where the modified inertia method is replaced by nonlinear lumped plasticity approach to model the damage. The research object focuses on a simple building designed using modified inertia method and lumped plasticity approach. The structure will be tested using nonlinear dynamic procedure (NDP) with the design basis earthquake (DBE) and risk-targeted maximum considered earthquake (MCE_R) levels. The test shows that the collapse mechanism in both methods has met the requirements of the DBE level, but not MCE_R level. For drift performance, both methods show satisfactory results. However, it can be concluded that the lumped plasticity approach provides more satisfactory results than the modified inertia method when viewed from the plastic hinge damage level.

Keywords: *lumped plasticity approach*, *modified partial capacity design*, inertia modification, *partial side sway mechanism*

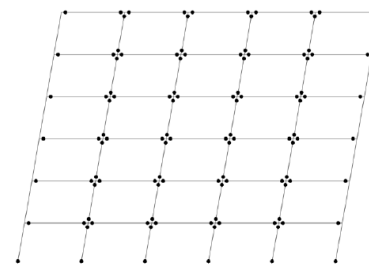
1. PENDAHULUAN

Perencanaan bangunan tahan gempa merupakan hal yang sangat penting untuk dilakukan karena hal tersebut menyangkut keselamatan jiwa para penghuni bangunan tersebut. Sebuah bangunan harus didesain untuk dapat menahan gaya gempa yang terjadi untuk mencegahnya mengalami keruntuhan total. Metode yang paling umum digunakan dalam mendesain bangunan tahan gempa adalah metode *capacity design* (CD) yang menerapkan prinsip *strong column weak beam* (SCWB), dimana prinsip ini bertujuan untuk mencegah keruntuhan *soft story* yang berbahaya seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. *Soft Story Mechanism*

Partial capacity design (PCD) adalah alternatif dari *capacity design* (CD) dimana dalam metode PCD, beberapa kolom yang dipilih diperbolehkan mengalami sendi plastis, sedangkan kolom lainnya akan didesain menggunakan sebuah faktor magnifikasi dengan harapan dapat menerima redistribusi gaya yang timbul akibat terbentuknya sendi plastis tersebut (Muljati & Lumantarna, 2007; 2008). Berdasarkan prinsip tersebut, mekanisme keruntuhan yang diperbolehkan dalam metode ini adalah hingga kondisi *partial side sway mechanism* seperti pada Gambar 2, yaitu mekanisme yang memperbolehkan terjadinya sendi plastis pada beberapa kolom tertentu sedemikian sehingga struktur tidak mengalami keruntuhan total. Namun, hasil penelitian tersebut menunjukkan terbentuknya sendi plastis pada kolom yang direncanakan elastis.



Gambar 2. *Partial Side Sway Mechanism*

Pudjisuryadi (2011) melakukan pendekatan ulang dalam perancangan struktur dengan melibatkan ketidakberaturan vertikal pada bangunan dengan mempertimbangkan bahwa penempatan kolom elastis tidak selalu harus terbatas pada bagian eksterior struktur. Dalam penelitian ini, ada perbedaan signifikan dalam hal penggunaan tulangan lentur balok yang diupayakan seminimal mungkin. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa mekanisme keruntuhan *partial side sway* masih belum tercapai.

Muljati dan Lumantarna (2013) meneruskan uji coba metode *partial capacity design* (PCD) pada bangunan berbentuk persegi dan persegi panjang dengan ketinggian 6 dan 10 lantai. Dalam pengujian ini, diterapkan prinsip *minimum design* pada struktur bangunan sehingga semua kolom didesain dengan dimensi yang seragam dan seluruh kolom eksterior dianggap sebagai kolom elastis. Namun, terbukti bahwa pendekatan desain semacam ini tidak efektif karena struktur mengalami mekanisme keruntuhan yang tidak memuaskan. Metode PCD yang ada terus diteliti dan dikembangkan hingga sampai pada metode *modified partial capacity design* (M-PCD).

2. LANDASAN TEORI

2.1 Modified Partial Capacity Design (M-PCD)

Tanaya (2021) melakukan penelitian yang mengusulkan sebuah metode alternatif dari *partial capacity design* (PCD), yaitu *modified partial capacity design* (M-PCD), dengan tujuan untuk memberikan metode yang lebih efektif dalam mencapai mekanisme keruntuhan *partial side sway mechanism*. Metode *modified partial capacity design* ini menggunakan pendekatan yang berbeda dengan *partial capacity design* sebelumnya, yaitu dengan menggunakan dua model struktur.

Model 1 digunakan untuk mendesain balok dan kolom plastis sesuai dengan prosedur *capacity design* (CD) tanpa menggunakan prinsip *strong column weak beam* (SCWB). Model 1 ini akan didesain terhadap gempa level DBE (*design basis earthquake*) dengan faktor modifikasi respons $R = 8$. Sedangkan model 2 digunakan untuk mendesain kolom elastis dengan cara memodelkan kerusakan pada balok dan kolom plastis sehingga terjadi redistribusi gaya akibat kerusakan tersebut. Pemodelan kerusakan dilakukan dengan membagi bentang kolom plastis dan balok menjadi 3 segmen, dimana kedua segmen ujung yang merangka pada *joint* akan direduksi inersianya untuk memodelkan sendi plastis. Nilai yang digunakan untuk modifikasi inersia menggunakan *slope* kurva bilinear dari momen-kurvatur. Model 2 ini akan diberikan gempa level DBE dengan faktor modifikasi respons $R = 1.6$ dan kolom elastis akan didesain dengan menggunakan gaya dalam hasil redistribusi.

2.2 Analisis Struktur Nonlinear Lumped Plasticity Approach

Lumped plasticity approach atau yang biasa juga dikenal sebagai *plastic hinge approach* adalah sebuah metode analisis struktur melalui pendekatan nonlinear. Pendekatan nonlinear merupakan pendekatan yang kompleks dan membutuhkan biaya komputasi yang tinggi sehingga analisis elastis linear lebih banyak dilakukan sebelumnya. Namun, seiring dengan berkembangnya zaman yang didukung dengan daya komputasi yang semakin cepat dan canggih, para praktisi mulai melirik analisis nonlinear yang tentu dapat memberi hasil yang lebih akurat, mengingat elemen struktur sebenarnya memiliki sifat nonlinear.

Menurut Papadopoulos dan Fragiadakis (2021), *plastic hinge approach* berdasarkan pada pengonsentrasian deformasi plastis di bagian ujung elemen struktur menggunakan *plastic hinge* yang berdasarkan pada relasi antara momen dan rotasi. Hubungan antara momen dan rotasi ini dapat didefinisikan dengan parameter yang terdapat pada ASCE 41 (2017).

Perbedaan utama dari metode *lumped plasticity approach* dan metode modifikasi inersia terletak pada tahap pembuatan model 2 untuk mendesain kolom elastis. Tanaya (2021)

melakukan modifikasi inersia pada semua balok dan kolom plastis, padahal belum tentu semua balok dan kolom plastis yang dimodifikasi inersianya akan benar-benar rusak saat menerima beban gempa. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan metode analisis struktur *nonlinear lumped plasticity approach* pada model 2, dimana pemodelan kerusakan dengan modifikasi inersia akan digantikan dengan pemberian informasi sifat nonlinear pada kedua ujung elemen sehingga kerusakan yang terjadi dapat terdeteksi dengan sendirinya dan distribusi gaya menuju kolom elastis menjadi lebih akurat.

2.3 Kriteria Kinerja Struktur

Kedua model struktur dalam penelitian ini akan diuji menggunakan *nonlinear dynamic procedure* (NDP) yang akan dilakukan pada level gempa DBE dan MCE_R (*risk-targeted maximum considered earthquake*). Gerak tanah diambil dari gempa Imperial Valley (El Centro 1940) yang telah dimodifikasi sesuai dengan respons spektrum Kota Surabaya dengan kelas situs tanah lunak (SE). Kota Surabaya dipilih sebagai studi kasus karena posisinya sebagai kota metropolitan terbesar kedua di Indonesia dengan pembangunan infrastruktur yang masih berkembang disertai potensi gempa yang cukup rawan.

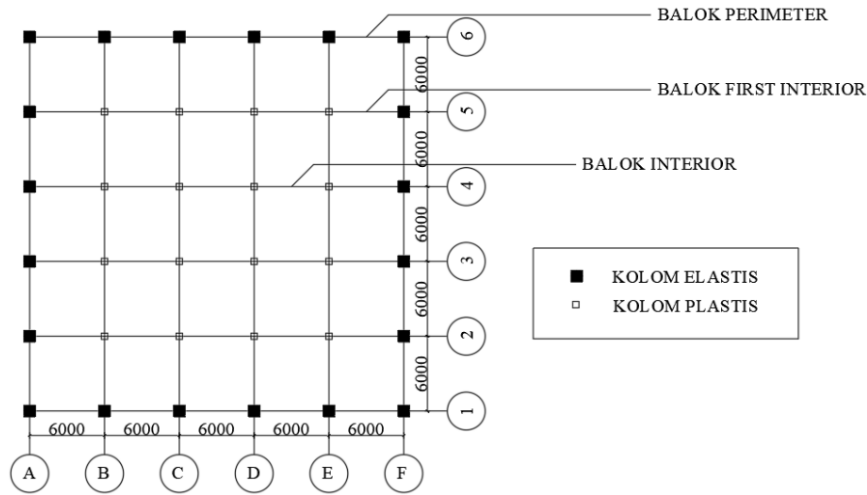
Performa dari struktur akan ditinjau dari beberapa aspek, antara lain mekanisme keruntuhan, tingkat kerusakan sendi plastis, serta *drift* bangunan. Mekanisme keruntuhan yang diharapkan dalam penelitian ini adalah *partial side sway mechanism* yang berarti tidak terjadi sendi plastis pada kolom yang didesain sebagai kolom elastis. Tingkat kerusakan yang diinginkan adalah sendi plastis yang tidak melebihi level *acceptance criteria* LS (*life safety*) untuk gempa DBE dan level CP (*collapse prevention*) untuk gempa MCE_R sesuai FEMA 273 (1997). *Drift* yang terjadi pada bangunan diharapkan untuk tetap memenuhi syarat *drift ratio* yang diizinkan yakni 2% saat diberikan gempa DBE dan 4% pada MCE_R .

3. PEMODELAN DAN DESAIN STRUKTUR

Tahapan dalam penelitian ini dimulai dari pembuatan model 1 untuk desain balok dan kolom plastis, baik pada metode *lumped plasticity approach* maupun metode modifikasi inersia. Pada metode modifikasi inersia, model 1 dapat dikerjakan secara bersamaan dengan pembuatan model 2. Berbeda dengan metode *lumped plasticity approach* yang mengharuskan desain balok dan kolom plastis pada model 1 selesai terlebih dahulu, dikarenakan pemberian *nonlinear hinge properties* yang memerlukan data penulangan dari model 1.

Model struktur yang digunakan sebagai studi kasus dalam penelitian ini adalah bangunan beton bertulang 5 bentang dengan denah berbentuk persegi yang setiap bentangnya memiliki panjang 6 meter sesuai pada Gambar 3. Jumlah lantai adalah 12 dengan ketinggian antarlantai 4 meter. Pembebanan yang diberikan untuk pemodelan awal terdiri dari beban gravitasi berupa berat sendiri, beban mati tambahan 1.5 kN/m^2 , beban hidup 2.4 kN/m^2 , dan beban dinding 10 kN/m pada balok perimeter.

Model struktur akan diberikan beban gempa level DBE Kota Surabaya dengan kelas situs SE sesuai SNI 1726 (2019). Analisis gempa menggunakan respons spektrum dengan faktor modifikasi respons, $R = 8$.



Gambar 3. Denah Model Struktur

3.1 Desain Struktur dengan Metode Analisis *Nonlinear Lumped Plasticity Approach*

Dengan informasi *nonlinear hinge properties* hasil penulangan dari model 1, *nonlinear time history analysis* dikerjakan pada model 2. Level gempa yang digunakan pada model 2 ini adalah level gempa DBE dengan faktor modifikasi respons, $R = 1$. Dengan terjadinya kerusakan plastis saat analisis riwayat waktu, dimungkinkan terjadinya redistribusi gaya dari balok dan kolom plastis yang mengalami kerusakan menuju kolom elastis yang masih bertahan. Gaya dalam yang terdapat pada kolom elastis akan dijadikan acuan untuk mendesain kolom elastis. Hasil desain dari metode *lumped plasticity approach* dapat dilihat pada Tabel 1, 2, 3, 4, dan 5. Perlu dicatat bahwa pada metode M-PCD, perencanaan tulangan transversal pada semua elemen masih mengadopsi prinsip desain kapasitas.

Tabel 1. Dimensi, Penulangan Lentur, dan Penulangan Geser Balok Perimeter Metode *Lumped Plasticity Approach*

Lantai	b x h (mm ²)	Posisi	Tulangan Longitudinal	Rasio Tulangan	Capacity Ratio	Tulangan Transversal
1	300x500	Atas	4D19	0.76%	0.99	D10-100
		Bawah	2D19	0.57%	0.76	
2	300x500	Atas	5D19	0.95%	0.95	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.76	
3-4	300x500	Atas	6D19	1.13%	0.92	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.86	
5-6	300x500	Atas	6D19	1.13%	0.91	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.79	
7-8	300x500	Atas	6D19	1.13%	0.87	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.83	
9-10	300x500	Atas	5D19	0.95%	0.96	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.75	
11-12	300x500	Atas	4D19	0.76%	0.99	D10-100
		Bawah	2D19	0.38%	0.98	

Tabel 2. Dimensi, Penulangan Lentur, dan Penulangan Geser Balok Interior Metode *Lumped Plasticity Approach*

Lantai	b x h (mm ²)	Posisi	Tulangan Longitudinal	Rasio Tulangan	Capacity Ratio	Tulangan Transversal
1	300x500	Atas	4D19	0.76%	0.97	D10-100
		Bawah	2D19	0.57%	0.71	
2-8	300x500	Atas	5D19	0.95%	0.96	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.76	
9-12	300x500	Atas	4D19	0.76%	0.99	D10-100
		Bawah	2D19	0.38%	0.95	

Tabel 3. Dimensi, Penulangan Lentur, dan Penulangan Geser Balok *First Interior* Metode *Lumped Plasticity Approach*

Lantai	b x h (mm ²)	Posisi	Tulangan Longitudinal	Rasio Tulangan	Capacity Ratio	Tulangan Transversal
1	300x500	Atas	5D19	0.95%	0.89	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.86	
2	300x500	Atas	6D19	1.13%	0.91	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.86	
3	300x500	Atas	7D19	1.32%	0.89	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.97	
4-9	300x500	Atas	7D19	1.32%	0.97	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.79	
10	300x500	Atas	7D19	1.32%	0.87	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.95	
11	300x500	Atas	6D19	1.13%	0.93	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.88	
12	300x500	Atas	5D19	0.95%	0.84	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.67	

Tabel 4. Dimensi, Penulangan Lentur, dan Penulangan Geser Kolom Plastik Metode *Lumped Plasticity Approach*

Lantai	b x h (mm ²)	Tulangan Longitudinal	Rasio Tulangan	Capacity Ratio	Tulangan Transversal
1	550x550	16D22	2.01%	1.00	3D10-100
2	550x550	16D22	2.01%	0.91	3D10-100
3	500x500	16D22	2.43%	0.96	3D10-100
4	500x500	16D22	2.43%	0.88	3D10-100
5	500x500	8D22	1.22%	0.89	3D10-100
6	500x500	8D22	1.22%	0.78	3D10-100
7	450x450	8D16	0.79%	0.89	3D10-100
8	450x450	8D16	0.79%	0.77	3D10-100
9	400x400	8D16	1.01%	0.81	3D10-100
10	400x400	8D16	1.01%	0.70	3D10-100
11	350x350	8D13	0.87%	0.74	3D10-80
12	300x300	12D10	0.95%	0.72	3D10-70

Tabel 5. Dimensi, Penulangan Lentur, dan Penulangan Geser Kolom Elastis Metode *Lumped Plasticity Approach*

Lantai	b x h (mm ²)	Tulangan Longitudinal	Rasio Tulangan	Capacity Ratio	Tulangan Transversal
1	1000x1000	32D32	2.57%	0.98	5D10-100
2	1000x1000	20D32	1.61%	0.93	5D10-100
3	900x900	20D32	1.99%	0.88	5D10-100
4	900x900	12D32	1.19%	0.88	4D10-100
5	800x800	12D25	0.96%	0.96	4D10-100
6	800x800	12D25	0.96%	0.69	4D10-100
7	700x700	16D22	1.26%	0.88	4D10-100
8	700x700	16D22	1.26%	0.89	4D10-100
9	600x600	24D22	2.58%	0.93	4D10-100
10	600x600	12D22	1.29%	1.00	4D10-100
11	500x500	20D22	3.10%	0.91	4D10-100
12	500x500	20D22	3.10%	0.91	4D10-100

3.2 Desain Struktur dengan Pendekatan Modifikasi Inersia pada Metode M-PCD

Agar metode M-PCD dengan pendekatan *lumped plasticity* bisa diteliti keefektifannya, struktur yang sama juga didesain menggunakan metode M-PCD yang dikembangkan sebelumnya, yaitu dengan menggunakan pendekatan modifikasi inersia untuk pemodelan kerusakan plastisnya. Nilai reduksi inersia yang digunakan adalah sebesar 0.002 yang didapat dari hasil penelitian Hendrarto & Salim (2023).

Hasil desain kolom elastis pada pendekatan ini dapat dilihat pada Tabel 6, dimana dimensi kolom perlu lebih besar dibandingkan dengan pendekatan *lumped plasticity approach* (khususnya pada baris yang berwarna abu-abu). Perubahan dimensi kolom elastis mengakibatkan perubahan gaya pada balok dan kolom plastis, sehingga dilakukan perubahan desain pula pada balok dan kolom plastis seperti yang tertera pada Tabel 7, Tabel 8, Tabel 9, dan Tabel 10.

Tabel 6. Dimensi, Penulangan Lentur, dan Penulangan Geser Kolom Elastis Metode Modifikasi Inersia

Lantai	Awal			Revisi			
	b x h (mm ²)	Rasio Tulangan	Capacity Ratio	b x h (mm ²)	Tulangan Longitudinal	Rasio Tulangan	Capacity Ratio
1	1000x1000	2.57%	1.00	1000x1000	32D32	2.57%	0.97
2	1000x1000	2.25%	1.00	1000x1000	28D32	2.25%	0.96
3	900x900	2.38%	0.97	900x900	24D32	2.38%	0.98
4	900x900	1.98%	0.97	900x900	20D32	1.98%	0.98
5	800x800	2.51%	0.95	800x800	20D32	2.51%	0.97
6	800x800	1.53%	0.97	800x800	20D25	1.53%	0.99
7	700x700	2.40%	0.98	700x700	24D25	2.40%	0.97
8	700x700	2.40%	0.98	700x700	24D25	2.40%	0.94
9	600x600	4.91%	0.98	700x700	24D25	2.40%	0.96

Adicahya: Penerapan Modified Partial Capacity Design (M-PCD) dengan Analisis Struktur Nonlinear pada Bangunan Sederhana

10	600x600	4.36%	0.98	700x700	24D25	2.40%	0.94
11	500x500	7.85%	0.96	600x600	20D25	2.73%	0.99
12	500x500	5.50%	0.98	600x600	20D25	2.73%	0.94

Tabel 7. Dimensi, Penulangan Lentur, dan Penulangan Geser Balok Perimeter Metode Modifikasi Inersia

Lantai	b x h (mm ²)	Posisi	Tulangan Longitudinal	Rasio Tulangan	Capacity Ratio	Tulangan Transversal
1	300x500	Atas	6D19	1.13%	0.92	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.86	
2	300x500	Atas	8D19	1.51%	0.93	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.86	
3	300x500	Atas	9D19	1.70%	0.99	D10-100
		Bawah	5D19	0.95%	0.86	
4-6	300x500	Atas	10D19	1.89%	0.94	D10-100
		Bawah	5D19	0.95%	0.97	
7	300x500	Atas	9D19	1.70%	1.00	D10-100
		Bawah	5D19	0.95%	0.87	
8	300x500	Atas	9D19	1.70%	0.94	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.96	
9	300x500	Atas	8D19	1.51%	0.96	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.88	
10	300x500	Atas	7D19	1.32%	0.95	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.78	
11	300x500	Atas	6D19	1.13%	0.89	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.84	
12	300x500	Atas	4D19	0.76%	0.97	D10-100
		Bawah	2D19	0.38%	0.95	

Tabel 8. Dimensi, Penulangan Lentur, dan Penulangan Geser Balok Interior Metode Modifikasi Inersia

Lantai	b x h (mm ²)	Posisi	Tulangan Longitudinal	Rasio Tulangan	Capacity Ratio	Tulangan Transversal
1	300x500	Atas	6D19	1.13%	0.85	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.81	
2-6	300x500	Atas	8D19	1.51%	0.98	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.89	
7	300x500	Atas	7D19	1.32%	0.98	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.79	
8	300x500	Atas	7D19	1.32%	0.89	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.96	
9	300x500	Atas	6D19	1.13%	0.89	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.84	
10	300x500	Atas	5D19	0.95%	0.94	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.74	
11-12	300x500	Atas	4D19	0.76%	0.95	D10-100
		Bawah	2D19	0.38%	0.92	

Tabel 9. Dimensi, Penulangan Lentur, dan Penulangan Geser Balok *First Interior* Metode Modifikasi Inersia

Lantai	b x h (mm ²)	Posisi	Tulangan Longitudinal	Rasio Tulangan	Capacity Ratio	Tulangan Transversal
1	300x500	Atas	6D19	1.13%	0.98	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.91	
2	300x500	Atas	8D19	1.51%	0.99	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.91	
3	300x500	Atas	10D19	1.89%	0.94	D10-100
		Bawah	5D19	0.95%	0.85	
4-7	300x500	Atas	11D19	2.08%	0.95	D10-100
		Bawah	5D19	0.95%	0.96	
8-9	300x500	Atas	10D19	1.89%	0.97	D10-100
		Bawah	5D19	0.95%	0.88	
10	300x500	Atas	9D19	1.70%	0.92	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.93	
11	300x500	Atas	7D19	1.32%	0.98	D10-100
		Bawah	4D19	0.76%	0.80	
12	300x500	Atas	6D19	1.13%	0.88	D10-100
		Bawah	3D19	0.57%	0.82	

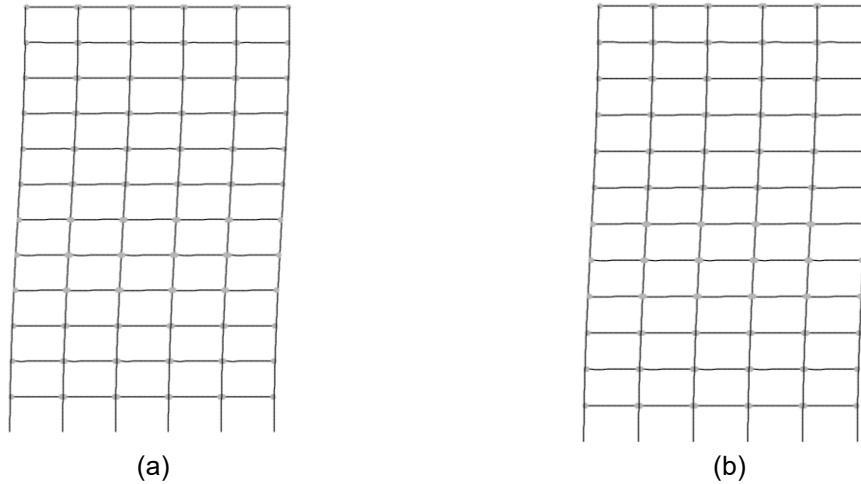
Tabel 10. Dimensi, Penulangan Lentur, dan Penulangan Geser Kolom Plastik Metode Modifikasi Inersia

Lantai	b x h (mm ²)	Tulangan Longitudinal	Rasio Tulangan	Capacity Ratio	Tulangan Transversal
1	550x550	16D22	2.01%	1.00	3D10-100
2	550x550	16D22	2.01%	0.91	3D10-100
3	500x500	16D22	2.43%	0.96	3D10-100
4	500x500	16D22	2.43%	0.88	3D10-100
5	500x500	8D22	1.22%	0.89	3D10-100
6	500x500	8D22	1.22%	0.78	3D10-100
7	450x450	8D16	0.79%	0.89	3D10-100
8	450x450	8D16	0.79%	0.77	3D10-100
9	400x400	8D16	1.01%	0.81	3D10-100
10	400x400	8D16	1.01%	0.70	3D10-100
11	350x350	8D13	0.87%	0.74	3D10-80
12	300x300	12D10	0.95%	0.72	3D10-70

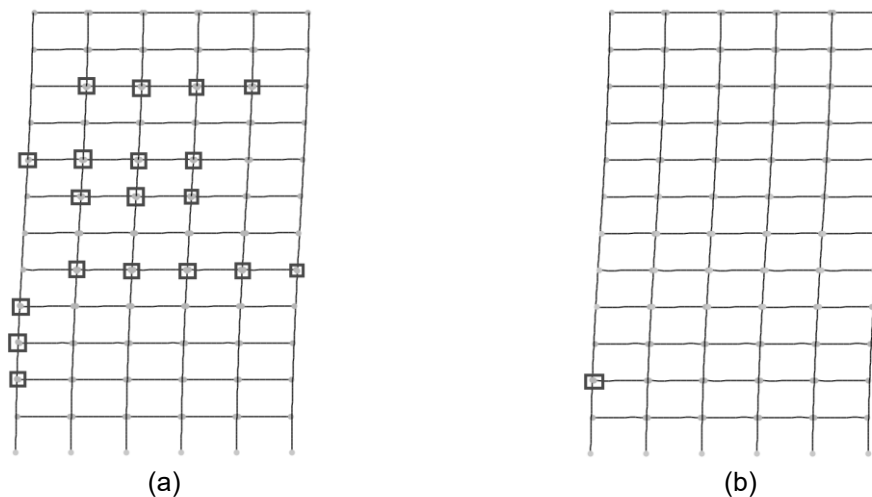
4. HASIL UJI KINERJA STRUKTUR

Partial side sway mechanism berhasil tercapai di semua model struktur, baik pada metode *lumped plasticity approach* maupun metode modifikasi inersia pada level gempa DBE. Namun, mekanisme kerusakan pada semua model struktur masih melampaui *partial side sway mechanism* pada level gempa MCE_R. Hal tersebut dapat terjadi karena kolom elastis yang didesain berdasarkan model 2 hanya menggunakan target level gempa DBE. Hasil mekanisme keruntuhan pada portal eksterior dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5. *Joint* dengan

tanda kotak menyatakan terbentuknya sendi plastis pada kolom elastis yang menggagalkan *partial side sway mechanism*. *Joint* pada Gambar 4 tidak ditemukan adanya tanda kotak, yang artinya tidak terbentuk sendi plastis pada kolom elastis, sedangkan pada Gambar 5 ditemukan beberapa sendi plastis pada kolom elastis.



Gambar 4. Mekanisme Keruntuhan Level Gempa DBE: (a) *lumped plasticity approach*, (b) modifikasi inersia



Gambar 5. Mekanisme Keruntuhan Level Gempa MCE_R : (a) *lumped plasticity approach*, (b) modifikasi inersia

Level kerusakan setiap sendi plastis berhasil memenuhi syarat dari FEMA 273 pada level gempa DBE, sedangkan pada level gempa MCE_R hanya berhasil dipenuhi oleh model dengan metode *lumped plasticity approach*. Level kerusakan sendi plastis pada gempa MCE_R yang tidak memenuhi syarat dapat disebabkan oleh proses desain yang hanya menggunakan target level gempa DBE. Jumlah dan level kerusakan setiap sendi dapat dilihat pada Tabel 11 dan 12.

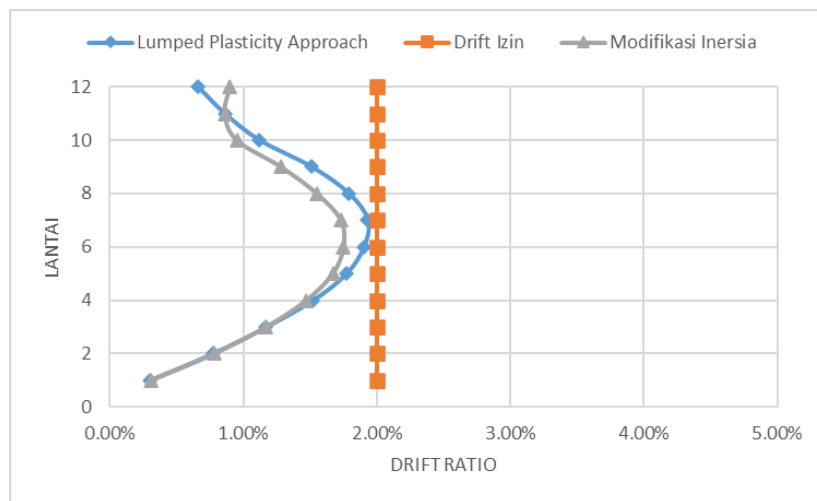
Tabel 11. Jumlah dan Level Sendi Plastis Metode *Lumped Plasticity Approach*

<i>Hinge State</i>	Balok		Kolom Plastis		Kolom Elastis	
	DBE	MCE _R	DBE	MCE _R	DBE	MCE _R
A to IO	1247	1009	384	328	480	460
IO to LS	193	431	0	56	0	20
LS to CP	0	0	0	0	0	0
> CP	0	0	0	0	0	0

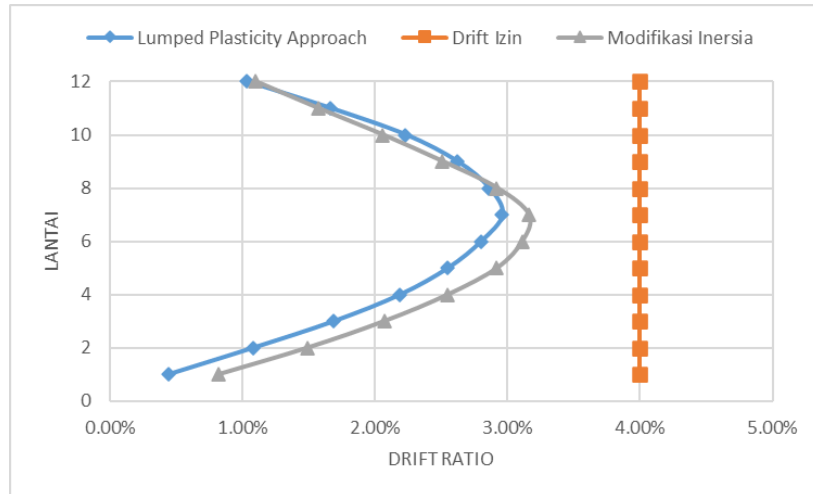
Tabel 12. Jumlah dan Level Sendi Plastis Metode Modifikasi Inersia

<i>Hinge State</i>	Balok		Kolom Plastis		Kolom Elastis	
	DBE	MCE _R	DBE	MCE _R	DBE	MCE _R
A to IO	1292	1027	382	302	480	460
IO to LS	148	413	2	80	0	20
LS to CP	0	0	0	0	0	0
> CP	0	0	0	2	0	0

Untuk syarat *drift ratio*, metode *lumped plasticity approach* dan metode modifikasi inersia sama-sama telah berhasil memenuhi kriteria *drift* yang diizinkan baik pada level gempa DBE maupun level gempa MCE_R. Hasil plot *drift* setiap lantai dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. *Drift Ratio* Level DBE



Gambar 7. *Drift Ratio* Level MCE_R

5. KESIMPULAN

Metode *modified partial capacity design* (M-PCD) dengan menggunakan analisis *lumped plasticity approach* dapat dikatakan sudah berhasil memberikan hasil analisis yang lebih akurat. Hal tersebut dapat terlihat dari hasil desain kolom elastis yang lebih hemat, namun memberikan performa yang lebih memuaskan jika dibandingkan dengan metode modifikasi inersia apabila dilihat dari segi pemenuhan syarat ketiga performa struktur yang ditinjau dalam penelitian ini. Namun, metode *modified partial capacity design* (M-PCD) dengan menggunakan analisis *lumped plasticity approach* memiliki kelemahan, yakni proses komputasi yang lebih lama dibandingkan dengan metode modifikasi inersia akibat dari penggunaan analisis nonlinear saat desain kolom elastis pada model 2. Walaupun pendekatan *lumped plasticity* sudah menunjukkan kemajuan dibandingkan metode modifikasi inersia, pendekatan ini masih belum bisa digunakan dalam praktik desain sesungguhnya karena mekanisme keruntuhan yang terjadi belum sesuai harapan. Pendekatan desain ini perlu dikembangkan lebih lanjut, terutama dalam merumuskan level gempa desain kolom elastis agar keruntuhan *partial side sway mechanism* dapat terjaga.

6. DAFTAR REFERENSI

- American Society of Civil Engineers. (2017). Seismic evaluation and retrofit of existing buildings.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI-03-1726-2019. Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.
- Building Seismic Safety Council. (1997). NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA publication 273).
- Hendrarto, V.C. & Salim, J.A. (2023). Penerapan metode modified-partial capacity design (MPCD) pada bangunan persegi 6 lantai dan 10 lantai dengan variasi penempatan kolom elastis 30% dan faktor modifikasi $R = 1$. (Unpublished undergraduate thesis) Universitas Kristen Petra.
- Muljati & Lumantarna. (2007). Partial capacity design, an alternative to the capacity design method. Proceedings of the 19th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials. ACMSM19. Christchurch, New Zealand, pp. 409-414.

- Muljati & Lumantarna. (2008). Performance of partial capacity design on fully ductile moment resisting frame in highly seismic area in Indonesia. The Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-11). Taipei, November, 2008.
- Muljati & Lumantarna. (2013). Minimum design limit of partial capacity design for regular moment resisting frames. The Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13). Sapporo, Japan, 11-13 September 2013.
- Papadopoulos & Fragiadakis. (2021). Plastic Hinge and Plastic Zone Seismic Analysis of Frames. National Technical University of Athens (N.T.U.A.), Athens, Greece.
- Pudjisuryadi, P. et. al. (2011). Seismic performance of structure with vertical set-back designed using partial capacity design. The 3rd International Conference of European Asian Civil Engineering Forum (EACEF). Universitas Atma Jaya, Yogyakarta, Indonesia, 20-22 September 2011.
- Tanaya, L.S. et. al. (2021). Modified partial capacity design (M-PCD): achieving partial side sway mechanism by using two steps design approach. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, Vol.907, 2021.