

Analisis Dinamik Nonlinier Kombinasi *Prefabricated Prefinished Volumetric Construction* Struktur Baja dengan Rangka Terbreis Konsentrik Khusus

Aldian Nurdiansyah ^[1], Andy Prabowo ^{[1]*}

^[1] Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jakarta, 11440, Indonesia

Email: andy.prabowo@ft.untar.ac.id*

*) Corresponding Author

Received: 20 May 2026; Revised: 29 June 2026; Accepted: 10 July 2026

How to cited this article:

Nurdiansyah, A., Prabowo, A., (2026). Analisis Dinamik Nonlinier Kombinasi *Prefabricated Prefinished Volumetric Construction* Struktur Baja dengan Rangka Terbreis Konsentrik Khusus. Jurnal Teknik Sipil, 22(2), 311–330.
<https://doi.org/10.28932/jts.v22i2.15664>

ABSTRAK

Prefabricated Prefinished Volumetric Construction (PPVC) merupakan salah satu *off-site construction* yang mendukung program penyediaan permukiman di Indonesia dengan waktu yang singkat. Penggunaan PPVC mendukung misi PBB mencapai *Sustainable Development Goals* (SDGs) mengenai inovasi infrastruktur dan permukiman berkelanjutan. Pembangunan PPVC di Indonesia memiliki batasan pada kondisi Indonesia yang rawan terhadap gempa. Penelitian ini bertujuan mengetahui perilaku PPVC yang dikombinasikan dengan struktur penahan gaya lateral agar dapat bertahan pada level seismisitas tinggi dengan evaluasi metode nonlinier baik dari pola pelelehan sendi plastis hingga level kinerja seismik. Metode dan kriteria penerimaan struktur untuk analisis nonlinier dinamik riwayat waktu mengacu ASCE 41-17, NIST GCR 15-917-34, serta FEMA P58-1. Pendetailan sambungan antar modul PPVC menggunakan pendekatan *spring* sehingga perilaku struktur relatif mendekati kondisi riil. Kinerja struktur PPVC yang dikombinasikan dengan Rangka Breis Konsentris Khusus (RBKK) memberikan hasil yang bisa diterima untuk struktur rumah susun empat lantai dengan level kinerja *Immediate Occupancy* (IO) untuk struktur global maupun lokal. Sistem RBKK membantu PPVC menahan gaya lateral akibat gempa sehingga gaya yang diterima sambungan antar modul PPVC tidak terlalu besar. Struktur rumah susun empat lantai dengan PPVC masih layak secara ketersediaan material di Indonesia dan kriteria penerimaan untuk gempa tinggi di Kota Jakarta.

Kata kunci: Analisis *Time History*, Evaluasi Kinerja, PPVC, RBKK, SDGs.

ABSTRACT. *Nonlinear Dynamic Analysis of Prefabricated Prefinished Volumetric Construction Combined with Special Concentric Braced Frame Steel Structure.* *Prefabricated Prefinished Volumetric Construction* (PPVC) is one of the *off-site construction* that supports fast provision of housing programme in Indonesia. PPVC utilization endorses the two of United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) which are focusing on infrastructure innovation and sustainable housing. Nonetheless, constructing PPVC in Indonesia has a limitation due to very vulnerable site condition to earthquake occurrence. This research aims to acknowledge the behavior of PPVC combined with Special Concentric Braced Frame (SCBF) as lateral resistance system with high level seismic load using nonlinear method evaluation, which are plastification pattern of plastic hinge until seismic performance level of structure. Nonlinear time history analysis refers to ASCE 41-17, NIST GCR 15-917-34, and FEMA P58-1. The module connection of PPVC structure is being detailed with spring constant approach to get best representative behavior, relatively close to the real situation. Performance level of PPVC combined with SCBF gives a reasonable condition for four storey small apartment, which is *Immediate Occupancy* (IO) for global and local evaluation result. SCBF helps the structure to resist lateral load from earthquake, thus, the load acting on PPVC module connection is not that in high number. Four

storey apartment with PPVC is feasible enough to be built with available section (common) in Indonesia and strong enough to resist high level seismicity in Jakarta.

Keywords: *Time History Analysis, Performance Evaluation, PPVC, SDGs, SCBF.*

1. PENDAHULUAN

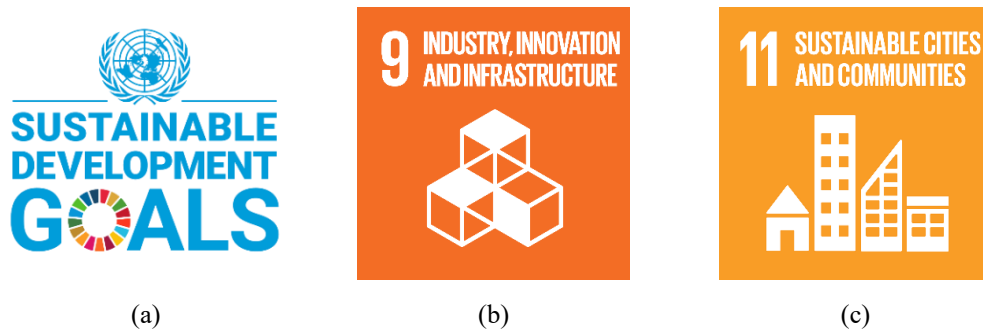
Perkembangan teknologi konstruksi semakin membantu para praktisi membangun bangunan gedung dengan lebih singkat, baik dalam proses desain maupun dari segi pelaksanaan. *Building Information Modelling (BIM)*, *off-site construction*, *lean construction* adalah beberapa produk hasil inovasi para ahli di bidang teknik sipil untuk menunjang proses konstruksi dengan tujuan memangkas *lead time* sedemikian sehingga mengurangi risiko *time overrun* yang berimbas kepada *cost overrun*. *Off-site construction* menjadi salah satu solusi dalam industri konstruksi karena mutu produk yang terkendali, serta kecepatan proses konstruksinya (Wuni & Shen, 2020). Penggunaan *off-site construction* dapat menjadi langkah yang menguntungkan untuk mengimbangi kecepatan pertumbuhan kebutuhan hunian di Indonesia.

Salah satu *off-site construction* yang umum digunakan adalah bangunan modular tipe *Prefabricated Prefinished Volumetric Construction (PPVC)*. PPVC merupakan pengembangan dari elemen prafabrikasi dua dimensi (2D) seperti dinding dan pelat sehingga istilah volumetric merupakan representasi dari modul yang dibuat tiga dimensi (3D). PPVC dirancang secara langsung menjadi satu modul sehingga proses instalasi lebih singkat dibandingkan elemen 2D. Bangunan modular pada awalnya dirancang untuk mempersingkat waktu konstruksi serta mendukung proses pemulihan pasca bencana (*post-disaster*) atau situasi darurat seperti peristiwa tsunami di Aceh (Bani & Agustapraja, 2020) dan pandemi COVID-19 (Ohiomah & Oguntola, 2025). Seiring perkembangannya, PPVC digunakan lebih luas lagi. Singapura merupakan negara yang telah mengembangkan PPVC sebagai bangunan residensial dan institusional karena menghasilkan proses konstruksi yang ramping baik dari segi manajerial konstruksi maupun proses manufaktur (BCA, 2024; Chua et al., 2020). Salah satu portofolio pertama Singapura untuk PPVC adalah The Crowne Plaza Changi Airport Hotel Extension (Chua et al., 2020).

Peningkatan penggunaan PPVC turut berkontribusi dalam misi jangka panjang Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) dalam hal ini adalah *Sustainable Development Goals (SDGs)*. Implementasi PPVC berkaitan dengan tujuan SDGs ke-9 yaitu Industri, Inovasi, dan Infrastruktur dan yang ke-11 yaitu Kota dan Permukiman yang Berkelanjutan, yang mana turut andil sebanyak dua dari 17 tujuan utama PBB. Muara dari penerapan SDGs adalah terciptanya ekonomi positif dan merata khususnya di Indonesia pada tahun 2030. Kecepatan konstruksi dan kemudahan instalasi akan berimbas pada terpenuhinya kebutuhan rumah tinggal untuk masyarakat,

menyeimbangkan antara *supply* dan *demand* dari perumahan dan permukiman di wilayah Indonesia.

PBB merilis logo resmi untuk misi jangka panjang SDGs dan setiap warna memiliki arti masing-masing. Gambar 1 menunjukkan misi PBB yang dapat ditempuh dengan aplikasi PPVC di industri konstruksi.



Gambar 1. (a) SDGs PBB, (b) Misi ke-9 SDGs, (c) Misi ke-11 SDGs (*United Nations*, 2026)

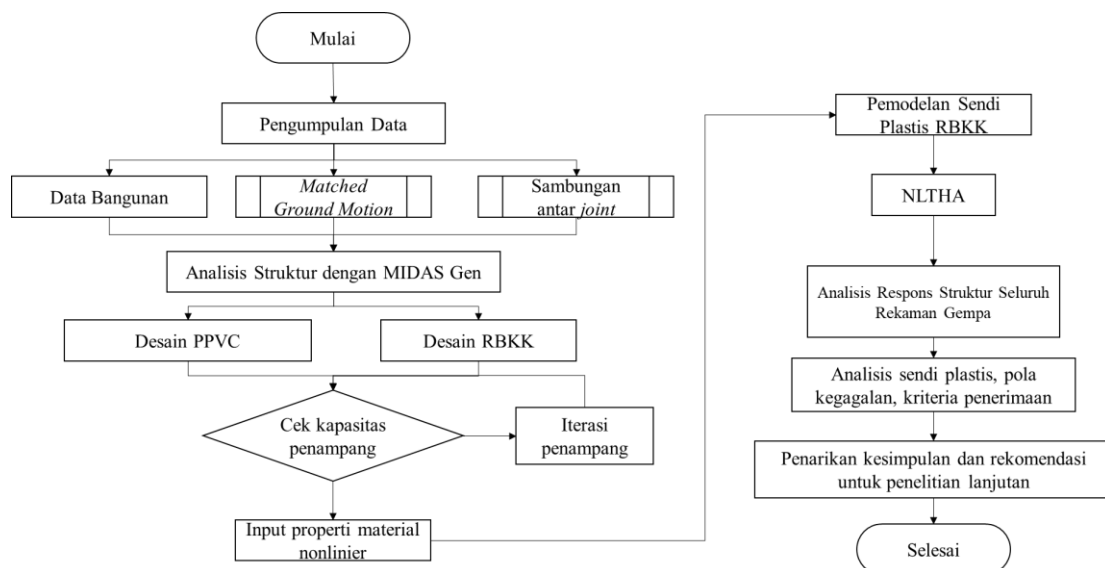
Penerapan bangunan modular secara massal memiliki tantangan tersendiri di Indonesia yang merupakan wilayah rawan gempa, berbeda dengan Malaysia dan Singapura yang cenderung lebih mudah mengadopsi bangunan modular sebagai opsi dari bangunan konvensional karena wilayahnya yang merupakan lempeng Eurasia yang stabil dan tidak termasuk *ring of fire* (Balendra & Li, 2008). Penelitian mengenai PPVC cenderung berfokus kepada sistem sambungan yang optimum karena salah satu tantangan dalam proses konstruksi bangunan modular adalah teknik penyambungan antar modul PPVC (Liew et al., 2018). Penerapan bangunan modular di Indonesia belum ditargetkan sampai *high-rise building* sehingga bangunan modular *low-to-mid rise* yang dibuat permanen merupakan satu langkah kemajuan dalam penerapan bangunan modular. Penelitian ini bertujuan mengetahui perilaku PPVC yang dikombinasikan dengan struktur penahan gaya lateral agar dapat bertahan pada level seismisitas tinggi dengan evaluasi metode nonlinier baik dari pola pelelehan sendi plastis hingga level kinerja seismik struktur.

Aspek seismik pada bangunan modular relatif belum banyak diteliti secara komprehensif mengingat kriteria penerimaan seismik bangunan modular belum mendapatkan standar yang baku oleh badan standarisasi maupun kementerian terkait. Namun, aspek keandalan bangunan modular telah banyak dikaji di luar Indonesia, Deng et al. (2020) memaparkan bahwa pengembangan penelitian mengenai bangunan modular dapat difokuskan kepada kemampuan/ketahanan lateralnya sedangkan Ye et al. (2021) mendapatkan hasil bahwa perilaku diafragma menjadi perhatian untuk bangunan modular karena karakteristiknya yang unik (tidak monolit). Hal-hal tersebut menjadi urgensi penelitian mengenai karakteristik bangunan modular secara numerik.

Hal kritis lainnya dalam permodelan bangunan modular adalah kondisi *shear-slip* pada sambungan yang berimbas kepada *interstory drift* (Palmiotta et al., 2023). Oleh karena itu, parameter *link* menjadi kajian penting kelayakan bangunan modular untuk berdiri secara permanen dalam kondisi kegempaan di Indonesia. Bangunan modular yang sudah dimodelkan akan memberikan spasi antar modul khususnya pada bagian pelat lantai, hal ini memiliki efek terhadap aksi diafragma pada struktur, proses unifikasi pelat lantai akan menciptakan diafragma kaku namun secara proses konstruksi akan memakan waktu yang cukup lama (Chua et al., 2020).

2. METODOLOGI PENELITIAN

Studi diawali dengan penentuan desain konsep ukuran bangunan PPVC disertai penentuan lokasi rangka bresing baja untuk menjaga stabilitas struktur baik terhadap beban gravitasi maupun beban gempa. Selain itu, studi literatur untuk menentukan pendekatan pemodelan sangat penting dan menjadi dasar untuk mengembangkan konsep desain struktur tahan gempa PPVC, termasuk di dalamnya pendekatan sambungan antar modul PPVC (Alembagheri et al., 2020 dan Chua et al., 2020), sambungan modul ke rangka bresing (Deng et al., 2020) dan aksi diafragma lantai PPVC (Ye et al., 2021). Perancangan komponen struktur baik PPVC maupun rangka bresing memperhatikan ketersediaan material di Indonesia serta spesifikasi pembebanan yang berlaku menjadi tahapan selanjutnya untuk menyiapkan desain struktur skematik. Pada akhirnya studi numerik untuk mengukur kinerja seismik desain struktur PPVC menjadi muara dari penelitian ini seperti ditampilkan dalam bagan alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

2.1. Data Perancangan Struktur

Model struktur PPVC yang akan diteliti adalah sebuah rumah susun empat lantai dengan denah dan posisi rangka breis berada di setiap sisi bangunan. Permodelan struktur menggunakan MIDAS Gen dengan memodelkan bangunan secara tiga dimensi. *Preliminary design* dapat dilakukan dengan metode *trial and error* untuk mendapatkan penampang struktur pada awal perencanaan. Denah bangunan untuk diteliti ditampilkan pada Gambar 3.

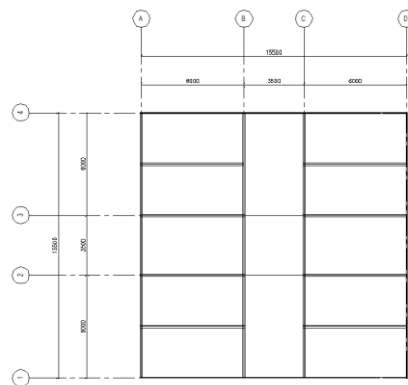
Fungsi bangunan : Rumah susun, dengan faktor kepentingan kelas II ($I_e = 1.0$)

Lokasi bangunan : Jakarta

Kelas situs : Tanah lunak (SE)

Sistem struktur : Rangka Terbreis Konsentris Khusus (RBKK)

Jumlah lantai : 4 (empat) lantai dengan tinggi tipikal 3.2 m



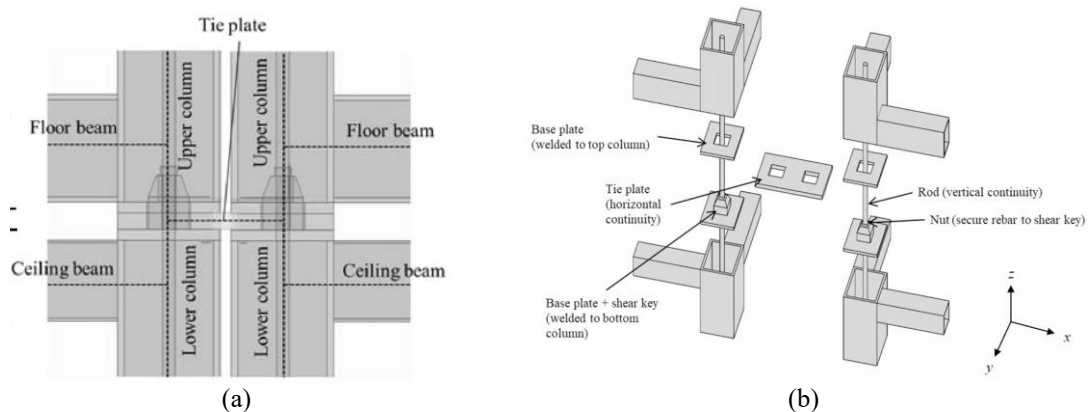
Gambar 3. Denah Struktur

Penampang yang digunakan dari katalog pasar yang aktif di Indonesia. Produsen baja yang dirujuk adalah SMS Perkasa dan Garuda Yamato Steel. Tujuan pemilihan penampang yang dijual secara massal di Indonesia untuk memudahkan proses fabrikasi dan tidak menimbulkan biaya tambahan yang tinggi akibat perlunya membuat *built-up steel* untuk PPVC. Metode perencanaan struktur yang digunakan adalah *capacity design method*. Detail penampang dan kelompok strukturnya ditampilkan pada Tabel 1.

Model sambungan yang dijadikan referensi berasal dari penelitian Chua et al. (2020). Permodelan sambungan PPVC pada perangkat lunak analisis struktur tidak bisa diasumsikan sebagai kaku penuh mengingat sambungan antar modul yang tidak monolit dan tidak juga terpraktualifikasi. Pendekatan yang dapat dilakukan adalah memodelkan sambungan dengan *link element* yang diperoleh dari perhitungan kekakuan sambungan. Chua et al. (2020) dan Wibowo et al. (2024) memanfaatkan *link* untuk menyambung satu modul ke modul lain dan memberikan hasil yang dianggap mewakili perilaku bangunan modular secara fisis. Model sambungan antar modul yang digunakan untuk penelitian ditampilkan pada Gambar 4.

Tabel 1. Penampang Model Struktur

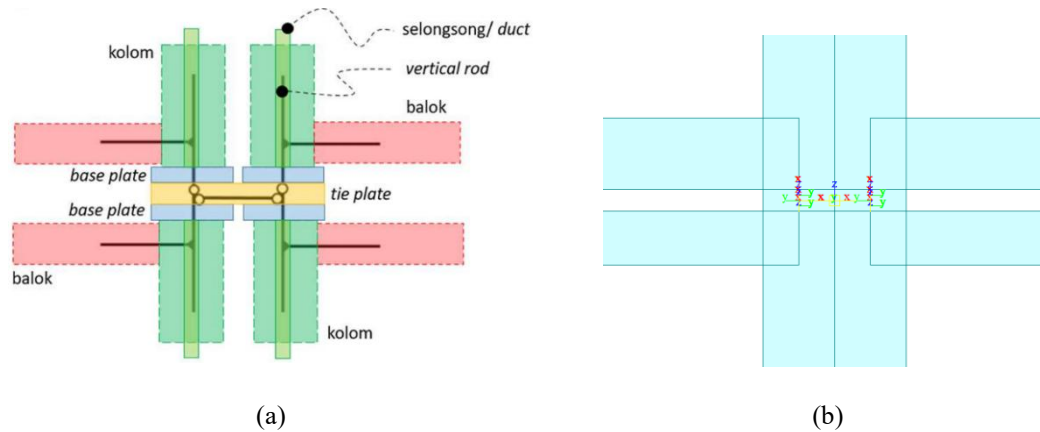
Elemen struktur	Penampang	Kelompok	Mutu Baja	Fy (MPa)	Fu (MPa)
Kolom Lantai 1-4	HSS200×200×12	PPVC	JIS SM490	315	490
Balok Lantai	HSS200×100×6	PPVC	JIS SM490	315	490
Balok Lantai Anak	HSS150×75×3.2	PPVC	JIS SM490	315	490
Balok Atap	HSS150×100×6	PPVC	JIS SM490	315	490
Balok Atap Anak	HSS75×75×4.5	PPVC	JIS SM490	315	490
Balok Atap Puncak	HSS80×80×4.5	PPVC	JIS SM490	315	490
Kolom Lantai 1-4	HSS200×200×12	RBKK	JIS SS400	235	400
Breis	HSS100×100×6	RBKK	JIS SS400	235	400
Balok Breis	WF500×200×10×16	RBKK	JIS SS400	235	400
Balok Non PPVC	WF350×175×7×11	-	JIS SS400	235	400



Gambar 4. Model Sambungan antar Modul PPVC (Chua et al., 2020)

Wibowo et al. (2024) meneliti perilaku bangunan modular dengan pendekatan *frame element* dengan sambungan modul menggunakan *spring*. Hasil menunjukkan bahwa teknik permodelan bangunan modular tidak direkomendasikan dibuat serupa dengan bangunan konvensional (asumsi kaku penuh). Efeknya terdapat perbedaan *initial stiffness* dan *base shear* ketika dibebani secara nonlinier statik, ketika tidak dimodelkan dengan *link* untuk sambungan antar modulnya *base shear* yang dihasilkan lebih besar. Model pendekatan sambungan hasil idealisasi dan penerapan pada perangkat lunak pada Gambar 5.

Permodelan *spring constant* perlu memerhatikan orientasi sumbu, aksial tidak selalu vertikal, tergantung kondisi kekakuan yang ditinjau. Input nilai *spring* mengacu pada teknik perhitungan pada penelitian Chua et al. (2020) dengan hasil yang ditunjukkan Tabel 2 dan Tabel 3. Model *spring* pada sambungan merepresentasikan perilaku kekakuan yang diidealisasi, jika sambungan dimodelkan sebagai jepit penuh konsekuensinya adalah pendetailan sambungan yang harus mengikuti kaidah AISC 341-22 dan tentunya tingkat penyerapan gaya akan lebih besar.



Gambar 5. (a) Detail Sambungan (Wibowo et al., 2020), (b) Permodelan Sambungan MIDAS Gen

Tabel 2. Nilai *Spring Constant* untuk Model Sambungan Vertikal

<i>Spring Constant</i>	b (mm)	h (mm)	t (mm)	L/l (mm)	A (mm ²)	k (kN/m)
k_v	200	200	8	200	6144	6144000
k_{h-x}	80	80	25	80	4000	3846154
k_{h-y}	80	80	25	80	4000	3846154

Tabel 3. Nilai *Spring Constant* untuk Model Sambungan Horizontal

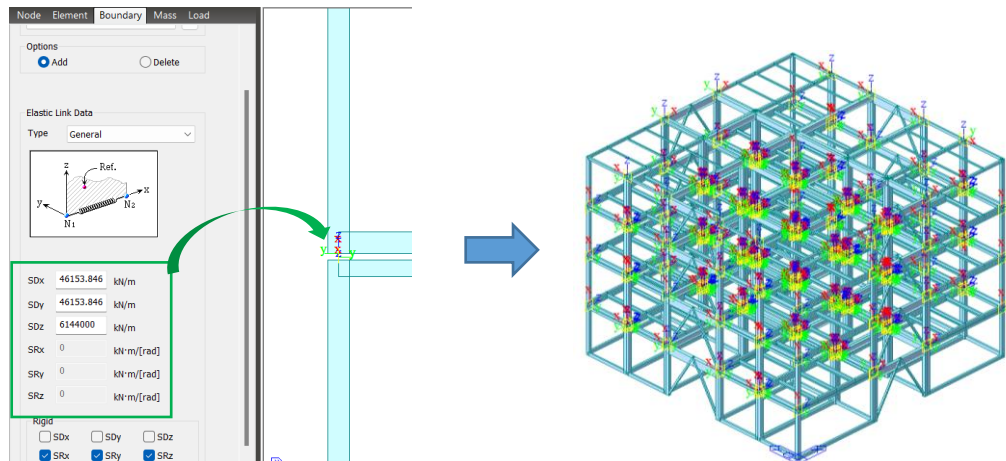
<i>Spring Constant</i>	b (mm)	h (mm)	t (mm)	L/l (mm)	A (mm ²)	k (kN/m)
$k_{axial-x}$	200	-	20	120	4000	6666666
$k_{axial-y}$	200	-	20	120	4000	6666666
k_{h-x}	200	-	20	120	4000	2564102
k_{h-y}	200	-	20	120	4000	2564102
k_{v-x}	200	-	20	120	4000	Rigid
k_{v-y}	200	-	20	120	4000	Rigid

Input nilai *spring constant* pada perangkat lunak memerlukan ketelitian dan keseragaman arah pada pemodelannya karena perangkat lunak cukup sensitif dengan orientasi sumbu lokal. Gambar 6 menunjukkan proses input nilai *spring constant* pada sambungan antar modul.

2.2. Analisis Dinamik Nonlinier

Analisis data untuk parameter gempa dilakukan dari penentuan respons spektrum target berdasarkan Buku Peta Sumber dan Bahaya Gempa Tahun 2024 untuk Kota Jakarta Pusat, dilanjutkan dengan mencari rekaman gempa untuk *ground motion*. Proses pengolahan data *ground motion* umumnya meliputi:

1. *Spectral matching/amplitude scaling*, penentuan kedua metode ini umumnya didasarkan pada hasil yang dituju, bila merujuk untuk *average response* maka *spectral matching* adalah metode optimum.
2. Pengecekan rentang periode *matching/scaling* berdasarkan SNI 1726-2019 pasal 11.2.3.1 dan SNI 8899-2020 pasal 8.1.



Gambar 6. Proses Input *Spring Constant* dan Hasil Akhir pada Struktur

3. Iterasi proses *matching*, jika hasil luaran masih ditemukan ketidaksesuaian seperti nilai rata-rata pencocokkan yang di bawah target maupun deviasi antara respons spektrum target dan rekaman gempa melebihi 10%.

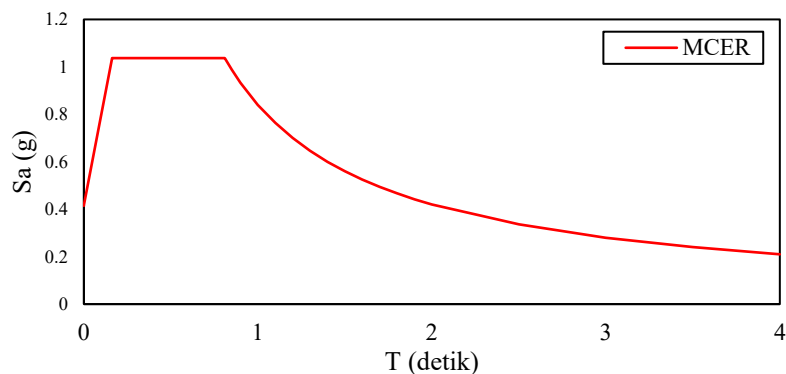
Hasil analisis struktur dengan metode nonlinier dinamik memiliki luaran berupa respons struktur per rekaman gempa, kurva histeresis, serta pola kelelahan sendi plastis pada elemen struktur. Peninjauan pembentukan sendi plastis pada rangka bresing serta interaksi antar modul menjadi tujuan dari analisis struktur dengan metode nonlinier dinamik. Setelah proses ekstraksi data hasil analisis nonlinier dapat dilanjutkan ke tahap pengkajian hasil analisis berupa evaluasi kinerja seismik, terdiri dari: perilaku struktur berdasarkan gaya dalam, level kinerja komponen struktur, level kinerja struktur keseluruhan, pola kegagalan komponen dan struktur, perilaku nonlinier komponen dan struktur. Beberapa hal yang ditargetkan untuk diteliti:

1. Membandingkan asumsi desain pada bangunan konvensional dan PPVC untuk menjadi input perangkat lunak analisis struktur.
2. Mengevaluasi interaksi yang terjadi antar modul dengan temuan asumsi desain PPVC.
3. Mengevaluasi perilaku bangunan modular rangka baja yang dianalisis dengan beban lateral akibat gempa.
4. Mengevaluasi kinerja seismik PPVC secara nonlinier dengan profil baja sesuai katalog yang tersedia di Indonesia.
5. Menganalisis penampang fiber hasil analisis nonlinier dan pola kegagalannya dengan kontrol tegangan vs regangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Modifikasi Rekaman Gerak Tanah

Penelitian ini menggunakan parameter kegempaan yang merujuk pada SNI 1726:2019 dan Kota Jakarta adalah referensi untuk studi kasus target spektrumnya. Perlu diperhatikan bahwa pencocokkan spektral untuk metode riwayat waktu nonlinier menggunakan gempa dengan periode ulang 2500 tahun yang merupakan *Maximum Considered Earthquake* (MCE_R) bukan *Design Basis Earthquake* (DBE) seperti yang digunakan untuk desain metode dinamik linear (BSN, 2019). Proses ekstraksi data rekaman gempa perlu memanfaatkan Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia yang menunjukkan kontur magnitudo serta rentang jarak untuk daerah Jakarta dengan periode ulang 2500 tahun, grafik respons spektrum yang digunakan seperti pada Gambar 7 serta data rentang magnitudo dan jarak pencarian rekaman gempa terdapat pada Tabel 4.



Gambar 7. Grafik Respons Spektrum Target Jakarta Periode Ulang 2500 Tahun

Tabel 4. Parameter untuk Proses Ekstraksi Data Rekaman Gerak Tanah dari Peta Deagregasi

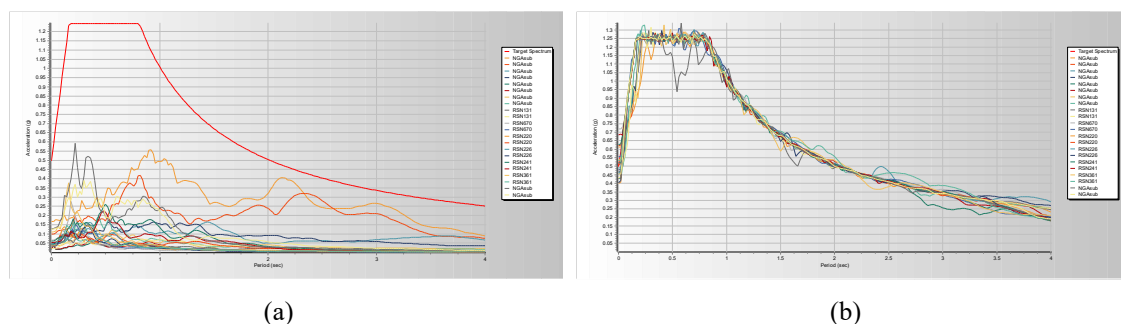
Jenis Sumber Gempa	Rentang Magnitudo, M	Rentang Jarak, R (km)
Sesar dangkal	5,8 – 6,0	40 – 50
Benioff	7,4 – 7,8	120 – 150
Megathrust	8,6 – 8,8	150 – 200

Penelitian ini menggunakan 11 pasang rekaman gempa, artinya ada 22 rekaman gempa yang perlu dicocokkan dengan respons spektrum target. Kode EW (*East-West*) pada rekaman gempa umumnya digunakan untuk sumbu X, NS (*North-South*) untuk sumbu Y, sedangkan untuk gempa vertikal ditandai dengan Z atau UP. Penggunaan rekaman gempa vertikal digunakan untuk kasus khusus yang mengharuskan pengecekan perilaku vertikal, salah satu contohnya seperti kantilever bentang panjang (Lesmana, 2023). Ekstraksi data dari situs NHR3 dan NGAWest2 PEER Berkeley ditentukan dari input yang terdapat pada Tabel 4, berdasarkan input tersebut diperoleh 11 pasang rekaman gempa untuk analisis yang disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Detail Rekaman Gerak Tanah yang Digunakan untuk Analisis

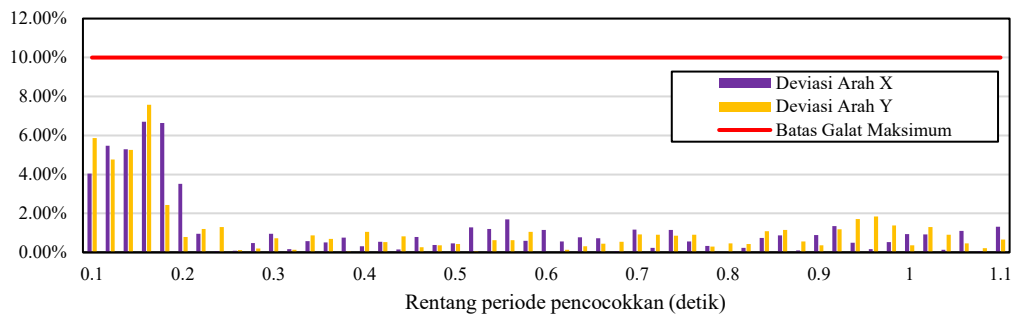
Sumber Gempa	RSN	Kejadian Gempa	Lokasi	Tahun	M	R (km)
Sesar dangkal	131	Friuli 02	Italia	1976	5,91	41,39
Sesar dangkal	670	Whittier Narrows 01	Amerika Serikat	1987	5,99	41,32
Sesar dangkal	2206	Chi-Chi 02	Taiwan	1999	5,90	46,27
Sesar dangkal	2260	Chi-Chi 03	Taiwan	1999	5,90	43,09
Sesar dangkal	2410	Chi-Chi 04	Taiwan	1999	5,90	40,55
Sesar dangkal	3616	Taiwan Smart 1	Taiwan	1999	5,80	41,83
Benioff	4040722	Ibaraki Offshore	Jepang	2011	7,92	113,65
Benioff	4029232	Miyagioki	Jepang	2004	7,40	114,94
Benioff	4030519	Kushirooki	Jepang	2004	7,01	118,45
Megathrust	4001037	Tohoku	Jepang	2011	9,12	145,46
Megathrust	4001101	Tohoku	Jepang	2011	9,12	124,48

Pencocokkan spektral harus menghasilkan rata-rata (*mean*) yang bernilai sama atau melebihi 110% target respons spektrum rencana. Artinya respons spektrum target MCE_R yang direncanakan perlu dikali 1,1 sampai dengan 1,2 dalam proses pencocokkan untuk memenuhi kriteria yang diatur SNI 1726:2019 pasal 11.2.3.3 sehingga respons spektrum yang digunakan untuk pencocokkan adalah respons spektrum yang sudah diperbesar 10% – 20%. Gambar 8 memberikan ilustrasi mengenai spektrum yang digunakan untuk pencocokkan dan rentang periode yang ditinjau serta hasil akhir pencocokkan berupa grafik *mean*.



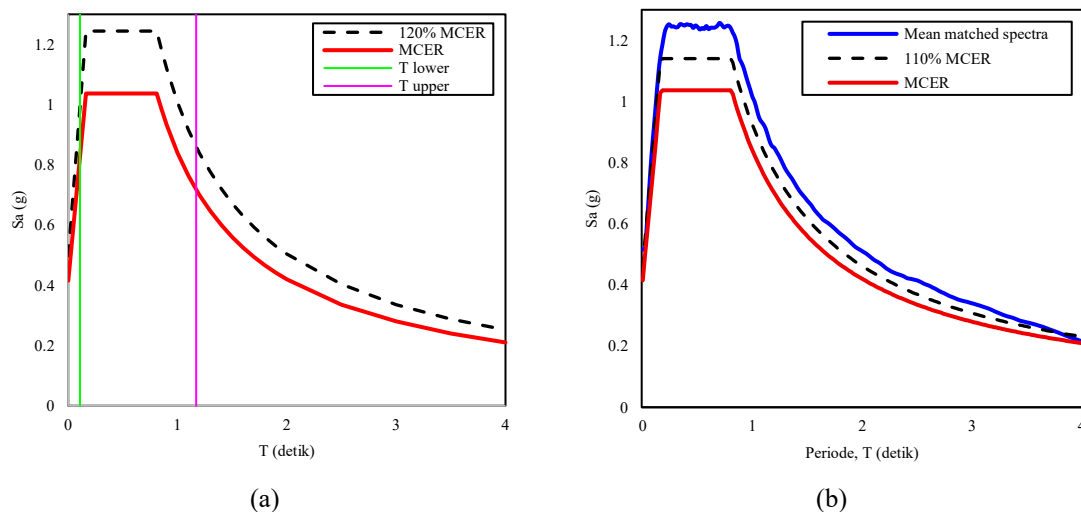
Gambar 8. Rekaman Gempa (a) Sebelum Pencocokkan Spektral, (b) Setelah Pencocokkan Spektral

SNI 1726:2019 pasal 7.9.2.3.1 mengatur batas maksimum untuk deviasi nilai respons spektrum target dengan hasil pencocokkan tidak melampaui 10% pada periode rentang pencocokkan. Jika hasil pencocokkan spektral pada rentang T_{lower} dan T_{upper} terdapat deviasi lebih dari 10% maka proses iterasi dilakukan sampai memenuhi ketentuan. Efek deviasi yang melebihi 10% adalah rekaman gempa yang tidak representatif karena proses pencocokkan spektral memiliki tujuan untuk menyesuaikan nilai frekuensi serta akselerasi terhadap respons spektrum target sehingga respons struktur akan menjadi bias jika tidak dilakukan dengan benar. Pengecekan atau kontrol penerimaan aspek tersebut diilustrasikan pada Gambar 9 untuk pengecekan kualitatif dan kuantitatif secara bersamaan.



Gambar 9. Kontrol Deviasi pada Rentang Periode Pencocokkan Spektral

Proses pencocokkan menghasilkan galat yang masih bisa diterima, karena dari pengecekan ketidaksesuaian pada periode T_{lower} dan T_{upper} tidak ditemukan deviasi yang melebihi 10%, artinya proses pencocokkan sudah teliti dan rekaman gempa bisa digunakan untuk analisis nonlinier riwayat waktu. Perbandingan respons spektrum target dengan rata-rata respons spektrum hasil pencocokkan diperlihatkan pada Gambar 10, dengan dibantu oleh respons spektrum yang ditingkatkan 10% sebagai kontrol sesuai SNI 1726:2019.

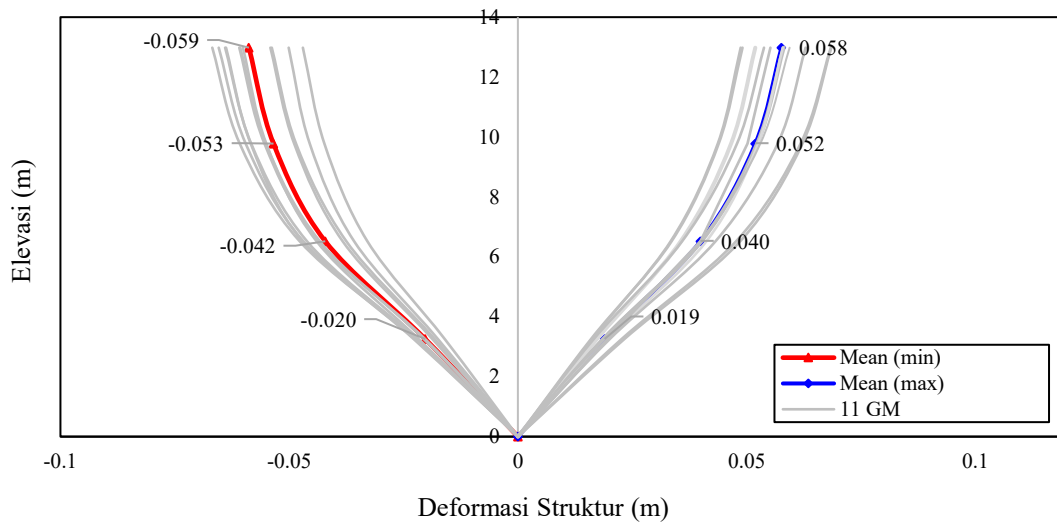


Gambar 10. (a) Rentang Periode Pencocokkan Spektral dan (b) Hasil Pencocokkan Spektral

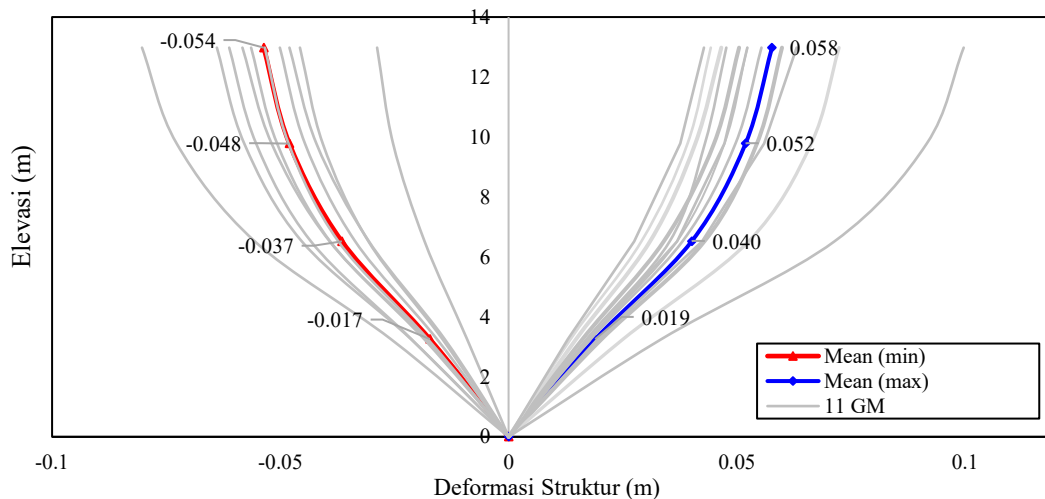
3.2. Analisis Struktur

Perbedaan antara analisis dinamik linear dan nonlinier adalah deformasi pada struktur yang bergantung pada waktu atau tidak. Pada analisis dinamik linier perpindahan dikontrol oleh *mode shape* bangunan, sedangkan pada analisis nonlinier bergantung pada rekaman gempa itu sendiri, yaitu akselerasi/kecepatan/perpindahan *versus* waktu. Untuk pengambilan data deformasi struktur diambil nilai maksimum pada waktu tertentu untuk dievaluasi sejauh mana perpindahan yang terjadi akibat rekaman-rekaman gempa yang berbeda. Visualisasi deformasi struktur hasil analisis nonlinier dinamik disajikan dalam bentuk positif dan negatif, hal tersebut terjadi karena

sifat gempa yang *back and forth* (bolak-balik) sehingga memberikan respons ke berbagai arah seperti yang ditampilkan Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Deformasi Struktur Bangunan Arah X



Gambar 12. Deformasi Struktur Bangunan Arah Y

Hasil yang digunakan adalah nilai *mean* dari seluruh rekaman gempa, mengingat proses modifikasi rekaman gempa yang digunakan adalah pencocokkan spektral sehingga luaran yang digunakan adalah rata-rata dari seluruh rekaman. Penerimaan deformasi berdasarkan ASCE 41 tidak diatur secara resmi untuk struktur global, namun hasil luaran deformasi seluruh rekaman gempa memberikan gambaran rekaman gempa mana yang menghasilkan hasil deformasi terbesar. Rekapitulasi deformasi struktur berdasarkan Gambar 11 dan Gambar 12 terdapat pada Tabel 6.

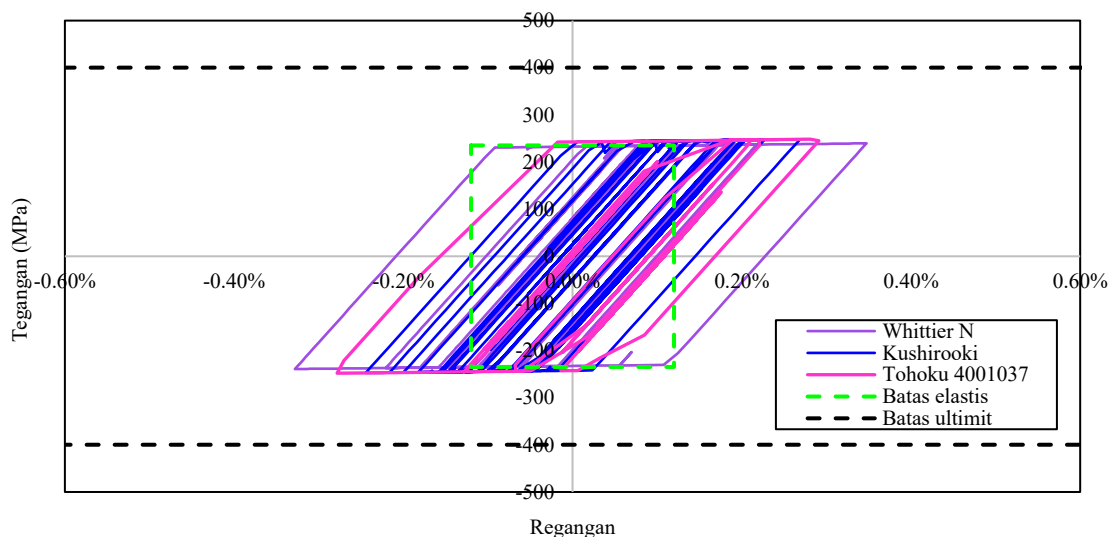
Berdasarkan Tabel 6 dapat disimpulkan bahwa sesar dangkal memberikan energi seismik yang besar sehingga deformasi yang terjadi memberikan nilai yang ekstrem dibanding rekaman

gempa lainnya untuk setiap sumbu. Analisis nonlinier riwayat waktu erat kaitannya dengan kurva histerisis, dengan kurva tersebut dapat dipelajari pola keruntuhan elemen struktur seperti breis, balok, dan kolom yang menerima gaya gempa. Kurva histerisis dapat berupa hubungan gaya vs deformasi, hubungan momen vs kurvatur, atau tegangan vs regangan. Pelelehan elemen struktur, penurunan kekakuan, dan daktilitasnya dapat diketahui dari pembacaan kurva histerisis.

Tabel 6. Rekapitulasi Kejadian Gempa dengan Deformasi Ekstrem

Jenis Deformasi	Rekaman Gempa	Jenis Gempa
Arah sumbu X minimum	ChiChi 04	Sesar dangkal
Arah sumbu X maksimum	Whittier Narrows	Sesar dangkal
Arah sumbu Y minimum	ChiChi 04	Sesar dangkal
Arah sumbu Y maksimum	ChiChi 02	Sesar dangkal

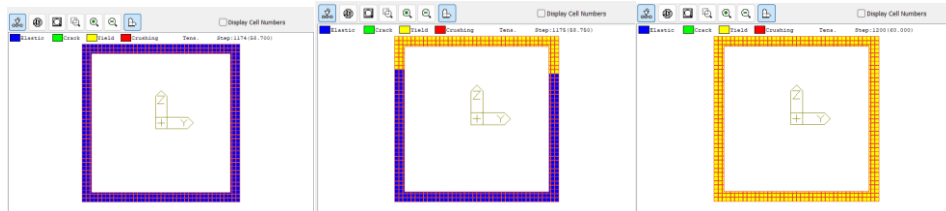
Tegangan dan regangan pada elemen struktur baja merupakan parameter yang perlu dijaga karena tegangan yang melampaui batas leleh akan menyebabkan elastisitas baja menurun, namun hal tersebut masih dapat diterima selama penampang yang digunakan daktil. Berbeda halnya dengan tegangan yang terjadi melampaui tegangan ultimit, dampaknya adalah kerusakan elemen struktur. Nilai tegangan dan regangan kontrol dapat diperoleh dari katalog produsen baja, dalam hal ini batas tegangan elastis adalah 235 MPa dan regangan adalah 0,12%. Kurva histerisis tegangan versus regangan terdapat pada Gambar 13 dengan mengambil sampel setiap gempa dari sesar dangkal yang diwakili Whittier Narrows, Benioff oleh Kushirooki, dan Megathrust oleh Tohoku 4001037.



Gambar 13. Kurva Histerisis Tegangan vs Regangan Tiga Sampel Gempa pada Breis (Sampel Elemen 661)

Gambar 13 menunjukkan tegangan dan regangan yang terjadi selama gempa berlangsung pada elemen breis nomor 661 (elemen breis lantai dasar) pada model MIDAS Gen kehilangan

elastisitasnya karena sudah melampaui batas tegangan dan regangan elastisnya. Tentunya hal tersebut masih dapat diterima selama kurva histerisis tidak menunjukkan nilai yang *drop* secara tiba-tiba dan regangan tidak melampaui batas izin (elongasi) dari produsen. Pola leleh penampang fiber ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Pola Pelelehan Sendi Plastis (Plastifikasi) Penampang Fiber Breis

Penggunaan penampang fiber menghasilkan pola pelelehan yang tidak sekaligus (*sequential*) yang sangat bergantung pada *time step*-nya. Pelelehan awal dimulai pada *step* 1175 dan penampang belum sepenuhnya leleh, dan pada *step* ke-1200 barulah penampang mengalami leleh sepenuhnya. Perlu dibedakan antara pola kegagalan beton dan baja, pada baja pola kegagalan penampang fiber tidak akan melalui proses *cracking*.

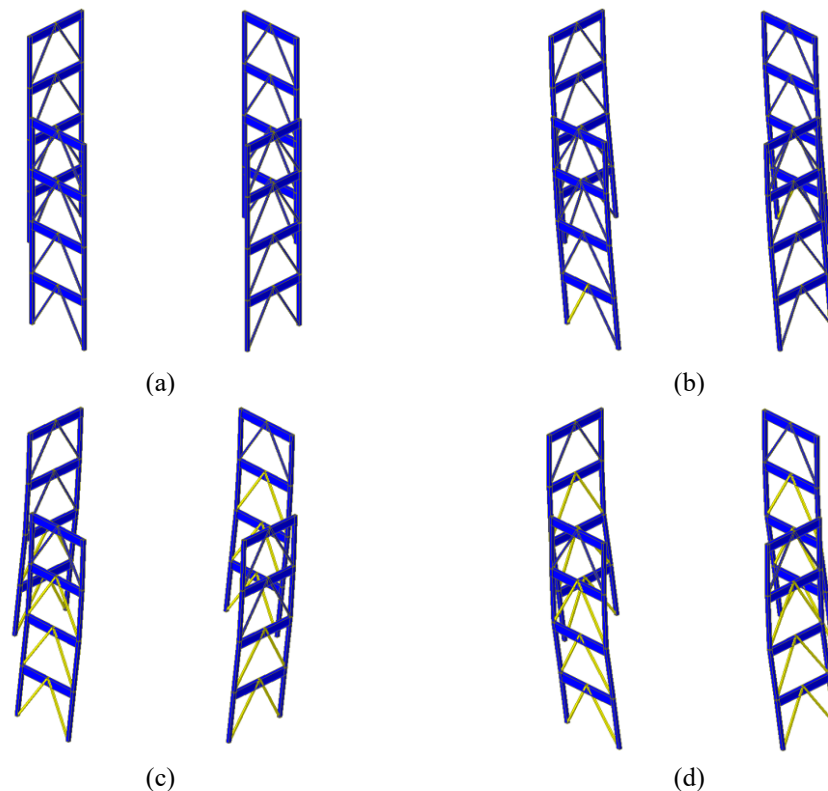
Sendi plastis merupakan kondisi yang perlu diperhatikan untuk evaluasi struktur bangunan, urutan pelelehan sendi plastis merupakan kontrol global untuk struktur sehingga urutan yang tidak sesuai akan berimbas pada kegagalan struktur. Urutan pelelehan pada struktur sangat perlu diperhatikan, karena urutan pelelehan yang dimulai dari struktur kritis seperti kolom akan menyebabkan ketidakstabilan bahkan keruntuhan prematur pada struktur global. Pola pelelehan sendi plastis secara berurutan ditampilkan pada Gambar 15 yang diawali dari kondisi diam sampai *final step* rekaman gempa.

Berdasarkan luaran analisis perangkat lunak, untuk seluruh skenario jenis gempa memberikan hasil/kondisi pelelehan yang dapat diterima, *first yield* (leleh pertama kali) terjadi pada breis, jika elemen pertama yang leleh adalah kolom maka perlu diperbaiki dari segi mutu maupun penampang, karena kegagalan struktur RBKK didesain untuk leleh pada breis.

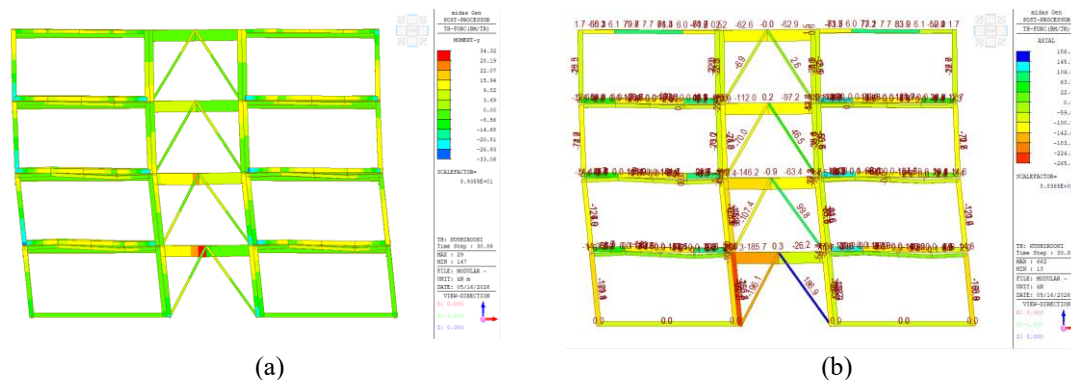
3.3. Perilaku Struktur dan Kriteria Penerimaan

Struktur yang didesain secara gravitasi tidak dapat diabaikan sepenuhnya terhadap respons dinamik dari beban riwayat waktu. Pada bagian ini, fokus tinjauan ada pada perilaku PPVC selaku bangunan gravitasi yang terkena efek seismik. ASCE 7-16 juga memberikan rekomendasi bahwa sistem struktur penahan gravitasi tidak bisa sepenuhnya diabaikan, perlu *judgement* yang tepat untuk kondisi tersebut. Ketelitian model perangkat lunak sangat berpengaruh terhadap hasil luaran kondisi tersebut, jika model tidak tepat, struktur penahan gravitasi dapat memikul beban lateral dengan persentase lebih dari seharusnya. Tinjauan perilaku

PPVC dilihat dari gaya dalam berupa momen, aksial, dan geser. Gambar 16 menunjukkan kontur gaya aksial dan momen lentur pada struktur bangunan untuk sampel rekaman gempa Kushirooki.



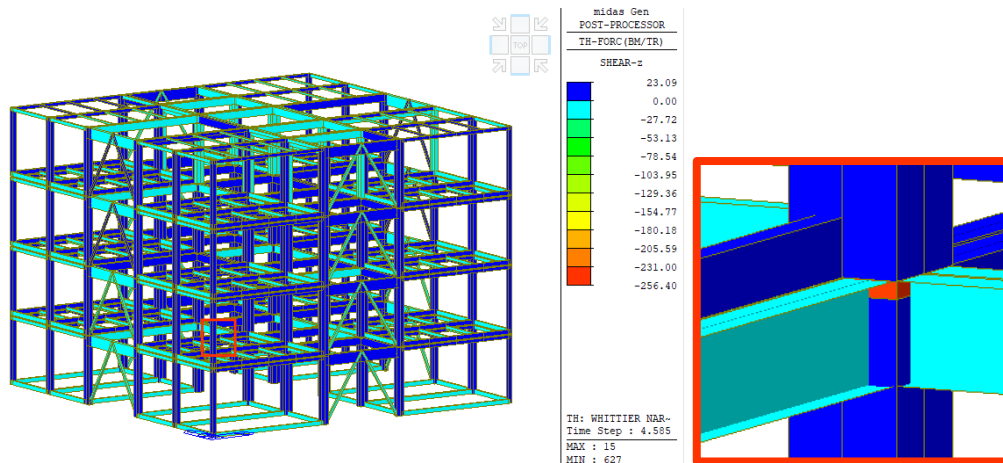
Gambar 15. Kondisi RBKK (a) sebelum gempa, (b) leleh pertama, (c) percepatan puncak gempa, (d) *final step*



Gambar 16. (a) Gaya Aksial, (b) Momen Lentur pada Struktur Bangunan

Momen terbesar terjadi pada balok RBKK dengan nilai 34,42 kNm, dan pada pertemuan modul PPVC sebesar 33,06 kNm. Besarnya momen pada balok RBKK diakibatkan distribusi gaya aksial dari breis dan akibat perilsan momen pada kedua ujung balok sehingga momen terkonsentrasi di tengah bentang. Berdasarkan Gambar 16.b model struktur memiliki perilaku sesuai kaidah teknis perencanaan, untuk breis menerima gaya dengan nilai yang berlawanan

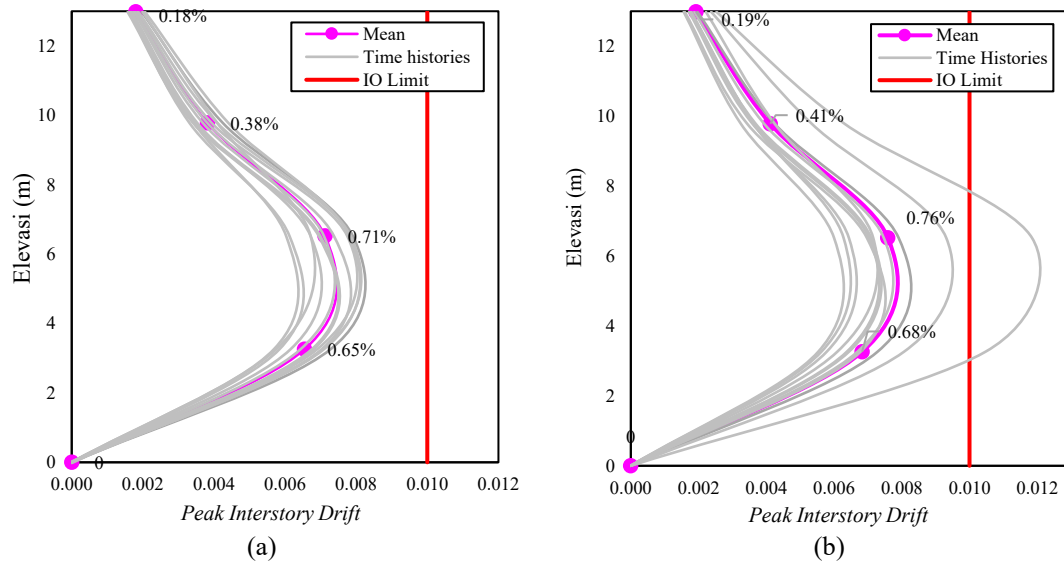
terdapat tarik dan tekan pada waktu yang bersamaan pada area lantai dasar rasio gaya tarik dan tekannya adalah 48:52. Modul PPVC menerima gaya aksial yang cukup tinggi yaitu interval 104,66 kN dan 145,78 kN berupa tarik pada area lantai. Selanjutnya pengecekan perilaku pada kondisi geser ditampilkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Gaya Geser Terbesar pada Struktur

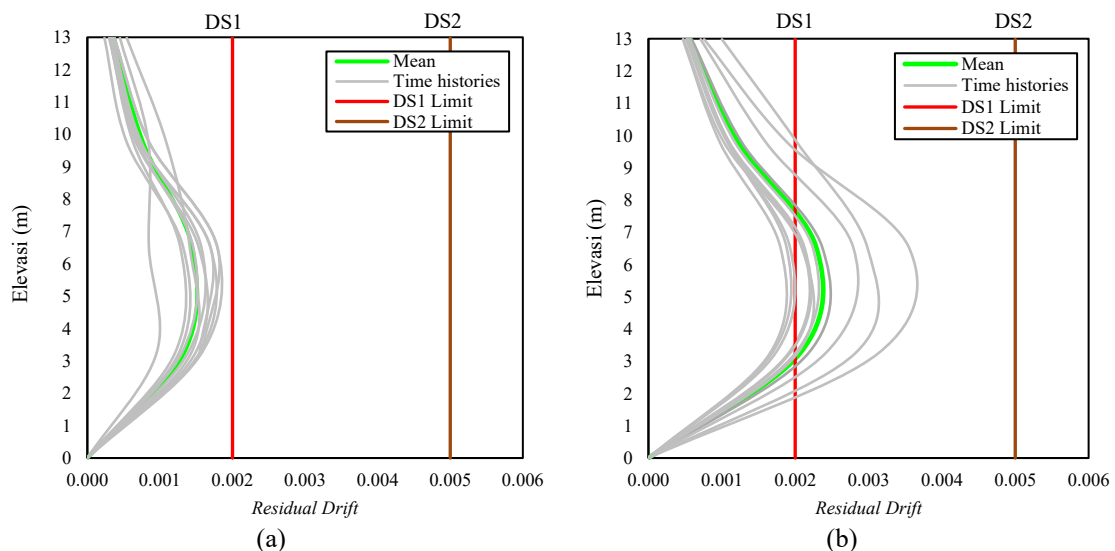
Gaya geser yang cukup besar terjadi pada pertemuan antara modul PPVC dan struktur gravitasi non PPVC, dapat disimpulkan bahwa interaksi antara modul perlu diperhatikan untuk mendesain sambungan pada area pertemuan tersebut, artinya *shear connector* untuk sambungan antar modul berperan penting untuk mempertahankan integritas struktur PPVC akibat guncangan gempa. Jika sambungan didesain secara komprehensif maka antar modul akan terciptanya *interlocking mechanism* sehingga pergerakan struktur dapat seragam, walaupun pelat tidak monolit sepenuhnya.

Kriteria penerimaan hasil analisis dinamik nonlinier diatur dalam beberapa referensi seperti NIST GCR 17-917-45 dan ASCE 41-17. Penelitian ini mengacu kriteria penerimaan ASCE 41-17 dari penerimaan elemen struktur yang terkontrol deformasi dan gaya hingga kriteria penerimaan kinerja struktur secara global. ASCE 41-17 membatasi *interstory drift* yang terjadi selama gempa berlangsung, proses evaluasi kinerja struktur dengan nonlinier dinamik tidak perlu amplifikasi apapun, perilaku murni struktur bangunan yang dibebani dengan percepatan gempa merupakan tinjauan utama. Kondisi deformasi struktur dikorelasikan dengan tinggi tingkat (*height level*) untuk memperoleh *interstory drift*. Pengecekan *interstory drift* dapat dikaitkan dengan kriteria penerimaan struktur secara global. Dari 11 pasang rekaman gempa, Gambar 18 menunjukkan kondisi *peak interstory drift* pada struktur rumah susun yang diteliti.



Gambar 18. *Peak Interstory Drift* (Transien) Struktur (a) Arah X, dan (b) Arah Y

Struktur rumah susun secara kualitatif dan kuantitatif dapat dikategorikan memiliki level kinerja *Immediate Occupancy* (IO), karena *peak interstory drift* yang terjadi masih di bawah batas IO yaitu 1,0%. Adapun pada arah Y terdapat satu rekaman yang melebihi batas IO yaitu ChiChi 02, kondisi tersebut masih dapat diterima karena masih dalam rentang *Life Safety* (LS) dan secara *mean* kinerja struktur masih termasuk kinerja IO. Setelah struktur dievaluasi *transient drift*-nya, selanjutnya pengecekan *residual drift* yang bersifat permanen untuk menentukan jenis perbaikan yang terjadi pada kondisi paska gempa. Ilustrasi *residual drift* untuk kedua sumbu ditampilkan Gambar 19.



Gambar 19. *Residual Interstory Drift* (Permanen) Struktur (a) Arah X, dan (b) Arah Y

Tingkat kerusakan pada arah X masih tergolong *Damage State* 1 (DS1), hal tersebut disimpulkan dari grafik *mean residual drift* yang masih di bawah 0,2%, sedangkan pada arah Y menunjukkan telah masuk DS2, artinya struktur sudah memerlukan perbaikan secara moderat karena *drift* sisa yang terjadi sudah melampaui tingkat operasional. Berbeda hal ketika nilai *mean* masih di bawah DS1 tetapi salah satu rekaman melampaui nilai DS1, tingkat kerusakan yang dipilih adalah DS1. Selanjutnya evaluasi kinerja struktur dapat direkapitulasi sesuai dengan pengukuran metrik yang direkomendasikan ASCE 41-17 dari kinerja global sampai kinerja lokal struktur. Tabel 7 menunjukkan rekapitulasi kinerja struktur dan kriteria penerimaannya.

Tabel 7. Rekapitulasi Kriteria Penerimaan Struktur PPVC dengan Analisis Dinamik Nonlinier

Nomor	Komponen Analisis Riwayat Waktu	Kinerja Struktur Hasil Analisis	Batas Maksimum
1	<i>Drift</i> lantai maksimum (transien)	IO	CP
2	<i>Drift</i> lantai residual	<i>Damage State</i> 2	Tidak ada
3	Komponen <i>deformation-controlled</i>		
	a. Breis tekan	LS	CP
	b. Breis tarik	IO	CP
	c. Kolom tarik	IO	CP
4	Kinerja struktur yang melampaui batas pada rekaman gempa tunggal	0/11, tidak ada rekaman gempa melampaui batas CP	1/11

4. KESIMPULAN

Asumsi desain PPVC dengan bangunan konvensional memiliki perbedaan pada permodelan sambungan antar elemennya, PPVC memerlukan *spring* untuk koneksi antar *node* elemennya. Struktur bangunan yang disusun oleh PPVC memiliki asumsi pelat yang tidak monolit sehingga cara paling aman untuk desain diafragma adalah membebaninya ke struktur baja pada sistem penahan gaya lateralnya. PPVC didesain untuk menahan gravitasi, namun perlu diperhatikan efek aksial dan geser akibat beban gempa sehingga perlu perhatian khusus pada elemen horizontal PPVC seperti balok untuk aksial dan sambungan antar modul untuk geser sehingga PPVC terkontrol oleh aksial dan geser dalam sistem struktur.

PPVC yang dikombinasikan dengan RBKK menghasilkan distribusi beban gempa yang dipikul RBKK dengan proses plastifikasi yang dimulai dari breis, perilaku tersebut merupakan ekspektasi yang tercapai dari kombinasi PPVC dengan RBKK. PPVC fokus menahan beban gravitasi yang sudah didesain, namun tetap menerima efek dari beban lateral gempa dengan fokus pada area sambungan. Berdasarkan hasil perilaku tersebut, penggunaan PPVC di Indonesia pada level kegempaan tinggi perlu didesain dengan kombinasi sistem penahan gaya lateral. Solusi terbaik untuk desain PPVC adalah mengombinasikannya dengan sistem penahan gaya lateral seperti RBKK maupun *core wall* beton untuk menanggung beban lateral akibat gempa kuat.

Level kinerja struktur rumah susun empat lantai yang diteliti dengan memanfaatkan katalog produk baja di Indonesia masuk kategori *Immediate Occupancy* (IO), namun untuk kondisi *residual drift*, struktur rumah susun memasuki kategori kerusakan (*damage state*) tingkat ke-2 sehingga perbaikan tingkat menengah perlu dilakukan untuk mempertahankan stabilitasnya. Artinya, secara numerik kemampuan struktur kombinasi PPVC dan RBKK untuk rumah susun dengan jumlah lantai 4 (empat) dapat dibangun dalam kondisi lingkungan dengan gempa kuat, hal ini didasari oleh pemilihan kota Jakarta dengan kelas situs tanah lunak (SE) yang memiliki risiko kegempaan tinggi di Indonesia. Bangunan yang lebih lebar dan lebih tinggi dapat menjadi penelitian lebih lanjut.

5. DAFTAR PUSTAKA

- AbdelMalek, H., Hasan, T. K., & Moustafa, A. (2023). Nonlinear time history analysis evaluation of optimized design for medium to high rise buildings using performance-based design. *Ain Shams Engineering Journal*, 14. doi:10.1016/j.asej.2022.102081
- AISC. (2022). *Seismic Provision for Structural Steel Buildings, AISC 341-22*. United States of America: American Institute of Steel Construction.
- Alembagheri, M., Sharafi, P., Hajirezaei, R., & Samali, B. (2020). Collapse capacity of modular steel buildings subject to module loss scenarios: The role of inter-module connections. *Engineering Structures*. doi:10.1016/j.engstruct.2020.110373
- American Society of Civil Engineers. (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings* (ASCE/SEI 41-17). ASCE.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung (SNI 1726:2019). BSN.
- Badan Standarisasi Nasional. (2020). Tata Cara Pemilihan dan Modifikasi Gerak Tanah Permukaan untuk Perencanaan Gedung Tahan Gempa (SNI 8899:2020). BSN.
- Balendra, T., & Li, Z. (2008). Seismic Hazard of Singapore and Malaysia. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 8(1), 57-63. doi:10.56748/ejse.8601
- Bani, F. A., & Agustapraja, H. R. (2020). Model Rumah Modular sebagai Perumahan Rakyat di Daerah Gempa Madiun. *JCEBT (Journal of Civil Engineering, Building and Transportation)*, 63-72. Retrieved from <http://ojs.uma.ac.id/index.php/jcebt>
- Building and Construction Authority. (2024). *Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) Prefabricated Prefinished Volumetric Construction*. Retrieved December 20, 2025, from https://www1.bca.gov.sg/docs/default-source/docs-corp-buildsg/ppvc_guidebook.pdf?sfvrsn=1a7b4580_2
- Chua, Y., Liew, J. R., & Pang, S. (2020). Modelling of connections and lateral behavior of high-rise modular steel buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, 166. doi:10.1016/j.jcsr.2019.105901
- Deierlein, G. G., Reinhorn, A. M., & Willford, M. R. (2010). Nonlinear structural analysis for seismic design. Gaithersburg, MD: NEHRP Consultants Joint Venture, a partnership of the Applied Technology Council .
- Deng, E.-F., Zong, L., Ding, Y., Zhang, Z., Zhang, J.-F., Shi, F.-W., . . . Gao, S.-C. (2020). Seismic performance of mid-to-high rise modular steel construction - A critical review. *Thin-Walled Structures*, 155. doi:10.1016/j.tws.2020.106924

- Lesmana, Y. (2023). *Handbook Basic Theory Nonlinear Time History Analysis*. Indonesia: Nas Media Pustaka.
- Liew, J. R., Dai, Z., & Chua, Y. (2018). Steel Concrete Composite Systems for Modular Construction of High-rise Buildings. *12th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures (ASCCS 2018)*, (pp. 59-65). Valencia. doi:10.4995/ASCCS2018.2018.7220
- NIST. (2017). *Recommended Modelling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Analysis of Seismic Evaluation, Retrofit, and Design*. 2017: Applied Technology Council. doi:10.6028/NIST.GCR.17-917-45
- Ohiomah, I., & Oguntona, O. (2025). Factors Driving the Adoption of Modular Building Practices in The Construction Industry. In C. S. Kumar, H. Majumder, A. Sharma, & F. Fernandes (Ed.), *4th International Conference on Advanced Manufacturing and Materials Processing*. Bali: MDPI. doi:10.3390/engproc2025114005
- Palmiotta, A., Garbellini, S., Audisio, L., Sulla, R., D'Amato, M., & Gigliotti, R. (2023). Seismic behaviour of steel modular buildings: numerical analysis and comparisons between different design solutions. *Procedia*, 44, 1156-1163. doi:10.1016/j.prostr.2023.01.149
- Wibowo, B. A., Saputra, A., & Satyarno, I. (2024). Analisis unit modular baja dengan pendekatan frame element. *Proceeding Civil Engineering Research Forum*. 4, pp. 289-300. Universitas Islam Indonesia.
- Wuni, I. Y., & Shen, G. Q. (2020). Critical success factors for management of the early stages of prefabricated prefinished volumetric construction project life cycle. *ECAM (Engineering, Construction and Architectural Management)*. doi:10.1108/ECAM-10-2019-0534
- Ye, Z., Giriunas, K., Sezen, H., Wu, G., & Feng, D.-C. (2021). State-of-the-art review and investigation of structural stability in multi-story modular building. *Journal of Building Engineering*, 33. doi:10.1016/j.jobbe.101844