

PENENTUAN BATASAN TINGKAT KERUSAKAN SEISMIK PADA BANGUNAN NON-ENGINEERED DI PACITAN

Stefanus Adi Kristiawan^{1*}, Hendramawat Aski Safarizki², Edy Purwanto¹, Senot Sangadji¹, Ahda Dinansya Trisnawan¹ dan Tonny Setyo Nugroho³

^{1*}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Surakarta
e-mail: s.a.kristiawan@ft.uns.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Veteran Bangun Nusantara, Sukoharjo
e-mail: hendra.mawat@gmail.com

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Surakarta
e-mail: edypurwanto@student.uns.ac.id; s.sangadji@ft.uns.ac.id; dinansya@student.uns.ac.id

³Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kabupaten Pacitan
e-mail: tonny.sn@gmail.com

ABSTRAK

Bangunan non-engineered merupakan bangunan yang banyak dijumpai di lapangan terutama bangunan hunian masyarakat kelas bawah. Survei yang telah dilakukan terhadap bangunan hunian masyarakat di Kabupaten Pacitan mengkonfirmasi hal ini dengan banyaknya temuan indikator ketidaksesuaian bangunan dalam memenuhi persyaratan teknis. Bangunan non-engineered sangat rentan mengalami kerusakan saat gempa. Evaluasi seismik terhadap bangunan ini memiliki nilai urgensi yang tinggi agar dapat diambil langkah-langkah antisipatif dalam menghadapi gempa yang dapat terjadi sewaktu-waktu. Makalah ini menyajikan hasil incremental dynamic analysis (IDA) terhadap contoh bangunan non-engineered yang ada di Pacitan. Dynamic pushover curve yang diperoleh dari IDA dievaluasi lebih lanjut untuk mengidentifikasi batasan tingkat kerusakan (damage limit state) yang relevan dengan struktur NEB. Batas tingkat kerusakan pada beragam level (DS1-DS4) yang diusulkan dalam penelitian ini dapat direkomendasikan untuk digunakan dalam evaluasi kerapuhan seismik struktur NEB.

Kata kunci: bangunan non-engineered, incremental dynamic analysis, damage state

PENDAHULUAN

Wilayah Kabupaten Pacitan merupakan wilayah yang sering mengalami gempa bumi. Gempa yang terjadi telah menyebabkan banyak korban, terutama disebabkan karena runtuhnya bangunan-bangunan hunian masyarakat. Hasil survei menunjukkan bahwa bangunan hunian di Pacitan tergolong sebagai *non-engineered building* (NEB), dimana bangunan-bangunan tersebut didirikan tanpa bantuan teknis perencanaan yang benar, tetapi hanya mengikuti kebiasaan dan praktek setempat (Watanabe et al., 2018). NEB ditandai dengan adanya ketidaksesuaian konstruksi bangunan dengan peraturan teknis terkait desain bangunan. Ketidaksesuaian dimaksud dapat berupa mutu material yang dibawah standar, penulangan dan detailnya yang tidak memenuhi syarat, proses pelaksanaan/pekerjaan yang buruk dan berpengaruh terhadap kualitas bangunan, dll (Boen & Pribadi, 2007; Charleson et al., 2016).

Hasil survei lapangan memberikan gambaran tanda-tanda NEB pada bangunan rumah tinggal di wilayah Pacitan, antara lain:

Penggunaan tulangan polos

Tulangan polos banyak digunakan pada pembangunan rumah tinggal karena alasan lebih murah. Tulangan jenis ini memiliki lekatan dengan beton yang rendah sehingga tidak bisa mengembangkan kekuatan penuh saat menerima gaya tarik, terutama saat gempa dimana struktur menerima beban siklik (Zhao et al., 2023). Tulangan akan cenderung mengalami slip sebelum mencapai kekuatan lelehnya sehingga elemen struktur yang menggunakan tulangan polos tidak dapat memikul gaya sesuai yang diharapkan. Dengan demikian



kuantifikasi kinerja seismik struktur beton yang menggunakan tulangan polos harus memperhitungkan slip ini (Paderno et al., 2021).

Diameter tulangan yang tidak sesuai

Beton bertulang memiliki kekuatan yang baik karena menggabungkan kekuatan beton yang sanggup menerima gaya tekan yang tinggi tetapi lemah terhadap gaya tarik dan tulangan yang mampu memikul gaya tarik yang tinggi. Dimensi tulangan yang dipasang akan menentukan seberapa besar gaya tarik maksimum yang bisa dipikul oleh beton bertulang tersebut. Dalam pembangunan rumah tinggal di wilayah Pacitan, banyak dijumpai diameter tulangan yang lebih kecil dari dimensi yang seharusnya. Kondisi ini merusak prinsip desain yang seharusnya menyediakan kuat lebih bahan sebagaimana diatur dalam pedoman perencanaan bangunan tahan gempa (SNI 1726:2019, 2019).

Jarak sengkang yang tidak memadai

Jarak sengkang maksimum telah diatur dalam peraturan beton terkait gempa pada bangunan (SNI 1726:2019, 2019). Hal ini dimaksudkan agar elemen struktur dapat memiliki kekuatan yang memadai dalam melawan gaya geser besar saat gempa terjadi (Wang et al., 2020). Selain itu, sengkang yang cukup memadai memiliki efek pengekanan terhadap inti beton sedemikian rupa akan melindungi inti beton dari *crushing* (Wang et al., 2020). Namun pada pembangunan rumah tinggal di wilayah Pacitan, ditemukan jarak sengkang yang berada pada kisaran 150-200 mm pada kolom dengan penampang 110 x 110 mm.

Detil *joint* yang tidak memenuhi syarat

Area *joint* merupakan titik krusial yang harus didesain sedemikian rupa tidak gagal mendahului kegagalan elemen lainnya. Secara hirarki *joint* harus lebih kuat dibandingkan dengan elemen-elemen yang disambungkannya. Dengan demikian *joint* dapat berperan untuk meneruskan gaya-gaya dalam pada elemen struktur. Kekuatan *joint* dipengaruhi oleh detil tulangan pada area *joint* tersebut. Mengingat detil tulangan ini seringkali rumit pelaksanaannya, maka banyak dijumpai detil *joint* yang tidak memenuhi syarat. Sebagai contoh, jumlah sengkang yang tidak cukup serta detil pengangkuran tulangan yang hanya ditekek tanpa memperhatikan kebutuhan panjang yang dibutuhkan untuk penjangkaran. Kondisi *joint* yang seperti ini meningkatkan resiko keruntuhan total pada bangunan yang sangat berbahaya bagi keselamatan penghuninya (Ahmad et al., 2018; Rizwan et al., 2018).

Praktek pencampuran beton yang tidak terukur

Beton merupakan campuran semen, pasir, kerikil dan air serta bisa ditambahkan bahan-bahan lain untuk maksud tertentu. Kekuatan beton ditentukan oleh proporsi campuran bahan-bahan tersebut. Namun pada praktek pembangunan rumah tinggal di wilayah Pacitan, para pekerja mencampur beton tanpa takaran yang benar. Pencampuran dilakukan menurut kebiasaan dan dilakukan berdasarkan kemudahan diaduk. Hal ini berakibat campuran beton yang tidak konsisten serta mutu beton yang relatif rendah, yaitu pada kisaran 3-4 MPa. Rendahnya mutu beton ini meningkatkan kemungkinan keruntuhan yang bersifat getas.

Proses pengecoran beton yang buruk

Setelah pencampuran beton, proses selanjutnya adalah melakukan pengecoran beton. Banyak dijumpai tanda-tanda pengecoran yang buruk seperti munculnya rongga-rongga dalam beton, bahkan juga ditemui beton yang tidak sepenuhnya menyelimuti tulangan.

Beragam indikasi ketidaksesuaian bangunan hunian terhadap persyaratan teknis tersebut meningkatkan resiko keruntuhan bangunan saat gempa terjadi. Oleh karena itu, penting untuk melakukan evaluasi kerapuhan seismik bangunan *non-engineered* ini (Giordano et al., 2021; Novelli et al., 2021) supaya dapat diambil langkah-langkah antisipatif dalam meningkatkan resiliensi bangunan terhadap bahaya gempa (Purwanto et al., 2021; Traykova et al., 2018). Salah satu langkah penting dalam evaluasi kerapuhan bangunan adalah menentukan batas tingkat kerusakan (*damage limit state*) mulai dari kerusakan *slight*, *moderate*, *extensive*, dan *complete* (Hapsari et al., 2023; Kristiawan et al., 2022; Sohn et al., 2022). Pada struktur yang telah didesain memenuhi standar, kriteria batas tingkat kerusakan ini telah banyak tersedia. Namun untuk struktur NEB, belum banyak ditemukan literatur yang membahas hal ini. Makalah ini bertujuan menyajikan usulan batasan tingkat kerusakan seismik pada bangunan *non-engineered* dengan

mengambil contoh struktur NEB di Kabupaten Pacitan. Analisis seismik dilakukan dengan *Incremental dynamic analysis* (IDA) untuk mendapatkan *dynamic pushover curve* dari beberapa sumber gempa, yang sebelumnya telah diolah menjadi *artificial accelerogram* yang sesuai dengan respon spektra wilayah Pacitan. IDA dipilih sebagai metode analisis karena hasil IDA dapat memberikan informasi terkait ketidakpastian (*uncertainty*) respon struktur yang bersumber dari ketidakpastian gempa dalam analisis seismik, yang selanjutnya ketidakpastian ini dapat dikuantifikasi (parameter statistik) untuk digunakan sebagai input dalam analisis kerapuhan seismik. Namun pembahasan makalah ini hanya sebatas penentuan tingkat kerusakan dan belum sampai pada tahapan penentuan *uncertainty* maupun evaluasi kerapuhannya.

MODEL STRUKTUR NEB

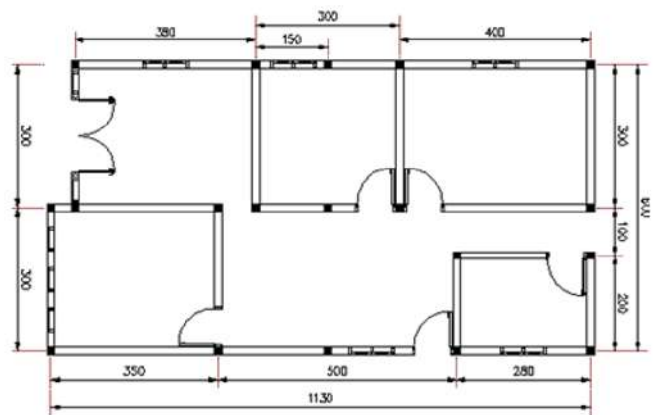
Model struktur NEB yang dipilih sebagai studi kasus dalam makalah ini diambil dari salah satu bangunan yang telah disurvei di Kecamatan Punung Kendal, Kabupaten Pacitan (Gambar 1). Sistem struktur bangunan *non-engineered* yang akan diteliti terdiri dari portal beton bertulang berlantai 1 (satu) dengan penutup atap genteng tanah. Data teknis bangunan disajikan pada Tabel 1. Gambar 2 memperlihatkan tampak samping bangunan beserta denah bangunannya.



Gambar 1. Lokasi bangunan NEB yang dipilih sebagai studi kasus

Tabel 1. Data teknis NEB yang dipilih sebagai studi kasus

Uraian	Data teknis
Jumlah lantai bangunan	1 lantai
Struktur bangunan	Beton bertulang
Panjang x lebar bangunan	11,3 x 6 m
Tinggi model	3,7 m
Dimensi & tulangan kolom	110 x 100 mm dengan tulangan utama diameter 8 mm polos, tulangan sengkang diameter 4 mm
Dimensi dan tulangan balok sloof	110 x 200 mm dengan tulangan utama diameter 8 mm polos tulangan sengkang besi diameter 4 mm
Dimensi dan tulangan balok lantai	110 x 150 mm dengan tulangan utama diameter 8 mm polos tulangan sengkang besi diameter 4 mm
Dimensi dan tulangan balok ring	110 x 150 mm dengan tulangan utama diameter 8 mm polos tulangan sengkang besi diameter 4 mm
Kuat tekan beton	4,53 MPa
Tegangan luluh tulangan	412 MPa



Gambar 2. Tampak bangunan dan denahnya

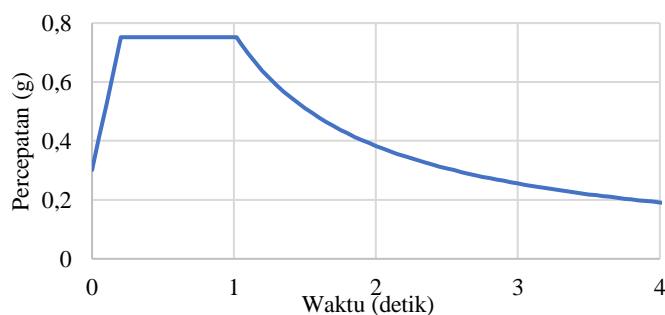
INCREMENTAL DYNAMIC ANALYSIS (IDA)

Beban mati struktur NEB

Perhitungan berat sendiri struktur dilakukan berdasarkan dimensi dan berat jenis material yang digunakan. Berat jenis material bangunan dapat diperkirakan dengan acuan SNI 1727-2019. Berat sendiri elemen struktur bangunan diperoleh secara otomatis saat pemodelan struktur dalam software Seismostruct. Sementara itu, bagian dari bangunan yang tidak ikut dimodelkan dalam Seismostruct dihitung secara manual dan diperlakukan sebagai beban mati tambahan. Pada penelitian ini, bagian bangunan yang tidak ikut dimodelkan adalah bagian yang berada diatas balok ring (lihat Gambar 2) seperti tembok segitiga, rangka kuda-kuda, reng dan usuk, penutup atap, plafond, dll. Kuda-kuda memiliki tinggi 2,8 meter dengan panjang 11,3 meter dan jarak antar kuda-kuda 6 meter. Selain itu, dinding pengisi struktur portal juga tidak ikut dimodelkan dan hanya diperhitungkan sebagai beban pada struktur NEB.

Beban gempa

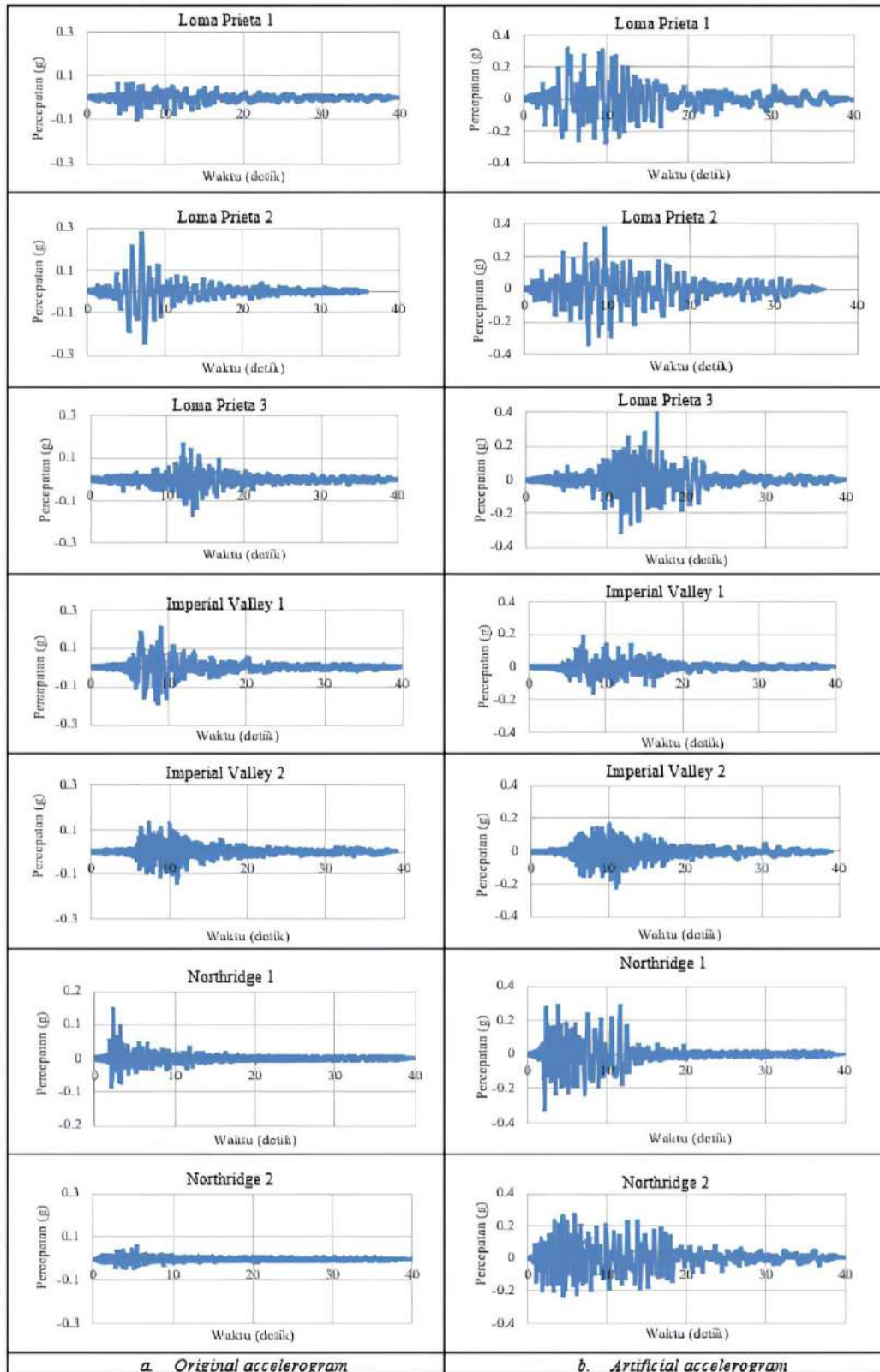
Gempa yang terjadi akan ditransmisikan ke bangunan dalam bentuk pergerakan tanah. Pergerakan tanah dari beberapa gempa kuat yang pernah terjadi di seluruh dunia telah dicatat dan disajikan dalam bentuk *accelerogram*. *Accelerogram* menampilkan percepatan tanah versus waktu selama gempa terjadi. Data *accelerogram* ini sangat penting digunakan dalam mengevaluasi kinerja seismik bangunan. Pada penelitian ini, dipilih 7 *accelerogram* yang diambil dari catatan kejadian gempa di wilayah Loma Prieta, Imperial Valley, dan Northridge. *Accelerogram* tersebut diperoleh dari basis data Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEERC). Intensitas gempa dari beragam sumber gempa tersebut harus disesuaikan dengan respon spektra di wilayah Pacitan (wilayah 3) seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Penyesuaian intensitas gempa dilakukan dengan bantuan software *seismomatch*. *Accelerogram* hasil *matching* ini (*artificial accelerogram*) selanjutnya digunakan sebagai input dalam *Incremental Dynamic Analysis*. Gambar 4 menyajikan *original accelerogram* dan *artificial accelerogram* yang telah disesuaikan dengan respon spektra wilayah Pacitan.



Gambar 3. Respon spektra di Pacitan

KoNTekS17

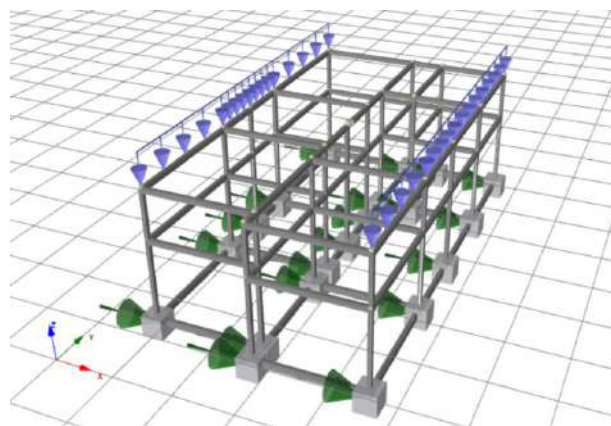
Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-17



Gambar 4. Original dan artificial accelerogram yang digunakan sebagai beban dinamik dalam penelitian ini

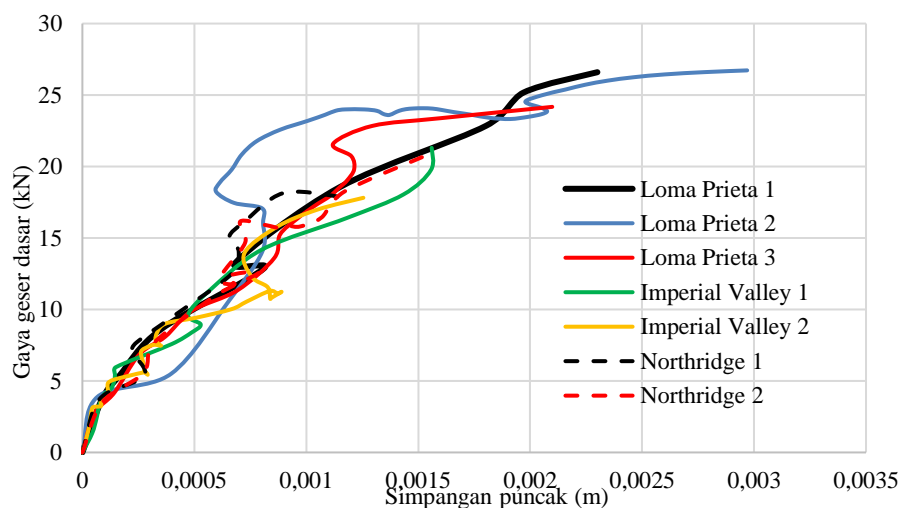
Pemodelan dan analisis dinamik struktur NEB

Analisis seismik struktur NEB dilakukan dengan bantuan software Seismostruct. Pemodelan 3D struktur NEB dalam software Seismostruct ditunjukkan pada Gambar 5. Beban tetap gravitasi yang dipikul struktur selain berat sendiri adalah beban mati tambahan sebagaimana yang telah dijelaskan pada sub bagian **Beban mati struktur NEB**. Analisis dinamik pada struktur dilakukan dengan metode *incremental dynamic*, dengan memberikan beban berupa pergerakan tanah sesuai dengan *artificial accelerogram* yang telah ditentukan pada sub bagian sebelumnya. Analisis ini pada prinsipnya merupakan analisis *time hystory* dengan mengaplikasikan intensitas gempa (*artificial accelerogram*) secara *incremental*, mulai dari intensitas rendah dimana respon struktur masih berperilaku elastis hingga intensitas tinggi yang akan menyebabkan struktur runtuh. Pada penelitian ini nilai *incremental* yang dipilih sebagai pengali *artificial accelerogram* adalah 0.02. Seismostruct dapat secara otomatis melakukan *incremental dynamic analysis* tersebut dan menampilkan *dynamic pushover curve* yang merepresentasikan kurva *envelope* dari respon maximum (*top drift*) versus *base shear* dari setiap *increment* pembebanan dinamik.



Gambar 5. Pemodelan struktur NEB beserta beban gravitasi dan dinamik yang bekerja pada struktur

Dynamic pushover curve



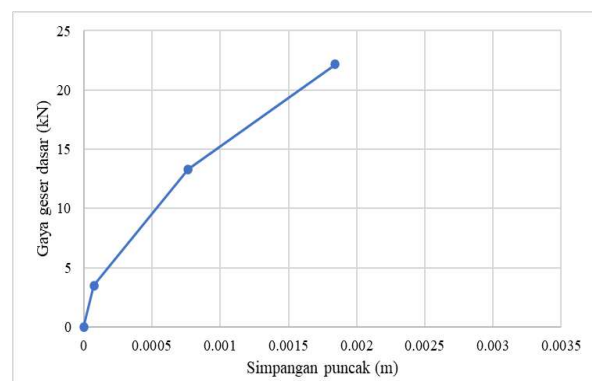
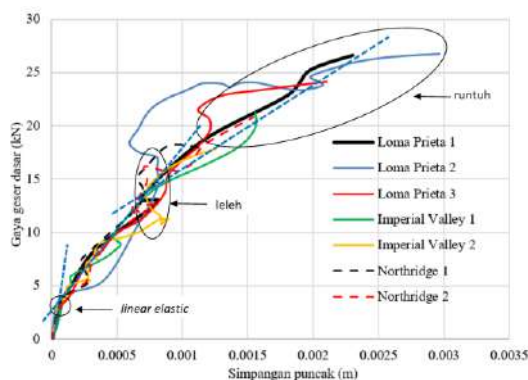
Gambar 6. *Dynamic pushover curve* dari hasil *incremental dynamic analysis* pada struktur NEB

Hasil dari *incremental dynamic analysis* pada struktur NEB disajikan sebagai *dynamic pushover curve* seperti diperlihatkan pada Gambar 6. *Dynamic pushover curve* memberikan gambaran mengenai hubungan antara besarnya gaya geser dasar versus simpangan puncak yang terjadi pada struktur NEB. Secara umum grafik yang diperoleh dari analisis dinamik dari beberapa input gempa menunjukkan kecenderungan

perilaku yang serupa yaitu struktur NEB masih berperilaku *linear elastic* sampai batas gaya geser dasar pada kisaran 3.5 kN. Diatas batas *linear elastic* ini, struktur NEB mulai menunjukkan adanya kerusakan, dimana perilaku global struktur ditandai dengan adanya degradasi kekakuan. Pada saat simpangan puncak mencapai kisaran 0.0007-0.008 m, struktur menunjukkan tanda-tanda adanya pelelehan tulangan sehingga pada gaya geser dasar diatas batas ini akan menyebabkan struktur NEB mengalami kenaikan simpangan yang signifikan sampai struktur runtuh. Pengaruh input gempa terhadap nilai batas keruntuhan (simpangan maximum) memiliki rentang yang sangat lebar yaitu 0.0012 pada gempa Northridge 1 dan 0.0029 pada gempa Loma Prieta 2. Hal ini berbeda dengan batasan *linear elastic* maupun batasan saat leleh yang cenderung memiliki rentang nilai yang relatif kecil. Kondisi ini akan berpengaruh dalam penentuan *uncertainty* saat penetapan batas kerusakan (*damage state*) seperti yang akan dibahas pada *Section* selanjutnya (Penentuan *damage limit state*).

PENENTUAN *DAMAGE LIMIT STATE*

Langkah pertama yang perlu dilakukan dalam analisis kerapuhan struktur NEB adalah menentukan *damage state* dari struktur yang bersangkutan. *Dynamic pushover curve* yang telah didiskusikan pada bagian sebelumnya memberikan indikasi kerusakan progresif yang terjadi pada struktur dimulai dari saat mana struktur masih berperilaku *linear elastic*, saat leleh, serta saat runtuh. Batas-batas nilai *linear elastic*, saat leleh, maupun saat runtuh pada kurva tersebut dapat diidentifikasi berdasarkan parameter nilai simpangan puncak artinya kita dapat menetapkan pada nilai simpangan puncak berapa struktur telah mencapai batas *linear elastic*, leleh maupun runtuh. Apabila simpangan puncak kita jadikan kriteria maka dapat dilihat dari *dynamic pushover curve* tersebut (Gambar 7a) bahwa batas *linear elastic* maupun batas saat leleh dari tujuh kurva tersebut berada pada rentang nilai simpangan puncak yang relatif kecil. Sebaliknya pada batasan runtuh, setiap input gempa memberikan simpangan puncak yang cukup jauh rentang nilainya. Oleh karena itu, dalam penelitian ini *dynamic pushover curve* yang diperoleh dari *incremental dynamic analysis* dari beragam input gempa tersebut terlebih dahulu dikonversi menjadi kurva tunggal yang berbentuk *three-linear* (Gambar 7b). Kurva *three-linear* ini diperoleh melalui pendekatan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7a dan dapat dijelaskan seperti berikut. Garis *linear* pertama dari kurva *three-linear* diperoleh dari garis miring yang melewati titik nol dan titik batas *linear elastic*; garis *linear* kedua adalah garis yang melewati titik batas *linear elastic* dan batas leleh; dan garis *linear* ketiga adalah garis yang melewati titik leleh dengan kemiringan tertentu yang mendekati perilaku pasca leleh dari kurva-kurva tersebut. Titik akhir (batas runtuh) dari kurva *three-linear* ini diperoleh dari rerata simpangan puncak saat runtuh dari tujuh *dynamic pushover curve*. Hasil pendekatan ini memberikan kurva *three-linear* yang dapat dianggap mewakili perilaku seismik dari struktur NEB seperti diperlihatkan pada Gambar 7b.



Aproksimasi kemiringan kurva (garis linear putus-putus) *dynamic pushover curve*

Kurva *three-linear* yang merupakan aproksimasi kurva *dynamic pushover curve*

Gambar 7. Kurva *three-linear* dari hasil aproksimasi *dynamic pushover curve*



Tabel 2. Deskripsi level kerusakan menurut FEMA-Haus MH 2.1 pada struktur C1

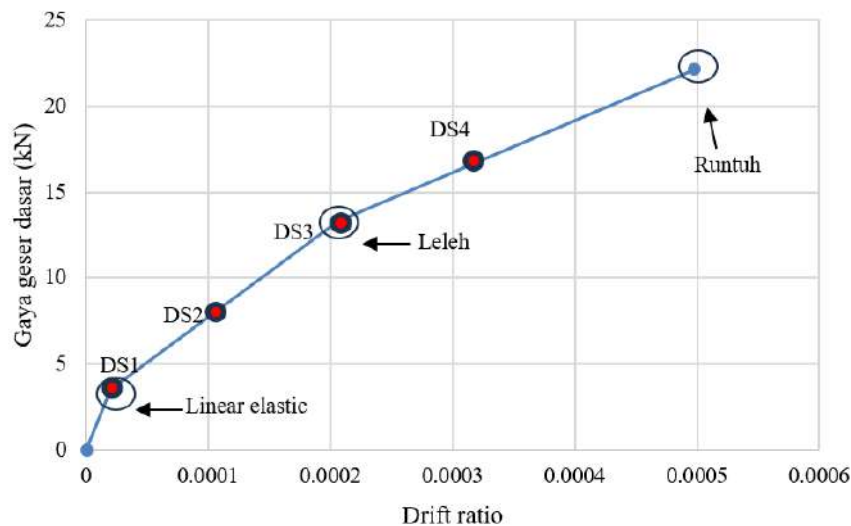
Damage state	Deskripsi kerusakan struktur
DS1 (Slight)	Retak rambut tipe lentur atau geser pada beberapa balok dan kolom di dekat sambungan atau di dalam sambungan.
DS2 (Moderate)	Sebagian besar balok dan kolom menunjukkan retak rambut. Pada rangka daktail, beberapa elemen rangka telah mencapai kapasitas leleh yang ditunjukkan dengan retak lentur yang lebih besar dan beberapa <i>spalling</i> beton. Rangka non-daktail dapat menunjukkan retak geser dan <i>spalling</i> yang lebih besar
DS3 (Extensive)	Beberapa elemen rangka telah mencapai kapasitas ultimitnya yang ditunjukkan pada rangka daktail dengan adanya retakan lentur yang besar, beton yang terkelupas, dan tulangan utama yang tertekuk; elemen rangka non-daktail dapat mengalami kegagalan geser atau kegagalan ikatan pada sambungan tulangan, atau ikatan yang putus atau tulangan utama yang tertekuk pada kolom yang dapat mengakibatkan keruntuhan parsial.
DS4 (Complete)	Struktur runtuh atau dalam bahaya runtuh karena kegagalan rapuh elemen rangka non-daktail atau hilangnya stabilitas rangka. Sekitar 13% (bangunan rendah), 10% (bangunan menengah) atau 5% (bangunan tinggi) dari total area bangunan C1 dengan kerusakan level ini diperkirakan akan runtuh.

FEMA-Hazus MH 2.1 (FEMA, 2012) mendeskripsikan level kerusakan pada portal struktur balok beton bertulang (struktur kategori C1) seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Level-level kerusakan sebagaimana dikategorikan pada Tabel 2 tersebut dikorelasikan dengan besaran ratio simpangan (*drift ratio*) yang terjadi pada struktur seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Pada Tabel 3 ini struktur C1 yang dimaksud merupakan struktur dengan ketinggian rendah (6 m) serta berada pada level desain yang beragam mulai dari *pre-code* hingga *high-code*. *Pre-code* menandakan bahwa desain struktur belum mempertimbangkan desain seismik. Struktur seperti ini mewakili struktur-struktur lama sebelum adanya peraturan perancangan gempa. Batasan *damage state* dari struktur *Pre-code* ini diambil 80% dari nilai *damage state* struktur *Low Code Design Level*.

Tabel 3. Batasan *drift ratio* pada masing-masing *damage state*

Level Desain Seismik	Rasio simpangan antar tingkat (<i>drift ratio</i>)			
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
High-code	0,0050	0,0100	0,0300	0,0800
Moderate-code	0,0050	0,0087	0,0233	0,0600
Low-code	0,0050	0,0080	0,0200	0,0500
Pre-code	0,0040	0,0064	0,0160	0,0400

Batasan *damage state* pada Tabel 3 dapat dipakai sebagai acuan awal untuk mengevaluasi level kerusakan pada struktur portal beton bertulang. Apabila batasan *damage state* dari struktur *Pre-code* yang termuat dalam Tabel 3 diterapkan untuk struktur NEB pada penelitian ini, maka simpangan puncak pada kurva *three-linear* Gambar 7b perlu diubah terlebih dahulu menjadi ratio simpangan. Dengan tinggi struktur adalah 3,7 m maka Gambar 7b menjadi kurva *three-linear* Gambar 8. Pada kurva *three-linear* yang baru ini, batasan *damage state* struktur *Pre-code* berada diluar respon struktur NEB. Pada *drift ratio* sebesar 0,004 struktur *Pre-code* baru mencapai level kerusakan *slight*; sebaliknya struktur NEB sudah runtuh jauh sebelum mencapai *drift ratio* tersebut. Ini berarti struktur NEB sangat rapuh dan rentan mengalami keruntuhan bahkan pada intensitas gempa yang kecil.



Gambar 8. Definisi *damage state* pada struktur NEB

Damage state yang realistis harus diusulkan agar relevan diterapkan dalam evaluasi kerapuhan struktur NEB. Pendekatan yang bisa digunakan dalam menentukan *damage state* ini adalah merujuk kembali ke deskripsi kerusakan struktur sebagaimana telah disajikan pada Tabel 2. Kerusakan *slight* (DS1) ditandai dengan retak rambut baik berupa retak tipe lentur atau geser pada balok maupun kolom di dekat sambungan (*joint*). Retak-retak ini bila terus berkembang akan menyebabkan degradasi kekakuan. Atas dasar ini, maka DS1 pada struktur NEB dapat ditentukan mendekati atau tepat pada batas *linear elastic*. Batasan ini juga lebih realistis dibandingkan dengan batasan yang diusulkan oleh Vargas (Vargas et al., 2013) untuk struktur beton bertulang yang mana DS1 setara dengan 70% dari nilai saat leleh. Selanjutnya Tabel 2 mengindikasikan bahwa DS2 ditentukan berdasarkan kondisi sebagian tulangan telah mencapai kapasitas leleh. Namun kriteria ini mungkin tidak cocok bila digunakan untuk struktur NEB dikarenakan mutu beton struktur NEB sangat kecil (dibawah 5 MPa) sehingga sebelum tulangan leleh, terdapat kemungkinan kerusakan beton yang cukup parah meskipun inti beton belum mengalami *crushing*. Mempertimbangkan hal ini, maka kerusakan tingkat moderat (DS2) diusulkan berada ditengah-tengah antara nilai batas *linear elastic* dan leleh. Sementara itu, terjadinya tulangan leleh pada struktur NEB dapat mengindikasikan telah terjadi kerusakan yang cukup ekstensif yang ditandai banyaknya elemen beton yang telah terkelupas. Oleh karena itu, DS3 diusulkan tepat saat tulangan mulai leleh. Terakhir, level kerusakan *complete* (DS4) ditandai dengan kemungkinan 13% dari bangunan rendah pada zona gempa tersebut telah mencapai keruntuhan. Bila angka ini dijadikan sebagai acuan dan titik runtuh pada kurva *three-linear* adalah rata-rata nilai *drift ratio* saat runtuh (atau 50% telah runtuh saat mencapai nilai *drift ratio* ini) untuk struktur NEB, maka DS4 dapat ditetapkan sebesar pada kisaran nilai *drift ratio* saat runtuh dikurangi standard deviasinya yaitu $0,000498-0,000175= 0,000323$. Angka ini setara dengan 65% dari *drift ratio* saat runtuh. Jadi batasan-batas DS1-DS4 untuk struktur NEB sebagaimana telah dijelaskan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} DS1 &= dr_e \\ DS2 &= 0,5(dr_e + dr_y) \\ DS3 &= dr_y \\ DS4 &= 0.65 dr_r \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

dimana dr_e , dr_y , dan dr_r masing-masing adalah *drift ratio* pada batas *linear elastic*, saat leleh, dan saat runtuh. Nilai DS1-DS4 tersebut selanjutnya diplot ke dalam Gambar 8 untuk mengilustrasikan posisinya dalam perkembangan kerusakan struktur NEB seiring dengan respon struktur tersebut terhadap kenaikan intensitas gempa.



KESIMPULAN

Penelitian ini dimulai dengan menyajikan hasil survei yang menunjukkan adanya indikasi *non-engineered building* (NEB) pada bangunan hunian masyarakat yang ada di Pacitan. Selanjutnya, penelitian menyajikan analisis dinamik struktur NEB dan menggunakan hasil analisis berupa *dynamic pushover curve* untuk menentukan batasan tingkat kerusakan seismik yang realistis pada struktur NEB. Beberapa kesimpulan utama yang dapat diturunkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

Beragam indikasi *non-engineered* ditemukan pada bangunan hunian di Kabupaten Pacitan diantaranya penggunaan tulangan polos, diameter tulangan yang lebih kecil dari ukuran yang seharusnya, jarak sengkang yang tidak memadai, detil penulangan *joint* yang tidak memenuhi syarat, mutu beton yang sangat rendah akibat praktek pencampuran beton yang tidak terukur, serta pelaksanaan konstruksi yang menimbulkan banyak beton keropos dan bahkan tidak menyelimuti tulangan.

Hasil analisis dinamik incremental disajikan dalam bentuk *dynamic pushover curve* dari beragam input gempa. Kurva ini memberikan gambaran respon struktur NEB mulai dari saat berperilaku *linear elastic*, saat terjadi leleh pada tulangan, hingga saat struktur runtuh.

Dari *dynamic pushover curve* tersebut, pada dasarnya respon struktur NEB dapat disederhanakan sebagai kurva *three-linear*. Kurva *three-linear* ini merupakan pendekatan yang memudahkan dalam mengidentifikasi batasan tingkat kerusakan seismik pada struktur NEB.

Dari kurva *three-linear* tersebut dapat disimpulkan bahwa struktur NEB sangat rapuh karena beragam tingkat kerusakan dapat terjadi pada simpangan yang jauh lebih rendah dibandingkan bahkan dengan kriteria tingkat kerusakan *slight* pada bangunan *Pre-code*.

Penelitian ini mengusulkan batasan tingkat kerusakan yang lebih realistis untuk struktur NEB dengan berpedoman pada deskripsi kerusakan yang dimuat dalam FEMA-Hazus MH 2.1 dimana kriteria tingkat kerusakan *slight* (DS1), *moderate* (DS2), *Extensive* (DS3) dan *Complete* (DS4) berturut-turut didasarkan pada *drift ratio* saat kondisi batas *linear elastic*, pertengahan *linear elastic* dan saat leleh, saat leleh dan 65% dari saat runtuh.

Batasan tingkat kerusakan yang diusulkan tersebut dapat digunakan lebih lanjut dalam analisis kerapuhan seismik struktur NEB.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, N., Shahzad, A., Ali, Q., Rizwan, M., & Khan, A. N. (2018). Seismic fragility functions for code compliant and non-compliant RC SMRF structures in Pakistan. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(10), 4675–4703. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0377-x>
- Boen, T., & Pribadi, K. S. (2007). *Engineering the Non Engineered Houses for Better Earthquake Resistance in Indonesia. Pt 8*, 202–208.
- Charleson, A., Nonoguchi, A., Maeshima, A., Villacis, C., Minowa, C., Zamani, G., Imai, H., Okazaki, K., Yamaguchi, K., Rajib Shaw, S. F., Kita, S., Saito, S., Matsuzaki, S., Ando, S., Yusakawa, S., & Ishiyama, Y. (2016). *Towards resilient non-engineered construction: guide for risk-informed policy making* (Tatsuo Narafu (ed.)). UNESCO.
- FEMA. (2012). Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model, Hazus–MH 2.1: Technical Manual. In *Federal Emergency Management Agency*. www.fema.gov/plan/prevent/hazus
- Giordano, N., De Risi, R., Voyagaki, E., Kloukinas, P., Novelli, V., Kafodya, I., Ngoma, I., Goda, K., & Macdonald, J. (2021). Seismic fragility models for typical non-engineered URM residential buildings in Malawi. *Structures*, 32(March), 2266–2278. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.118>
- Hapsari, I. R., Kristiawan, S. A., Sangadji, S., & Gan, B. S. (2023). Damage States Investigation of Infilled Frame Structure Based on Meso Modeling Approach. *Buildings*, 13(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/buildings13020298>
- Kristiawan, S. A., Hapsari, I. R., Purwanto, E., & Marwahyudi, M. (2022). Evaluation of damage limit state for rc frame based on fe modeling. *Buildings*, 12(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/buildings12010021>

- Novelli, V. I., Risi, R. De, Ngoma, I., Kafodya, I., & Kloukinas, P. (2021). Fragility curves for non-engineered masonry buildings in developing countries derived from real data based on structural surveys and laboratory tests. *Soft Computing*, 25(8), 6113–6138. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05603-w>
- Paderno, A., Pelucco, S., Metelli, G., & Preti, M. (2021). Analytical and numerical modelling of existing RC frames with smooth rebars. *Engineering Structures*, 249(October), 113160. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113160>
- Purwanto, E., Kristiawan, S. A., Sangadji, S., & Saifullah, H. A. (2021). Strengthening of Non-Engineered Building with Steel Plate to Increase Seismic Performance. *3rd International Conference on Sustainable Infrastructure*, 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/832/1/012020>
- Rizwan, M., Ahmad, N., & Khan, A. N. (2018). Seismic performance of compliant and noncompliant special moment-resisting reinforced concrete frames. *ACI Structural Journal*, 115(4). <https://doi.org/10.14359/51702063>
- SNI 1726:2019. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Badan Standarisasi Nasional.
- Sohn, J., Choi, I., & Kim, J. (2022). Development of limit states for seismic fragility assessment of piloti-type structures verified with observed damage data. *Engineering Structures*, 251(PB), 113562. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113562>
- Traykova, M., Giarlelis, C., Lampropoulos, A., & Moseley, J. (2018). *Simple strengthening techniques for Non-Engineered buildings against seismic actions*. September, 19–21.
- Vargas, Y. F., Pujades, L. G., Barbat, A. H., & Hurtado, J. E. (2013). Incremental Dynamic Analysis and Pushover Analysis of Buildings. A Probabilistic Comparison. *Computational Methods in Applied Sciences*, 26, 293–308. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5134-7_17
- Wang, P., Shi, Q., Wang, F., & Wang, Q. (2020). Seismic behaviour of concrete columns with high-strength stirrups. *Earthquake and Structures*, 18(1), 15–25. <https://doi.org/10.12989/eas.2020.18.1.015>
- Watanabe, S., Shima, N., & Fujita, K. (2018). *Research on Non-Engineered Housing Construction Based on a Field Investigation in Jakarta*. 7581. <https://doi.org/10.3130/jaabe.12.33>
- Zhao, J., Yin, L., Li, X., & Yue, X. (2023). Bond Behavior of Plain Bars in Concrete under Reversed Cyclic Loading. *Materials*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/ma16134836>