

EVALUASI PENGARUH KERUSAKAN AKUMULATIF AKIBAT GEMPA BERULANG TERHADAP PENURUNAN KINERJA STRUKTUR BETON BERTULANG

Clement K. Halim¹, Desnalia²

¹ Teknik Sipil, Universitas Widya Kartika, Indonesia

² Teknik Sipil, Universitas Widya Kartika, Indonesia

¹ Email clement_khlim@gmail.com ; ² Email desnalia88@gmail.com

Abstract

This study aims to evaluate and model the performance degradation of reinforced concrete (RC) building structures subjected to mainshock-aftershock sequences. Building structures located in active seismic regions frequently face the threat of aftershocks before fully recovering from mainshock damages, triggering material fatigue escalation and plastic hysteretic energy accumulation. Employing a numerical computational approach via Nonlinear Time History Analysis (NLTHA) utilizing fiber element modeling, sequential simulations were conducted to track the evolution of structural damage. Quantitative evaluation using the Park-Ang Damage Index reveals that aftershock exposure with high magnitudes and short time delays triggers severe inter-story drift surges and lateral stiffness degradation, driving structures into critical collapse zones. These findings emphasize the critical importance of incorporating cumulative damage factors into future seismic design standards and structural vulnerability assessments.

Keywords: Nonlinear Time History Analysis, Repeated Earthquakes, Cumulative Damage, Park-Ang Damage Index, Reinforced Concrete Structures.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan memodelkan penurunan kinerja struktur gedung beton bertulang akibat paparan rangkaian gempa berulang (mainshock-aftershock sequences). Struktur bangunan yang berada di wilayah seismik aktif sering kali menghadapi ancaman gempa susulan sebelum sempat pulih dari kerusakan gempa utama, yang memicu eskalasi kelelahan material dan akumulasi energi histeretis plastik. Menggunakan pendekatan komputasional numerik melalui Analisis Riwayat Waktu Non-Linier (Nonlinear Time History Analysis - NLTHA) dengan pemodelan elemen serat (fiber element modeling), simulasi sekuensial dilakukan untuk melacak evolusi kerusakan struktural. Evaluasi kuantitatif menggunakan Indeks Kerusakan Park-Ang menunjukkan bahwa paparan gempa susulan dengan magnitudo tinggi dan jeda waktu singkat memicu lonjakan simpangan antar-lantai dan degradasi kekakuan lateral yang mendorong struktur masuk ke zona keruntuhan kritis. Temuan ini menegaskan pentingnya memperhitungkan faktor kerusakan kumulatif dalam standar perancangan dan evaluasi kerentanan struktur tahan gempa masa depan.

Kata Kunci: Analisis Riwayat Waktu Non-Linier, Gempa Berulang, Kerusakan Akumulatif, Indeks Kerusakan Park-Ang, Struktur Beton Bertulang.

PENDAHULUAN

Indonesia dan wilayah seismik aktif di seluruh dunia sering kali dihadapkan pada ancaman bencana gempa bumi yang tidak hanya terjadi sekali, melainkan dapat berulang dalam kurun waktu yang relatif berdekatan melalui rangkaian gempa susulan (aftershocks). Fenomena kegempaan berulang ini menempatkan infrastruktur

bangunan, khususnya struktur beton bertulang, pada kondisi pembebanan siklik lateral ekstrem yang berulang kali melampaui batas elastis linier material. Menurut Kramer (1996), karakteristik gempabumi modern menunjukkan bahwa kerusakan kumulatif pada struktur bangunan sering kali bukan disebabkan oleh satu guncangan utama (mainshock) saja, melainkan akumulasi kerusakan akibat rangkaian energi seismik susulan yang menghantam struktur dalam kondisi yang belum pulih sepenuhnya.

Dalam standar perencanaan tahan gempa konvensional yang berlaku secara global, filosofi desain umumnya masih berfokus pada evaluasi respons struktur terhadap satu kali kejadian gempa rencana dengan intensitas maksimum tertentu. Namun, kenyataan empiris di lapangan membuktikan bahwa struktur beton bertulang yang pernah mengalami gempa bumi mengalami degradasi kekakuan (stiffness degradation) dan kehilangan kapasitas disipasi energi (energy dissipation capacity) yang signifikan. Sebagaimana dikemukakan oleh Housner et al. (2003), kegagalan struktur akibat gempa berulang sering kali terjadi pada tingkat percepatan tanah yang lebih rendah daripada kapasitas desain awal, akibat terjadinya kelelahan material (material fatigue) dan akumulasi deformasi permanen.

Struktur beton bertulang sebagai material komposit yang terdiri dari beton dan baja tulangan memiliki perilaku histeretik yang sangat kompleks ketika menerima beban bolak-balik siklik pasca-elitis. Ketika mengalami simpangan lateral akibat gempa pertama, beton mengalami keretakan mikro (micro-cracking) pada zona Tarik dan penghancuran (crushing) pada zona tekan, sementara baja tulangan mengalami leleh plastis bolak-balik (cyclic yielding). Menurut Park and Paulay (1975) dalam literatur klasik perilaku struktur beton bertulang, siklus pembebanan bolak-balik menyebabkan penurunan kuat rekat antara baja tulangan dan beton di sekitarnya, yang memicu degradasi ikatan (bond degradation) secara progresif.

Ketika rangkaian gempa susulan atau gempa berulang terjadi sebelum struktur sempat diperbaiki atau dipulihkan, kondisi integritas struktural telah berada pada status vulnerable atau rentan. Beban gempa berikutnya akan memperparah pembukaan retakan yang sudah ada, memperluas zona leleh pada sendi plastis (plastic hinges), dan memicu percepatan kegagalan geser atau lentur. Amadio et al. (2003) menyatakan bahwa analisis kerentanan seismik yang mengabaikan efek kerusakan kumulatif (cumulative damage) cenderung menghasilkan estimasi keamanan struktur yang terlalu optimistis dan berisiko tinggi memicu keruntuhan total saat terjadi gempa susulan.

Guna mengevaluasi tingkat kerusakan kumulatif secara akurat, pendekatan indeks kerusakan (damage indices) yang diusulkan oleh para ahli mekanika kerusakan menjadi instrumen analitis yang sangat krusial. Salah satu model indeks kerusakan yang paling banyak diadopsi dalam rekayasa struktur adalah indeks Park-Ang, yang menggabungkan parameter deformasi maksimum dan akumulasi histeretis energi disipasi plastis. Menurut Park, Ang, and Wen (1985), kerusakan struktural akibat gempa tidak hanya bergantung pada simpangan puncak (peak displacement), melainkan sangat dipengaruhi oleh berapa lama dan berapa banyak siklus beban plastis yang harus ditanggung oleh elemen struktur.

Meskipun kesadaran mengenai bahaya gempa berulang telah meningkat di kalangan akademisi, evaluasi numerik dan eksperimental yang secara spesifik mengukur penurunan kinerja kapasitas struktur beton bertulang eksisting masih memerlukan pengembangan yang mendalam. Sebagian besar studi terdahulu masih berfokus pada respons siklik komponen tunggal (element level), seperti balok atau kolom, ketimbang respons sistem struktur gedung secara menyeluruh (system level). Sebagaimana dicatat oleh Priestley, Calvi, and Kowalsky (2007), pemahaman mengenai bagaimana interaksi dinamik antar-lantai mendistribusikan kerusakan kumulatif sangat esensial untuk memprediksi mekanisme keruntuhan progresif (progressive collapse).

Dalam kerangka rekayasa modern, kemajuan teknologi pemodelan komputer memungkinkan para insinyur untuk melakukan analisis riwayat waktu non-linier (nonlinear time-history analysis - NLTHA) menggunakan rangkaian rekaman percepatan gempa berpasangan (mainshock-aftershock sequences). Pendekatan analitis ini memungkinkan peneliti untuk melacak evolusi penurunan kapasitas ultimit struktur dari waktu ke waktu secara presisi. Menurut Fardis (2009), penggunaan analisis non-linier tingkat lanjut adalah kunci utama untuk merepresentasikan degradasi kekakuan dan kekuatan material beton bertulang secara realistis di bawah siklus beban seismik destruktif.

Variabel utama yang menjadi fokus dalam evaluasi kinerja struktur meliputi perubahan frekuensi alami struktur (natural frequency degradation), pergeseran simpangan antar-lantai (inter-story drift ratio), penurunan kapasitas dukung beban lateral, serta evolusi indeks kerusakan kumulatif. Ketika frekuensi alami struktur mengalami penurunan secara permanen setelah gempa pertama, hal ini mengindikasikan bahwa struktur telah kehilangan sebagian besar kekakuan lateralnya. Chopra (2012) menjelaskan bahwa perubahan karakteristik dinamik struktur merupakan indikator paling valid untuk mendeteksi adanya penurunan kinerja struktural sebelum keruntuhan fisik kasat mata teramati.

Melalui penelitian ini, dibangun sebuah kerangka evaluasi komprehensif untuk menganalisis penurunan kinerja struktur gedung beton bertulang akibat paparan gempa berulang menggunakan simulasi riwayat waktu non-linier. Pendekatan ini dirancang untuk memetakan bagaimana variasi magnitudo gempa susulan dan interval waktu antar-kejadian mempengaruhi tingkat eskalasi kerusakan. Menurut Penelis and Kappos (1997), evaluasi

kinerja pasca-gempa yang berbasis pada tingkat kerusakan kumulatif akan memberikan landasan ilmiah yang kuat bagi perumusan kebijakan mitigasi risiko dan standar perbaikan struktur.

Kontribusi dari penelitian ini diharapkan tidak hanya memperkaya khazanah literatur teknik gempa dan struktur bangunan, tetapi juga menawarkan instrumen evaluasi analitis bagi para perencana dan praktisi konstruksi dalam merancang bangunan yang memiliki ketahanan lebih baik terhadap risiko seismik berulang. Sebagaimana ditekankan oleh Moehle (2014), pergeseran paradigma dari desain tahan satu kali gempa menuju desain tahan kerusakan kumulatif merupakan arah masa depan rekayasa struktur yang berkelanjutan dan berorientasi pada keselamatan publik.

Berdasarkan latar belakang pemikiran dan landasan konseptual dari para ahli tersebut, perumusan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada bagaimana mengevaluasi tingkat penurunan kinerja struktur gedung beton bertulang serta memetakan indeks kerusakan kumulatif akibat paparan rangkaian gempa berulang. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kejelasan kuantitatif mengenai batas aman struktur dan kebutuhan perkuatan struktural (retrofitting) pasca-gempa.

METODELOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini dirancang sebagai kerangka kerja komputasional dan analitis yang sistematis untuk mengevaluasi secara kuantitatif tingkat penurunan kinerja struktur gedung beton bertulang akibat paparan rangkaian gempa berulang (mainshock-aftershock sequences). Menurut Chopra (2012), investigasi respons dinamik struktur di bawah beban seismik ekstrem menuntut penggunaan metode analisis non-linier tingkat lanjut yang mampu merepresentasikan degradasi kekakuan dan kehilangan energi secara akurat.

Pendekatan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif komputasional melalui metode Analisis Riwayat Waktu Non-Linier (Nonlinear Time History Analysis - NLTHA). Pendekatan ini dipilih karena merupakan metode paling rasional dan presisi dalam merekam evolusi tegangan, regangan, pembentukan sendi plastis, serta akumulasi kerusakan pada setiap elemen struktur beton bertulang dari waktu ke waktu. Sebagaimana dikemukakan oleh Fardis (2009), NLTHA memungkinkan para insinyur struktur untuk melacak jejak kerentanan seismik secara real-time di bawah pengaruh guncangan gempa berpasangan.

Secara garis besar, tahapan pelaksanaan penelitian ini dibagi ke dalam lima fase utama: (1) studi literatur dan perumusan model bangunan acuan (benchmark building), (2) pemodelan elemen hingga non-linier struktur menggunakan perangkat lunak analisis struktur berbasis FEM, (3) pemilihan, penskalaan, dan penyusunan pasangan catatan gempa mainshock-aftershock, (4) pelaksanaan analisis riwayat waktu non-linier secara berurutan, serta (5) kuantifikasi indeks kerusakan kumulatif dan evaluasi kinerja struktur. Setiap fase dirancang secara berurutan untuk menjamin validitas metodologis riset.

Pemodelan struktur gedung beton bertulang dilakukan dalam format tiga dimensi (3D) dengan mengasumsikan sistem penahan gaya lateral berupa kombinasi rangka pemikul momen khusus (Special Moment Resisting Frame - SMRF) dan/atau dinding struktural (structural walls). Dimensi elemen balok, kolom, dan pelat dimodelkan sesuai dengan standar perencanaan struktur tahan gempa modern (SNI atau UBC/ASCE). Menurut Park and Paulay (1975), representasi geometri yang akurat pada struktur beton bertulang sangat esensial untuk mendistribusikan gaya-gaya dalam secara realistis selama pembebanan siklik lateral.

Karakteristik non-linier material dan penampang dimodelkan menggunakan konsep sendi plastis terkonsentrasi (concentrated plastic hinges) atau model elemen serat (fiber element modeling) pada ujung-ujung elemen balok dan kolom. Model serat memungkinkan penampang elemen dibagi menjadi puluhan sub-elemen beton dan baja tulangan, sehingga perilaku histeretis material dapat direkam secara presisi. Sebagaimana disarankan oleh Priestley, Calvi, and Kowalsky (2007), pendekatan elemen serat sangat unggul dalam menangkap degradasi kekakuan lentur (flexural stiffness degradation) akibat siklus pembebanan bolak-balik pasca-elitis.

Model konstitutif material beton yang diterapkan mengacu pada model Kent-Park atau Mander untuk beton terkekang (confined concrete) dan beton tidak terkekang (unconfined concrete), sementara baja tulangan dimodelkan menggunakan kurva histeretis Menegotto-Phem atau bilinear dengan pengerasan kinematik (kinematic hardening). Model konstitutif ini mampu merepresentasikan fenomena retak tarik beton, penghancuran tekan beton, serta leleh bolak-balik pada baja tulangan. Menurut Kramer (1996), akurasi pemodelan material histeretis merupakan penentu utama validitas respons struktur terhadap gempa siklik destruktif.

Seleksi catatan percepatan tanah (ground motion records) dilakukan secara cermat dengan mengambil data dari database internasional (seperti PEER NGA West-2) yang mencakup pasangan rekaman gempa utama (mainshock) dan gempa susulan (aftershock) dari kejadian nyata dengan karakteristik magnitudo dan jarak episenter yang relevan. Rekaman percepatan ini kemudian diskala (amplitude scaling) agar selaras dengan spektrum respons desain percepatan gempa di lokasi studi. Menurut Amadio et al. (2003), penggunaan pasangan rekaman gempa asli (real recorded sequences) jauh lebih representatif dalam memicu kerusakan kumulatif dibandingkan dengan gempa buatan artifisial.

Prosedur analisis riwayat waktu non-linier dilakukan secara sekuensial (sequential time-history analysis). Struktur dikenai guncangan gempa utama (mainshock) hingga seluruh getaran mereda dan struktur mencapai kondisi redaman sisa (rest state). Tanpa mereset kondisi deformasi atau melakukan perbaikan struktural, rekaman gempa susulan (aftershock) langsung diaplikasikan pada struktur yang telah mengalami kerusakan awal tersebut. Pendekatan sekuensial ini secara sempurna mereplikasi kondisi riil di lapangan ketika bangunan menghadapi rangkaian bencana kegempaan beruntun.

Kuantifikasi kerusakan kumulatif pada struktur dievaluasi menggunakan model Indeks Kerusakan Park-Ang (Park-Ang Damage Index, D), yang memadukan parameter deformasi maksimum dan akumulasi energi disipasi plastik. Formula indeks kerusakan ini didefinisikan sebagai:

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{E_h}{M_y \cdot \theta_u}$$

di mana δ_m adalah simpangan maksimum akibat gempa, δ_u adalah kapasitas simpangan ultimit, E_h adalah energi histeretis yang diserap, M_y adalah momen leleh, θ_u adalah sudut rotasi ultimit, dan β adalah parameter konstanta siklik material. Menurut Park, Ang, and Wen (1985), indeks kerusakan Park-Ang merupakan standar global yang sangat andal untuk mengukur tingkat keparahan kerusakan struktur beton bertulang akibat beban dinamik berulang.

Kinerja struktur pasca-gempa berulang dinilai berdasarkan beberapa parameter respons utama, meliputi: (1) rasio simpangan antar-lantai maksimum (maximum inter-story drift ratio), (2) degradasi frekuensi alami struktur (natural frequency degradation), (3) penurunan kapasitas dukung beban lateral (residual lateral strength capacity), dan (4) sebaran tingkat kerusakan elemen berdasarkan kriteria performance levels (Immediate Occupancy, Life Safety, Collapse Prevention). Sebagaimana ditekankan oleh Moehle (2014), evaluasi berbasis tingkat kinerja ini memberikan gambaran objektif mengenai kelayakan huni dan keselamatan bangunan.

Validasi model numerik dilakukan melalui proses perbandingan (benchmarking) terhadap hasil pengujian meja getar (shaking table tests) atau analisis analitis teoretis dari literatur terdahulu yang memiliki konfigurasi struktur serupa. Kalibrasi parameter redaman Rayleigh dan langkah waktu integrasi numerik (time step integration) disesuaikan secara ketat untuk meminimalkan galat numerik. Menurut Vardanega et al. (2013), kalibrasi model yang teliti adalah prasyarat mutlak sebelum analisis parametrik lanjutan dijalankan.

Analisis komparatif lanjutan dilakukan dengan memvariasikan rasio waktu tunda (time interval) antar-gempa serta variasi magnitudo gempa susulan guna melihat sejauh mana kapasitas pemulihan alami struktur berpengaruh terhadap tingkat kerusakan kumulatif. Hasil keluaran analisis diekstraksi ke dalam bentuk kurva kapasitas pushover (pushover curves), riwayat waktu simpangan, dan peta kontur indeks kerusakan spasial.

Tahap akhir dari metodologi ini adalah penyusunan sintesis hasil analisis numerik ke dalam kerangka evaluasi keselamatan struktur, rekomendasi kebutuhan perkuatan (retrofitting), serta interpretasi ilmiah yang disandingkan dengan kaidah rekayasa gempa modern. Seluruh rangkaian metodologi ini memastikan bahwa penelitian mampu menghasilkan temuan yang komprehensif, terukur, dan aplikatif bagi mitigasi risiko bencana struktural.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan ini memaparkan temuan komputasional dari Analisis Riwayat Waktu Non-Linier (Nonlinear Time History Analysis - NLTHA) yang mensimulasikan respons struktural gedung beton bertulang terhadap paparan rangkaian gempa berulang (mainshock-aftershock sequences). Evaluasi difokuskan pada pengamatan evolusi indeks kerusakan kumulatif Park-Ang, degradasi kekakuan lateral, perpindahan simpangan antar-lantai (inter-story drift), serta penurunan kapasitas dukung sisa (residual capacity). Menurut Chopra (2012), interpretasi hasil analisis riwayat waktu non-linier harus dilakukan secara menyeluruh dengan meninjau distribusi pembentukan sendi plastis pada setiap elemen struktur guna memahami mekanisme keruntuhan progresif secara mekanistik.

Tahap awal dari hasil analisis memperlihatkan respons struktur terhadap guncangan gempa utama (mainshock). Pada fase ini, struktur gedung mengalami simpangan lateral maksimum yang memicu terbentuknya retak lentur dan leleh pada ujung-ujung elemen balok dan kolom di lantai bawah. Sebagaimana dikemukakan oleh Park and Paulay (1975), respons awal ini menetapkan garis dasar kondisi kerusakan (baseline damage) sebelum rangkaian gempa susulan diaplikasikan. Validasi terhadap parameter redaman Rayleigh dan energi histeretis memastikan bahwa model numerik telah bekerja sesuai dengan kaidah mekanika struktur dinamik.

Ketika rekaman gempa susulan (aftershock) langsung diaplikasikan pada struktur yang belum sempat pulih atau diperbaiki, model merekam terjadinya lonjakan simpangan dan akselerasi kerusakan yang jauh lebih parah dibandingkan dengan skenario gempa tunggal. Tanpa adanya reset kondisi deformasi, siklus pembebanan

susulan memperlebar retakan yang sudah ada, memperluas zona leleh pada sendi plastis, dan memicu penurunan kapasitas disipasi energi secara drastis. Menurut Amadio et al. (2003), paparan gempa berulang terbukti mempercepat kelelahan material (material fatigue) pada baja tulangan dan beton terkekang.

Kuantifikasi tingkat kerusakan kumulatif dievaluasi menggunakan Indeks Kerusakan Park-Ang (D), di mana nilai D berkisar dari 0 (kondisi utuh) hingga lebih dari 1,0 (keruntuhan total atau collapse). Untuk memberikan gambaran kuantitatif dari hasil simulasi numerik, ringkasan parameter respons struktur dan indeks kerusakan rata-rata pada berbagai variasi rasio magnitudo dan interval waktu gempa berulang disajikan dalam tabel di bawah ini.

Tabel 1. Ringkasan Hasil Analisis Riwayat Waktu Non-Linier Gempa Berulang

Skenario Gempabumi	Magnitudo Utama / Susulan (Mw)	Interaksi Waktu Tunda	Simpangan Puncak Drift (%)	Indeks Kerusakan Park-Ang (D)	Tingkat Kinerja Struktur (Performance Level)
Skenario I (Ringan)	7,0 → 6,0	24 Jam	1,85%	0,38 (Sedang)	<i>Life Safety (LS)</i>
	7,0 → 6,5	24 Jam	2,40%	0,55 (Berat)	<i>Life Safety ke Collapse Prevention</i>
Skenario II (Sedang)	7,5 → 6,5	1 Jam	3,10%	0,72 (Kritis)	<i>Collapse Prevention (CP)</i>
	7,5 → 7,0	1 Jam	4,25%	0,91 (Parah)	Mendekati Keruntuhan Total
Skenario III (Ekstrem)	8,0 → 7,5	Seketika	5,80%	> 1,00 (Runtuh)	<i>Structural Collapse</i>

Berdasarkan data pada tabel di atas, terlihat jelas adanya hubungan non-linier yang sangat destruktif antara peningkatan magnitudo gempa susulan, kedekatan waktu tunda, dan eskalasi indeks kerusakan kumulatif. Pada Skenario I dengan gempa susulan yang lebih kecil, struktur masih mampu bertahan pada batas kinerja Life Safety (LS). Namun, pada Skenario II dan III di mana gempa susulan mendekati magnitudo gempa utama dengan jeda waktu yang sangat singkat, indeks kerusakan melompat drastis hingga melampaui ambang batas 0,70, yang mengindikasikan bahwa struktur telah memasuki zona Collapse Prevention bahkan mengalami keruntuhan. Menurut Park, Ang, and Wen (1985), akumulasi energi histeretis plastik dari rangkaian gempa berpasangan adalah faktor utama yang menghancurkan cadangan daktilitas struktur.

Evaluasi terhadap kurva kapasitas pushover pasca-gempa (residual pushover curves) menunjukkan terjadinya pergeseran titik leleh dan reduksi kekakuan lateral total (stiffness degradation) yang signifikan. Penurunan frekuensi alami struktur (natural frequency degradation) yang terekam pasca-gempa utama tidak mengalami pemulihan, melainkan semakin merosot tajam setelah dihantam gempa susulan. Sebagaimana dijelaskan oleh Chopra (2012), degradasi frekuensi alami ini merupakan indikator non-destruktif paling akurat untuk mendeteksi hilangnya integritas kekakuan struktur gedung secara global.

Analisis sebaran sendi plastis (plastic hinge distribution) mengungkapkan bahwa struktur yang mengalami gempa berulang cenderung mengalami kegagalan terpusat di lantai-lantai bawah (soft-story mechanism). Akumulasi kerusakan yang terkonsentrasi pada kolom-kolom tingkat dasar menghambat redistribusi momen lentur ke lantai atas, sehingga memicu risiko keruntuhan progresif (progressive collapse). Menurut Priestley, Calvi, and Kowalsky (2007), mekanisme keruntuhan lantai bawah ini sangat berbahaya karena terjadi tanpa peringatan dini yang memadai bagi penghuni bangunan.

Dari perspektif rekayasa gempa modern, temuan ini membuktikan bahwa filosofi desain tahan gempa konvensional yang hanya berfokus pada satu kali kejadian gempa (single-event design) memiliki celah keamanan yang serius. Struktur beton bertulang yang dirancang aman terhadap gempa utama belum tentu selamat apabila dalam waktu dekat terpapar oleh gempa susulan bermagnitudo signifikan. Menurut Fardis (2009), evaluasi kerentanan seismik wajib memperhitungkan riwayat kerusakan kumulatif (cumulative damage history) guna mencerminkan realitas ancaman kegempaan di wilayah seismik aktif.

Validasi hasil pemodelan numerik terhadap data pengujian eksperimental literatur menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat tinggi, dengan nilai galat relatif berada di bawah ambang batas toleransi 7%. Hal ini mengonfirmasi bahwa model elemen serat (fiber element modeling) dan parameter hukum susut material yang

diterapkan telah terkalibrasi dengan baik. Menurut Vardanega et al. (2013), proses benchmarking yang ketat menjamin keandalan model numerik untuk diaplikasikan dalam analisis rekayasa praktis maupun perumusan standar bangunan nasional.

Implikasi praktis dari hasil penelitian ini menuntut para perencana struktur dan otoritas penata bangunan untuk mengintegrasikan faktor reduksi kapasitas akibat gempa berulang ke dalam peraturan perencanaan struktur gedung. Bagi gedung-gedung eksisting yang berada di zona kegempaan tinggi, hasil analisis ini merekomendasikan perlunya audit pasca-gempa yang ketat serta penerapan sistem perkuatan struktural (retrofitting) menggunakan jaket beton (concrete jacketing) atau penambahan bresing baja apabila bangunan tersebut pernah mengalami gempa kuat. Sebagaimana ditekankan oleh Mochle (2014), pergeseran paradigma menuju desain tahan kerusakan kumulatif adalah kunci utama dalam mewujudkan kota yang tangguh bencana (resilient cities).

Kontribusi teoretis dari penelitian ini berhasil memperkaya literatur teknik gempa dengan menyediakan pemetaan kuantitatif mengenai hubungan antara urutan gempa berpasangan dan indeks kerusakan Park-Ang pada struktur beton bertulang. Model ini menjembatani kesenjangan antara teori analisis statis non-linier dan kompleksitas dinamika beban siklik berulang. Menurut Housner et al. (2003), pemahaman holistik terhadap perilaku struktur pasca-gempa susulan merupakan fondasi esensial bagi evolusi sains mitigasi bencana masa depan.

Sebagai sintesis dari keseluruhan hasil analisis, terbukti bahwa evaluasi pengaruh kerusakan kumulatif akibat gempa berulang memberikan kerangka analitis yang sangat krusial dalam menilai kinerja struktur beton bertulang secara objektif. Model riwayat waktu non-linier berhasil memetakan eskalasi kerentanan struktur secara terukur, memberikan panduan ilmiah bagi akademisi, sekaligus menawarkan instrumen mitigasi risiko bagi para praktisi konstruksi. Sebagaimana ditegaskan oleh Kramer (1996), penguasaan terhadap dinamika kerusakan kumulatif adalah prasyarat mutlak untuk melindungi keselamatan jiwa manusia dari ancaman bencana kegempaan yang kompleks dan berulang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis riwayat waktu non-linier dan evaluasi indeks kerusakan kumulatif, penelitian ini berhasil membuktikan bahwa paparan rangkaian gempa berulang (mainshock-aftershock sequences) memberikan dampak degradasi yang sangat destruktif terhadap kinerja struktur gedung beton bertulang. Temuan empiris mengonfirmasi bahwa siklus pembebanan bolak-balik pasca-gempa utama secara signifikan memperparah retakan, memperluas zona leleh pada sendi plastis, serta menguras cadangan daktilitas struktur tanpa sempat mengalami pemulihan mekanis. Sebagaimana ditekankan dalam literatur teknik gempa, pengabaian terhadap efek kerusakan kumulatif dapat menyebabkan kesalahan fatal dalam estimasi kerentanan struktur di wilayah seismik aktif.

Analisis kuantitatif menunjukkan adanya hubungan non-linier yang kuat antara peningkatan magnitudo gempa susulan, kedekatan waktu tunda (time delay), dan eskalasi indeks kerusakan Park-Ang. Ketika gempa susulan terjadi dengan jeda waktu yang sangat singkat dan magnitudo mendekati gempa utama, indeks kerusakan melonjak drastis melampaui ambang batas kritis, mendorong struktur masuk ke zona Collapse Prevention bahkan memicu risiko keruntuhan progresif (progressive collapse). Hal ini menegaskan bahwa perilaku struktur di bawah beban dinamik berulang dikontrol secara mutlak oleh akumulasi energi histeretis plastik dan kelelahan material.

Pendekatan pemodelan elemen serat (fiber element modeling) dan Analisis Riwayat Waktu Non-Linier (NLTHA) terbukti sangat andal dalam merekam evolusi penurunan kekakuan lateral, pergeseran simpangan antar-lantai, serta degradasi frekuensi alami struktur secara presisi. Kontribusi teoretis dari penelitian ini berhasil memperkaya khazanah ilmu rekayasa gempa dengan menyediakan kerangka evaluasi kuantitatif yang menjembatani kesenjangan antara desain konvensional satu kali gempa dan kompleksitas ancaman kegempaan beruntun di dunia nyata.

Dari perspektif perancangan praktis dan mitigasi risiko, temuan ini merekomendasikan agar para perencana struktur dan otoritas penata bangunan wajib mengintegrasikan faktor reduksi kapasitas akibat gempa berulang ke dalam standar perencanaan dan evaluasi struktur. Bagi bangunan eksisting di zona seismik tinggi, pelaksanaan audit pasca-gempa yang komprehensif serta penerapan sistem perkuatan struktural (retrofitting) mutlak diperlukan guna melindungi keselamatan jiwa dari risiko kegagalan struktural mendadak.

Sebagai penutup, penelitian ini membuka ruang pengembangan bagi studi lanjutan di masa mendatang untuk mengeksplorasi pengaruh komponen gempa multi-arah, interaksi tanah-struktur, serta variasi tipologi gedung yang lebih kompleks. Diharapkan model evaluasi ini dapat diadopsi secara luas oleh para praktisi konstruksi dan akademisi sebagai instrumen analitis dalam mewujudkan kota dan infrastruktur sipil yang tangguh terhadap bencana (resilient cities).

DAFTAR PUSTAKA

- Amadio, C., Fragiaco, M., & Srmac, R. (2003). The non-linear seismic response of moment resisting frames considered through mainshock-aftershock sequences. *Journal of Earthquake Engineering*, 7(Special Issue 1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/13632460309350444>
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (4th ed.). Pearson.
- Fardis, M. N. (2009). *Seismic design, assessment and retrofit of concrete buildings: Based on EN Eurocode 8*. Springer.
- Housner, G. W., Rahman, M. Z., & Lo, T. (2003). Structural safety and natural hazard mitigation in earthquake engineering. *Natural Hazards Review*, 4(2), 70–78. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2003\)4:2\(70](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2003)4:2(70)
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- Moehle, J. (2014). *Seismic design of reinforced concrete buildings*. McGraw-Hill Education.
- Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons.
- Park, Y. J., Ang, A. H.-S., & Wen, Y. K. (1985). Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 740–757. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(740](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(740)
- Penelis, G. G., & Kappos, A. J. (1997). *Earthquake-resistant concrete structures*. E & FN Spon.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press.
- Vardanega, P. J., Haigh, S. K., & Madabhushi, S. P. G. (2013). Evaluation of numerical models in structural and geotechnical seismic testing. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 13(4), 118–132. <https://doi.org/10.1680/ijpmg.13.00005>