

RETROFIT SEISMIK EFISIEN UNTUK BANGUNAN BETON BERTULANG EKSISTING

Junaedi Utomo^{1*}, Han Ay Lie² dan Hermawan³

^{1*} Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44, Yogyakarta
e-Email: junaedi.utomo@uajy.ac.id

² Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. H. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang
e-mail: hanaylie@live.undip.ac.id

³ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur Sel. IV No.1,
Semarang e-mail: hermawan.mrk@gmail.com

ABSTRAK

Masalah yang sering ada pada bangunan eksisting antara lain: ketidak teraturan baik horisontal maupun vertikal, kekakuan lateral struktur rendah, dan daktilitas rendah sehingga bangunan eksisting tersebut rentan terhadap gempa dan memerlukan seismik retrofit untuk meningkatkan kekakuan dan kapasitasnya. Saat ini evaluasi seismik dan retrofit pada bangunan eksisting mengacu pada standar ASCE41-17. Ada dua prosedur yang disederhanakan dalam ASCE41-17 yaitu: Tier 1 untuk *screening* dan Tier 2 untuk evaluasi berbasis defisiensi. Untuk struktur bangunan yang lebih kompleks, ASCE41-17 menyediakan Tier 3 yaitu prosedur evaluasi sistematis. Ada dua pilihan untuk Tier 3 yaitu Tier 3 dengan prosedur linier dan Tier 3 dengan prosedur non linier. Makalah ini akan memakai Tier 3 dengan prosedur non linier karena pilihan ini diizinkan untuk bangunan kompleks dengan lebih dari satu ke tidak teraturan dan untuk semua level kinerja yang dievaluasi. Prosedur non linier lebih tidak konservatif bila dibanding dengan prosedur linier sehingga faktor keamanan yang digunakan dapat lebih rendah. Ada dua prosedur non linier: *Nonlinear Static Procedure* (NSP) dan *Nonlinear Dynamic Procedure* (NDP). NSP akan digunakan untuk melakukan asesmen terhadap respons seismik dan dilanjutkan dengan perkuatan pada struktur beton bertulang eksisting. Informasi detail tentang struktur bangunan eksisting yaitu: uji material, gambar kerja, hasil *scanning* tulangan terpasang dan survei lapangan, perlu diperoleh dan dipahami dengan baik sebelum melakukan evaluasi seismik sehingga prosedur non linear yang kurang konservatif, bersama dengan faktor keamanan yang lebih rendah, dapat digunakan. Dengan pendekatan ini kriteria penerimaan dari ASCE41-17 lebih mudah dipenuhi. Proses iterasi dengan NSP dipakai untuk memperoleh efisiensi hasil retrofit melalui intervensi terhadap sistem struktur eksisting.

Kata kunci: ASCE41-17, Bangunan Eksisting, Intervensi, *Nonlinear Static Procedure*, Seismik Retrofit

PENDAHULUAN

Retrofitting adalah bentuk intervensi ke sistem struktur bangunan eksisting yang potensial memerlukan biaya tinggi dan juga potensial menimbulkan ke tidak nyamanan. Metode yang digunakan untuk *retrofitting* dapat menyebabkan kerusakan pada komponen non struktural yang nantinya harus diperbaiki, dan menimbulkan gangguan operasional dalam bangunan bila retrofit dilaksanakan bersamaan dengan penggunaan bangunan. Prosedur berbasis defisiensi dan prosedur sistematis dalam ASCE41-17 memakai prinsip-prinsip berbasis kinerja (*performance-based*) untuk evaluasi seismik dan retrofit bangunan eksisting dengan kriteria dari pemilik bangunan, ahli teknik yang kompeten atau instansi yang berwenang. ASCE41-17 ditulis dengan lingkup aplikasi yang lebar sehingga pengguna punya banyak opsi dalam memilih Level Bahaya Seismik dan Level Target Kinerja Bangunan saat menentukan Sasaran Kinerja Bangunan. Strategi seismik retrofit yang efisien adalah : (1) menggunakan prosedur non linier, prosedur non linier lebih tidak konservatif dibanding dengan prosedur linier sehingga faktor keamanan yang digunakan lebih rendah; (2) meminimalkan gangguan saat pelaksanaan retrofit.



RETROFIT, EVALUASI SEISMIK DAN LEVEL PENGETAHUAN

Retrofit dilakukan untuk menghilangkan atau mengurangi defisiensi pada bangunan eksisting dengan meningkatkan kinerja struktur keseluruhan, melalui perkuatan pada elemen struktur atau dengan menambahkan elemen baru ke dalam sistem struktur. Retrofit sering dilakukan untuk meningkatkan kapasitas geser dan lentur dari elemen-elemen struktur agar memenuhi ketentuan dalam peraturan yang berlaku.

Proses evaluasi seismik dalam ASCE41-17 terdiri dari tiga tier, yaitu: Prosedur *screening* Tier 1, prosedur evaluasi berbasis defisiensi Tier 2 dan prosedur evaluasi sistematis Tier 3. Evaluasi Tier 1 perlu dilakukan lebih dahulu untuk mencari potensi defisiensi pada bangunan eksisting. Untuk evaluasi yang lebih detail dan akurat, prosedur evaluasi sistematis Tier 3 dapat langsung dipakai untuk asesmen semua komponen dalam bangunan eksisting. Analisis dengan Tier 3 mengkonfirmasi semua defisiensi yang telah teridentifikasi dari evaluasi Tier 1. Prosedur Tier 3 yang memakai analisis non linier dapat menghasilkan solusi retrofit yang lebih ekonomis, dibandingkan dengan solusi dari prosedur Tier 1 dan Tier 2 yang konservatif. Empat prosedur analisis yang diizinkan dalam ASCE41-17 adalah: Prosedur Statik Linier (LSP), Prosedur Dinamik Linier (LDP), Prosedur Statik Nonlinier (NSP) dan Prosedur Dinamik Nonlinier (NDP). Saat ini NSP telah menjadi standar untuk retrofit dan dipakai untuk: (1) struktur dengan *irregularity*; (2) memperhitungkan *high inelastic demand*; (3) memeriksa *higher mode effects* (Antoniou, 2023). Prosedur NSP akan dipakai untuk asesmen bangunan eksisting dalam makalah ini.

Level Pengetahuan (*Knowledge level*) merupakan hal yang baru dalam retrofit bangunan. Level Pengetahuan ditentukan oleh : (1) geometri sistem struktur, baik komponen struktural maupun komponen nonstruktural; (2) *detailing*, yaitu detil dan jumlah tulangan terpasang; dan (3) material penyusun komponen. Meskipun gambar konstruksi dan gambar jadi (*as-built drawings*) telah diperoleh, tetap harus dilakukan survei lapangan dan uji material untuk memeriksa apakah ada penyimpangan yang dapat berpengaruh terhadap respon seismik struktur. ASCE41-17 membagi Level Pengetahuan menjadi tiga yaitu: *minimum*, *usual* dan *comprehensive* yang selanjutnya dipakai dengan memilih satu di antara tiga *knowledge factor* yaitu: 0.75-0.9, 1.0 dan 1.0. *Knowledge factor* dari ASCE41-17 beroperasi pada sisi kapasitas komponen sehingga nilainya lebih kecil atau maksimum sama dengan satu. Level Pengetahuan dipakai untuk memilih jenis analisis yang digunakan, dan *knowledge factor* dipakai sebagai tambahan faktor keamanan untuk memperhitungkan kurangnya pengetahuan tentang bangunan eksisting. ASCE7-41 tidak memperbolehkan pemakaian prosedur analisis non linier bila Level Pengetahuan bangunan eksisting adalah minimum.

LEVEL KINERJA, SASARAN KINERJA DAN LEVEL BAHAYA SEISMIK

Performance objective adalah Sasaran Kinerja yang harus ditentukan saat melakukan evaluasi atau retrofit. Konsep perancangan berbasis kinerja diimplementasikan melalui pilihan satu atau lebih target sasaran kinerja bangunan yang terdiri dari pasangan level kinerja (*performance level*) dan level bahaya seismik (*seismic hazard level*). Level kinerja adalah ukuran kinerja bangunan eksisting saat mengalami gempa, yaitu pola kerusakan komponen struktural dan nonstruktural yang dialami bangunan paska gempa. Untuk komponen struktural, Level Kinerja menyatakan keamanan bangunan dan dikelompokkan dalam 6 kondisi diskrit yaitu: (1). *Immediate Occupancy* (S-1) – kondisi kerusakan terbatas paska gempa, bangunan aman dihuni; (2). *Damage Control* (S-2) – diantara S-1 dan S-3; (3). *Life Safety* (S-3) – kondisi kerusakan paska gempa, komponen-komponen struktural mengalami kerusakan berat namun belum menimbulkan keruntuhan parsial atau total; (4). *Limited Safety* (S-4) – Diantara S-3 dan S-5; (5). *Collapse Prevention* (S-5) – kondisi kerusakan paska gempa, struktur mengalami kerusakan signifikan meskipun masih mampu mendukung beban gravitasi; dan (6). *Not Considered* (S-6) – *performance level* ini dipakai bila retrofit hanya dilakukan pada komponen nonstruktural, kinerja komponen struktural tidak ditinjau (biasanya atas permintaan pemilik bangunan). Untuk komponen nonstruktural, Level Kinerja menunjukkan pola kerusakan paska gempa pada komponen nonstruktural dan dibagi dalam 5 kondisi diskrit yaitu: (1). *Operational* (N-A); (2). *Position Retention* (N-B); (3). *Life Safety* (N-C); (4). *Hazards Reduced* (N-D); dan (5). *Not Considered* (N-E).

Satu atau lebih Target Sasaran Kinerja dipilih dari pasangan beberapa Level Kinerja Target dan Level Bahaya Seismik seperti ditunjukkan oleh **Tabel 1**. Dalam **Tabel 1**, BSE 1-E, BSE 2-E dan BSE 2-N adalah Level Bahaya Seismik, misalnya BSE 1-E adalah *Basic Safety Earthquake* - 1 untuk bangunan eksisting dengan kemungkinan terlampaui 20% dalam 50 tahun. Masing-masing *cell* dalam **Tabel 1** adalah Sasaran Kinerja diskrit. Contoh pemilihan target sasaran kinerja dalam Tabel 1 ditunjukkan oleh Gambar 1. ASCE 41-17 menentukan *Basic Performance Objective for Existing Buildings* (BPOE) yang terdiri dari dua objek diskrit (yaitu: Sasaran Kinerja g dan l pada Gambar 1) di atas garis diagonal dari kiri atas ke kanan bawah. Jadi di dalam BPOE ASCE 41-17, bahaya seismik didasarkan pada kemungkinan terlampaui 5% dalam 50 tahun dan 20% dalam 50 tahun. Dibanding dengan gedung baru yang berdasar kemungkinan terlampaui 2% dalam 50 tahun, BPOE mengizinkan pengguna mengambil risiko yang lebih tinggi.

Tabel 1. Level Kinerja Bangunan dalam ASCE 41-17 (Tabel C2-2)

Level Bahaya Seismik	Level Kinerja Bangunan			
	Level Kinerja Operational (1-A)	Level Kinerja Immediate Occupancy (1-B)	Level Kinerja Life Safety (3-C)	Level Kinerja Collapse Prevention (5-D)
50%/50 tahun (tahun)	a	b	c	d
BSE 1-E (20%/50 thn)	e	f	g	h
BSE 2-E (5%/50 thn)	i	j	k	l
BSE 2-N (ASCE 7 – MCE _R)	m	n	o	p



Gambar 1. Pemilihan Sasaran Kinerja dalam SeismoBuild

ASCE41-17 menentukan batasan kapasitas kuantitatif tiap level kinerja untuk semua kuantitas respon yang diperiksa. Batasan kapasitas kuantitatif ini disebut *Acceptance Criteria*. Batasan kapasitas kuantitatif ini merupakan nilai maksimum untuk kuantitas respon yang diperiksa (misal: sendi-plastis yang dimodelkan dengan *moment-chord rotation*). Struktur dinyatakan memenuhi tiap level kinerja bila kuantitas respon dari komponen di dalam struktur di bawah batas kapasitas kuantitatif.

RESPON SPEKTRA AKSELERASI

Bahaya seismik akibat gerakan tanah didefinisikan melalui Respon Spektra Akselerasi atau riwayat akselerasi gerakan tanah akibat gempa yang ditentukan secara probabilistik atau deterministik. Contoh Respon Spektra Akselerasi yang merupakan *screenshot* dari perangkat lunak *SeismoBuild* ditunjukkan oleh **Gambar 2**. Parameter S_{XS} (desain parameter percepatan respon spektral periode pendek) dan S_{XI} (desain parameter percepatan respon spektral periode panjang) pada **Gambar 2** dihitung memakai Prosedur Umum pada *section 2.4.1* dari ASCE41-17. Contoh hitungan parameter S_{XS} dan S_{XI} dapat dilihat pada FEMA P2006



(2018). Kedua parameter ini perlu ditentukan untuk level bahaya seismik BSE-1E dan BSE-2E. Sebagai ilustrasi, hitungan parameter S_{XS} dan S_{XI} untuk bangunan di Yogyakarta dengan nilai redaman 5% dan kelas situs D untuk level bahaya seismik BSE-1E dan BSE-2E dilakukan sebagai berikut:

BSE 2-E: 5%/50 tahun percepatan respon spektral, dibatasi oleh **BSE-2N**

Desain parameter percepatan respon spektral periode pendek $S_{XS,BSE-2E}$ ditentukan dengan $F_{a,5/50} \times S_{S,5/50}$ namun tidak lebih besar dari $S_{XS,BSE-2N}$.

Percepatan respon spektral periode pendek ditentukan dengan Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia (2022): $S_{S,5/50} = 0.9$ dan $S_{S,BSE-2N} = 1.35$. Faktor F_a untuk menyesuaikan percepatan respon spektral periode pendek untuk kelas situs ditentukan Tabel 11.4-1 dari ASCE 7-16: $F_{a,5/50} = 1.14$ dan $F_{a,BSE-2N} = 1.0$.

$$S_{XS,BSE-2N} = F_{a,BSE-2N} \times S_{S,BSE-2N} = 1.0 \times 1.35 = 1.35$$

$$S_{XS,BSE-2E} = F_{a,5/50} \times S_{S,5/50} = 1.14 \times 0.9 = 1.03 < S_{XS,BSE-2N}$$

Desain parameter percepatan respon spektral periode panjang $S_{XI,BSE-2E}$ ditentukan dengan $F_{v,5/50} \times S_{I,5/50}$ namun tidak lebih besar dari $S_{XI,BSE-2N}$.

Percepatan respon spektral periode panjang ditentukan dengan Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia (2022): $S_{I,5/50} = 0.1$ dan $S_{I,BSE-2N} = 0.2$. Faktor F_v untuk menyesuaikan percepatan respon spektral periode panjang untuk kelas situs ditentukan Tabel 11.4-2 dari ASCE 7-16: $F_{v,5/50} = 2.4$ dan $F_{v,BSE-2N} = 2.2$.

$$S_{XI,BSE-2N} = F_{v,BSE-2N} \times S_{I,BSE-2N} = 2.2 \times 0.2 = 0.44$$

$$S_{XI,BSE-2E} = F_{v,5/50} \times S_{I,5/50} = 2.4 \times 0.1 = 0.24 < S_{XI,BSE-2N}$$

BSE 1-E: 20%/50 tahun percepatan respon spektral, dibatasi oleh **BSE-1N**

Desain parameter percepatan respon spektral periode pendek $S_{XS,BSE-1E}$ ditentukan dengan $F_{a,20/50} \times S_{S,20/50}$ namun tidak lebih besar dari $S_{XS,BSE-1N}$.

Percepatan respon spektral periode pendek ditentukan dengan Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia (2022): $S_{S,20/50} = 0.5$. Faktor F_a untuk menyesuaikan percepatan respon spektral periode pendek untuk kelas situs ditentukan Tabel 11.4-1 dari ASCE 7-16: $F_{a,20/50} = 1.4$.

$$S_{XS,BSE-1N} = 2/3 \times S_{S,BSE-2N} = 2/3 \times 1.35 = 0.9$$

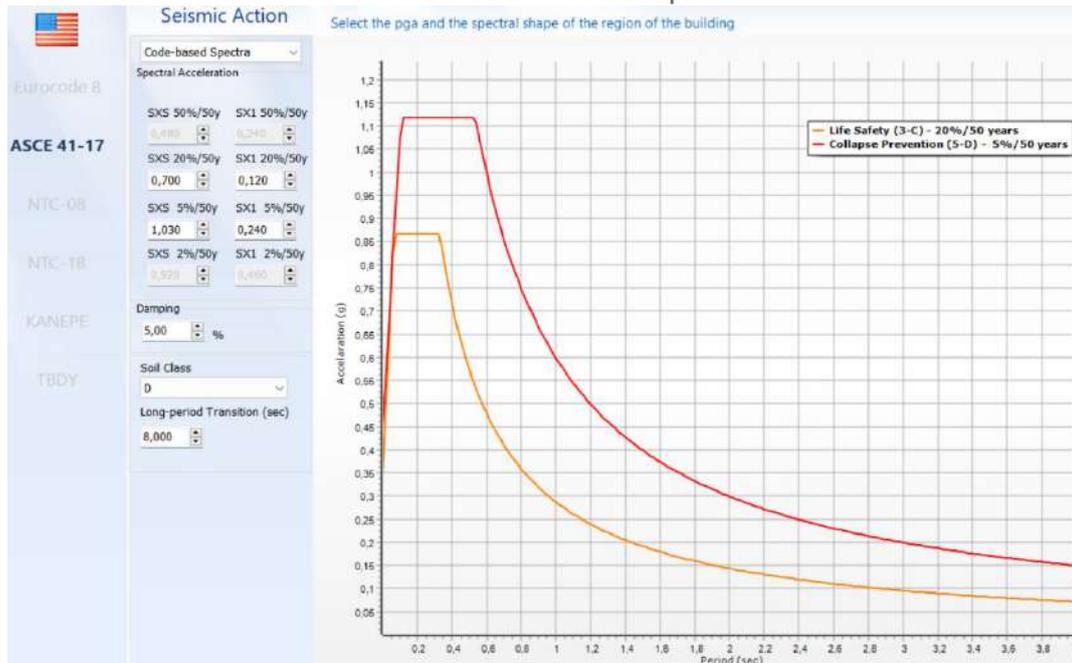
$$S_{XS,BSE-1E} = F_{a,20/50} \times S_{S,20/50} = 1.4 \times 0.5 = 0.7 < S_{XS,BSE-1N}$$

Desain parameter percepatan respon spektral periode panjang $S_{XI,BSE-1E}$ ditentukan dengan $F_{v,20/50} \times S_{I,20/50}$ namun tidak lebih besar dari $S_{XI,BSE-1N}$.

Percepatan respon spektral periode panjang ditentukan dengan Peta Diagregasi Bahaya Gempa Indonesia (2022): $S_{I,20/50} = 0.05$. Faktor F_v untuk menyesuaikan percepatan respons spektral periode panjang untuk kelas situs ditentukan Tabel 11.4-2 dari ASCE 7-16: $F_{v,20/50} = 2.4$.

$$S_{XI,BSE-1N} = 2/3 \times S_{I,BSE-2N} = 2/3 \times 0.4 = 0.27$$

$$S_{XI,BSE-1E} = F_{v,20/50} \times S_{I,20/50} = 2.4 \times 0.05 = 0.12 < S_{XI,BSE-1N}$$



Gambar 2. Respon Spektra Akselerasi untuk bahaya seismik BSE-1E dan BSE-2E.

Code-based spectra pada **Gambar 2** dibentuk dengan memasukkan nilai-nilai yang telah dihitung yaitu nilai parameter $S_{XS,BSE-1E} = 0.7$, $S_{XI,BSE-1E} = 0.12$, $S_{XS,BSE-2E} = 1.03$, $S_{XI,BSE-2E} = 0.24$, redaman 5%, dan kelas situs D. Berdasar pengamatan hasil diagrafasi di Indonesia, untuk periode getar 1 detik tidak terlalu berbeda dengan periode getar 3 detik. Oleh karena itu, Peta Diagrafasi Bahaya Gempa Indonesia (2022) disajikan untuk periode getar 0.2 dan 3 detik (halaman 24) dan dipakai untuk membentuk Respons Spektra Akselerasi.

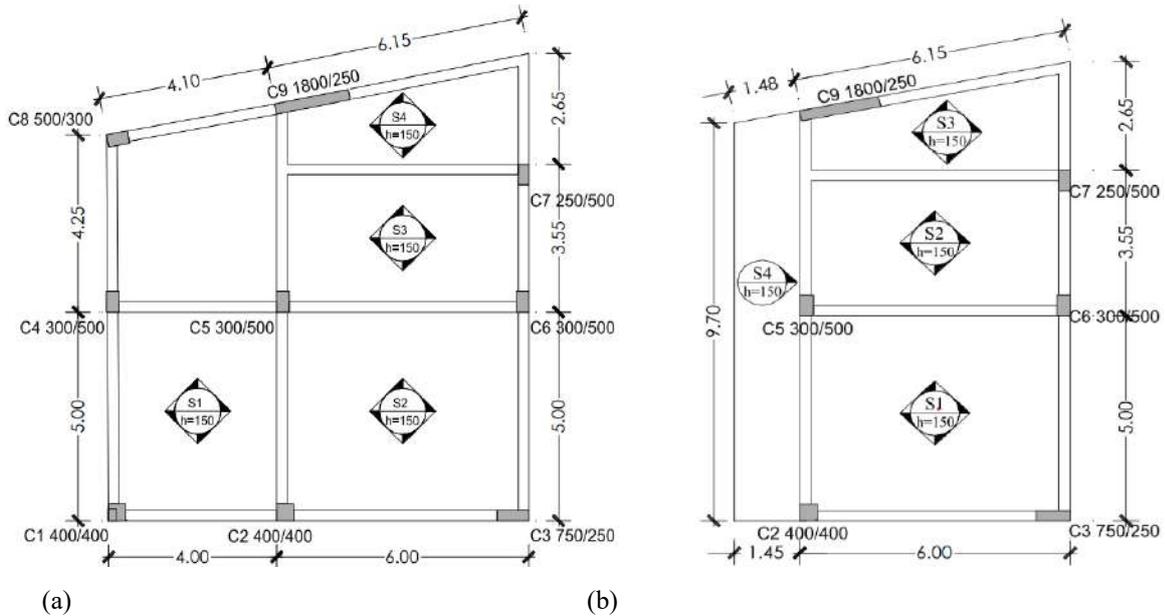
SIMULASI SEISMİK RETROFIT BANGUNAN BETON BERTULANG EKSISTING

Lokasi bangunan beton bertulang eksisting diasumsikan di Yogyakarta dengan kelas situs D dan 5% nilai redaman. Bangunan eksisting yang akan dibahas diambil dari *manual SeismoBuild* dan telah dimodifikasi yaitu: (1) jumlah tingkat ditambah dari dua menjadi tiga tingkat, untuk lebih memunculkan ketidak teraturan vertikal; (2) ditambah tangga beton bertulang, agar pengaruh adanya tangga terhadap respon non linier struktur dapat ikut diperhitungkan; (3) dimensi kolom diperkecil untuk memunculkan berbagai defisiensi. **Gambar 3** menunjukkan geometri bangunan eksisting.

Asesmen dan retrofit bangunan eksisting dilakukan langsung dengan prosedur NSP (Tier 3 memakai prosedur nonlinier). ASCE 41-17 tidak mengizinkan penggunaan metoda analisis nonlinier canggih seperti NSP bila level pengetahuan terhadap bangunan eksisting adalah minimum. Bila informasi tentang bangunan eksisting tidak lengkap, sehingga berbagai defisiensi yang ada bisa saja tidak teridentifikasi maka metoda linier, dengan faktor keamanan yang lebih besar untuk mengkompensasi kurangnya level pengetahuan, lebih cocok untuk digunakan. Dalam makalah ini diasumsikan level pengetahuan tentang bangunan eksisting cukup sehingga dipakai *knowledge factor* = 1,0. Level pengetahuan cukup artinya *properties* dari masing-masing komponen yang akurat sudah diperoleh melalui data yang tersedia, dan telah diverifikasi dengan uji material. Nilai-nilai *default* desak beton dan tarik baja dari *SeismoBuild* yang ditunjukkan oleh **Tabel 2** dipakai untuk asesmen dan retrofit.

Dimensi elemen-elemen struktur adalah sebagai berikut: (1) kolom: C1 dan C2 (300 mm x 300 mm), C3 (500 mm x 250 mm), C3, C5, C6, C7 dan C8 (500 mm x 400 mm); (2) balok: Semua balok (B1 s/d B20) (500 mm x 250 mm); (3) dinding beton: W9 (1800 mm x 250 mm). Tulangan *longitudinal* dan *transversal* di dalam elemen-elemen struktur tidak ditunjukkan semua. Hanya tulangan kolom yang diretrofit yang akan ditunjukkan. Tebal pelat lantai 150 mm, ditunjukkan oleh **Gambar 3**. *Superimpose dead load* = 1.5 kN/m²

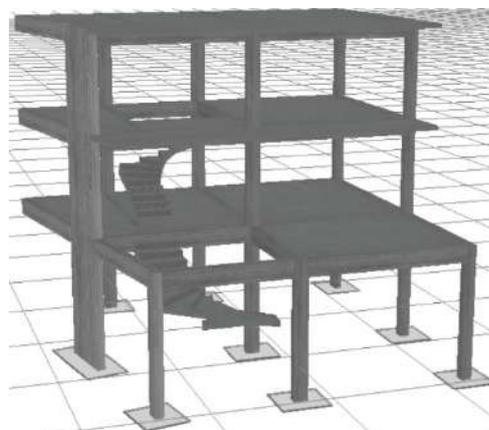
dan beban hidup 2 kN/m². Tulangan terpasang pada pelat lantai (arah sumbu X dan sumbu Y) $\Phi 10@150$ mm c/c. Tinggi masing-masing kolom 3,0 m dan pondasi pada posisi -1,0 m. Konfigurasi bangunan beton bertulang eksisting ditunjukkan oleh **Gambar 4**.



Gambar 3. Bangunan eksisting (tangga tidak ditunjukkan): (a) Denah lantai I; (b) Denah lantai II dan III.

Tabel 2. *Properties* material yang dipakai dalam retrofit

Nama	Tipe Elemen	F_c , nilai yang diharapkan (MPa)	F_c , nilai batas bawah (MPa)	F_s , nilai yang diharapkan (MPa)	F_s , nilai batas bawah (MPa)
<i>Default</i> eksisting	Eksisting	20.0 (<i>Mean</i>)	16.0 (<i>Mean</i> - σ)	275.0 (<i>Mean</i>)	220.0 (<i>Mean</i> - σ)
<i>Default</i> baru	Baru	33.0 (<i>Mean</i>)	25.0 (<i>Mean</i> - σ)	555.6 (<i>Mean</i>)	500.0 (<i>Mean</i> - σ)



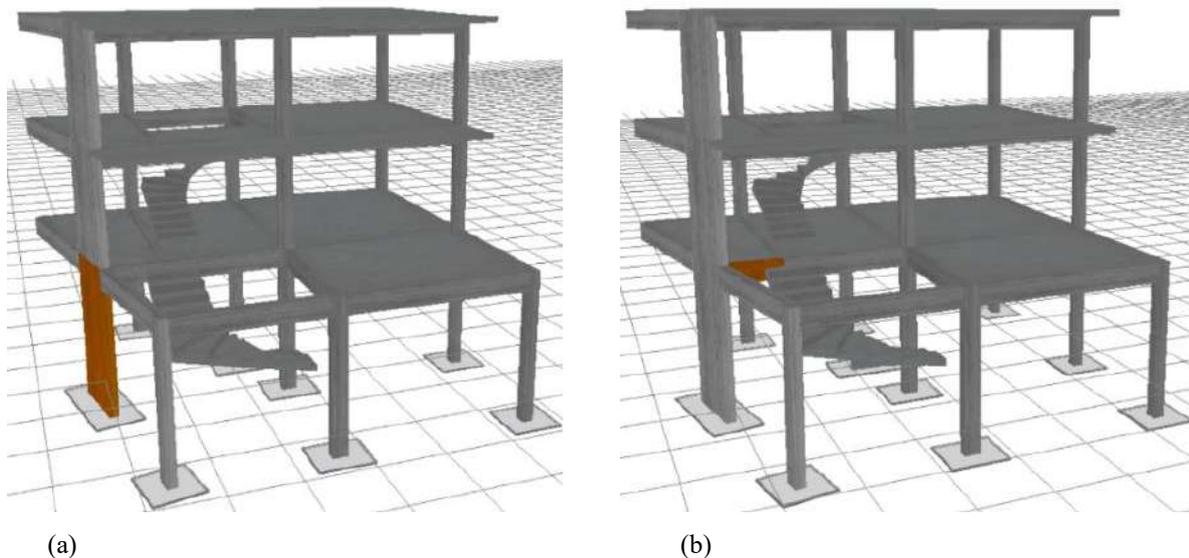
Gambar 4. Konfigurasi bangunan beton bertulang eksisting.

Level Kinerja untuk evaluasi dan retrofit telah ditentukan oleh ASCE41-17 yaitu: *Life Safety* dan *Collapse Provention*. Bahaya Seismik juga telah ditentukan, yaitu: BSE-1E dan BSE-2E. Pasangan Level Kinerja dan Bahaya Seismik menghasilkan Sasaran Kinerja, yaitu: pilihan g dan l yang ditunjukkan dalam **Gambar 1**. Selanjutnya Bahaya Seismik BSE-1E dan BSE-2E dinyatakan dalam *Code-based spectra* dari ASCE41-17 yang dibentuk menggunakan Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia (2022), dan ditunjukkan oleh **Gambar 2**. Asesmen dan retrofit bangunan biasanya dilakukan lebih dahulu melalui prosedur Tier 1 untuk

screening awal dengan *checklists* yang disediakan oleh ASCE41-17. Namun karena bangunan eksisting ini sederhana maka prosedur Tier 1 untuk mendeteksi potensi defisiensi tidak dilakukan. Potensi defisiensi bangunan eksisting dapat diidentifikasi melalui **Gambar 3** dan **Gambar 4** yaitu melalui konfigurasi, sistem struktur dan detail semua elemen. Evaluasi seismik dilakukan langsung memakai prosedur Tier 3. Hasil analisis nonlinier ini akan mengkonfirmasi potensi defisiensi yang telah diidentifikasi.

Dari **Gambar 3** dan **Gambar 4** tampak bahwa distribusi massa, kekakuan dan geometri sepanjang tinggi bangunan menimbulkan ketidakteraturan vertikal, dan adanya dinding beton yang asimetri yaitu pada satu sisi bangunan saja menimbulkan ketidakteraturan horizontal (*stiffness irregularity*). Perlu strategi retrofit agar intervensi yang akan dilakukan hanya menimbulkan gangguan minimal, karena mungkin saja saat intervensi sedang dikerjakan gedung masih tetap operasional. Selain gangguan minimal, kerusakan komponen nonstruktural juga perlu diusahakan minimal. Strategi retrofit yang dipilih adalah memperkuat kolom-kolom luar disisi yang berlawanan dengan dinding beton dengan *column jacketing*. Dengan kekuatan *jacketing* pada kolom-kolom luar maka *stiffness irregularity* akan berkurang sehingga respon seismik bangunan eksisting menjadi lebih baik. Dengan menggunakan strategi ini, gangguan saat intervensi dilakukan terhadap kondisi eksisting dan operasional (bila ada) adalah minimal. Delapan kombinasi beban default dari *SeismoBuild* yaitu : $\text{Modal} \pm X \pm \text{ecc}Y$ dan $\text{Modal} \pm Y \pm \text{ecc}X$ dipakai dalam analisis *pushover*. Selanjutnya dilakukan *code-based checks* untuk level kinerja *Life Safety* dan *Collapse Prevention* seperti ditunjukkan oleh **Gambar 5** dan **Gambar 6**. Dari hasil analisis tampak bahwa, akibat ketidak teraturan horizontal, gaya lateral terkonsentrasi pada dinding beton. Hasil analisis juga mengkonformasi bahwa kolom-kolom luar disisi yang berlawanan dengan dinding perlu ditingkatkan kekuatan dan kekakuannya. Dari hasil analisis ini tampak bahwa kekakuan yang tidak seimbang antara dinding beton dan kolom-kolom (terutama kolom-kolom luar pada sisi yang berlawanan) menimbulkan banyak masalah defisiensi. Perkuatan pada dinding beton biayanya mahal, apalagi bila pondasi dinding beton juga diperkuat, oleh karena itu dicoba dinding beton tidak diperkuat namun kolom-kolom luar diperkuat dan ditingkatkan kekakuannya dengan *concrete jacketing*. Iterasi pertama dalam proses retrofit dilakukan dengan melakukan *column jacketing* pada kolom-kolom luar lantai I seperti ditunjukkan oleh **Gambar 7**.

Life Safety (3-C) :



Gambar 5. Life Safety (code-based checks): (a) Members chord rotations; (b) Members shear forces.

Collapse Prevention (5-D):

Longitudinal Reinforcement

JACKET, Corners: 4Ø18mm, Top/Bottom: 2Ø14mm, Left/Right: 2Ø14mm, Additional: None. $A_{s,tot} = 1633,63 \text{ cm}^2$.
CORE, Corners: 4Ø18mm, Top/Bottom: 0Ø14mm, Left/Right: 0Ø14mm. Additional: None. $A_{s,tot} = 1017,88 \text{ cm}^2$.

Transverse Reinforcement

JACKET, Along height: 2Ø8mm/15 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 15 \text{ cm}$. Along width: 2Ø8mm/15 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 15 \text{ cm}$.
CORE, Along height: 2Ø8mm/20 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 20 \text{ cm}$. Along width: 2Ø8mm/20 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 20 \text{ cm}$.

Member : column C2 , Floor : 1

Longitudinal Reinforcement

JACKET, Corners: 4Ø18mm, Top/Bottom: 2Ø14mm, Left/Right: 2Ø14mm, Additional: None. $A_{s,tot} = 1633,63 \text{ cm}^2$.
CORE, Corners: 4Ø18mm, Top/Bottom: 0Ø14mm, Left/Right: 0Ø14mm. Additional: None. $A_{s,tot} = 1017,88 \text{ cm}^2$.

Transverse Reinforcement

JACKET, Along height: 2Ø8mm/15 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 15 \text{ cm}$. Along width: 2Ø8mm/15 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 15 \text{ cm}$.
CORE, Along height: 2Ø8mm/20 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 20 \text{ cm}$. Along width: 2Ø8mm/20 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 20 \text{ cm}$.

Member : column C3 , Floor : 1

Longitudinal Reinforcement

JACKET, Corners: 4Ø18mm, Top/Bottom: 2Ø14mm, Left/Right: 2Ø14mm, Additional: None. $A_{s,tot} = 1633,63 \text{ cm}^2$.
CORE, Corners: 4Ø18mm, Top/Bottom: 2Ø14mm, Left/Right: 0Ø14mm. Additional: None. $A_{s,tot} = 1325,75 \text{ cm}^2$.

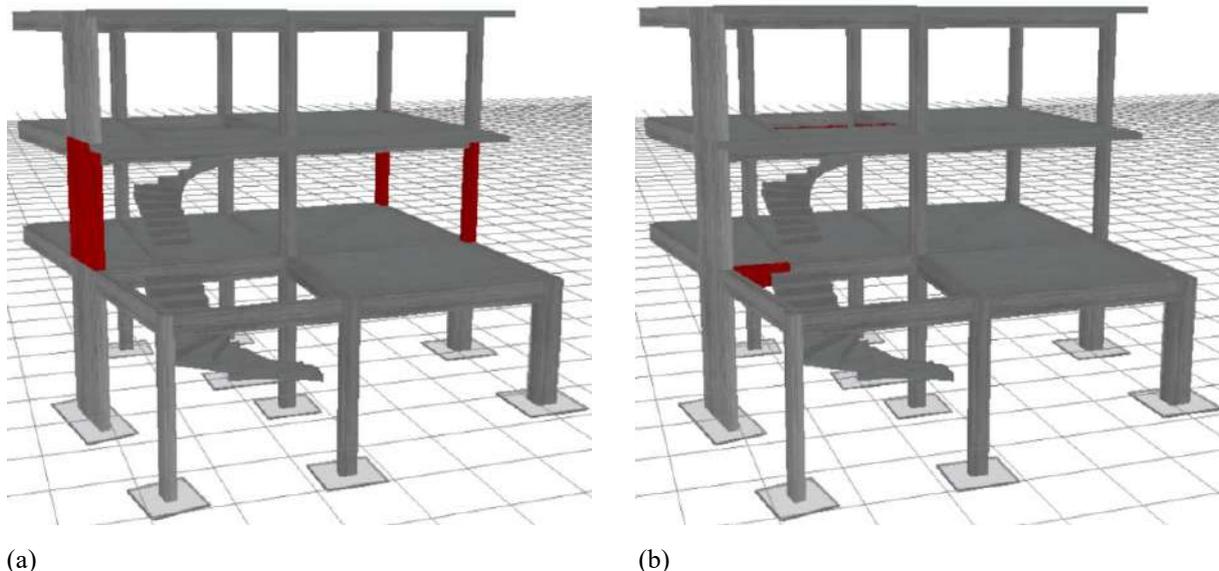
Transverse Reinforcement

JACKET, Along height: 2Ø8mm/20 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 20 \text{ cm}$. Along width: 2Ø8mm/20 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 20 \text{ cm}$.
CORE, Along height: 2Ø8mm/20 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 20 \text{ cm}$. Along width: 2Ø8mm/20 cm. $A_{sw} = 1,01 \text{ cm}^2 / 20 \text{ cm}$.

Gambar 8. Detail tulangan longitudinal dan transversal kolom luar C1, C2 dan C3 pada lantai I

Hasil *code-based checks* untuk level kinerja *Collapse Prevention* pada iterasi pertama ditunjukkan **Gambar 9**. Untuk level kinerja *Life Safety* semua defisiensi telah hilang sehingga tidak ditunjukkan. Dari **Gambar 9a** tampak bahwa strategi *stiffness balancing* dapat dilanjutkan dengan *concrete jacketing* pada kolom lantai I sampai lantai II seperti ditunjukkan oleh **Gambar 10**. Perkuatan kolom C3 dan kolom C10 sama dengan kolom di bawahnya. Perkuatan akibat defisiensi geser pada balok (**Gambar 9b**) dilakukan dengan pembungkusan eksternal menggunakan *fiber reinforced polymer* (FRP) yang tidak berpengaruh terhadap kekakuan balok.

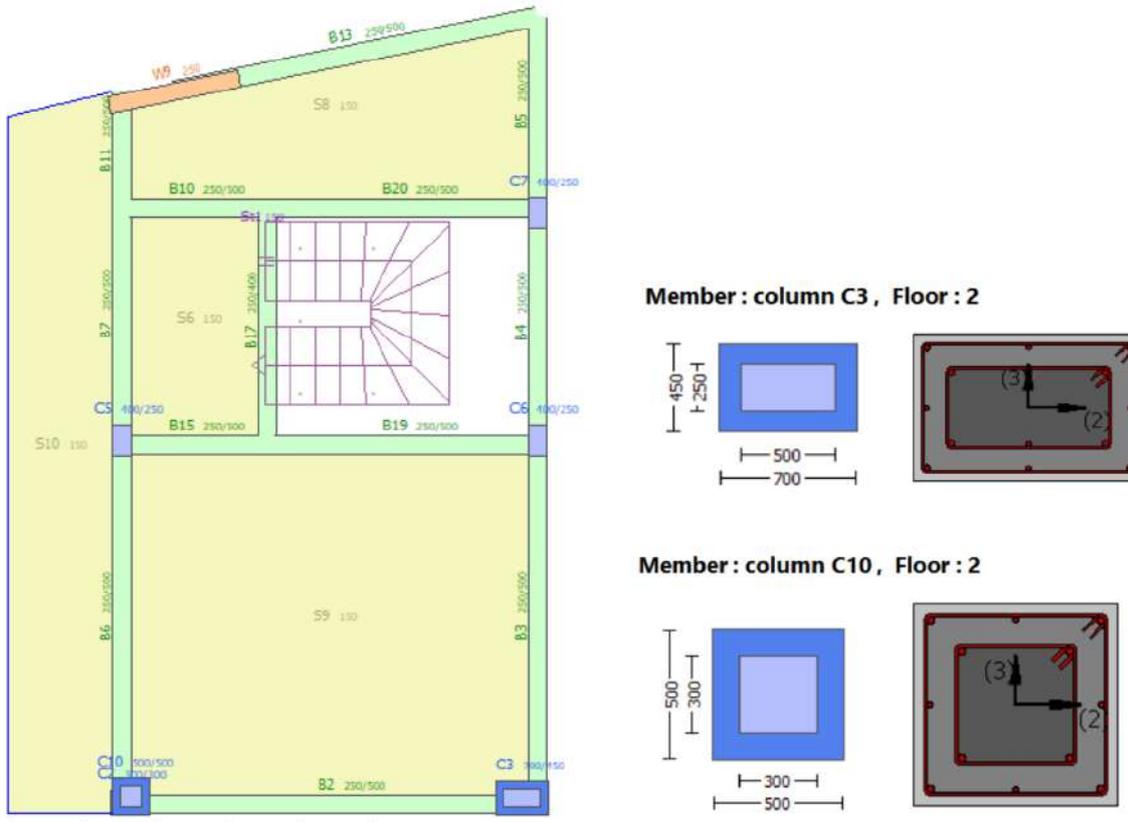
Collapse Prevention (5-D):



Gambar 9. Collapse Prevention (code-based checks): (a) Members chord rotations; (b) Members shear forces.

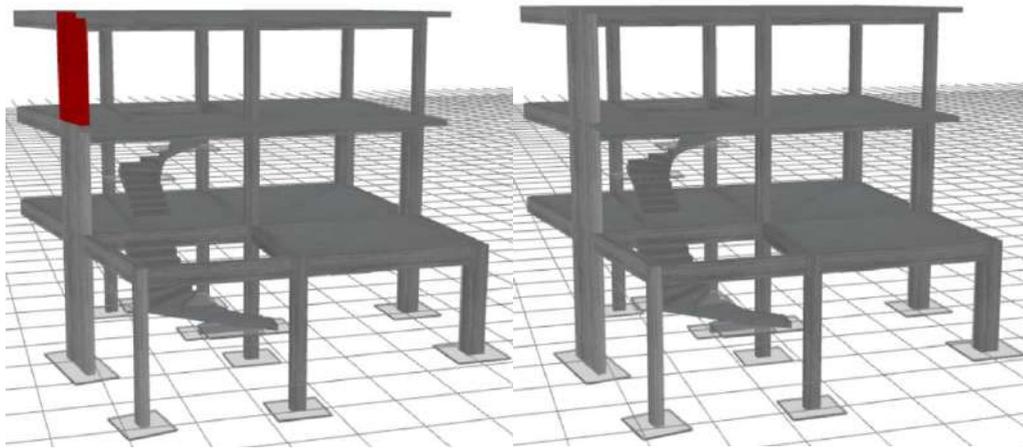
Code-based checks untuk level kinerja *Life Safety* dan *Collapse Prevention* dilakukan pada iterasi kedua. Tidak ada defisiensi pada kinerja *Life Safety* sehingga hasilnya tidak ditunjukkan. Untuk kinerja *Collapse Prevention* masih ada defisiensi pada dinding beton di lantai III seperti ditunjukkan oleh Gambar 11. Pemeriksaan rasio Demand/Capacity pada dinding beton ditunjukkan oleh Gambar 12. Tampak bahwa

performance ratio dinding beton W9 = 1.114363, hanya sedikit lebih besar satu artinya defisiensi dinding W9 adalah defisiensi ringan. Dari hasil iterasi kedua tampak bahwa defisiensi dinding W9 dapat dihilangkan dengan melanjutkan jacketing kolom C3 dan C10 sampai lantai III. Iterasi ketiga menunjukkan semua defisiensi sudah hilang.



Gambar 10. Perkuatan pada kolom luar C3 dan C10 lantai II dengan jacketing.

Collapse Prevention (5-D):



(a)

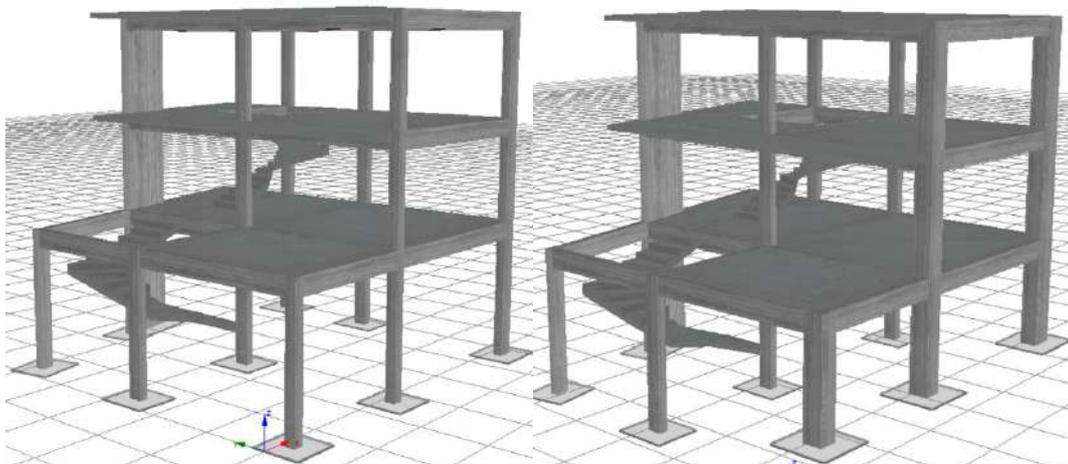
(b)

Gambar 11. Collapse Prevention (code-based checks): (a) Members chord rotations; (b) Members shear forces.

Member	Floor	Edge	Local Axis	Demand	Capacity	Perf. Ratio	Analysis
wall W9	3	End	(3)	0,017312	0,015535	1,114363	Modal - Y -
wall W9	3	Start	(3)	0,015452	0,015535	0,994621	Modal - Y -
column C3	3	End	(2)	0,019582	0,023045	0,849701	Modal - Y +
column C3	3	Start	(2)	0,016820	0,022992	0,731551	Modal - Y +
column C3	3	End	(3)	0,021852	0,032342	0,675643	Modal + X -

Gambar 12. Rasio Demand/Capacity dinding beton W9.

Sistem struktur dari bangunan eksisting sebelum dan sesudah diretrofit ditunjukkan oleh **Gambar 13**. Tampak bahwa bangunan beton bertulang eksisting menjadi lebih kekar setelah retrofit.



(a)

(b)

Gambar 13. Sistem struktur bangunan eksisting: (a) Sebelum diretrofit dan (b) Sesudah diretrofit.

PENINGKATAN KEKAKUAN DAN KAPASITAS LATERAL BANGUNAN EKSISTING

Ada delapan kurva kapasitas yang diperoleh dari analisis *pushover* dengan prosedur NSP sesuai jumlah kombinasi beban yang dipakai, Kurva kapasitas untuk kombinasi beban Modal + X + eccY ditunjukkan oleh **Gambar 14**. Dari **Gambar 14** tampak bahwa gaya geser lateral (*base shear*) pada bangunan eksisting meningkat dari 370 kN sebelum retrofit menjadi 750 kN setelah retrofit. *Target displacement* sebelum retrofit (bulatan kecil pada **Gambar 14a**) menurun setelah retrofit (bulatan kecil pada **Gambar 14b**). *Target displacement* pada level kinerja *Life Safety* dan *Collapse Prevention* menunjukkan tingkat kerusakan bangunan pada bahaya seismik BSE-1E dan BSE-2E (**Tabel 1**). *SeismoBuild* memberikan nilai-nilai *target displacement* sebagai berikut:

Target displacement sebelum retrofit:

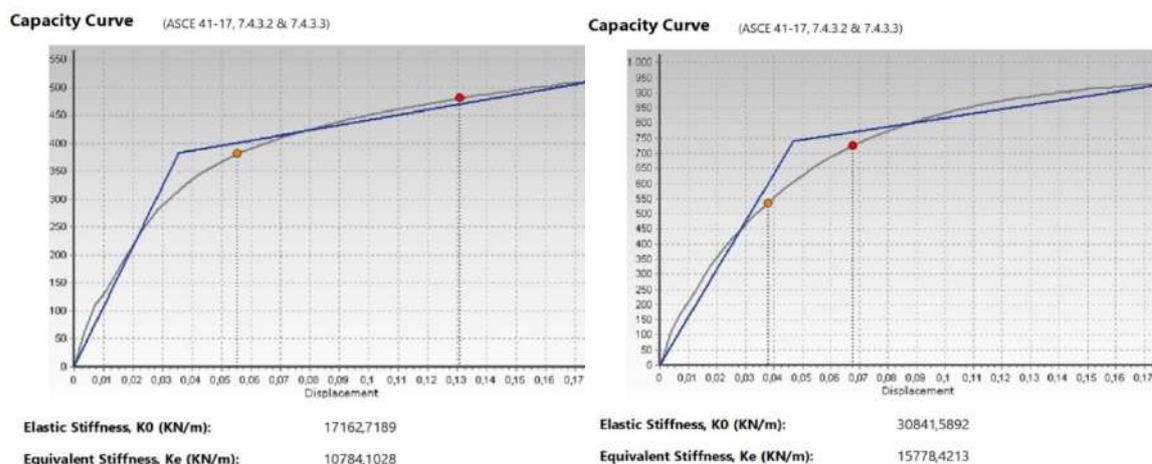
Level kinerja *Life Safety* = 0.05318 m

Level kinerja *Collapse Prevention* = 0.130811 m.

Target displacement setelah retrofit:

Level kinerja *Life Safety* = 0.037884 m

Level kinerja *Collapse Prevention* = 0.067782 m.



(b)

Gambar 14. Kurva kapasitas: (a) Sebelum retrofit dan (b) Setelah retrofit.

KESIMPULAN

Bangunan beton bertulang eksisting yang mempunyai ketidak teraturan horizontal dan vertikal dapat ditingkatkan kekakuan dan kapasitasnya untuk menahan beban gempa sesuai dengan level kinerja dan level bahaya seismik mengikuti ketentuan dalam ASCE41-17. Ada tiga kesimpulan yang diperoleh dari proses retrofit yang telah diuraikan:

- Bila level pengetahuan tentang bangunan eksisting cukup maka retrofit dengan Prosedur Nonlinier Statik (NSP), dengan faktor keamanan yang lebih rendah (Tier 3), dapat langsung dipakai untuk menghasilkan analisis yang lebih akurat dan hasil retrofit yang lebih efisien.
- Hasil analisis bangunan eksisting dengan *torsional irregularity*, tidak langsung dipakai untuk proses retrofit (tidak semata mengikuti *output* hasil analisis). Logika dari ilmu teknik sipil yang mengarahkan perlunya strategi *stiffness balancing* dengan *concrete jacketing* pada kolom-kolom luar untuk perbaikan respons seismik struktur dan menghilangkan defisiensi.
- Saat melakukan kajian awal (Tier 1), sebaiknya dengan prosedur NSP yang lebih akurat dan dapat langsung menunjukkan defisiensi pada bangunan eksisting.

DAFTAR PUSTAKA

- [ASCE] American Society of Civil Engineers (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-17)*. Reston, Virginia: ASCE.
- ASCE] American Society of Civil Engineers (2017). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7 – 16)*. Reston, Virginia: ASCE.
- Antoniou, Stelios. (2023). *Seismic Retrofit for Reinforced Concrete Buildings*, John Wiley & Sons Inc.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2018). *Example Application Guide for ASCE/SEI 41-13 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings – with Additional Commentary for ASCE/SEI 41-17*. FEMA P2006, Washington, DC: Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency.
- Pusat Studi Gempa Nasional (2022). *Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa*, Direktorat Bina Teknik Pemukiman dan Perumahan, Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- SeismoBuild (2020). SeismoBuild. *A Computer Program for the Linear and Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Buildings*. Tersedia di URL: www.seismosoft.com.