

KEANDALAN STRUKTUR KOLOM BETON BERTULANG PADA BANGUNAN GEDUNG: STUDI KOMPARASI PBI 71 DAN SNI 2847:2013

Ugik Kurniadi
Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta
e-mail: ugiknet@gmail.com

Abstrak

Analisis komparasi keandalan elemen struktur kolom pada sebuah bangunan eksisting di Jakarta dilakukan berdasarkan standar yang berlaku di Indonesia saat ini. Bangunan yang ditinjau dibuat sekitar 40 tahun lalu berdasarkan PBI 71 yang berfungsi sebagai gedung kampus dimana keandalan kolom saat ini diperiksa berdasarkan SNI 2847:2013. Beragam kombinasi pembebanan, termasuk efek kegempaan, dipertimbangkan berdasarkan SNI 1726:2012. Bangunan tersebut dimodelkan dengan element hingga 3D melalui analisis numerik menggunakan perangkat lunak ETABS dan Midas Gen. Gaya dalam internal kolom dievaluasi terhadap diagram interaksi biaksial kolom untuk memeriksa kapasitas kolom tersebut. Rasio keandalan dari kolom beton bertulang pada studi ini didefinisikan sebagai rasio antara panjang garis a-b dengan garis a-c dimana titik a merupakan titik kordinat nol (0, 0, 0) pada diagram interaksi biaksial, titik b merupakan titik koordinat beban rencana (P, M_x, M_y) dan titik c merupakan proyeksi perpanjangan garis a-b sampai menyentuh bidang kegagalan diagram interaksi. Pengecekan persyaratan *Strong Column Weak Beam* (SCWB) dan kemampuan layan kolom juga dilaksanakan untuk mengevaluasi kemampuan mekanisme disipasi energi saat keruntuhan terjadi, persyaratan simpangan antar lantai beserta ketidakberaturan torsi. Hasil analisa menunjukkan bahwa bangunan yang ditinjau tidak memenuhi persyaratan SCWB serta tidak memiliki kapasitas kolom yang cukup berdasarkan pembebanan yang berlaku saat ini. Prinsip rekomendasi kekuatan kemudian disusun untuk meningkatkan kapasitas struktur kolom agar dapat memenuhi persyaratan standar perancangan yang berlaku.

Kata kunci: kolom, keandalan, diagram interaksi, beton bertulang

Abstract

Comparative study of structural column reliability of an existing building in Jakarta is conducted based on the current governing design code. The building was built 40 years ago using PBI 71 which has been functioning as a campus (school) building which now is being assessed using SNI 2847:2013. A complete set of loading combination, including the seismic load, is considered based on SNI 1726:2012. The building is modelled with 3D finite element model using ETABS and Midas Gen. The column internal forces is evaluated using the biaxial interaction diagram to check the actual capacity of the existing columns. The reliability ratio of the concrete column is defined as a ratio of line a-b length to line a-c length where point a is the zero (0, 0, 0) coordinate on the interaction diagram, point b is the design load coordinate (P, M_x, M_y) and point c is the projection of line a-b until intersecting with the failure plane of the interaction diagram. Strong Column Weak Beam (SCWB) and serviceability checking is also conducted to evaluate the energy dissipation mechanism ability, interstory drift and the torsional irregularity. The results show that the observed building does not satisfy the SCWB requirement and does not have sufficient strength based on the current design code. Principal recommendation then is proposed to increase the column capacity so that it could fulfil the strength and serviceability requirement.

Key words: column, reliability, interaction diagram, reinforced concrete

PENDAHULUAN

Di Indonesia perencanaan struktur bangunan gedung beton bertulang harus memenuhi peraturan yang telah ditetapkan oleh pihak yang berwenang, seperti Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 (PBI 71) yang diterbitkan oleh Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik dan untuk saat ini Standar Nasional Indonesia No. 2847 tahun 2013 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (SNI 2847:2013) yang dikeluarkan oleh Badan Standarisasi Nasional Indonesia. Selama kurun waktu lebih dari empat puluh tahun sejak tahun 70-an hingga sekarang, sejumlah bangunan telah dirancang, baik menggunakan PBI 71 atau SNI 2847:2013. Diantara bangunan-bangunan tersebut ada yang masih berdiri kokoh dan berfungsi dengan baik, dan ada pula yang mengalami kerusakan atau keruntuhan, baik karena sebab tangan manusia (*man made error*) maupun bencana alam (*natural disasters*).

Pemahaman akan kondisi bangunan eksisting ini hanya dapat dilakukan dengan melakukan analisa ulang sejumlah struktur bangunan beton yang dahulu dirancang berdasarkan PBI 71 untuk kemudian diperiksa dengan menggunakan standar terkini, yaitu SNI 2847:2013. Sehingga, dapat diketahui apakah struktur bangunan tersebut memenuhi persyaratan yang tertuang dalam SNI 2847:13. Penelitian ini berfokus untuk mengungkap status keandalan kolom struktur bangunan dimana elemen kolom merupakan elemen struktur esensial yang merupakan penyangga utama struktur atas dan menentukan tingkat keamanan bangunan ketika difungsikan sesuai peruntukannya.

Penelitian tentang keandalan struktur kolom beton bertulang, dilatar belakangi oleh adanya perbedaan prinsip dan teknis antara PBI 71 dengan SNI 2847:2013. Perbedaan tersebut antara lain dalam hal:

1. Prinsip perhitungan kekuatan beton dan baja tulangan

Sebagaimana diuraikan dalam Sub-Bab 10.4 tentang Cara Perhitungan Konstruksi (PBI 71, hal 102), perhitungan struktur beton bertulang dilakukan dengan dua acara, yaitu:

- a) Perhitungan tegangan dilakukan dalam keadaan elastis dengan menggunakan beban kerja (*working stress design*).
- b) Perhitungan tegangan dilakukan dalam keadaan batas dengan menggunakan beban batas (*limit stress design*).

Sedangkan dalam SNI 2847:2013 diasumsikan beton bertulang tetap dapat menahan beban, termasuk akibat gempa dan kombinasi berbagai pembebanan lainnya, selama dalam keadaan batas meskipun melewati kondisi elastisnya dan dikenal sebagai filosofi desain kapasitas (*design capacity philosophy*).

Batasan minimum untuk penggunaan mutu material

Pada PBI 71 kekuatan tekan beton karakteristik (σ_{bk}') yang umum digunakan adalah antara 125–225 kg/cm² (Lihat Tabel 4.2.1 dan Tabel 11.1.1 PBI 71). Sedangkan untuk SNI 2847:2013 kekuatan tekan beton yang disyaratkan (f_c') adalah antara 17–28 MPa (173–286 kg/cm²) (Lihat Pasal 10.2.7.3 SNI 2847:2013). Sementara, kekuatan baja rencana (σ_{au}^*) yang biasa digunakan untuk PBI 71 adalah U24 (2.080 kg/cm²), sedangkan untuk SNI 2847:13 adalah baja dengan kekuatan tarik 420 MPa (4.283 kg/cm²).

2. Besaran pembebanan, khususnya beban hidup

Terdapat beberapa fungsi ruang yang berdasarkan SNI 1727:2013 besaran beban hidupnya lebih besar dibandingkan yang dipersyaratkan dalam PBI 71. Pada SNI 1726:2012 juga memberikan besaran beban gempa yang lebih besar dibandingkan dengan SNI 1726:2002 dimana beban gempa harus dikalikan dengan Faktor Keutamaan bangunan.

3. Detailing sistem penulangan

Persyaratan SRPMK pada SNI 2847:2013 memiliki persyaratan detailing tulangan yang lebih ketat daripada yang disyaratkan dalam PBI 71. Dengan demikian baja tulangan yang dipasang pada bangunan yang didesain dengan PBI 71 diperkirakan memiliki rasio penulangan yang lebih rendah dari SNI 2847:2013.

Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk menilai keandalan struktur kolom bangunan beton bertulang yang telah dirancang dengan menggunakan PBI 71 berdasarkan analisa ulang menggunakan SNI 2847:2013. Penelitian ini memiliki manfaat untuk: mengetahui kinerja kemampuan struktur kolom guna mengklasifikasikan besaran risiko bangunan struktur beton eksisting untuk dapat disimpulkan kondisi bangunan tersebut termasuk pada kondisi aman, tidak aman, layak, atau tidak layak serta untuk mendapatkan data awal sebagai dasar pertimbangan upaya tindakan lanjutan, khususnya apabila tidak terpenuhinya syarat kapasitas dan kemampuan layan yang dinilai berdasarkan standar terbaru yang berlaku.

METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif, melalui pengumpulan data numerik tentang struktur bangunan dan analisa terhadap model matematis dengan metode elemen hingga. Selain itu penelitian ini juga melakukan pendekatan kualitatif. Dalam konteks ini penulis melakukan kajian literatur mengenai konsep teoritis dan praktis terkait isu-isu penelitian, melakukan observasi lapangan, wawancara terhadap pihak-pihak terkait dan melakukan pendalaman tentang objek penelitian melalui telaah pustaka. Observasi lapangan dilakukan dengan melihat dan mencatat kondisi fisik bangunan,

mengukur dimensi seluruh elemen struktur. Adapun wawancara dilakukan terhadap pemilik bangunan (*owner*), pengelola gedung, serta para pihak terkait untuk mendapatkan data primer tentang objek penelitian.

Di samping itu, dilakukan juga pengumpulan dokumen perencanaan struktur bangunan gedung yang menjadi objek penelitian yang telah didesain berdasarkan pada PBI 71. Hal-hal tersebut meliputi: dokumen perencanaan struktur, gambar struktur, spesifikasi teknis dan hasil-hasil analisa struktur pada saat bangunan tersebut didesain. Dalam metode penelitian ini dilakukan pengetesan ulang mutu beton dan penelitian semua dokumen perencanaan serta dokumen pelaksanaan.

Deskripsi Model

Dalam penelitian ini sebuah bangunan gedung eksisting yang terbuat dari beton bertulang menjadi obyek penelitian. Bangunan gedung tersebut dirancang dan dibangun dengan menggunakan PBI 71 dan ukurannya mewakili kebanyakan dimensi bangunan gedung di Indonesia. Bangunan tersebut berfungsi sebagai kampus perguruan tinggi dan berlokasi di Jakarta.

Tabel 1 – Deskripsi Struktur Bangunan Eksisting

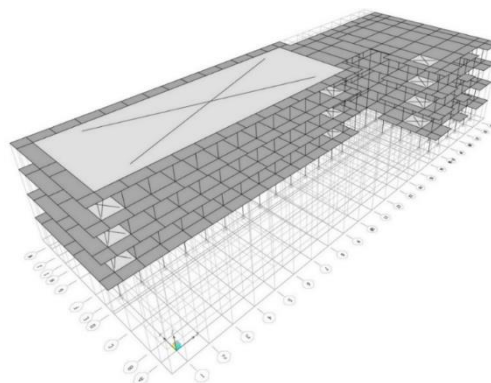
Nama Bangunan	B
Fungsi Bangunan	Kampus (Sekolah)
Usia Bangunan	40 tahun
Peraturan Desain	PBI 71
Jenis Struktur	Beton Bertulang
Dimensi	57 m × 19.4 m
Jumlah Lantai	4 Lapis
Lokasi	Jakarta Timur

Tabel 2 - Mutu Beton dan Baja Tulangan Struktur Bangunan Eksisting

Struktur	Mutu Beton Rencana (f'_c)	Mutu Beton Aktual (f'_c)	Mutu baja (f_y)
Gedung Kampus	K175 (14.5 MPa)	17 MPa	320 MPa



Gambar 1 Denah Tipikal dan Potongan Bangunan



Gambar 2 Pemodelan Struktur Bangunan dengan FEM Software

Strategi Pemodelan

Struktur bangunan analisis secara 3D menggunakan software analisis struktur Midas Gen, ETABS (*Extended Three dimensional Analysis of Building Systems*) dan PCA Column. Untuk analisis dinamik struktur bangunan gedung dimodelkan sebagai sebagai *Discrete Multi Degree of Freedom System* dimana pada setiap lantai terdapat massa terpusat (*lumped mass*). Kontribusi massa kolom tidak diperhitungkan dalam analisis dinamik. Bentuk kolom yang dianalisis adalah kolom dengan bentuk umum seperti persegi.

Pembebanan

Input pembebanan bangunan menyesuaikan terhadap fungsi bangunan, dimensi bangunan, elemen arsitektur, serta spektra kegempaan sesuai lokasi bangunan yang ditinjau. Kombinasi pembebanan memperhitungkan kombinasi pembebanan gravitasi serta kombinasi pembebanan kegempaan. Besaran beban gempa mengikuti SNI 1726:2012.

Tabel 3 - Pembebanan pada Lantai Berdasarkan PMI 1970 dan SNI 1727:2013

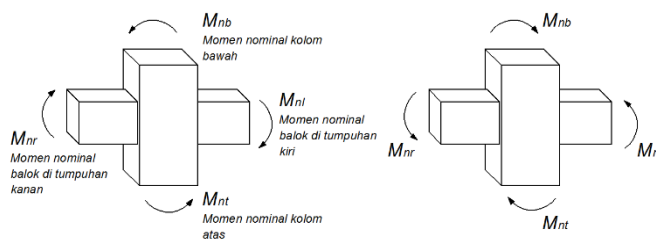
Struktur	PMI 1970 kN/m ² (kg/m ²)	SNI 1727:2013 kN/m ² (kg/m ²)
Kampus	2.5 (250)	Ruang kelas 1.92 (192)
		Koridor di atas lantai pertama 3.83 (383)
		Koridor lantai pertama 4.92 (492)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengecekan *Strong Column Weak Beam*

Keruntuhan/ kegagalan pada kolom dapat mengakibatkan keruntuhan seluruh sistem struktur di atasnya. Namun, apabila keruntuhan terjadi pada komponen lainnya, misalnya balok, maka kerusakan struktur bangunan akan terjadi hanya pada bagian tersebut. Jika kerusakan pada balok tersebut semakin parah selanjutnya akan merambat kebagian struktur yang lainnya, sampai akhir terjadinya keruntuhan total bangunan. Ini merupakan dasar pemikiran konsep Kolom Kuat Balok Lemah (*Strong Column Weak Beam*).

Salah satu hal kritis dalam ketentuan resmi adalah untuk memastikan bahwa kekuatan batas kolom lebih besar dari balok pada sambungan balok-kolom. SNI 2847 (2013) menetapkan kriteria kolom kuat balok lemah sebagai berikut:



Gambar 3 - Konsep SCWB

$$\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb}$$

dimana:

$\sum M_{nc}$: jumlah kekuatan lentur nominal kolom yang merangka ke dalam joint (sambungan balok-kolom struktur), yang dievaluasi di muka-muka joint.

$\sum M_{nb}$: jumlah kekuatan lentur nominal balok yang merangka ke dalam joint (sambungan balok-kolom struktur), yang dievaluasi di muka-muka joint.

Tabel 4 dan 5 di bawah menunjukkan bahwa struktur yang ditinjau tidak memenuhi persyaratan *Strong Column Weak Beam* pada semua lantai di kedua arah peninjauan.

Tabel 4 Pengecekan SCWB Gedung pada Arah X

Lantai	P _u [kN]	ΦM _{nx} kolom [kNm]	ΣM _{Cx} [kNm]	ΦM _{nx} balok [kNm]		1.2 ΣM _{gx} [kNm]	Cek
				Ujung <i>i</i>	Ujung <i>j</i>		
LT ATAP	175	85	85	65.90	96.10	194.4	NOT OK
LT 4	414.1	88	173	65.90	96.10	194.4	NOT OK
LT 3	656.4	72	160	65.90	96.10	194.4	NOT OK
LT 2	904.5	59	131	65.90	96.10	194.4	NOT OK

Tabel 5 Pengecekan SCWB Gedung pada Arah Y

Lantai	P _u [kN]	ΦM _{ny} kolom [kNm]	ΣM _{Cy} [kNm]	ΦM _{ny} balok [kNm]		1.2 ΣM _{gy} [kNm]	Cek
				Ujung <i>i</i>	Ujung <i>j</i>		
LT ATAP	175	113	113	141.00	268.80	491.76	NOT OK
LT 4	414.1	114	227	141.00	268.80	491.76	NOT OK
LT 3	656.4	95	209	141.00	268.80	491.76	NOT OK
LT 2	904.5	81	176	141.00	268.80	491.76	NOT OK

Dengan demikian, struktur gedung tersebut tidak dapat menyediakan sistem disipasi energi yang baik dimana pembentukan sendi plastis tidak dapat terjadi pada ujung-ujung balok. Sehingga, pembentukan sendi plastis dapat terjadi pada kolom dan dapat menyebabkan keruntuhan gedung itu sendiri sebagaimana kolom tidak dapat menyediakan stabilitas bagi gedung untuk tetap dapat berdiri.

Penentuan Kapasitas Kolom

Gaya-gaya dalam yang terbentuk pada kolom akibat berbagai variasi pembebanan meliputi besaran gaya aksial terfaktor P_u dan momen lentur M_u serta gaya geser V_u, yang biasanya dihitung berdasarkan momen yang bekerja pada ujung-ujung kolom. Kolom juga mengalami adanya momen sekunder akibat gaya tekan yang terjadi pada ujung-ujungnya. Kolom struktur dapat berbentuk persegi dengan sengkang, atau bulat dengan sengkang spiral.

Penentuan kapasitas pada kolom dengan gaya biaksial ditentukan dengan metode yang berbeda dengan kolom uniaksial mengingat kapasitas untuk kedua sumbu utama harus terpenuhi pada kombinasi beban bekerja manapun (Budiono, 2011). Pada kolom persegi hal khusus yang harus diperhatikan adalah lentur biaksial akan menghasilkan sumbu netral yang membentuk sudut terhadap sumbu-sumbu utama serta tidak selalu tegak lurus dengan bidang lentur resultan (Rahim, 1997).

Penentuan kapasitas aksial dari kolom akibat beban biaksial menurut persamaan Bresler adalah sebagai berikut:

$$\frac{1}{P_n} = \frac{1}{P_{nx}} + \frac{1}{P_{ny}} - \frac{1}{P_{no}}$$

dengan:

P_u = Kapasitas akibat beban lentur dua arah (*biaxial bending*)

P_{nx} = Kapasitas beban uniaksial, yaitu beban bekerja dengan eksentrisitas e_y dengan e_x = 0

P_{ny} = Kapasitas beban uniaksial, yaitu beban bekerja dengan eksentrisitas e_x dengan e_y = 0

P_{no} = Beban aksial murni dengan e_x = 0 dan e_y = 0

Sementara penentuan kapasitas momennya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{M_{nx}}{M_{ox}} + \frac{M_{ny}}{M_{oy}} \leq 1$$

dengan:

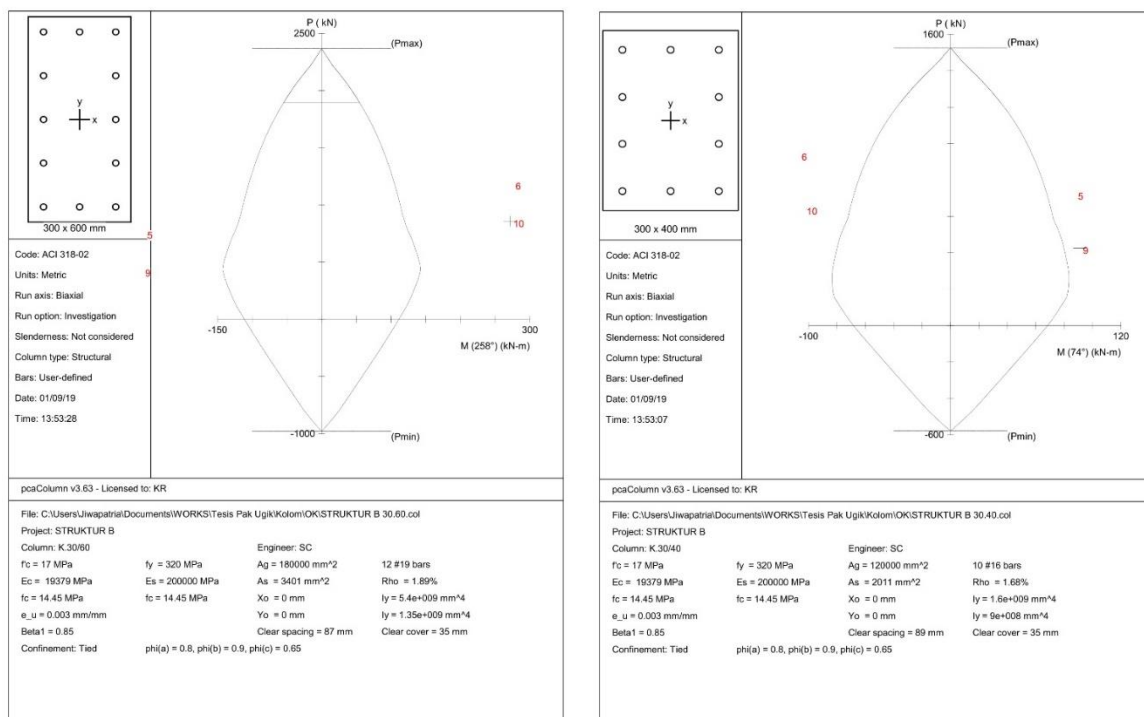
M_{nx} = Momen desain pada sumbu-x

M_{ny} = Momen desain pada sumbu-y

M_{ox} dan M_{oy} = Momen kapasitas masing-masing pada sumbu-x dan sumbu-y.

Kolom 30/60 yang ditinjau terletak pada as E dan as K pada gedung. Kolom tersebut merupakan kolom eksterior (kolom pada as terluar) dan memiliki tributary area yang lebih besar daripada kolom interior. Sebagaimana dapat dilihat dalam Gambar 4.a titik koordinat dari beban yang bekerja berada di luar bidang keruntuhan dari diagram interaksi kolom tersebut dengan proyeksi bidang diagram interaksi pada sudut 258° . Gambar 4.b juga menampilkan titik koordinat dari kombinasi pembebanan COMB 6 dan COMB10 yang merupakan kombinasi pembebanan dengan beban gempa di dalamnya. Dari hasil di atas, dapat terlihat bahwa kolom 30/60 tidak memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban bekerja.

Kolom 30/40 terletak pada as G dan as H dari Struktur Gedung B dan merupakan kolom interior (terletak pada as di tengah bangunan). Dimensi kolom interior ini lebih kecil dari pada kolom eksterior karena tributary area kolom ini lebih kecil daripada tributary area kolom eksterior.



Gambar 4 Diagram Interaksi (a) Kolom 30/60 dan (b) 30/40

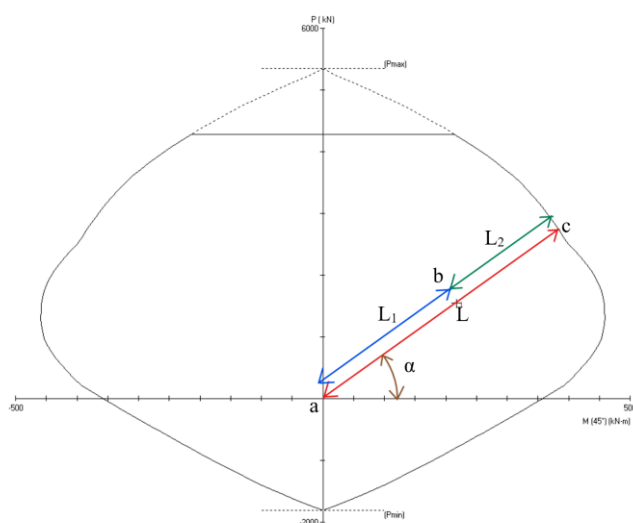
Rasio Keandalan Struktur

Berbagai aturan dan standar perencanaan struktur bangunan gedung tidak menentukan secara spesifik metode untuk menilai atau mengukur keandalan struktur bangunan, khususnya yang telah dibangun dan beroperasi. Di sisi lain, penulis sebagai praktisi di lapangan, memandang diperlukan suatu cara praktis untuk menentukan keandalan struktur bangunan gedung. Paling tidak cara tersebut dapat menjadi metode sederhana yang dapat digunakan dalam perencanaan dan pengujian keandalan, sebelum dilakukan kajian secara menyeluruh dan lengkap tentang keandalan bangunan gedung dengan menggunakan metode yang lebih rumit, memakan waktu lebih lama dan memakan biaya lebih mahal.

Kajian pustaka yang dipaparkan ini telah menunjukkan bahwa struktur gedung harus mampu menahan kombinasi pembebanan, termasuk gempa, dan memenuhi keadaan kolom kuat balok lemah, agar tidak terjadi keruntuhan total secara mendadak. Dengan demikian, kolom struktur adalah komponen struktur gedung yang sangat penting dan dapat dijadikan objek pengujian keandalan suatu struktur bangunan yang telah berdiri dan berfungsi (*existing building structures*). Penentuan keandalan kolom struktur yang akan dilakukan terhadap bangunan eksisting yang telah didirikan menggunakan aturan yang lama (saat

bangunan tersebut didesain, yaitu PBI 71) adalah dengan cara menghitung kapasitasnya dengan menggunakan aturan dan standar terkini (SNI 2847:2013). Kemudian, kapasitas kolom yang dihasilkan dari perhitungan tersebut akan dibandingkan dengan kapasitas yang masih tersedia. Keandalan kolom struktur tersebut adalah rasio keduanya.

Elemen struktur kolom dapat dinyatakan kuat menahan beban ultimit yang bekerja selama kordinat P , M_x , M_y masih berada di dalam diagram interaksi. Pada analisis struktur, diperhitungkan 18 kombinasi pembebanan dimana kapasitas kolom harus diperiksa pada setiap kombinasi pembebanan. Sering sekali ditemui kasus dimana dalam praktik, suatu kolom di desain dengan kombinasi envelope, dimana besaran P dan M yang dihasilkan merupakan hasil envelope (diambil nilai yang terbesar dari seluruh kombinasi pembebanan). Hal ini menyebabkan suatu kolom hanya diperiksa dengan 1 kordinat P_{max} , $M_{x,max}$, dan $M_{y,max}$. Penggunaan envelope ini sering dipakai untuk menyederhanakan proses analisis. Akan tetapi, kegagalan suatu elemen kolom tidak selalu diakibatkan oleh pembebanan dimana terdapat P terbesar dan M terbesar. Kegagalan kolom juga dapat terjadi, ketika misalnya, P bernilai kecil, akan tetapi M bernilai besar ataupun sebaliknya. Sehingga, idealnya, kapasitas kolom diperiksa untuk setiap kombinasi pembebanan.



Gambar 5 Pendefinisian Rasio Keandalan Kolom pada Diagram Interaksi

Rasio keandalan kolom beton bertulang didefinisikan sebagai rasio antara panjang garis a-b dengan garis a-c dimana titik a merupakan titik kordinat nol (0, 0, 0), titik b merupakan titik koordinat beban rencana (P , M_x , M_y) dan titik c merupakan proyeksi perpanjangan garis a-b sampai menyentuh bidang kegagalan diagram interaksi. Dalam hal ini rasio keandalan mengacu kepada perbandingan beban yang bekerja dengan kapasitas kolom sesuai batas bidang keruntuhan pada diagram interaksi dimana sudut α konstan. Dengan demikian, rasio keandalan kolom mendefinisikan sejauh apa tingkat pembebanan kolom dengan bidang kegagalan terdekat pada diagram interaksi biaksial.

Besar M_x dan M_y akan diproyeksikan sebagai momen ekuivalen M yang bekerja pada bidang P-M dengan sudut tertentu, sesuai dengan besaran nilai M_x dan M_y sehingga bisa didapatkan bidang 2 dimensi dimana besaran P dan M ekuivalen dapat secara mudah dilihat. Kemudian, titik c (titik proyeksi garis a-b ke bidang keruntuhan terdekat pada diagram interaksi) juga dapat ditentukan dengan mudah pada bidang P-M yang dimaksud. Titik c memiliki koordinat P' dan M' dimana nilai tersebut merupakan koordinat pada bidang keruntuhan. Adapun besaran nilai L_1 dan L adalah sebagai berikut:

$$L_1 = \sqrt{P^2 + M^2}$$

$$L = \sqrt{(P')^2 + (M')^2}$$

Kolom-kolom K30/40 dievaluasi keandalannya pada as 1-H dimana terdapat beban kerja terbesar. Dari Tabel 6 terindikasi potensi kegagalan struktur kolom pada beberapa kombinasi pembebanan, khususnya

karena pembebanan gempa, meskipun struktur kolom tersebut cukup kuat menahan beban vertikal sebagaimana terdefinisi pada COMB 1 dan 2. Kegagalan kolom terjadi hampir pada semua kombinasi pembebanan yang terdapat beban gempa di dalamnya.

Tabel 6 Rasio Keandalan Kolom K30/40 Struktur Gedung

Loading Combination	P [kN]	M [kNm]	P' [kN]	M' [kNm]	L ₁ [-]	L [-]	Rasio L ₁ /L [-]	Ket.
COMB1	830.40	10.10	1220	15	830.46	1220.09	0.681	OK
COMB2	904.50	11.10	1220	15	904.57	1220.09	0.741	OK
COMB3-6 MIN	631.30	91.28	608	88	637.86	614.34	1.038	NOT OK
COMB3-6 MAX	1033.20	106.95	763	79	1038.72	767.08	1.354	NOT OK
COMB7-10 MIN	724.40	87.50	602	72	729.67	606.29	1.203	NOT OK
COMB7-10 MAX	940.10	107.07	630	71	946.18	633.99	1.492	NOT OK
COMB11-14 MIN	332.90	94.04	352	98	345.93	365.39	0.947	OK
COMB11-14 MAX	734.70	103.94	599	85	742.02	605.00	1.226	NOT OK
COMB15-18 MIN	426.00	91.03	382	81	435.62	390.49	1.116	NOT OK
COMB15-18 MAX	641.60	103.51	481	78	649.90	487.28	1.334	NOT OK

Tabel 7 Rasio Keandalan Kolom K30/60 Struktur Gedung

Loading Combination	P [kN]	M [kNm]	P' [kN]	M' [kNm]	L ₁ [-]	L [-]	Rasio L ₁ /L [-]	Ket.
COMB1	999.35	11.68	1895	21	999.42	1895.12	0.527	OK
COMB2	1039.96	12.69	1900	22	1040.04	1900.13	0.547	OK
COMB3-6 MIN	667.66	176.05	686	178	690.48	708.72	0.974	OK
COMB3-6 MAX	1274.73	198.58	1010	57	1290.11	1011.61	1.275	NOT OK
COMB7-10 MIN	755.83	255.85	440	144	797.96	462.96	1.724	NOT OK
COMB7-10 MAX	1186.56	274.69	597	136	1217.94	612.29	1.989	NOT OK
COMB11-14 MIN	338.90	180.19	366	183	383.83	409.20	0.938	OK
COMB11-14 MAX	945.98	194.42	804	189	965.75	825.92	1.169	NOT OK
COMB15-18 MIN	427.07	258.90	224	131	499.42	259.49	1.925	NOT OK
COMB15-18 MAX	857.81	271.52	464	142	899.76	485.24	1.854	NOT OK

Kolom K30/60 Struktur Gedung B diperiksa pada as 1-E dimana terdapat gaya aksial tekan terbesar. Kolom ini mengalami kegagalan yang sifatnya serupa dengan kolom K30/40 pada bangunan yang sama. Kegagalan terjadi pada hampir semua kombinasi pembebanan dimana terdapat beban gempa di dalamnya. Rasio keandalan terbesar mencapai 1.989 yang artinya kapasitas kolom terlampaui cukup jauh.

Hal tersebut dapat terjadi karena adanya peningkatan besaran beban hidup (LL) untuk fungsi bangunan sebagai gedung sekolah yaitu dari 250 kg/m² menjadi 192 kg/m² untuk ruang kelas, 383 kg/m² untuk koridor di lantai pertama dan 492 kg/m² untuk koridor di lantai atas. Serta, bangunan gedung dengan fungsi sebagai gedung sekolah memiliki faktor keutamaan 1.25 yang berarti terdapat tambahan beban gempa sebesar 25% untuk dimasukkan dalam analisis dinamika struktur. Sehingga pada akhirnya, beban hidup yang bekerja sesuai dengan standar yang berlaku saat ini mengakibatkan adanya peningkatan beban bekerja terfaktor pada struktur bangunan sekolah. Maka dapat disimpulkan bahwa struktur gedung kampus yang ditinjau dengan fungsi sekolah tidak mampu menahan beban terfaktor yang bekerja. Sehingga, struktur tersebut berpotensi tidak mampu memberikan jaminan keamanan bagi pengguna gedung tersebut. Peningkatan kapasitas elemen kolom perlu dilakukan guna memenuhi persyaratan kekuatan dan kemampuan layan gedung sesuai dengan ketentuan aturan dan standar terkini yang berlaku.

SIMPULAN

1. Keandalan struktur gedung merupakan persyaratan yang harus dipenuhi setiap struktur gedung di Indonesia sekarang. Hal ini telah diatur dan ditegaskan dalam berbagai aturan hukum, mulai dari perundangan, peraturan pemerintah sampai dengan standar perancangan bangunan. Dengan demikian seluruh bangunan di Indonesia sekarang ini, baik bangunan eksisting yang telah didesain dengan standar lama (PBI 71) maupun bangunan baru yang didesain dengan standar saat ini (SNI 2847:2013), harus dapat memenuhi persyaratan keselamatan, kesehatan, kenyamanan, dan kemudahan bangunan gedung.
2. Persyaratan *Strong Column Weak Beam* pada struktur gedung baik pada arah X dan arah Y pada setiap lantai tidak terpenuhi. Rasio keandalan kolom struktur gedung menunjukkan bahwa kolom dimensi 30/40 dan 30/60 cukup menahan beban gravitasi namun tidak kuat menahan kombinasi beban kegempaan. Sehingga, tetap disimpulkan bahwa kolom struktur gedung tidak memiliki kapasitas yang cukup dan rasio keandalan kolom memiliki nilai lebih besar dari satu pada beberapa kombinasi pembebanan. Bangunan yang berfungsi sebagai gedung sekolah, memiliki persyaratan pembebanan dengan faktor pembesaran berupa faktor keutamaan dimana untuk gedung sekolah adalah 1.25. Dengan kata lain, bangunan gedung sekolah memiliki beban gempa desain 25% lebih besar dibandingkan dengan gedung dengan faktor keutamaan 1.
3. Struktur gedung yang ditinjau yang dibuat sekitar 40 tahun lalu tidak memenuhi persyaratan *Strong Column Weak Beam* sehingga proses disipasi energi yang baik melalui pembentukan sendi plastis di balok tidak dapat terjadi. Struktur gedung kampus yang berfungsi sebagai gedung sekolah tidak memiliki kapasitas kolom yang cukup untuk menahan beban terfaktor. Studi kasus pada bangunan tersebut memberikan gambaran umum mengenai keandalan struktur gedung eksisting yang dirancang berdasarkan PBI 71 dimana struktur kolom tidak mampu memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam standar perancangan sesuai SNI 2847:2013.

SARAN

1. Para pihak pemilik dan pengguna bangunan gedung yang dahulu direncanakan berdasar PBI 71, yang hingga saat ini masih digunakan, disarankan melakukan audit ulang struktur beton bertulang bangunan untuk menjamin keamanan, kenyamanan dalam penggunaannya. Hal ini mengingat struktur beton bertulang yang diteliti telah memiliki masa layan yang mendekati umur 50 tahun atau 10% dari periode gempa 500 tahun. Keandalan struktur harus dapat diverifikasi dan dijamin sebagaimana disyaratkan dalam standar perancangan, peraturan dan perundangan yang berlaku di Indonesia saat ini. Dengan diberlakukannya standar perencanaan bangunan gedung tahan gempa di Indonesia, maka sudah seharusnya standar tersebut menjadi acuan semua pihak. Karena itu, para pemilik dan pengguna bangunan dengan konstruksi beton yang direncanakan sebelum diberlakukannya standar Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan gedung SNI 2847:2013 dan SNI lainnya yang melengkapi/mendampingi disarankan agar melakukan pengecekan ulang terhadap bangunannya guna mengetahui keandalan strukturnya khususnya keandalan struktur kolom beton sebagai penyangga utama struktur atas. Hasil audit tersebut dapat memberikan informasi aktual mengenai kondisi struktur yang ditinjau saat ini dan dapat memberikan rekomendasi langkah-langkah perkuatan struktur apabila diperlukan. Metode perhitungan praktis melalui pengecekan keandalan seperti yang diajukan dalam penelitian ini dapat digunakan untuk penelitian kedepannya.
2. Berdasarkan kesimpulan yang telah dibahas sebelumnya, pada struktur gedung kampus perlu dilakukan perkuatan elemen struktur kolom guna memenuhi persyaratan kekuatan dan kemampuan layan. Elemen struktur pada gedung harus diperkuat sampai dapat memberikan kapasitas kolom yang lebih besar daripada beban yang bekerja serta memiliki simpangan antar lantai yang lebih kecil daripada simpangan ijin. Sehingga target perkuatannya merujuk kepada faktor eksternal (beban yang bekerja pada struktur). Dengan kata lain, perkuatan pada bangunan gedung bersifat krusial untuk dilakukan karena menyangkut keamanan dan kenyamanan secara langsung. Perbaikan dan perkuatan dapat dilakukan dengan cara *grouting* cor ulang, *shotcrete* dan/atau menggunakan material penguat lainnya seperti material berbahan dasar *fiber reinforced polymer*. Penebalan penampang kolom dengan cara *grouting* cor ulang ataupun *shotcrete* dapat meningkatkan inersia dan kekakuan penampang yang dapat meningkatkan kemampuan layan dari kolom tersebut dimana simpangan antar lantai dapat menjadi lebih kecil. Baja tulangan tambahan juga dapat diangkur ke kolom eksisting sehingga kapasitas kekuatan kolom dapat ditingkatkan agar dapat memenuhi persyaratan

Strong Column Weak Beam serta meningkatkan kapasitas kolom dalam menahan beban luar yang bekerja. Sedangkan, perkuatan dengan menggunakan *fiber reinforced polymer* (FRP) dapat meningkatkan kapasitas kekuatan kolom secara signifikan dan metode pengerjaannya mudah untuk dilakukan. FRP strip ini dapat dilekatkan pada serat beton terluar dengan menggunakan *chemical epoxy resin*. FRP strip tersebut dapat meningkatkan kapasitas lentur serta kapasitas geser kolom. Namun, perlu diperhatikan, umumnya metode perkuatan dengan menggunakan FRP tidak memberikan tambahan kekakuan kepada kolom karena tidak ada perbesaran penampang kolom. Perihal durabilitas, untuk tulangan yang terlihat korosi/karat agar dibersihkan permukaannya sebelum dilakukan shotcrete dan/atau dengan cara menggantinya jika tulangan sudah rapuh dan tidak bisa berfungsi lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- Australian Building Codes Board (ABCB), 2016, *Handbook: Structural Reliability*, Australian Government and States and Territories of Australia.
- Badan Standardisasi Nasional, 2013, *SNI 2847 – 2013 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional, 2012, *SNI 1726 – 2012 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan non-Gedung*, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional, 2013, *SNI 1727 – 2013 tentang Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain*, Jakarta
- Budiono, B. & Supriyatna, L., 2011, *Studi Komparasi Desain Bangunan Tahan Gempa Dengan menggunakan SNI 03-1726-2002 dan RSNI 03-1726-201x*.
- Cambridge University Press, 2019, *Cambridge Business English Dictionary*, <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/reliability>
- Computer and Structures, Inc. 2011, *ETABS Nonlinear Version 9.7.4 Extended 3D Analysis of Building Systems*.
- Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, DirJend Cipta Karya. & Dep PUTL, 1971, *Peraturan Beton Indonesia 1971 (PBI 71)*, Jakarta.
- Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, DirJen Cipta Karya. & Dep PUTL, 1970, *Peraturan Muatan Indonesia 1970 NI 18 (PMI 70)*, Jakarta.
- Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, DirJen Cipta Karya. & Dep PU, 1983, *Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983*, Jakarta.
- Gökdemir, H. & Günaydin, A., 2018, *Investigation of Strong Column–Weak Beam Ratio in Multi-Storey Structures*, Anadolu Univ. J. of Sci. and Technology A – Appl. Sci. and Eng. XX (X) – 201X.
- Holický, M., 2009, *Reliability Analysis for Structural Design*, SUN MeDIA Stellenbosch, South Australia,
- Imran, I. & Hendrik, F., 2010, *Perencanaan Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa*.
- Ismail, F. A., 2011, *Identifikasi Kegagalan Struktur dan Alternatif Perbaikan Serta Perkuatan Gedung BPKP Provinsi Sumatera Barat*, Jurnal Rekayasa Sipil, 7(2).
- Iswandi, I., 2014, *Perencanaan Dasar Struktur Gedung Beton Bertulang*.
- Krisnanto, H. N., Hardijana, D. & Noryanto, 2009, *Keandalan Struktur Bangunan Terhadap Gempa Bumi pada Bangunan Rumah Tinggal Padat Penduduk di Perkotaan*. Artikel Penelitian. Jurusan Pendidikan Teknik Arsitektur, Universitas Pendidikan Indonesia.
- Melchers, R. E. & Beck, A. T., 2018, *Structural Reliability Analysis and Prediction*, 3rd Edition. John Wiley & Sons, New York, USA.
- McCormac, J. C., 2004, *Desain Beton Bertulang Edisi Kelima Jilid 1*.
- McCormac, J. C., 2004, *Desain Beton Bertulang Edisi Kelima Jilid 2*.
- Qu, Z, Ye. L., 2009, *Failure Mechanism and Its Control of Building Structures Under Earthquake Based on Structural System Concept*.
- Rafiq, M.Y. & Southcombe, C., 1998, *Genetic Algorithms in Optimal Design and Detailing of Reinforced Concrete Biaxial Columns Supported by a Declarative Approach for Capacity Checking*, Computers & Structures 69(4):443-457.
- Wibowo, F. X. N., Afriyadi, Y. & Handayani, F. D., 2007, *Perkuatan Kolom yang Miring Akibat Gempa Bumi*, Konferensi Nasional Teknik Sipil I (KoNTekS I), Yogyakarta, 435 – 44.