

Studi Komparatif Desain Beton Prategang Berdasarkan SNI 2847:2013 dan Eurocode EN 1992-1-1:2004 dengan Mempertimbangkan Aspek Seismik

Christ Billy Prakoswa

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Alamat: Civil Engineering Building, 2nd Floor ITS Campus, Keputih, Sukolilo,
Surabaya East Java, Indonesia 60111

Korespondensi penulis: christbillyp@pu.go.id

Abstract. *This study compares prestressed concrete designs based on different earthquake-resistant building standards, namely SNI 1726:2002, Eurocode EN 1998-1-1:2004, PPIUG 1983, and prestressed concrete design requirements based on EN 1992-1-1:2004. The study was conducted to assess the differences in initial prestressing force (F_o) requirements, structural element dimensions, and earthquake load resistance in both standard approaches. Prestressed concrete designed using the Eurocode approach was shown to require up to 12% less initial prestressing force than the SNI requirements. This is due to two main factors: lower prestress loss and a larger effective flange width in the Eurocode calculation method. This difference has implications for material efficiency, as the tendon cross-sectional area required in the Eurocode design is smaller than in the SNI, primarily due to the relatively stricter cracking moment requirements in the SNI. Nevertheless, the study results indicate that prestressed concrete designs based on the Eurocode have better earthquake resistance. This is influenced by the magnitude of the earthquake load calculated using EN 1998-1-1:2004, which is generally higher than the results of the earthquake load calculations in SNI 1726:2012. This condition results in a stronger structural design and is better prepared to face major earthquake scenarios. This difference in approach confirms that the choice of design standards significantly influences the efficiency of material use and the level of structural safety. Thus, the integration of prestressed concrete design principles according to Eurocode can be an alternative to improve the seismic performance of structures in Indonesia, as long as it still pays attention to compliance with applicable local regulations. This study contributes to the development of more effective, efficient, and safe earthquake-resistant building design practices.*

Keywords: *Comparative Study, EN 1992-1-1:2004, Eurocode, Prestressed Concrete, SNI 2847:2013.*

Abstrak. Studi ini membahas perbandingan desain beton prategang berdasarkan standar bangunan tahan gempa yang berbeda, yaitu SNI 1726:2002, Eurocode EN 1998-1-1:2004, PPIUG 1983, serta ketentuan desain beton prategang yang mengacu pada EN 1992-1-1:2004. Penelitian dilakukan untuk menilai perbedaan kebutuhan gaya prategang awal (F_o), dimensi elemen struktur, serta ketahanan terhadap beban gempa pada kedua pendekatan standar tersebut. Beton prategang yang didesain dengan pendekatan Eurocode terbukti memerlukan gaya prategang awal hingga 12% lebih kecil dibandingkan persyaratan dalam SNI. Hal ini disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu kehilangan prategang yang lebih rendah dan lebar flens efektif yang lebih besar pada metode perhitungan Eurocode. Perbedaan ini berimplikasi pada efisiensi penggunaan material, karena luas penampang tendon yang dibutuhkan dalam desain Eurocode lebih kecil dibandingkan SNI, terutama akibat persyaratan momen retak pada SNI yang relatif lebih ketat. Meskipun demikian, hasil studi menunjukkan bahwa desain beton prategang berdasarkan Eurocode memiliki ketahanan gempa yang lebih baik. Hal ini dipengaruhi oleh besarnya beban gempa yang dihitung menggunakan EN 1998-1-1:2004, yang umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan hasil perhitungan beban gempa pada SNI 1726:2012. Kondisi ini menghasilkan desain struktur yang lebih kuat dan lebih siap menghadapi skenario gempa besar. Perbedaan pendekatan ini menegaskan bahwa pemilihan standar desain berpengaruh signifikan terhadap efisiensi penggunaan material dan tingkat keamanan struktur. Dengan demikian, integrasi prinsip-prinsip desain beton prategang sesuai Eurocode dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan kinerja seismik struktur di Indonesia, selama tetap memperhatikan kesesuaian dengan peraturan lokal yang berlaku. Studi ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan praktik desain bangunan tahan gempa yang lebih efektif, efisien, dan aman.

Kata kunci: Studi Banding, EN 1992-1-1:2004, Eurocode, Beton Prategang, SNI 2847:2013.

1. LATAR BELAKANG

Beton bertulang pra-tegang merupakan salah satu teknologi penting dalam bidang rekayasa struktur, yang menggabungkan kemampuan tekan beton dan kekuatan tarik baja untuk membentuk sistem struktural yang efisien dan tahan lama. Dalam sistem ini, tendon baja ditegangkan terlebih dahulu (pre-tensioned) atau setelah pengecoran (post-tensioned), lalu dikunci ke dalam beton, sehingga beton berada dalam kondisi kompresi sebelum dikenai beban luar (Nilson et al., 2010; Gopalakrishnan & Murthy, 2020). Proses ini menghasilkan tegangan dalam yang terkendali secara presisi dan dirancang untuk menahan tegangan tarik akibat pembebanan struktural, serta mengurangi risiko retak dan lendutan jangka panjang (Salmon & Johnson, 2012; Kong & Evans, 2016). Beton bertulang pra-tegang banyak diterapkan pada struktur bentang panjang seperti jembatan, gedung bertingkat, dan atap ruang besar karena keunggulannya dalam mengurangi volume bahan dan meningkatkan performa struktural (Bungey, Millard, & Grantham, 2006; Feng et al., 2023).

Di Indonesia, standar utama dalam perencanaan dan pelaksanaan struktur beton adalah SNI 2847:2013 yang mengadaptasi ACI 318M-11, yang memberikan panduan teknis mengenai desain struktur beton bertulang dan pra-tegang berbasis kekuatan (BSN, 2013; ACI, 2011). Namun, seiring perkembangan teknologi konstruksi global, banyak negara kini merujuk pada standar internasional lainnya seperti Eurocodes. Salah satu yang paling relevan adalah Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004), yang dirancang oleh Comité Européen de Normalisation (CEN) dan digunakan secara luas di Uni Eropa maupun negara-negara non-Eropa karena pendekatan desainnya yang berbasis limit state dan performa struktural (JRC, 2008; CEN, 2004). Eurocode 2 mengakomodasi inovasi terbaru dalam material, metode konstruksi, serta pertimbangan lingkungan yang lebih komprehensif dibanding standar yang lebih lama (FIB, 2010; Lantsoght, 2019).

Dalam konteks nasional, penting bagi SNI 2847 untuk terus diselaraskan dengan perkembangan ilmiah dan teknis internasional agar mampu menghasilkan desain struktur yang efisien, ekonomis, dan aman. Apalagi, ACI 318M telah mengalami beberapa pembaruan, seperti versi 2014 dan 2019, yang mengakomodasi pendekatan berbasis performa dan penyederhanaan format desain (ACI, 2014; ACI, 2019). Karena SNI 2847:2013 masih merujuk pada ACI 318M-11, maka terdapat kesenjangan teknis yang perlu dikaji secara sistematis. Oleh sebab itu, studi komparatif terhadap standar nasional dan standar internasional seperti Eurocode menjadi penting untuk meningkatkan relevansi dan kualitas peraturan konstruksi di Indonesia.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil desain struktur beton bertulang pra-tegang berdasarkan SNI 2847:2013 dan Eurocode EN 1992-1-1:2004. Tujuan spesifik dari penelitian ini adalah: (1) menentukan dimensi struktural beton bertulang menggunakan SNI 2847:2013, (2) menentukan dimensi struktural beton bertulang menggunakan EN 1992-1-1:2004, (3) membandingkan hasil desain dari kedua standar tersebut, dan (4) mengidentifikasi faktor-faktor teknis yang menyebabkan perbedaan hasil desain struktural.

2. KAJIAN TEORITIS

Prinsip Dasar Beton Bertulang

Menurut Lin.T.Y (1953), terdapat 3 prinsip dasar beton bertulang. Prinsip pertama adalah penggunaan gaya pretension untuk mengubah beton menjadi material elastis. Prinsip analisis tegangan elastis melibatkan penumpukan tegangan yang disebabkan oleh beban eksternal, seperti momen lentur dan beban aksial. Untuk menimbulkan tegangan tekan, struktur harus dikenakan beban aksial (F). Ketika beban F diterapkan dengan eksentrisitas relatif terhadap sumbu pusat massa bagian beton, hal ini menghasilkan momen internal yang dapat menyeimbangkan dan mengurangi momen lentur yang disebabkan oleh beban eksternal.

Prinsip kedua adalah bahwa baik beton bertulang maupun beton prategang bergantung pada keseimbangan antara gaya tekan dalam beton (C) dan gaya tarik dalam baja (T). Prinsip ketiga adalah bahwa beton prategang bekerja dengan menyeimbangkan beban eksternal dengan tegangan internal yang diperkenalkan dalam tendon.

Metode *Post-Tensioning*

Beton dituang terlebih dahulu, di mana saluran tendon yang disebut ducts telah disiapkan. Langkah 1: Menggunakan cetakan yang telah disiapkan lengkap dengan ducts pra-tegang yang dipasang sesuai dengan eksentrisitas yang direncanakan, beton dituang.

Langkah 2: Setelah beton mencapai usia dan kekuatan yang cukup untuk menahan gaya pra-tegang, tendon dimasukkan ke dalam saluran dan kemudian ditarik untuk mencapai gaya pra-tegang yang diperlukan. Dalam hal metode aplikasi, salah satu ujung tendon dipasang terlebih dahulu, sementara ujung lainnya ditarik (penarikan satu ujung). Sebagai alternatif, penegangan dapat dilakukan secara bersamaan dari kedua ujung sebelum dipasang. Setelah dipasang, saluran diisi dengan grout melalui lubang grout yang telah disediakan.

Tabel 1. Comparison of pre-tensioning and post-tensioning

	<i>Advantages</i>	<i>Disadvantages</i>
<i>Pre-tensioning</i>	<i>Does not require anchorage devices</i> <i>Tendons are protected by concrete without needing grouting or additional protection</i> <i>Better prestress distribution in the transmission zone</i> <i>Factory-produce precast</i>	<i>Requires a strong stressing bed</i> <i>Difficult to form deflected or draped tendon profiles</i>
<i>Post-tensioning</i>	<i>No need for a stressing bed</i> <i>More flexible in determining tendon layout and cross-sectional profile</i> <i>Easy adjustment of tendon eccentricity</i> <i>Cast in place</i>	<i>Tendons require protection systems</i> <i>Very high concentrated forces at the end anchor zones</i>

SNI 2847:2013

Peraturan mengenai desain struktur beton bertulang di Indonesia telah diperbarui dari waktu ke waktu untuk mengikuti kemajuan teknologi dan teknik. SNI 03-2847:2002 direvisi dan digantikan oleh SNI 2847:2013, yang didasarkan pada ACI 318M-11. Beberapa komponen struktural mengalami perubahan dalam prosedur desainnya, salah satunya adalah elemen lentur (balok). Menurut SNI 2847:2013, bagian lentur diklasifikasikan menjadi tiga kategori: bagian yang dikendalikan oleh tegangan tarik, bagian yang dikendalikan oleh tegangan tekan, dan bagian yang terletak di zona transisi antara kendali tegangan tarik dan tekan.

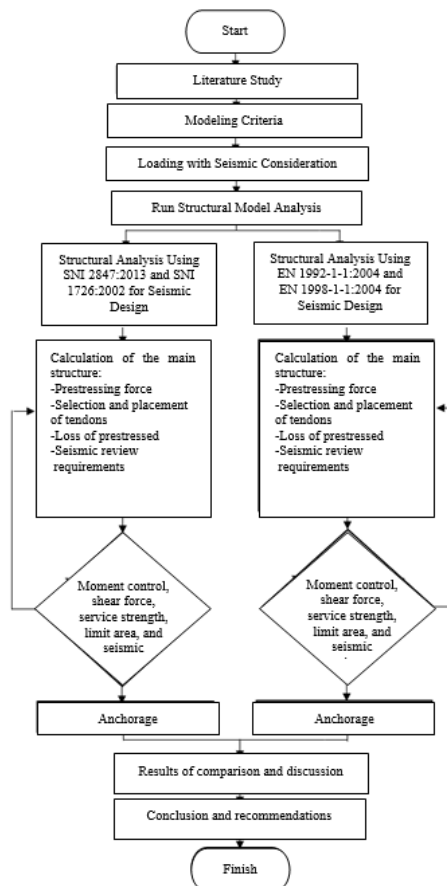
Penentuan kriteria bagian ini didasarkan pada regangan tarik bersih, ϵ_t , pada lapisan terluar baja tulangan. Selain itu, faktor pengurangan kekuatan ϕ dapat diambil sebagai 0,90 ketika ϵ_t atau lebih besar, dan berkurang secara linier seiring berkurangnya ϵ_t , hingga nilai minimum yang diizinkan sebesar 0,004. SNI 2847:2013 mengurangi luas penahan tarik yang diperlukan hingga 15% dibandingkan dengan SNI 2002, dengan penurunan kapasitas lentur sekitar 1,7%. (Setiawan, 2015)

EN 1992-1-1:2004

Eurocode adalah peraturan desain struktural yang berlaku di Uni Eropa (UE), dikembangkan dan disusun oleh CEN. Seri Eurocode terdiri dari delapan bagian, dengan desain struktur beton bertulang diatur dalam EN 1992-1-1:2004, sementara desain struktural tahan gempa diatur dalam EN 1998-1-1:2004. EN 1992-1-1:2004 menggantikan peraturan sebelumnya, yaitu British Standard BS 8110. Secara umum, Eurocode menyediakan informasi dasar yang diperlukan. Prinsip-prinsip dalam Eurocode tidak mengizinkan metode desain alternatif, dan semua desain harus mematuhi peraturan Eurocode. Eurocode mengharapkan para perancang untuk memperoleh koefisien dan informasi rinci dari buku teks dan manual desain. (Shafii dkk., 2001).

3. METODE PENELITIAN

Langkah-langkah kerja, sesuai dengan kegiatan yang dijelaskan, perlu disusun sebelum memulai Proyek Akhir. Urutan dimulai dengan mengumpulkan literatur dan pedoman desain, dan berakhir dengan membandingkan hasil analisis dua kode.



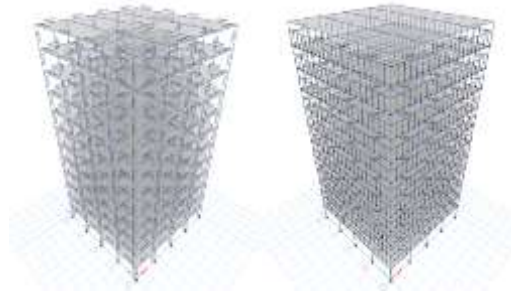
Gambar 1. Alur Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan Bangunan

Variabel Desain	= post-tensioning
Fungsi Bangunan	= Hotel dan kantor
Kategori Risiko	= II
Lokasi	= Aceh
Jenis Tanah	= tanah lunak
Zona Gempa	= 3
Jumlah Lantai	= 12.00 m
Tinggi lantai	= 4,00 m
Tinggi bangunan	= 48,00 m

Jumlah baris = 4,00
Jarak kolom = 6,00 m
Kelas beton = 40,00 MPa
Kelas baja = 390,00 MPa



Gambar 2. Pembuatan Model Bangunan dalam ETABS v.16.2

Analisis Struktur Berdasarkan SNI 1726:2013

Lokasi = Aceh

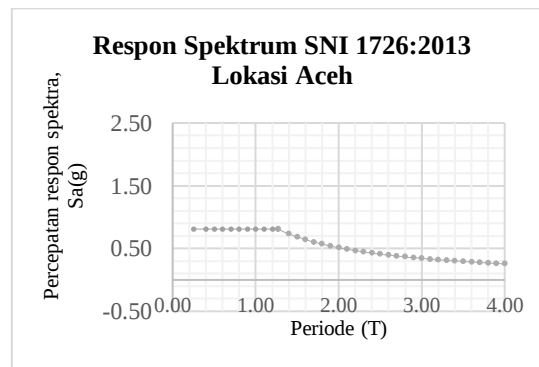
Kelas tanah lunak SE

PGA = 0,62 g

SDS = 0,81 g

SD1 = 1,03 g

Vstatic = 5309,88 KN



**Gambar 3. Grafik Spektrum Respon Berdasarkan SNI 1726:2013 untuk Aceh, Kelas
Lokasi SE**

Desain Struktur Beton Bertulang Bertekanan Berdasarkan SNI 2847:2013

1) Kombinasi Beban Layanan

1D pada pengangkatan

Momen penyangga kiri = 478,31 kNm

Momen tengah jembatan = 1.359,49 kNm

Momen penyangga kanan = -478,31 kNm

1D+1L

Momen penopang kiri = -550,98 kNm

Momen tengah jembatan = 1703,59 kNm

Momen penyangga kanan = -550,98 kNm

1D+1L+1EX Min

Momen penyangga kiri = -632,06 kNm

Momen tengah jembatan = 1703,63 kNm

Momen penyangga kanan = -632,06 kNm

2) Analisis Bagian

$B_{eff} = 2.64 \text{ m}$

$h_{slab} = 0.14 \text{ m}$

$A_{slab} = 0.37 \text{ m}^2$

$Y_b = 0.81 \text{ m}$

$I = 0.11 \text{ m}^4$

$Y_t = 0.39 \text{ m}$

$W_t = 0.29 \text{ m}^3$

$W_b = 0.14 \text{ m}^3$

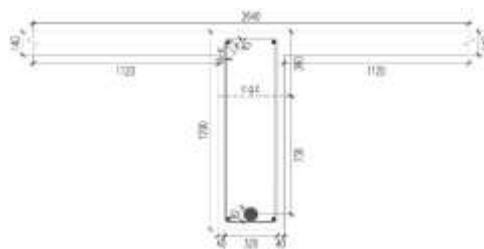
$K_t = 0.17 \text{ m}$

$K_b = 0.36 \text{ m}$

$E = 0.73 \text{ m}$

$A_{tot} = 0.79 \text{ m}^2$

$Kel = 7.68 \text{ m}$



Gambar 4. Bagian Beton Bertulang Bertekanan Berdasarkan SNI 2847:2013

3) Tegangan yang Diperbolehkan

Segera setelah transfer gaya pretensi (sebelum kerugian jangka panjang), tegangan pada serat terluar memiliki nilai-nilai sebagai berikut:

1. Gaya tekan:

$$f_{cc,0} = -0.6 f_{ckp}(t_0) = 22.24 \text{ MPa}$$

2. Gaya tarik:

$$f_{ct,0} = 0.62 (f_{ci})^{0.5} = 3.77 \text{ MPa}$$

Di bawah beban layanan (setelah kerugian pretensi terjadi).

3. Gaya tekan:

$$f_{cc,t} = -0.45 f_c' = -18.00 \text{ MPa}$$

4. Gaya tarik:

$$f_{ct,t} = 0.62 (f_{ct})^{0.5} = 3.92 \text{ MPa}$$

Gaya pretensi awal ditetapkan sebagai $P_{mo} = 1608.84 \text{ kN}$

4) Tendon Selection

$$f_{pu} = 1770,00 \text{ MPa (tekanan serat yang telah dilepaskan)}$$

$$f_{pi} 70\% = 1239,00 \text{ MPa (tekanan serat yang telah dilepaskan)}$$

$$f_{py} = 1526,00 \text{ MPa}$$

$$\text{Unit tendon} = 6-12$$

$$\text{Jumlah serat} = 9,00$$

$$\text{Muatan patah minimum} = 2124,00 \text{ kN}$$

$$\text{Diameter serat} = 15,70 \text{ mm}$$

$$D \text{ saluran} = 77,00 \text{ mm}$$

$$A \text{ yang digunakan} = 1743,04 \text{ mm}^2$$

$$f \text{ yang digunakan} = F_o / A_{used} = 942,34 \text{ MPa}$$

5) Kerugian Pra-tegangan

Kerugian langsung

$$\text{- Akibat pemendekan elastis} = \text{tidak signifikan}$$

$$\text{- Akibat geseran penahan} = \text{tidak signifikan}$$

$$\text{- Akibat efek goyangan} = 9,28\%$$

$$\text{- Akibat pembatasan kolom} = 4,60\%$$

Kerugian yang bergantung pada waktu

$$\text{- Akibat penyusutan} = 1,17\%$$

$$\text{- Akibat creep} = 0,02\%$$

$$\text{- Akibat relaksasi baja} = 6,57\%$$

$$\text{Total kerugian pretensi} = 21,26\%$$

6) Pengendalian Gaya Pra-tegangan Setelah Kerugian

Serat bawah:

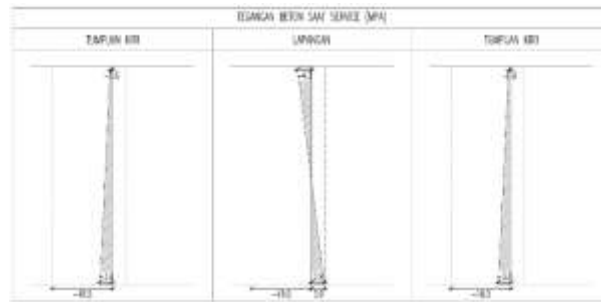
$$-18000 \leq -\frac{1270.57}{0.79} + \frac{1270.57 \times 0.73}{0.29} - \frac{1703.59}{0.29}$$

$$-18000 \leq -4296.42 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}$$

Top fiber:

$$3921.22 \leq -\frac{1270.57}{0.79} - \frac{1270.57 \times 0.73}{0.14} + \frac{1703.59}{0.14}$$

$$3921.22 \leq 3921.22 \text{ kN/m}^2 \text{ (OK)}$$



Gambar 5. Diagram Tegangan pada Beban Operasional

Pengendalian Persyaratan SPRMK Sesuai dengan SNI 2847:2013 Ps 21.5.2.5

Serat atas = -4,30 MPa

Serat bawah = 3,92 MPa

$f_{pc} = -1,62 \text{ MPa} < 3,50 \text{ MPa (OK)}$

7) Pengendalian Defleksi

Defleksi pada saat pengangkatan

$$\Delta_{\text{total}} = -27,71 + 26,37 + 24,85 = -23,51 (\downarrow) < 50,00 \text{ mm}$$

Pergeseran pada beban operasional

$$\Delta_{\text{total}} = -21,71 + 32,87 + 24,85 = 36,00 (\downarrow) < 50,00 \text{ mm}$$

8) Perhitungan Momen Maksimum

$$f_{pu} = 1770,00 \text{ MPa}$$

$$f_{ps} = 1531,66 \text{ MPa}$$

$$d_p = 1111,50 \text{ mm}$$

$$A_{ps} = 1743,04 \text{ mm}^2$$

$$T = A_{ps} \times f_{ps} = 2669733,36 \text{ N}$$

$$\phi M_n = 2634,94 > 2156,78 \text{ kNm}$$

9) Perhitungan Saat Retak

$$\text{Mid-span (Field) } M_{cr} = 1703,59$$

$$\text{Persyaratan } \phi M_n > 1,2 M_{cr}$$

$$2634,94 > 2044,31 \text{ kNm}$$

$$\text{Penopang } M_{cr} = 1838,34$$

$$\text{Persyaratan } \phi M_n > 1,2 M_{cr}$$

$$2329,73 > 2206,01 \text{ kNm}$$

10) Perhitungan Penguatan Engsel Plastik

$$\begin{aligned} 0.25 \phi M_n (\text{SPRMK}) &= 391.22 \text{ kNm} \\ \mu_{\text{seismic}} - 0.25 \phi M_n &= 314.19 \text{ kNm} \\ \rho_{\min} &= 0.00405 \\ \rho_{\text{bal}} &= 0.04038 \\ \rho_{\max} &= 0.03030 \\ \rho_{\text{required}} &= 0.00175 \\ A_s &= 1844.66 \text{ mm}^2 \\ n &= 4.00 \\ T &= 766071.43 \text{ N} \\ M_n &= 849.83 \text{ kNm} \\ \phi M_n &= 764.85 \text{ kNm} \end{aligned}$$

11) Perhitungan Penguatan Geser

$$\begin{aligned} V_c &= 489,20 \text{ kN} \\ V_u &= 433,58 \text{ kN} \\ \phi V_c &= 366,90 \text{ N} \\ \text{Stirrups di luar daerah engsel plastik:} \\ A_v \min &= 405,42 \text{ mm}^2 \\ \text{Diusulkan} &= \text{D10-300} \\ S_{\max} &= d/2 = 600,00 \text{ OK} \end{aligned}$$

12) Shear Reinforcement Calculation at Plastic Hinge Region

$$\begin{aligned} M_{pr1} &= 1084,15 \text{ kNm} \\ M_{pr2} &= 1055,55 \text{ kNm} \\ V_e &= 524,25 \text{ kN} \\ V_s &= V_n - V_c = 209,79 \text{ kN} \\ V_s' &= 959,22 \text{ kN} \\ A_s \text{ perlu} &= 537,92 \text{ mm}^2 \\ \text{Panjang engsel plastic } 2h &= 2,40 \text{ m} \\ \text{Diusulkan} &= \text{D10-150} \end{aligned}$$

13) Desain Penguatan Torsional

$$\begin{aligned} T_u &= 158,95 \text{ kNm} \\ T_n \text{ oleh beton} &= 198,90 \text{ kNm} \\ \text{Tidak diperlukan penguatan torsi tambahan} \end{aligned}$$

Analisis Struktur Berdasarkan EN1998-1-1:2004

Lokasi = Aceh

PGA = 0.62

Jenis tanah D

Dirancang menggunakan Spektrum Respons Elastis Tipe 2, untuk yang Eurocode merekomendasikan parameter berikut:

$S = 1.80$

$T_b = 0.01 \text{ s}$

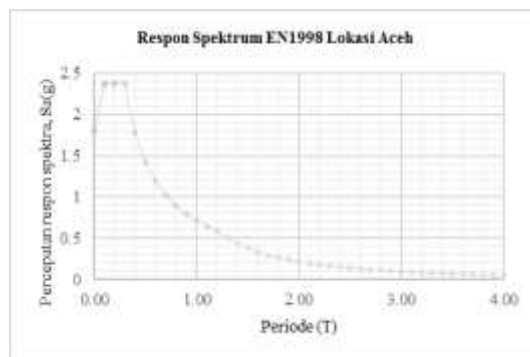
$T_c = 0.30 \text{ s}$

$T_d = 1.20 \text{ s}$

Jenis struktur DCH (tinggi ketahanan)

$q = 5.85$

Batas bawah tingkat $\beta = 0.20$



Gambar 6. Grafik Spektrum Respons berdasarkan EN 1998-1-1:2004 untuk Aceh, Kelas Lokasi SD

Desain Struktur Beton Bertulang Bertekanan Berdasarkan EN1992-1-1:2004

1) Kombinasi Beban Layanan

1D pada jacking

Momen penyangga kiri = -478,31 kNm

Momen tengah jembatan = 1.395,5 kNm

Momen penyangga kanan = -478,31 kNm

1D+1L

Momen penyangga kiri = -550,98 kNm

Momen tengah jembatan = 1703,59 kNm

Momen penyangga kanan = -550,98 kNm

1D+1L+1Ex

Momen penyangga kiri = -727,24 kNm

Momen tengah jembatan = 1703,63 kNm

Momen penyangga kanan = -727,24 kNm

2) Analisis Bagian

$b_{eff} = 5,60 \text{ m}$

$h_{slab} = 0,14 \text{ m}$

$y_{bottom} = 0,919 \text{ m}$

$I = 0,14 \text{ m}^4$

$Y_{top} = 0,28 \text{ m}$

$Z_{top} = 0,50 \text{ m}^3$

$Z_{bottom} = 0,15 \text{ m}^3$

$\alpha_{top} = A/Z_{top} = 2,42 / \text{m}$

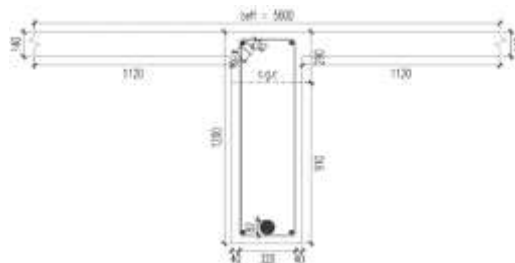
$\alpha_{bottom} = A/Z_{bottom} = 7,93 / \text{m}$

$e = 0,84 \text{ m}$

$A_{tot} = 1,21 \text{ m}^2$

$Kel = 13,60 \text{ m}$

$e_{support} = 0,20 \text{ m}$



Gambar 7. Desain Bagian Beton Bertulang Bertekanan Berdasarkan EN1992-1-1-2004

3) Gaya Tekanan yang Diperbolehkan

Segara setelah transfer gaya pretensi (sebelum kerugian jangka panjang):

1. Tegangan tekan:

$f_{cc,0} = -0.6 f_{ckp}(t_0) = 19.80 \text{ MPa}$

2. Tegangan tarik:

$f_{ct,0} = 1.0 f_{ctm}(t_0) = 3.09 \text{ MPa}$

b. Di bawah beban layanan setelah kerugian pretensi terjadi.

1. Tegangan tekan:

$f_{cc,t} = -0.45 f_{ckp} = -18.00 \text{ MPa}$

2. Tegangan tarik:

$f_{ct,t} = 1.0 f_{ctm} = 3.51 \text{ MPa}$

Gaya pretensi awal ditetapkan sebagai $P_{mo} = 1454.05 \text{ kN}$

4) Pemilihan Tendon

$$k.f_{pk} = 1770.00 \text{ MPa (tendon yang telah dilepaskan tegangan)}$$

$$f_{pk} = f_{p0.1k} = 1526.00 \text{ MPa}$$

$$f_{pi} = 75\% f_{p0.1k} = 1144.50 \text{ MPa}$$

$$\text{Area} = P_{mo}/f_{pi} = 1270,47 \text{ mm}^2$$

Tendon baja pra-tegang yang akan digunakan adalah sistem post-tensioning multistrand dengan spesifikasi sebagai berikut:

$$\text{Unit tendon} = 6-12$$

$$\text{Jumlah serat s} = 9,00$$

$$D \text{ serat} = 15,70 \text{ mm}$$

$$\text{Jumlah tendon} = 1,00$$

$$\text{Diameter saluran (D)} = 77,00 \text{ mm}$$

$$\text{Luas penampang (Aused)} = 1743,04 \text{ mm}^2$$

$$F_{used} = P_{mo}/A_{used} = 834,20 \text{ MPa}$$

5) Kerugian Prestressing

Kerugian bergantung waktu

$$\text{- Akibat penyusutan, creep, dan relaksasi baja} = 5,60\%$$

$$\text{Total kerugian pretensi} = 16,21\%$$

6) Pengendalian Gaya Pretensi Setelah Kerugian

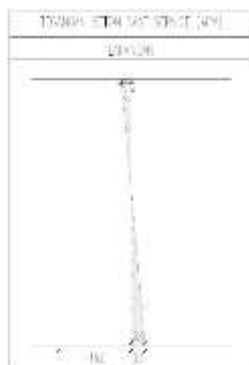
serat bawah:

$$f_{ct} = \frac{(1218.28 \times (2.42 \times 0.84 + 1)) - 2.42 \times 1395.50}{-1.21}$$

$$f_{ct} = 3.45 \text{ MPa} \leq 3.51 \text{ MPa (OK)}$$

$$f_{cc} = \frac{(1218.28 \times (\alpha_{\text{bottom}} \times 0.84 - 1)) - 7.93 \times 1395.50}{1.21}$$

$$f_{cc} = -2.37 \text{ MPa} \leq -18.00 \text{ MPa (OK)}$$



Gambar 8. Diagram Tegangan di Tengah Jembatan di Bawah Beban Operasional

7) Pengendalian Defleksi

Defleksi saat pengangkatan

$$\Delta_{\text{total}} = -65,35 + 31,64 = -33,72 (\uparrow) < 48,00 \text{ mm (OK)}$$

Defleksi pada Beban Operasional

$$\Delta_{\text{total}} = -15,52 + 31,64 = 16,11 (\downarrow) < 48,00 \text{ mm (OK)}$$

8) Perhitungan Momen Ultimate

$$f_{p0.1k} = 1526,00 \text{ MPa}$$

$$f_{pd} = f_{p0.1k} / \gamma_s = 1326,96 \text{ MPa}$$

$$T = f_{pd} \times A_p = 2312933,56 \text{ N}$$

$$MRD = 2552,91 \text{ kNm}$$

$$MD = 2343,00 \text{ kNm}$$

Di daerah engsel plastik ($= h$), saat menahan beban gempa, kekuatan lentur yang disediakan oleh tendon diabaikan. Oleh karena itu, penguatan lentur di daerah engsel plastik:

$$\text{EN1992-1-1:2004 - 5.4.3.1.2(1)}$$

$$d_{\text{tul}} = 25.00 \text{ mm}$$

$$A_s = 491,07 \text{ mm}^2$$

$$T = f_{yd} \times A_p = 832686.34 \text{ N}$$

$$x = 97.58 \text{ mm}$$

$$MRD = 914.68 \text{ KNm}$$

$$MD = 893.39 \text{ KNm}$$

9) Perhitungan Momen Retak

$$\epsilon_{cs}(\infty) = -215,00 \times 10^{-6}$$

$$\rho_w = 0,004$$

$$\sigma_{cs} = 0,04 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 3,51 \text{ MPa}$$

$$M_{cr} = 1935,17 \text{ kNm}$$

$$MD = 1703,63 \text{ kNm}$$

10) Desain Penguatan Geser

Perlawanan geser pada bagian beton yang tidak retak berdasarkan EN1992-1-1:2004 - 6.2.2(2)

$$\sigma_{cp} \text{ yang digunakan} = 1.01 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2.34 \text{ MPa}$$

$$VRD,c = 927.25 \text{ kN}$$

$$V_{ed} = 482,60 \text{ kN}$$

Perhitungan penguatan geser minimum, berdasarkan EN1992-1-1:2004 9.2.2(5)

$$\rho_{min} = 0,0013$$

$$s_{max} = 600,00 \text{ mm}$$

Usulan: penguat geser ganda D10-300

Desain penguatan geser di daerah engsel plastic berdasarkan EN1992-1-1:2004 - 5.5.3.1.3(6)

$$s_{max} = 150,00 \text{ mm}$$

Diusulkan: penguat geser dua kaki D10-150

11) Desain Penguatan Torsi

$$J_t = 687984000.00 \text{ mm}^3$$

$$f_{ctd} = 2.34 \text{ MPa}$$

$$T_{Rd,c} = 1800.83 \text{ kNm}$$

$$T_{ED} = 235.23 \text{ kNm}$$

Spesifikasi desain untuk beton bertulang pra-tegang berdasarkan SNI 2857:2013

Kelas U:

Dimensi penampang	= 1200/400
Fo	= 1642,53 kN
Fe	= 1287,07 kN
Eksentrisitas di penyangga	= -200,00 mm
Eksentrisitas di tengah bentang	= 730,94 mm
Tendon	= 6-12
Jumlah serat	= 9,00 serat
Tabung	= 77,00 mm
Jacking	= ZPE-12/St2
Anchor aktif	= VSL GC 6-12
Anchor mati	= VSL AF 6-12
Grouting	= 82MPa

Kelas T:

Dimensi penampang	= 1200/400
Fo	= 1178,44 kN
Fe	= 921,35 kN
Eksentrisitas di penyangga	= -200,00 mm
Eksentrisitas di tengah jembatan	= 730,94 mm

Tendon	= 6-12
Jumlah serat	= 8,00 serat
Saluran	= 77,00 mm
Jacking	= ZPE-12/St2
Anchor aktif	= VSL GC 6-12
Anchor mati	= VSL AF 6-12
Grouting	= 82MPa

Kelas C:

Dimensi bagian	= 1200/400
Fo	= 966,27 kN
Fe	= 728,87 kN
Eksentrisitas di penyangga	= -200,00 mm
Eksentrisitas di tengah jembatan	= 730,94 mm
Tendon	= 6-12
Jumlah serat	= 8,00 serat
Tabung	= 77,00 mm
Jacking	= ZPE-12/St2
Anchor aktif	= VSL GC 6-12
Anchor mati	= VSL AF 6-12
Grouting	= 82MPa

Spesifikasi Desain untuk Beton Bertulang Bertekanan Berdasarkan EN1992-1-1:2004

Dimensi penampang	= 1200/400
Eksentrisitas di tengah bentang	= 665,88 mm
Tendon	= 6-12
Jumlah serat	= 9,00 serat
Tabung	= 77,00 mm
Jacking	= ZPE-12/St2

Tabel 2 Perbandingan Desain Beton Bertulang

No	Aspek	SNI 2847:2013 Kelas U	EN 1992-1-1:2004
1	Asumsi Desain	Ps.10.2.3 - Regangan tekan maksimum pada beton di serat tekan ekstrem adalah 0,003.	Ps. 6.1(2) - Regangan tekan maksimum pada beton di serat tekan ekstrem adalah 0,0035 untuk $f_c' < 50$ MPa - Regangan awal pada baja prategang diperhitungkan saat menentukan tegangan hasil pada baja
2	<i>Filosofi Desain</i>	SNI 1727 menggunakan Metode Desain Faktor Beban dan Ketahanan Ketahanan Desain (ϕR_n) $\geq$ Efek Beban Desain (γS_n)	Ps. 2.4.2 Menggunakan kombinasi faktor beban dan tegangan yang diizinkan Resistansi Desain (ΨR_n) $\geq$ Tegangan material yang diizinkan (S_n / γ)
3	Kombinasi Beban	SNI 1727 a. 1,4 D b. 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (La or H) c. 1,2 D + 1,0 L $\pm$ 1,6 W + 0,5 (La or H) d. 1,2 D $\pm$ 1,0 E + - 1,0 L 3. 0,9 D $\pm$ (1,6 W or 1,0 E)	EN1990-1-1:2004 $\gamma_G \times G_k + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + E$
4	<i>Lampiran Nasional</i>	- Tidak sesuai dengan standar	- Menerima nilai koefisien dari setiap negara
5	Lebar efektif	Ps.8.12.2 $L / 4$ $b + 2(8t_f)$ $b + 2(0.5 \times (L-b))$ Hasil desain: 2640.00 mm	Ps. 5.3.2.1 $b + 2(0.2b_i + 0.1 l_o)$ Hasil desain: 5600.00 mm

6	Kekuatan tekan awal beton pada waktu (t) f_{ci}'	- Menggunakan koefisien dari PBI 1971 yang disesuaikan dengan usia beton (U) Hasil desain: 37.07 MPa	Ps. 3.1.1.6 - Koefisien bergantung pada klasifikasi jenis semen: S, N, atau R Hasil desain: 33.00 MPa
7	Stres material	- Tegangan yang diperbolehkan pada baja prategang adalah 0,70 kali tegangan tarik - modulus patah $0,62\sqrt{f_{ci}'}$ MPa Hasil desain: 3.92 MPa	Ps. 7.2.(5) - Tegangan yang diperbolehkan pada baja prategang adalah 0,75 kali kekuatan leleh - modulus patah $0,3f_{ct}^{2/3}$ MPa Hasil desain: 3.51 MPa
8	Hilangnya F_o :	Hasil desain: Total 21.64%	Hasil desain: Total 16.21%
	Efek goyangan (PF)	Ps. 18.6.2 $F_{pf} = F_o \times e^{-(\mu\alpha + KL)}$ $\mu = 0.19$ $k = 0.0016$ Hasil desain: 9.28%	Ps. 5.10.5.2 $P_{\mu}(x) = P_{max} \cdot e^{-(\mu(\theta + kx))}$ $\mu = 0.190$ $k = 0.005$ Hasil desain: 5.42%
	Creep (CR)	Hasil desain: 1.17%	Hasil desain: 5.60%
	Shrinkage (SH)	Hasil desain: 0.02%	
	Relaksasi baja (RE)	Hasil desain: 6.57%	
9	Mu	Ps. 18.7 $f_{ps} = f_{pu}[1 - \gamma_p / \beta_1 \rho_p f_{pu} / (f_c')]$ Hasil desain: ϕM_n 2634.94	Ps. 6.1 $f_{pd} = f_{p0.1k} / \gamma_s$ Hasil desain: M_{Rd} 2552.91

10	Mcr	Ps. 18.8.2 $M_{cr} = f_r \times W_b + F \times (e + kt)$ - Perlu diperiksa $M_n > 1.2 M_{cr}$ Hasil desain: 2044.31 kNm	(Gilbert et al., 2017) $M_{cr} = (f_r - \sigma_{cs}) \times W_b + F \times (e + kt)$ $\sigma_{cs} = ((2.5 \rho_w - 0.8 \rho_{cw}) / (1 + 50 \rho_w)) E_s \times \epsilon_{cs}$ Hasil desain: 1935.17 kNm
11	Gaya geser	Ps. 11.3.2 $V_c = (0.05 \times \lambda \times \sqrt{f_c'} + 4.8 (V_u \times dp) / M_u) \times b_w \times d$ Hasil desain: V_u 433.58 kN φV_n 366.90 kN	Ps. 6.2.2(2) $V_{Rd,c} = (1 \times b_w) / S \sqrt{(f_{ctd}^2 + a_1 \times \sigma_{cp} \times f_{ctd})}$ Hasil desain: V_u 482.60 kN V_{Rdc} 927.25 kN
12	Beban torsi	Ps. 11.5.2 $T_n = 0.083 \lambda \sqrt{f_c} (A_{cp}^2 / P_{cp}) \times \sqrt{(1 + f_{pc} / (0.33 \lambda \sqrt{f_c}))}$ Hasil desain: T_u 158.95 kN φT_n 198.90 kN	Ps. 6.3.2(5) $T_{Rd,c} = J_t \times f_{tctd} \sqrt{(1 + 10 \sigma_{cp} / f_{ck})}$ $J_t = 0.33 \sum (x^2 y)$ Hasil desain: T_u 235.23 kN T_{Rdc} 1800.83 kN
13	SPRM persyaratan	Ps. 21.5.2.5 - Tendon diperbolehkan menahan beban gempa hingga 25% dari kekuatan maksimumnya - Tekanan kompresi rata-rata akibat gaya pra-tekan harus kurang dari $f_c' / 10$ atau 3,5 MPa	EN1998-1-1:2004 - Tidak menentukan kapasitas tendon untuk menahan momen gempa; oleh karena itu, diasumsikan bahwa tendon hanya menahan beban gravitasi - Sendi plastik terletak di ujung balok dengan panjang h

		- Sendi plastik terletak di ujung balok dengan panjang 2h	Hasil desain: Lentur 5D25
		Hasil desain: Lentur 4D25	

Pembahasan

Dari perbedaan-perbedaan ini, analisis penyebab perbedaan tersebut sebagai berikut:

1. Asumsi Desain - Regangan beton dalam Eurocode mengikuti hubungan: $0.0028 + 0.0027 [(98 - f_{cm})/100]^4$. Nilai regangan ini mempengaruhi tegangan baja pada kekuatan ultimate, sedangkan dalam SNI, nilainya mempengaruhi nilai ϕ .
2. Filosofi Desain - Faktor pengurangan kekuatan dalam SNI dipengaruhi oleh perilaku tegangan atau regangan yang dominan. Dalam Eurocode, faktor parsial berbeda tergantung pada apakah beban bersifat menguntungkan atau merugikan, dengan nilai faktor yang berbeda.
3. Kombinasi Beban - Faktor beban dalam Eurocode bervariasi tergantung pada jenis struktur dan jenis beban yang diterapkan. Pada beton bertulang, faktor-faktor beban ini mempengaruhi kekuatan ultimate struktur.
4. Annex Nasional - Lebih akurat sesuai dengan kondisi geografis masing-masing negara. Tidak ada Lampiran Nasional Eurocode yang tersedia untuk Indonesia.
5. Lebar Efektif - Perhitungan desain dalam Eurocode sangat dipengaruhi oleh lokasi struktur. Hasil desain menunjukkan lebar flensa efektif yang lebih besar (b_{eff}) dalam EN, yang mempengaruhi eksentrisitas dan momen inersia.
6. Kekuatan tekan awal beton pada waktu (t) f_{ci} - Koefisien Eurocode mengakomodasi rentang kekuatan beton yang luas dengan menyediakan nilai perkiraan untuk kekuatan tekan, sedangkan koefisien PBI hanya berlaku untuk kualitas semen tertentu.
7. Tegangan Material - Tegangan tekan yang diizinkan pada tendon untuk gaya pra-tekan relatif serupa. Namun, Eurocode tidak secara khusus mendefinisikan nilai yang diizinkan untuk tegangan tarik beton selama transfer pra-tekan.
8. Efek goyangan (PF) - Perbedaan signifikan dalam hasil perhitungan disebabkan oleh rumus dan nilai koefisien μ dan k yang berbeda. Dalam rumus efek goyangan Eurocode, μ dikalikan dengan kx , menghasilkan nilai kehilangan pretensi yang lebih kecil.
9. Creep (CR) - Rumus yang disediakan oleh Eurocode sangat kompleks dan memerlukan akurasi tinggi serta data desain yang lengkap.

10. Relaksasi baja lebih rendah karena gaya pretensi yang lebih kecil dibandingkan dengan SNI. Umur layanan desain untuk bangunan dalam Eurocode adalah 50 tahun.
11. μ - Tegangan tendon pada kekuatan ultimate diperkirakan lebih tinggi dalam SNI (0,87 fpu, dibandingkan dengan EN 0,75 fpu). Dalam Eurocode, tegangan leleh yang diizinkan dibagi dengan faktor keamanan parsial material untuk baja prategang sebesar 1.15.
12. M_{cr} - Momen retak dalam Eurocode memperhitungkan faktor relaksasi dari baja tulangan non-prategang, yang ditandai sebagai σ_{cs} . Modulus patah dalam SNI memiliki nilai yang lebih tinggi. SNI menetapkan persyaratan yang lebih ketat terkait momen nominal dan momen retak.
13. Gaya geser - Eurocode menghasilkan gaya geser yang lebih tinggi akibat kombinasi beban. Eurocode juga memberikan kapasitas geser yang lebih besar akibat momen inersia yang lebih tinggi. SNI merumuskan desain geser dengan mempertimbangkan baik gaya geser V_u maupun μ .
14. Beban torsi - Eurocode menghasilkan beban torsi yang lebih tinggi akibat kombinasi beban. Kapasitas torsi retak dalam SNI lebih kecil karena tidak memperhitungkan kontribusi flensa balok T (karena tidak ada penguatan stirrup di flensa) sedangkan B_{eff} dalam Eurocode lebih besar.
15. Persyaratan SPRM - Dalam SNI, persyaratan SPRMK lebih ketat daripada persyaratan SPRM dalam Eurocode. Ketentuan SPRM diatur dalam EN 1998-1-1:2004. Jarak maksimum pengikat dalam daerah engsel plastik sama dalam kedua standar.

Desain balok bertulang prategang menggunakan EN 1992-1-1:2004 menghasilkan gaya prategang yang 12% lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan SNI 2847:2013. Namun, jumlah untai yang digunakan sama karena persyaratan untuk menahan momen dari sistem prategang penuh. Desain balok menurut Eurocode juga memerlukan waktu yang relatif lebih lama karena formulasi yang sangat rinci dan kompleks. Hal ini juga mengharuskan perancang memiliki data masukan yang lengkap dan akurat, karena terdapat banyak variabel yang harus ditentukan. Selain itu, akurasi yang tinggi sangat penting dari perancang karena notasi yang digunakan untuk setiap variabel berbeda dari konvensi yang umum digunakan di Indonesia.

Berdasarkan hasil desain dari kasus bangunan 10 lantai ini, penulis secara sementara menyimpulkan bahwa mendesain balok prategang menggunakan SNI 2847:2013 lebih efisien. Hal ini disebabkan oleh perhitungan yang lebih cepat dan kemudahan akurasi yang lebih besar, terutama mengingat perbedaan gaya pretensi (12%) tidak cukup signifikan untuk mengimbangi keuntungan praktis. Namun, diperlukan studi lebih lanjut mengenai desain balok bertulang

pretensi pada struktur berskala besar untuk mengamati dan mengevaluasi perbedaan secara komprehensif.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil desain yang diperoleh dalam penelitian ini, penulis mengajukan beberapa rekomendasi untuk pengembangan kajian di masa mendatang. Pertama, guna memperkaya pemahaman dan perbandingan antara SNI 2847:2013 dan EN 1992-1-1:2004 pada struktur beton bertulang pra-tegang yang dirancang untuk menahan beban gempa, disarankan dilakukan studi lanjutan yang lebih mendalam. Kajian tersebut dapat mencakup beberapa aspek penting, seperti pengembangan sistem beton bertulang pra-tegang secara keseluruhan, penerapan teknologi pra-tegang pada struktur jembatan, analisis balok dengan bagian retak yang diperbolehkan dalam desain, serta studi tentang balok dengan bentang panjang yang menggunakan gaya pra-tegang tinggi. Kedua, diperlukan studi komparatif yang lebih spesifik terhadap ketentuan desain gempa antara SNI 1726:2012 dan EN 1998-1-1:2004 (Eurocode 8). Hal ini penting untuk mengevaluasi kesesuaian dan kelayakan implementasi standar Eurocode dalam konteks kegempaan Indonesia, yang memiliki karakteristik seismik tersendiri. Ketiga, untuk mendukung adopsi Eurocode secara lebih luas dan realistis di Indonesia, studi lebih lanjut juga dibutuhkan dalam penyusunan National Annex atau Lampiran Nasional. Lampiran ini akan memungkinkan penyesuaian terhadap kondisi lokal Indonesia tanpa mengabaikan prinsip dasar dari Eurocode, sehingga penerapannya dapat dilakukan secara efektif dan kontekstual.

DAFTAR REFERENSI

- ACI (American Concrete Institute). (2011). *ACI 318M-11: Building code requirements for structural concrete and commentary*. Farmington Hills, MI: ACI.
- ACI. (2014). *ACI 318M-14: Building code requirements for structural concrete and commentary*. ACI Committee 318.
- ACI. (2019). *ACI 318M-19: Building code requirements for structural concrete and commentary*. ACI Committee 318.
- Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2012). *SNI 1726:2012 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. <https://doi.org/10.1080/0893569032000131613>
- Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2013). *SNI 2847:2013 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*.

- BSN (Badan Standardisasi Nasional). (2013). *SNI 2847:2013 - Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Jakarta: BSN.
- CEN (Comité Européen de Normalisation). (2004). *EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: CEN.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1971). *Peraturan beton bertulang Indonesia*.
- Eurocode. (2004). *EN 1992: Design of concrete structures*.
<https://doi.org/10.1136/aim.2010.003699>
- Eurocode. (2004). *EN 1998: Design of structures for earthquake resistance*.
- Gilbert, R. I., Mickleborough, N. C., & Ranzi, G. (2017). *Design of prestressed concrete to Eurocode 2*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315389523>
- Gopalakrishnan, N., & Murthy, A. R. (2020). Advances in prestressed concrete technology. *Journal of Structural Engineering*, 46(4), 412–421.
- JRC (Joint Research Centre). (2008). *Eurocode 2: Background and applications*. European Commission.
- Lantsoght, E. O. L. (2019). *Prestressed concrete: Design principles and applications*. CRC Press.
- Lin, T. Y., & Burns, N. H. (1981). *Design of prestressed concrete structures* (3rd ed.). Wiley.
- Nilson, A. H., Darwin, D., & Dolan, C. W. (2010). *Design of concrete structures* (14th ed.). McGraw-Hill Education.
- Salmon, C. G., & Johnson, J. E. (2012). *Steel structures: Design and behavior* (5th ed.). Pearson.
- Toniolo, G., & di Prisco, M. (2017). *Reinforced concrete design to Eurocode 2*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-52033-9>
- VSL International Ltd. (n.d.). *VSL strand post-tensioning systems*.