

STUDI PARAMETRIK PENGARUH PERATURAN ACI 318-14 TERHADAP KEBUTUHAN TULANGAN PENGEKANG (CONFINEMENT) PADA KOLOM

Erwin Lim^{a*}, Eben Haezer^b, Tanri Wijaya^c

^a Staf akademik, Institut Teknologi Bandung

^b Asisten peneliti, Institut Teknologi Bandung

^c Structural engineer, Divisi Struktur, PT Wiratman

*corresponding author: erwin_petrus@yahoo.com

ABSTRAK: Tren perkembangan struktur bangunan gedung tingkat tinggi di Indonesia saat ini sangat pesat sehingga menyebabkan kebutuhan akan desain dan konstruksi bangunan yang semakin tinggi juga. Salah satu implikasi dari tren ini adalah gaya aksial yang harus dipikul oleh kolom-kolom di lantai dasar semakin besar. Secara teoritis, kemampuan berdeformasi dari kolom akan semakin berkurang seiring dengan bertambahnya gaya aksial. Sedangkan, kemampuan deformasi elemen struktural sangat diperlukan untuk mencapai struktur tahan gempa dengan kinerja yang baik. Untuk mengatasi masalah ini, persyaratan terbaru ACI 318-14, yang akan dijadikan acuan dalam SNI 2847 seri berikutnya, mengenai rumusan kebutuhan tulangan pengekang (*confinement*) pada kolom menjadi lebih ketat. Persyaratan akan tulangan pengekang dalam ACI 318-14 memasukkan pengaruh besarnya gaya aksial dan pendetailan kait seismik (*seismic hook*) dari tulangan sengkang dan tulangan silang (*cross ties*) terhadap tulangan longitudinal. Makalah ini membahas latar belakang munculnya rumusan tulangan pengekang yang baru pada ACI 318-14 dan implikasi dari persyaratan ACI 318-14 terhadap kebutuhan tulangan pengekang berdasarkan studi parametrik pada gedung fiksional. Adapun, parameter yang dibahas ialah jumlah lantai bangunan, dimensi kolom, kuat tekan beton, dan kuat leleh baja tulangan sengkang.

KATA KUNCI: ACI 318-14, gaya aksial, gedung tinggi, kolom, tulangan pengekang.

1. PENDAHULUAN

Bangunan gedung tingkat tinggi menjadi populer di Indonesia, terutama di kota-kota besar seperti Jakarta, Surabaya, Bandung, dsb. Secara struktural, sistem struktur yang umum digunakan dalam gedung tingkat tinggi adalah sistem struktur rangka (kolom dan balok), sistem struktur dinding geser dan kombinasi dari keduanya, sesuai dengan kebutuhan dan keterbatasan dari tiap sistem. Dalam sistem struktur rangka dan kombinasi rangka dengan dinding geser, kolom merupakan elemen struktural yang sangat penting dalam menahan beban-beban yang bekerja pada suatu gedung. Beban-beban tersebut antara lain adalah beban gravitasi yang memberikan dominasi gaya aksial pada kolom dan beban lateral yang memberikan dominasi momen pada kolom. Oleh karena itu, kapasitas dan deformasi kolom sangatlah bergantung akan interaksi aksial dan momen. Secara teoritis, beban aksial yang bekerja pada kolom akan mengurangi kemampuan deformasi yang dimiliki oleh kolom saat menerima gaya lateral. Hal ini tentunya tidak diharapkan dalam mendesain suatu bangunan yang tahan gempa atau terhadap beban lateral lainnya karena akan membuat keruntuhan yang bersifat getas.

Pada bangunan gedung tingkat tinggi, kolom-kolom pada lantai dasar menerima gaya aksial yang sangat besar daripada lantai-lantai di atasnya, namun dalam proses mendesainnya (sesuai SNI 2847-2013) belum memperhitungkan faktor gaya aksial yang besar tersebut terhadap deformasi kolom dalam menahan gaya lateral. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, persyaratan terbaru ACI 318-14, yang akan dijadikan acuan dalam SNI 2847 berikutnya, menambahkan persyaratan kebutuhan tulangan pengekang kolom. ACI 318-14 telah memperhitungkan pengaruh besarnya gaya aksial dan pendetailan kait seismik (*seismic hook*) dari tulangan sengkang dan tulangan silang (*cross ties*) terhadap tulangan longitudinal. Persyaratan ini bertujuan untuk memastikan kolom-kolom dengan gaya aksial yang besar masih dapat memiliki kemampuan deformasi yang diinginkan atau bersifat daktail.

2. STUDI LITERATUR

Tulangan pengekang (*confinement*) pada elemen kolom memiliki fungsi penting untuk memberi perilaku yang daktail pada kolom. Sebelumnya, berbagai negara dan studi telah mengembangkan persamaan untuk menentukan jumlah (area/luas) tulangan pengekang yang diperlukan untuk memberikan kekangan yang baik pada kolom. Beberapa peraturan beton bertulang di Kanada (CSA A23.3-04) dan Selandia Baru (NZS 3101-06), telah mempertimbangkan gaya aksial yang bekerja pada kolom dalam penentuan area tulangan pengekang. Hal ini berbeda dengan peraturan beton di Amerika Serikat (ACI 318-11 dan edisi sebelumnya) yang saat ini diadopsi sebagai peraturan beton di Indonesia (SNI 2847-2013). Pada seri ACI terbaru, yaitu ACI 318-14, persamaan penentuan area tulangan pengekang diperbarui dengan menambahkan faktor gaya aksial dan pengaruh kait (seismik atau bukan seismik) pada tulangan longitudinal kolom. Berikut disajikan beberapa persamaan penentuan area tulangan pengekang dari berbagai peraturan dan studi:

2.1 ACI 318-11 dan ACI 318-14 (Amerika Serikat)

ACI 318-11 (dan edisi sebelumnya):

Rasio luas tulangan pengekang ($A_{sh}/(sb_c)$) diambil yang terbesar diantara persamaan (1) dan (2):

$$\frac{A_{sh}}{s b_c} \geq 0.3 \frac{f'_c}{f_{yt}} \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \quad (1)$$

$$\frac{A_{sh}}{s b_c} \geq 0.09 \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (2)$$

dimana:

A_{sh}	= kebutuhan area/luas tulangan pengekang
s	= spasi vertikal antar tulangan pengekang
b_c	= lebar kolom dari dihitung dari luar ke luar tulangan pengekang
f'_c	= kuat tekan beton
f_{yt}	= kuat leleh tulangan pengekang dan dibatasi ≤ 700 MPa
A_g	= luas bruto beton
A_{ch}	= luas beton terkekang (dihitung dari luar ke luar tulangan pengekang)

ACI 318-14:

Pada edisi terbaru ACI 318-14, ACI mulai memasukkan pengaruh gaya aksial, pengaruh beton mutu tinggi, dan kait seismik ke dalam rumus penentuan rasio tulangan pengekang seperti yang ditunjukkan sebagai berikut:

- Untuk kondisi $P_u \leq 0.3A_g f'_c$ dan $f'_c \leq 70$ MPa:
Diambil nilai terbesar antara persamaan (1) dan (2).
- Untuk kondisi $P_u > 0.3A_g f'_c$ dan $f'_c > 70$ MPa:
Diambil nilai terbesar antara persamaan (1), (2) dan (3).

$$0.2 k_f k_n \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}} \quad (3)$$

dimana

P_u	= gaya aksial terfaktor
k_f	= faktor kuat tekan beton $\left(\frac{f'_c}{172.25} + 0.6 \geq 1.0 \right)$
k_n	= faktor keefektifan pengekang $\left(\frac{n_l}{n_l - 2} \right)$
n_l	= jumlah tulangan longitudinal yang terkekang lateral (kait 135° /sudut)

2.2 CSA A23.3-04 (Kanada)

Pada peraturan Kanada (CSA A23.3-04), rasio tulangan pengekang diambil yang terbesar diantara persamaan (2) dan (4) dengan $f_{yt} \leq 500$ MPa sebagai berikut:

$$\frac{A_{sh}}{s b_c} \geq 0.2 k_n k_p \frac{A_g f'_c}{A_{ch} f_{yt}} \quad (4)$$

dimana	k_n	= faktor keefektifan pengekang $\left(\frac{n_l}{n_l-2}\right)$
	k_p	= P/P_o
	P	= gaya aksial tekan pada kolom
	P_o	= gaya aksial nominal tanpa eksentrisitas $(0.85f'_c(A_g - A_s) + A_s f_{yl})$
	A_s	= luas tulangan longitudinal
	f_{yl}	= kuat leleh tulangan longitudinal

2.3 NZS 3101-06 (Selandia Baru)

Area atau luas tulangan pengekang ditentukan dengan persamaan (5) dengan $f_{yt} \leq 800$ MPa dan $A_g/A_{ch} \leq 1.5$. Persamaan (5) didasarkan pada hasil studi Watson, Zahn, dan Park. Nilai $\rho_l m \leq 0.4$.

$$\frac{A_{sh}}{s b_c} \geq \left(\frac{1.3 - \rho_l m}{3.3} \frac{A_g f'_c}{A_{ch} f_{yt} \phi f'_c A_g} \right) - 0.006 \quad (5)$$

dimana:

ϕ	= 0.85
ρ_l	= luas tulangan terpasang dibagi A_g
m	= $f_{yl}/0.85f'_c$

2.4 Elwood et.al. (2009)

Area atau luas tulangan pengekang ditentukan dengan persamaan (6) dengan $f_{yt} \leq 689$ MPa. Nilai $[(h_x + 300)/500]$ tidak perlu diambil kurang dari 1.0.

$$\frac{A_{sh}}{s b_c} \geq 0.25 k_p k_n \left(\frac{f'_c}{f_{yt}} \right) \left(\frac{A_g}{A_{ch}} \right) \quad (6)$$

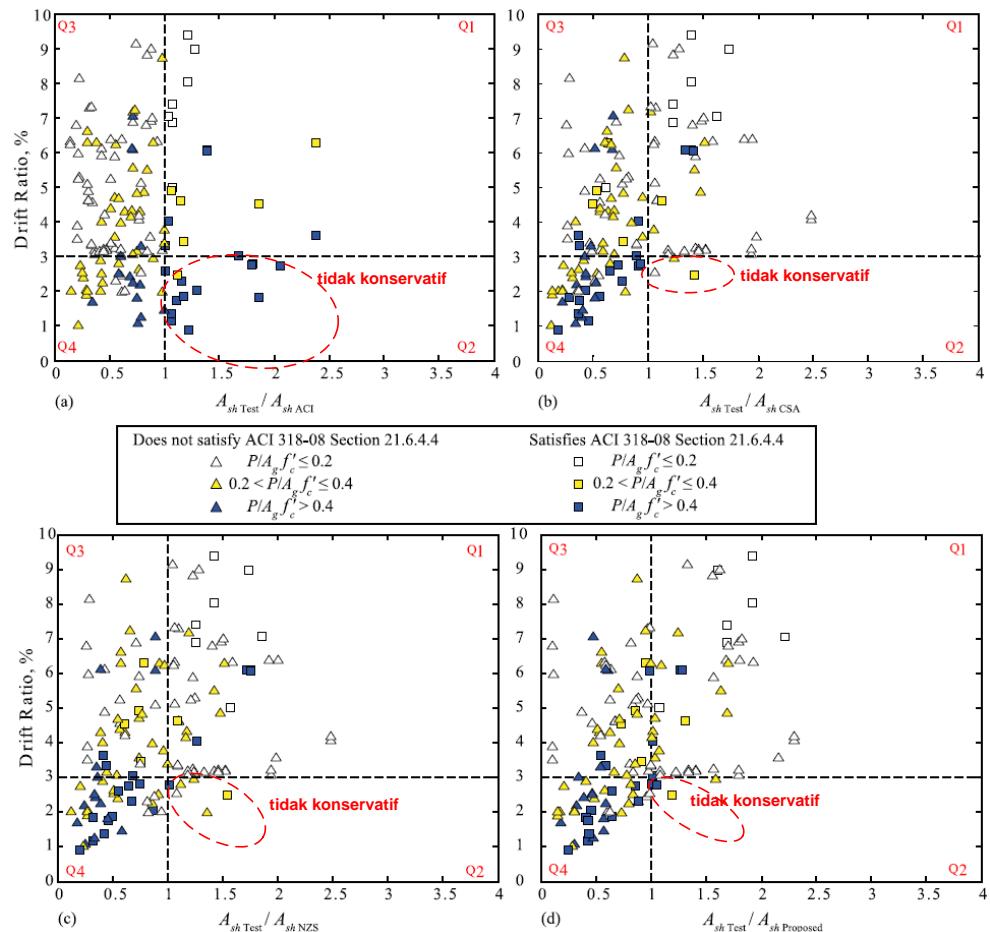
dimana:

k_p	= $P_u/A_g f'_c$, tidak perlu diambil kurang dari 0.2
k_n	= $[0.6 + 0.4(n/n_{ls})][(h_x + 300)/500]$
n	= jumlah total tulangan longitudinal pada kolom
n_{ls}	= jumlah tulangan longitudinal yang terkekang lateral (kait 135°/sudut)
h_x	= jarak pusat ke pusat spasi horizontal kaki-kaki pengekang (mm)
P_u	= gaya aksial terbesar (ultimate) yang bekerja pada kolom

Elwood et al. melakukan analisis lebih jauh terhadap akurasi rumus kekangan yang diajukannya (Persamaan 6) dengan mengevaluasi database uji kolom dari *PEER Structural Performance Database* seperti terlihat pada **Gambar 1**. Secara sederhana, kolom-kolom tersebut dikelompokkan berdasarkan dua kategori, (1) berdasarkan minimum kapasitas deformasi 3% dan (2) berdasarkan rasio antara tulangan sengkang terpasang dan tulangan sengkang yang dibutuhkan. Nilai *drift ratio* 3% diambil sebagai target performa karena *Maximum Considered Demand* adalah 1,5 kali *Design Basis Demand*, dimana nilai rasio *drift* untuk bangunan dengan kolom sebagai penahan gaya lateral memiliki batas performa 2%. Sedangkan persyaratan tulangan dicek berdasarkan peraturan ACI 318-11 (Gambar 1a), peraturan CSA (Gambar 1b), peraturan NZS (Gambar 1c), dan persamaan 6 (Gambar 1d).

Dengan demikian, untuk setiap gambar, dapat dibagi menjadi 4 Kuadran (Q1, Q2, Q3 dan Q4). Data pada kuadran Q1 (kanan atas) merepresentasikan kolom dengan tulangan pengekang yang dipasang melebihi persyaratan yang digunakan, dan memiliki

kapasitas drift yang sama atau melebihi target (3%). Data pada kuadran Q4 (kiri bawah) merepresentasikan kolom dengan tulangan pengekang kurang dari yang persyaratan yang digunakan dan memiliki kapasitas drift dibawah target. Data pada kuadran Q3 (kiri atas) merepresentasikan kolom dengan tulangan pengekang kurang dari persyaratan yang digunakan, namun memiliki kapasitas drift yang melebihi target. Hal ini menunjukkan persyaratan yang digunakan sangatlah konservatif untuk kasus tersebut. Di sisi lain, data pada kuadran Q2 (kanan bawah) merepresentasikan kolom dengan tulangan pengekang lebih dari persyaratan yang digunakan, namun memiliki kapasitas drift kurang dari target. Hal ini mengindikasikan bahwa persyaratan yang digunakan tidak konsevatif (tidak pada sisi aman) untuk kasus tersebut. Idealnya, kolom yang diuji harus masuk pada kuadran Q1 dan kuadran Q4.

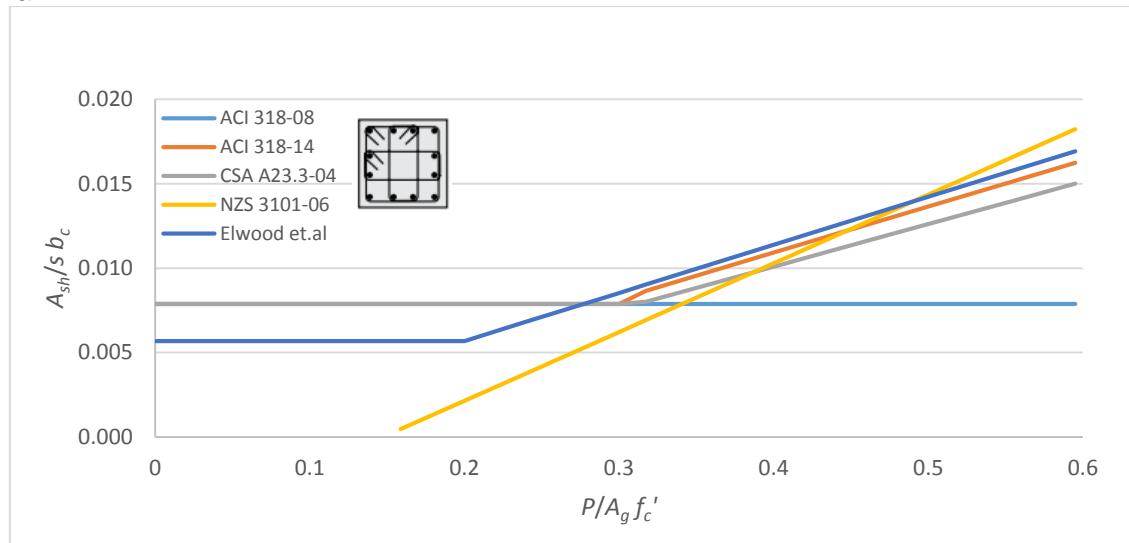


Gambar 1. Rasio Drift Terhadap Kebutuhan Tulangan Pengekang untuk Kolom Persegi: (a) ACI; (b) CSA; (c) NZS; dan (d) Persamaan 6 (Gambar diambil dari Elwood et al. 2009)

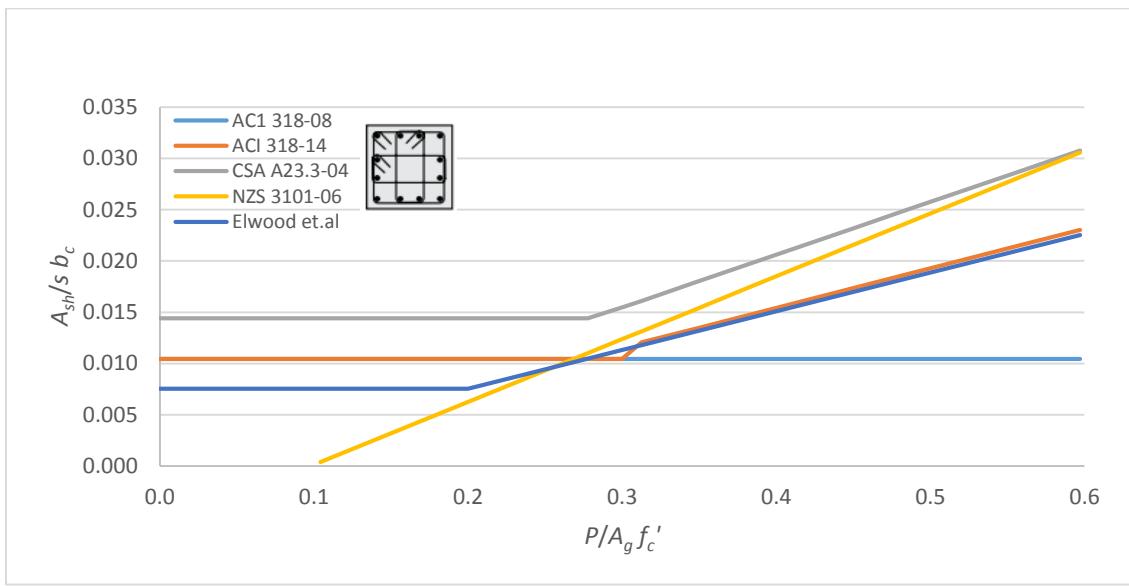
Pada **Gambar 1a** dapat dilihat bahwa dengan persyaratan ACI 318-11 (dan ACI 318-08), kolom yang berada pada kuadran Q2 adalah mayoritas kolom-kolom dengan $P/A_g f'_c > 0.4$. Hal ini mengindikasikan bahwa ACI 318-11 (dan SNI 2847-2013) tidak konservatif untuk kolom dengan gaya aksial yang tinggi, sehingga diperlukan adanya pembaharuan. Sedangkan penentuan kebutuhan tulangan pengekang dengan CSA (**Gambar 1b**), NZS (**Gambar 1c**) dan Elwood et.al (**Gambar 1d**) memberikan hasil yang lebih baik dimana kolom hasil tes sangatlah sedikit yang berada pada kuadran Q2. Di antara ketiga ketentuan yang disebutkan terakhir, jumlah kolom yang masuk dalam kuadran Q2 untuk ketentuan Elwood et al. adalah yang paling sedikit. Dari **Gambar 1b**, **1c**, dan **1d** dapat dilihat bahwa kolom-kolom yang termasuk dalam kuadran Q2 mayoritas adalah kolom dengan rasio gaya aksial rendah ($P/A_g f'_c < 0.4$). Dengan demikian, dapat disimpulkan berdasarkan evaluasi **Gambar 1**, bahwa ketentuan rumusan pengekang rekomendasi Elwood et al. merupakan yang terbaik.

3. STUDI PARAMETRIK ELEMEN KOLOM

Untuk mendapatkan perbandingan antara rumusan kekangan, maka dilakukan studi parametrik seperti yang disajikan dalam **Gambar 2**. **Gambar 2** menunjukkan rasio kebutuhan tulangan pengekang yang dihitung berdasarkan ACI 318-08, ACI 318-14, CSA A23.3-04, NZS 3101-06 dan persamaan yang diajukan oleh Elwood et.al apabila gaya aksial divariasikan dari 0 - 0.6 $A_g f'_c$. Studi parametrik ini dilakukan untuk kolom dengan dimensi 600 mm x 600 mm, jumlah tulangan longitudinal 12D29 ($\rho = 2.15\%$) seperti pada **Gambar 2**, dan $A_g/A_{ch} = 1.3$. Kasus 1 (**Gambar 2a**) dikhkusukan untuk kolom dengan properti material normal, yakni: $f'_c = 35$ MPa dan $f_{yt} = f_{yl} = 400$ MPa. Sedangkan Kasus 2 (**Gambar 2b**) dikhkusukan untuk kolom dengan properti material mutu tinggi, yakni $f'_c = 80$ MPa, $f_{yt} = 700$ MPa dan $f_{yl} = 500$ MPa.



(a) Kasus 1: material mutu normal



(b) Kasus 2: material mutu tinggi

Gambar 2. Perbandingan dari berbagai persamaan kebutuhan tulangan pengekang

Perbandingan diantara persamaan-persamaan tersebut menunjukkan:

- Untuk kasus 1 dimana properti material yang digunakan merupakan material mutu normal (**Gambar 2a**), pada saat rasio gaya aksial $P/A_g f'_c \leq 0.3$, rasio kebutuhan tulangan dari ACI 318-14 memberikan hasil yang sama dengan ACI 318-11 dan CSA A23.3-04. Sedangkan

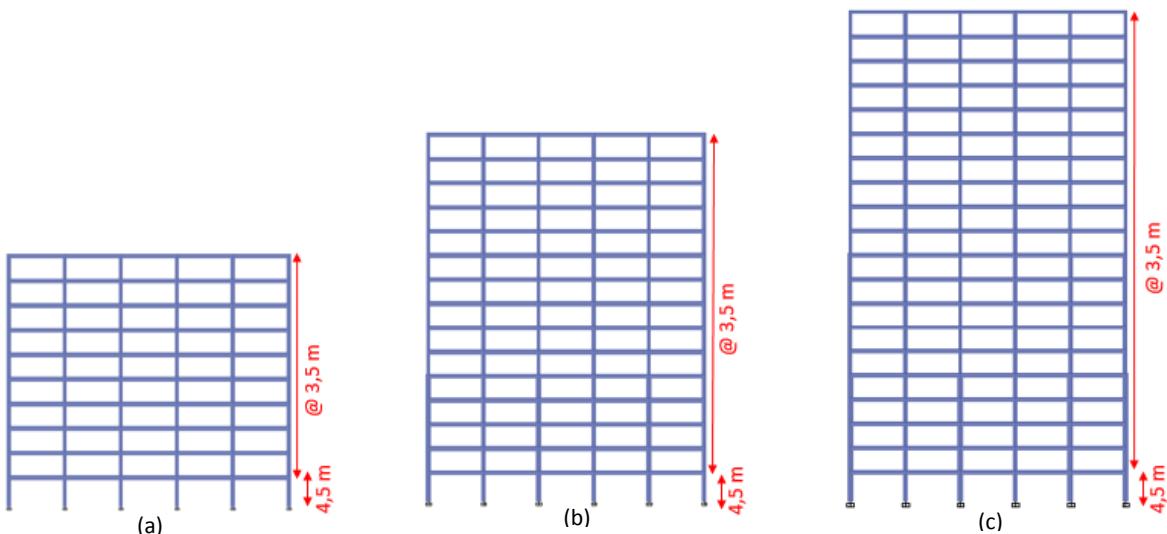
persyaratan yang diajukan oleh Elwood et.al dan NZS 3101-06 menghasilkan rasio kebutuhan tulangan yang lebih kecil daripada ACI 318-14, ACI 318-11 dan CSA 23.3. Namun, pada saat $P/A_{gf_c}' > 0.3$, rasio kebutuhan tulangan dari ACI 318-14 mulai meningkat dan melebihi rasio kebutuhan tulangan dari ACI 318-11 dan CSA A23.3-04, namun masih terletak sedikit di bawah rasio kebutuhan tulangan dari persamaan yang diajukan Elwood et al. (Persamaan 6).

- Untuk Kasus 2 dimana properti material yang digunakan merupakan material mutu tinggi (**Gambar 2b**), persyaratan kekangan dari CSA A23.3-04 memberikan persyaratan yang paling ketat dibandingkan dengan yang lainnya, baik ketika rasio gaya aksial rendah maupun tinggi. Sementara itu, untuk rasio gaya aksial rendah ($P/A_{gf_c}' \leq 0.3$), persyaratan kekangan dari Elwood et al. sedikit di bawah persyaratan kekangan dari ACI 318-14. Namun, persyaratan kekangan dari kedua rumusan ini berhimpit untuk kolom dengan rasio gaya aksial tinggi ($P/A_{gf_c}' > 0.3$).

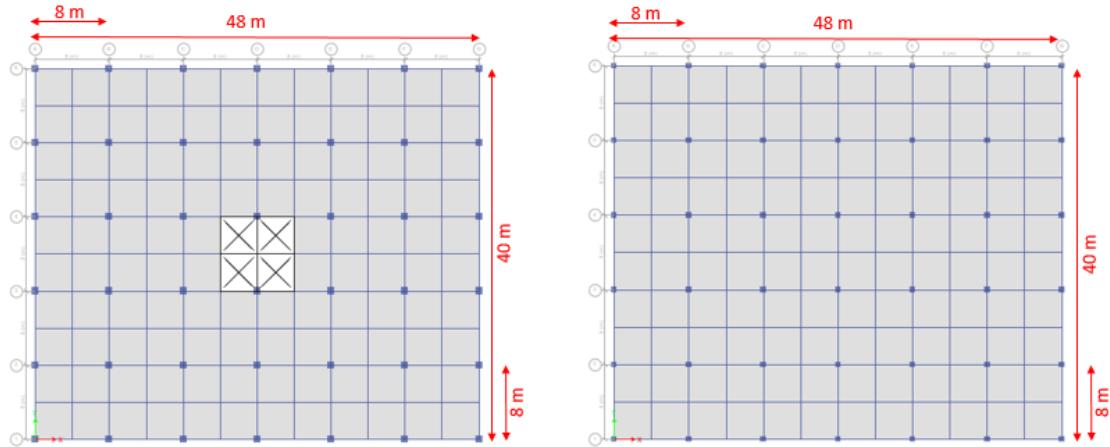
Dari **Gambar 2**, relasi antara rumusan ACI 318-14 dan rekomendasi Elwood et al. dapat disimpulkan sbb: (1) rumus tulangan pengekang ACI 318-14 memberikan hasil yang lebih besar (konservatif) dibandingkan rumus Elwood et al. untuk kolom dengan rasio gaya aksial rendah ($P/A_{gf_c}' \leq 0.3$) dan (2) rumus tulangan pengekang ACI 318-14 memberikan jumlah tulangan pengekang yang sama dengan rumus Elwood et al. untuk kolom dengan rasio gaya aksial tinggi ($P/A_{gf_c}' > 0.3$). Menggabungkan hasil dari Gambar 1 dan Gambar 2, dapat disimpulkan bahwa rumus tulangan pengekang ACI 318-14 akan memberikan hasil yang aman untuk kolom dengan rasio aksial rendah dan rasio aksial tinggi.

4. STUDI PARAMETRIK GEDUNG FIKSIONAL

Untuk mendapatkan dampak perubahan rumusan tulangan pengekang terhadap desain bangunan tinggi, maka dilakukan studi parametrik terhadap tiga gedung fiksional, dimana masing-masing dengan jumlah lantai 10 lantai, 15 lantai, dan 20 lantai (**Gambar 3**). Namun ketiga gedung tersebut memiliki denah yang sama untuk lantai tipikal dan atap seperti pada **Gambar 4**.



Gambar 3. Gedung Fiksional (a) 10 Lantai; (b) 15 Lantai; dan (c) 20 Lantai



Gambar 4. Denah Gedung Fiksional (a) Denah Lantai Tipikal; (b) Denah Lantai Atap

Ukuran elemen-elemen struktural balok dan kolom ditentukan dengan *preliminary* dan didapatkan ukuran sebagai berikut: untuk lantai tipikal, ukuran balok induk adalah 300 mm x 700 mm, sedangkan ukuran balok anak adalah 300 mm x 600 mm. Untuk balok lantai atap, ukuran balok induk adalah 300 mm x 600 mm dan ukuran balok anak adalah 300 mm x 500 mm. Mutu beton untuk balok adalah 30 MPa. Ukuran kolom divariasikan untuk dapat mengakomodasi beban lantai di atasnya yang berbeda pada setiap gedung. Selain itu, ukuran kolom dibuat bervariasi juga untuk satu gedung yang sama untuk melihat pengaruh ukuran kolom terhadap kebutuhan tulangan pengekang dari persyaratan baru pada ACI 318-14. Kriteria desain kolom akan dibahas lebih detail pada **Subbab 4.2**. Ukuran kolom disajikan pada **Tabel 1**.

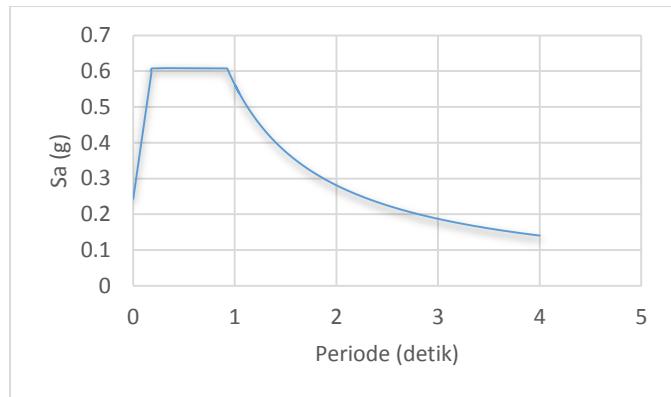
Tabel 1. Ukuran Kolom Gedung Fiksional

10 Lantai - K600		10 Lantai - K750	
Lantai	Ukuran (mm x mm)	Lantai	Ukuran (mm x mm)
Lt 6 - Lt 10	600 x 600	Lt 6 - Lt 10	600 x 600
Lt 1 - Lt 5	600 x 600	Lt 1 - Lt 5	750 x 750
15 Lantai - K700		15 Lantai - K850	
Lt 11 - Lt 15	600 x 600	Lt 11 - Lt 15	600 x 600
Lt 6 - Lt 10	600 x 600	Lt 6 - Lt 10	700 x 700
Lt 1 - Lt 5	700 x 700	Lt 1 - Lt 5	850 x 850
20 Lantai - K800		20 Lantai - K1000	
Lt 16 - Lt 20	600 x 600	Lt 16 - Lt 20	600 x 600
Lt 11 - Lt 15	600 x 600	Lt 11 - Lt 15	700 x 700
Lt 6 - Lt 10	700 x 700	Lt 6 - Lt 10	800 x 800
Lt 1 - Lt 5	800 x 800	Lt 1 - Lt 5	1000 x 1000

4.1 Pembebanan

Gedung dibebani dengan beban gravitasi, dimana beban mati berasal dari berat sendiri dan *super imposed dead load* (SIDL), beban hidup gedung perkantoran, dan beban seismik (gempa) dalam bentuk respon spektra. Untuk lantai tipikal, beban SIDL adalah 1,2 kN/m² dan beban hidup perkantoran adalah 2,5 kN/m². Sedangkan untuk lantai atap, beban SIDL adalah 2 kN/m² dan beban hidup perkantoran adalah 0,96 kN/m².

Pembebanan gempa dilakukan dengan menggunakan analisis respon spektra dari kota Jakarta (asumsi tanah lunak - SE) dengan parameter sebagaimana pada **Gambar 5**. Bangunan gedung fiksional ini juga dapat dikategorikan memiliki Kategori Desain Seismik (KDS) D.



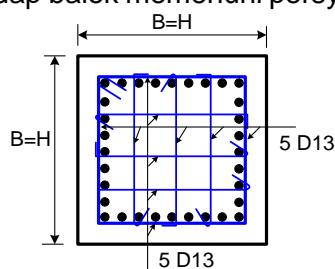
Gambar 5. Respon Spektra Kota Jakarta

4.2 Kriteria Desain Kolom

Dalam makalah ini dilakukan 4 studi kasus dalam studi parametrik pada gedung fiksional. Parameter tiap kasus adalah dimensi kolom dan mutu material yang digunakan sebagaimana terlihat pada tiga baris pertama pada **Tabel 2**. Untuk Kasus 1 dan Kasus 2, dimensi kolom yang digunakan untuk bangunan 10, 15, dan 20 lantai, masing-masing adalah $600 \times 600 \text{ mm}^2$, $700 \times 700 \text{ mm}^2$, dan $800 \times 800 \text{ mm}^2$. Sementara itu, Kasus 1 menggunakan mutu material normal ($f_c = 30 \text{ MPa}$ dan $f_{yt} = 400 \text{ MPa}$) sedangkan Kasus 2 menggunakan mutu material tinggi ($f_c = 60 \text{ MPa}$ dan $f_{yt} = 700 \text{ MPa}$). Untuk Kasus 3 dan Kasus 4, dimensi kolom diperbesar menjadi $750 \times 750 \text{ mm}^2$, $850 \times 850 \text{ mm}^2$, dan $1000 \times 1000 \text{ mm}^2$ untuk bangunan lantai 10, 15, dan 20 lantai.

Beberapa kriteria desain kolom sesuai dengan studi kasus yang ditentukan:

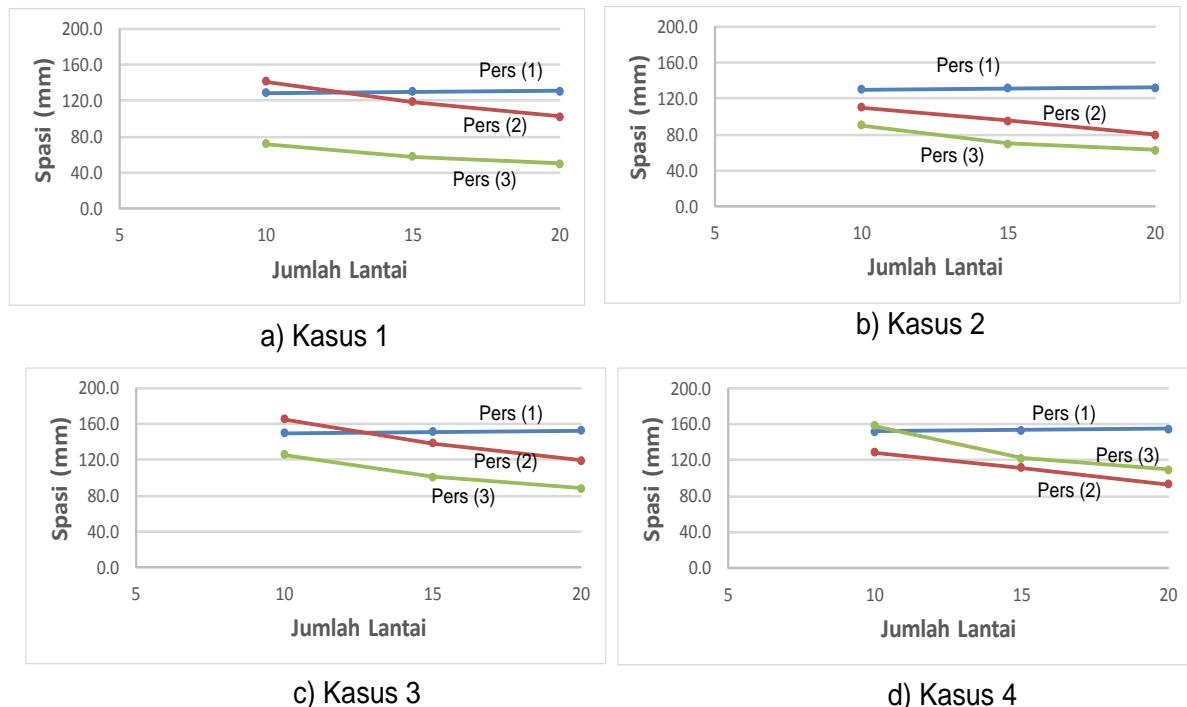
- Tulangan longitudinal disediakan sesuai kebutuhan ($\min = 1\%$ dan $\max = 3\%$). Namun selalu dipasang dengan konfigurasi 32Dxx (9 tulangan per sisi), dimana nilai xx disesuaikan dengan kebutuhan seperti terlihat pada **Gambar 6**.
- Tulangan pengekang (*confinement*) terpasang pada semua case adalah 5D13 ($A_{sh} = 663,66 \text{ mm}^2$) dipasang dengan kait $135^\circ - 90^\circ$, dengan demikian, untuk analisis hanya perlu dibandingkan spasi vertikal antar tulangan saja.
- Rasio kekuatan kolom terhadap balok memenuhi persyaratan *strong column weak beam*.



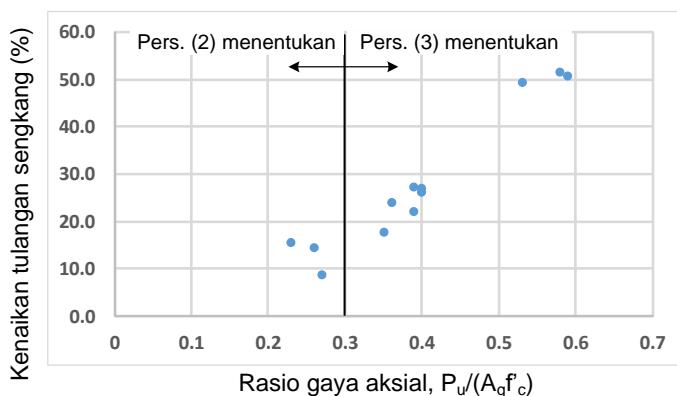
Gambar 6. Sketsa tipikal detailing elemen kolom

4.3 HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Hasil pemodelan, analisa struktur, dan desain yang dilakukan, ditampilkan pada **Tabel 3**. Rasio tulangan longitudinal berkisar antara 1.0% - 3.3%, sedangkan rasio gaya aksial, $P_u/(A_g f'_c)$ berkisar antara 0.26 – 0.59. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa *drift ratio* maksimum untuk semua kasus kurang dari 1.5%. Karena konfigurasi tulangan dan luas tulangan sengkang sudah ditentukan sama untuk semua kasus, maka cukup dibandingkan spasi vertikal yang dihasilkan dari Persamaan (1), (2), dan (3) dan disajikan pada tiga baris terakhir pada **Tabel 2**. Untuk desain, spasi vertikal tulangan sengkang diambil yang terkecil di antara tiga persamaan tersebut dan diplot pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Spasi vertikal tulangan pengekang untuk empat studi kasus



Gambar 8. Kenaikan kebutuhan tulangan sengkang

Secara umum, dari hasil analisis (**Tabel 2** dan **Gambar 7**) dapat disimpulkan bahwa apabila rasio gaya aksial, $P_u/(A_g f'_c)$ lebih besar daripada 0.3, maka persamaan (3) akan menentukan (**Gambar 7a**, **7b**, dan **7c**). Studi ini menunjukkan bahwa implikasi dari rumus tulangan pengekang dari ACI 318-14 (persamaan 3) akan menaikkan kebutuhan tulangan pengekang antara 18%-50% (**Gambar 8**). Kenaikan kebutuhan tulangan pengekang ini berbanding lurus dengan rasio gaya aksial, $P_u/(A_g f'_c)$. Pada Kasus 1, dimana rasio gaya aksial di atas 0.5, kenaikan kebutuhan tulangan sengkang mencapai 50% (**Gambar 7a**). Sedangkan untuk Kasus 2 dan Kasus 3, dimana rasio gaya aksial sekitar 0.4, maka kenaikan kebutuhan tulangan sengkang adalah sekitar 25%. Namun, apabila rasio gaya aksial kurang dari 0.3 seperti dalam Kasus 4, maka dapat dianggap dimensi kolom agak terlalu besar sehingga persamaan (2) akan menentukan (**Gambar 7d**).

Kenaikan kebutuhan tulangan pengekang yang signifikan tersebut harus menjadi perhatian engineer dalam mendesain kolom terutama dalam hal *detailing*. Spasi vertikal antar tulangan pengekang, s sebesar 100 mm merupakan nilai minimum yang biasa dipakai dalam konstruksi kolom gedung tingkat tinggi di Indonesia. Apabila nilai s yang dipakai kurang dari 100 mm seperti yang terlihat dalam **Tabel 2**, maka akan timbul masalah konstruksi di mana jarak vertikal antar tulangan pengekang terlalu rapat. Di sisi lain, apabila spasi vertikal antar

tulangan pengekang dipertahankan sebesar 100 mm, maka luas tulangan pengekang, A_{sh} akan bertambah secara signifikan sehingga mengakibatkan jarak horizontal antar tulangan pengekang, h_x menjadi terlalu rapat. Hal tersebut menyebabkan padatnya tulangan (*steel congestion*)

Tulangan yang terlalu padat dapat menyebabkan terjadinya keropos beton (*honeycomb*) pada saat pengcoran, terutama di daerah penyambungan tulangan (*lap splice*). Salah satu cara yang dapat digunakan untuk menghindari masalah tersebut adalah dengan menggunakan tulangan pengekang dengan kuat leleh, f_yt yang lebih tinggi. Nilai maksimum f_yt yang diijinkan dalam SNI 2847:2013 atau ACI 318 sebesar 700 MPa. Spasi yang lebih renggang dapat dilihat dalam Kasus 2 dan Kasus 4 dimana digunakan material mutu tinggi. Selain itu, *engineer* juga dapat menyesuaikan dimensi kolom agar nilai rasio gaya aksial, $P_u/(A_g f'_c)$ lebih kecil daripada 0.3 atau menggunakan sambungan mekanis (*mechanical coupler*) di daerah *lap splice*.

5. KESIMPULAN.

Makalah ini menunjukkan pentingnya perubahan yang dilakukan dalam ACI 318-14 mengenai persyaratan tulangan pengekang. Penambahan persamaan (3) ke dalam peraturan ACI 318-14 semakin membuat desain kolom semakin aman karena telah memperhitungkan besarnya gaya aksial dan konfigurasi tulangan. Namun, perubahan ini juga menyebabkan timbulnya permasalahan konstruksi karena kebutuhan tulangan pengekang yang meningkat secara signifikan, terutama pada kolom dengan rasio gaya aksial $P_u/(A_g f'_c)$ lebih besar daripada 0.3. Peningkatan kebutuhan tulangan pengekang ini akan semakin signifikan seiring dengan bertambahnya rasio gaya aksial $P_u/(A_g f'_c)$.

Permasalahan tersebut dapat dihindari dengan menggunakan material mutu tinggi seperti yang ditunjukkan dalam studi parametrik (Kasus 2 dan Kasus 4), terutama tulangan pengekang mutu tinggi. Selain itu, penggunaan *mechanical coupler* juga dapat menjadi pertimbangan *engineer* dalam desain untuk menghindari tulangan yang terlalu padat pada daerah *splicing*.

6. REFERENSI

- Elwood, K.J.; Maffei, J.M.; Riederer, K.A.; and Telleen, K., "Improving Column Confinement—Part 1: Assessment of Design Provisions," Nov. 2009.
- Elwood, K.J.; Maffei, J.M.; Riederer, K.A.; and Telleen, K., "Proposed New Provisions for the ACI 318 Building Code," Nov. 2009.
- ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008.
- ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011.
- ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014.
- Standards Association of New Zealand, "Concrete Design Standard, NZS 3101:2006, Part 1" and "Commentary on the Concrete Design Standard, NZS 3101:2006, Part 2," Wellington, New Zealand, 2006.
- Canadian Standards Association, "Design of Concrete Structures," CSA A23.3-04, Mississauga, ON, Canada, 2004.
- Berry, M.; Parrish, M.; and Eberhard, M., "PEER Structural Performance Database User's Manual (Version 1.0)," 2004, <http://maximus.ce.washington.edu/~peera1/>.
- SNI 03-2847, "Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847:2013)," Badan Standarisasi Nasional, Indonesia, 2013.
- SNI 03-1727, "Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 03-1727:2012)," Badan Standarisasi Nasional, Indonesia, 2012.
- SNI 03-1726, "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 03-1726:2012)," Badan Standarisasi Nasional, Indonesia, 2012.

Tabel 2. Hasil analisis dan detailing dari 4 studi kasus gedung fiksional

	Kasus 1			Kasus 2			Kasus 3			Kasus 4		
Properti material	$f_c' = 40 \text{ MPa}$; $f_{yt} = 400 \text{ MPa}$			$f_c' = 60 \text{ MPa}$; $f_{yt} = 700 \text{ MPa}$			$f_c' = 40 \text{ MPa}$; $f_{yt} = 400 \text{ MPa}$			$f_c' = 60 \text{ MPa}$; $f_{yt} = 700 \text{ MPa}$		
Jumlah lantai	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Ukuran kolom	K600	K700	K800	K600	K700	K800	K750	K850	K1000	K750	K850	K1000
Longitudinal	32D22	32D28	32D28	32D22	32D28	32D28	32D16	32D19	32D22	32D16	32D19	32D22
ρ_g (%)	3.1	3.3	3.0	3.1	3.3	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$P_u/(A_g f_c')$	0.53	0.58	0.59	0.36	0.39	0.40	0.35	0.40	0.39	0.23	0.27	0.26
Max. Drift Ratio X (%)	1.41	1.29	1.25	1.41	1.29	1.25	1.16	1.20	1.20	1.16	1.20	1.20
Max. Drift Ratio Y (%)	1.42	1.33	1.29	1.42	1.33	1.29	1.18	1.23	1.25	1.18	1.23	1.25
Spasi dari Pers. 1 (mm)	128.39	129.88	130.99	149.78	151.53	152.82	130.47	131.44	132.50	152.22	153.34	154.59
Spasi dari Pers. 2 (mm)	141.81	118.94	102.42	165.44	138.76	119.49	110.06	95.77	80.15	128.40	111.73	93.51
Spasi dari Pers. 3 (mm)	71.80	57.61	50.39	125.65	100.82	88.19	90.59	70.02	62.52	158.52	122.53	109.41

