

## STUDI PARAMETRIK PENGARUH KONFIGURASI TULANGAN LONGITUDINAL DAN TRANSVERSAL PADA EFEKTIFITAS PENGEKANGAN KOLOM PERSEGI BETON BERTULANG MENGGUNAKAN XTRACT

### *Parametric Study Influence of The Longitudinal and Transversal Configuration on Confinement Rectangular Reinforced Concrete Column Effectiveness Using XTRACT*

**Anang Kristianto, Yosafat Aji Pranata, Noek Sulandari**

Prodi Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha, Jalan Suria Sumantri 65, Bandung

Surel: anang.kristianto@eng.maranatha.edu

Diterima : 30 Juli 2020;

Disetujui : 27 Oktober 2020

#### **Abstrak**

*Detailing tulangan pengekok kolom balok persegi pada struktur kolom beton bertulang yang dibangun di daerah rawan gempa memerlukan perhatian khusus mengingat banyaknya kegagalan struktur yang terjadi di lapangan akibat kurangnya pemahaman yang benar mengenai konsep desainnya maupun kesalahan implementasinya di lapangan. Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Comentary (ACI 318-14) yang diikuti oleh SNI 2847-2019 melakukan perubahan signifikan pada perhitungan luas tulangan pengekok yang memasukkan unsur tulangan longitudinal khususnya pada kolom dengan beban aksial yang tinggi atau mutu beton diatas 70 MPa untuk sistem rangka pemikul momen khusus dalam rangka meningkatkan kemampuan daktilitasnya. Penelitian ini merupakan studi parametrik menggunakan data eksperimental yang tersedia. 22 kolom persegi beton bertulang dari mutu beton 29-88 MPa serta konfigurasi tulangan mulai dari konfigurasi tanpa pengikat silang (cross ties) hingga kolom dengan 3 kaki pengikat silang pada tiap sisinya. Data penelitian yang ada dievaluasi dan analisis untuk mendapatkan daktilitas lateral maupun kurvturnya. Hasil dari studi ini menekankan perlunya penggunaan pengikat silang yang mengekok secara lateral tulangan longitudinal, penggunaan pengikat silang memberikan peningkatan daktilitas yang signifikan, standar luas tulangan pengekok terbaru memberikan tingkat daktilitas yang lebih baik dari sebelumnya.*

**Kata Kunci:** Konfigurasi, tulangan pengekok, daktilitas, efektifitas kekangan, studi parametrik

#### **Abstrac**

*Confinement reinforcement detailing of a rectangular concrete column built on high-risk seismic area required special attention because of more structures failure due to the lack of design concept knowledge and wrong in implementation. ACI 318-14 followed by SNI 2847-2019 has made new requirements significantly especially in column with high axial loads or high concrete compressive strength for special moment-resisting frame to ductility improvement. This parametric study using experimental data from the available literature. 22 rectangular reinforced concrete columns with compressive strength range of 29 - 88 MPa and reinforcement configuration from hoop without cross ties until columns with 3 crossties on each side. These data were evaluated and analyzed to obtain latrerel ductility and curvature ductility. The result of this study is emphasizing importance of longitudinal bars laterally supported by cross ties, cross ties confined laterally longitudinal reinforcement improving level of ductility significantly. New requirement code giving more better ductility level than before.*

**Keywords:** Configuration, confinement reinforcement, ductility, effectiveness confinement, parametric study

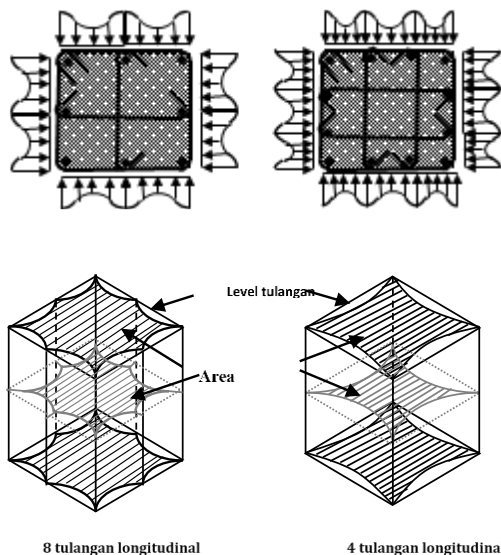
#### **PENDAHULUAN**

Struktur kolom merupakan salah satu elemen penting penahan beban lateral secara khusus beban gempa. Sebagai elemen Struktur Rangka Pemikul Momen kolom beton bertulang memerlukan pendetailan tulangan pengekok secara khusus untuk menjaga agar inti kolom beton dapat terkekang

dengan baik sehingga struktur berperilaku seperti yang diharapkan. Pada konsep kolom kuat balok lemah, struktur kolom didesain sedemikian rupa dengan asumsi bahwa pada saat terjadi beban gempa disipasi energi dapat terjadi pada balok melalui pembentukan sendi plastis. Kondisi ini memerlukan desain dan detailing tulangan pengekok pada kolom yang memenuhi persyaratan sehingga diharapkan

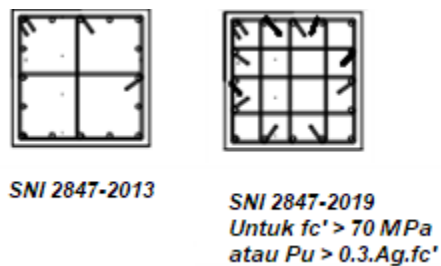
kolom memiliki daktilitas yang baik agar disipasi energi dengan pembentukan sendi plastis pada balok dapat terjadi lebih dahulu sebelum pada kolom. Beberapa penelitian telah memberikan rekomendasi berbagai parameter yang mempengaruhi efektifitas tulangan pengekuat dalam mengikat inti beton. Pengaruh yang signifikan dari distribusi tulangan longitudinal dan konfigurasi tulangan pengekuat dibuktikan oleh Sheikh dan Uzumeri (1980) berdasarkan hasil pengujian benda uji kolom dengan beban aksial konsentris. Dalam publikasinya Sheikh dan Uzumeri untuk pertama kali memperkenalkan konsep “area efektif inti terkekang” (*effectively confined core area*) sebagai parameter yang signifikan dalam memperhitungkan efektifitas suatu kekangan (Gambar 1). Penelitian pengembangan selanjutnya dilakukan oleh Sheikh dan Yeh (1986; 1992) dengan memasukkan pengaruh tulangan longitudinal dan eksentrisitas benda uji kolom yang dibebani dengan level beban aksial yang tinggi secara eksentris. Model teoritis yang lebih komprehensif berdasarkan konsep ini dikembangkan lebih lanjut oleh Mander et al. (1988) berdasarkan benda uji kolom persegi. Konsep “area efektif inti terkekang” selanjutnya banyak diadopsi menjadi salah satu parameter yang signifikan dalam mengembangkan model kekangan beton bertulang. Pendekatan efektifitas kekangan yang didasarkan atas data empiris hasil pengujian berbagai benda uji dilakukan oleh (Saatcioglu dan Razvi 1992; 2002).

Istilah “*equivalent uniform confinement pressure*” yang diusulkan oleh Saatcioglu dan Razvi menggunakan konsep *strength and deformability* yang dihasilkan oleh tekanan lateral tulangan pengekuat untuk memperhitungkan efektifitas yang dihasilkan oleh kekangan. Efektifitas kekangan dari tulangan pengekuat dipengaruhi oleh luas area efektif dari beton yang terkekang serta distribusi tegangan kekangan yang terjadi pada tulangan pengekuat, dimana hal ini dipengaruhi oleh distribusi tulangan longitudinal dan lateralnya (Sheikh dan Yeh 1990). Semakin banyak jumlah tulangan longitudinal yang dikekang oleh sengkang, area efektif daerah beton yang terkekang akan meningkat. Sakai et al. (1990) melaporkan bahwa kolom dengan rasio luas tulangan longitudinal yang lebih besar meningkatkan daktilitas kolom, meskipun begitu dilaporkan juga bahwa untuk rasio 1,4% hingga 3,6% tidak menunjukkan efek yang signifikan terhadap perilaku tegangan dan regangan kolom Bjerkeli et al. (1990). ACI 318M-14 yang juga diadopsi oleh SNI 2847-2019 telah mengadakan perubahan secara signifikan dalam menentukan efektifitas kekangan yang ditunjukkan dalam perhitungan rasio volumetrik tulangan kolom persegi untuk struktur pemikul momen khusus yang dipakai pada daerah dengan resiko gempa tinggi. ACI menambahkan faktor keefektifan pengekuat atau  $k_n$  yang merupakan fungsi dari jumlah tulangan longitudinal yang terikat lateral oleh pengikat silang yang ditekuk 135°.



**Gambar 1** Distribusi Tegangan Lateral yang Terbentuk pada Berbagai Konfigurasi Tulangan Pengekuat

Sumber: Mander et al-1988, Saatcioglu &Razvi-1992,



**Gambar 2** Perbedaan Detailing Tulangan Pengekuat Kolom Persegi SNI 2013 dan SNI 2019

Gambar 2 memperlihatkan perbedaan detailing yang disyaratkan dalam SNI terbaru pada kolom dengan beban aksial tinggi atau mutu beton diatas 70 MPa. Secara detail (SNI 2847-2019)memberikan syarat luas tulangan pengekuat sebagai berikut: Perubahan detailing untuk kondisi tertentu ini tentunya memerlukan perhatian khusus dalam implemenasinya. SNI 03-2847-2013 dan sebelumnya mensyaratkan kebutuhan tulangan pengekuat hanya untuk menjamin bahwa terkelupasnya selimut beton tidak menyebabkan berkurangnya kapasitas kolom dalam menahan gaya aksial, namun dalam peraturan terbaru perlu

memperhitungkan efektifitas kekangan dalam hal ini kemampuan daktilitas lateralnya apabila gaya aksial yang bekerja cukup tinggi atau mutu beton diatas 70 Mpa (SNI 03-2847-2013). Hal ini dilakukan karena dari beberapa data hasil eksperimen membuktikan bahwa gaya aksial atau mutu beton yang tinggi menurunkan kemampuan daktilitas kolom (Taheri, Moghadam, dan Tasnimi 2017).

Pada studi parametrik ini akan dipaparkan kajian efektifitas konfigurasi tulangan longitudinal dan transversal dalam bentuk kemampuan daktilitasnya baik daktilitas lateral maupun daktilitas kurvatur. Kajian ini memberikan wawasan yang penting bagi akademisi dan praktisi dalam mengimplementasikan peraturan terbaru SNI 2847-2019 terkait bagian desain tulangan kolom pengekang untuk bangunan di daerah rawan gempa yang mengalami perubahan cukup signifikan.

**METODE**

Untuk keperluan studi parametrik pada makalah ini diambil beberapa data eksperimen yang mendukung terkait dengan konfigurasi tulangan longitudinal dan pengekang yang diambil dari beberapa referensi jurnal ilmiah. (Hammad dan Eissa 2010; Azizinamini et al. 1994; Bayrak dan Sheikh 1997; Mo dan Hwang 1999; Araki dan Kabayama 2004; Seong et al. 2011). Data yang diambil adalah kolom bujur sangkar dengan mutu beton dari 29-88 MPa, konfigurasi tulangan longitudinal dengan jumlah 4 hingga 24, pengikat silang dengan jumlah 1 hingga 3 untuk masing-masing sisi. Selanjutnya dengan data dari beberapa jurnal ilmiah tersebut dibuatkan pengelompokan dalam bentuk tabel berdasarkan jumlah tulangan longitudinal serta transversal yang digunakan agar memudahkan dalam menganalisisnya. Data hasil pengujian beberapa jurnal referensi ditunjukkan seperti dalam Tabel 1. Tabel 2 memperlihatkan lanjutan data penelitian terkait parameter lainnya. Keterangan parameter yang digunakan adalah sebagai berikut:  $f_c'$  = mutu beton, b dan h = dimensi kolom,  $f_{yl}$  = mutu tulangan longitudinal,  $f_{yt}$  = mutu tulangan transversal, s= spasi tulangan transversal,  $d_{bl}$ = diameter tulangan longitudinal,  $d_{bt}$ = diameter tulangan transversal, P= gaya aksial yang diberikan,  $\rho_l$ = rasio tulangan longitudinal,  $\rho_s$ = rasio volumetrik tulangan pengekang, P= gaya aksial yang diberikan,  $P_o$ = kapasitas aksial kolom (ACI 318M-14 2014 Eq.22.4.22). Selanjutnya berdasarkan data ini dilakukan analisis untuk mendapatkan indeks efektifitas kekangan pada masing-masing benda uji sesuai dengan rekomendasi Shin et al. (2015). Data dari berbagai hasil penelitian ini juga dihitung besarnya rasio volumetriknya yang merupakan luas

tulangan pengekang pada kolom. Rasio volumetrik data benda uji kemudian dibandingkan perhitungan rasio volumetrik berdasarkan SNI 2013 dan berdasarkan standar terbaru yaitu SNI 2019. Secara detail SNI 2847-2019 memberikan syarat luas tulangan pengekang sebagai berikut:

Untuk :  $P_u \leq 0,3A_g f_c'$  dan  $f_c' \leq 70MPa$  , diambil nilai terbesar antara persamaan (1) dan (2)

Untuk :  $P_u > 0,3A_g f_c'$  atau  $f_c' > 70MPa$ , diambil nilai terbesar antara persamaan (1), (2) dan (3).

$$A_{sh} = 0,3sh_c \left[ \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right] \frac{f_c'}{f_{yh}} \dots\dots\dots(1)$$

$$A_{sh} = 0,09sh_c \frac{f_c'}{f_{yh}} \dots\dots\dots(2)$$

$$A_{sh} = 0,3k_f k_n \frac{P_u}{f_{yh} A_{ch}} \dots\dots\dots (3)$$

dimana :

$P_u$  = gaya aksial terfaktor

$k_f$  = faktor kekuatan beton =  $\frac{f_c'}{175} + 0.6 \geq 1,0$

$k_n$  = faktor keefektifan pengekang =  $\frac{n_l}{n_l - 2}$

$n_l$  = jumlah tulangan longitudinal disekeliling inti kolom yang terkekang lateral (sudut/kait 135°)

Perbandingan luas tulangan pengekang ini dilakukan untuk menganalisis sejauh mana kebutuhan luas tulangan pengekang sudah dipenuhi dalam setiap benda uji dari berbagai penelitian ini pada standar yang lama dan standar yang baru (2019)

Selain menggunakan data hasil eksperimen juga dilakukan analisis dengan menggunakan software XTRACT, penggunaan software ini diperlukan untuk menganalisis kapasitas tegangan dan regangan aksial serta momen kurvatur yang diperlukan untuk memvalidasi efektifitas kekangan yang terjadi pada hasil eksperimen diatas dan juga memberikan gambaran pengaruh konfigurasi tulangan longitudinal dan pengekang yang berbeda.


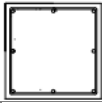
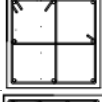
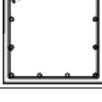
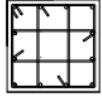
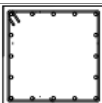


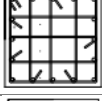
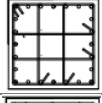
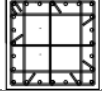
**Diskretisasi Penampang**

Untuk keperluan analisis daktilitas dengan *software* maka seluruh tipe konfigurasi dan material sesuai dengan data hasil eksperimen dibuat model penampangnya. Model penampang dibagi menjadi bagian kecil persegi (*mesh*). Ukuran mesh dibuat otomatis sesuai algoritma program yang digunakan. Ukuran mesh yang lebih rapat akan memberikan hasil yang lebih akurat di dalam memberikan model perilaku material tetapi akan terjadi peningkatan waktu komputasi. Gambar 3 memperlihatkan contoh diskritisasi mesh dari salah satu tipe konfigurasi tulangan.

Pemodelan hubungan tegangan regangan pada penampang beton bertulang terdiri dari tiga model material yaitu material baja tulangan, material beton terkekang dan beton tidak terkekang. Hubungan tegangan regangan material beton terkekang dan tidak terkekang menggunakan model Mander et al (1988). Hubungan tegangan regangan beton terkekang tergantung dari beberapa input parameter yang dimasukkan seperti jarak spasi tulangan trasnversal, rasio tulangan transversal arah x

maupun y, jumlah tulangan longitudinal dan luas inti penampang beton. Hubungan tegangan regangan material baja tulangan untuk mutu baja hingga 500 MPa menggunakan template yang disediakan oleh software dengan tipe *bilinear with strain hardening*, sementara untuk baja tulangan dengan mutu yang lebih tinggi langsung diinputkan hubungan tegangan regangannya berdasarkan data hasil eksperimen pada jurnal. Hasil dari analisis adalah hubungan momen kurvatur yang menunjukkan kapasitas

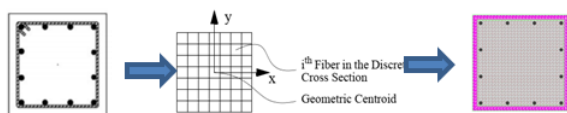
**Tabel 1** Data Penelitian dari Literatur

<i>Type</i>	<i>Sumber</i>	<i>fc' (MPa)</i>	<i>b(mm)</i>	<i>h(mm)</i>	<i>P/Po</i>	<i>konfigurasi</i>
<b>L4-T0</b>	Hammad(2010)	51.3	200	200	0.25	
<b>L4-T0</b>	Hammad(2010)	73	200	200	0.25	
<b>L4-T0</b>	Hammad(2010)	76.4	200	200	0.25	
<b>L4-T0</b>	Hammad(2010)	77	200	200	0.25	
<b>L8-T0</b>	Azizinamini et al(1994)	53.8	305	305	0.16	
<b>L8-T0</b>	Bayrak & Sheikh (2004)	72.1	305	305	0.50	
<b>L8-T1</b>	Azizinamini et al(1994)	50.9	305	305	0.16	
<b>L12-T0</b>	Mo & Wang (2000)	29.4	400	400	0.08	
<b>L12-T2</b>	Sugano et al (1990)	66.7	250	250	0.32	
<b>L12-T2</b>	Sugano et al (1990)	84.5	250	250	0.30	
<b>L12-T2</b>	Sugano et al (1990)	66.7	250	250	0.58	
<b>L12-T2</b>	Sugano et al (1990)	66.7	250	250	0.58	
<b>L12-T2</b>	Sugano et al (1990)	84.5	250	250	0.54	
<b>L16-T0</b>	Araki & Kabayama (2004)	27	800	800	0.10	
<b>L16-T1</b>	Seong et al (2011)	57.5	450	450	0.11	
<b>L16-T1</b>	Qu et al (2013)	92.5	600	600	0.09	
<b>L16-T1</b>	Seong et al (2011)	57.5	450	450	0.10	
<b>L16-T2</b>	Araki & Kabayama (2004)	43.6	800	800	0.18	
<b>L16-T3a</b>	Hwang et al (2013)	83.4	600	600	0.55	
<b>L16-T3b</b>	Hwang et al (2013)	88.5	600	600	0.45	
<b>L24-T2</b>	Seong et al (2011)	41.4	450	450	0.11	
<b>L24-T3</b>	Seong et al (2011)	41.4	450	450	0.10	

**Tabel 2** Data Penelitian dari Literatur

Tipe	$f_{yl}$ (Mpa)	$f_{yt}$ (Mpa)	$s$ (mm)	$d_{bl}$ (mm)	$d_{bs}$ (mm)	$P$ (N)	$\rho_l$	$\rho_s$
L4-T0	400	298	40	16	8	507,707	2.01%	2.13%
L4-T0	400	274	40	16	10	688,449	2.01%	3.34%
L4-T0	400	274	40	16	10	716,768	2.01%	3.34%
L4-T0	400	274	40	16	10	721,765	2.01%	3.34%
L8-T0	473.34	454	67	19.05	12.7	850034	2.44%	2.73%
L8-T0	454	463	95	19.5	16	3,321,785	2.58%	3.15%
L8-T1	473.34	495.4	41	19.05	9.53	804,204	2.44%	3.82%
L12-T0	534.5	510.6	50	19	6.35	450,000	2.12%	0.79%
L12-T2	404	833	45	12.6	8	1,292,313	2.40%	2.00%
L12-T2	404	833	35	12.6	8	1,478,750	2.40%	2.57%
L12-T2	404	315	50	12.6	8	2,376,188	2.40%	2.60%
L12-T2	404	833	40	12.6	8	2,376,188	2.40%	2.25%
L12-T2	404	833	35	12.6	8	2,693,438	2.40%	2.57%
L16-T0	378	358	100	25	16	1,730,000	1.26%	1.00%
L16-T1	608	500	50	12.7	9.53	1,164,375	1.00%	2.38%
L16-T1	735	862	450	32	13	3,330,000	3.57%	0.24%
L16-T1	608	500	50	13	10	838,350	1.0%	2.38%
L16-T2	364	1475	150	25	10.7	4,610,000	1.26%	0.30%
L16-T3	744	817.3	140	25	13	17,119,000	2.25%	0.87%
L16-T3	735	820	100	25	16	14,515,000	2.25%	1.91%
L24-T2	453	486	50	13	10	838,350	1.50%	3.16%
L24-T3	353	343	50	13	10	838,350	1.50%	3.96%

momen setiap penampang dan divalidasi dari hasil penelitian.



**Gambar 3** Model Kolom pada XTRACT Setelah Dilakukan Meshing

Sumber: (Chadwell dan Imbsen 2004)

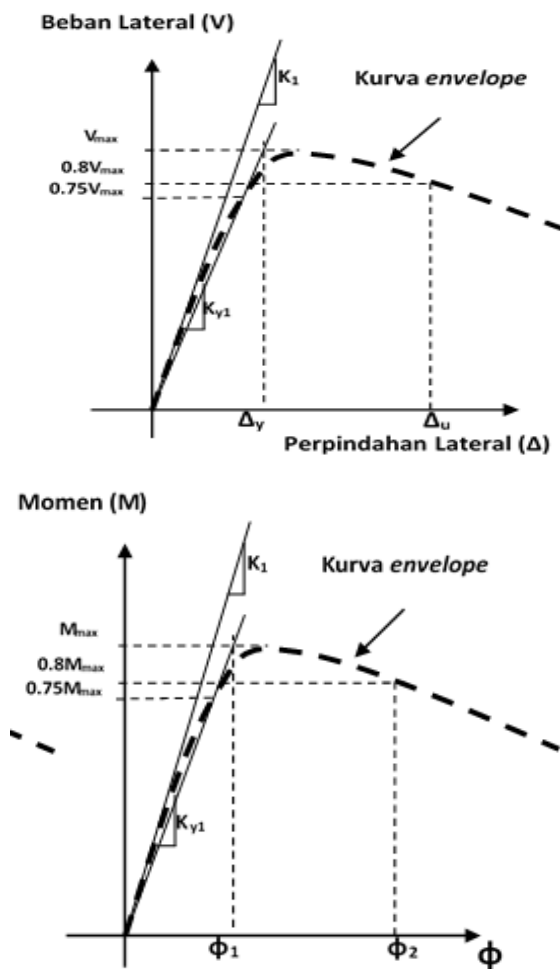
Dimana  $\rho_{cc}$  = rasio luas penampang tulangan longitudinal dan luas inti beton  $w_i$  = jarak bersih antara tulangan longitudinal yang dikekang oleh tulangan pengikat silang atau sudut,  $b_c$  dan  $d_c$  adalah dimensi penampang inti kolom yang diukur dari sumbu tulangan pengekang,  $s'$  = jarak bersih tulangan transversal. Penelitian lanjut memperlihatkan tidak hanya rasio  $\rho_s.f_{yt}/f_c'$  tetapi juga koefisien  $K_e$  merupakan faktor penting untuk mencapai daktilitas yang diinginkan dengan memperhatikan efektifitas kekangan tulangan transversal dan seberapa baik distribusi tulangan longitudinalnya mengelilingi inti beton (Shin et al. 2015).

**Efektifitas dan Daktilitas Kekangan**

Koefisien efektifitas geometrik kekangan dihitung berdasarkan persamaan seperti yang diusulkan oleh Mander et al. (1988) sebagai berikut :

$$K_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i)^2}{6b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{(1 - \rho_{cc})} \dots\dots\dots (4)$$

Oleh karena perilaku beton bertulang yang tidak linear maka pada umumnya untuk mendefinisikan parameter daktilitas beberapa peneliti (Brachmann, Browning, dan Matamoros 2004; Bayrak dan Sheikh 1997) secara praktis menggunakan diagram seperti pada Gambar 4. Titik perpindahan saat leleh ( $\Delta y$ ) merupakan titik absis perpotongan garis yang ditarik dari perpotongan titik 75% nilai  $V_{max}$  pada daerah



**Gambar 4** Kurva Definisi Daktilitas  
 Sumber: (Brachmann et al. 2004)

elastis dengan garis horisontal yang merupakan nilai maksimum gaya lateral. Titik perpindahan ultimate ( $\Delta_u$ ) didefinisikan sebagai nilai perpindahan setelah puncak yang dapat dicapai pada saat beban lateral mengalami penurunan sebesar 20% dari nilai puncaknya. Sehingga sesuai dengan kurva pada Gambar 3 didapatkan daktilitas perpindahan dan kurvatur :

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad \mu_{\phi} = \frac{\phi_2}{\phi_1} \dots\dots\dots (5)$$

Berdasarkan daktilitas perpindahan Ghee, Priestley, dan Paulay (1989) membagi jenis kolom menjadi 3 bagian yaitu:

- Sangat daktil :  $\mu_{\Delta} > 6$
- Moderate daktil :  $4 < \mu_{\Delta} \leq 6$
- Terbatas :  $2 < \mu_{\Delta} \leq 4$

Sementara itu (Sheikh dan Khoury 1997) berdasarkan daktilitas kurvatur membagi jenis kolom menjadi 3 bagian, yaitu :

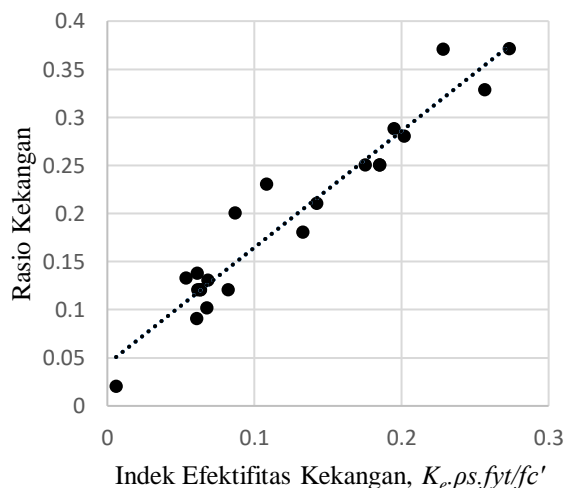
- Sangat daktil :  $\mu_{\phi} > 16$
- Moderate daktil :  $8 \leq \mu_{\phi} \leq 16$
- Rendah :  $8 < \mu_{\phi}$

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Indek Efektifitas Kekangan**

Hasil analisis studi parametrik dengan menggunakan data-data eksperimen yang tersedia dan dengan menggunakan software XTRACT untuk menghitung besarnya daktilitas kurvatur dapat dilihat pada Tabel 3. Untuk mendapatkan pengaruh tulangan pengekang terhadap daktilitas kolom maka diperkenalkan istilah rasio kekangan  $\rho_s.fyt/fc'$ . Bila rasio ini kalikan dengan koefisien efektifitas geometri kekangan,  $K_e$  maka didapatkan Indeks Efektifitas Kekangan ( $K_e.\rho_s.fyt/fc'$ ).

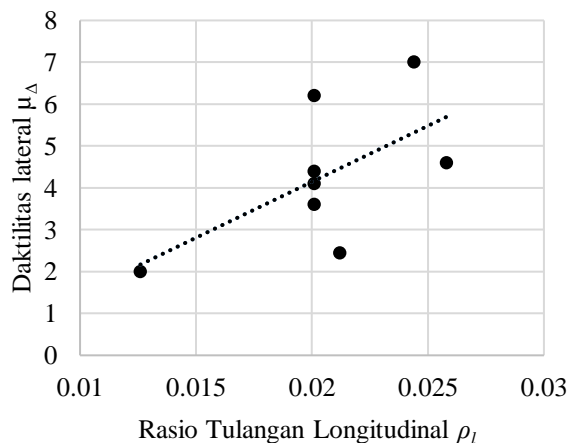
Gambar 5 memperlihatkan pengaruh indeks efektifitas kekangan terhadap kemampuan daktilitas kolom pada seluruh benda uji. Semakin tinggi Indeks Efektifitas Kekangan memberikan efek dalam peningkatan daktilitas lateralnya. Indeks efektifitas kekangan memperlihatkan bahwa daktilitas berbanding lurus dengan mutu baja tulangannya dan berbanding terbalik dengan mutu betonnya dan sebanding dengan koefisien efektifitas geometri kekangan. Hal ini yang menjadi dasar penggunaan persamaan rasio volumetrik dalam peraturan beton dalam SNI 2847-2019.



**Gambar 5** Korelasi Indeks Efektif Kekangan terhadap Kemampuan Daktilitas Lateral Kolom

**Tabel 3** Daktilitas pada Berbagai Konfigurasi Tulangan Longitudinal dan Transversal

<i>Tipe</i>	$\rho_s.fyt/fc'$	$K_e$	$\Delta y$ (mm)	$\Delta u$ (mm)	$\mu_\Delta$	<i>Drift</i>	$\mu_\phi$	$A_{sh}/s.hc$	<i>Rasio</i> <i>SNI 2013</i>	<i>Rasio</i> <i>SNI 2019</i>
L4-T0	0.12	0.511	5.00	31.00	6.20	0.04	20.42	0.014	0.93	0.93
L4-T0	0.13	0.526	5.50	19.70	3.60	0.03	19.45	0.022	0.93	0.70
L4-T0	0.12	0.526	5.20	21.50	4.10	0.03	15.68	0.014	0.93	0.70
L4-T0	0.12	0.526	5.50	24.00	4.40	0.03	12.60	0.014	0.93	0.70
L8-T0	0.23	0.470	5.40	37.60	7.00	0.04	>16	0.015	1.36	1.36
L8-T0	0.20	0.435	4.60	21.20	4.60	0.01	>16	0.016	1.14	0.41
L8-T1	0.37	0.617	6.20	49.20	8.00	0.05	10.12	0.02	2.22	2.22
L12-T0	0.14	0.446	21.60	52.70	2.44	0.03	17.78	0.004	0.80	0.80
L12-T2	0.25	0.702	3.00	20.00	6.70	0.04	>16	0.022	2.44	2.44
L12-T2	0.25	0.740	3.00	19.00	6.30	0.04	>16	0.028	2.55	2.55
L12-T2	0.12	0.684	2.00	5.00	2.50	0.01	11.00	0.019	0.83	0.49
L12-T2	0.28	0.721	2.00	7.00	3.50	0.01	>16	0.024	2.67	1.60
L12-T2	0.25	0.740	2.00	10.00	5.00	0.02	>16	0.028	2.55	1.56
L16-T0	0.13	0.402	48.00	96.00	2.00	0.04	8.20	0.005	0.71	0.71
L16-T1	0.21	0.678	36.70	207.90	5.70	0.06	24.80	0.01	1.00	1.00
L16-T1	0.02	0.295	7.00	14.60	2.10	0.01	17.16	0.002	0.20	0.20
L16-T1	0.28	0.678	40.8	227.8	5.58	0.06	25.26	0.012	1.71	1.71
L16-T2	0.10	0.667	58.00	395.50	6.82	0.07	4.39	0.003	1.00	1.00
L16-T3a	0.09	0.675	5.80	18.00	3.10	0.01	>16	0.009	0.90	0.47
L16-T3b	0.18	0.738	12.40	50.40	4.10	0.03	>16	0.02	2.00	1.25
L24-T2	0.37	0.737	42.60	244.70	5.74	0.07	15.26	0.016	2.00	2.00
L24-T3	0.33	0.782	33.40	258.10	7.73	0.07	>16	0.021	1.91	1.91



**Gambar 6** Korelasi Rasio Tulangan Longitudinal dengan Daktilitas Lateral

**Konfigurasi Tulangan Longitudinal dan Transversal (Pengikat Silang)**

Gambar 6 memperlihatkan kecenderungan pengaruh tulangan longitudinal terhadap efektifitas kekangan

yang ditunjukkan dalam kemampuan daktilitasnya yang semakin meningkat. Pada peraturan SNI 2847-2013 persamaan kebutuhan minimum tulangan pengekang belum memasukkan faktor jumlah tulangan longitudinal yang terikat pada penahan lateral sudut atau pengikat silang (*cross ties*) yang ditekuk 1350, namun pada SNI 2847-2019 yang telah mengikuti perkembangan terbaru dari ACI 318M-14 telah memasukkan faktor tulangan longitudinal sebagai parameter yang mempengaruhi kebutuhan tulangan pengekang.

Penggunaan tulangan longitudinal yang semakin bertambah dan merata pada seluruh sisi memberikan peningkatan daktilitas lateral. Penggunaan tulangan longitudinal saja tanpa diikat dengan menggunakan pengikat silang tidak cukup meningkatkan daktilitas, hal ini dapat dilihat pada Pada persamaan 4 koefisien efektifitas geometrik  $K_e$  dapat diuraikan menjadi dua bagian yaitu pengaruh efektifitas kekangan arah horisontal ( $K_h$ ) dan pengaruh efektifitas kekangan arah vertikal ( $K_v$ ), sehingga  $K_e=K_h, K_v \geq 1$ . Dimana koefisien kekekangan arah horisontal :

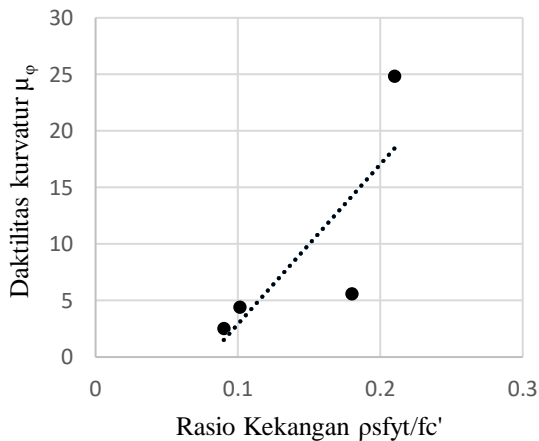


$$K_h = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i)^2}{6b_c d_c} \dots\dots\dots (6)$$

Paultre dan Légeron (2008) menyederhanakan :

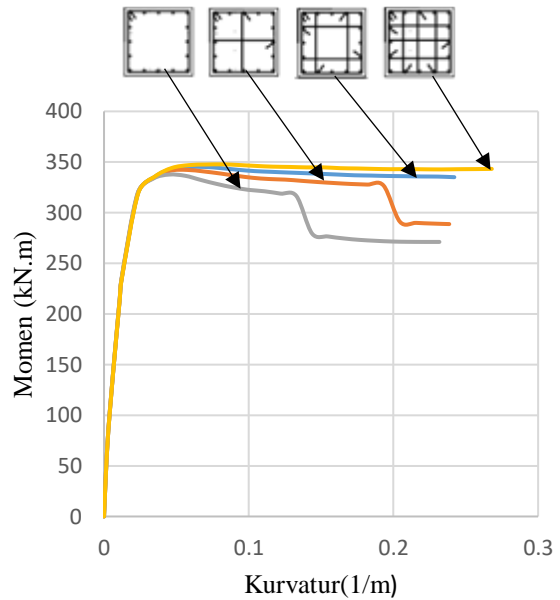
$$K_h = 1 - \frac{2}{n_l} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana  $n_l$  adalah jumlah tulangan longitudinal yang diikat oleh tulangan pengekuat sudut atau kait 135°. Sesuai dengan Tabel 3 dan persamaan (6) dan (7) diatas bahwa semakin banyak tulangan longitudinal yang terkekang pengikat silang maka semakin efektif penampang mengekuat inti beton. Gambar 7 memperlihatkan signifikansi peningkatan daktilitas lateralnya pada kolom yang diberi penambahan tulangan pengikat silang (benda uji L16-T1, L16-T2, L16-T3a dan L16-T3b). Pada Gambar 8 terlihat hasil analisis Momen-Kurvatur benda uji L16-T0, L16-T1, L16-T2 dan L16-T3 dengan menggunakan XTRACT untuk penampang dengan dimensi dan jumlah tulangan longitudinal yang sama namun memiliki perbedaan dalam jumlah pengikat silang yang menjadi penahan lateral tulangan longitudinalnya.



**Gambar 7** Pengaruh Penambahan Penggunaan *Crossties* pada Tulangan Pengekuat (L16-T1 Sampai T3) terhadap Daktilitas Kurvatur

Pada peraturan baru pengaruh jumlah tulangan longitudinal yang terkekang pada penahan lateral dimasukkan dalam variabel  $k_n$ , yang merupakan fungsi dari jumlah tulangan longitudinal yang terikat oleh hoop atau pengikat silang dengan sudut 135° pada kedua ujungnya. Penelitian dari Welt et al. (2017) memberikan bukti yang menguatkan bahwa pengikat silang dengan sudut 135° pada kedua ujungnya memberikan perilaku yang lebih baik daripada pengikat silang dengan ujung 90° dan 135° pada ujung lainnya.



**Gambar 8** Hubungan Momen-Kurvatur pada Peningkatan Jumlah Tulangan Pengikat

**Pengaruh Beban Aksial**

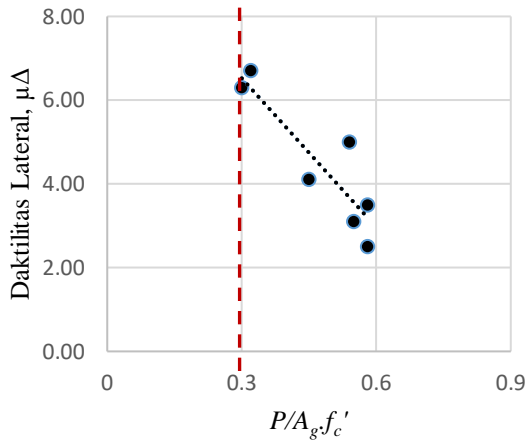
Pada SNI 2013 luas tulangan pengekuat tidak tergantung dari beban aksial yang bekerja pada kolom, karena prinsipnya hanya menggantikan luas penampang yang berkurang akibat terkelupasnya selimut beton. Namun data penelitian pada semua benda uji dengan beban aksial  $\geq 0.3P_0$  (L12-T2 dan L16-T3) yang diperlihatkan pada Gambar 9 memberikan korelasi pengaruh beban aksial pada beban diatas  $0.3A_g f_c'$  terhadap penurunan daktilitas lateral secara drastis. Sesuai dengan konsep Indeks efektifitas kekangan kondisi ini dapat diantisipasi dengan menambah luas tulangan pengekuat serta penggunaan pengikat silang yang terkait pada setiap tulangan longitudinal. Sebagai konsekuensinya kebutuhan luas tulangan pengekuat tidak lagi sebagai konstanta tetapi bertambah banyak dengan semakin besarnya beban aksial yang bekerja. Penelitian terakhir Rodrigues et al. (2016) mengenai efek beban aksial terhadap daktilitas kolom yang diberi beban lateral biaksial siklik memberikan data terjadinya penurunan sekitar 20% hingga 50%.

**Perbandingan dengan SNI 2847-2013**

Edisi terbaru ACI 318M-14 dan juga SNI 2847-2019, memasukkan pengaruh gaya aksial, pengaruh beton mutu tinggi, dan jumlah tulangan longitudinal yang terikat pada kait 135° ke dalam rumus penentuan rasio tulangan pengekuat seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (3). Untuk memperlihatkan pengaruh perubahan standar peraturan pada hasil eksperimen yang dianalisis dalam studi ini maka dibuat nilai rasio tulangan pengekuat ( $A_{sh}/s.h_c$ ) yang



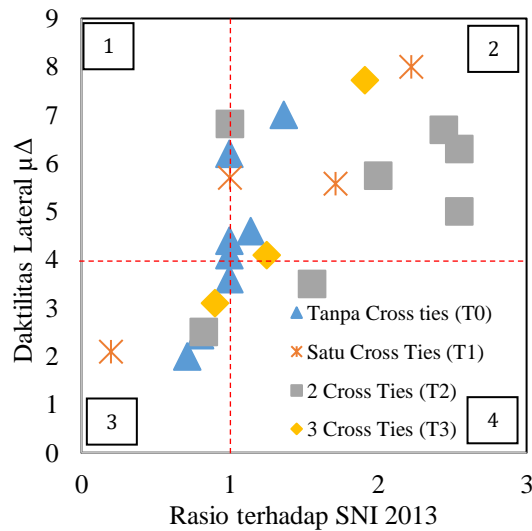
ada, serta perbandingannya dengan nilai rasio dari standar SNI 2013 dan SNI 2019. Nilai rasio kurang dari 1 menunjukkan bahwa kebutuhan tulangan pengekok dibawah nilai minimum standar yang berlaku baik untuk SNI 2013 maupun SNI terbaru (SNI 2019).



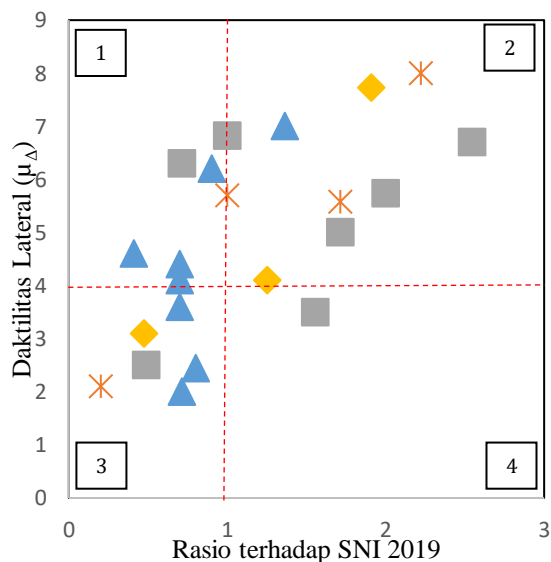
**Gambar 9** Pengaruh Beban Aksial pada Daktilitas Lateral Kolom

Tabel 3 memperlihatkan hasil dari perhitungan rasio tersebut. Secara umum terlihat bahwa konfigurasi penampang tanpa pengikat silang (*cross ties*) dan hanya mengandalkan tulangan longitudinal sulit untuk memenuhi standar tulangan pengekok sesuai peraturan. Konfigurasi jenis ini sebagian menghasilkan daktilitas lateral diatas 4, namun kapasitas drift yang dihasilkan disekitar 3% bahkan pada benda uji dengan  $P/Po=0.5$  (L8-T0) menghasilkan drift 1%. Tabel 3 juga menunjukkan bahwa secara umum penggunaan *cross ties* dengan rasio yang memenuhi standar memiliki kemampuan daktilitas lateral lebih tinggi dari 4,0. Kolom dengan rasio tulangan pengekok dibawah persyaratan (L12-T2, L16-T1, L16-T3) menghasilkan daktilitas yang rendah. Pemberian gaya aksial yang besar memberikan kemampuan daktilitas kurvatur yang rendah (L16-T3). Hasil penelitian ini menegaskan kembali bahwa gaya aksial yang bekerja pada kolom memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan daktilitas kolom tersebut. Pada peraturan SNI 2019 pengaruh besarnya gaya aksial tersebut diperhitungkan apabila  $P_u > 0,3A_g f_c'$  atau  $f_c' > 70MPa$ . Pada tabel tersebut terlihat juga bahwa SNI terbaru akan memberikan kebutuhan tulangan pengekok yang lebih banyak sehingga kolom memiliki daktilitas yang mencukupi untuk menahan kebutuhan deformasi yang disyaratkan. Untuk melihat pengaruh penggunaan peraturan baru terhadap berbagai konfigurasi yang dianalisis dalam studi ini dibuat suatu grafik seperti terlihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.

Pada Gambar 10 terdapat 4 kuadran yang memperlihatkan pemenuhan rasio tulangan pengekok kolom terhadap standar dengan daktilitas lateral yang dicapai dari hasil penelitian. Kuadran 1 adalah data eksperimen yang memenuhi nilai minimum rasio tulangan pengekok dan memiliki daktilitas lateral minimum 4. Kuadran 2 adalah hasil eksperimen yang tidak memenuhi syarat minimum tetapi memiliki daktilitas diatas 4. Kuadran 3 adalah hasil eksperimen yang rasio tulangan pengekoknya dibawah nilai minimum standar dan memiliki tingkat daktilitas dibawah 4. Sementara kuadran 4 adalah hasil eksperimen yang memenuhi standar minimum tetapi menghasilkan daktilitas yang kurang dari 4.



**Gambar 10** Rasio Tulangan Benda Uji terhadap Nilai minimum SNI 2013



**Gambar 11** Rasio Tulangan Benda Uji terhadap Nilai Minimum SNI 2847- 2010

Secara umum pada Gambar 10 seluruh kolom dari data eksperimen sudah berada di kuadran 1 dan 3, yaitu kuadran yang sesuai dengan kondisi yang dimaksud dalam standar. Pemberlakuan luas tulangan pengekang menggunakan peraturan baru diperlihatkan pada Gambar 11.

Penggunaan standar baru mengindikasikan tidak terpenuhinya syarat minimum jumlah tulangan pengekang terutama pada kolom dengan tulangan longitudinal yang banyak namun tanpa tulangan pengikat lateral. Sekalipun dari sisi daktilitas masih memenuhi persyaratan tetapi dari sisi peraturan tidak memenuhi syarat. Hal ini memperlihatkan juga bahwa standar yang baru memiliki standar daktilitas yang lebih tinggi dari 4 terutama untuk kolom dengan beban aksial yang besar atau kolom dengan mutu beton yang tinggi.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis penampang serta validasi dari hasil eksperimen maka didapatkan konfigurasi tulangan pengekang kolom dengan tulangan longitudinal tanpa *cross ties* memberikan kemampuan daktilitas lateral dan kurvatur yang rendah.

Pemberian pengikat silang (*cross ties*) menambah kemampuan daktilitas kolom, baik lateral maupun kurvatur.

Penggunaan pengikat silang harus disertai dengan penambahan tulangan longitudinal atau tulangan longitudinal harus diberi pengikat silang (*cross ties*) agar efektif memberikan kekangan inti beton terutama dalam arah vertikal.

Perubahan standar luas tulangan pengekang pada SNI 2847-2019 memberikan tingkat keamanan yang lebih terutama kepada kolom dengan beban aksial lebih dari  $0.3 Ag,fc'$ , atau kolom dengan mutu beton  $> 70$  MPa, hal ini dapat dilihat dari hasil studi parametrik untuk kolom dengan beban aksial tinggi memiliki daktilitas lateral yang rendah.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan untuk Universitas Kristen Maranatha dengan pemberian fasilitas laboratorium serta dana penelitian T.A. 2019 sehingga proses penelitian berlangsung dengan baik. Terima kasih juga kepada Ryan P dan Ackerlay S, mahasiswa yang membantu penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Concrete Institute. 2014. "ACI 318M-14 Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary." Detroit.
- Araki, Hideo, dan Kenji Kabayama. 2004. "Seismic Performance of Full Scale Reinforced Concrete Columns Containing Coal Ash." In *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004. Paper No. 15*, 1-14.
- Azizinamini, A, SSB Kuska, P Brungardth, dan E Hatfield. 1994. "Seismic Behavior of Square High-Strength Concrete Column." *Structural Journal ASCE* 91 (3): 336-45.
- Badan Standardisasi Nasional. 2013. "SNI 03-2847 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung."
- Badan Standardisasi Nasional. 2019. "SNI 03-2847 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung."
- Bayrak, Oguzhan, dan Shamim A Sheikh. 1997. "High-Strength Concrete Columns under Simulated Earthquake Loading." *Structural Journal ACI* 94 (6): 708-22.
- Bjerkeli, L., J. J. Jensen, dan A Tomaszewicz. 1990. "Deformation Properties and Ductility of High-Strength Concrete." In *Utilization of High Strength Concrete-Second International Symposium, ACI Publication*, 121:215-36. <https://doi.org/10.14359/2844>.
- Brachmann, Ingo, Jo Ann Browning, dan Adolfo Matamoros. 2004. "Drift-Dependent Confinement Requirements for Reinforced Concrete Columns Under Cyclic Loading." In *ACI Structural Journal*, 101:669-77. American Concrete Institute. <https://doi.org/10.14359/13389>.
- Chadwell, C. B., dan R. A. Imbsen. 2004. "XTRACT: A Tool for Axial Force - Ultimate Curvature Interactions." In *Proceedings of the 2004 Structures Congress - Building on the Past: Securing the Future*, 1723-31. [https://doi.org/10.1061/40700\(2004\)178](https://doi.org/10.1061/40700(2004)178).
- Ghee, Ang Beng, M J Nigel Priestley, dan T Paulay. 1989. "Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns." *Structural Journal ACI* 86 (1): 45-59.
- Hammad, Y H, dan M Eissa. 2010. "Experimental Performance of HSC Columns under Cyclic Loads." Ph. D. Dissertation, Benha University, Egypt.
- Mander, J. B., M. J. N. Priestley, dan R. Park. 1988. "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete." *Journal of Structural Engineering ASCE* 114 (8): 1804-26.

- [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804)).
- Mo, Y L, dan M L Hwang. 1999. "New Configuration of Lateral Steel for RC Column." *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 4 (3): 111–18.
- Paultre, P, dan F Légeron. 2008. "Confinement Reinforcement Design for Reinforced Concrete Columns." *Journal of sStructural Engineering ASCE* 134 (5): 738–49.
- Rodrigues, Hugo, André Furtado, dan António Arêde. 2016. "Behavior of Rectangular Reinforced-Concrete Columns under Biaxial Cyclic Loading and Variable Axial Loads." *Journal of Structural Engineering ASCE* 142 (1): 1–8. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001345](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001345).
- Saatcioglu, Murat, dan Salim R. Razvi. 1992. "Strength and Ductility of Confined Concrete." *Journal of Structural Engineering ASCE* 118 (6): 1590–1607. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1992\)118:6\(1590\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1992)118:6(1590)).
- . 2002. "Displacement-Based Design of Reinforced Concrete Columns for Confinement." *ACI Structural Journal* 99 (1): 3–11. <https://doi.org/10.14359/11030>.
- Sakai, Yuuki, Junichi Hibi, Shunsuke Otani, dan Hiroyuki Aoyama. 1990. *Experimental Studies on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns using High-Strength Concrete*. Japan Concrete Institute Sapporo.
- Seong, Dai Jeong, Tae Hoon Kim, Myung Seok Oh, dan Hyun Mock Shin. 2011. "Inelastic performance of high-strength concrete bridge columns under earthquake loads." *Journal of Advanced Concrete Technology* 9 (2): 205–20. <https://doi.org/10.3151/jact.9.205>.
- Sheikh, Shamim A., dan Shafik S. Khoury. 1997. "A Performance-Based Approach for the Design of Confining Steel in Tied Columns." *ACI Structural Journal* 94 (4): 421–31. <https://doi.org/10.14359/493>.
- Sheikh, Shamim A., dan Suzru M. Uzumeri. 1980. "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns." *Journal of Structural Division ASCE* 106 (5): 1079–1102.
- Sheikh, Shamim A., dan C. C. Yeh. 1992. "Analytical Moment-Curvature Relations for Tied Concrete Columns." *Journal of Structural Engineering ASCE* 118 (2): 529–44. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1992\)118:2\(529\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1992)118:2(529)).
- Sheikh, Shamim A., dan Ching-Chung Yeh. 1990. "Tied Concrete Columns under Axial Load and Flexure." *Journal of Structural Engineering ASCE* 116 (10): 2780–2800. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1990\)116:10\(2780\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1990)116:10(2780)).
- Sheikh, Shamim A, dan C C Yeh. 1986. "Flexural behavior of confined concrete columns." In *ACI Journal Proceedings*, 83:389–404.
- Shin, H. O., Y. S. Yoon, W. D. Cook, dan D. Mitchell. 2015. "Effect of Confinement on the Axial Load Response of Ultrahigh-Strength Concrete Columns." *Journal of Structural Engineering ASCE* 141 (6): 1–18. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001106](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001106).
- Shin, H.O., Y.S. Yoon, W.D. Cook, dan D. Mitchell. 2015. "Effect of Confinement on the Axial Load Response of Ultrahigh-Strength Concrete Columns." *ASCE Journal of Structural Engineering* 141 (June): 1–18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X).
- Taheri, Ali, Abdolreza S. Moghadam, dan Abass Ali Tasnimi. 2017. "Critical Factors in Displacement Ductility Assessment of High-Strength Concrete Columns." *International Journal of Advanced Structural Engineering* 9 (4): 325–40. <https://doi.org/10.1007/s40091-017-0169-6>.
- Welt, Travis S., Leonardo M. Massone, James M. LaFave, Dawn E. Lehman, Steven L. McCabe, dan Pablo Polanco. 2017. "Confinement Behavior of Rectangular Reinforced Concrete Prisms Simulating Wall Boundary Elements." *Journal of Structural Engineering ASCE* 143 (4): 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001682](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001682).