

EFEK PENGEKANGAN KOLOM BERLUBANG BETON MUTU NORMAL TERHADAP DAKTILITAS KURVATUR

Bambang Sabariman

Dosen Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Negeri Surabaya

Rachmat Purwono

Dosen Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan, Jurusan Teknik Sipil, ITS Surabaya

Priyosulistyo

Dosen Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, UGM Yogyakarta

ABSTRAK

Sampai saat ini masih ditemui pemakaian konduit (pipa-pipa) pada kolom beton bertulang, sehingga penampang kolom menjadi berlubang. Peraturan ACI 318M-95 membatasi besarnya lubang maksimum 4%, apabila persentase lubang > 4%, maka besarnya lubang harus diperhitungkan terhadap pengaruh kekuatannya. Peraturan tersebut tidak menyinggung pengaruh lubang terhadap daktilitas kolom berlubang.

Penelitian ini dilakukan dengan membuat benda uji kolom berlubang dan tak berlubang dengan variasi: rasio sengkang tunggal = 0,0184; rasio sengkang rangkap = 0,0276; rasio tulangan memanjang = 0,0252; $f'_c = 26$ MPa, penampang kolom = $b \times h = 200$ mm x 200 mm, panjang kolom = $L = 1100$ mm, rasio lubang (0%; 4,53%; 7,07%), pada kedua ujung kolom diberikan $P_{aksial-tekana}$ konstan $0,12f'_cA_g = 12,5$ ton, diberikan pula beban *lateral* terletak 1/3 & 2/3 bentang kolom untuk menimbulkan momen. Variabel yang diamati berupa momen dan daktilitas kurvatur.

Hasil penelitian tentang kekuatan momen kolom berlubang 4% masih menunjukkan kekuatan yang sama dengan kolom tak berlubang. Eksperimen ini juga mendapatkan daktilitas kurvatur rentang $6,14 \leq \mu_\phi \leq 8,49$ (termasuk daktilitas terbatas). Jika rasio lubang melebihi 4%, maka akan menurunkan daktilitas kurvatur

Kata kunci: rasio lubang, daktilitas kurvatur, daktilitas terbatas.

ABSTRACT

Conduit (pipes) in reinforced concrete columns is still used to date. ACI 318M-95 code limits the hole up to maximum 4% of the column cross sectional area. If the percentage is more than 4%, its effect toward its strength should be considered. But the Code does not mention the effect of the hollow cross section on the ductility.

This study was done by testing hollow and solid columns with variation as follows: single stirrup ratio = 0.0184, double stirrup ratio = 0.0276, longitudinal steel ratio = 0.0252, concrete compression strength $f'_c = 26$ MPa, column cross-section $b = h = 200$ mm, column length $L = 1100$ mm, hole-ratio (0%, 4.53%, 7.07%). Both ends of the column are loaded by constant axial compression load of $0.12f'_cA_g = 12,5$ ton, lateral loads are applied at 1/3 and 2/3 points to produce moments. The observed variables are moment and curvature ductility.

The result of the study shows that the 4% hollow column still has the same moment strength as the solid one. This experiment also indicates that its curvature ductility is within the range of $6.14 \leq \mu_\phi \leq 8.49$, thus showing that the columns should be considered as limited ductile structure. If the hole-ratio is more than 4%, however, a decrease in the curvature ductility will be found.

Keywords: hole ratio, curvature ductility, limited ductility.

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juni 2004. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Dimensi Teknik Sipil Volume 6 Nomor 2 September 2004.

PENDAHULUAN

Pemasangan instalasi pipa (listrik, air hujan dll) yang tertanam pada elemen struktur kolom sering dijadikan alasan estetika, tanpa memperhatikan pengaruh pengurangan kekuatan kolom. Peraturan ACI 318M-95 pasal 6.3.4 membatasi pemakaian konduit sebesar 4% dari luas penampang melintang kolom, apabila lebih besar dari 4% maka pengaruh lubang perlu diperhitungkan terhadap kekuatannya. Mengingat pentingnya elemen struktur dibandingkan dengan elemen yang lain, maka perlu diketahui sampai sejauh mana pengaruh lubang pipa terhadap perilaku daktilitas kolom.

Penelitian ini membahas mengenai pengaruh lubang terhadap perilaku daktilitas kolom yang menerima beban aksial konstan $P = 0,12f'_c A_g$ dan menerima beban *lateral* (dianggap mewakili beban gempa), dimana f'_c adalah kuat tekan silinder beton, dan A_g adalah luas bruto penampang kolom. Untuk meningkatkan daktilitas maka kolom diberi pengekangan yang memenuhi persyaratan ACI 318M-95, sedang perhitungan daktilitas benda uji kolom dihitung berdasarkan teori tegangan-regangan beton dari Kent & Park [2].

SIGNIFIKANSI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk:

1. Mengetahui pengaruh lubang sebesar 4% pada elemen struktur kolom terkekang yang menerima beban *lateral* dan beban aksial konstan terhadap daktilitas dan kekuatan kolom
2. Apakah kolom berlubang masih memiliki kekuatan dan daktilitas seperti yang disyaratkan oleh ACI 318M-95.

TINJAUAN PUSTAKA

Kurva Tegangan-Regangan Beton Mutu Normal menurut Kent-Park

Hubungan tegangan-regangan beton ($f_c - \epsilon_c$) untuk penelitian ini memakai hasil penelitian Kent dan Park [2] seperti Gambar 1, yang berlaku untuk komponen terkekang dengan sengkang segiempat.

Pada kurva tersebut dapat dilihat karakteristik-karakteristiknya sebagai berikut:

- Daerah AB : $\epsilon_c \leq 0,002$

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{0,002} - \left(\frac{\epsilon_c}{0,002} \right)^2 \right] \quad (1)$$

- Daerah BC : $0,002 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{20c}$

$$f_c = f'_c [1 - Z (\epsilon_c - 0,002)] \quad (2)$$

- Daerah CD : $\epsilon_c \geq \epsilon_{20c}$

$$f_c = 0,2f'_c$$

dimana :

$$Z = \frac{0,5}{\epsilon_{50u} + \epsilon_{50h} - 0,002} \quad (3)$$

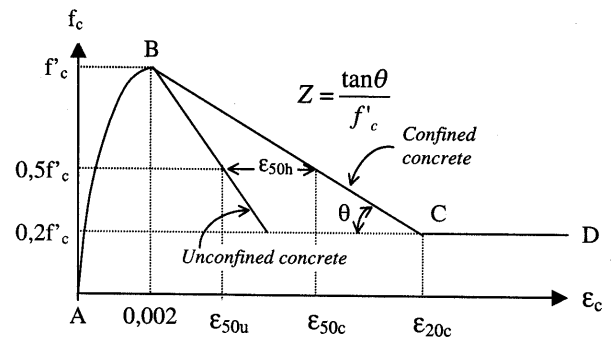
$$\epsilon_{50u} = \frac{3 + 0,002f'_c}{f'_c - 1000} \quad \text{dan} \quad \epsilon_{50h} = \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s_h}} \quad (4)$$

f'_c = kuat tekan silinder beton dalam psi

ρ_s = perbandingan volume tulangan melintang terhadap inti beton yang diukur terhadap bagian luar sengkang

b'' = lebar inti kekangan diukur terhadap bagian luar sengkang

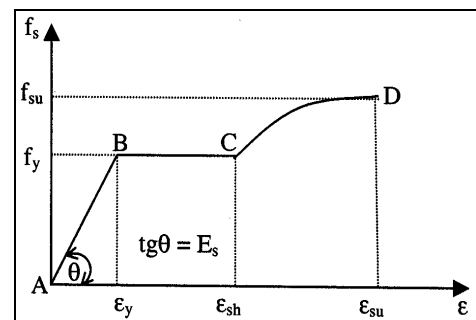
s_h = jarak sengkang



Gambar 1. Kurva hubungan tegangan-regangan beton yang dikekang dengan sengkang segiempat oleh Kent & Park.

Diagram Tegangan-Regangan Baja

Selain hubungan $f_c - \epsilon_c$ dari Kent & Park, dipakai pula hubungan tegangan-regangan baja ($f_s - \epsilon_s$) seperti Gambar 2.



Gambar 2. Kurva hubungan tegangan-regangan baja

Daerah CD pada Gambar 2 menunjukkan pengaruh *strain-hardening* baja [2], diagram tegangan-regangan tersebut akan digunakan

dalam penelitian ini dengan perumusan sebagai berikut:

- Daerah AB : $\epsilon_s \leq \epsilon_y$

$$f_s = \epsilon_s E_s$$

- Daerah BC : $\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}$

$$f_s = f_y$$

- Daerah CD : $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$

$$f_s = f_y \left[\frac{m(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2}{60(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right] \quad (8)$$

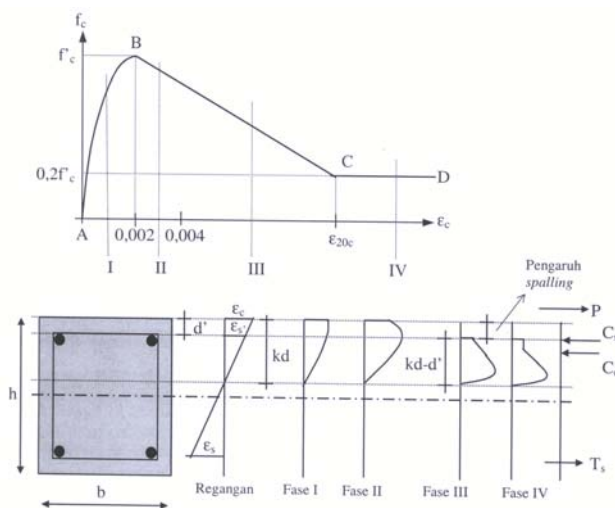
dimana :

$$m = \frac{\left(\frac{f_{su}}{f_y} \right) (30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2} \quad (9)$$

$$r = \epsilon_{su} - \epsilon_{sh} \quad (10)$$

ANALISIS KEKUATAN PENAMPANG KOLOM

Kekuatan penampang kolom beton terkekang dianalisis berdasarkan beberapa fase, penentuan letak fase ini ditinjau atas dasar tegangan-regangan beton yang terjadi. Setiap fase yang satu dengan yang lainnya akan berbeda bentuk diagramnya, maka kekuatan penampang kolom akan berbeda setiap fasenya. Dalam penelitian ini akan meninjau kekuatan kolom mulai dari fase I sampai dengan fase IV (lihat Gambar 3), yang didasarkan pada kurva tegangan-regangan Kent & Park [2].



Gambar 3. Model tegangan-regangan untuk analisis penampang berdasarkan tegangan-regangan Kent & Park [2], Fase I untuk $0,002 < \epsilon_{cm}$, Fase II untuk $0,002 \leq \epsilon_{cm} < 0,004$, Fase III untuk $0,004 \leq \epsilon_{cm} < \epsilon_{20c}$, Fase IV untuk $0,004 \leq \epsilon_{cm} > \epsilon_{20c}$

$$C_c = \alpha \cdot f'_c \cdot b \cdot kd \quad (11)$$

$$P = \alpha \cdot f'_c \cdot b \cdot kd + \sum_{i=1}^n f_{si} A_{si} \quad (12)$$

$$M = \alpha \cdot f'_c \cdot b \cdot kd \left(\frac{h}{2} - \gamma kd \right) + \sum_{i=1}^n f_{si} A_{si} \left(\frac{h}{2} - d_i \right) \quad (13)$$

$$\phi = \frac{\epsilon_{cm}}{kd} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} f'_c \cdot d\epsilon_c}{f'_c \cdot \epsilon_{cm}} \quad (15)$$

- Untuk $\epsilon_{cm} < 0,002$

$$\alpha = \frac{\epsilon_{cm}}{0,002} \left(1 - \frac{\epsilon_{cm}}{0,006} \right) \quad (16)$$

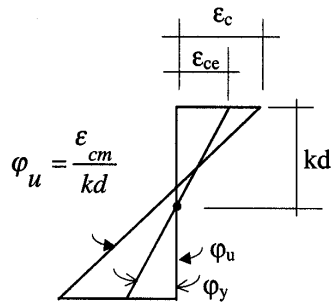
- Untuk $0,002 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{20c}$

$$\alpha = \frac{0,004}{3\epsilon_{cm}} + \left(1 - \frac{0,002}{\epsilon_{cm}} \right) \left(1 - \frac{z}{2} (\epsilon_{cm} - 0,002) \right) \quad (17)$$

$$\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} f'_c \cdot d\epsilon_c}{\epsilon_{cm} \cdot \int_0^{\epsilon_{cm}} f'_c \cdot d\epsilon_c} \quad (18)$$

DAKTILITAS KURVATUR

Elemen yang daktil adalah elemen yang mampu mempertahankan sebagian besar momen kapasitas pada saat mencapai μ_ϕ yang direncanakan. Daktilitas elemen beton bertulang dinyatakan dengan daktilitas kurvatur ($\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$), dimana $\phi_u = \epsilon_{cm} / kd$. Pada saat regangan beton tak terkekang (beton luar sengkang) lebih besar dari $\epsilon_{cu} = 0.004$ tinggi kd tidak termasuk bagian yang sudah *spalled* (lihat Gambar 3 fase III dan fase IV). Nilai ϕ_y akan diperoleh pada saat kondisi regangan tulangan tarik pertama kali mencapai regangan leleh baja yang dipakai, maka kondisi yang demikian disebut kurvatur leleh pertama (ϕ_y).



Gambar 4. Diagram tegangan-regangan pada kurvatur saat leleh pertama dan ultimit

METODE PENELITIAN

Benda Uji Kolom

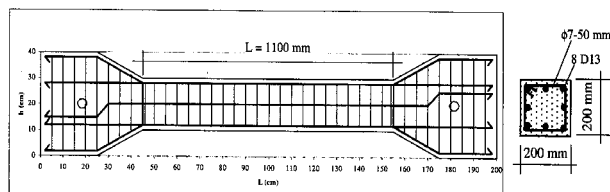
Untuk mengetahui pengaruh lubang terhadap daktilitas kolom maka dibuat dua benda uji kolom berlubang 4,53%; dua benda uji kolom berlubang 7,07% dan satu benda uji kolom tak berlubang, rincian benda uji lihat Tabel 1.

Tabel 1. Rincian benda uji kolom segiempat bxh = 200 x 200 mm, tulangan memanjang 8φ13 mm dan sengkang memakai φ 7 mm

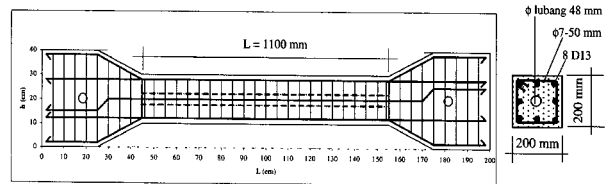
Benda Uji	Rasio Lubang (%)	φ lubang (mm)	ρt (%)	ρs (%)	Jarak sengkang (mm)	Z
KST ₁ L ₀	0	0	2,52	1,84	50	18,883
KST ₁ L ₁	4,53	48	2,52	1,84	50	18,883
KST ₁ L ₂	7,07	60	2,52	1,84	50	18,883
KSR ₁ L ₁	4,53	48	2,52	2,76	60	14,019
KSR ₁ L ₂	7,07	60	2,52	2,76	60	14,019

Sumber: hasil perhitungan

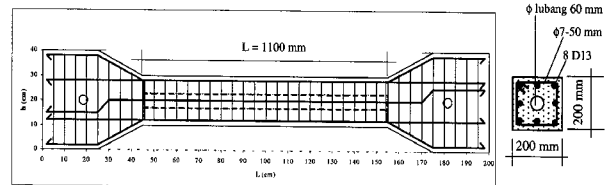
Beberapa benda uji kolom dikekang dengan sengkang tunggal dan sebagai pembandingnya beberapa kolom dikekang dengan sengkang rangkap. Perencanaan kolom memakai sengkang rangkap dimaksudkan untuk mengetahui peningkatan nilai daktilitas kolom, gambar penulangan kolom lihat Gambar 5 s.d. 9.



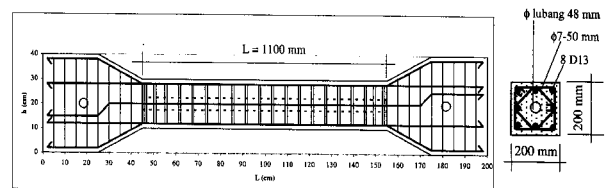
Gambar 5. Penulangan kolom KST₁L₀



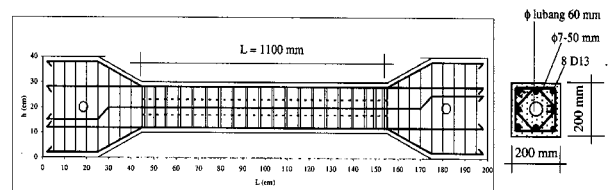
Gambar 6. Penulangan kolom KST₁L₁



Gambar 7. Penulangan kolom KST₁L₂



Gambar 8. Penulangan kolom KSR₁L₁



Gambar 9. Penulangan kolom KSR₁L₂

Tata Nama Benda Uji

Secara umum nomenklatur benda uji K.ST₁.L_i dan K.SR₁.L_i mempunyai pengertian sebagai berikut: K = kolom, ST₁ = sengkang tunggal jarak 50 mm, SR₁ = sengkang rangkap jarak 60 mm, L₀ = penampang kolom tanpa lubang, L₁ = penampang kolom berlubang 4,53%, L₂ = penampang kolom berlubang 7,07%.

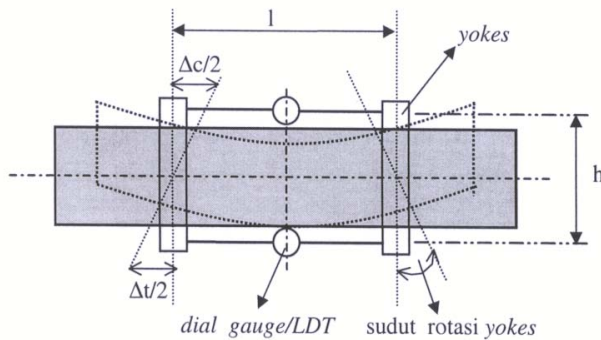
Prediksi Teoritis

Prediksi teoritis momen dan daktilitas kurvatur benda uji kolom berlubang dan tak berlubang yang menerima gaya kombinasi aksial dan lentur dianalisa menggunakan pers. (1) s/d pers. (18), hal ini dilakukan untuk memprediksikan perilaku benda uji kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen. Berdasarkan interaksi kompatibilitas tegangan-regangan dengan bantuan komputer diperoleh prediksi teoritis hubungan momen vs daktilitas kurvatur (M - μ_φ).

Pengolahan Data Eksperimen

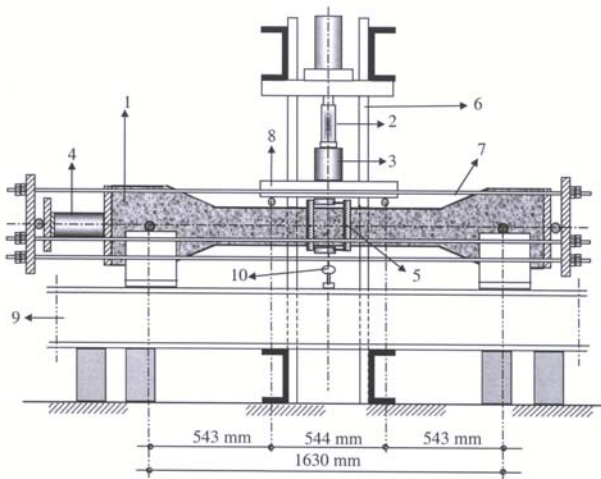
- a. Dari eksperimen diperoleh data beban, lendutan dan pergerakan *yokes*
- b. Besarnya momen eksperimen dihitung sesuai dengan *setup* benda uji, menggunakan rumus $M_{\text{eksp}} = [(P_l/2) \cdot (l_t/3)] + (P_{\text{aks}} \cdot \delta)$, dimana l_t adalah panjang antara dua tumpuan dan δ adalah lendutan yang terjadi
- c. Berdasarkan data pergerakan *yokes* kemudian dihitung kurvatur kolom [3], perhitungannya menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\varphi = \frac{(\Delta_c + \Delta_t)}{(l \cdot h)} \tag{19}$$



Gambar 10. Skema Pemasangan Alat *Yokes*

Setup Benda Uji untuk Kombinasi Gaya Aksial dan Lentur



Gambar 11. *Setup* Benda Uji

Keterangan sesuai gambar dari *setup* benda uji:

1. Benda Uji Kolom beton
2. *Hydraulic Jack* berkemampuan tekan 30 ton sebagai beban *lateral*
3. *Load cell* berkemampuan tekan 60 ton sebagai kontrol besarnya beban *lateral*
4. *Hydraulic Jack* kap. 100 ton sebagai beban aksial

5. Perangkat alat *yokes* dan *LDT* (*linear displacement transducer*)
6. *Frame* penahan beban *lateral* produksi *Power Team*
7. Besi 6φ20 mm sebagai penyalur beban aksial dari *hydraulic jack* ke ujung kiri-kanan benda uji
8. Besi landasan penyalur dua beban *lateral*
9. Besi WF600
10. *Dial gauge* pengontrol lendutan.

HASIL PREDIKSI DAN EKSPERIMEN

Hasil Uji Mutu Baja dan Beton

Uji kuat tarik baja dan uji tekan beton dilakukan di Lab. Mekanika Bahan PAU UGM. Pengujian tiga buah tulangan φ8 mm didapat nilai rata-rata $f_{yh} = 341,357$ MPa, $f_{su} = 474,591$ MPa, $\epsilon_y = 0,00171$; $\epsilon_{su} = 0,1471$ dan diameter efektif = 7 mm. Untuk pengujian tiga buah tulangan D13 didapat nilai rata-rata $f_y = 327,635$ MPa, $f_{su} = 458,88$ MPa, $\epsilon_y = 0,00164$; $\epsilon_{sh} = 0,02431$; $\epsilon_{su} = 0,19364$ dan diameter efektif = 12,68 mm. Uji kuat tekan beton berbentuk silinder φ150 x 300 mm yang dilakukan di Lab. Mekanika Bahan PAU UGM diperoleh data berupa beban P saat hancur untuk setiap silinder uji. Nilai kuat tekan beton dicari dengan rumus $f_i = P_i / A_i$. Dari 14 buah silinder uji, f_c rata-rata diperoleh dengan rumus f_c rata-rata = $\Sigma f_i / 14$, didapat $f_c = 26$ MPa.

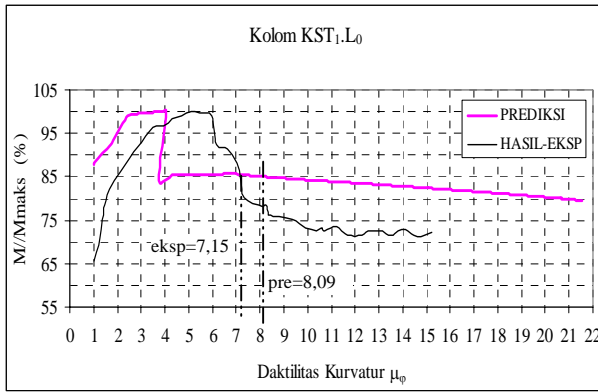
Hasil Prediksi Teoritis

Dari hasil uji mutu baja dan beton dijadikan *input* untuk menghitung prediksi teoritis. Prediksi teoritis dihitung dengan cara interaksi komputer dimana setiap harga k_d dan ϵ_{cm} yang menghasilkan gaya dalam (P) harus memenuhi kesetimbangan dengan beban ekstern sebesar $0,12 \cdot f_c \cdot A_g$ setara $P = 12,5$ ton. Setelah persamaan kesetimbangan dipenuhi maka akan didapat nilai M_{maks} dan nilai ϵ_{cm} , k_d dapat digunakan untuk menghitung φ_u , φ_y dan μ_φ . Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 12 s.d. 16.

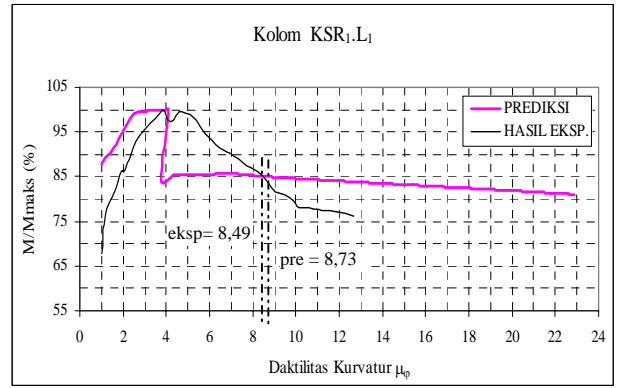
Tabel 2. Nilai prediksi untuk $M_{\text{pre-maks}}$ dan μ_φ

Benda Uji	$M_{\text{pre-maks}}$ (ton.m)	μ_φ pada 0,85 $M_{\text{pre-maks}}$
KST1.L0	3,216	8,09
KST1.L1	3,209	8,11
KST1.L2	3,198	8,17
KSR1.L1	3,216	8,73
KSR1.L2	3,206	8,78

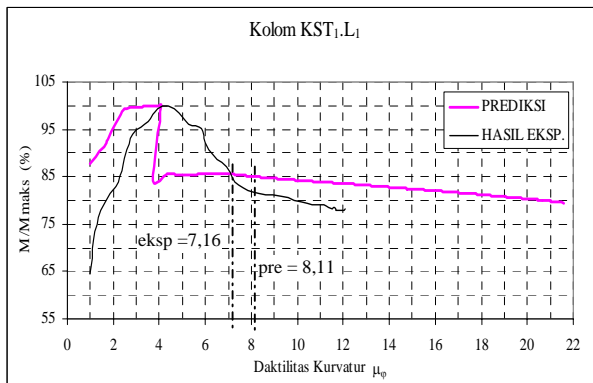
Sumber: hasil perhitungan



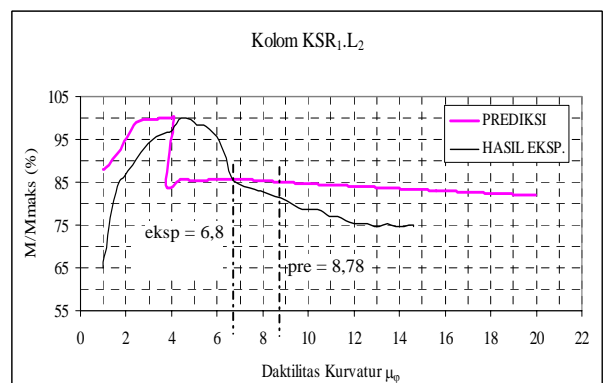
Gambar 12. Grafik perbandingan hubungan M/M_{maks} dan daktilitas kurvatur hasil prediksi teoritis dengan hasil eksperimen kolom KST₁.L₀



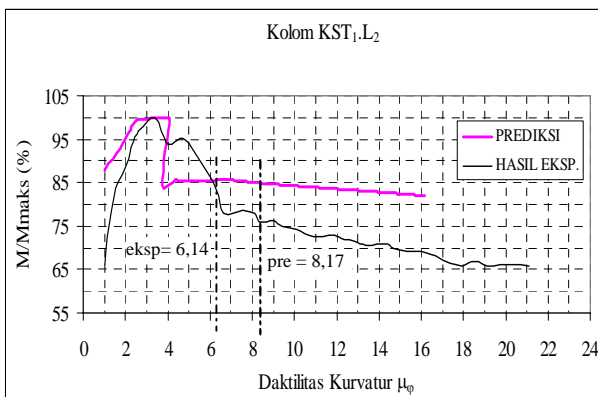
Gambar 15. Grafik perbandingan hubungan M/M_{maks} dan daktilitas kurvatur hasil prediksi teoritis dengan hasil eksperimen kolom KSR₁.L₁



Gambar 13. Grafik perbandingan hubungan M/M_{maks} dan daktilitas kurvatur hasil prediksi teoritis dengan hasil eksperimen kolom KST₁.L₁



Gambar 16. Grafik perbandingan hubungan M/M_{maks} dan daktilitas kurvatur hasil prediksi teoritis dengan hasil eksperimen kolom KSR₁.L₂



Gambar 14. Grafik perbandingan hubungan M/M_{maks} dan daktilitas kurvatur hasil prediksi teoritis dengan hasil eksperimen kolom KST₁.L₂

PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN

Hasil eksperimen

Hasil eksperimen disajikan pada Tabel 3 s.d. 7 dan Gambar 12 s.d. 16 berikut ini:

Tabel 3. Nilai hasil eksperimen $M_{eksp-maks}$ dan μ_{ϕ}

Benda Uji	$M_{eksp-maks}$ (ton.m)	μ_{ϕ} pada $0,85 M_{eksp-maks}$
KST ₁ .L ₀	3,159	7,15
KST ₁ .L ₁	3,097	7,16
KST ₁ .L ₂	3,572	6,14
KSR ₁ .L ₁	2,945	8,49
KSR ₁ .L ₂	2,961	6,8

Sumber: hasil eksperimen

Tabel 4. Nilai perbandingan $M_{pre-maks}$ terhadap $M_{eksp-maks}$

Benda Uji	$M_{pre-maks}$ (ton.m)	$M_{eksp-maks}$ (ton.m)	$M_{pre-maks}/M_{eksp-maks}$
KST ₁ .L ₀	3,216	3,159	1,02
KST ₁ .L ₁	3,209	3,097	1,04
KST ₁ .L ₂	3,198	3,572	0,895
KSR ₁ .L ₁	3,216	2,945	1,09
KSR ₁ .L ₂	3,206	2,961	1,08

Sumber: hasil eksperimen

Tabel 5. Nilai perbandingan prediksi $\mu_{\phi pre}$ terhadap eksperimen $\mu_{\phi eksp}$

Benda Uji	$\mu_{\phi pre}$	$\mu_{\phi eksp}$	$\mu_{\phi pre}/\mu_{\phi eksp}$
KST ₁ .L ₀	8,09	7,15	1,131
KST ₁ .L ₁	8,11	7,16	1,133
KST ₁ .L ₂	8,17	6,14	1,331
KSR ₁ .L ₁	8,73	8,49	1,028
KSR ₁ .L ₂	8,78	6,8	1,291

Sumber: hasil eksperimen

Tabel 6. Nilai μ_{ϕ} hasil eksperimen dan penurunan nilai μ_{ϕ} antar lubang

Benda Uji	μ_{ϕ} pada 0.85 M_{maks}	Keterangan
KST ₁ .L ₁ terhadap KST ₁ .L ₀	7,16	Harga μ_{ϕ} dianggap sama
	7,15	
KST ₁ .L ₂ terhadap KST ₁ .L ₀	6,14	Harga μ_{ϕ} turun 14,13%
	7,15	
KSR ₁ .L ₂ terhadap KSR ₁ .L ₁	6,8	Harga μ_{ϕ} turun 19,91%
	8,49	

Sumber: hasil eksperimen

Tabel 7. Peningkatan nilai μ_{ϕ} akibat pemakaian sengkang rangkap

Benda Uji	μ_{ϕ} pada 0.85 M_{maks}	Peningkatan harga μ_{ϕ}	Keterangan
KST ₁ .L ₁ terhadap KSR ₁ .L ₁	7,16	18,57%	Sengkang tunggal terhadap sengkang rangkap
	8,49		
KST ₁ .L ₂ terhadap KSR ₁ .L ₂	6,14	10,75%	
	6,8		

Sumber: hasil eksperimen

PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN

Pengaruh Besarnya Lubang

Hasil uji eksperimen untuk kolom bersengkang tunggal dan bersengkang rangkap yang disajikan pada Gambar 12 s.d. 16, menunjukkan

makin besar persentase lubang maka makin turun nilai daktilitas kurvatur (μ_{ϕ}) hingga mencapai 19,91% (lihat Tabel 6).

Pengaruh Penggunaan Sengkang

Penggunaan sengkang rangkap dalam penelitian ini mampu meningkatkan daktilitas kurvatur sampai mencapai 18,57% terhadap pemakaian sengkang tunggal (lihat Tabel 7).

Perbedaan Hasil Prediksi Teoritis dengan Hasil Eksperimen

Pada Tabel 3 terlihat kolom berlubang 4% (KST₁L₁) hasilnya masih menunjukkan kekuatan M_{maks} dan μ_{ϕ} yang sama dengan kolom tak berlubang (KST₁L₀, lihat Tabel 3), tetapi nilai perbandingan prediksi teoritis daktilitas kurvatur terhadap nilai daktilitas kurvatur hasil eksperimen mencapai 33% untuk kolom berlubang 7,07% (lihat Tabel 5).

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang terbatas ini, dapat disimpulkan:

1. Bila dilihat dari tingkat daktilitas hasil eksperimen untuk kolom tak berlubang dan kolom berlubang 4% menunjukkan hasil yang hampir sama tetapi untuk kolom berlubang 7,07% terjadi penurunan daktilitas kurvatur sebesar 14,13% untuk sengkang tunggal dan 19,91% untuk sengkang rangkap, nilai ini semuanya dibandingkan terhadap kolom tidak berlubang dan seluruh benda uji dalam penelitian ini menghasilkan $6,14 \leq \mu_{\phi} \leq 8,49$ pada 0,85 M_{maks} dengan demikian tingkat daktilitas hasil eksperimen seluruh benda uji hanya mencapai tingkat daktilitas terbatas
2. Dengan merubah pemakaian sengkang tunggal menjadi sengkang rangkap, dari hasil eksperimen dapat meningkatkan daktilitas kurvatur hingga 18,57%
3. Kekuatan momen maksimum kolom berlubang 4% (KST₁L₁) hasilnya masih menunjukkan M_{maks} dan μ_{ϕ} yang sama dengan kolom tak berlubang (KST₁L₀, lihat Tabel 3) tetapi perlu ditelaah kembali pemakaian asumsi tegangan-regangan beton Kent & Park [2] yang diaplikasikan pada penampang kolom berlubang >4% sebab dari penelitian untuk kolom berlubang 7,07% (lihat Tabel 5) masih diperoleh nilai perbandingan prediksi teoritis daktilitas kurvatur terhadap nilai daktilitas kurvatur hasil eksperimen mencapai 33%.

Sesuai dengan hal tersebut diatas kiranya dapat ditarik kesimpulan lagi bahwa: semakin besar lubang, daktilitas kolom semakin turun, maka syarat besarnya lubang tetap diambil $\leq 4\%$ (sesuai anjuran ACI 318M-95 tentang pembatasan lubang/konduit).

DAFTAR PUSTAKA

1. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318 M-95)*, American Concrete Institute, 1995.
2. Park, R. dan Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1975.
3. Pendyala, R., Mendis, P., Patnaikuni, I., Full-Range Behavior of High-Strength Concrete Flexural Members: Comparison of Ductility Parameters of High and Normal-Strength Concrete Members, *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 1, January-February 1996, pp. 30-35.