

Perhitungan Kehilangan Pratekan Total dengan Memakai Teori Kemungkinan

M. Sigit Darmawan

Dosen Jurusan Diploma Teknik Sipil, FTSP - ITS

Email: msdarmawan@ce.its.ac.id

ABSTRAK

Salah satu tahapan perhitungan yang penting untuk perhitungan konstruksi beton pratekan adalah perhitungan besarnya kehilangan pratekan (*loss of prestress*). Pada umumnya perhitungan kehilangan pratekan dilakukan dengan memakai anggapan bahwa semua variabel yang berpengaruh bersifat deterministik. Anggapan ini menjadi kurang tepat bila dikaitkan dengan sifat-sifat beton dan baja pratekan yang mempunyai tingkat variabilitas yang tertentu. Pada studi ini akan disajikan perhitungan kehilangan pratekan akibat susut dan rangkai pada beton serta relaksasi pada baja, dengan memperhitungkan variabilitas sifat-sifat beton dan baja pratekan. Variabilitas beton dan baja pratekan akan diperhitungkan dalam perhitungan dengan memakai analisis teori kemungkinan (*probability analysis*). Mengingat sangat terbatasnya data parameter statistik beton dan baja pratekan untuk kondisi Indonesia, maka parameter statistik yang diperlukan untuk perhitungan kehilangan pratekan akan diambil dari berbagai penelitian sebelumnya yang pada umumnya dilakukan di luar Indonesia. Hasil studi menunjukkan bahwa memasukkan variabilitas sifat-sifat beton dan baja pratekan mempunyai efek yang cukup besar terhadap besarnya kehilangan pratekan. Kehilangan pratekan akibat susut dan rangkai beton serta relaksasi baja dan kombinasi dari ketiga faktor tersebut mempunyai rata-rata sebesar 3.86%, 10.05%, 4.31% dan 18.22%, dengan koefisien penyebaran sebesar 57%, 35%, 18% dan 25%.

Kata Kunci: *Kehilangan Pratekan Total, Susut, Rangkai, Relaksasi, Probability Analysis*

1. PENDAHULUAN

Perhitungan kehilangan pratekan total (*loss of prestress*) merupakan salah satu tahapan yang penting dalam perhitungan konstruksi beton pratekan. Besarnya kehilangan pratekan menentukan seberapa besar gaya yang diperlukan untuk pemberian pratekan agar struktur beton pratekan mampu memikul beban-beban yang direncanakan secara efektif. Meskipun kesalahan dalam perhitungan kehilangan pratekan, tidak mempunyai dampak yang berarti terhadap kekuatan maksimum penampang beton pratekan, kesalahan dalam perkiraan kehilangan pratekan mempunyai efek yang besar terhadap tingkat pelayanan (*serviceability*) dari struktur beton pratekan. Masalah yang mungkin timbul akibat kurang tepatnya perkiraan kehilangan pratekan adalah terjadinya lendutan yang berlebihan dan atau retak yang berlebihan.

Pada umumnya perhitungan kehilangan pratekan dilakukan dengan anggapan semua parameter beton dan baja pratekan bersifat deterministik (dapat ditentukan dengan pasti). Tentu saja anggapan ini kurang tepat bila dikaitkan dengan sifat-sifat material beton yang pada umumnya mempunyai tingkat variabilitas yang cukup besar. Seperti halnya beton, material baja pratekan juga mempunyai variabilitas tertentu, meskipun tidak sebesar material beton.

Pada studi ini akan dilakukan perhitungan kehilangan pratekan akibat susut dan rangkai pada beton serta relaksasi pada baja pratekan dengan memasukkan variabilitas sifat-sifat beton dan baja. Variabilitas sifat-sifat beton dan baja akan diperhitungkan dengan memakai analisis teori kemungkinan (*probability analysis*).

2. TINJAUAN PUSTAKA

Perhitungan kehilangan pratekan lazimnya dilakukan dengan mengacu kepada perumusan empiris yang diberikan oleh peraturan beton (*code*). Salah satu *code* yang memberikan perumusan yang cukup jelas tentang cara-cara perhitungan kehilangan pratekan akibat susut dan rangkai pada beton adalah AS 3600. Sebaliknya untuk ACI 318 tidak memberikan perumusan tertentu untuk memperhitungkan kehilangan pratekan akibat kedua faktor tersebut.

Seperti diketahui susut dan rangkai adalah deformasi beton yang tergantung waktu dan meningkat dengan bertambahnya waktu. Selain itu besarnya rangkai juga dipengaruhi besarnya tegangan yang bekerja. Ada beberapa model yang dapat digunakan untuk memprediksi kedua fenomena tersebut, mulai perumusan sederhana seperti yang diberikan dalam peraturan beton (*code*), sampai dengan perumusan yang cukup kompleks seperti diusulkan oleh Bazant dan Baweja (1995).

Beberapa peneliti, antara lain Gilbert (1988), Koutsoukis (1996), Khor (1999) telah melakukan studi perbandingan berbagai model untuk perhitungan susut dan rangkai pada beton, termasuk perumusan yang diberikan oleh peraturan beton seperti AS 3600, ACI 209, CEB-FIP. Namun demikian hasil studi perbandingan tersebut, belum dapat menyimpulkan apakah model tertentu memprediksi lebih baik dibandingkan dengan model yang lain. Hasil studi perbandingan tersebut juga menunjukkan ada perbedaan yang cukup besar antara model yang satu dengan yang lainnya serta kurang berhasil dalam memprediksi data tes yang tersedia (Gilbert, 1988). Hasil studi juga menghasilkan kesimpulan bahwa perumusan AS 3600 memberikan nilai yang merupakan rata-rata dari model yang lainnya. Berdasarkan hasil studi tersebut, maka pada penelitian ini akan dipakai AS 3600 untuk menentukan besarnya susut dan rangkai pada beton.

3. PERUMUSAN CREEP DAN SUSUT BETON

3.1. Susut Beton

Regangan akibat susut pada beton pada umur t (hari) dapat ditentukan dengan perumusan sebagai berikut (AS 3600, 2002):

$$\varepsilon_{cs}(t) = k_1 \varepsilon_{cs,b} \dots \dots \dots (1)$$

dimana $\varepsilon_{cs,b}$ adalah regangan susut dasar rencana (*basic design shrinkage strain*) dan k_1 adalah factor modifikasi untuk memasukkan pengaruh: (i) umur beton; (ii) tipe lingkungan; dan (iii) ukuran dan bentuk penampang. Bila tidak ada data dari hasil tes untuk menentukan $\varepsilon_{cs,b}$, AS 3600 menyarankan untuk memakai nilai sebesar 700×10^{-6} . Namun demikian perlu dicatat bahwa nilai sebenarnya $\varepsilon_{cs,b}$ bervariasi antara 500×10^{-6} s/d 1000×10^{-6} . Sedangkan nilai k_1 ditentukan sesuai perumusan Gilbert (1990) sebagai berikut

$$k_1 = \frac{k_4 k_5 (t - t_c)^{0.7}}{(t - t_c)^{0.7} + k_6} \dots \dots \dots (2)$$

dimana

$$k_4 = 0.62 + 1.5e^{-0.005t_h} \dots \dots \dots (3)$$

$$k_5 = \frac{4.0 - 0.04 \times h}{3} \dots \dots \dots (4)$$

$$k_6 = \frac{t_h}{7} \dots \dots \dots (5)$$

dan t_c waktu (dalam hari) ketika curing dihentikan. Pada persamaan diatas h adalah rata-rata kelembaban tahunan (%), and t_h adalah tebal teoritis penampang (mm) yang didefinisikan sebagai

$$t_h = \frac{2A_g}{u_e} \dots \dots \dots (6)$$

dengan A_g adalah luas penampang total dan u_e adalah keliling penampang yang berhubungan langsung dengan udara.

3.2. Rangkai Beton

Regangan akibat rangkai pada beton pada umur t (hari) dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut (AS 3600, 2002):

$$\epsilon_{cc}(t) = \phi_{cc}(t) \frac{f_c}{E_c(28)} \dots\dots\dots(7)$$

dimana

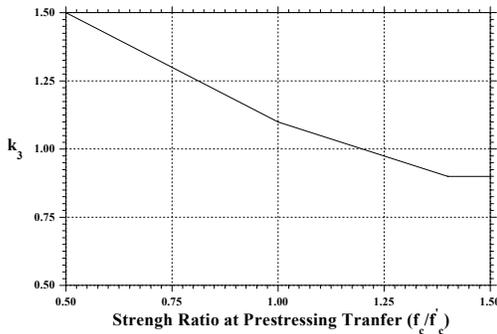
$$\phi_{cc}(t) = k_2 k_3 \phi_{cc,b} \dots\dots\dots(8)$$

dimana f_c adalah tegangan pada beton, $E_c(28)$ adalah modulus elastis beton pada umur 28 hari, $\phi_{cc,b}$ adalah factor rangkakan dasar (*basic creep factor*), yang tergantung pada kuat tekan beton (lihat Tabel 1). Perlu dicatat bahwa nilai $\phi_{cc,b}$ dapat bervariasi sampai dengan $\pm 30\%$.

Tabel 1: Faktor Rangkakan Dasar $\phi_{cc,b}$.

f_c (MPa)	20	25	32	40	50
$\phi_{cc,b}$	5.2	4.2	3.4	2.5	2.0

Adapun k_2 adalah factor modifikasi seperti halnya faktor k_1 pada perhitungan susut and k_3 faktor untuk memperhitungkan umur beton pada saat gaya pratekan dikerjakan (lihat Gambar 1).



Gambar 1: Koefisien Rangkakan k_3 .

Adapun nilai k_2 ditentukan dengan memakai perumusan

$$k_2 = \frac{k_7 k_8 (t - t_a)^{0.7}}{(t - t_a)^{0.7} + k_9} \dots\dots\dots(9)$$

dimana

$$k_7 = 0.76 + 0.9e^{-0.008t_h} \dots\dots\dots(10)$$

$$k_8 = 1.37 - 0.011 \times h \dots\dots\dots(11)$$

$$k_9 = 0.15t_h \dots\dots\dots(12)$$

dan t_a umur (hari) pada saat beban dikerjakan.

3.3. Relaksasi Baja Pratekan

Tegangan pada baja pratekan akan berkurang dengan waktu bila baja ditahan dalam kondisi regangan yang tetap. Kejadian ini disebut relaksasi, yang serupa dengan rangkakan pada beton. Beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya relaksasi antara lain, temperatur, tegangan awal baja dan tipe baja pratekan. Besarnya kehilangan pratekan setelah waktu t (hari) dapat diperkirakan dengan formula sebagai berikut (AS 3600, 2002):

$$R_p(t) = k_{10} k_{11} k_{12} k_{13} R_b \dots\dots\dots(13)$$

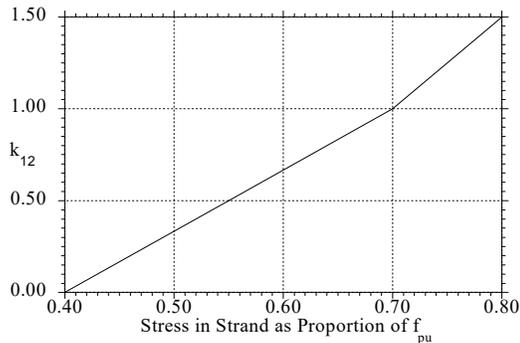
dimana k_{10} , k_{11} and k_{12} adalah faktor modifikasi untuk memperhitungkan lama pemberian pratekan, temperatur dan besarnya tegangan awal. R_b adalah faktor relaksasi dasar, yang tergantung pada tipe baja. Besarnya R_b bervariasi antara 1 s/d 2% untuk baja dengan relaksasi rendah (*low relaxation prestressing steel*). Adapun nilai k_{10} and k_{11} dapat ditentukan dengan perumusan sebagai berikut:

$$k_{10} = \log[5.4(t - t_p)^{1/6}] \dots\dots\dots(14)$$

$$k_{11} = \frac{t_e}{20} \geq 1.0 \dots\dots\dots(15)$$

dimana t_p adalah waktu ketika baja pratekan ditarik (hari) dan t_e adalah temperatur rata-rata tahunan ($^{\circ}C$). Nilai dari

k_{12} tergantung pada proporsi tegangan terhadap tegangan maksimum baja dan dapat ditentukan nilainya berdasarkan Gambar 2.



Gambar 2: Koefisien Relaksasi k_{12}

Faktor k_{13} dipakai untuk memperhitungkan pengaruh susut dan rangkai pada beton terhadap besarnya kehilangan pratekan

akibat relaksasi baja dan ditentukan besarnya sebagai

$$k_{13} = \left[1 - \frac{\text{kehilangan(susut + rangkai)}}{f_{si}} \right] \dots(16)$$

dimana f_{si} adalah tegangan awal pada baja pratekan

3.4. Parameter Statistik Yang Dipakai

Mengingat tidak terdokumentasinya data penelitian tentang susut dan rangkai pada beton di Indonesia, maka parameter statistik yang akan dipakai untuk perhitungan kehilangan pratekan dengan memakai analisa teori kemungkinan adalah memakai parameter statistik yang berasal dari penelitian di luar Indonesia (lihat Tabel 2).

Tabel 2: Parameter Statistik Yang Dipakai

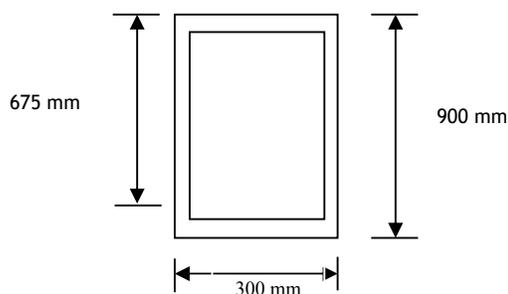
Parameter	Rata-rata	COV	Distribusi	Referensi
$\epsilon_{cs,b}$ (regangan susut dasar rencana)	750×10^{-6}	144×10^{-6}	Uniform (500-1000) $\times 10^{-6}$	AS 3600
$\phi_{cc,b}$ (faktor rangkai dasar)	2.5	0.43	Uniform (3.25-1.75)	AS 3600
R_b (%) (faktor relaksasi dasar)	1.5	0.29	Uniform (1-2)	AS 3600
f'_c (MPa) (kuat tekan beton)	$F^a_c + 7.5$	$s^b = 6$	Lognormal	Attard and Stewart (1998)
$E_c(t)$ (MPa) (modulus elastis beton)	$4600\sqrt{f'_c(t)}$	-	-	Mirza et al. (1979)
$ME^c(E_c(t))$	1.0	0.12	Normal	-
E_p (MPa) (modulus elastis baja)	195000	0.02	Normal	Mirza et al. (1980)
f_{pu} (MPa) (tegangan max baja)	$1.04 f_{pk}$	0.025	Normal	Mirza et al. (1980b)
H (mm) (Tinggi balok)	$H_{nom} + 0.8$	$s = 3.6$	Normal	Mirza and McGregor (1979b)
B (mm) (lebar balok)	$B_{nom} + 2.5$	$s = 3.7$	Normal	Mirza and McGregor (1979b)
ME(Susut)	1.0	0.34	Normal	Bazant and Baweja (1995)
ME(Rangkai)	1.0	0.23	Normal	Bazant and Baweja (1995)
RH (%) (kelembaban relatif)	80	0.1	Normal	Stewart (1996)
t_e (°C) (temperatur rata-rata tahunan)	27.5	0.1	Normal	-

^a F'_c = kuat tekan karakteristik; ^b s = standar deviasi, COV = koefisien penyebaran; ^c ME = Model Error; f_{pk} = tegangan maksimum baja karakteristik

Analisa teori kemungkinan dilakukan dengan melakukan simulasi *Monte Carlo*. Simulasi *Monte Carlo* dilakukan dengan memasukkan sebuah nilai dari setiap variabel yang terlibat kedalam perumusan kehilangan pratekan dengan secara acak (*random*) sesuai dengan tipe distribusinya. Langkah ini dilakukan berulang kali untuk mendapatkan nilai kehilangan pratekan yang dapat diterima secara statistik, misalnya dengan melakukan 1000000 simulasi. Dengan tersedianya perangkat keras komputer yang relatif cepat, simulasi sebanyak ini telah dapat dilakukan dalam waktu yang relatif singkat.

4. APLIKASI PERHITUNGAN

Sebagai contoh perhitungan, maka dilakukan perhitungan kehilangan pratekan untuk balok pratekan dengan dimensi seperti Gambar 3.



Gambar 3: Balok 300 mm x 900 mm.

Sedangkan data disain yang dipakai adalah sebagai berikut:

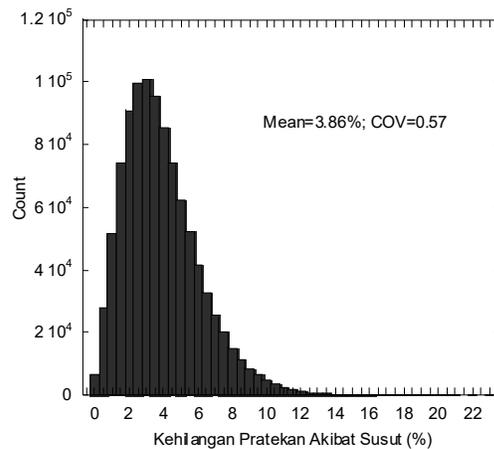
- f'_c (kuat tekan)=40 MPa
- A_{ps} (luas penampang baja)=3643 mm²
- f'_{ci} (kuat tekan saat transfer)=30 MPa
- E_p (modulus elastis baja)=195000 MPa
- f_{si} (tegangan awal baja pratekan)=1100 MPa

5. HASIL YANG DIPEROLEH

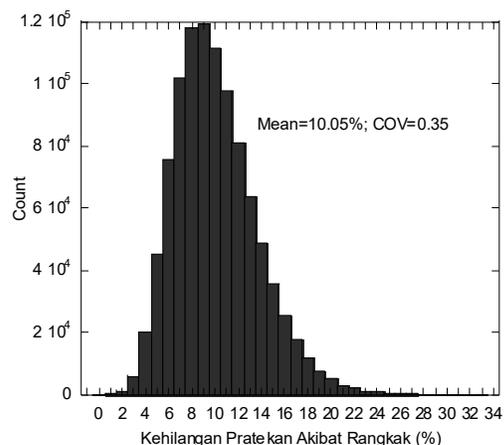
Selanjutnya dilakukan perhitungan besarnya kehilangan pratekan akibat susut dan rangkai pada beton serta relaksasi pada baja setelah umur 30 tahun, dimana pada umumnya pada umur ini nilai kehilangan pratekan telah mencapai nilai maksimum. Hasil perhitungan kehilangan pratekan disajikan dalam bentuk histogram secara

berurutan pada Gambar 4, 5, 6 dan 7. Kehilangan pratekan dinyatakan dalam persen terhadap besarnya tegangan awal baja pratekan (f_{si}).

Gambar 4 menunjukkan bahwa kehilangan pratekan akibat susut mempunyai rata-rata sebesar 3.86% dan koefisien penyebaran (COV) sebesar 57%, sementara Gambar 5 menunjukkan kehilangan pratekan akibat rangkai mempunyai rata-rata sebesar 10.05% dan koefisien penyebaran sebesar 35%. Hasil ini sesuai perkiraan bahwa kehilangan pratekan akibat susut akan mempunyai koefisien penyebaran lebih besar dibandingkan akibat rangkai karena model error untuk susut mempunyai koefisien penyebaran yang lebih besar dibandingkan model error untuk rangkai.



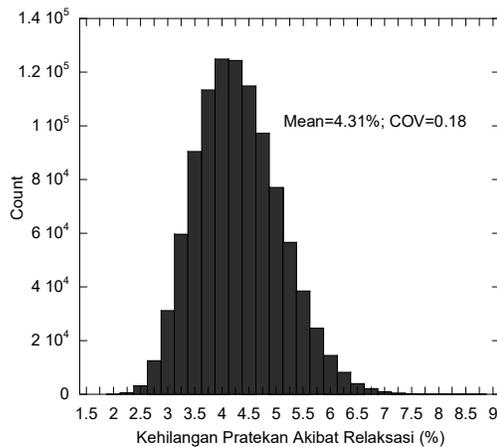
Gambar 4: Kehilangan Pratekan Akibat Susut Beton.



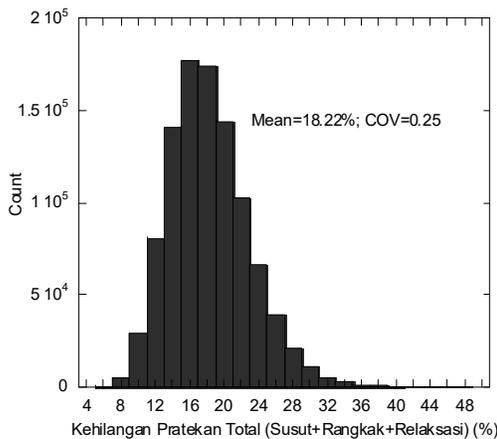
Gambar 5: Kehilangan Pratekan Akibat Rangkai Beton.

Gambar 6 menunjukkan kehilangan pratekan akibat relaksasi pada baja, dimana diperoleh nilai rata-rata sebesar 4.31% dengan koefisien penyebaran sebesar 18%.

Gambar 7 selanjutnya menunjukkan kehilangan pratekan akibat kombinasi susut dan rangkai pada beton serta relaksasi pada baja, dimana diperoleh nilai rata-rata sebesar 18.22% dengan koefisien penyebaran sebesar 25%.

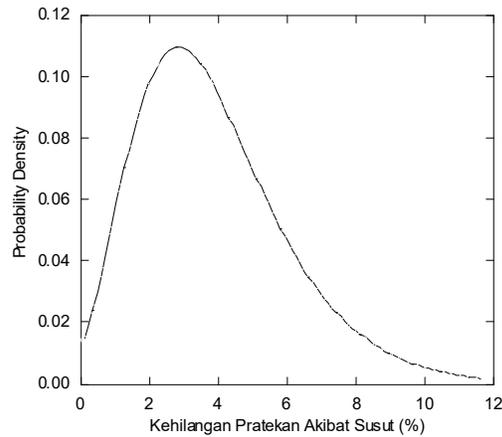


Gambar 6: Kehilangan Pratekan Akibat Relaksasi Baja.

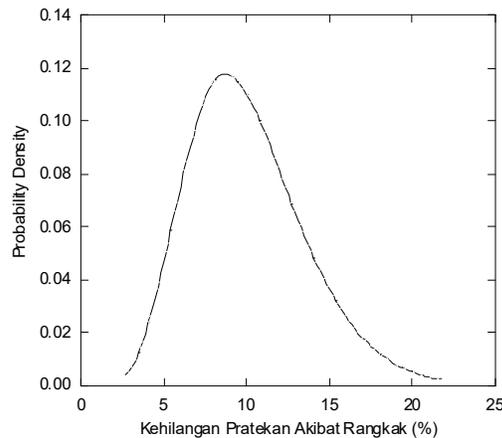


Gambar 7: Kehilangan Pratekan Akibat Susut dan Rangkai Beton serta Relaksasi Baja.

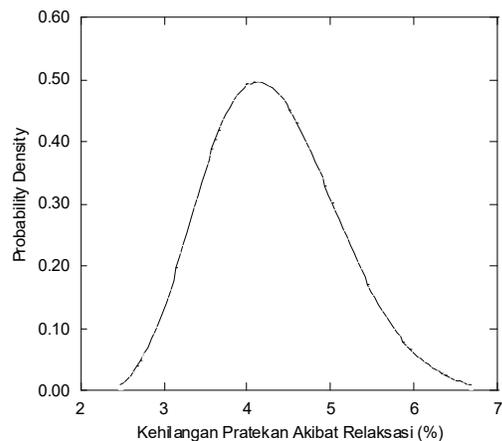
Gambar 8, 9, 10 dan 11 secara berurutan menyajikan distribusi kehilangan pratekan akibat susut dan rangkai beton serta relaksasi pada baja dan kombinasi dari ketiga faktor tersebut.



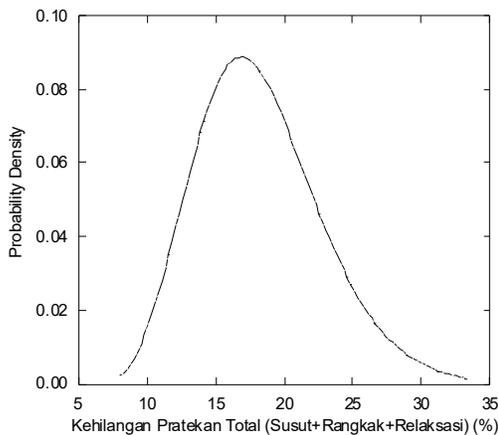
Gambar 8: Distribusi Kehilangan Pratekan Akibat Susut.



Gambar 9: Distribusi Kehilangan Pratekan Akibat Rangkai.



Gambar 10: Distribusi Kehilangan Pratekan Akibat Relaksasi.



Gambar 11: Distribusi Kehilangan Pratekan Akibat Susut dan Rangkak Beton serta Relaksasi Baja.

Gambar 8, 9, 10 dan 11 telah secara jelas menunjukkan bahwa nilai kehilangan pratekan mempunyai variasi yang cukup besar. Dengan demikian perlu diperhatikan bahwa nilai kehilangan pratekan yang diperoleh dengan cara deterministik (mengabaikan variasi sifat-sifat beton) ada kemungkinan tidak akurat. Nilai yang diperoleh secara deterministik tersebut, pada umumnya merupakan nilai yang mendekati rata-rata dari besarnya kehilangan pratekan. Nilai yang didapat secara deterministik (rata-rata) tersebut mempunyai kemungkinan sebesar $\pm 50\%$ akan terlampaui. Hampir semua code telah memberi peringatan kemungkinan ketidaktepatan nilai kehilangan pratekan yang diperoleh berdasarkan perumusan yang diberikan dalam code. Untuk itu diperlukan kehati-hatian dalam menentukan besarnya kehilangan pratekan karena akan berpengaruh kepada tingkat pelayanan balok pratekan, misalnya besarnya lendutan atau retak yang diluar perkiraan.

6. KESIMPULAN

Hasil studi menunjukkan bahwa perhitungan kehilangan pratekan akibat susut dan rangka beton serta relaksasi pada baja dengan memperhitungkan variabilitas sifat-sifat beton dan baja pratekan mempunyai pengaruh yang cukup besar. Dengan memasukkan pengaruh variasi dan ketidakentuan sifat-sifat beton dan baja, didapatkan bahwa kehilangan pratekan

akibat susut mempunyai rata-rata sebesar 3.86% dengan koefisien penyebaran sebesar 57%, kehilangan pratekan akibat rangkak mempunyai rata-rata sebesar 10.05% dengan koefisien penyebaran yang lebih kecil, yaitu sebesar 35%. Sedangkan kehilangan pratekan akibat relaksasi baja mempunyai rata-rata sebesar 4.31% dengan koefisien penyebaran sebesar 18%. Akibat kombinasi susut dan rangkak beton serta relaksasi baja, kehilangan pratekan mempunyai rata-rata sebesar 18.22% dengan koefisien penyebaran sebesar 25%.

7. DAFTAR ACUAN

- ACI 318 (2002), Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- ACI Committee 209 (1992), Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures (ACI 209), ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- AS 3600 (2001), Concrete Structures, Standards Association of Australia, Homebush, New South Wales, Australia.
- Attard, M. M. and Stewart, M. G. (1998), A Two Parameter Stress Block for Model for High Strength Concrete, ACI Structural Journal, ACI, Vol. 95, No. 3, pp. 305-317.
- Bazant, Z. P. and Baweja, S. (1995), Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-model B3, Materials & Structures, Vol. 28, pp. 357-365.
- Comite Euro-International du Beton (1990), CEB-FIP International recommendations for the design and construction of concrete structures, CEB-FIP Code 90, Paris-London.
- Gilbert, R. I. (1988), Time Effects in Concrete Structures, Elsevier, New York, USA.

- Gilbert, R. I. and Mickleborough, N. C. (1990), *Design of Prestressed Concrete*, Unwin Hyman Ltd, London.
- Khor, E. H. (1999), *Early-age Effects on Serviceability Reliability of Reinforced Concrete Flexural Members*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Clemson University, SS, USA.
- Koutsoukis, M. (1996), *On the Probabilistic Time-dependent Axial Shortening of Tall Concrete Building*, PhD Thesis, Department of Civil and Mechanical Engineering, University Tasmania, Australia.
- Mirza, S. A., Hatzinikolas, M. and MacGregor, J. G. (1979), *Statistical Description of Strength of Concrete*, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 105, No. ST6, pp. 1021-1037.
- Mirza, S. A., Kikuchi, D. K. and MacGregor, J. G. (1980), *Flexural Strength Reduction Factor for Bonded Prestressed Concrete Beams*, *ACI Journal*, Vol. 77, No. 4, pp. 237-246.
- Mirza, S. A. and MacGregor, J. G. (1979b), *Variations in Dimensions of Reinforced Concrete Members*, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 105, No. ST4, pp. 751-766.
- Stewart, M. G. (1996), *Serviceability Reliability Analysis of Reinforced Concrete Structures*, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 7, pp. 794-803.