

PREDIKSI MASA GUNA ELEMEN STRUKTUR BETON AKIBAT PEMBEBANAN BERULANG

Life Time Prediction of Structural Concrete Element Due To Repeated Loadings

Agoes Soehardjono MD

Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang
Jl. MT. Haryono 167 Malang 65145, e-mail. agoes-s@indo.net.id.

ABSTRACT

The problem of life time of concrete structural represent matter which still need furthermore research. Existing formula still show wide scatter and the effect of repeated load to assumed not yet satisfactored. In addition only few articles on journals has explored the subject. This research aimed to evaluate and compare the methods of calculating the maximum crack width between EC 2 and ACI 318-02 codes. The research to be done to reinforced concrete plates. The fracture mechanics method, the model mathematic method, and the experiment result used to analyse maximum crack width (w_{max}). The fracture mechanics method from Carpinteri used to analyse the initial crack depth and the fatigue crack growth rate on structural beam of reinforced concrete. To analyse the fatigue crack growth rate is used to Paris formula. The result showed that at 10 Hz load frequency, steel stress ratio, reinforcement ratio and repeated load do affect the maximum crack width until the bond fatigue limit state by **three linear model** includes : (i) $w = w_o$, (ii) $w = A.e^{B.fs/fy} . (N - C.fs / fy - D) + w_o$, and (iii) $w = w_f = (E.fs / fy + F) . w_o$, where w_o is the initial crack width and A, B, C, D, E, and F are dimensionless coefficients that depend on the reinforcement ratio.

Keywords : crack width, repeated load, bond fatigue.

PENDAHULUAN

Masa guna elemen struktur beton bertulang diartikan bahwa elemen struktur beton bertulang sudah tidak mampu menahan beban berulang. Untuk jembatan jalan raya (*highway bridges*), beban kendaraan dalam waktu tertentu dapat menyebabkan retak mikro, perambatan retak (*crack propagation*) dan akhirnya mengalami keruntuhan (*failure*) bila keadaan batas lelah (*fatigue limit state*) terlampaui. Lebar retak yang berlebihan akan menyebabkan kekuatan struktur berkurang secara signifikan.

Masalah retak pada pelat beton bertulang pada jembatan jalan raya sudah sering dijumpai di Indonesia sejak tahun 1980, dengan berbagai penyebab yang dapat diperkirakan antara lain : (1) akibat beban yang bekerja (*applied load*) melebihi beban rencana (*design load*), (2) adanya aksi tambahan yang belum diperhitungkan akibat sistem struktur, dan (3) persyaratan peraturan yang digunakan tidak memadai. Peraturan beton bertulang mulai dari PBI 1971, SK SNI T-15-1991-03, dan SK SNI 03-2847-2002 merupakan peraturan beton yang banyak digunakan dalam perencanaan, tidak hanya untuk bangunan gedung tetapi juga diterapkan untuk bangunan jembatan jalan raya. Memperhatikan kedua jenis bangunan tersebut berbeda karakteristiknya, maka walaupun tidak mutlak seharusnya peraturan

yang digunakan juga berbeda. Timbulnya masalah retak pada pelat jembatan bila dilihat dari segi peraturan beton menunjukkan bahwa evaluasi rumusan retak untuk kontrol retak perlu dilakukan.

Lebar retak (*crack width*) yang melampaui batas pada struktur beton dapat menimbulkan bahaya korosi pada tulangan baja. Bila proses korosi dibiarkan dapat mengurangi kekuatan tulangan yang selanjutnya struktur akan mengalami keruntuhan. Pengaruh beban berulang (*repeated load*) pada beban kerja (*working load*) sangat penting untuk beberapa struktur, terutama bila struktur berada dilingkungan yang korosif, yang mana dapat mengakibatkan kekuatan lekat (*bond strength*) antara baja tulangan dan beton berkurang sehingga lebar retak akan bertambah besar, selain itu juga kekuatan adhesi antara baja tulangan dan beton sekelilingnya menjadi hilang dan tegangan lekat (*bond stress*) hanya ditimbulkan oleh aksi mekanik saja. Rumusan lebar retak maksimum akibat beban monotonik lebih sesuai digunakan untuk struktur bangunan gedung yang mempunyai frekuensi beban yang relatif lebih kecil yaitu sekitar $f = (1 - 2)$ Hz.. Sedangkan Rumusan lebar retak maksimum akibat beban berulang lebih sesuai digunakan untuk struktur bangunan jembatan jalan raya yang mempunyai frekuensi beban yang relatif lebih besar yaitu nilainya sekitar $f = (5 - 15)$ Hz .

Dalam perencanaan dengan metode kekuatan batas, lebar retak merupakan salah satu dari persyaratan kemampuan layan (*serviceability*) yang perlu diperhitungkan. Untuk tujuan tersebut, suatu metode sederhana untuk memperkirakan lebar retak maksimum pada kondisi beban layan diperlukan. Soehardjono (2006) memberikan suatu kajian mendalam bahwa rumusan lebar retak pada pembebanan monotonik yang ada masih berbeda-beda dengan skater yang relatif lebar. Berbagai peraturan Eropa EC2 atau Australia AS 3600 (Patrick dan Wheeler, 2000) dan Amerika ACI 318 (ACI, 2002) merekomendasikan rumusan lebar retak maksimum yang berbeda, dan mereka memberikan batasan lebar retak maksimum ijin yang berbeda pula. Indonesia sebagai negara di khatulistiwa seharusnya memberikan batasan lebar retak maksimum yang berbeda dari mereka di Eropa maupun di Amerika. Beberapa peneliti seperti Rehm dan Eligehausen (1999), dan Soehardjono (2006) telah mengindikasikan bahwa lebar retak pada pembebanan berulang untuk pelat beton bertulang pracetak dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti : (1) rasio tegangan baja; (2) selimut beton; (3) rasio tulangan; (4) frekuensi beban; (5) kedalaman retak; dan (6) lebar retak awal beban statik. Untuk memprediksi lebar retak maksimum pada pembebanan berulang, sejumlah persamaan dikembangkan berdasarkan pendekatan mekanika retakan. Metode untuk memprediksi lebar retak maksimum ini adalah merupakan modifikasi dari rumusan Carpinteri (1998) dan rumusan hasil eksperimen yang diusulkan oleh Soehardjono (2006).

Lebar retak adalah salah satu dari persyaratan kemampuan layan yang diperlukan pada perencanaan keadaan batas. Pelat beton bertulang yang mengalami retak mikro akan mengalami perambatan retak yang cukup signifikan bila beban berulang diberikan walaupun pada kondisi beban kerja. Sehingga, metode sederhana untuk memprediksi lebar retak maksimum pada pembebanan berulang sangat diperlukan. Tujuan penelitian ini adalah

menetapkan persamaan perencanaan untuk memprediksi lebar retak maksimum pada beban berulang sampai mengalami fatik lekatan (*the fatigue of bond*) antara tulangan baja dengan beton di sekelilingnya. Rumusan ini diharapkan dapat dipakai untuk memprediksi umur suatu jembatan jalan raya yang terbuat dari beton bertulang dengan kriteria keruntuhan berupa lebar retak maksimum pada pelat lantai. Disamping itu juga dapat mengetahui kapan sebaiknya lebar retak tersebut diperbaiki dalam rangka pemeliharaan jembatan jalan raya. Mengingat pada ACI 318-02 rumusan lebar retak secara eksplisit sudah tidak tercantum lagi, tetapi sebenarnya sudah diakomodasi dalam rumusan spasi tulangan pelat beton, maka dalam analisis akan disajikan keterkaitan rumusan antara lebar retak dengan spasi tulangan pelat baik pada beban monoton maupun pada beban berulang.

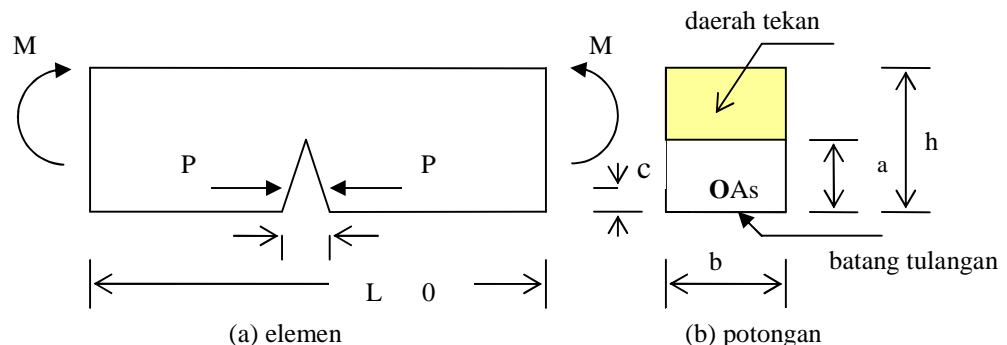
KAJIAN PUSTAKA

Pembebanan Monotonik

Untuk dapat menganalisis perilaku retak elemen struktur beton perlu mengetahui hubungan antara beban dan deformasi. Menurut Carpinteri (1998), bila pada suatu elemen retak seperti pada Gambar 1, dimana bekerja gaya P dan momen M secara simultan pada permukaan retak, kita dapat mengevaluasi deformasi COD (*crack opening displacement*) PP akibat gaya P , pada titik dimana gaya P terjadi, dan pada saat yang sama deformasi COD PM akibat momen M . Deformasi tersebut adalah lebar retak w yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$w = PM + PP = PM M - PP P \quad (1)$$

dimana PM , PP , adalah komponen *compliance* dari elemen akibat adanya retak. Komponen *compliance* tersebut dapat dinyatakan dan didekati Soehardjono (2006) dalam bentuk berikut.



Gambar 1. Elemen retak

$$P_M = \frac{2}{h \cdot b \cdot E} \int_{c/h}^{\xi} Y_M(\xi) Y_P(c/h, \xi) d$$

$$P_M = \frac{2}{h \cdot b \cdot E} 57,366 \cdot 1,7622 \quad (2)$$

$$P_P = \frac{2}{b \cdot E} \int_{c/h}^{\xi} Y_P^2(c/h, \xi) d$$

$$P_P = \frac{2}{b \cdot E} 4,524 e^{2,687} \quad (3)$$

dengan $\xi = a/h$ adalah kedalaman retak relatif dan Y_P , Y_M adalah fungsi yang tergantung pada kedalaman retak relatif yang dirumuskan oleh Okamura, Watanabe dan Takano (Carpinteri, 1998) adalah :

$$Y_M(\xi) = 6 (1,99 \xi^{1/2} - 2,47 \xi^{3/2} + 12,97 \xi^{5/2} - 23,17 \xi^{7/2} + 24,80 \xi^{9/2}) \quad (4)$$

$$Y_P(\xi) = 1 (1,99 \xi^{1/2} - 0,41 \xi^{3/2} + 18,70 \xi^{5/2} - 38,48 \xi^{7/2} - 53,85 \xi^{9/2}) \quad (5)$$

Bila diskontinuitas dalam retak penampang melintang pada level tulangan dianggap nol, sampai momen leleh atau tulangan mengalami slip maka persamaan (1) menjadi :

$$M - P_M M - P_P P = 0 \quad (6)$$

Sehingga kita dapatkan gaya tak diketahui P sebagai fungsi dari momen yang terjadi M. Dengan persamaan (2), (3) dan (1), maka didapat persamaan

$$\frac{P \cdot h}{M} = \frac{1}{r''(c/h, \xi)} = \frac{\lambda_{PM} \cdot h}{\lambda_{PP}} \quad (7)$$

Didefinisikan bahwa ketangguhan retakan (*fracture toughness*) K_c adalah suatu sifat dimana untuk mengukur tahanan material pada retakan getas ketika terjadi retak. Nilai K_c yang tetap untuk spesimen yang lebih tebal seperti pelat beton bertulang pracetak diketahui merupakan ketangguhan retakan regangan bidang K_{IC} (Bazant dan Planas, 1999; Callister, 1998), yang ditentukan dengan rumusan

$$K_{IC} = Y_P(\xi) f_s \sqrt{\pi \cdot a} \quad (8)$$

Transfer gaya tulangan eksentris P, yang konsentris dengan sumbu balok, komponen faktor intensitas tegangan (*stress intensity factors*) K_{IM} dan K_{IF} akibat aksi momen M dan gaya aksial P, dapat ditulis sebagai

$$K_{IM} = \frac{Y_M(\xi)}{h^{3/2} b} [M - P(\frac{h}{2} - ds)] \quad (9)$$

$$K_{IF} = - \frac{Y_F(\xi)}{h^{1/2} b} P \quad (10)$$

Superposisi komponen factor intensitas tegangan K_{IF} dan K_{IM} , dan seting $K_I = K_{IC}$, yaitu faktor intensitas tegangan kritis beton, maka penyelesaian momen M sama dengan momen retak (*fracture moment*) M_F ditentukan oleh :

$$M_F = \frac{K_{IC} h^{3/2} b}{Y_M(\xi)} + \frac{P \cdot h}{Y_M(\xi)} [Y_P(\xi) + Y_M(\xi) (\frac{1}{2} - \frac{c}{h})] \quad (11)$$

dengan

M_F = momen retak pada retak yang baru

$$K_{IC} = 2,175 f_c'^{0,6} \sqrt{\gamma} \quad (\text{N/mm}^{3/2})$$

$$= 2,828 e^{0,0454 d_{max}}$$

d_{max} = diameter agregat maksimum (mm)

f_c' = tegangan tekan karakteristik beton (N/mm²)

Dengan mensubstitusikan persamaan (2), (3), dan (7) kedalam persamaan (1), serta pelat beton bertulang pracetak dianggap sebagai material komposit unidireksional. Kemudian substitusikan gaya aksial $P = A_s \cdot f_s$, modulus elastisitas $E = E_c (1 + n \cdot \rho)$ dan $E_c = 25.886 \text{ N/mm}^2$ dari hasil eksperimen (Suhardjono, 2006), maka rumusan lebar retak maksimum dapat ditulis

$$w_{maks} = 0,647 \cdot 10^{-6} \frac{A_s \cdot f_s}{(1 + n \cdot \rho)} \cdot e^{0,013435 a} \quad (\text{mm})$$

validasi data eksperimen bahwa:

$$w_{exp} / w_{ana} = -0,0037 f_s + 1,15 \quad (12)$$

$$w_{maks} = (0,74 - 0,0024 f_s) \cdot 10^{-6} \frac{A_s \cdot f_s}{(1 + n \cdot \rho)} \cdot e^{0,013435 a} \quad (\text{mm}) \quad (13)$$

dengan:

A_s = luas tulangan baja (mm²) per m lebar

f_s = tegangan baja (N/mm²)

$n = E_s/E_c$ = rasio modulus

= $A_s/(s \cdot h)$ = rasio tulangan

a = $0,08 f_s + 61,16$ = tinggi retak (mm) dari hasil eksperimen (Suhardjono, 2006).

Pembebanan Berulang

Berdasarkan data tinggi retak atau kedalaman retak awal (a_i), kemudian dilakukan analisis laju

perambatan retak leleh (*fatigue crack growth rate analysis*) terhadap ke 15 spesimen pelat uji dengan menggunakan persamaan *Paris-Erdogan* (Carpinteri, 1998; Karihaloo, 1998):

$$da/dN = A (K_I)^m \quad (\text{m.cycle}^{-1}) \quad (14)$$

dengan

da/dN = laju perambatan retak (m.cycle⁻¹)

K_I = selang factor intensitas tegangan (N.m^{-3/2})

A, m = konstanta material

Berdasarkan hasil eksperimen, Baluch, et.al., (1999), mengusulkan nilai konstanta material beton $A = 7,71 \cdot 10^{-25}$ dan $m = 3,12$ untuk laju perambatan leleh da/dN dalam (m.cycle⁻¹) dan K_I dalam (N.m^{-3/2}).

Untuk beton bertulang yang merupakan material komposit unidireksional, karena rasio modulus n dan rasio tulangan merupakan parameter penting maka peneliti mengusulkan suatu koreksi A menjadi :

$$A = \left(\frac{1}{1 + n \cdot \rho} \right)^{3,12} 7,71 \cdot 10^{-25} \quad (15)$$

1. Selang faktor intensitas tegangan (Carpinteri atau Persamaan (11)) adalah :

$$K_{IC} = \frac{Y_M(\xi)}{h^{3/2} \cdot b} M_F - \left[\frac{Y_M(\xi)}{h^{3/2} \cdot b} \left(\frac{h}{2} - ds \right) + \frac{Y_P(\xi)}{h^{1/2} \cdot b} \right] A_s \cdot fs \quad (\text{N.m}^{-3/2}) \quad (16)$$

dengan

a/h = tinggi retak relatif

M_F = $T_1 \cdot d_1 + T_2 \cdot d_2 + A_s \cdot fs \cdot ds$ (N.m)

fs = selang tegangan (*stress range*) (N/m²)

A_s = luas satu tulangan (m²)

h = tebal pelat (m)

b, s = lebar per satu tulangan (m)

ds = selimut beton (m)

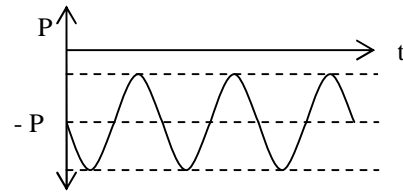
2. Selang faktor intensitas tegangan (komposit atau Persamaan (8)) adalah :

$$K_{IC} = k Y_P() fs a \quad (\text{N.m}^{-3/2}) \quad (17)$$

dengan

$k = (1 - fs / fy) \bar{\rho}$

a = tinggi retak (m)



Gambar 2. Model beban berulang

Untuk model pembebanan berulang seperti pada Gambar 2., bahwa :

a. kedalaman retak adalah fungsi yang tergantung beban berulang dan faktor intensitas tegangan

$$a = f (N, K_I) \quad \text{dari Pers. (14)}$$

b. selang faktor intensitas tegangan adalah fungsi yang tergantung pada tegangan baja dan konstanta material

$$K_I = f (k, Y, fs) \quad \text{dari Pers. (16) dan (17)}$$

c. lebar retak maksimum adalah fungsi yang tergantung pada kedalaman retak

$$w_{\max} = f (a) \quad \text{dari Pers. (13)}$$

Berdasarkan hubungan tersebut, kemudian dapat dievaluasi lebar retak maksimum $w = f (fs, N)$, kemudian pengaruh pembebanan berulang terhadap lebar retak dapat ditentukan.

METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

Bahan beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen Portland tipe I sesuai dengan ASTM. Agregat halus pasir alami dari sungai Brantas Mojokerto sesuai ASTM dengan modulus kehalusan $f_m = 2,58$; berat isi = 1.545 kg/m³; kadar air $w = 4,59$ %; berat jenis $sg = 2,74$; penyerapan air abs = 3,73 %; dan gradasi pada zone No.2 sesuai BS 882 dan SK SNI T-15-1990-03. Agregat kasar kerikil pecah dari sungai Brantas Mojokerto sesuai ASTM dengan modulus kehalusan $f_m = 7,50$; berat isi = 1.528 kg/m³; kadar air $w = 0,96$ %; berat jenis $sg = 2,64$; penyerapan air abs = 2,70 %; dan gradasi sesuai ASTM C 33 - 90. Perencanaan campuran beton sesuai SK SNI T-15-1990-03 dengan proporsi dalam berat per m³ PC : Ps : Kr = 1 : 1,96 : 2,94 dan factor air semen $fas = 0,49$. Baja tulangan ulir dari PT. Hanil Jaya metal Works Surabaya sesuai JIS G 3112 dengan diameter 13 mm

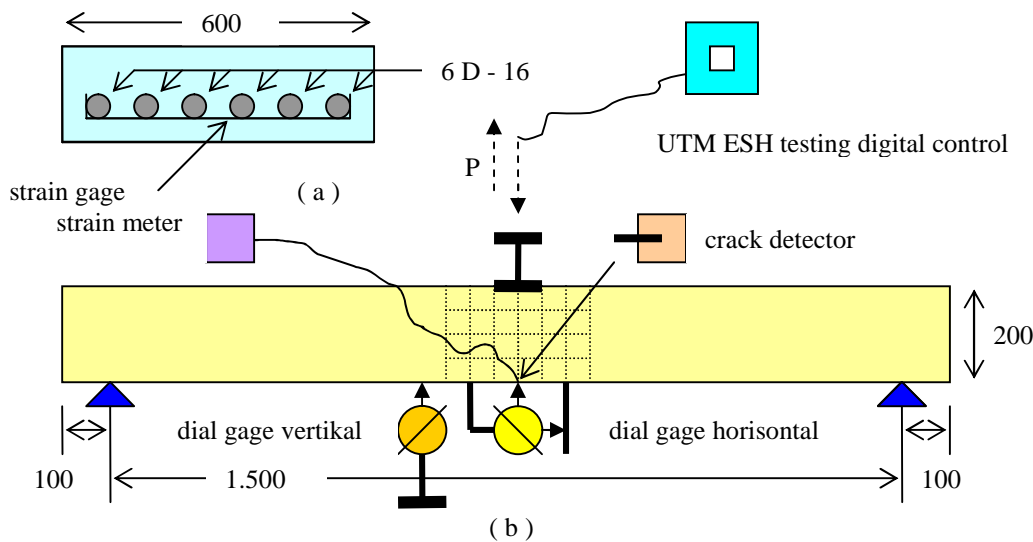
dan mutu $f_y = 400 \text{ N/mm}^2$, $f_u = 630 \text{ N/mm}^2$, serta modulus elastisitas $E_s = 200.000 \text{ N/mm}^2$.

Pengujian kuat tekan beton silinder sesuai ASTM C 39-93a. Hasil evaluasi dan penerimaan beton didapat $f_c' = 35 \text{ N/mm}^2$. Pengujian kuat tarik belah beton sesuai ASTM C 496-90 dan dengan grafik Walker dan Bloem didapat nilai kuat tarik belah $f_{cs} = 2,88 \text{ N/mm}^2$ dan kuat tarik lentur $f_r = 4,88 \text{ N/mm}^2$. Pengujian modulus elastisitas beton sesuai ASTM C 469-90 dengan mengambil nilai modulus elastisitas chord $E_c = 25.886 \text{ N/mm}^2$.

Peralatan Penelitian

Alat uji tarik baja UTM merk ESH Testing Digital Control cap. 2.000 kN. Alat uji tekan, uji

tarik belah dan modulus elastisitas UTM merk ELLE beserta perlengkapannya cap 2.000 kN. Alat uji lentur spesimen pelat untuk beban monoton Beam Bending Testing Machine tipe PBC-100P MFG Tokyo cap. 100 tonf. Alat uji lentur spesimen pelat untuk beban berulang UTM merk ESH Testing Digital Control cap. 2.000 kN. Alat ukur regangan baja electrical strain gauges merk TML tipe FLA-3-11 dengan gauge length 10 mm dan gauge factor $2,14 \pm 1$. Alat pendeteksi regangan digital strain meter merk TC-1K tipe S238C. Alat ukur tinggi dan lebar retak concrete width ruler, crack detector merk WF 10X, dan dial gauge horisontal. Seting alat dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. (a) Potongan spesimen dan (b) Setup pengujian

Perakitan, Pengecoran dan Pengujian

Penampang pelat dengan ukuran 600 x 200 berisi tulangan memanjang diameter 16 mm dengan angka tulangan = 0,0023 s/d 0,0088 dan tulangan melintang diameter 6 dengan 200 mm. Strain gauge dipasang pada tulangan baja dengan ditutup isolasi sebelum beton di cor. Jumlah spesimen 18 buah dengan rincian 3 buah untuk uji beban monoton dan 15 buah untuk beban berulang dengan variasi angka tulangan, frekuensi beban dan rasio tegangan baja.

$$w_{maks} = 3,38 \cdot 10^{-4} \frac{(1 + 0,07 \cdot c)}{(1 + \frac{16 \cdot n \cdot \rho}{3})} fs \text{ (mm)} \quad (18)$$

sedangkan berdasarkan mekanika retakan (MR) dapat ditulis

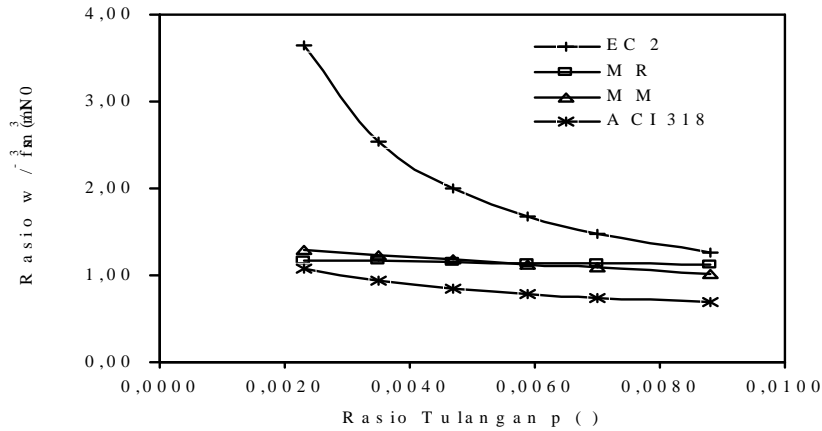
$$w_0 = w_{maks} = (0,74 - 0,0024 fs) \cdot 10^{-6} \frac{As \cdot fs}{(1 + n \cdot \rho)} e^{0,013435 a} \text{ (mm)} \quad (19)$$

Bila lebar retak maksimum berdasarkan model matematik (MM) dan mekanika retakan (MR) sebelum divalidasi dibandingkan dengan rumusan dari Eurocode 2 dan ACI 318-02, maka nilainya cukup moderat untuk rasio tulangan = 0,0023 s/d 0,0088 seperti pada Gambar 4.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

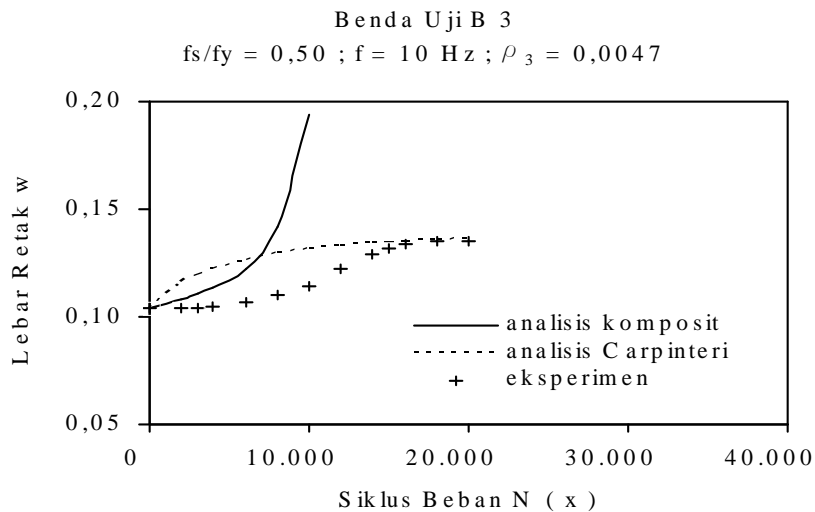
Pembebanan Monotonik

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis data (Suhardjono, 2006), maka rumusan lebar retak maksimum berdasarkan model matematik (MM) dapat ditulis



Gambar 4. Hubungan lebar retak vs. tegangan baja variasi rasio tulangan

Pembebanan Berulang



Gambar 5. Hubungan lebar retak vs. siklus beban (analisis dan eksperimen)

Pada pelat beton bertulang akibat beban berulang, lebar retak hasil analisis bila material diasumsi komposit meningkat dan berperilaku secara geometrik, sedangkan menurut analisis Carpinteri berperilaku secara eksponen seperti pada Gambar 5. Menurut peneliti perilaku lebar retak hasil eksperimen merupakan gabungan antara kedua proses peningkatan lebar retak yaitu peningkatan lebar retak : (1) akibat peningkatan tegangan tarik beton komposit, (2) akibat peningkatan tegangan slip antara baja dan beton. Nilai lebar retak relatif tetap seperti pada lebar retak awal (w_0) sampai pada siklus beban tertentu (N_0), kemudian meningkat secara linier positif, dan kemudian berubah menuju nilai tetap sampai pada siklus beban tertentu (N_f), ini merupakan indikator bahwa beton telah mencapai lebar retak lelah (w_f). Berkurangnya kekuatan lekat

antara baja dan beton akibat beban berulang menyebabkan tegangan slip dan lebar retak meningkat sampai mendekati nilai tetap yang selanjutnya semua kekuatan ditahan oleh tulangan baja. Kondisi ini menyatakan bahwa kekuatan dari lekatan telah mencapai lelah atau hilang.

Perilaku lebar retak w vs. siklus beban N diatas dapat digambarkan ke dalam **model tri – linier** (*tri linear model*) seperti pada Gambar 6 dan 7.

Rumusan lebar retak pada beban berulang dengan variasi tegangan baja f_s , rasio tulangan ρ , dan frekuensi beban f adalah sebagai berikut :

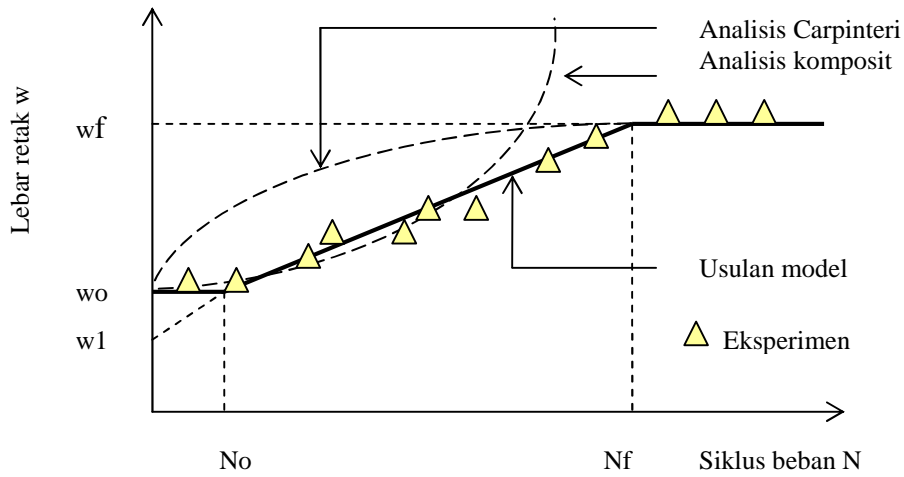
1. Tahap awal : $1 < N < N_0$
 $w = w_0$ (20.a)
2. Tahap peningkatan : $N_0 < N < N_f$

$$w = \frac{(wf - wo)}{(Nf - No)} (N - No) + wo \quad (20.b)$$

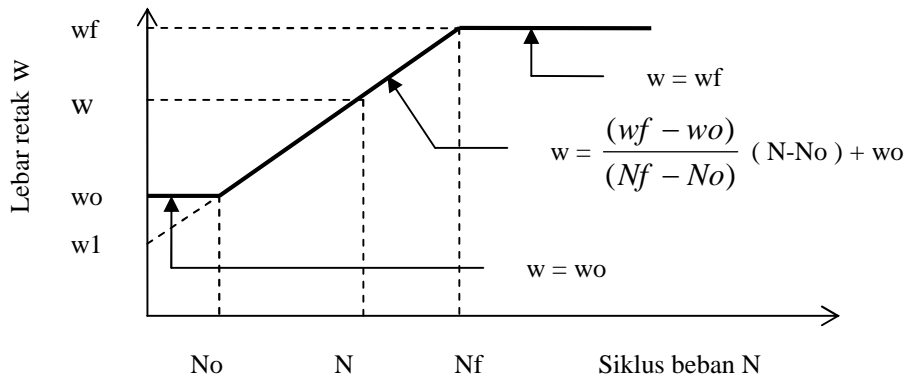
3. Tahap lelah lekatan : $Nf \leq N$
 $w = wf$

$$(20.c)$$

Model Perilaku Lebar Retak



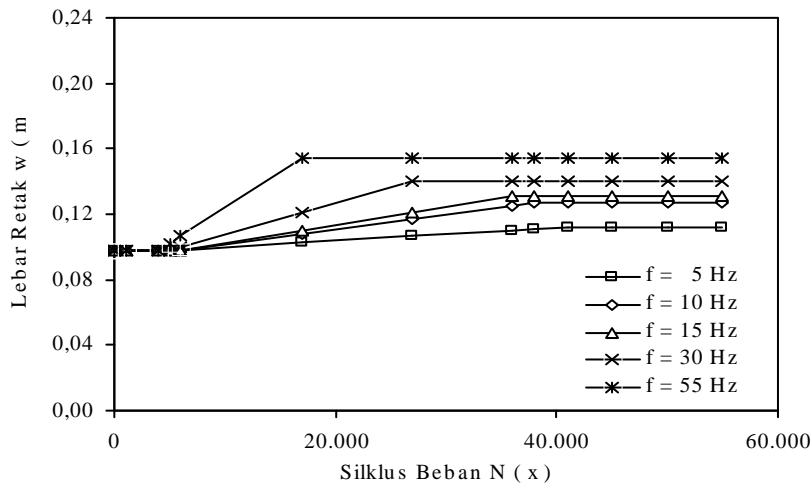
Gambar 6. Lebar retak vs siklus beban (usulan model)



Gambar 7. Lebar retak vs siklus beban (model tri linier usulan)

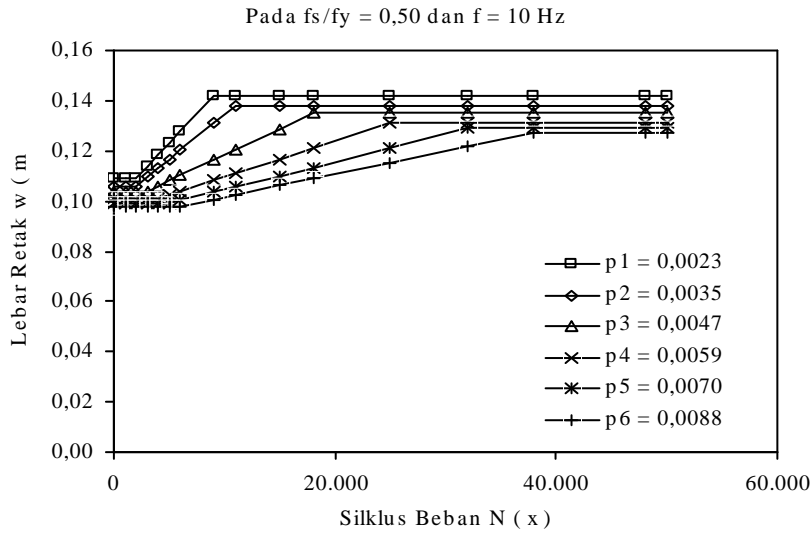
Pengaruh Frekuensi

Pada $f_s/f_y = 0,50$ dan $p_6 = 0,0088$



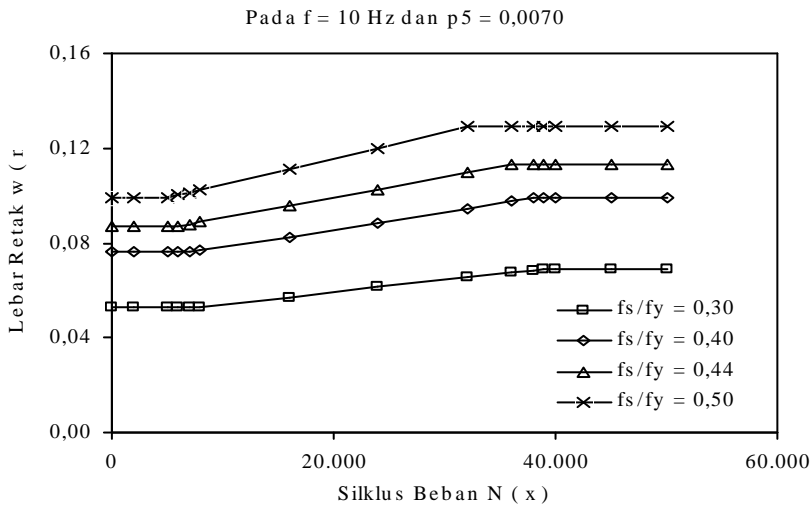
Gambar 8. Lebar retak vs siklus beban (variasi frekuensi)

Pengaruh Rasio Tulangan Pada Beban Berulang



Gambar 9. Lebar retak vs siklus beban (variasi rasio tulangan)

Pengaruh Rasio Tegangan



Gambar 10. Lebar retak vs siklus beban (variasi rasio tegangan)

Adapun pengaruh frekuensi, rasio tulangan dan rasio tegangan pada beban berulang dapat dilihat pada Gambar 8, 9 dan 10. Berdasarkan pembahasan di atas penulis merekomendasikan rumusan lebar retak berdasarkan analisis mekanika retakan perlu memasukkan rasio tegangan. Dan rasio lebar retak pada saat fatik lekatan dibandingkan lebar retak awal adalah $w_f/w_o = 1,30$

Rumusan lebar retak pada pembebanan berulang, sebagai fungsi dari rasio tegangan baja f_s/f_y , rasio tulangan, dan siklus beban N pada frekuensi beban $f = 10$ Hz. diberikan dibawah ini :

$$\begin{aligned}
 &1. \text{ Tahap awal} && : 1 < N < N_o \\
 &w = w_o \\
 &N_o = C.f_s/f_y + D && (21.a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &2. \text{ Tahap peningkatan} && : N_o < N < N_f \\
 &w = A.e^{B.f_s/f_y} (N - C.f_s/f_y - D) + w_o. && (21.b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &3. \text{ Tahap fatik lekatan} && : N_f < N \\
 &w = w_f \\
 &N_f = (G.f_s/f_y + H). N_o && (21.c)
 \end{aligned}$$

dengan: A, B, C, D, E, F, G, H = koefisien yang tergantung rasio tulangan (Tabel 1).

Contoh Perhitungan

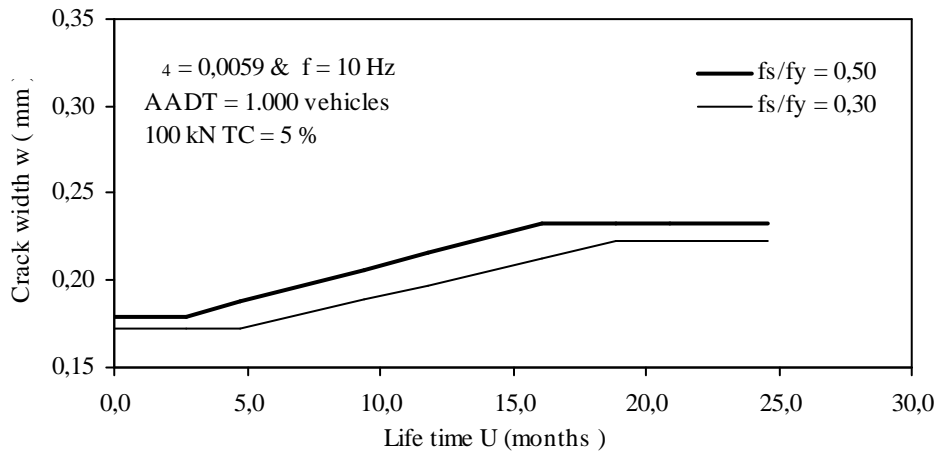
Pelat beton bertulang dari suatu jembatan jalan raya dengan batang tulangan ulir (diameter 16 mm). Angka tulangan adalah 0,0059. Frekuensi beban adalah 10 Hz (Barker dan Puckett, 1998) untuk jembatan jalan raya. Lalu-lintas harian rata-rata (AADT) adalah 1.000 kendaraan dan karakteristik truk (TC) adalah 5 %. Hubungan antara umur dan siklus beban untuk satu jalur adalah $N = 365 U$

$ADTT_{SL}$ (Barker dan Puckett, 1998). Berdasarkan lebar retak maksimum 0,30 mm sesuai dengan SNI 03-2847-2002 (SNI, 2002), hitung umur pelat beton bertulang pracetak seperti pada Gambar 10.

Berdasarkan Gambar 11, untuk $f_s/f_y = 0,50$ maka diperoleh umur pelat beton pracetak (kriteria fatik lekatan) adalah $U = 16,10$ bulan dengan lebar retak $w_{maks} = 0,233$ mm.

Tabel 1. Koefisien pelat yang tergantung rasio tulangan pada $f = 10$ Hz.

	A	B	C	D	E	F	G	H
0,0023	$10. 10^{-7}$	2,50	- 9.510	6.900	$6. 10^{-16}$	1,296	10,17	0,02
0,0035	$8. 10^{-7}$	2,86	- 11.380	8.500	$6. 10^{-16}$	1,296	9,96	0,40
0,0047	$5. 10^{-7}$	3,22	- 13.251	10.100	$6. 10^{-16}$	1,296	9,74	0,77
0,0059	$3. 10^{-7}$	3,58	- 15.121	11.700	$6. 10^{-16}$	1,296	9,53	1,15
0,0070	$2. 10^{-7}$	3,82	- 15.121	12.700	$6. 10^{-16}$	1,296	7,80	2,48
0,0088	$1. 10^{-7}$	4,04	- 15.121	13.700	$6. 10^{-16}$	1,296	7,14	2,62



Gambar 11. Lebar retak vs. umur dengan variasi f_s/f_y

KESIMPULAN

- Rumusan lebar retak maksimum pada beban monoton digunakan rumusan (18) yang dihasilkan dari analisis model matematik (MM). Adapun rumusan tersebut adalah sebagai berikut:

$$w_{maks} = 3,38. 10^{-4} \frac{(1 + 0,07.c)}{(1 + \frac{16.n.\rho}{3})} f_s \text{ (mm)} \quad (21)$$

- Rumusan lebar retak maksimum pada beban berlang digunakan rumusan (21) yang dihasilkan

dari analisis model tri-linier. Adapun rumusan **model tri-linier** tersebut adalah sebagai berikut:

Tahap awal : $1 < N \leq N_o$

$$w = w_o \quad (22.a)$$

$$N_o = C.f_s/f_y + D$$

Tahap peningkatan: $N_o < N < N_f$

$$w = A.e^{\frac{B.f_s/f_y}{N - C.f_s/f_y - D}} + w_o \quad (22.b)$$

Tahap fatik lekatan : $N_f \leq N$

$$w = w_f \quad (22.c)$$

$$N_f = (G.f_s/f_y + H) . N_o$$

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Bp. Rektor, Ketua Lemlit, dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah membantu penulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318-02, 2002, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318-02)*, ACI, First Printing, Detroit-Michigan, pp. 118-119.
- Baluch, M.H., Qureshy, A.B. & Azad, A.K., 1999, *Fatigue Crack Propagation in Plane Concrete, Proceedings*, ed SP Shah & SE Swartz. Springer Verlag, pp. 80-87.
- Barker, R.M. dan Puckett, J.A., 1998, *Design of Highway Bridges Based on AASHTO LRFD*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 155-157, 424-425.
- Bazant, Z.P. dan Planas, J., 1999, *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, CRC. Press, New York, pp. 430 - 433.
- Callister, W.D. Jr., 1998, *Materials Science and Engineering An Introduction*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc, New York, pp. 179 - 193, 203 -214.
- Carpinteri, A., 1998, *Applications of Fracture Mechanics to Reinforced Concrete*, Elsevier Applied Science, New York, pp. 349 - 355, 415 - 419.
- Karihaloo, B.L., 1998, *Fracture Mechanics and Structural Concrete*, First Published, Longman Scientific & Technical, Essex, England, pp. 109 - 113.
- Patrick, M. dan Wheeler, A., 2000, *Design Booklet RCB-2.1(1) Crack Control of Slabs Part 1 : AS 3600 Design, One Steel Reinforcing*, CCTR University of Western Sydney, pp. 16-18.
- Rehm, G dan Eligehausen, R., 1999, *Bond of Ribbed Bars Under High Cycle Repeated Loads*, *ACI Structural Journal*, Feb-Mar, pp. 297-304.
- SNI 03-2847-2002, 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, BSN, Puslitbang Teknologi Pemukiman, Balitbang Dept. Kimpraswil, Bandung, pp. 72 - 74.
- Soehardjono, A., 2006, *Pengaruh Angka Tulangan dan Beban Berulang terhadap Lebar Retak Pelat Beton Satu Arah*, *Disertasi Program Doktor*, Jurusan Teknik Sipil, FTSP - ITS, Surabaya.