

POLA RETAK PADA STRUKTUR PELAT JEMBATAN BETON BERTULANG

Soelarso

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
 Jl. Jenderal Sudirman Km.3 Cilegon 42435
 Email :soelarso_civiluntirta@yahoo.com

ABSTRAK

Pelat merupakan struktur yang menahan beban lentur dan diteruskan ke balok, sehingga pelat merupakan struktur yang menerima beban awal sebelum ke balok. Struktur pelat yang tipis harus cukup kaku menerima beban sehingga tidak terjadi kegagalan seperti halnya retak.

Penelitian ini berisikan pola retak yang terjadi pada pelat beton bertulang dimana dibandingkan hasil dari eksperimen dan penyelesaian secara numerik. Hasil dari perbandingan tersebut menunjukkan retak yang terjadi pada pelat merupakan retak lentur dengan lebar retak awal 0,05 mm dan terjadi pada beban 16 KN

Kata kunci : Pelat beton bertulang, retak, atena

ABSTRACT

Plates are structures that resist bending loads and forward it to beam, so the plate is a structure that receives the initial load before the beam. A thin plate structure has to be quite stiff so it does not accept the burden of failure such as cracks.

This research examined a pattern of cracks that occur in reinforced concrete slab and compared the results from experimental works and numerical resolution. The results of this comparison show that the cracks that occur on the plates are the flexural cracks (bending cracks) with the initial crack width 0.05 mm and occur at the load 16 KN

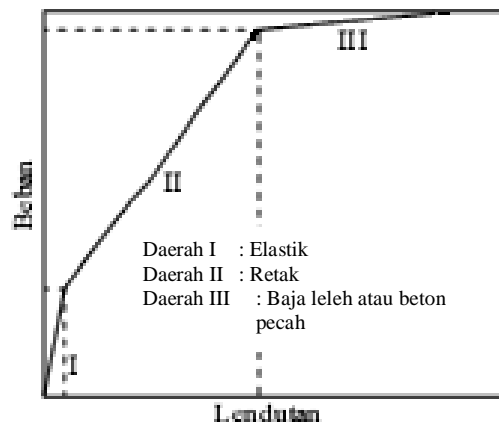
Keywords : Reinforced concrete slab, crack, atena

1. PENDAHULUAN

Struktur beton bertulang didesain untuk memenuhi kriteria keamanan (*safety*) dan layak pakai (*serviceability*). Untuk memenuhi kriteria keamanan dan layak pakai, maka besarnya retak dan lendutan struktur pada kondisi beban kerja harus dapat diestimasi dan memenuhi kriteria tersebut. Dalam mendesain struktur beton bertulang, perkiraan besarnya beban runtuh (batas) sangat penting. Selain nilai absolute beban yang menyebabkan keruntuhan, maka perilaku struktur saat runtuh juga perlu diketahui. Perilaku struktur tersebut diantaranya pola retak dan lebar retak beton bertulang pada saat menerima beban sampai dengan beban runtuh.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Beton bertulang merupakan material heterogen yang disusun oleh semen, agregat halus dan agregat kasar yang mempunyai propertis mekaniknya bervariasi dan sulit terdefinisi dengan pasti. Sehingga untuk memudahkannya dalam menganalisis maka umumnya dianggap sebagai material yang homogen.



Gambar 1. Perilaku Beban-Lendutan Struktur Beton Bertulang

Perilaku keruntuhan dapat dibagi dalam tiga tahapan, yaitu : elastis penuh (belum retak), tahapan mulai terjadi retak-retak dan tahapan plastis (leleh pada baja atau beton pecah). Respons non-linier disebabkan dua hal utama yaitu : keretakan beton di daerah tarik dan tulangan mengalami leleh atau beton pecah (*crushing*) pada daerah desak. Selain itu juga disebabkan perilaku lain yang terkait, misalnya *bond-slip* antara tulangan baja dan

beton disekitarnya, aksi penguncian agregat pada daerah retak dan akhirnya aksi angkur (*dowel action*) dari tulangan yang melintas disekitar retak. Perilaku sebagai fungsi waktu, misalnya *creep*, *shrinkage* dan variasi temperatur juga menyumbang perilaku non-linier. Kecuali itu, hubungan tegangan-regangan beton tidak hanya bersifat non-linier, tetapi juga berbeda antara beban tekan dan tarik, sifat mekaniknya tergantung dari umur waktu dibebani, kondisi lingkungan (suhu sekeliling dan kelembaban).

a. Model Konstitutif Retak-Plastis

Model Retak-Plastis mengkombinasikan perilaku model *konstitutif* untuk tarik (pematahan atau peretakan) dan tekan (plastik). Model retak ini berdasar pada *classical orthotropic smeared crack formulation* dan *crack bend model*. Model ini memakai kriteria keruntuhan Rankine, *exponential softening*, dan model ini dapat digunakan sebagai model retak putar/rotasi atau tetap. Model plastis *hardening/softening* adalah didasarkan Menetrey-Willam atau kegagalan permukaan Drucker-Prager. Kedua model memakai algoritma balik untuk pengintegrasian persamaan konstitutif. Perhatian khusus diberikan kepada pengembangan dari suatu algoritma untuk kombinasi dari dua model. Algoritma yang dikombinasikan adalah didasarkan pada suatu penggantian berulang, dan hal ini memungkinkan kedua model untuk dikembangkan dan dirumuskan secara terpisah. Algoritma mampu menangani kasus ketika kegagalan permukaan kedua model aktif tetapi juga ketika perubahan fisik seperti terjadi retak penutup. Model ini dapat digunakan untuk mensimulasi retak beton, kehancuran beton akibat pengekanan yang tinggi, dan retak penutup dalam kaitan dengan kehancuran

1) Formulasi Model Material

Formulasi model material didasarkan pada dekomposisi regangan kedalam komponen elastis e_{ij}^e , plastis e_{ij}^p dan retak e_{ij}^f (De Borst 1986).

$$e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^p + e_{ij}^f \tag{1}$$

Hubungan tegangan yang baru kemudian dapat dirumuskan menjadi:

$$\sigma_{ij}^n = \sigma_{ij}^{n-1} + E_{ijkl}(\Delta \varepsilon_{kl}^e - \Delta \varepsilon_{kl}^p - \Delta \varepsilon_{kl}^f) \tag{2}$$

Dimana kenaikan regangan plastis $\Delta \varepsilon_{ij}^p$ dan regangan retak $\Delta \varepsilon_{ij}^f$ harus dievaluasi berdasarkan pada model material yang dipakai.

2) Model Retak Rankine untuk Retak Beton
Kriteria Rankine dipakai untuk retak beton $F_i^f = \sigma_{ii}^t - f_{ii}^t \leq 0$. Ini

diasumsikan bahwa regangan dan tegangan dikonversi ke dalam arah material yang dalam kasus model retak rotasi/puntir berhubungan dengan arah prinsipal, dan dalam kasus model retak tetap, diberikan bahwa arah prinsipal pada serangan retak. Oleh karena itu, σ_{ii}^t menunjukkan tegangan percobaan dan f_{ii}^t adalah kekuatan tarik material pada arah *i*. Simbol utama menunjukkan kuantitas pada arah material. Status tegangan percobaan dihitung menggunakan *elastic predictor*.

$$\sigma_{ii}^t = \sigma_{ii}^{n-1} + E_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl} \tag{3}$$

Jika tegangan percobaan tidak memenuhi persamaan 3, kenaikan regangan retak pada arah *i* dapat dihitung memakai asumsi bahwa pernyataan tegangan final harus memenuhi persamaan 4.

$$F_i^f = \sigma_{ii}^t - f_{ii}^t = \sigma_{ii}^t - E_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl}^f - f_{ii}^t = 0 \tag{4}$$

Persamaan ini dapat disederhanakan dengan asumsi bahwa kenaikan regangan retak adalah searah dengan kegagalan permukaan, dan bahwa selalu hanya satu kegagalan permukaan yang dipilih. Untuk kegagalan permukaan *k*, kenaikan regangan retak harus mempunyai bentuk

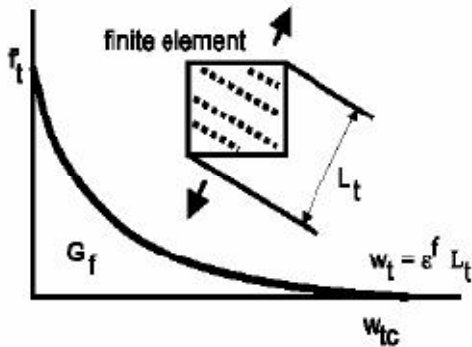
$$\Delta \varepsilon_{ij}^f = \Delta \lambda \frac{\partial F_k^f}{\partial \sigma_{ij}} = \Delta \lambda \delta_{ik} \tag{5}$$

Setelah dimasukkan kedalam persamaan 5 sebuah formula untuk kenaikan pengali keretakan λ didapatkan.

$$\Delta \lambda = \frac{\sigma_{kk}^t - f_{kk}^t}{E_{kkkk}} = \frac{\sigma_{kk}^t - f_{kk}^t (w_k^{\max})}{E_{kkkk}} \text{ dan } w_k^{\max} = L_t \left(\varepsilon_{kk}^t + \Delta \lambda \right) \tag{6}$$

Persamaan ini dapat diselesaikan dengan iterasi karena untuk material *softening*

nilai kekuatan tarik tertentu $f_t'(w_k^{\max})$ adalah fungsi dari terbukanya retak w .



Gambar 2. Softening tarik dan panjang karakteristik

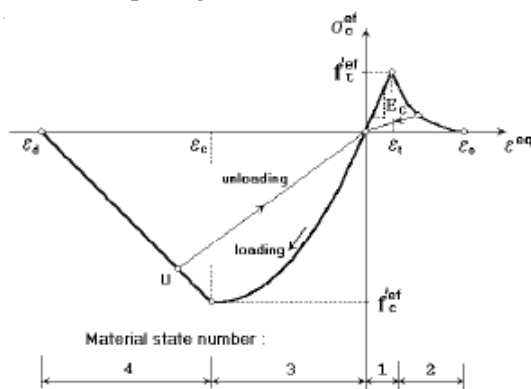
b. Hubungan Regangan–Tegangan Beton

1) Hukum Uniaksial Ekuivalen

Perilaku nonlinier beton pada pernyataan tegangan biaksial diuraikan dengan cara tegangan efektif σ_c^{ef} , dan regangan uniaksial ekuivalen ϵ^{eq} . Tegangan efektif adalah umumnya dalam tegangan prinsipal. Regangan ekuivalen uniaksial diperkenalkan untuk menghilangkan efek poisson pada pernyataan tegangan bidang.

$$\epsilon^{eq} = \frac{\sigma_{ci}}{E_{ci}} \tag{7}$$

Regangan uniaksial ekuivalen dapat dianggap sebagai regangan yang akan dihasilkan oleh tegangan σ_{ci} dalam pengujian uniaksial dengan modulus E_{ci} dengan arah i . Dalam asumsi ini, nonlinier mewakili kerusakan yang disebabkan hanya *governing stress* σ_{ci} . Diagram regangan tegangan uniaksial ekuivalen yang lengkap untuk beton dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Hukum regangan tegangan uniaksial untuk beton

Jumlah bagian-bagian diagram pada gambar 3 (*material state number*) adalah dipakai dalam hasil analisis untuk menandai status kerusakan beton.

Unloading adalah fungsi linier sampai dengan origin. Sebuah contoh titik *unloading* U diperlihatkan pada gambar 3. Karena itu hubungan tegangan σ_c^{ef}

dan regangan ϵ^{eq} tidak unik dan tergantung dari sejarah pembebanan. Perubahan dari pembebanan hingga tidak dibebani terjadi ketika kenaikan regangan efektif mengubah tanda. Jika pembebanan ulang yang berikutnya terjadi aliran tidak terbebani linier terjadi hingga titik akhir pembebanan U tercapai lagi. Kemudian fungsi pembebanan dilanjutkan.

Hukum regangan-tegangan uniaksial ekuivalen mewakili pernyataan tegangan biaksial.

Modulus secant dihitung sebagai berikut :

$$E_c^s = \frac{\sigma_c}{\epsilon^{eq}} \tag{8}$$

Modulus tangen E_c^t dipakai dalam matrik material D_c untuk pembentukan matrik kekakuan elemen untuk solusi iterasi. Modulus tangen adalah kemiringan kurva regangan tegangan pada regangan yang diberikan. Nilai ini selalu positif. Untuk kasus ketika kemiringan kurva kurang dari nilai minimum E_{min}^t nilai modulus tangen ditetapkan sebesar $E_c^t = E_{min}^t$. Hal ini terjadi pada bagian softening dan dekat dengan puncak tekan.

2) Tarik Sebelum Retak

Perilaku beton pada tarik tanpa retak diasumsikan elastik linier, E_c adalah modulus elastis awal beton, $f_t'^{ef}$ adalah kuat tarik yang diperoleh dari fungsi kegagalan biaksial,

$$\sigma_c^{ef} = E_c \epsilon^{eq}, 0 \leq \sigma_c \leq f_t'^{ef} \tag{9}$$

3) Tarik Setelah Retak

Dua tipe rumus dipakai untuk pembukaan retak:

a) Model retak fiksi berdasarkan pada hukum pembukaan retak dan energi retak. Rumus ini cocok untuk memodelkan pertumbuhan retak pada

beton. Rumus ini dipakai dengan kombinasi dengan retak band.

- b) Hubungan regangan tegangan dalam titik material. Formula ini tidak cocok untuk kasus pertumbuhan retak normal pada beton dan

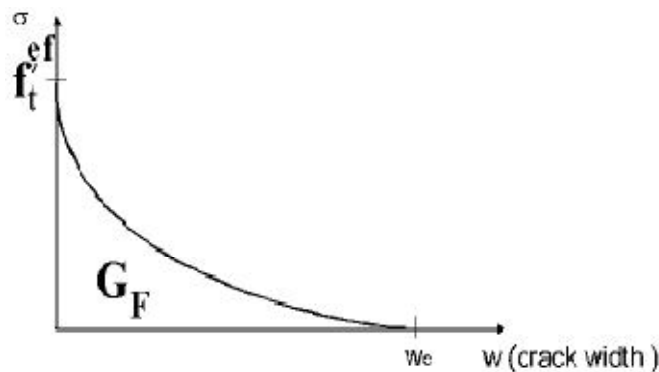
$$\frac{\sigma}{f_t^{ef}} = \left\{ 1 + \left(c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right\} \exp \left(-c_2 \frac{w}{w_c} \right) - \frac{w}{w_c} \left(1 + c_1^3 \right) \exp(-c_2), w_c = 5.14 \frac{G_f}{f_t^{ef}} \tag{10}$$

dimana w adalah pembukaan retak, w_c adalah pembukaan retak pada pelepasan seluruhnya tegangan, σ adalah tegangan normal pada retak (kohesi retak). Nilai dari konstanta $c_1 = 3$, $c_2 = 6.93$. G_f adalah energi retak yang diperlukan untuk menciptakan unit luas retak tegangan bebas, f_t^{ef} adalah kekuatan tarik efektif yang diperoleh dari fungsi keruntuhan.

seharusnya dipakai pada kasus-kasus tertentu.

- 4) Hukum Pembukaan Retak Eksponensial
Fungsi pembukaan retak diperoleh secara percobaan oleh Hordijk (1991).

Lebar retak w dihitung sebagai lendutan yang membuka retak total dalam band retak. $w = \epsilon_{cr} L_t'$ dimana ϵ_{cr} adalah regangan pembuka retak yang nilainya sama dengan regangan yang searah dengan arah retak pada pernyataan retak setelah pelepasan tegangan berakhir.



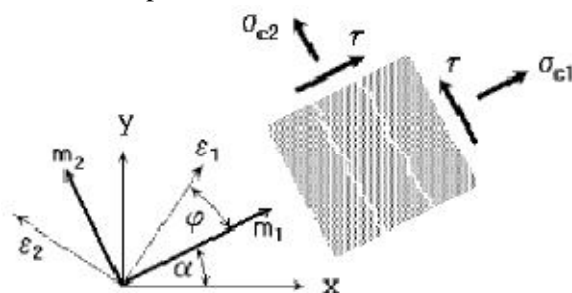
Gambar 4. Hukum pembukaan retak eksponensial

c. Model Smeared Cracks

1. Fixed Crack Model

Pada model *fixed cracks* (Cervenka 1985, Darwin 1974) arah retak diberikan oleh arah tegangan principal pada saat permulaan retak.

Selama pembebanan selanjutnya arah ini adalah tetap dan mewakili sumbu orthotropis material.

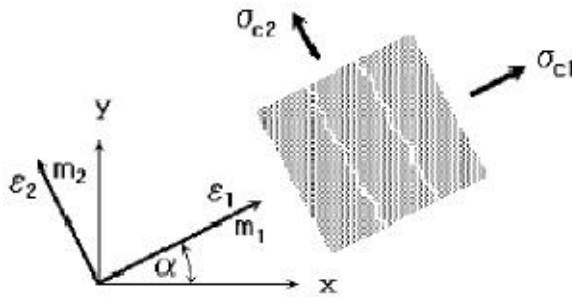


Gambar 5. Model *fixed crack*.

Arah tegangan dan regangan principal berhimpit dalam beton tak retak karena asumsi isotropis pada komponen beton. Setelah retak, orthotropis muncul. Sumbu lemah material m_1 adalah tidak sejajar dengan arah retak, sumbu kuat m_2 sejajar dengan retak.

2. Rotated Crack Model

Pada model *rotated crack* (Crisfield 1989), arah tegangan principal berhimpit dengan arah regangan principal maka regangan geser tidak terjadi pada permukaan retak dan hanya dua komponen tegangan normal harus didefinisikan, seperti terlihat pada gambar 6.



Gambar 6. Model *rotated crack*

Jika sumbu regangan principal berputar selama pembebanan arah retak akan berputar juga. Untuk menjamin *co-axiality* regangan principal dengan sumbu material maka modulus geser tangent G_t dihitung sesuai dengan Crisfield 1989 sebagai berikut

$$G_t = \frac{\sigma_{c1} - \sigma_{c2}}{2(\epsilon_1 - \epsilon_2)} \tag{11}$$

d. Matrik Kekakuan Material

1. Beton Belum Retak

Matriks kekakuan material untuk beton yang belum retak mempunyai bentuk sebuah matrik material isotropis. Matriks ini dapat ditulis dalam sistem koordinat global x dan y .

$$D_c = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{0} \end{bmatrix} \tag{12}$$

Pada persamaan diatas E adalah modulus elastis beton yang diperoleh dari hukum uniaksial ekuivalen. Poisson's rasio ν adalah konstan.

2. Beton Retak

Untuk beton retak matriks mempunyai bentuk matriks elastis untuk material orthotropis. Matriks dirumuskan dalam sistem koordinat $m1, m2$ seperti pada gambar 5 dan 6 yang berhimpit dengan arah retak. Sistem koordinat lokal mengacu pada *superkrips L*. Arah 1 adalah searah dengan retak dan arah 2 adalah sejajar dengan arah retak. Definisi

dari konstanta elastis untuk material orthotropis dalam pernyataan tegangan bidang mengikuti hubungan fleksibilitas:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau \end{Bmatrix} \tag{13}$$

Pertama-tama kita eliminasi rasio Poisson orthotropik untuk beton retak karena mereka umumnya tidak diketahui. Untuk itu kita memakai hubungan simetris $\nu_{12}E_2 = \nu_{21}E_1$. Oleh karena itu hanya ada konstanta elastis independent E_1, E_2, ν_{21} . Asumsikan bahwa $\nu_{21} = \nu$ adalah rasio Poisson untuk beton tidak retak dan memakai hubungan simetri, kita memperoleh:

$$\nu_{12} = \frac{E_{12}}{E_2} \nu \tag{14}$$

Matriks kekakuan D_c^L dianggap sebagai matriks fleksibilitas invers dari persamaan 15

$$D_c^L = H \begin{bmatrix} \xi & \nu\xi & 0 \\ \nu\xi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$\xi = \frac{E_1}{E_2}, H = E_1(1 - \xi\nu^2) \tag{16}$$

Pada hubungan diatas E_2 harus bukan nol. Jika E_2 sama dengan nol dan E_1 tidak sama dengan nol maka formula alternatif dipakai dengan

memakai parameter invers $\frac{1}{\xi} = \frac{E_2}{E_1}$. Pada

kasus bahwa modulus elastik sama dengan nol, matrik D_c^L tertulis sama dengan matrik nol. Matriks D_c^L ditransformasikan ke dalam sistem koordinat global memakai matriks transformasi T_ϵ

$$D_c = T_\epsilon^T D_c^L T_\epsilon \tag{17}$$

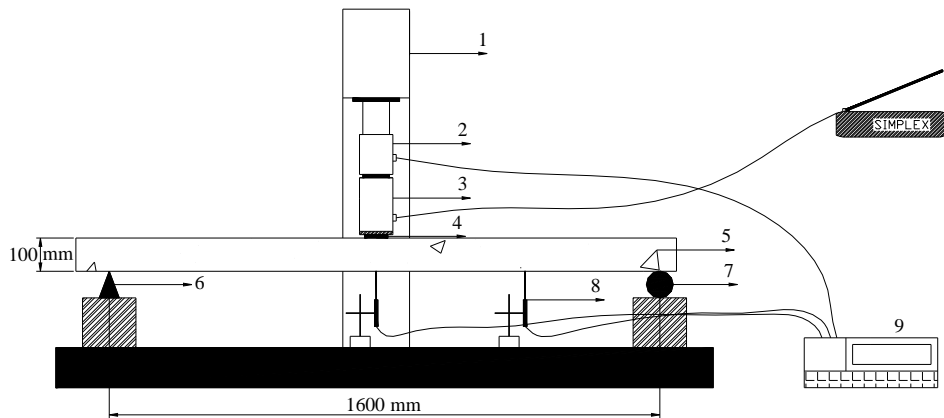
$$\text{dimana } T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)^2 & \sin(\alpha)^2 & 2 \cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha)^2 & \cos(\alpha)^2 & -2 \cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha)\sin(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) & \cos(\alpha)^2 - \sin(\alpha)^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Sudut α adalah antara sumbu global x dan sumbu material pertama m_1 .

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pengujian benda uji pelat diletakkan pada *loading frame* dengan tumpuan sendi dan rol pada kedua ujungnya. Pembebanan dilakukan dengan menggunakan *hidraulic jack* yang berada ditengah bentang pelat jembatan. Pembebanan dilakukan secara bertahap dengan interval kenaikan sebesar 2 KN

sampai kuat batas pelat jembatan tersebut. Kondisi tersebut ditandai dengan tidak adanya peningkatan beban meskipun *hidraulic jack* terus dipompa, sedangkan lendutan terus bertambah. *Set up* alat dan pembebanan dari benda uji plat jembatan dapat dilihat pada gambar 7.

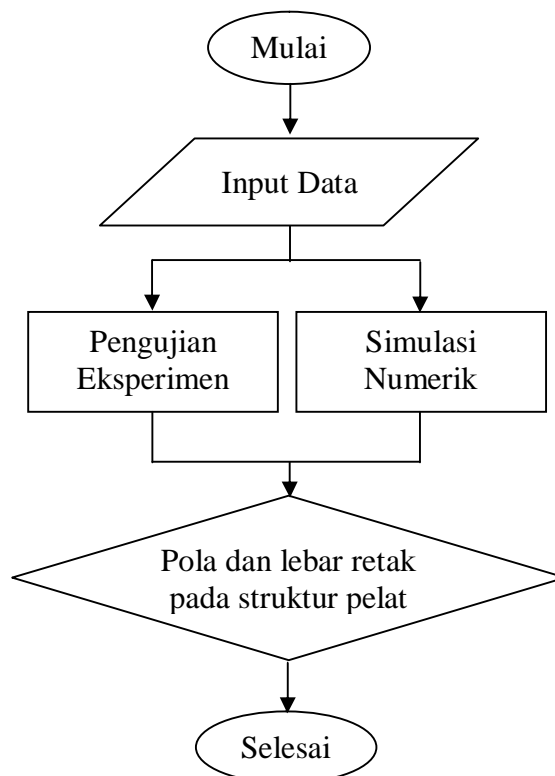


Keterangan :

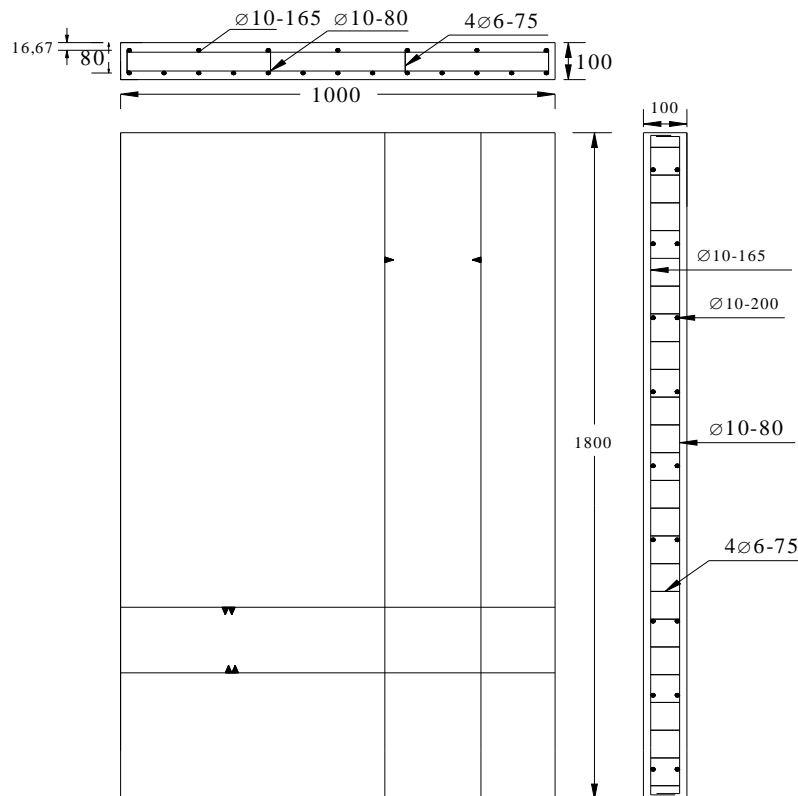
- | | |
|-----------------------------|------------------|
| 1. Loading Frame | 6. Tumpuan sendi |
| 2. Load Cell | 7. Tumpuan rol |
| 3. Hidraulic jack | 8. LVDT |
| 4. Pembebanan | 9. Data logger |
| 5. Benda uji pelat jembatan | |



Gambar 7. Set up pengujian benda uji



Gambar 8. Bagan alir penelitian



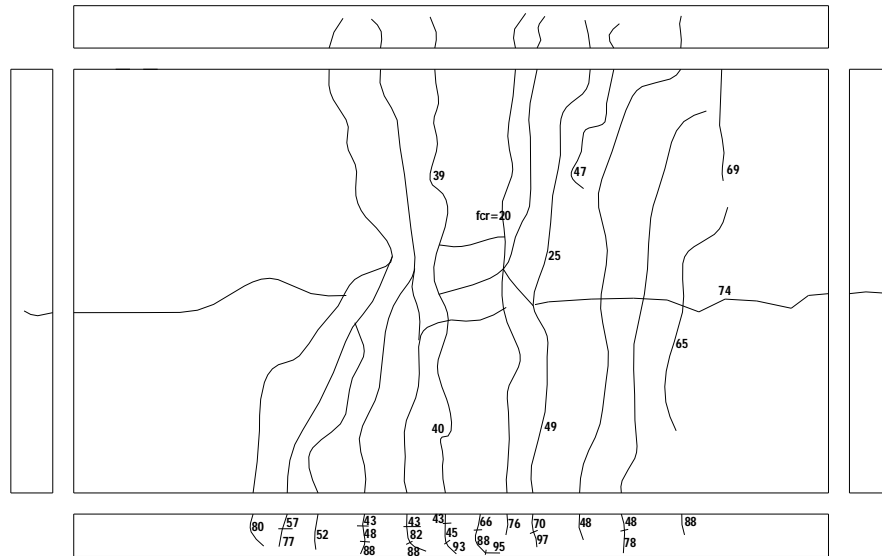
Gambar 9. Benda Uji Pelat Beton Bertulang

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

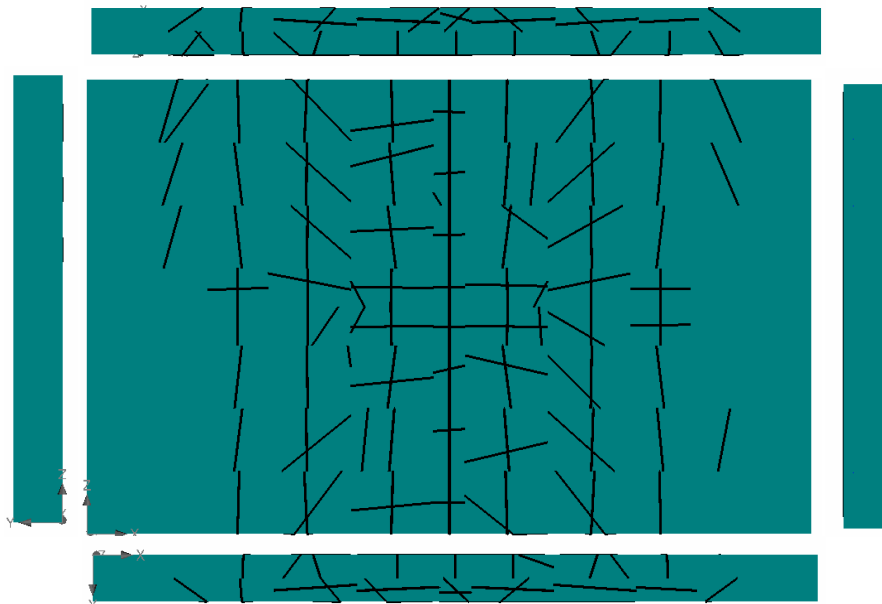
Pada pengujian lentur ini diukur lebar retak yang terjadi pada setiap peningkatan beban dimulai dengan retak awal hingga sampai pada beban maksimum benda uji. Pengamatan lebar retak dilakukan menggunakan penggaris pembaca *crack*, yang mana nilainya mendekati ketelitian *microcrack*. Pengukuran lebar retak dilakukan pada retak terbesar dibagian tarik beton didaerah lapangan. Pada setiap *crack* baru,

penandaan dilakukan terhadap letak dan nomor *crack* menunjukkan step beban.

Retak pertama terjadi pada saat beban 16 KN dimana lebar retak sebesar 0,05 mm. Ketika benda uji mencapai kondisi ultimit lebar retak berkisar 1,663 mm. Untuk lebih jelasnya pola retak dan grafik hubungan beban dengan lebar retak dapat dilihat pada gambar 10, gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 10. Pola Retak Pengujian Eksperimen

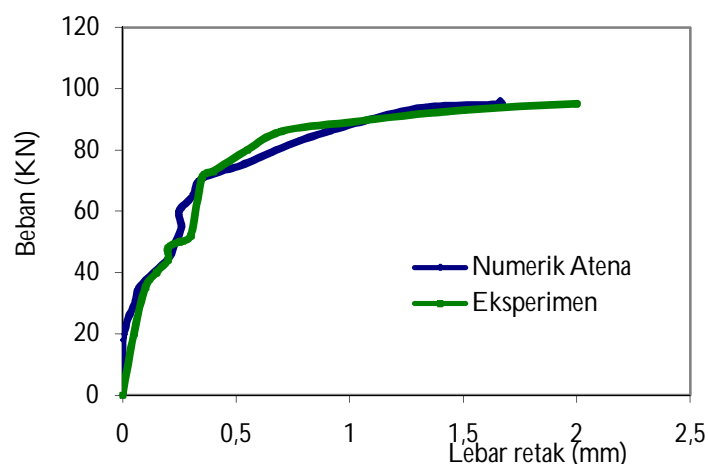


Gambar 11. Pola Retak Simulasi Numerik

Pemodelan numerik juga memberikan pola retak yang terjadi selama iterasi berlangsung. Hasil pola retak dari pemodelan numerik untuk pelat dapat dilihat pada gambar 11, dan pola retak pemodelan numerik dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen yang ada pada gambar 10. Pada pola retak dibawah dapat dilihat bahwa retak yang terjadi

merupakan kerusakan lentur, dimana retak terjadi pada arah lentur yaitu daerah lapangan dengan lebar maksimum retak sebesar 1,663 mm.

Hubungan lebar retak dan beban dapat dilihat pada gambar 12, dimana hasil eksperimen dan hasil dari pemodelan numerik memiliki hasil yang sama.



Gambar 12. Hubungan beban dengan lebar retak pelat

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pembahasan disimpulkan bahwa :

1. Hasil pola dan lebar retak eksperimen dan pemodelan numerik memiliki hasil yang hampir sama
2. Retak awal terjadi pada beban 16 KN dimana lebar retaknya sebesar 0,05 mm
3. Pola retak merupakan retak lentur yang terjadi pada tengah bentang

6. DAFTAR PUSTAKA

Cervenka, *Computer Simulation of Failure of Concrete Structure for Practice*, E-328, Prague
 Cervenka, 1996, *Computer Simulation as Design Tool for Concrete Structures*,

ICCE-96, The International Conference in Civil Engineering on Computer Applications, Research and Practice, 6-8 April 1996, Bahrain

Cervenka&Niewald, 2003, *ATENA Program Documentation: User's Manual for ATENA – GID interface*, Cervenka Consulting, Prague

Cervenka, 2007, *ATENA Program Documentation* :Cervenka Consulting

Foley, C.M. danBuckhouse, E.R., 1998, *Strengthening Existing Reinforced Concrete Beams or Flexure Using Bolted External Structural Steel Channels*, College of Engineering Departement of Civil & Environmental Engineering Marquette University.