

DEFLECTION PREDICTION USING STRUT-AND-TIE MODEL WITH AN EFFECTIVE CROSS-SECTIONAL AREA APPROACH

MEMPREDIKSI LENDUTAN MENGGUNAKAN MODEL *STRUT-AND-TIE* DENGAN PENDEKATAN LUAS TAMPANG EFEKTIF

Tavio and F. Hartoyo

Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Kampus ITS Keputih Sukolilo Surabaya 60111. E-mail: tavio@its.ac.id

ABSTRACT

In the reinforced concrete design, one of the serviceability requirements is the deflection control. Deflection is necessary to be limited due to the functional reasons and aesthetic requirements. The existing concrete codes, such as ACI 318-02, and SNI 03-2847-2002, provide an empirical formula to predict the deflection of reinforced concrete elements. The formula was mainly derived from the experimental data. Hence, it is deemed necessary to propose a more conceptual approach for predicting the actual deflections occurred in the concrete elements. In this paper, a strut-and-tie model which taking into account the effects of cracking is proposed for predicting the deflections in the reinforced concrete beams. The effects of cracking are considered using an effective cross-sectional area approach. The validity of this model is verified by the experimental data obtained from literature.

Keywords : deflection; effective cross-sectional area; reinforced concrete; serviceability; strut-and-tie model.

ABSTRAK

Dalam desain beton bertulang, salah satu persyaratan serviceability adalah kontrol defleksi. Defleksi perlu dibatasi karena alasan fungsional dan persyaratan estetika. Peraturan beton yang ada, seperti ACI 318-02, dan SNI 03-2847-2002, memberikan rumus empiris untuk memprediksi defleksi elemen beton bertulang. Rumus tersebut terutama berasal dari data eksperimen. Oleh karena itu, dipandang perlu untuk mengusulkan pendekatan yang lebih konseptual untuk memprediksi defleksi yang sebenarnya terjadi pada elemen beton. Dalam tulisan ini, model *strut-and-tie* yang memperhitungkan efek retak diusulkan untuk memprediksi defleksi pada balok beton bertulang. Efek dari retak dipertimbangkan menggunakan pendekatan luas penampang-lintang yang efektif. Validitas model ini diverifikasi oleh data eksperimen yang diperoleh dari literatur.

Kata-kata Kunci: defleksi; efektif luas penampang; beton bertulang, *serviceability*, *strut-and-tie model*.

PENDAHULUAN

Tujuan perhitungan tegangan di dalam perencanaan beton bertulang adalah untuk meyakinkan bahwa struktur cukup kuat untuk melaksanakan fungsinya. Selain cukup kuat menahan beban, struktur juga harus memenuhi kriteria kondisi layan (*serviceability*). Di dalam kondisi layan itu dibahas masalah lendutan dan lebar retak maksimum yang boleh terjadi.

Pada struktur beton bertulang, lendutan yang berlebihan dari balok boleh jadi untuk balok itu sendiri tidak begitu merugikan, akan tetapi pengaruhnya pada komponen yang dipikul oleh balok yang melendut sering menentukan besar lendutan yang diperbolehkan. Lendutan yang berlebihan dapat menjadikan sistem menjadi tidak dapat dipakai dan menimbulkan ketidaknyamanan bagi penggunaannya. Bila unsur-unsur penahan lentur yang memikul atau yang dihubungkan dengan dinding pemisah dan konstruksi lain ada kemungkinannya untuk rusak akibat lendutan yang besar, maka perhitungan lendutan akibat beban kerja biasanya diperlukan.

Lendutan yang masih dapat diterima tergantung dari banyak faktor, antara lain jenis bangunan (sekolah, gudang, pabrik, tempat tinggal, dsb), adanya langit-langit yang dipilester, jenis dan pengaturan dari partisi, kepekaan dari peralatan terhadap lendutan, dan besar maupun lama dari pembebanan hidup.

Model *strut-and-tie* telah digunakan untuk merancang struktur beton selama bertahun-tahun. Zhu, et al. (Mosley, 1989) memperkenalkan penggunaan model *strut-and-tie* untuk memprediksi lebar retak dengan memperhatikan kondisi kompatibilitas. Model yang diusulkan, yaitu *the compatibility-aided strut-and-tie model* (CASTM), disahkan untuk memprediksi lebar retak diagonal pada sudut tepian belokan balok T terbalik. Prediksi CASTM telah cocok dengan hasil tes yang sangat baik, terutama dalam kisaran layanan beban.

Dalam makalah ini, diusulkan untuk menerapkan model *strut-and-tie* untuk memprediksi defleksi dengan memperhatikan efek retak. Untuk menjelaskan efek retak I model, formula luas penampang efektif diusulkan. Kalibrasi dan perumusan model didukung oleh data uji dari literatur. Metode rasional diusulkan berdasarkan model *strut-and-tie* dapat digunakan untuk memprediksi defleksi balok pada bermacam-macam tahapan beban.

PENDEKATAN PENELITIAN

Sebuah prosedur rasional berdasarkan *strut-and-tie* model diusulkan untuk memprediksi defleksi balok beton bertulang. Karena rasionalitasnya, model ini berlaku untuk berbagai jenis balok. Karena menggunakan gulungan statis determinate, model ini juga mudah untuk memahami dan menganalisis. Persamaan desain defleksi yang dihasilkan memiliki arti fisik yang lebih jelas dan dapat lebih mudah diinterpretasikan oleh insinyur desain.

GAMBARAN TENTANG MODEL STRUT-AND-TIE

"*Strut and Tie-Model*" berawal dari "*Truss-analogi-model*" yang pertama kali dicetuskan oleh Hennebique lebih dari satu abad yang lampau. Model ini kemudian diperkenalkan oleh Ritter (1899), Morsch (1902).

Sebenarnya, ide dasar dari model *strut and tie* ini adalah adanya aliran tegangan yang timbul akibat beban luar yang dibebani. Dalam Gambar 1 ditunjukkan bahwa akibat beban F, balok mengalami tegangan tarik di bagian serat bawah. Hal ini dibuktikan dengan munculnya retak lentur di tengah bentang.

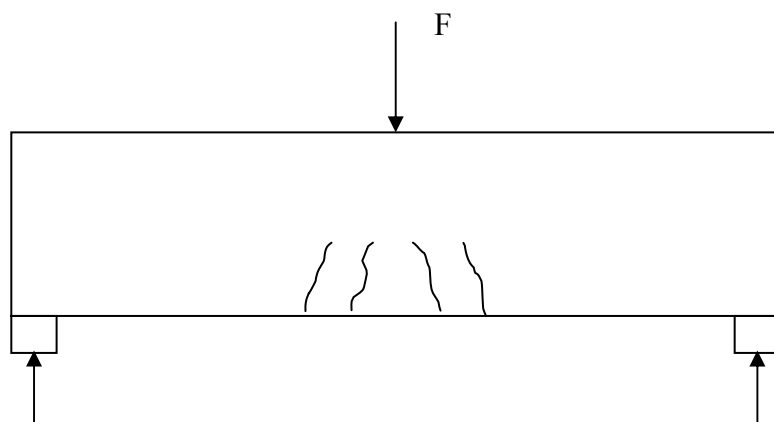
Berdasarkan analisa, seperti pada analisa elemen hingga kita dapat menurunkan kontur tegangan pada balok akibat beban F (Gambar 2). Tegangan yang diperoleh merupakan tegangan normal atau tegangan utama. Kontur tegangan menghubungkan daerah yang sama tegangannya. Berdasarkan kontur tegangan, dapat

ditentukan aliran tegangan yang terjadi. Aliran tegangan ini kemudian disebut *trayektori tegangan*.

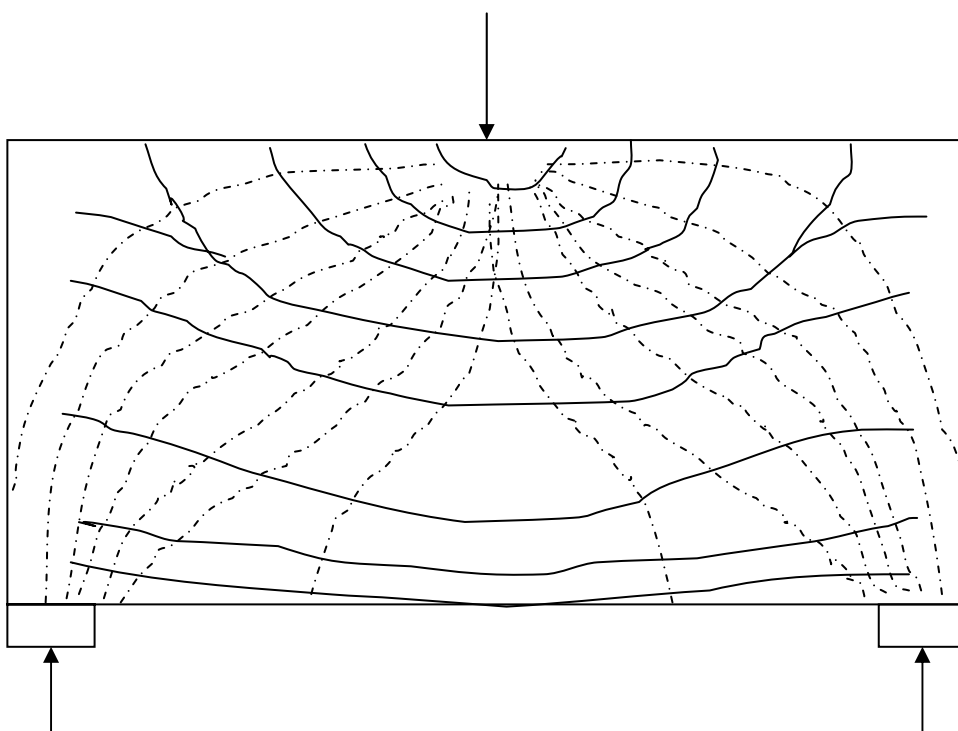
Dari trayektori tegangan kita dapat memperoleh dua informasi yaitu: jenis trayektori tegangan yaitu trayektori tegangan tekan (*compressive stress trajectories*) yang disimbolkan dengan garis putus-putus (-----) dan trayektori tegangan tarik (*tensile*

stress trajectories) yang disimbolkan dengan garis penuh (—) serta arah aliran tegangan (Gambar 3).

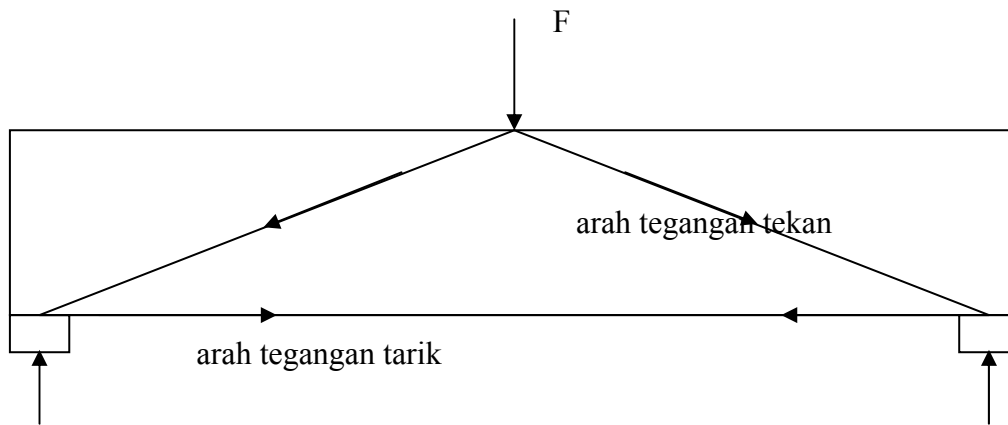
Dengan memperhatikan pola dan arah tegangan yang terjadi, dicoba untuk menganalogikan aliran itu dengan menggunakan rangka batang atau *truss* (Gambar 4 dan 5).



Gambar 1. Pola Retak pada Balok Akibat Beban F



Gambar 2. Kontur Tegangan



Gambar 3. Arah Aliran Tegangan

Rangka batang tersebut berupa elemen struktur yang hanya bisa menerima gaya pada arah aksial. Batang yang menerima gaya aksial tekan disebut *strut* dan yang menerima gaya aksial tarik disebut *tie*. Sedangkan titik pertemuan antar batang disebut *nodal*.

Rangka batang yang diusulkan bisa terdiri dari batang tekan dan tarik, sejajar dengan arah memanjang dari balok, atau batang tekan diagonal dengan sudut tertentu dan batang tarik vertikal. Batang tekan dan batang tarik yang sejajar diperlukan untuk memikul momen lentur, yang kita peroleh dari standar penulangan lentur. Batang tarik vertikal adalah penulangan geser yang dipasang untuk memikul gaya lintang, sedangkan batang tekan diagonal akan dipikul oleh betonnya sendiri.

Sampai saat ini belum ada kepastian yang jelas mengenai berapa besarnya sudut antara batang tekan diagonal dengan batang tarik horisontal dalam *strut-tie*. Beberapa peneliti dan peraturan memberikan kisaran sudut yang dapat dibuat seperti:

1. Rogowsky, Ramirez, dan Mac Gregor: $25^{\circ} < \theta < 65^{\circ}$
2. Thurliman & Swiss code (1976): $0,5 < \tan \theta < 2$ atau $26,6^{\circ} < \theta < 63,4^{\circ}$
3. CEB-FIP Code (1978): $31^{\circ} < \theta < 59^{\circ}$
4. ACI 318-02: $\theta > 25^{\circ}$

Truss analogi dari kemudian dikembangkan/ disempurnakan oleh Rusch(1964), Kupfer(1964), Leonhardt(1965), Elfgren (1972), Nielsen (1978), Mueller (1978), Collins dan Mitchell (1980), Hsu (1982), Thurlimann (1983), Marti (1985), Mac-Gregor (1986), Hardjasaputra (1987), Reineck (1990), dan Collins (1991) serta peneliti-peneliti lainnya.

Karena keunggulan dan kesederhanaannya untuk menganalisa, metode ini sudah diadopsi oleh banyak peraturan perencanaan di berbagai negara, salah satunya adalah peraturan ACI 318-02.

STRUT-AND TIE MODEL FOR PREDICTING DEFLECTION

Definition of Truss Elements

Akibat beban beban luar P, maka permodelan rangka untuk mewakili balok yang terbebani adalah seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 5. Tinggi rangka direncanakan sebagai jarak terbentuk masih memenuhi syarat $25^{\circ} < \theta < 65^{\circ}$.

antara pusat titik berat tulangan tekan atas sampai titik berat tulangan tarik bawah.

Untuk besar sudut θ° , direncanakan jarak bentang utama

$$\lambda = \frac{H}{\tan(\theta^{\circ})}$$

Penempatan jarak bentang utama ini dimulai dari

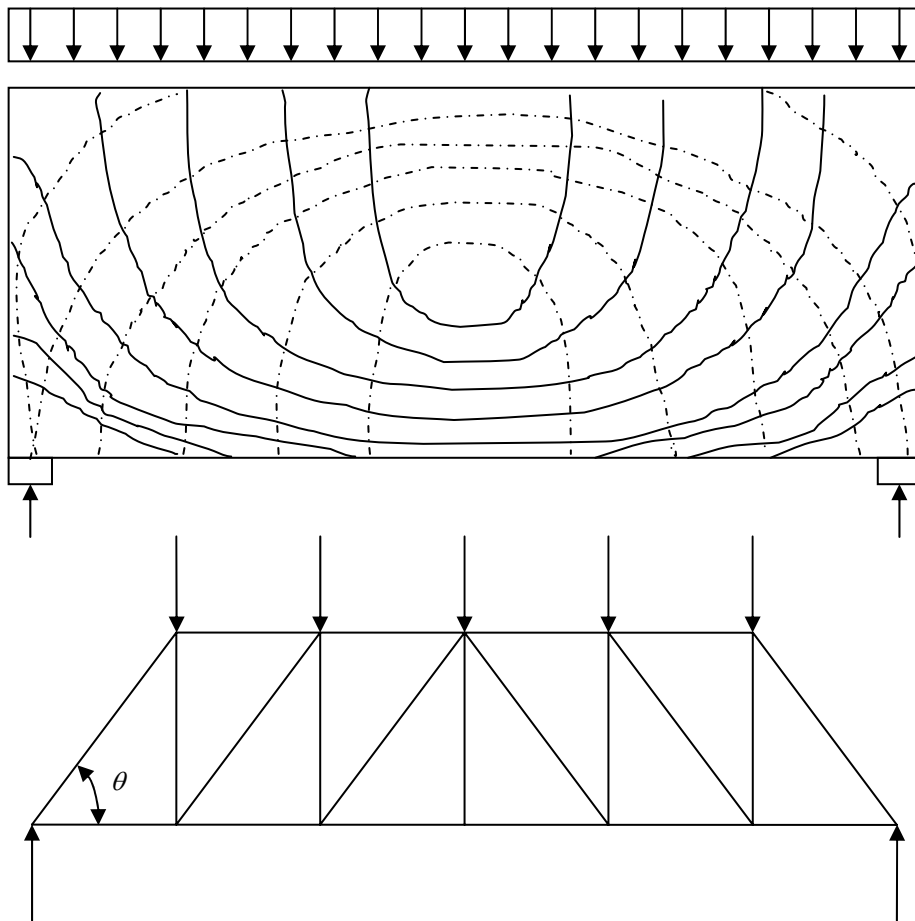
titik simpul rangka dimana posisi beban P bekerja sampai pada ujung rangka (Gambar 6). Jika pada ujung rangka masih terdapat sisa panjang bentang yang lebih besar dari panjang bentang utama ini, maka dapat ditambahkan lagi panjang bentang utama (Gambar 7) dengan syarat sudut yang terbentuk antara batang diagonal dengan bentang horisontal pada ujung rangka masih memenuhi syarat besarnya sudut $25^{\circ} < \theta < 65^{\circ}$ dan harus memperhatikan letak sengkang pada balok, dimana jarak tulangan sengkang dan batang vertikal paling ujung dari rangka batang harus maksimum $\frac{1}{2}$ jarak antarsengkang ($1/2s$).

Demikian juga dengan bentang yang dimulai dari titik simpul rangka dimana posisi beban P bekerja sampai pada tengah bentang. Jika masih terdapat panjang bentang yang lebih besar dari panjang bentang utama, maka dapat ditambahkan lagi panjang bentang utama dengan syarat sudut yang terbentuk antara batang diagonal dengan bentang horisontal pada tengah bentang masih memenuhi syarat besarnya sudut $25^{\circ} < \theta < 65^{\circ}$ dan harus memperhatikan letak sengkang pada balok, dimana jarak tulangan sengkang dan batang vertikal paling ujung dari rangka batang harus maksimum $\frac{1}{2}$ jarak antarsengkang ($1/2s$).

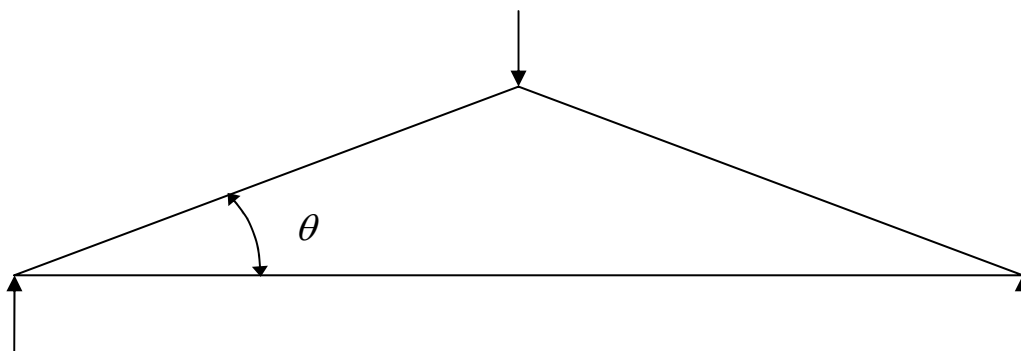
Contoh permodelan rangka untuk besar sudut 45° :

Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa untuk bentang 418 mm dan 250 mm masih mungkin ditambahkan bentang utama karena sudut yang dari Gambar 7 dapat dilihat untuk sudut $44,7^{\circ}$ memenuhi syarat $25^{\circ} < \theta < 65^{\circ}$, tetapi jarak antara batang vertikal pada rangka batang paling ujung dengan sengkang tidak memenuhi syarat maksimum dimana $52 \text{ mm} > \frac{1}{2} s = 40 \text{ mm}$. Maka pada bentang dengan panjang 418 mm tidak dapat ditambahkan lagi bentang utama.

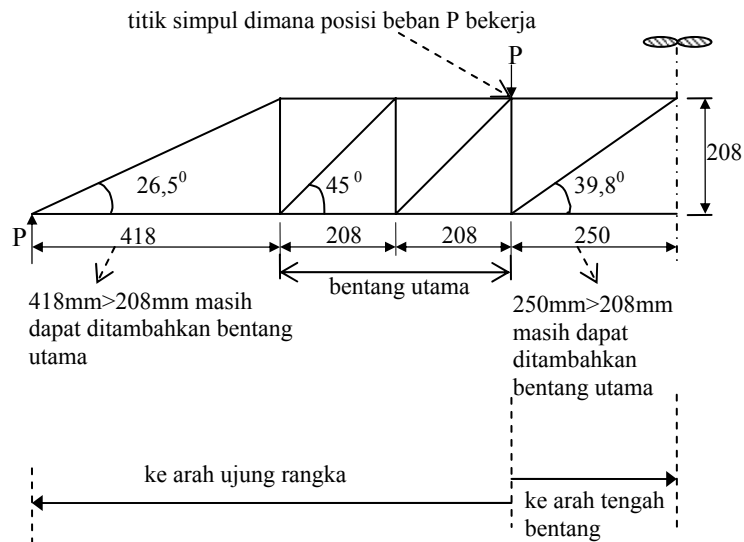
Demikian juga untuk sudut $78,6^{\circ}$ tidak memenuhi syarat $25^{\circ} < \theta < 65^{\circ}$ maka pada bentang dengan panjang 250 mm tidak dapat ditambahkan lagi bentang utama.



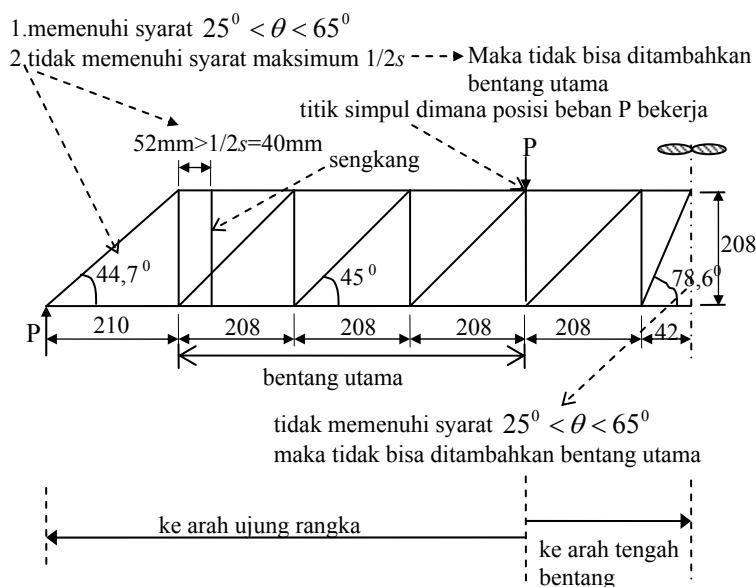
Gambar 4. Trayektori Tegangan Akibat Beban Merata & Analogi Rangka



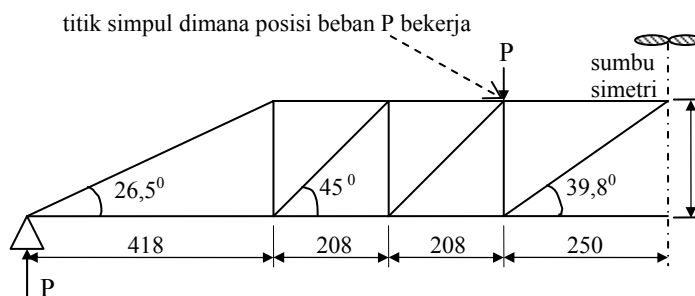
Gambar 5. Analogi Rangka



Gambar 6. Penentuan Bentang Utama pada Permodelan Rangka Sudut 45°

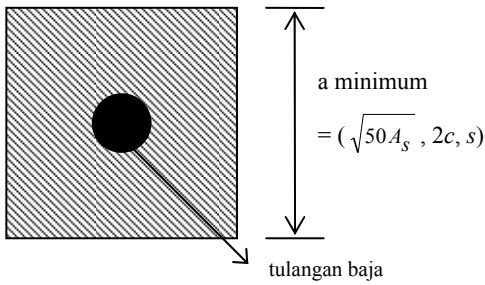


Gambar 7. Penambahan Bentang Utama pada Ujung dan Tengah Rangka Sudut 45°



Gambar 8. Permodelan Akhir Rangka Sudut 45° untuk Setengah Bentang Balok

Dengan dipenuhinya syarat sudut $25^0 < \theta < 65^0$ didapatkan model rangka sudut 45^0 seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 8. Untuk element *tie*, digunakan usulan luas gross oleh Hsu (2003) yaitu:



Gambar 9. Penentuan a Minimum Dalam Luas Penampang Tie

dimana:

- A_s = luas tulangan baja
- c = tebal selimut beton yang diukur terhadap titik berat tulangan sampai permukaan terluar beton (*surface*)
- s = spasi antar tulangan diukur dari as ke as tulangan

PENDEKATAN PENAMPANG LINTANG EFEKTIF

Setelah terjadi retak pada penampang beton, maka sesungguhnya luasan penampang beton dalam menahan tegangan tarik tidak lagi utuh berupa luasan gross. Luasan yang menahan tegangan tarik ini disebut luasan efektif. Luasan efektif ini diperkirakan berada antara luasan penampang beton gross (A_g) sampai luasan penampang tulangan baja saja (A_s). Untuk itu diusulkan perumusan luas penampang efektif ini ke dalam bentuk matematis:

$$A_{eff} = \left(\frac{\sigma_r}{\sigma} \right)^a \cdot A_g + \left[1 - \left(\frac{\sigma_r}{\sigma} \right)^a \right] \cdot A_{sn} \leq A_g \quad (1)$$

dimana:

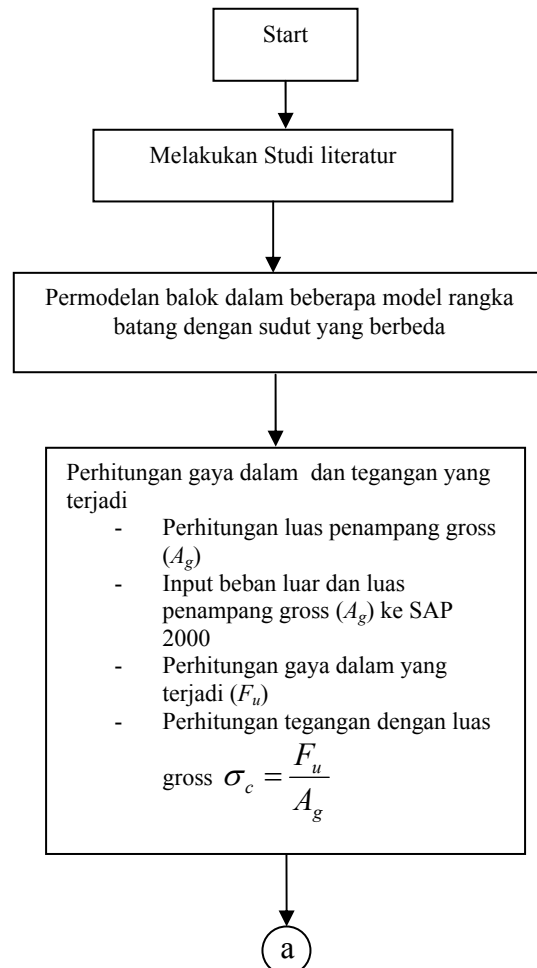
- A_{eff} = luas penampang efektif beton
- σ_r = tegangan retak beton $= f_r = 0,62 \sqrt{f'_c}$ dalam MPa
- σ = tegangan yang terjadi pada frame rangka yang ditinjau
 $= \frac{F_u}{A_g}$
- A_g = luas penampang gross
- A_{sn} = luas transformasi penampang tulangan baja
- a = koefisien yang akan dicari

PROSEDURE ITERASI

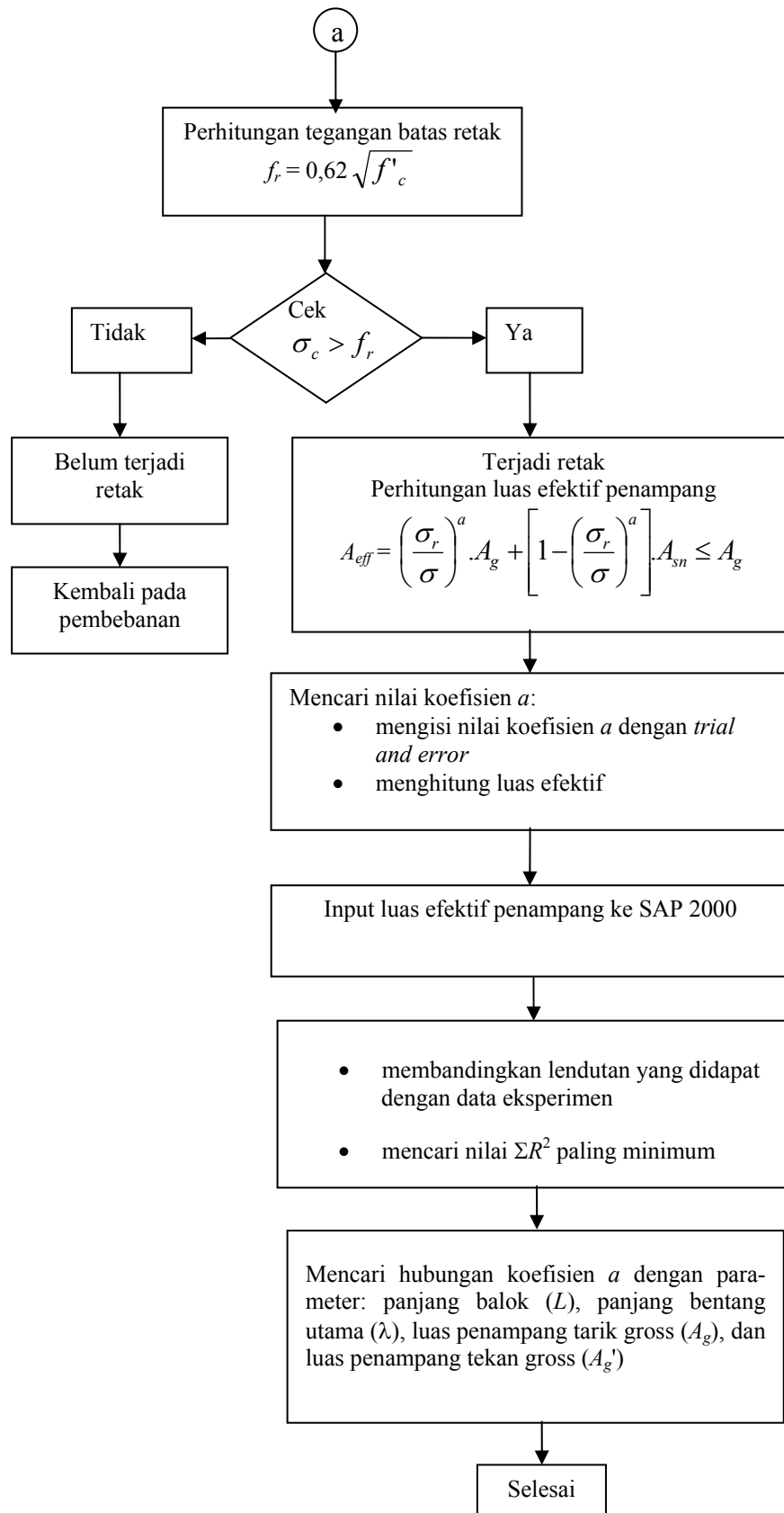
Langkah-langkah yang diambil dalam penyusunan makalah ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Studi literatur dengan mengambil data-data hasil eksperimen lendutan dalam beberapa literatur dan jurnal.
2. Permodelan balok ke dalam bentuk rangka batang dengan beberapa pilihan besar sudut.

3. Perhitungan luas penampang gross dengan usulan dari Hsu (2003).
4. Input luas penampang gross dan beban luar ke program SAP 2000. Didapatkan gaya dalam aksial pada semua frame. Setelah itu dilakukan perhitungan tegangan berdasarkan luas gross.
5. Perhitungan tegangan batas retak. Rumus diambil dari peraturan ACI 9.6.2.3
6. Perbandingan tegangan berdasarkan luas gross dengan tegangan batas retak. Untuk luasan yang mengalami tarik, jika tegangan yang terjadi lebih besar dari tegangan batas retak maka retak telah terjadi dan dilanjutkan dengan perhitungan luasan efektif penampang.
7. Perhitungan luas efektif penampang. Dalam menghitung luas efektif, dilakukan dengan cara *trial and error* untuk mencari nilai koefisien a sampai didapatkan nilai $\sum R^2$ paling minimum. Nilai $\sum R^2$ adalah kwadrat selisih antara lendutan prediksi dengan lendutan dari data.
8. Mencari hubungan antara nilai koefisien a dalam perumusan luas efektif dengan parameter dari balok (model rangka) seperti: $L, \lambda, A_g,$ dan A_g' .
9. Mengambil kesimpulan mengenai perumusan luas penampang efektif beserta nilai koefisien a .



Gambar 10. Metodologi Penelitian



Gambar 10. Lanjutan (Metode Penelitian)

KALIBRASI DENGAN DATA TEST

Untuk mencari besarnya koefisien a , digunakan cara coba-coba atau *trial and error*. Dalam *trial and error* ini akan dicari besarnya koefisien a yang paling optimum yaitu koefisien a yang memberikan harga $\sum R^2$ paling minimum. Dalam metoda kwadrat terkecil, didefinisikan:

$$\sum R^2 = a (y_a - y_e)^2 \quad (2)$$

dimana:

$\sum R^2$ = jumlah kwadrat selisih antara data analisa dengan data eksperimen

y_a = hasil analisa perhitungan rumus atau teori

y_e = data eksperimen dari percobaan di laboratorium

Dari hasil *trial and error* didapatkan nilai koefisien a untuk tiap model rangka yang dapat dilihat dalam Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Koefisien a

Balok	Sudut	$\sum R^2$	a
ST-2B	25 ⁰	0,7999	1,45
	35 ⁰	0,5403	1,65
	45 ⁰	0,5560	1,75
S18	25 ⁰	0,0251	0,5
	35 ⁰	0,0120	1,0
	45 ⁰	0,0167	1,0
S26	25 ⁰	0,2125	0,2
	35 ⁰	0,1271	0,55
	45 ⁰	0,1464	0,55

KOEFISIEN a

Untuk mendapatkan nilai koefisien a yang berlaku pada semua balok, dirumuskan persamaan regresi dari kurva hubungan antara parameter $(L/\lambda).(A_g/A_g')$ dan $a^{0,067}$ seperti yang dapat dilihat dalam Gambar 11.

Dari Gambar 11 di atas didapatkan persamaan regresi untuk mendapatkan nilai koefisien a yaitu:

$$a = \left[\left(\frac{5.L}{1000.\lambda} \right) \left(\frac{A_g}{A_g'} \right) + 0,934 \right]^{15} \quad (3)$$

PERBANDINGAN DENGAN HASIL EKSPERIMENTAL

Data eksperimen yang digunakan dalam perhitungan, tidak didapatkan melalui percobaan pengukuran lendutan secara langsung di laboratorium. Data ini diperoleh dari penelitian terdahulu yang terdapat pada literatur (Zhu, 2003).

Data yang dipakai dalam perhitungan antara lain:

Balok ST-2B

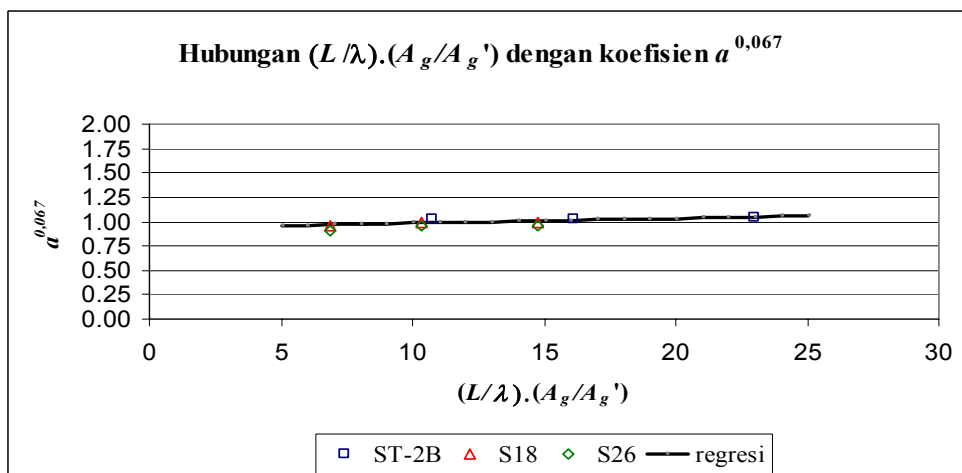
Data beton:

- Data berat:
 - berat semen = 340 kg
 - berat agregat = 1022 kg
 - berat pasir = 880 kg
 - berat air = 170 kg
- Data kuat tekan: $f'_c = 46$ MPa
- Data modulus Elastisitas: $E_c = 30$ GPa

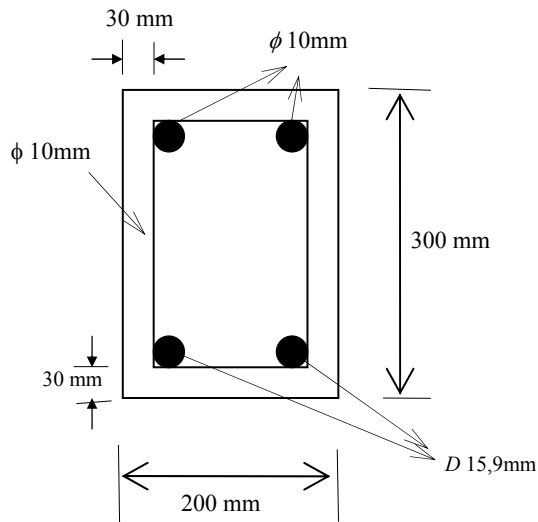
Data Baja tulangan:

- Tulangan tekan D 10 mm
- Tulangan Tarik D 15,9 mm
- Tulangan sengkang ϕ 10 mm
- Jarak antar sengkang = 80 mm
- f_y tulangan = 480 MPa
- f_u tulangan = 600 MPa
- E tulangan = 200 GPa

Data yang lain seperti penampang balok yang digunakan dan posisi pembebanan balok dapat dilihat dalam Gambar 12.a dan 12.b.



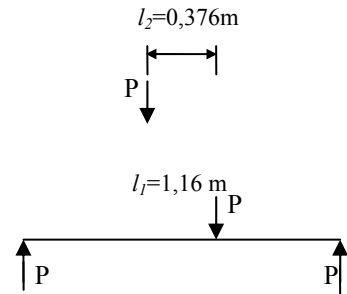
Gambar 11. Hubungan Antara $(L/\lambda).(A_g/A_g')$ dengan Koefisien $a^{0,067}$



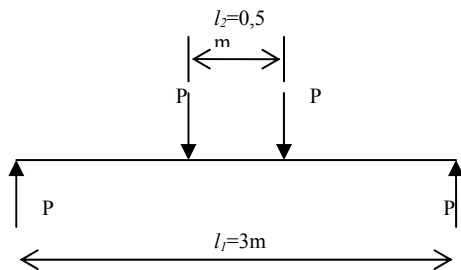
Gambar 12.a. Penampang Balok ST-2B

Jarak antar sengkang	= 98 mm
f_y tulangan	= 530 MPa
f_u tulangan	= 460 MPa
E tulangan	= 200 GPa

Data yang lain seperti penampang balok yang digunakan dan posisi pembebanan balok dapat dilihat dalam Gambar 13 – 14.



Gambar 14. Posisi Pembebanan Balok S18



Gambar 12.b. Posisi Pembebanan Balok

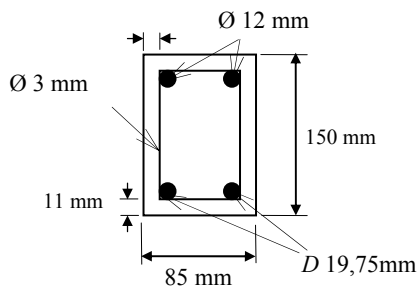
Balok S26 :

Data beton:
- Data kuat tekan: $f'_c = 57,2$ MPa

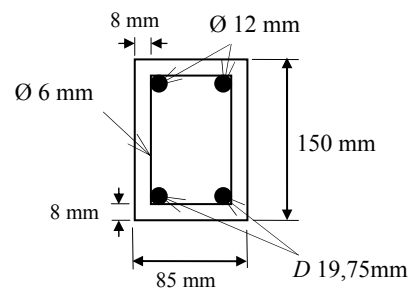
Data Baja tulangan:	
Tulangan tekan	Ø 12 mm
Tulangan Tarik	D 19,75 mm
Tulangan sengkang	Ø 6 mm
Jarak antar sengkang	= 56 mm
f_y tulangan	= 530 MPa
f_u tulangan	= 460 MPa
E tulangan	= 200 GPa

Data yang lain seperti penampang balok yang digunakan dan posisi pembebanan balok dapat dilihat dalam Gambar 15 – 16.

Hasil analisa untuk tiap model balok dapat dilihat dalam Gambar



Gambar 13. Penampang Balok S18

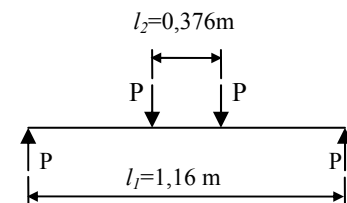


Gambar 15a. Penampang Balok S26

Balok S18 :

Data beton:
- Data kuat tekan: $f'_c = 57,2$ MPa

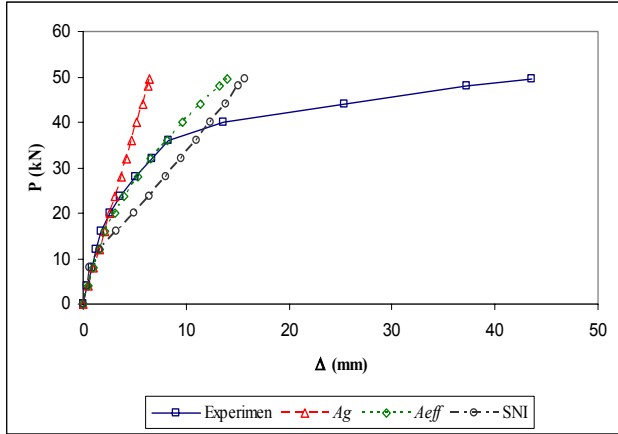
Data Baja tulangan:	
Tulangan tekan	Ø 12 mm
Tulangan Tarik	D 19,75 mm
Tulangan sengkang	Ø 3 mm



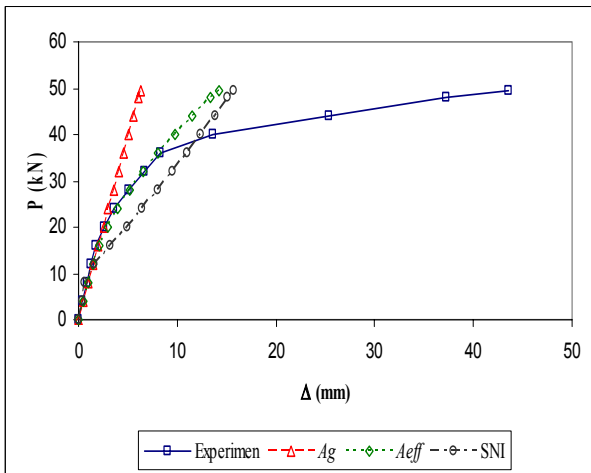
Gambar 15b. Posisi Pembebanan Balok S26

16 sampai Gambar 18 untuk balok ST-2B, Gambar 19 sampai Gambar 21 untuk balok S18, dan Gambar 22 sampai Gambar 24 untuk balok S26.

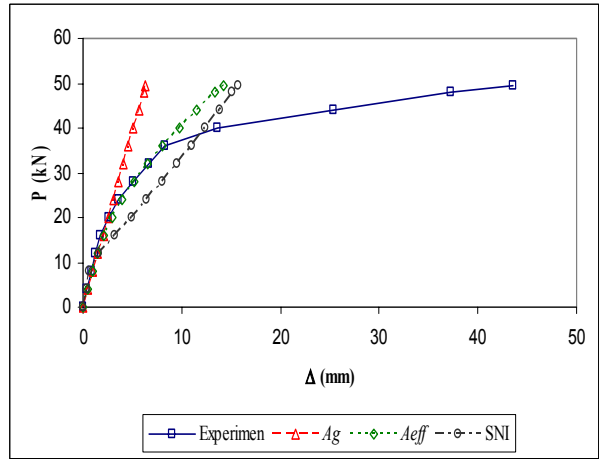
Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa hasil prediksi lendutan menggunakan luas penampang gross memberikan prediksi yang masih jauh dari hasil eksperimen yang sebenarnya. Sedangkan hasil prediksi lendutan menggunakan luas penampang efektif memberikan prediksi yang jauh lebih baik dalam arti lebih mendekati hasil eksperimen. Selain itu dapat dilihat juga bahwa prediksi lendutan dengan menggunakan perumusan dari SNI memberikan hasil prediksi yang kurang mendekati hasil eksperimen.



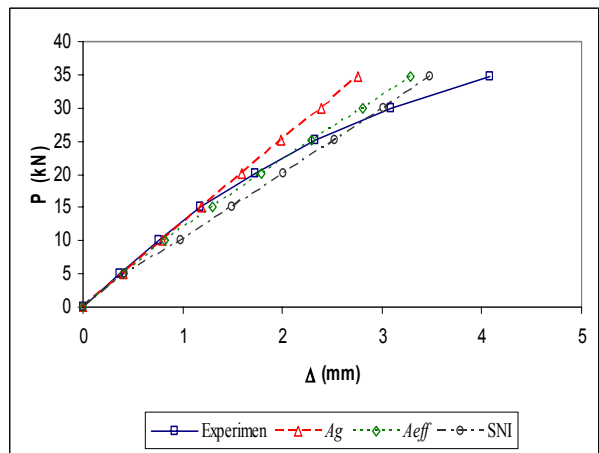
Gambar 16. Grafik Perbandingan Hasil Lendutan Aktual dengan Lendutan Prediksi Menggunakan A_g dan A_{eff} pada Model Rangka Sudut 25^0 Untuk Balok ST-2B.



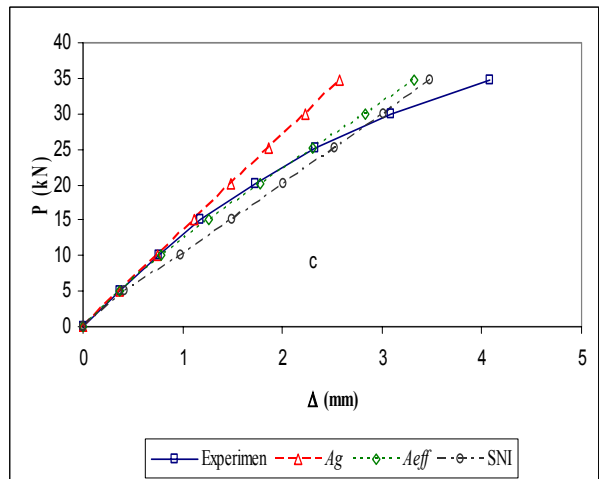
Gambar 17. Grafik Perbandingan Hasil Lendutan Aktual dengan Lendutan Prediksi Menggunakan A_g dan A_{eff} pada Model Rangka Sudut 35^0 Untuk Balok ST-2B.



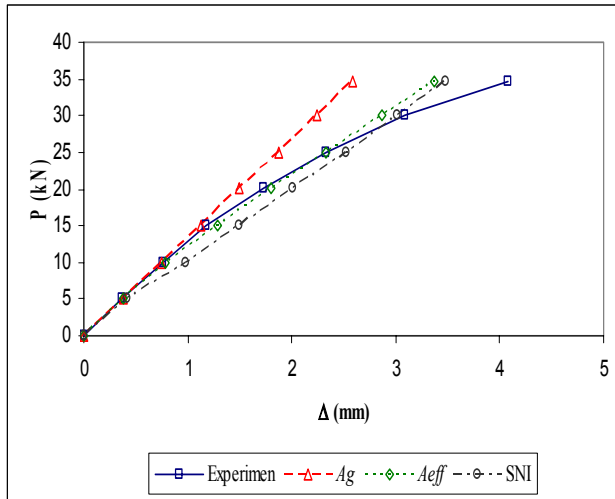
Gambar 18. Grafik Perbandingan Hasil Lendutan Aktual dengan Lendutan Prediksi Menggunakan A_g dan A_{eff} pada Model Rangka Sudut 45^0 Untuk Balok ST-2B.



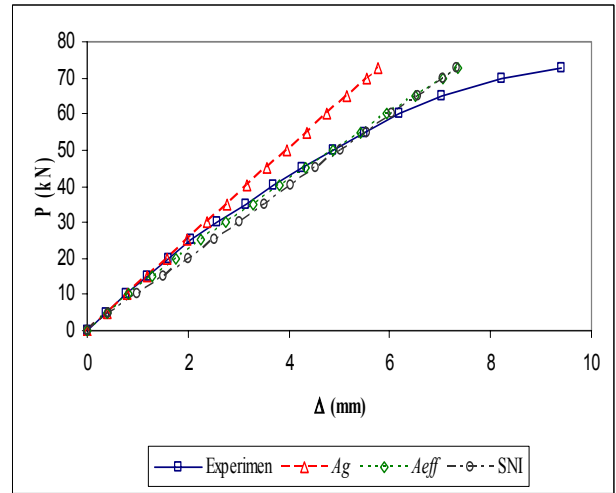
Gambar 19. Grafik Perbandingan Hasil Lendutan Aktual dengan Lendutan Prediksi Menggunakan A_g dan A_{eff} pada Model Rangka Sudut 25^0 Untuk Balok S18.



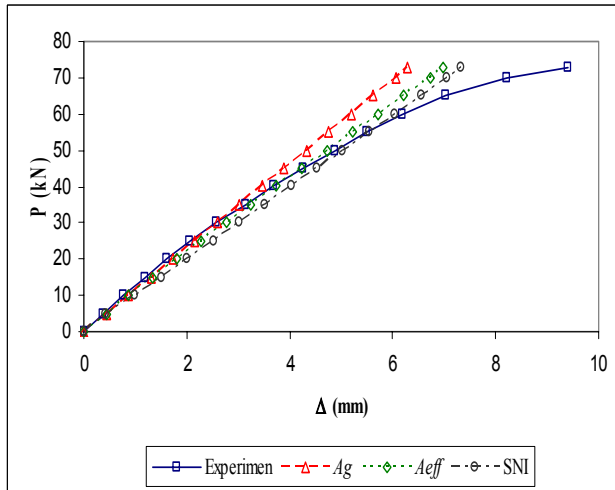
Gambar 20. Grafik Perbandingan Hasil Lendutan Aktual dengan Lendutan Prediksi Menggunakan A_g dan A_{eff} pada Model Rangka Sudut 35^0 Untuk Balok S18.



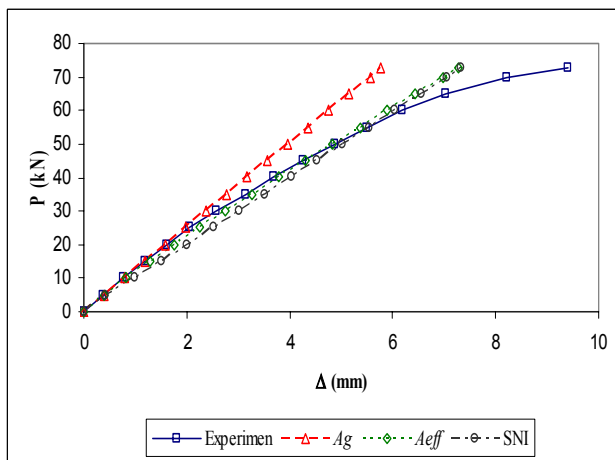
Gambar 21. Grafik Perbandingan Hasil Lentutan Aktual dengan Lentutan Prediksi Menggunakan A_g dan A_{eff} pada Model Rangka Sudut 45° Untuk Balok S18.



Gambar 24. Grafik Perbandingan Hasil Lentutan Aktual dengan Lentutan Prediksi Menggunakan A_g dan A_{eff} pada Model Rangka Sudut 45° Untuk Balok S26.



Gambar 22. Grafik Perbandingan Hasil Lentutan Aktual dengan Lentutan Prediksi Menggunakan A_g dan A_{eff} pada Model Rangka Sudut 25° Untuk Balok S26.



Gambar 23. Grafik Perbandingan Hasil Lentutan Aktual dengan Lentutan Prediksi Menggunakan A_g dan A_{eff} pada Model Rangka Sudut 35° Untuk Balok S26.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari usulan metoda *strut-and-tie* dalam memprediksi lentutan adalah sebagai berikut:

1. Metoda *strut-and-tie* selama ini hanya digunakan dalam desain struktur, namun dari hasil riset dibuktikan bahwa metoda *strut-and-tie* dapat juga digunakan untuk perhitungan *serviceability* pada struktur balok beton bertulang.
2. Metoda *strut-and-tie* memodelkan balok beton bertulang menjadi rangka batang. Pada perhitungan lentutan dengan metoda ini besarnya sudut rangka batang yang paling optimum yaitu sudut 35° .
3. Hasil prediksi lentutan menggunakan luas penampang gross masih jauh dari lentutan sebenarnya. Hal ini dikarenakan beton telah mengalami retak saat tegangan yang terjadi melebihi tegangan batas retak, tetapi luas penampangnya masih utuh (gross). Setelah tegangan tarik yang terjadi melebihi batas tegangan tarik beton yaitu $f_r = 0,62 \sqrt{f'_c}$ maka luas penampang gross harus dikoreksi atau direduksi menjadi luas efektif yang memberikan prediksi lentutan yang lebih mendekati data eksperimen atau sesungguhnya. Luasan efektif ini diperkirakan berada antara luasan penampang beton gross (A_g) sampai luasan penampang tulangan baja saja (A_s).
4. Metoda *Strut-And-Tie* dapat digunakan sebagai alternatif lain untuk memprediksi lentutan pada balok beton bertulang. Penggunaan metoda *Strut-And-Tie* yang didukung dengan perumusan luas efektif penampang dapat memberikan prediksi lentutan yang lebih akurat dibandingkan prediksi lentutan dengan perumusan yang sudah ada (dalam hal ini perumusan SNI).

DAFTAR PUSTAKA

- Ghali, A. dan Favre, R. (1994). *Concrete Structures Stresses and Deformations*. Edisi Kedua, E & FN Spon, 1994, 444 hal.
- Hardjasaputra, H. dan Tumilar, S. (2002). *Model Penunjang dan Pengikat (Strut-and-Tie Model) pada Perancangan Struktur Beton*. Edisi Pertama, Universitas Pelita Harapan, Jakarta, 2002, 141 hal.
- Masmoudi, R., Theriault, M. dan Benmokrane, B. (1998) "Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Deformed Fiber Reinforced Plastic Reinforcing Rods". *ACI Structural Journal*, V. 95, No 6, hal. 665-675.

- Mosley, W.H. dan Bungle, J.H. (1989). *Perencanaan Beton Bertulang*. Edisi Ketiga, Erlangga, Jakarta, 355 hal.
- Narayanan, R. dan Darwish, I.Y.S. (1987). "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement". *ACI Structural Journal*, V. 84, No 3, Mei-Juni 1987, hal. 216-227.
- Nawy, E. G. (1998). *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*. PT Refika Aditama, Bandung, 763 hal.
- Purwono, R., Tavio, Imran, I. dan Raka, I G.P. (2007). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002) Dilengkapi Penjelasan (S-2002)*. ITS Press, Surabaya, 408 hal.
- Reineck, K. H. (2002). *Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and Tie Models*. American Concrete Institute, Farmington Hills, 242 hal.
- Wang, C. K. dan Salmon, C. G. (1993). *Desain Beton Bertulang*. Jilid 1, Edisi Keempat, Erlangga, Jakarta, 1993, 484 hal.
- Wang, C. K.; dan Salmon, C. G. (1993). *Desain Beton Bertulang*. Jilid 2, Edisi Keempat, Erlangga, Jakarta, 1993, 452 hal.
- Zhu, R. R. dkk. (2003). "Crack Width Prediction Using Compatibility-Aided Strut and Tie Model", *ACI Structural Journal*, V. 100, No 4, Juli-Agustus 2003, hal. 413-421.