

**ALTERNATIF DESAIN STRUKTUR BALOK TINGGI GIRDER
JEMBATAN DENGAN ENERGI REGANGAN MINIMUM**

Christanto Yudha Saputra

Satuan Kerja Pelaksanaan Jalan Nasional I Jawa Tengah
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional VII
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Abstrak

Pada artikel ini dipaparkan salah satu alternative perancangan Struktur Balok Tinggi Girder Jembatan yang memiliki kompleksitas tinggi berupa pertemuan multi tegangan Tarik dan tekan. Salah satu alternative dalam mendesain balok tinggi girder tersebut adalah dengan menggunakan konsep Energi Regangan Minimum. Sebagai studi kasus sebuah balok girder sederhana yang dibebani beban terpusat ditengah bentang divariasikan model Tarik Tekannya. Model Perancangan dimodelkan Dengan Program *CAST* dan Hasil permodelan dari program dianalisis besar energy regangan yang terjadi sehingga dapat diketahui besar energy minimum system struktur girder. Diakhir tulisan dilakukan proses optimasi pada struktur girder untuk mendapatkan model perancangan ideal.

Kata Kunci : Girder Jembatan, energy regangan Minimum

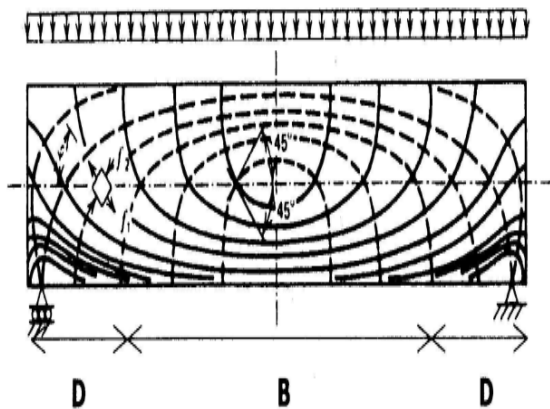
PENDAHULUAN

Balok tinggi ialah suatu elemen struktur seperti balok biasa, tetapi mempunyai angka perbandingan tinggi/lebar yang besar. Pada ACI318-02 sec 10.7.1 Balok dianggap sebagai balok tinggi dan memiliki daerah terganggu secara penuh sepanjang bentang ketika balok dibebani pada satu bagian dan pada sisi berseberangan dengan permukaan terbebani itu terdapat perletakan sehingga komponen *strut* atau tekan dapat terbentuk diantara bagian terbebani dan bagian perletakan, kemudian memiliki kriteria berikut :

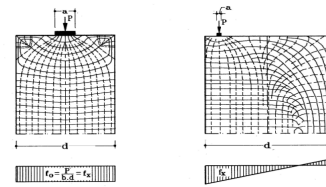
- a. Bentang bersih l_n sama dengan atau kurang dari empatkali ketinggian balok. ($l_n \leq 4d$)
- b. Daerah terbebani beban terpusat dengan jarak 2 kali dari kedalaman balok terhadap perletakan. ($a \leq 2d$)

Lebih kecil dari syarat tersebut didesain dengan kondisi dimana regangan terdistribusi secara non linear. Dinding yang mengalami beban vertikal, balok bentang pendek yang mengalami beban sangat berat dan beberapa jenis dinding geser dapat diakategorikan dalam elemen struktur balok tinggi.

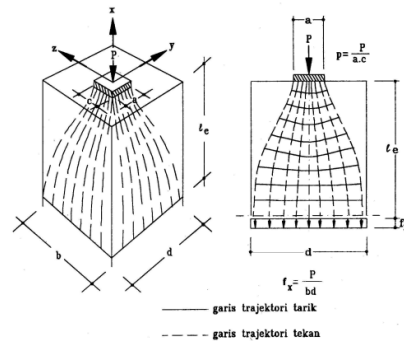
Collins menunjukkan berbagai gambaran bentuk distribusi dan trajektori tegangan. Berikut akan diperlihatkan berbagai bentuk standar distribusi dan trajektori tegangan utama seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2, dan untuk bentuk-bentuk yang non-standar perlu dilakukan serangkaian analisis berdasarkan *finite-element* elastis dimana perangkat lunak komputer untuk analisis elastis cukup tersedia.



Gambar 1. Trajektori tegangan utama, distribusi tegangan utamadan model Tekan dan Tarik



Gambar 2. Trajektori tegangan utama, distribusi tegangan elastis akibat beban terpusat dengan lokasi beban dan landasan yang besarnya berbeda

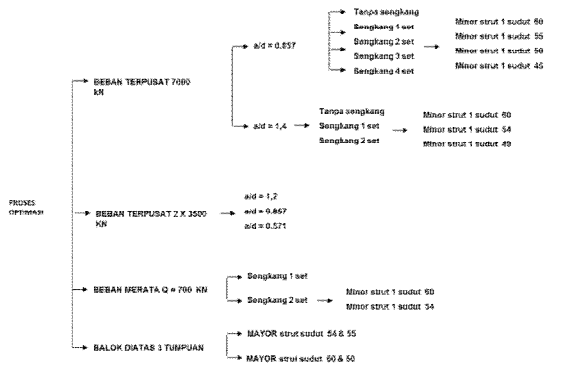


Gambar 3. Trajektori tegangan utama tiga dimensi pada suatu kolom pendek yang dibebani beban terpusat

Perilaku Balok Tinggi

Karena geometrinya inilah maka balok tinggi memiliki tegangan dua dimensi yang tidak linier dan bukan satu dimensi dan mengalami tegangan dua dimensi. Sebagai akibatnya bidang datar sebelum melentur tidak harus tetap datar setelah melentur, distribusi regangan tidak lagi linier dan deformasi geser yang diabaikan pada balok biasa menjadi cukup berarti dibandingkan dengan deformasi lentur murni. Sebagai akibatnya, blok tegangan menjadi nonlinier meskipun pada taraf elastis. Pada keadaan limit dengan beban batas, distribusi tegangan tekan pada beton tidak akan lagi mengikuti bentuk parabola sebagaimana pada balok biasa.

Perilaku Balok tinggi sebelum mengalami retak dapat diselidiki dengan mengetahui trayektori tegangan pada daerah terganggu yang dianalisis secara elastis. Dengan analisis elastis dapat diketahui kapan dan dimana retak beton akan terjadi. Setelah retak terjadi redistribusi pada tegangan internal dan distribusi ini tidak dapat dianalisis dengan analisis elastis kembali. Namun demikian analisis elastis dapat digunakan untuk memperkirakan kebutuhan dan letak perkuatan penulangan pada balok.



Gambar 5. Metoda Optimasi dengan Energi Regangan

Mekanisme pembahasan studi kasus ini akan dibagi menjadi dua tahap yaitu:

Tahap pertama adalah membuat model balok tinggi dengan menggunakan software CAST, Mekanisme pembahasan akan dimulai dengan tahapan membuat model balok tinggi yaitu dengan menentukan lebar pelat tumpuan balok berdasarkan beban-beban yang bekerja kemudian menentukan bentuk model yang mendekati dengan trajektori tegangan yang terbentuk dalam hal ini kami menggunakan model pada jurnal tersebut.

Tahap kedua mencari model yang optimum dengan menggunakan metode energi regangan minimum, menganalisis total energi regangan yang muncul pada komponen Tarik (baja tulangan) kemudian mencari model yang memiliki energi regangan minimum.

Program CAST

Program *freeware* yang dikembangkan oleh Prof Daniel Kuchma, dari University of Illinois, at UrbanaChampaignUSA. Program untuk perancangan struktur pada daerah terganggu dengan menggunakan metode Tekan dan Tarik ini dikembangkan sejak tahun 1998 bersama rekannya Prof Tjen Tjhin.

Proses permodelan struktur ditujukan untuk mencari bentuk pemodelan yang mendekati kenyataan di lapangan, untuk mendapatkan model yang optimal diperlukan proses iterasi yang membutuhkan banyak model. Model-model ini kemudian dibandingkan antara satu dengan yang lain hingga didapat model paling optimal dengan trayektori tegangan kondisi aktual.

Tahapan pendesainan dengan menggunakan program *CAST* adalah sebagai berikut:

1. Tentukan batas daerah D dan tentukan beban yang bekerja pada struktur. Beban ini bisa

berupa beban terpusat maupun beban merata yang bekerja pada daerah-D. Ada dua model pembebanan yang digunakan oleh program ini yaitu beban yang bekerja pada permukaan luar struktur dan beban yang bekerja. Program sehingga didapatkan gaya-gaya yang bekerja pada komponen-komponen tersebut.

2. Pemilihan permodelan tulangan yang disediakan oleh program untuk memenuhi kebutuhan gaya tarik yang bekerja pada tulangan tersebut dan pastikan bahwa angkur yang disediakan memenuhi batas tegangan yang bekerja pada *nodal zone*.
3. Evaluasi komponen Tekan, Tarik dan *Nodal zone* sehingga semua komponen tersebut dapat memikul gaya yang bekerja.
4. Mendesain tulangan minimum pada struktur guna menjamin daktilitas dari struktur tersebut.

PEMBAHASAN

Kekuatan Material Compression /Tekan

Tekan pada elemen beton yang berada pada daerah tegangan tekan dan diidealisasikan sebagai medan tegangan tekan uniaksial. *Tekan*, harus diketahui lebih dahulu kekuatan maksimum yang dapat disediakan oleh beton untuk mencegah kehancuran yang disebabkan oleh tegangan tekan diagonal (*web crushing*).

Kekuatan Nominal Tekan dengan tulangan longitudinal adalah :

$$F_{ns} = A_c \cdot f_{cu} + A_s \cdot f_s$$

Dengan :

A_c = Luas penampang beton pada ujung dari daerah *Tekan*

A_s = Luas penampang tulangan pada daerah *Tekan*

f_s = Tegangan tulangan baja yang memikul tekan

f_{cu} = Tegangan tekan efektif beton pada daerah

Kekuatan Material Tension/Tarik

Kekuatan batas *Tension Tarik* yang digunakan adalah kekuatan leleh tulangan baja yang terdefinisi sebagai tegangan leleh baja (f_{sy}). Karena perilaku daktil yang diasumsikan terjadi,

maka dalam perencanaan struktur diusahakan berada dalam kondisi *under-reinforced*.

Kekuatan Nominal *Tarik* adalah:

$$F_{nt} = A_{st} \cdot f_y + A_{ps} \cdot (f_{se} + f_p)$$

Dengan :

A_{st} = Luas penampang tulangan pada daerah *Tarik*

f_y = Tegangan leleh tulangan baja

A_{ps} = Luas penampang tendon pada beton prategang

$A_{ps} = 0$ untuk beton non-prategang

$(f_{se} + f_p)$ = Tegangan pada tendon beton prategang yang tidak boleh melebihi f_{py} Kekuatan Nominal *Tarik* (F_{nt}) sama pada seluruh peraturan beton bertulang dan usulan para ahli.

Analisis Kekuatan Material Nodal Zone

Kegagalan yang terjadi pada Nodal Zone diasumsikan oleh kehancuran beton. Proses kehancuran ini terjadi akibat tegangan pada daerah nodal melebihi kapasitas tegangan efektif yang mampu ditahan.

Kekuatan Tekan Nominal *Nodal Zone* adalah:

$$F_{mn} = A_n \cdot f_{cu}$$

Dengan:

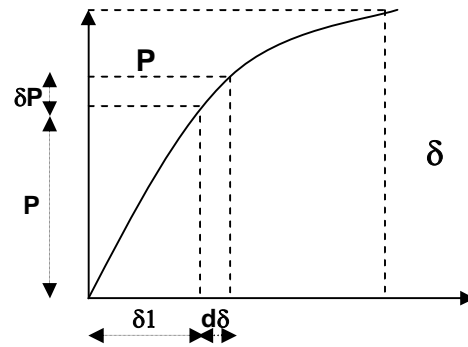
A_n = Luas terkecil dari:

- Luas pada muka *Nodal Zone* dimana F_u bekerja
- Luas penampang pada *Nodal Zone* yang tegak lurus dengan gaya resultan pada penampang

f_{cu} = Tegangan tekan efektif beton pada *Nodal Zone*

Perhitungan Energi Regangan

Perhitungan energi regangan pada komponen model *Tekan-And-Tarik* menggunakan konsep perhitungan energi regangan sebuah batang yang dikenai beban statis aksial tarik. Komponen *Tarik* dalam soal ini berupa sebuah tulangan longitudinal yang telah didesain sebelumnya untuk menahan aksi tarik sehingga terbentuk keseimbangan horizontal.



Gambar 5. Diagram Beban Peralihan

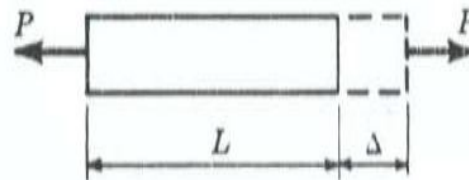
Pada diagram ini sumbu vertikal menunjukkan beban aksial dan sumbu horisontal menunjukkan perpanjangan beban. P_1 notasi untuk harga beban, berapapun antara nol hingga harga maksimum P , dan mencatat perpanjangan di batang tersebut dengan δ_1 . Lalu pertambahan δP_1 pada beban akan menghasilkan peningkatan $d\delta_1$ pada perpanjangan. Usaha yang dilakukan oleh beban selama peningkatan perpanjangan adalah hasil kali beban dan jarak yang dilampaui, artinya usaha sama dengan $P_1 d\delta_1$. Usaha ini dinyatakan dalam gambar tersebut dengan luas yang diarsir gelap dibawah kurva peralihan. Usaha total yang dilakukan oleh beban pada saat meningkat dari nol hingga harga maksimum P adalah jumlah dari semua strip elemental:

$$W = \int_0^{\delta} P_1 \cdot d\delta_1$$

Dalam tinjauan geometrik usaha yang dilakukan oleh beban sama dengan luas dibawah kurva peralihan.

Perilaku Elastik Linier, jika diasumsikan bahan pembentuk batang mengikuti *hukum Hooke* sedemikian hingga kurva beban-peralihan adalah garis lurus Gambar 5. Jadi, Energi Regangan U yang disimpan dibatang tersebut (sama dengan usaha W yang dilakukan oleh beban) adalah:

Energi regangan sesuai dengan teori mekanika bahan dapat dirumuskan sebagai berikut:



$$U = \frac{P^2 L}{2AE} \text{ atau } U = \int_0^L \frac{P^2 dx}{2AE}$$

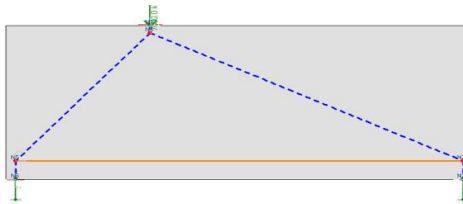
Dimana, U = Energi regangan (Nm)
 L = Panjang batang (m)
 A = Luas penampang batang (m²)
 P = Gaya (N)

Permodelan Pertama ($a/d = 0,857$)

Deskripsi: Model diterapkan untuk perancangan struktur balok tinggi dengan rasio $a/d = 0,857$ beban pada jarak 3000 mm dari perletakan J, berupa beban terpusat 7000 kN. Optimasi akan dilakukan dengan mencari kebutuhan banyak komponen vertikal yang dibutuhkan.

1. Tanpa Tulangan Tarik Vertikal

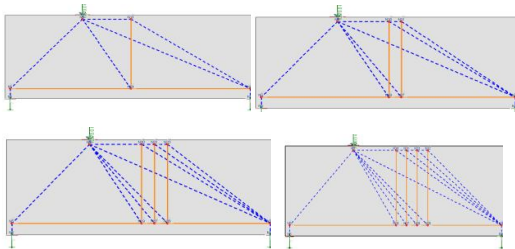
Deskripsi: Model terdiri dari 2 komponen Major Tekan dan dan sebuah Tulangan Tarik Longitudinal.



Gambar 6. Tanpa tulangan tarik vertical

2. Dengan Tulangan Vertikal

Deskripsi : Model dengan variasi tulangan vertical.

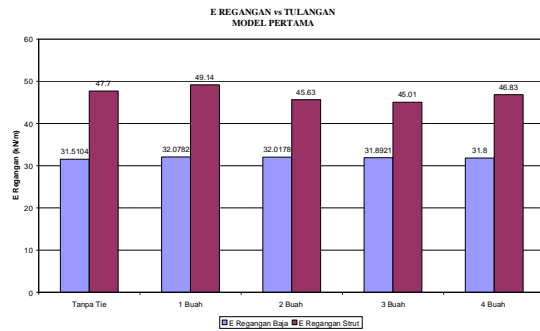


Gambar 7. Model dengan variasi Tulangan tarik vertikal

Analisis Penambahan Tulangan Vertikal

Berdasarkan grafik energi regangan yang dihasilkan terlihat bahwa pada saat balok tinggi tidak diberikan komponen tulangan vertikal (Tarik vertikal)

menghasilkan nilai energi regangan yang paling rendah dibandingkan dengan model yang diberikan tulangan vertikal. Dari Gambar 8 terlihat bahwa ketika terjadi penambahan komponen tulangan vertikal mulai dari sebuah tulangan vertikal, nilai energi regangan meningkat lebih besar dari tanpa tulangan vertikal, kemudian ketika penambahan dua tulangan vertikal nilai energi regangan lebih kecil dari sebuah tulangan vertikal, kecenderungan grafik menurun terus hingga pada penambahan empat buah komponen tulangan vertikal dan mulai mendatar pada penambahan lebih besar dari lima buah tulangan vertikal. Berdasarkan teori energi regangan bahwa model yang terjadi sesungguhnya dilapangan adalah model dengan energi regangan yang paling rendah yaitu model tanpa komponen tulangan vertikal karena penambahan komponen tulangan vertikal tidak memberikan nilai energi regangan yang lebih rendah daripada tanpa tulangan vertikal. Hal ini terjadi karena beban P yang bekerja masih bisa dipikul oleh komponen Tekan beton saja, sehingga ketika terjadi penambahan komponen tulangan vertikal tidak memberikan andil dalam menahan beban P.

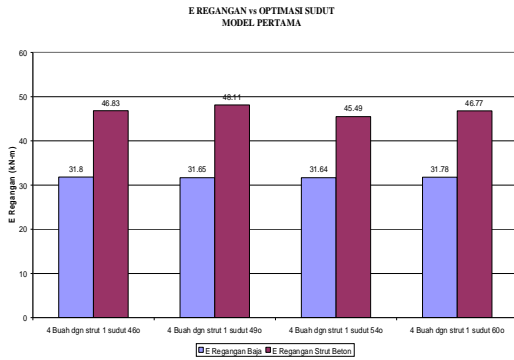


Gambar 8. Energi Regangan vs Jumlah Tulangan vertikal untuk model pertama

Analisis Posisi Tulangan vertikal Optimum

Pemodelan ini mengoptimasi model dengan jumlah tulangan vertikal empat buah, model ini dipilih untuk dioptimasi karena pada model ini, grafik energi regangan yang dihasilkan memberikan nilai yang paling optimum hal ini terlihat bahwa ketika jumlah tulangan vertikal lebih besar dari empat buah, besar energi regangan yang dihasilkan cenderung sama. Optimasi model ini dilakukan dengan cara menggeser tulangan vertikal secara bersamaan dengan batasan sudut Tekan yang bisa terjadi yaitu antara 30°-50°. Ada empat posisi tulangan tulangan vertikal, posisi pertama tulangan vertikal yaitu Tekan paling kiri bersudut 50° dengan Tarik horizontal, kemudian

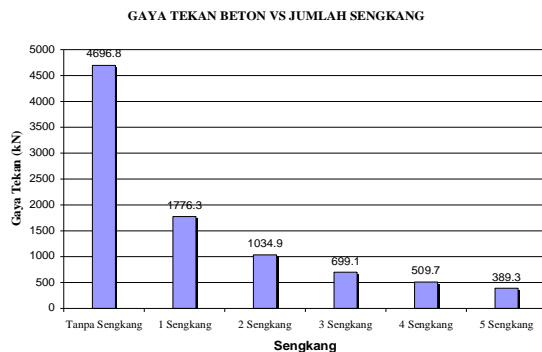
posisi ini ditambah sejarak 0,5 m kekanan dari posisi pertama untuk posisi kedua dan seterusnya. Hasil energi regangan yang di plot pada grafik terlihat berbentuk parabolis dengan nilai terendah pada posisi tulangan vertikal 2 dan 3, posisi 1 dan 4 memiliki nilai energi regangan yang besar. Dari grafik ini terlihat bahwa posisi tulangan vertikal yang optimum adalah pada posisi 2 dan 3.



Gambar 9. Energi regangan vs sudut antara Tarik horizontal dengan Tekan model pertama

Analisis Gaya Pada Major Tekan

Akibat penambahan tulangan vertikal pada model terjadi perubahan nilai gaya tekan yang bekerja pada major Tekan dimana tulangan vertikal tersebut ditempatkan.

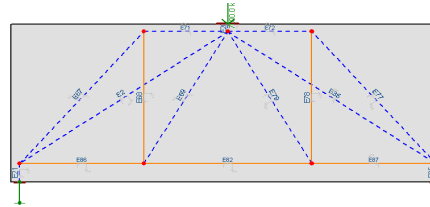


Gambar 10. Gaya tekan pada major Tekan vs jumlah tulangan vertikal untuk model pertama

Penambahan satu buah tulangan vertikal menurunkan hampir 50% gaya tekan pada major Tekan, hal ini sangat bermanfaat guna mencegah terjadinya bursting pada beton akibat besarnya gaya tekan yang bekerja pada major Tekan.

Permodelan Kedua ($a/d = 1.4$)

Deskripsi: Model diterapkan untuk perancangan struktur balok tinggi dengan rasio $a/d = 1,40$ beban pada jarak 5000 mm dari perletakan J, berupa beban terpusat 7000 kN. Optimasi akan dilakukan dengan mencari kebutuhan banyak komponen vertikal yang dibutuhkan. Model optimasi berjumlah 3 buah yaitu :

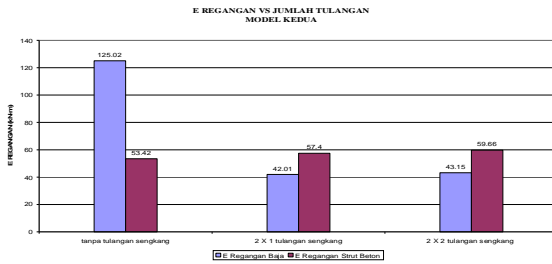


Gambar 11. Permodelan kedua ($a/d=1.4$)

1. Tanpa tulangan vertikal
Deskripsi : Model terdiri dari 2 buah mayor Tekan dan sebuah komponen Tarik tulangan longitudinal.
2. Tulangan Tarik vertikal 1 buah tiap sisi dari beban terpusat
Deskripsi : Model terdiri dari 2 komponen Major Tekan dan 2 minor Tekan dan 1 Tulangan Tarik Longitudinal dan 2 tulangan Tarik vertikal (tulangan vertikal).
3. Minor Tekan bersudut 50°
Deskripsi : Komposisi dasar sama dengan Model beban di tengah dengan 1 buah tulangan tarik vertikal tiap sisi beban terpusat, namun divariasikan dengan besar sudut minor Tekan sebesar 50° .

Analisis Penambahan Tulangan vertikal

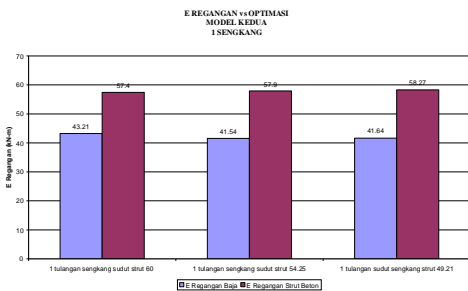
Berdasarkan grafik terlihat penambahan tulangan vertikal sangat berpengaruh pada penurunan nilai energi regangan. Pada model tanpa tulangan vertikal nilai energi regangan sangat besar, kemudian ketika terjadi penambahan satu buah tulangan vertikal nilai energi regangan mulai turun, tapi pada saat jumlah tulangan vertikal dua buah nilai energi regangan naik kembali. Dari hasil energi regangan ini dapat dianalisis bahwa model yang optimum, mendekati kenyataan dilapangan adalah model dengan jumlah tulangan vertikal satu buah. Penambahan jumlah tulangan vertikal tidak efektif ketika lebih besar dari satu buah.



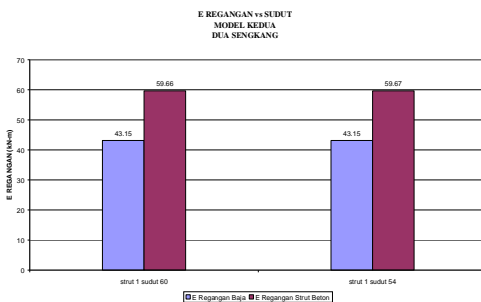
Gambar 12. Energi regangan vs jumlah tulangan vertikal untuk model kedua

Analisis Posisi Tulangan vertikal Optimum

Analisis selanjutnya adalah dengan cara mencari dimana posisi satu buah tulangan vertikal yang paling efektif. Untuk mendapatkan posisi yang efektif dilakukan tiga kali iterasi yaitu dengan cara perubahan posisi tulangan vertikal sejarak 0,5 m, dimulai dari posisi tulangan vertikal terdekat dengan beban terpusat yaitu dengan sudut Tekan sebesar 50° , kemudian digeser menjauhi beban terpusat hingga mendekati tumpuan dengan sudut $49,21^\circ$. Dari hasil pemodelan didapatkan posisi tulangan vertikal yang paling efektif dengan nilai energi regangan yang paling rendah adalah posisi yang berada pada pertengahan bentang major Tekan yaitu pada sudut $54,25^\circ$.



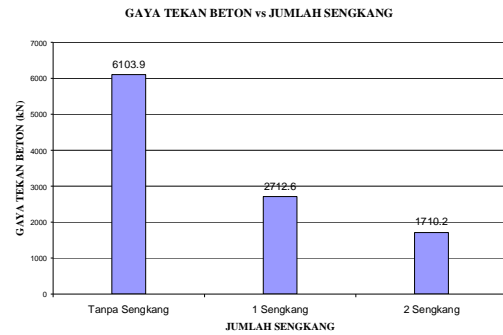
Gambar 13. Optimasi model kedua dengan jumlah tulangan tulangan vertikal 1 Buah



Gambar 14. Optimasi dua buah tulangan vertical dengan cara merubah posisi tulangan

Analisis Gaya Pada Major Tekan

Dari grafik terlihat besar gaya tekan yang bekerja setelah diberikan satu buah tulangan vertikal turun hingga 55 %, namun ketika penambahan tulangan vertikal menjadi menjadi dua buah penurunan yang terjadi tidak sebesar penurunan pertama. Penurunan besaran gaya tekan pada major Tekan ini akibat dari terdistribusinya besaran gaya tekan kebeberapa minor Tekan.



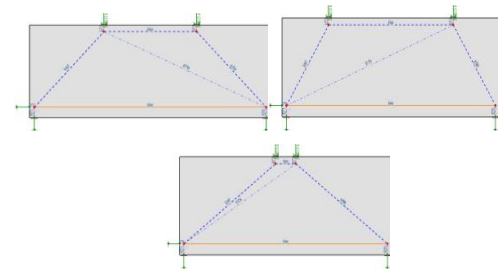
Gambar 15. Gaya tekan pada major Tekan vs jumlah tulangan vertikal untuk model kedua

Permodelan Ketiga

$$(a/d = 1.2; a/d = 0,857; a/d = 0.571)$$

Deskripsi : Model diterapkan untuk perancangan struktur balok tinggi dengan rasio $(a/d = 1.2; a/d = 0,857; a/d = 0.571)$ dan beban pada jarak berturut-turut mm dari perletakan terdekat, berupa beban terpusat 7000 kN yang dibagi menjadi 2 buah beban terpusat sama besar masing-masing 3500 kN. Permodelan kali dilakukan untuk mengetahui hubungan besar kebutuhan perkuatan dengan perbandingan a/d .

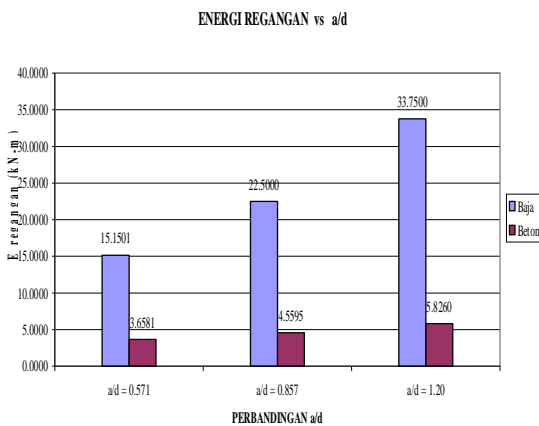
Model terdiri dari 2 buah mayor Tekan dan sebuah komponen tarik tulangan longitudinal:



Gambar 16. Struktur Balok Model ke-3

Analisis Posisi Beban P Terhadap Tumpuan (a/d)

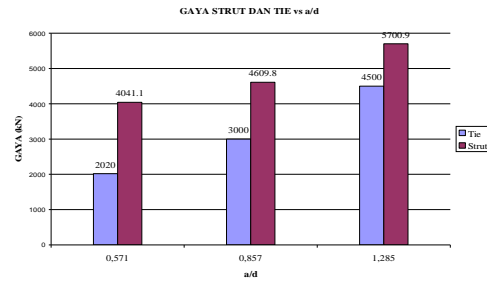
Optimasi yang dilakukan pada model ini adalah dengan cara menggeser posisi beban terpusat P yang bekerja. Hal ini dilakukan karena penambahan tulangan vertikal tidak dimungkinkan karena sudut yang terbentuk antara minor Tekan dengan Tarik horizontal lebih besar dari 50°. Penempatan posisi dua buah beban terpusat yang masing-masing besarnya sebesar 0,5 P adalah dengan mengoptimalkan batasan sudut yang diperbolehkan yaitu antara rentang 30°-50°. Dari hasil energi regangan masing-masing model terlihat bahwa energi regangan terendah terjadi pada posisi beban P berada pada posisi terdekat dengan tumpuan dimana Tekan membentuk sudut 50° dengan Tarik horizontal atau posisi dengan nilai semakin kecil ketika posisi beban P mendekati tumpuan a/d terkecil. Hal ini terjadi karena gaya tarik yang bekerja pada komponen Tarik horizontal.



Gambar 17. Energi regangan vs a/d untuk pemodelan ketiga

Analisis Terhadap Gaya Tekan Tekan dan Tarik pada Tarik

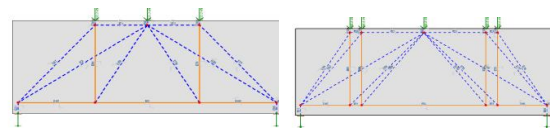
Besar gaya tarik pada Tarik horizontal semakin mengecil seiring dengan mengecilnya nilai perbandingan a/d. Hal ini diikuti pula oleh mengecilnya besar gaya tekan pada major Tekan, karena besar gaya pada major Tekan merupakan resultan dari keseimbangan tiga gaya pada tumpuan dimana besar gaya vertikal pada tumpuan bernilai konstan, besar gaya tarik pada Tarik horizontal mengecil ketika beban mendekati tumpuan.



Gambar 18. Gaya tekan pada major Tekan dan tarik pada Tarik horizontal terhadap nilai a/d

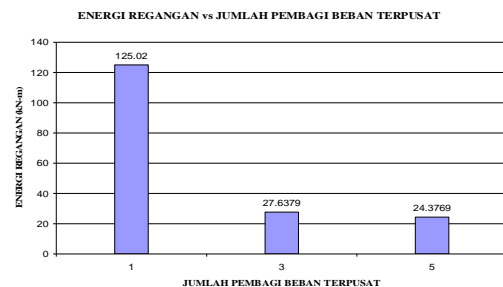
Permodelan Keempat $\left(q = \frac{7000}{10} = 700 \text{ kN/m} \right)$

Deskripsi : Model diterapkan untuk perancangan struktur balok tinggi dengan beban merata 700 kN/m. Model terdiri dari 2 buah yaitu model dengan satu tulangan vertikal dan model dengan dua tulangan vertikal. Sudut mayor Tekan masing-masing sebesar :

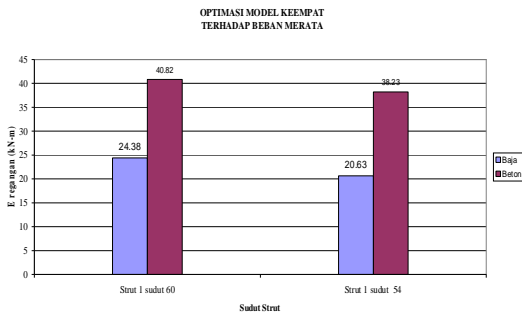


Gambar 19. Permodelan keempat -1

Beban merata yang bekerja pada balok tinggi harus dikonversi kedalam bentuk beberapa beban terpusat agar mempermudah pemodelan. Dalam pemodelan penulis menggunakan model Tekan and Tarik yang mirip dengan model 2 yaitu model dengan beban terpusat ditengah. Jumlah pembagi beban terpusat P = 7000 kN ada 3 yaitu dibagi 1, 3 dan 5. Sehingga beban merata yang dikonversi menjadi beban terpusat sebesar 7000 kN, 2333,3 kN dan 1400 kN. Berdasarkan hasil energi regangan dari masing-masing model terlihat bahwa semakin besar jumlah pembagi semakin kecil energi regangan yang dihasilkan.



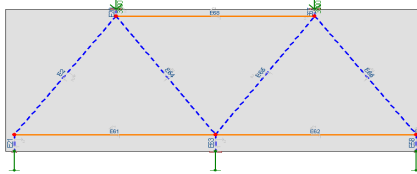
Gambar 20. Energi regangan vs jumlah pembagian beban merata menjadi beban terpusat



Gambar 21. Energi regangan vs sudut antara Tekan dengan Tarik horizontal

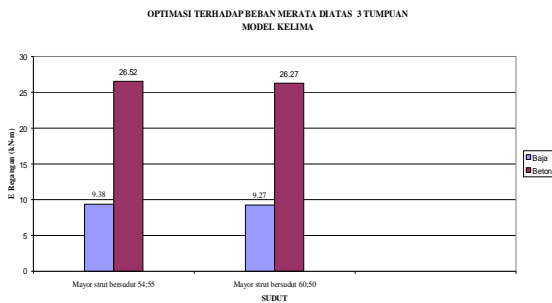
Permodelan Kelima (statis tak tentu)

Deskripsi : Model diterapkan untuk perancangan balok tinggi dengan beban merata dengan sifat statis tak tentu.



Gambar 22. Permodelan Statis tak Tentu

Pada model ini modifikasi yang dilakukan adalah dengan cara menambah jumlah tumpuan pada balok tinggi dari dua tumpuan sendi-rol menjadi tiga tumpuan sendi-sendir-rol. Beban terpusat yang bekerja masih tetap sebesar 7000 kN, dibagi menjadi dua bagian sehingga beban masing-masing 3500 kN. Optimasi model yang dapat dilakukan hanya dengan merubah besaran nilai a/d , penambahan komponen tulangan vertikal tidak dimungkinkan karena sudut yang dapat terbentuk antara minor Tekan dengan Tarik horizontal tidak memenuhi syarat.



Gambar 23. Energi regangan vs sudut antara Tekan dengan Tarik horizontal

Dari grafik terlihat major Tekan dengan sudut 50° memiliki nilai energi regangan terendah. Ketika beban yang sama diberikan pada setiap model, terdapat beberapa model yang tidak mengalami penurunan energi regangan ketika diberi tambahan tulangan tarik tulangan vertikal, sebagai contoh pada pemodelan pertama yaitu pemodelan menurut jurnal penambahan komponen tulangan vertikal tidak berpengaruh karena Tekan beton masih sanggup menahan gaya tekan yang bekerja, sedangkan untuk pemodelan dengan beban terpusat ditengah, penambahan komponen tulangan vertikal sangat berpengaruh dalam mereduksi energi regangan. Penambahan tulangan vertikal yang tidak efektif karena justru menambah energi regangan struktur dapat disebabkan penambahan panjang tulangan tarik tulangan vertikal lebih signifikan dibandingkan pengurangan luas tulangan tarik

Kesimpulan

Desain dengan menggunakan metoda Energi Regangan Minimum merupakan bagian dari metoda yang telah distandarkan dalam peraturan Konstruksi Beton Indonesia dalam SNI 2847 tahun 2013 Peraturan Beton Bertulang Struktural. Sudut optimum yang memberikan nilai energi regangan terkecil berada pada kisaran pertengahan rentang sudut pemodelan. Hal ini bisa dilihat pada iterasi model dengan jumlah tulangan vertikal empat buah dimana nilai energi regangan minimum berada pada kisaran sudut 49-54 derajat. Pemodelan dengan beban terpusat berjumlah dua buah dengan rasio a/d yang mengecil memberi implikasi bahwa energi regangan yang timbul juga semakin kecil. Hal ini terjadi karena semakin kecil nilai a/d maka beban geser sebagian besar dipikul langsung oleh beton, dan aliran gaya segera menuju perletakan. Dalam kondisi ini beton memiliki tegangan gaya tekan yang besar dan dapat menimbulkan aksi regangan tarik, oleh karena itu dibutuhkan tulangan penahan *bursting* pada daerah Tekan beton.

DAFTAR PUSTAKA

American Concrete Institute, 2002, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

Bambang Budiono & Dicky R Munaf, 1995, *Perancangan komponen struktur balok*

tinggi dari beton mutu tinggi, HAKI Conference, Jakarta.

Benny & Marie, 2003, *Tinjauan dan Penerapan Metoda Tekan-and-Tarik Model pada perencanaan daerah D studi kasus Balok Konsol Beton Bertulang*, Departemen Teknik Sipil ITB.

Collins & Mitchell, 1987, *Prestressed Concrete Basics*, First Edition, Canadian Prestressed Concrete Institute (CPCI), Ottawa, Canada.

Gerardo Aguilar et al, 2004, *Experimental Evaluation of Design Procedures for Shear Strength of Deep Reinforced Concrete Beam*, ACI Structural Journal.

Gere and Timoshenko, 2000, *Mekanika Bahan*, jilid 1 Edisi ke Empat Penerbit Erlangga.

Hardjasaputra, H. dan Tumilar, S., 2002, *Model Penunjang dan Pengikat (Tekan-and-Tarik Model) Pada Perancangan Struktur Beton*, Penerbit Universitas Pelita Harapan, Jakarta.

Rio & Edy, **2004**, *Kajian Penulangan geser Minimum pada Balok Beton Bertulang*, Departemen Teknik Sipil ITB.

Shyh-Jiann Hwang et al, 2003, *Closure to Prediction for Discontinuity Regions by Softened Tekan-and-Tarik Model*, ASCE Structural Journal March.