

STUDI NUMERIK: TINJAUAN KONDISI BATAS REGANGAN MAKSIMUM PADA PELAT TARIK BAJA BERLUBANG

Y. DJOKO SETIYARTO

Jurusan Teknik Sipil
Universitas Komputer Indonesia

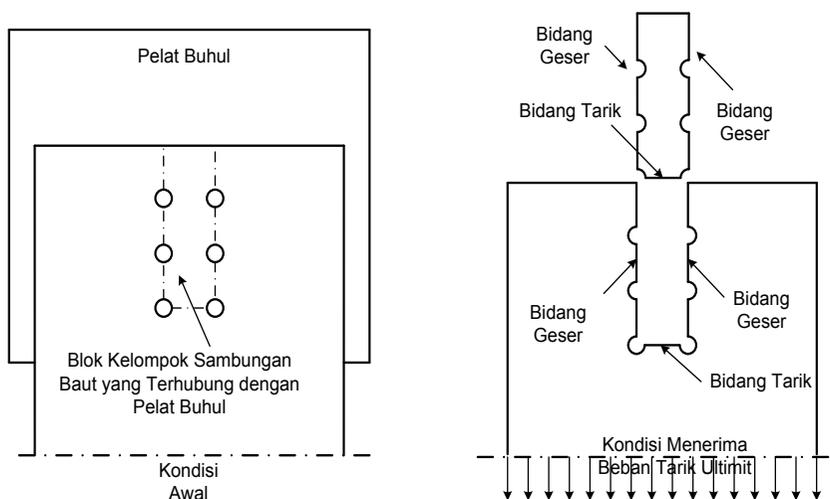
Keruntuhan geser blok dikenal sebagai salah satu bentuk keruntuhan potensial yang dapat terjadi pada pelat tarik baja berlubang. Dalam mekanisme keruntuhannya, gaya tarik terjadi di sepanjang garis transversal (bidang tarik) dan gaya geser terjadi di sepanjang garis longitudinal antar lubang baut (bidang geser). Menurut AISC-LRFD 2005, kekuatan geser blok selalu ditentukan oleh kekuatan tarik pada bidang tarik bersih yang diakumulasikan dengan kekuatan geser minimal pada bidang geser kotor atau bersih. Sehingga diasumsikan bahwa fraktur selalu terjadi pertama kali pada bidang tarik, yang kemudian diikuti dengan leleh pada bidang geser. Asumsi ini berbeda dengan AISC-LRFD 1999, yaitu saat kekuatan ultimit tercapai, fraktur dapat terjadi pada bidang tarik bersih yang diikuti dengan leleh pada bidang geser, atau dapat pula terjadi fraktur pada bidang geser bersih yang diikuti leleh pada bidang tarik kotor. Studi numerik berikut ini akan meninjau apabila kekuatan pelat tarik baja berlubang ditentukan dengan asumsi kelelahan seutuhnya terjadi pada bidang tarik dan bidang geser tanpa disertai timbulnya fraktur. Studi numerik dilakukan dengan menggunakan software Finite Elemen Analysis (FEA), yang kriteria keruntuhannya berdasarkan kondisi batas regangan maksimum. Hasil prediksi FEA menunjukkan bahwa kekuatan ultimit pada pelat tarik baja berlubang dengan asumsi kelelahan pada penampang bidang tarik dan bidang geser mempunyai peluang menjadi lebih menentukan dibanding keruntuhan geser blok. Selain itu diketahui pula bahwa distribusi tegangan tarik yang terjadi di sekitar tepi lubang pelat umumnya tidak seragam.

Kata Kunci: regangan maksimum, keruntuhan geser blok, leleh, fraktur, distribusi tegangan

PENDAHULUAN

Elemen tarik baja merupakan salah satu masalah sederhana yang dijumpai oleh para perencana struktural. Meskipun demikian, diperlukan sikap hati-hati dalam perencanaan, karena telah banyak kegagalan struktur yang diakibatkan oleh putusnya sambungan atau titik hubung elemen struktur tarik.

Menurut AISC-LRFD kekuatan elemen tarik pada struktur baja ditentukan oleh tiga kemungkinan bentuk keruntuhan, yaitu leleh pada penampang geser bruto ($0.9 \cdot F_y \cdot A_g$), fraktur pada penampang tarik efektif ($0.75 \cdot F_y \cdot A_e$), dan keruntuhan geser blok di sekitar sambungan. Keruntuhan geser blok dikenal sebagai bentuk keruntuhan potensial yang dapat menentukan beban kapasitas dari beberapa jenis sambungan atau elemen



Gambar 1 Mekanisme Keruntuhan Geser Blok Pada Sambungan Baut

struktur. Sebagai ilustrasi, mekanisme keruntuhan geser blok dapat dilihat pada Gambar 1. Blok yang terhubung dengan pelat buhul (gusset plate) dibatasi oleh garis lintasan keruntuhan di antara lubang-lubang baut, di mana dalam mekanisme keruntuhannya gaya tarik terjadi di sepanjang garis transversal (bidang tarik) dan gaya geser terjadi di sepanjang garis longitudinal antar lubang baut (bidang geser).

Meskipun perhitungan *block shear rupture strength* tidak dimasukkan dalam ketentuan di *Chapter D* (bab dalam AISC yang membahas masalah elemen tarik), tetapi pengantar paragraf pada AISC-LRFD 1999 *Chapter D*, serta catatan *user* pada AISC-LRFD 2005 *Chapter D*, telah mengarahkan *user* untuk melihat *Section J4.3*. Menurut AISC-LRFD 1999, kekuatan geser blok diperhitungkan dari nilai terkecil di antara dua jenis kegagalan struktur elemen tarik yang mungkin terjadi, yaitu:

- a. Leleh geser dan fraktur tarik, jika :

$$F_u \cdot A_{nt} \geq 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv}$$

$$fR_n = f \{ 0.6 F_y A_{gv} + F_u A_{nt} \} \leq f \{ 0.6 F_u A_{nv} + F_u A_{nt} \} \quad (1)$$

- b. Leleh tarik dan fraktur geser jika :

$$F_u \cdot A_{nt} < 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv}$$

$$fR_n = f \{ 0.6 F_u A_{nv} + F_y A_{gt} \} \leq f \{ 0.6 F_u A_{nv} + F_u A_{nt} \} \quad (2)$$

Sedangkan menurut AISC-LRFD 2005, kekuatan tersedia untuk batas keruntuhan geser blok sepanjang jalur geser dan jalur tegak lurus gaya tarik diperhitungkan dengan cara:

$$fR_n = f_{min} \{ U_{bs} F_u A_{nt} + 0.6 F_y A_{gv}; U_{bs} F_u A_{nt} + 0.6 F_u A_{nv} \}$$

Keterangan:

A_{gt} = luas bruto yang mengalami tarik
 A_{nt} = luas neto yang mengalami tarik
 A_{gv} = luas bruto yang mengalami geser
 A_{nv} = luas neto yang mengalami geser

$U_{bs} = 1$ untuk distribusi tegangan tarik yang seragam

$U_{bs} = 0.5$ untuk distribusi tegangan tarik non seragam.

$f = 0.75$

AISC-LRFD 1999 mengasumsikan bahwa salah satu bidang tarik atau geser mencapai kekuatan ultimitnya, maka pada bidang yang lain terjadi kelelahan seluruhnya (Salmon & Johnson, 1990). Asumsi ini menghasilkan dua kemungkinan mekanisme keruntuhan yang penentu keruntuhannya adalah salah satu yang memiliki nilai kuat fraktur terbesar. Mekanisme pertama mengasumsikan bahwa beban ultimit tercapai ketika keruntuhan terjadi di sepanjang bidang tarik

bersih (the net tension plane) dan kelelahan seluruhnya terjadi pada bidang geser kotor (the gross shear plane). Kebalikannya, bentuk keruntuhan kedua mengasumsikan bahwa keruntuhan terjadi di sepanjang bidang geser bersih sementara kelelahan seutuhnya terjadi pada bidang tarik kotor.

AISC-LRFD 2005 mengasumsikan bahwa kekuatan geser blok selalu ditentukan oleh kekuatan tarik pada bidang tarik bersih yang diakumulasikan dengan kekuatan geser minimal pada bidang geser kotor atau bersih. Dalam asumsi tersebut, fraktur selalu terjadi pertama kali pada bidang tarik, diikuti dengan leleh pada bidang geser (Brockenbrough et al, 2006). Pada bidang tarik bersih, untuk kondisi tegangan tarik yang seragam diberi faktor koreksi UBS = 1, sedangkan untuk kondisi tegangan tarik yang tidak seragam diberi faktor koreksi UBS = 0.5. Distribusi tegangan tarik tidak seragam umumnya terjadi pada sambungan-sambungan yang memiliki jarak eksentrisitas antara titik berat dari sambungan terhadap gaya tarik yang relatif besar (Gupta, 2005).

Tinjauan berikut ini akan memaparkan bentuk keruntuhan yang mirip seperti geser blok, namun diasumsikan keruntuhan yang terjadi pada bidang tarik dan bidang geser adalah kelelahan seutuhnya tanpa disertai timbulnya fraktur. Analisis kekuatan ultimit dan distribusi tegangan pada penampang pelat tarik baja berlubang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak analisis elemen hingga (*finite element analysis*) yaitu ADINA 8.3.1. Dalam hal ini, kriteria keruntuhan ditentukan oleh kondisi batas regangan maksimum. Karena masalah mekanisme fraktur dalam *finite element analysis* (FEA) tidak ditinjau, maka bentuk keruntuhan yang terjadi bukanlah mencerminkan keruntuhan geser blok sebenarnya, namun akan ditinjau apakah keruntuhan dengan asumsi leleh tanpa fraktur akan menjadi lebih menentukan, mengingat penyebaran leleh dapat menurunkan kapasitas beban dari suatu struktur tanpa memutuskan elemen tersebut. Tinjauan berikut juga akan membahas masalah distribusi tegangan dan

regangan yang terjadi pada pelat tarik baja berlubang. Dengan mengevaluasi distribusi tegangan dan regangan tersebut maka akan diketahui apakah bentuk keruntuhan yang terjadi sesuai dengan mekanisme keruntuhan geser blok.

BAJA & PEMODELANNYA

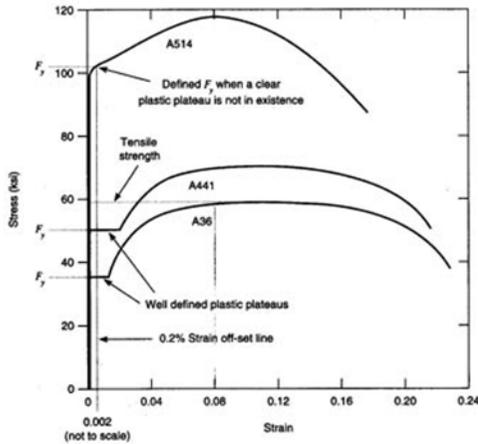
Sifat Material Baja

Sifat mekanis material baja diperoleh dari uji tarik yang melibatkan pembebanan tarik sampel baja dan bersamaan dengan itu dilakukan pengukuran beban dan perpanjangan sehingga diperoleh tegangan dan regangan yang dihitung dengan menggunakan $\sigma = P/A$ dan $\epsilon = DL/L$. Selama uji tarik, sampel dibebani hingga hancur, dan diperoleh diagram tegangan regangan seperti

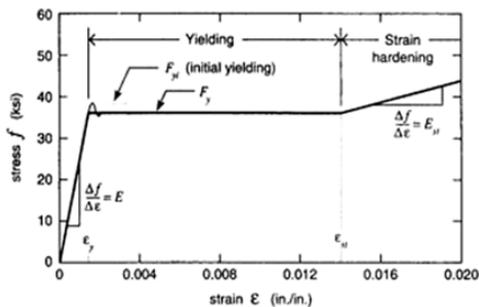
Gambar 2. Pada awal pembebanan, terlihat hubungan linier antara tegangan dan regangan. Selanjutnya, setelah melewati titik limit proporsional, hubungan tersebut menjadi tidak linier seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 2a. Baja akan bersifat tetap elastis (artinya apabila beban dihilangkan akan kembali ke panjang semula), apabila tegangannya tidak melewati suatu titik yang nilainya sedikit di atas limit proporsional, atau disebut limit elastis. Karena limit proporsional dan limit elastis sangat dekat, maka seringkali dianggap sebagai titik yang sama.

Ketika beban bertambah, tercapai suatu titik dimana regangan bertambah namun tegangannya konstan. Tegangan demikian disebut tegangan leleh F_y . Pada Gambar 2b terlihat adanya tegangan leleh awal (initial yielding) yang nilainya sedikit lebih besar dari F_y . Tegangan leleh awal hanya dapat tercapai sesaat dan nilainya tidak stabil. Regangan saat tegangan leleh awal terjadi dinamakan regangan leleh awal ϵ_y . Pada saat baja terus meregang atau meleleh, yang lama kelamaan akan dicapai suatu titik dimana kapasitas pikul bebannya bertambah. Fenomena bertambahnya kekuatan ini disebut *strain hardening*. Saat mengalami *strain hardening*, baja akan

mencapai tegangan maksimum yang selanjutnya terjadi penurunan kapasitas pikul beban meskipun regangan terus bertambah hingga baja putus. Tegangan maksimum tersebut dinamakan tegangan



Gambar 2a.
Kurva tegangan regangan
dari 3 jenis baja ASTM (Englekirk, 1994)



Gambar 2b
Diagram Tegangan Regangan
Hasil Uji Tarik Baja A36 (Englekirk, 1994)

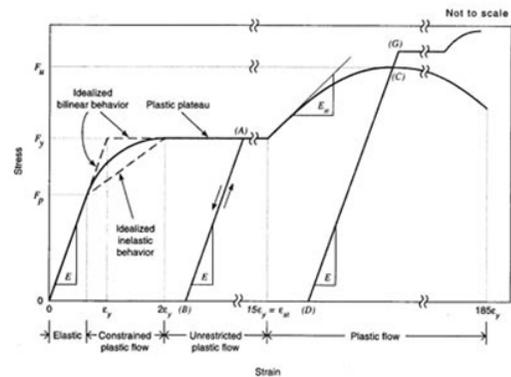
ultimit F_u atau kuat tarik baja.

Gambar 3 memperlihatkan idealisasi kurva tegangan regangan yang digunakan untuk tujuan praktis. Bagian kurva mulai dari titik awal hingga limit proporsional dinamakan selang elastis. Setelah melewati limit proporsional, baja diidealisasikan

berperilaku inelastik hingga regangan sekitar $2\epsilon_y$ dan mengalami *plastic plateau* hingga regangan *strain hardening* sebesar $15\epsilon_y$. Baja diasumsikan mendekati runtuh ketika regangan mencapai $185\epsilon_y$ (Englekirk, 1994).

Pemodelan Material Pada FEA

Dalam FEA, hubungan tegangan regangan dari material baja dapat dimodelkan sebagai kurva linier dan nonlinier, di mana pemodelan kurva nonlinier diantaranya tersedia pilihan kurva bilinear atau multilinear. Pada studi numerik berikut ini akan di pelajari sampai sejauh mana perbedaan penggunaan ketiga jenis model material tersebut, yaitu model material elastik linier, model material elastik-plastik bilinear, dan model material elastik-plastik



Gambar 3
Idealisasi Kurva Tegangan Regangan
(Englekirk, 1994)

multilinear.

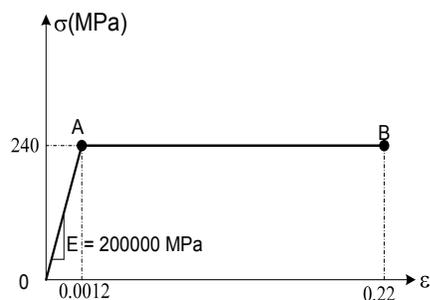
material elastik linier diasumsikan mempunyai modulus elastisitas sebesar $E = 200000$ MPa dan rasio Poisson sebesar 0.3. Untuk model material elastik-plastik bilinear, nilai modulus elastisitas dan rasio poisson diasumsikan sama dengan model material elastik linier, dan memiliki tegangan leleh awal sebesar 240 MPa. Dalam model material elastik-plastik bilinear, efek *strain hardening* tidak ditinjau dan

regangan plastik efektif maksimum dibatasi sebesar 22% (asumsi regangan putus baja sebesar $185\varepsilon_y$). Model material elastik-plastik bilinear dalam FEA dapat dilihat pada Gambar 4a.

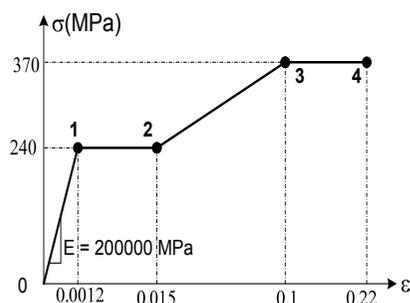
Sedangkan untuk model material elastik-plastik multilinear, material juga diasumsikan mempunyai modulus elastisitas dan rasio Poisson yang sama dengan model material elastik linier. Dalam kurva multilinear tersebut, regangan leleh dan tegangan leleh diasumsikan terjadi sebesar 0.0012 dan 240 MPa. Kemudian material diasumsikan mulai mengalami *strain hardening* saat mencapai regangan 1,5% dan tegangan ultimit sebesar 370 MPa tercapai saat regangan ultimit mencapai 1%. Baja diasumsikan putus bila mengalami regangan plastik sebesar 22% ($185\varepsilon_y$) yang terjadi saat tegangan mencapai 370 MPa. Model material elastik-plastik multilinear dapat dilihat pada Gambar 4b. Ketiga jenis model kurva material tersebut akan ditinjau perilaku linier dan nonlinieritasnya selama analisis elemen hingga dengan cara menggambarkan hubungan beban dan peralihan yang terjadi. Selanjutnya akan digunakan salah satu dari ketiga model material tersebut untuk analisis nonlinier dalam studi numerik ini.

PEMODELAN GEOMETRI PELAT TARIK BAJA BERLUBANG

Model-model geometri pelat tarik baja berlubang yang akan dilakukan untuk analisis elemen hingga nonlinier dapat dilihat pada Gambar 5. Setiap model geometri akan ditentukan besarnya $q_{ultimit}$ berdasarkan kondisi batas regangan maksimum. Model uji tersebut menggunakan elemen *plane stress 2D*, berjenis *quadrilateral* yang memiliki jumlah titik nodal setiap elemen adalah 9 (Q9). Derajat kebebasan yang terjadi di setiap titik nodal adalah sebanyak 2 buah, yaitu translasi arah Z dan arah Y. Pada setiap lubang pelat, setengah lingkaran pelat tidak mengalami peralihan arah Z maupun arah y (*boundary condition*) karena diasumsikan diameter baut sama dengan diameter



(a) Kurva Tegangan Regangan *Elastic-Plastic Bilinear*



(b) Kurva Tegangan Regangan *Elastic-Plastic Multilinear*

Gambar 4 Model Material untuk FEA

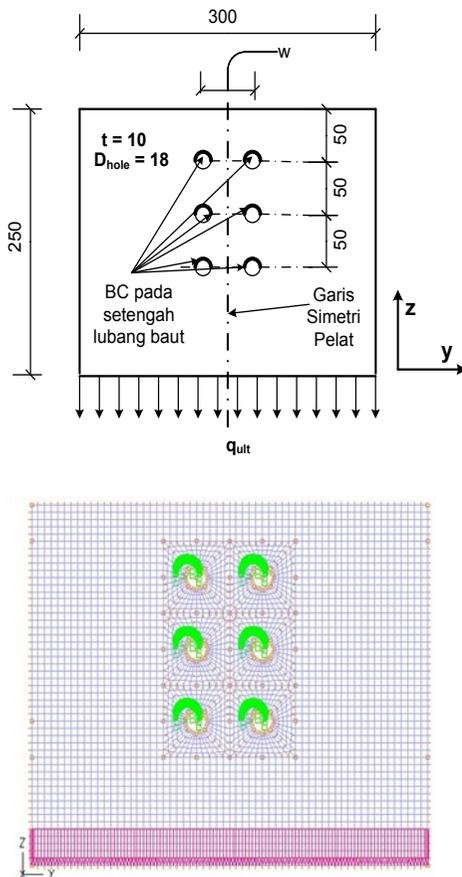
lubang pelat dan setengah diameter lubang menumpu pada baut. Dalam hal ini, analisis kontak antara tepi lubang dengan batang baut tidak ditinjau. Beban awal tarik berupa *prescribed pressure* diberikan sebesar 1 N/mm² disepanjang penampang pelat bawah.

Untuk mengetahui bagaimana distribusi tegangan pada bidang tarik serta pengaruhnya terhadap beban ultimit, maka jarak baris baut (dinyatakan dengan simbol w) dijadikan variasi sebagai berikut; 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm dan 70 mm. Sehingga pada akhirnya akan diperoleh hasil FEA sebanyak 5 kali pengujian.

KERUNTUHAN BERDASARKAN BATAS REGANGAN MAKSIMUM

Kondisi keruntuhan yang terjadi pada elemen model adalah berdasarkan regangan plastik efektif maksimum (ADINA, 2005). Untuk kurva tegangan-regangan

bilinier, kehancuran regangan plastik yang terjadi secara tidak langsung berhubungan dengan batas regangan plastik efektif maksimum yang ditetapkan saat 'input' regangan plastik efektif maksimum untuk kurva tegangan-regangan biliner (Gambar 3). Sedangkan untuk kurva tegangan-regangan multilinier, batas regangan plastik



Gambar 5
Pemodelan Pelat untuk FEA
(Satuan panjang dalam mm)

efektif maksimum ditentukan berdasarkan 'input' data regangan tegangan yang terakhir (Gambar 4).

Apabila suatu titik elemen dari model

memiliki nilai regangan plastik efektif yang mencapai nilai regangan plastik efektif maksimum yang telah ditetapkan tersebut, maka elemen tersebut tidak akan memberikan kontribusi kekakuan terhadap model. Sehingga model akan memiliki batas kekakuan tertentu saat penambahan beban dalam *time step* berikutnya, dan dalam suatu *time step* tertentu model tidak akan dapat menerima tambahan beban lagi sehubungan dengan terbatasnya kekakuan yang dimiliki atau kejadian konvergensi dalam iterasinya tidak tercapai. Pembebanan saat *time step* terakhir yang dapat diberikan ketika iterasi masih menunjukkan konvergensi diasumsikan sebagai beban maksimum atau ultimit.

Model material yang digunakan dalam penyelesaian FEA di atas menggunakan hubungan tegangan-regangan *plastic-bilinear*, sehingga penyelesaian FEA-nya merupakan persoalan nonlinier yang memerlukan adanya iterasi seperti yang telah disebutkan di atas. Iterasi dilakukan untuk setiap tahap pembebanan. Selesai atau tidaknya suatu iterasi dalam setiap tahap pembebanan berhubungan dengan konvergensi yang dapat dicapai oleh program. Konvergensi tersebut tergantung pada jenis iterasi yang dipilih dan batas toleransi yang diberikan. Dalam studi numerik ini, iterasi yang dipilih untuk penyelesaian persoalan nonlinier di atas adalah iterasi *Full Newton* (Gambar 6) atau lebih dikenal dengan iterasi *Newton-Raphson*. Algoritma persamaan yang digunakan untuk iterasi tersebut adalah sebagai berikut (Bathe, 1982) :

$${}^{t+Dt}K^{(i-1)}DU^{(i)} = {}^{t+Dt}R - {}^{t+Dt}F^{(i-1)} \quad \dots(3)$$

$${}^{t+Dt}U^{(i)} = {}^{t+Dt}U^{(i-1)} + DU^{(i)} \quad \dots(4)$$

Keterangan :

${}^{t+Dt}R$ adalah vektor yang menyimpan beban eksternal (prescribed) pada tahap waktu (beban) $t + Dt$

${}^{t+Dt}F^{(i-1)}$ adalah vektor gaya titik nodal yang ekuivalen terhadap tegangan elemen pada tahap waktu (beban) $t + Dt$ dan dalam tahap iterasi $(i-1)$. Vektor ${}^{t+Dt}F^{(i-1)}$ bergantung secara nonlinier terhadap peralihan titik nodal yang solusinya memerlukan iterasi.

$DU^{(i)}$ adalah matriks solusi inkremen yang digunakan untuk menentukan peralihan iterasi berikut.

${}^{t+Dt} K^{(i-1)}$ adalah matriks kekakuan tangen berdasarkan solusi yang dihitung pada akhir iterasi ($i - 1$) saat tahap waktu (beban) $t + Dt$.

Pada persamaan 3 tersebut, matriks $DU^{(i)}$ dicari untuk menghasilkan matriks ${}^{t+Dt}U^{(i)}$ dalam persamaan 4. Selanjutnya matriks ${}^{t+Dt}U^{(i)}$ digunakan untuk mencari vektor ${}^{t+Dt}F^{(i-1)}$ yang merupakan fungsi dari peralihan. Umumnya, solusi dari persamaan 3 tidak akan memenuhi sistem keseimbangan dari elemen hingga nonlinier, sehingga selalu ada selisih (residual) antara vektor gaya luar ${}^{t+Dt}R$ dengan vektor tahanan internal ${}^{t+Dt}F^{(i-1)}$, atau dapat didefinisikan ${}^{t+Dt}R - {}^{t+Dt}F^{(i-1)}$. Jika *residual* yang dihasilkan sangat kecil maka solusi persamaan 3 dapat diterima sebagai solusi yang tepat, atau dengan kata lain kriteria konvergensi telah tercapai. Namun jika *residual* besar, proses iterasi diulangi lagi hingga nilai residual yang dihasilkan sangat kecil. Setelah konvergensi tercapai dalam suatu tahap pembebanan tertentu yaitu tR , maka iterasi dilakukan untuk tahap pembebanan berikutnya yaitu ${}^{t+Dt}R$. Besarnya ukuran beban yang diberikan dalam setiap tahap pembebanan berikutnya dapat diatur seperti Gambar 7.

Menurut Bathe (Bathe, 1982), untuk memberikan indikator saat peralihan dan gaya hasil iterasi tersebut mendekati nilai keseimbangannya, kriteria konvergensi berdasarkan inkremen energi internal setiap iterasi dipandang lebih bermanfaat dibandingkan inkremen energi internal saat kondisi awal. Inkremen energi internal setiap iterasi merupakan jumlah kerja yang dilakukan oleh keseimbangan beban luar dalam inkremen peralihan. Konvergen diasumsikan tercapai ketika;

$$\| {}^{t+Dt}R - {}^{t+Dt}F^{(i)} \|_2 \leq e_E \| {}^{t+Dt}R - {}^tF \|_2 \dots(5)$$

$$conv = \frac{\|R^{i+1}\|^2}{1 + \|R_E\|^2} \equiv \frac{\sum_{j=1}^n (R_j^{i+1})^2}{1 + \sum_j (R_{Ej})^2} \text{ Kriteria} \dots(6)$$

konvergensi biasanya dinyatakan dalam

bentuk ternormalisir seperti berikut (Bhatti, 2006):

R^{i+1} merupakan nilai residu yang diperoleh dari selisih antara beban eksternal $R_E (= {}^{t+Dt}R$ dalam persamaan Bathe) dengan tahanan internal. Konstanta bernilai 1 diberikan sebagai denominator untuk mencegah terjadinya pembagi nol ketika R_E bernilai nol. Iterasi akan selesai bila parameter konvergensi bernilai lebih kecil atau sama dengan toleransi (misal, toleransi = 0.01). Dalam FEA, penentuan kriteria konvergensi mirip dengan persamaan 6, dan diberikan dalam beberapa opsi pilihan, yaitu berdasarkan (ADINA, 2005): *energy only*, *energy and force*, *energy and displacemet*, *force only*, dan *displacement only*. Secara *default*, program menggunakan kriteria konvergensi energi yang dinyatakan dalam persamaan:

$$\frac{\Delta U^{(i)T} [{}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F^{(i-1)}]}{\Delta U^{(i)T} [{}^{t+\Delta t}R - {}^tF]} \leq ETOL \dots(7)$$

Nilai toleransi energi (ETOL) dalam program dapat ditentukan sesuai tingkat ketelitian yang diinginkan *user*. Secara *default*, toleransi energi untuk kriteria konvergensi yang ditetapkan program adalah sebesar 0.001, dan jenis batasan toleransi inilah yang digunakan dalam studi numerik ini.

Secara tidak langsung, hubungan tegangan-regangan dari model material nonlinieritas berpengaruh terhadap penentuan matriks kekakuan tangen ${}^{t+Dt}K^{(i-1)}$ dan gaya internal ${}^{t+Dt}F^{(i-1)}$ dari persamaan 3 di atas. Untuk elemen 2D, matriks kekakuan tangen diformulasikan dengan persamaan (Cook et all, 2002):

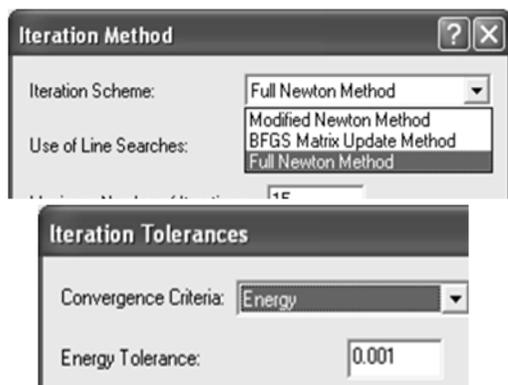
$$[k_T] = \int [B]^T [E_{ep}] [B] dV \dots(8)$$

Keterangan :

B = matriks *strain-displacement*

E_{ep} = matriks elastis plastis

Dalam setiap iterasi, persamaan (8) yang digunakan untuk menentukan matriks



Gambar 6
Metode Iterasi yang Dipilih dan Batas Toleransi Konvergensi yang Ditetapkan

kekakuan tangen tersebut hampir mirip dengan persamaan yang digunakan untuk menentukan matriks kekakuan solusi linier, yaitu seperti penentuan matriks B yang berdasarkan fungsi bentuk (shape function) dari elemen *plane stress* 2D yang digunakan. Sedangkan perbedaannya terletak pada saat menentukan matriks E_{ep} , yang susunan matriksnya tergantung pada kondisi tegangan yang terjadi, apakah dalam kondisi elastis atau plastis. Karena dalam setiap iterasi persamaan 3 akan selalu dihasilkan pertambahan nilai (increment) peralihan $DU^{(i)}$ yang baru, maka akan selalu ada inkremen regangan yang

terjadi (sesuai dengan definisi $\Delta \epsilon = \frac{\Delta u}{L}$). Inkremen regangan tersebut bila dijumlahkan dengan regangan saat proses iterasi sebelumnya akan mendefinisikan nilai regangan dan tegangan yang baru, yang sekaligus pula akan menentukan apakah status tegangan elemennya telah mencapai kondisi plastis (melebihi tegangan leleh F_y yang ditetapkan) atau belum. Sehingga dalam hal ini matriks E_{ep} dapat disusun berdasarkan kondisi tegangan tersebut. Selama inkremen regangan yang terjadi saat tahap iterasi (i-1) di suatu elemen tidak memberikan inkremen

regangan plastik efektif yang nilainya melebihi inkremen regangan plastik efektif maksimum yang telah ditetapkan, nilai-nilai tegangan yang berhubungan dengan inkremen regangan plastis dari elemen tersebut akan digunakan dalam penyusunan matriks E_{ep} . Inkremen regangan plastik efektif dinyatakan dengan persamaan (ADINA, 2005):

$$\Delta e^p = \sqrt{\frac{2}{3} \left[(d\epsilon_x^p)^2 + (d\epsilon_y^p)^2 + (d\epsilon_z^p)^2 + \frac{1}{2} (d\gamma_{xy}^p)^2 + d\gamma_{yz}^p{}^2 + d\gamma_{xz}^p{}^2 \right]} \quad (9)$$

Setiap proses iterasi meningkat ke proses iterasi berikutnya, nilai gaya internal $t^{+Dt} F^{(i-1)}$ dari persamaan 3 di atas juga akan bertambah, sehingga akan memberikan selisih residu yang makin kecil. Pertambahan nilai gaya internal $t^{+Dt} F^{(i-1)}$ tersebut diakibatkan adanya pertambahan nilai tegangan dari yang dihasilkan di setiap elemen, yang secara tidak langsung diakibatkan adanya inkremen peralihan yang telah disebutkan di atas. Bertambahnya nilai tegangan-tegangan dalam suatu elemen akan melampaui tegangan leleh yang telah ditetapkan. Karena jumlah tegangan secara umum adalah 6 buah, maka untuk menyatakan kelelahan suatu elemen model harus berdasarkan pengaruh keenam jenis tegangan tersebut, yang dinyatakan dengan tegangan efektif seperti persamaan 10, (ADINA, 2005) yaitu:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 6 \left[\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 \right]} \quad (10)$$

Sesuai dengan teori von Mises, leleh berawal ketika tegangan efektif di suatu titik melebihi batas tegangan leleh uniaksial tarik (σ_Y), atau dapat dinyatakan dengan pertidaksamaan berikut (Cook, 1999)

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_Y} \geq 1$$

Leleh terjadi bila(11)

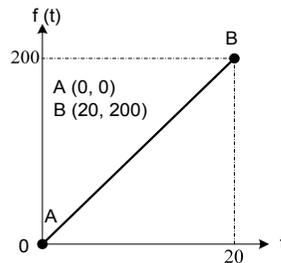
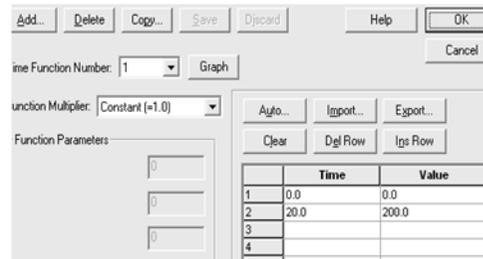
Jika dalam model ditetapkan $\sigma_Y = 240$ MPa, maka node-node elemen yang memiliki nilai tegangan efektif yang sama atau melebihi

240 MPa dapat dinyatakan telah mengalami kelelahan. Sehingga dalam analisis distribusi tegangan efektif dari hasil FEA berikut akan meninjau lokasi-lokasi di sekitar lubang pelat yang telah memiliki nilai tegangan efektif lebih besar atau sama dengan 240 MPa.

5. PREDIKSI KEKUATAN ULTIMIT DENGAN AUTOMATIC TIME-STEPPING

Prediksi kekuatan ultimit yang dimaksud adalah beban *pressure* yang dapat diberikan pada tahap pembebanan terakhir yang telah mencapai konvergen. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, bahwa setiap tahap pembebanan yang telah mencapai konvergen akan berpindah ke tahap pembebanan berikutnya, dimana besarnya ukuran beban tahap pembebanan berikutnya diatur menggunakan fungsi waktu seperti Gambar 7. Namun untuk mendapatkan besarnya ukuran beban yang akan digunakan untuk analisis tahap pembebanan paling akhir (dan mencapai konvergen) adalah sulit, karena memerlukan waktu untuk *trial and error* yang sangat lama. Dalam hal ini, *software FE* memberikan suatu option *Automatic Time-Stepping* (ATS) yang secara otomatis dapat berfungsi mengatur besarnya ukuran beban dalam setiap tahap pembebanan apabila kovergensinya sulit tercapai. Sehingga *trial and error* untuk penentuan besar ukuran beban pada tahap pembebanan paling akhir dapat diminimalisasi

Selama analisis berjalan, option *Automatic Time-Stepping* (ATS) harus dalam keadaan aktif, dan pendefinisian *time step* untuk memperoleh beban yang konvergen dilakukan secara *trial and error* berdasarkan ATS. Selanjutnya, nilai *prescribed pressure* saat kondisi konvergen tersebut dibagi dengan luas penampang pelat, akan menjadi kekuatan ultimit tarik dari pelat baja berlubang. Apabila selama analisis sedang berjalan tidak ada konvergen yang tercapai, maka secara otomatis program akan membagi inkremen



Gambar 7
Mendefinisikan Variasi Beban Berdasarkan Fungsi Waktu

step beban terakhir sedemikian hingga mencapai konvergen. Sebagai contoh, definisi variasi beban dengan menggunakan fungsi waktu diinputkan sebagai berikut; saat $t = 0$ maka $f(t) = 0$; dan saat $t = 20$ maka $f(t) = 200$. Artinya besar inkremen setiap *step* pembebanan adalah $q \cdot 200 / 20 = 10q$ satuan beban. Jika q adalah besaran beban yang diaplikasikan (misal *pressure* = 1 MPa), maka besar beban *step* ke 14 adalah $14 \cdot 1 \text{ MPa} \cdot 200 / 20 = 140 \text{ MPa}$. Jika pada awal mulanya definisi untuk jumlah *step* pembebanan diisi sembarang (misal 20 dengan ukuran *step* = 1, karena tidak diketahui konvergen tercapai pada *step* ke berapa), maka secara otomatis ATS akan membagi inkremen *step* pembebanan terakhir dan memberikan informasi pada *step* pembebanan ke berapa konvergen akan tercapai, seperti Gambar 9.

Pada Gambar 9 tersebut, ATS menginformasikan bahwa saat *step* 14 (dari 20 *step* yang didefinisikan) konvergen tidak tercapai, maka ukuran *step* dirubah dari semula 1 menjadi 0.2. Pada akhirnya diperoleh perkiraan konvergen terjadi pada



Gambar 8

Mendefinisikan Jumlah Step Pembebanan Saat Awal Analisis

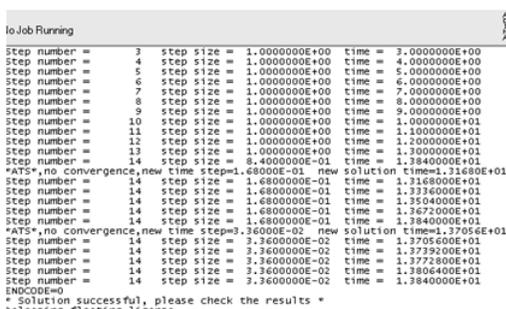


Gambar 10

Merubah definisi jumlah step sesuai ATS

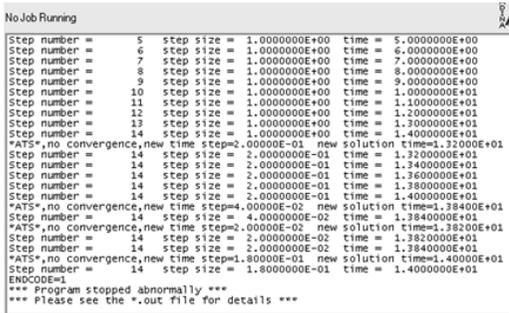
step 14 dengan nilai waktu adalah 13.84. Maka definisi jumlah step pembebanan dirubah seperti pada Gambar 10. Setelah dianalisis ulang, maka akan diperoleh solusi yang konvergen (succesful) seperti pada Gambar 11. Nilai waktu sebesar 13.84 berarti memberikan *prescribed pressure* sebesar 138.4 MPa, dan nilai inilah yang menjadi nilai kekuatan ultimit dalam analisis.

ANALISIS ELEMEN HINGGA YANG DILAKU-



Gambar 11

Informasi Konvergensi Telah TercPada Gam-



Gambar 9

Informasi ATS tentang Pembagian Inkremen Step Pembebanan Terakhir Sebelum Konvergen Tercapai, yaitu Step 14

KAN BESERTA TUJUANNYA

Studi numerik berikut ini akan mempelajari 3 tujuan utama sehubungan dengan masalah kondisi batas regangan maksimum. Sehingga jenis *running program* yang dilakukan sesuai dengan tujuan masing-masing sebagai berikut:

a. *Running program* dengan menggunakan model material linier, *plastic-bilinier* dan

plastic-multilinier. Model geometri yang digunakan adalah model pelat dengan $w = 30$ mm hingga 70 mm. Tujuannya adalah untuk mengetahui sejauh mana perbedaan hasil FEA akibat perbedaan penggunaan model material tersebut.

b. *Running program* dengan menggunakan model material *plastic-bilinier* yang menggunakan regangan plastik efektif maksimum sebesar 22% dan 100%. Model geometri yang digunakan adalah model pelat dengan $w = 50$ mm. Tujuannya adalah untuk mengetahui sejauh mana perbedaan hasil FEA akibat perbedaan penggunaan regangan plastik efektif maksimum tersebut.

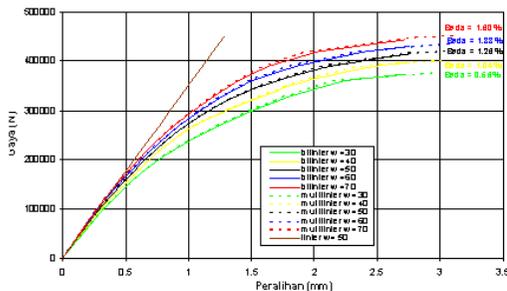
c. *Running program* dengan menggunakan model material *plastic-bilinier* yang menggunakan regangan plastik efektif maksimum sebesar 22%. Model geometri yang digunakan adalah model pelat dengan jarak 2 pusat baris baut (w) adalah 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm dan 70 mm. Tujuannya adalah untuk

mengetahui sejauh mana perbedaan kekuatan ultimit hasil FEA dengan metode desain AISC-LRFD. Selain itu juga akan dilakukan analisis distribusi tegangan hasil FEA.

HASIL DAN PEMBAHASAN UNTUK 3 JENIS MODEL MATERIAL

Hubungan gaya dan peralihan yang merupakan hasil FEA untuk model material elastik linier, model material elastik-plastik bilinear, dan model material elastik-plastik multilinier dapat dilihat pada Gambar 12. Terlihat untuk model material linier menghasilkan hubungan gaya dan peralihan yang linier pula. Pengaruh nonlinieritas material terlihat untuk model material elastik-plastik bilinear, dan model material elastik-plastik multilinier, di mana kurva gaya dan peralihan tersebut menunjukkan suatu hubungan batas gaya maksimum yang dapat dicapai dengan regangan yang lebih besar dibandingkan dengan regangan yang bersifat linier.

Pada Gambar 12, antara model elastik-plastik multilinier dan elastik-plastik bilinear



Gambar 12

Kurva Model Material *Plastic-Bilinear* dan *Plastic-Multilinier* Tidak Berbeda Jauh.

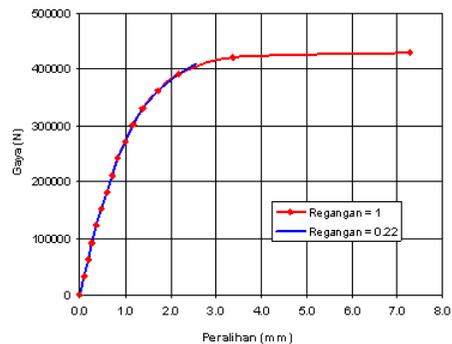
Hubungan Gaya vs Peralihan yang Diambil Pada Titik Simetris dimana Beban Bekerja.

menghasilkan perbedaan nilai P_{max} yang relatif kecil yaitu sekitar 0.56% hingga 1.6%. Oleh sebab itu, untuk memudahkan analisis FE selanjutnya, tinjauan penggunaan model material yang dipilih adalah *plastic - bilinear*

HASIL DAN PEMBAHASAN KONDISI BATAS REGANGAN MAKSIMUM

Pada Gambar 13 terlihat hubungan gaya dan peralihan untuk model material plastik bilinear yang regangan plastik efektif maksimumnya dibatasi sebesar 22% dan 100%. Terlihat untuk regangan plastik efektif maksimum sebesar-besarnya ($\epsilon_{peff} = 100\%$) menunjukkan kekuatan ultimit yang dicapai maksimum sebesar 430.5 kN (beda 31.24%) dan untuk regangan plastik efektif yang dibatasi sesuai asumsi baja putus ($\epsilon_{peff} = 22\%$) menunjukkan kekuatan ultimit yang dicapai maksimum sebesar 414.99 kN (beda 33.7%). Perbedaan sebesar kurang dari 35% tersebut apabila dibandingkan dengan metode desain AISC-LRFD 2005 yang kekuatan ultimitnya mencapai 626.16 kN. Hal ini menunjukkan bahwa dengan asumsi baja meregang/meleleh sepanjang apapun asal tidak terjadi fraktur masih dapat menentukan kekuatan ultimit dari elemen tarik baja.

Apabila melihat perbedaan kekuatan



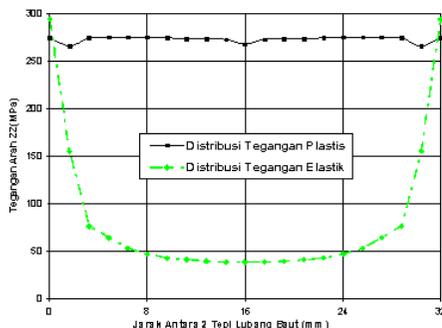
Gambar 13

Hubungan Gaya dan Peralihan untuk Model Material *Plastic-Bilinear* dengan Regangan Maksimum sebesar 100% dan 22%

ultimit yang dihasilkan dari kedua pembatasan regangan plastik maksimum tersebut, maka tampak bahwa perbedaan kekuatan ultimit yang dihasilkan tidak

signifikan, yaitu sebesar 3.6%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan model regangan maksimum sebesar 100% masih memberikan hasil kekuatan ultimit yang cukup dengan kondisi regangan putus baja.

Sedangkan Gambar 14 dan 15 berikut, memperlihatkan hasil FEA untuk distribusi tegangan tarik (arah Z) saat kelelahan seutuhnya terjadi pada bidang tarik w. Terlihat distribusi tegangan tarik saat kondisi elastik dan plastis untuk model material bilinear dengan regangan plastis maksimum 22% dan 100% menunjukkan perilaku yang hampir sama. Untuk regangan plastis maksimum 22%, hasil kondisi elastik diambil dari step pembebanan ke 3 dan kondisi plastis diambil dari step pembebanan ke 14. Untuk regangan plastis maksimum 100%, kondisi elastik diambil dari step pembebanan ke 3, dan kondisi plastis diambil dari step pembebanan ke 15.



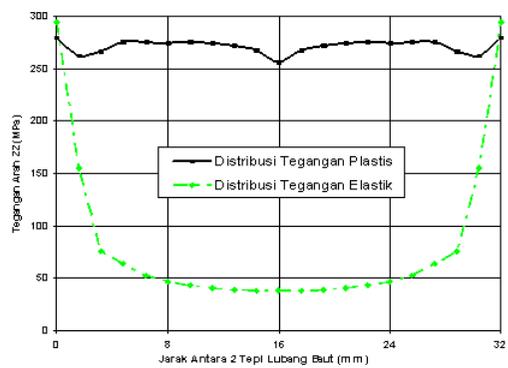
Gambar 14
Distribusi Tegangan Tarik Untuk
Regangan Maksimum = 22%

KEKUATAN ULTIMIT TARIK HASIL FEA, AISC-LRFD99 & AISC-LRFD 05

Tabel 1 memperlihatkan hasil kekuatan ultimit yang dicapai untuk setiap model geometri dengan variasi jarak antar baris baut (w) selama analisis elemen hingga dilakukan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin panjang jarak antar baris

baut, yang artinya semakin luas bidang tarik efektifnya, maka semakin besar kekuatan ultimit yang dimiliki. Perbandingan hasil peralihan dan besarnya gaya yang diaplikasikan untuk setiap tahap pembebanan dapat dilihat pada Gambar 16. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin panjang jarak antar baris baut, maka deformasi atau peralihan yang terjadi semakin kecil

Besarnya kekuatan ultimit menurut



Gambar 15
Distribusi Tegangan Untuk
Regangan Maksimum = 100%

Tabel 1
Hasil Prediksi Kekuatan Ultimit Menurut FEA

No.	w	$Q_{ultimit}$ (N/mm ²)	R_n
			(N)
1	30	124.7	374100
2	40	132.4	397170
3	50	138.3	414990
4	60	143.4	430200
5	70	147.8	443400

metode desain AISC-LRFD1999 dan AISC-LRFD2005 dapat dilihat pada Tabel 4 dan 6. Karena lebar pelat dalam arah tegak lurus beban diasumsikan cukup lebar yaitu 300 mm, maka dalam hal ini keruntuhan tarik akibat leleh pada penampang kotor

($F_y.A_g$) sebesar 720 kN dan keruntuhan tarik akibat fraktur pada penampang efektif ($F_u.A_e$) sebesar 879,1 kN bukanlah penentu keruntuhan tarik pada pelat. Menurut AISC, keruntuhan pelat lebih mungkin ditentukan oleh keruntuhan geser blok di sekitar kelompok lubang baut dan peningkatan kekuatan ultimit terjadi sesuai dengan variasi jarak w yang semakin membesar pula. Pada Tabel 3 dan 5 menunjukkan hasil perhitungan metode desain dengan memperhitungkan faktor reduksi. Hasil perbandingan FEA dengan metode desain AISC dapat dilihat pada Tabel 7.

Karena asumsi mekanisme keruntuhan FEA dan desain AISC-LRFD berbeda, maka perbedaan prediksi kekuatan ultimit hasil FEA dengan metode desain AISC dari Tabel 7 terlihat bahwa peningkatan kekuatan ultimit akibat variasi jarak baris baut menurut AISC-LRFD2005 dengan faktor reduksi adalah cukup mendekati hasil FEA, karena memiliki persentasi perbedaan yang sedikit.

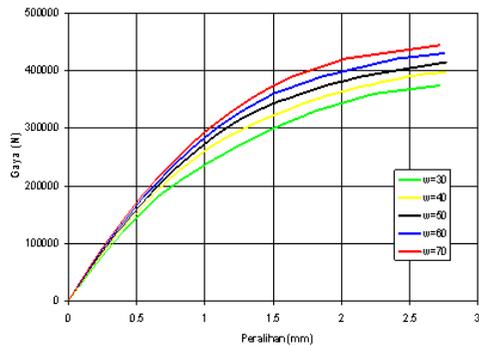
DISTRIBUSI TEGANGAN PADA PENAMPANG

Tabel 2
Perhitungan Luas Bidang Geser dan Bidang

No.	w (mm)	Agt (mm ²)	Ant (mm ²)	Agv (mm ²)	Anv
					(mm ²)
1	30	300	120	3000	2280
2	40	400	220	3000	2280
3	50	500	320	3000	2280
4	60	600	420	3000	2280
5	70	700	520	3000	2280

BIDANG TARIK

Apabila ditinjau suatu garis pada bidang tarik yang menghubungkan 2 buah tepi lubang baut yaitu w , maka distribusi tegangan untuk setiap model FEA dapat dilihat pada Gambar 17 sampai dengan 26. Gambar tersebut menunjukkan bahwa distribusi tegangan tarik ZZ (arah Z) yang terjadi di sepanjang penampang bidang tarik adalah tidak seragam ketika tegangan



Gambar 16
Hubungan Gaya vs Peralihan untuk Setiap Variasi Jarak Baris Baut

masih dalam kondisi elastis. Sesuai dengan pengujian-pengujian konsentrasi tegangan pada lubang pelat yang mengalami tegangan tarik (Boresi, 1993), biasanya tegangan tarik yang berada di dekat tepi lubang baut cenderung lebih besar dibandingkan yang berada jauh dari tepi lubang baut. Besar tegangan tarik maksimum di sekitar lubang dalam kondisi elastis adalah 1.1 – 1.3 kali tegangan leleh. Tegangan tarik ZZ mendekati seragam (mendekati tegangan tarik ZZ rata-rata) ketika tegangan yang terjadi adalah dalam kondisi plastis, dimana nilai tegangan tarik di titik - titik sepanjang bidang tarik yang saat kondisi elastis masih rendah, mulai menunjukkan peningkatan nilai tegangan hingga mendekati nilai tegangan tarik di sekitar lubang pelat. Besar tegangan tarik rata-rata saat kondisi plastis adalah 1.1 – 1.2 kali tegangan leleh.

Pada kondisi plastis, perbedaan antara tegangan tarik ZZ dengan tegangan tarik ZZ rata-rata sepanjang penampang bidang tarik dalam Gambar 17 sampai dengan 26 adalah berkisar antara 1% hingga 5%. Sehingga dalam kondisi plastis distribusi tegangan tarik z di sepanjang penampang bidang tarik dapat dikatakan seragam.

Tabel 4
Perhitungan Beban Ultimit menurut AISC-LRFD 1999 Tanpa Faktor Reduksi

No.	Leleh Bruto (N) $F_y \cdot A_g$	Fraktur Penampang Efektif (N) $0.75 \cdot F_u \cdot A_e$	Geser Blok (N) R_n
1	720000	879120	578160
2	720000	879120	602160
3	720000	879120	626160
4	720000	879120	650160
5	720000	879120	674160

Tegangan efektif Von Mises menentu-

Tabel 5
Perhitungan Beban Ultimit menurut AISC-LRFD 2005 Dengan Faktor Reduksi

No	Leleh Bruto (N) $0.9 \cdot F_y \cdot A_g$	Fraktur Penampang Efektif (N) $0.75 \cdot F_u \cdot A_e$	Geser Blok (N)	
			$U_b \cdot F_u \cdot A_{nt}$	$\phi \cdot R_n$
1	648000	659340	44400	357300
2	648000	659340	81400	385050
3	648000	659340	118400	412800
4	648000	659340	155400	440550
5	648000	659340	192400	468300

kan terjadinya kelelahan di suatu node elemen. Sesuai dengan persamaan 5, tegangan efektif ditentukan oleh enam jenis tegangan. Karena model FEA yang digunakan dalam kasus ini adalah *plane stress* maka besar tegangan efektif dipengaruhi oleh tegangan tarik ZZ, tegangan geser YZ, dan tegangan tarik YY.

Pada Gambar 17 sampai dengan 26 terlihat bahwa kurva tegangan Von Mises

Tabel 6
Perhitungan Beban Ultimit menurut AISC-LRFD 2005 Tanpa Faktor Reduksi

No.	Leleh Bruto (N) $F_y \cdot A_g$	Fraktur Penampang Efektif (N) $F_u \cdot A_e$	Geser Blok (N) R_n
1	720000	879120	476400
2	720000	879120	513400
3	720000	879120	550400
4	720000	879120	587400
5	720000	879120	624400

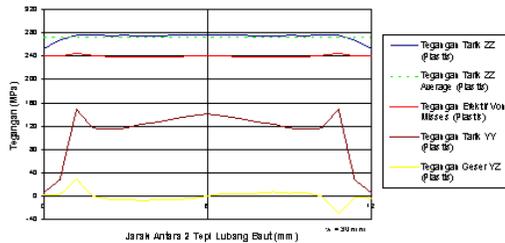
Tabel 7
Perbandingan Kekuatan Ultimit Hasil FEA dengan Desain AISC-LRFD1999 dan AISC-LRFD2005 Akibat Pengaruh Variasi Jarak

No	Hasil FEA (N)	Persentase Perbedaan (%)			
		LRFD'99 & FEA		LRFD'05 & FEA	
		Dengan FR	Tanpa FR	Dengan FR	Tanpa FR
1	374100	13.7	35.3	-4.7	21.5
2	397170	12.1	34.0	-3.1	22.6
3	414990	11.6	33.7	-0.5	24.6
4	430200	11.8	33.8	2.3	26.8
5	443400	12.3	34.2	5.3	29.0

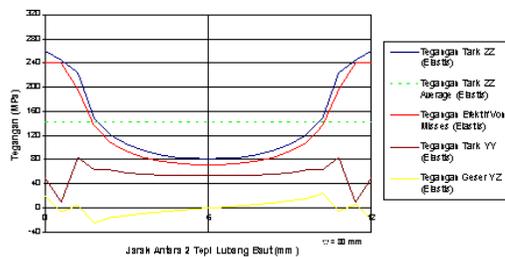
selalu berada di bawah tegangan tarik ZZ karena adanya pengaruh tegangan tarik YY pada suku kuadrat kedua yang mengurangi nilai tegangan tarik ZZ, di samping pula adanya angka $\frac{1}{2}$ di awal persamaan yang membuat nilai tegangan Von Mises lebih kecil daripada tegangan tarik ZZ. Dalam kondisi elastis, terlihat adanya konsentrasi tegangan di sekitar lubang pelat seperti halnya tegangan tarik ZZ. Kemudian dalam kondisi plastis, tegangan Von Mises mulai mendekati seragam. Namun untuk variasi w yang semakin membesar ($w = 60$ dan 70

mm), perbedaan tegangan Von Mises di sekitar tengah bentang w dengan di sekitar lubang semakin membesar.

Pada Gambar 27 sampai dengan 31 terlihat distribusi tegangan efektif kondisi



Gambar 17
Distribusi Tegangan Saat Kondisi Elastis Untuk Penampang Bidang Tarik $w = 30$ mm

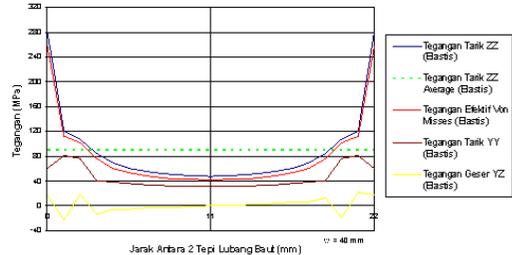


Gambar 18
Distribusi Tegangan Saat Kondisi Elastis Untuk Penampang Bidang Tarik $w = 30$ mm

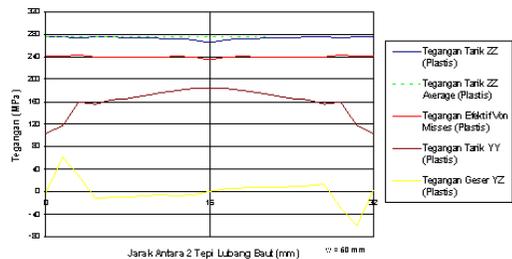


Gambar 19
Distribusi Tegangan Saat Kondisi Elastis Untuk Penampang Bidang Tarik $w = 40$ mm

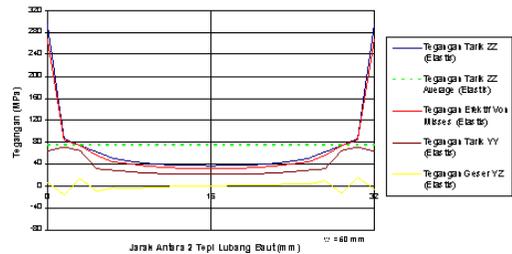
plastis (ultimit) untuk pelat dengan berbagai variasi w . Saat kondisi plastis, pada penampang bidang geser terlihat



Gambar 20
Distribusi Tegangan Saat Kondisi Elastis Untuk Penampang Bidang Tarik $w = 40$ mm



Gambar 21
Distribusi Tegangan Saat Kondisi Elastis Untuk Penampang Bidang Tarik $w = 50$ mm

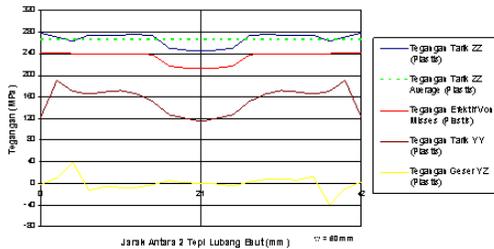


Gambar 22
Distribusi Tegangan Saat Kondisi Elastis Untuk Penampang Bidang Tarik $w = 50$ mm

mengalami kelelahan tekan arah Z (warna biru) yang relatif besar, serta dipengaruhi oleh tegangan geser yang relatif besar pula. Sedangkan pengaruh tegangan tarik YY lebih banyak memberikan kontribusi terjadinya kelelahan di sekitar ujung pelat.

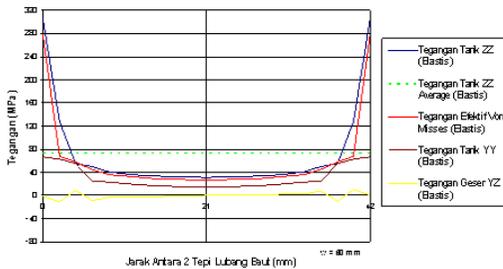
Distribusi tegangan efektif pada geometri pelat dapat dilihat pada Gambar 32

sampai dengan 36. Dari keseluruhan gambar distribusi tegangan efektif tersebut terlihat bahwa dalam kondisi ultimit, kelelahan terjadi di sekitar lubang baut, yaitu pada penampang bidang tarik dan penampang bidang geser.



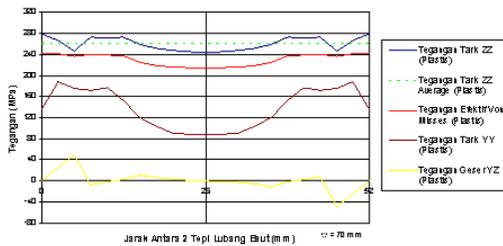
Gambar 23

Distribusi Tegangan Saat Kondisi Plastik Untuk Penampang Bidang Tarik $w = 60$ mm



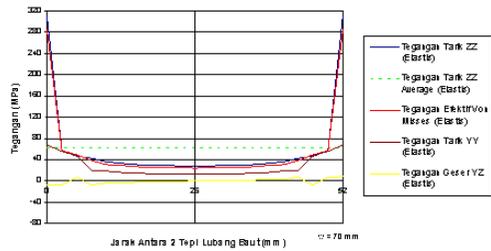
Gambar 24

Tegangan Saat Kondisi Elastis Untuk Penampang Bidang Tarik $w = 60$ mm



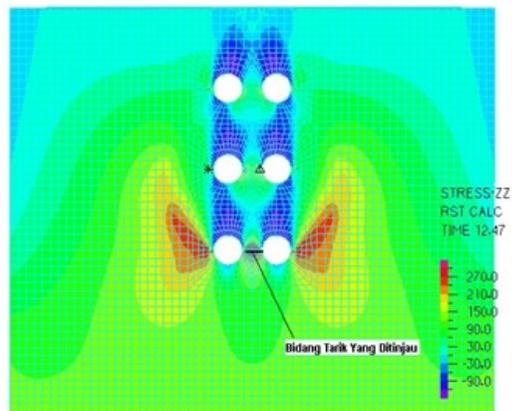
Gambar 25

Distribusi Tegangan Saat Kondisi Plastik Untuk Penampang Bidang Tarik $w = 70$ mm



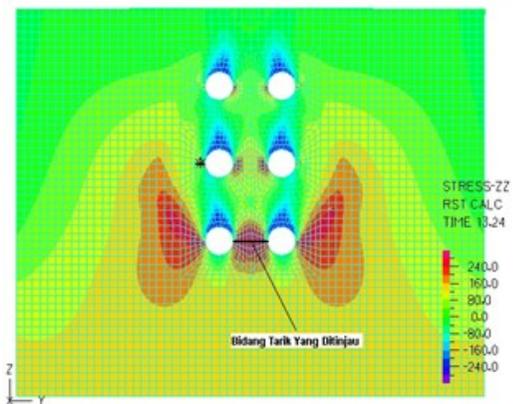
Gambar 26

Distribusi Tegangan Saat Kondisi Elastis Untuk Penampang Bidang Tarik $w = 70$ mm



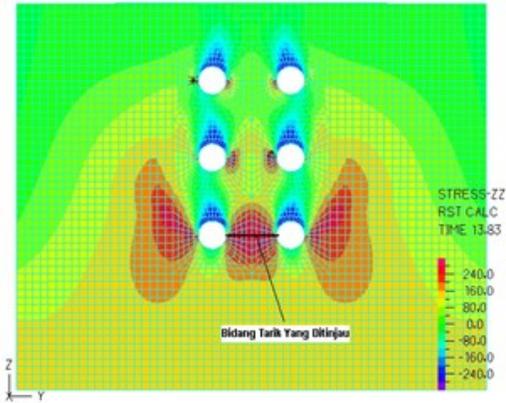
Gambar 27

Distribusi Tegangan Tarik, $w = 30$ mm

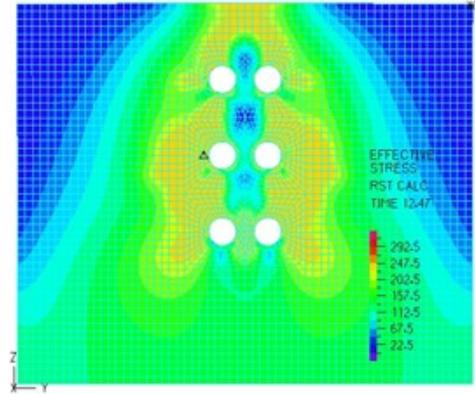


Gambar 28

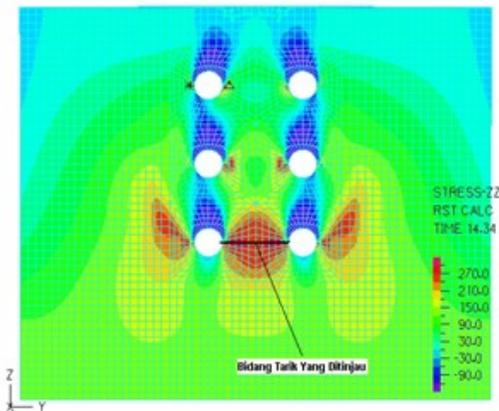
Distribusi Tegangan Tarik, $w = 40$ mm



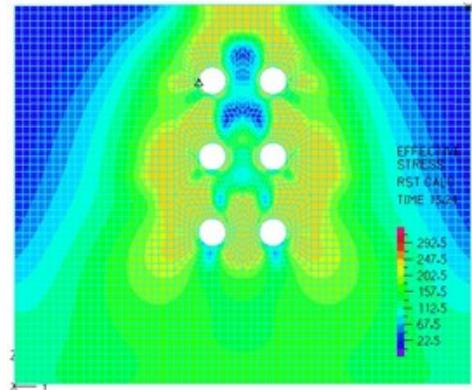
Gambar 29
Distribusi Tegangan Tarik, w = 50 mm



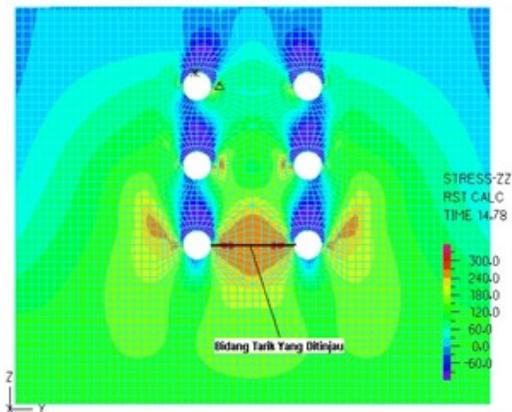
Gambar 32
Distribusi Tegangan Efektif, w = 30 mm



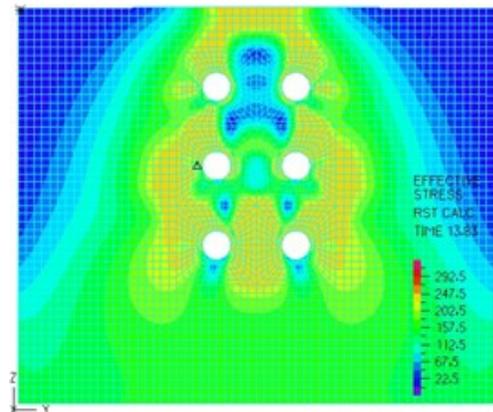
Gambar 30
Distribusi Tegangan Tarik, w = 60 mm



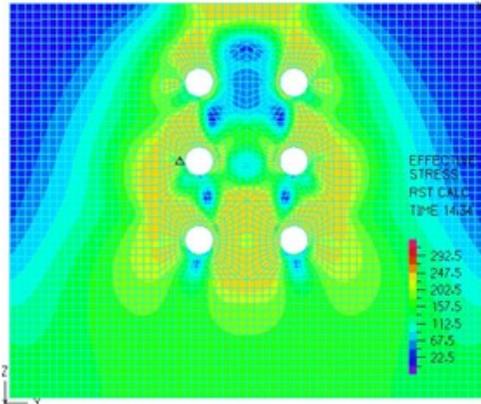
Gambar 33
Distribusi Tegangan Efektif, w = 40 mm



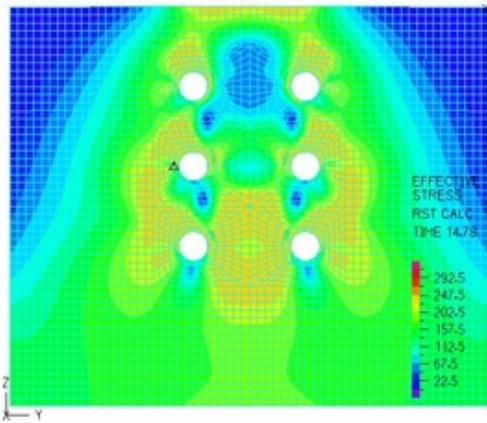
Gambar 31
Distribusi Tegangan Tarik, w = 70 mm



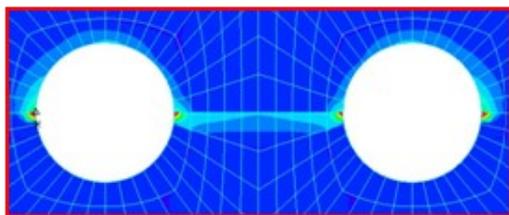
Gambar 34
Distribusi Tegangan Efektif, w = 50 mm



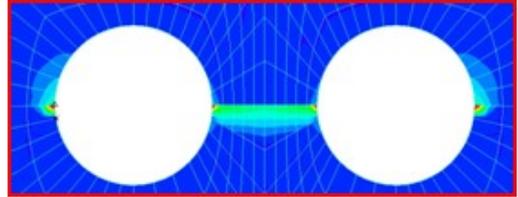
Gambar 35
Distribusi Tegangan Efektif , w = 60 mm



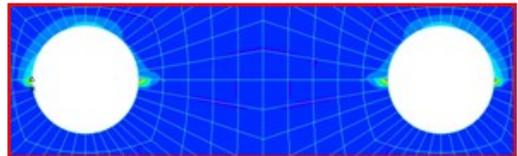
Gambar 36
Distribusi Tegangan Efektif , w = 70 mm



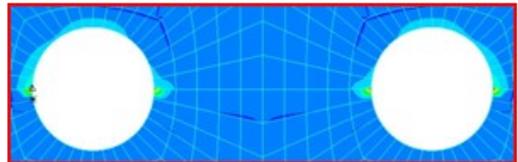
Gambar 37
Distribusi Regangan Plastis Efektif
Akumulasi Untuk Pelat Dengan w = 30 mm



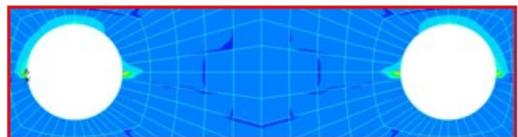
Gambar 38
Distribusi Regangan Plastis Efektif
Akumulasi Untuk Pelat Dengan w = 40 mm



Gambar 39
Distribusi Regangan Plastis Efektif
Akumulasi Untuk Pelat Dengan w = 50 mm



Gambar 40
Distribusi Regangan Plastis Efektif
Akumulasi Untuk Pelat Dengan w = 60 mm



Gambar 41
Distribusi Regangan Plastis Efektif
Akumulasi Untuk Pelat Dengan w = 70 mm

Distribusi tegangan efektif tersebut menunjukkan bahwa mekanisme keruntuhan dalam FEA adalah tidak sama dengan keruntuhan geser blok, karena terlihat pada penampang bidang geser,

distribusi tegangan efektifnya adalah tidak seragam.

Distribusi regangan efektif plastis dapat dilihat pada Gambar 37 hingga 41, terlihat bahwa regangan efektif yang relatif besar (bernilai > 0.03) terjadi di sepanjang bidang tarik untuk $w = 30$ mm dan $w = 40$ mm. Namun untuk w yang bernilai 50 mm hingga 70 mm nilai regangan efektif yang relatif besar hanya terjadi di tepi lubang baut. Hal ini diakibatkan karena w yang bernilai 50 mm ~ 70 mm memiliki penampang bidang tarik yang lebih luas dibandingkan w yang bernilai 30 mm dan 40 mm, sehingga gaya tarik yang menimbulkan terjadinya regangan efektif tersebut dapat didistribusikan di sepanjang penampang bidang tarik dengan lebih luas. Regangan efektif plastis dihitung berdasarkan pengaruh regangan plastis arah z , regangan geser plastis yz dan regangan plastis arah y . Distribusi regangan plastis arah z , regangan geser plastis yz dan regangan plastis arah y . Distribusi regangan efektif lebih banyak dipengaruhi regangan arah z karena menunjukkan pola regangan yang sama.

Distribusi regangan plastis arah z memperlihatkan adanya regangan tarik pada penampang bidang tarik dan regangan tekan terjadi pada penampang bidang geser. Hasil ini sesuai dengan distribusi tegangan arah z . Hasil ini menunjukkan bahwa selama gaya tarik bekerja pada pelat berlubang maka penampang bidang geser akan mengalami gaya tekan dan penampang bidang tarik akan mengalami gaya tarik. Sedangkan gambar distribusi regangan geser memperlihatkan bahwa regangan yang signifikan besar (> 0.1) baik bernilai tekan maupun tarik yang hanya terjadi pada tepi lubang pelat yang dekat dengan lokasi dimana gaya tarik diaplikasikan, seperti halnya dengan regangan efektif. Hal ini diakibatkan karena saat gaya tarik diaplikasikan, bagian lubang yang dekat dengan gaya tarik yang terlebih dahulu menerima beban tarik.

KESIMPULAN DAN SARAN

Beberapa hal yang dapat disimpulkan dan dikembangkan penelitian lanjutan dari studi numerik di atas adalah sebagai berikut:

1. Kekuatan ultimit hasil FEA dengan kondisi batas regangan maksimum sebesar 22%, untuk kelima model pelat dengan panjang jarak antara tepi 2 lubang baut yang bervariasi memberikan hasil kekuatan ultimit yang mendekati metode desain AISC-LRFD2005. Perbedaan yang dihasilkan antara FEA dengan AISC-LRFD 2005 untuk kelima model pelat adalah sebesar 21% sampai dengan 29% apabila LRFD 2005 dihitung tanpa faktor reduksi, jika dengan menggunakan faktor reduksi perbedaannya menjadi 5% sampai dengan 10%.
2. Pengaruh penggunaan model *plastic-bilinier* dan *plastic-multilinier* tidak memberikan perbedaan hasil analisis yang cukup signifikan. Berdasarkan pengujian FEA dengan kondisi regangan batas maksimum, untuk 5 model uji dengan variasi nilai w (jarak antara 2 baris baut) yang berbeda, antara model *plastic-bilinier* dan *plastic-multilinier* memberikan hasil perbedaan kekuatan ultimit sebesar kurang dari 2%.
3. Pengaruh variasi panjang w adalah semakin panjang nilai w maka kekuatan ultimit semakin meningkat dan deformasi yang ditimbulkan akan semakin kecil. Hal ini terlihat pada distribusi tegangan efektif di penampang melintang tegak lurus arah gaya yang semakin bertambah luas penampang bidang yang mengalami tarik.
4. Dalam kondisi elastis, nilai tegangan tarik Z di sekitar lubang pelat menunjukkan nilai yang selalu lebih tinggi dibandingkan dengan nilai tegangan tarik di daerah lain, sehingga dapat dikatakan distribusi tegangan tariknya selalu tidak seragam akibat adanya konsentrasi tegangan di sekitar lubang pelat. Dalam kondisi plastis, distribusi tegangan tarik Z mendekati seragam meskipun ada sedikit

perbedaan (<5%) dengan tegangan tarik Z rata-rata, namun tidak terlalu signifikan seperti kondisi elastis.

5. Mekanisme keruntuhan pelat tarik baja berlubang hasil FEA dapat ditunjukkan dengan terjadinya kelelahan di sekitar penampang bidang tarik maupun bidang geser. Mekanisme keruntuhan pelat tarik baja berlubang tersebut berbeda dengan keruntuhan geser blok AISC. Hal ini terlihat dalam distribusi tegangan efektif yang menunjukkan adanya keseragaman distribusi tegangan pada penampang bidang tarik (kelelahan seluruh penampang bidang tarik), namun tidak demikian pada penampang geser.
6. Tinjauan kekuatan ultimit pelat tarik baja berlubang dengan asumsi kelelahan seutuhnya pada bidang tarik dan bidang geser menunjukkan nilai kekuatan ultimit yang lebih menentukan (lebih kecil) dibandingkan asumsi keruntuhan geser blok AISC-LRFD 2005. Peluang apakah mekanisme keruntuhan kelelahan pada bidang tarik dan geser seperti yang ditunjukkan dalam FEA akan lebih menentukan dalam kenyataan, sebaiknya perlu dilakukan penelitian lanjutan yang berupa percobaan di laboratorium.
7. Hasil distribusi regangan efektif menunjukkan untuk w yang kecil (≤ 40 mm) memberikan nilai regangan efektif yang cukup besar (> 0.03) di sepanjang penampang bidang tarik. Sedangkan untuk w yang besar (> 40 mm) memberikan nilai regangan efektif yang cukup besar hanya di sekitar tepi lubang pelat. Hal ini diakibatkan karena w yang besar memiliki penampang bidang tarik yang lebih luas, sehingga gaya tarik yang menimbulkan terjadinya regangan dapat didistribusikan di sepanjang penampang bidang tarik dengan lebih luas.

REFERENSI

- ADINA R&D. (2005). *Theory and Modeling Guide*, Volume 1, ADINA R&D, Water-town, USA.
- ADINA R&D. (2005). *User Interface Primer*, Report ARD 01-6, ADINA R&D, Water-town, USA.
- AISC. (1999). *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- AISC. (2005). *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- Bathe, Klaus-Jürgen. (1982). *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice-Hall, New-Jersey, USA.
- Bhatti, M. Asghar. (2006). *Advanced Topics in Finite Element Analysis Structures: with Mathematica and Matlab Computation*, John Wiley & Sons, New York.
- Brockenbrough, R.L and Merritt, F.S. (2006). *Structural Steel Designer's Handbook*. 4th Edition, McGraw-Hill, New York.
- Boresi, A.P., Schmidt, R.J., and Sidebottom, O.M. (1993). *Advanced Mechanics of Materials*, Fifth Edition, John Wiley & Sons, Canada.
- Cook, R.D and Young, W.C. (1999). *Advanced Mechanics of Materials*, Second Edition, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E., and Witt, R.J. (2002). *Concept and Applications of Finite Element Analysis*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, USA.
- Englekirk, R. (1994). *Steel Structures: Controlling Behavior Through Design*, John Wiley & Sons, Canada.
- Gupta, M. and Gupta, L.M. (2004). "Evaluation of Stress Distribution in Bolted Steel Angles Under Tension," *Electronic Journal of Structural Engineering*, pp.17-27.
- Kara, Emre. (2005). "A Numerical Study on Block Shear Failure of Steel Tension Members", *A Thesis Submitted to The Graduate School of Natural and Applied Science of Middle East Technical University*

SNI (2000). *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung* - SNI 03-1729-2002.

Salmon, C.G. and Johnson, J.E. (1990). *Steel Structure: Design and Behavior*, Third Edition, Harper Collins Publisher, USA.

