

STUDI NUMERIK: PERILAKU PELAT BERLUBANG AKIBAT *PROOF LOAD* BAUT MUTU TINGGI DENGAN MENGGUNAKAN ANALISIS KONTAK

Y. DJOKO SETIYARTO
Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer

Jenis sambungan geser-kritis pada struktur baja memerlukan adanya proof load pada baut mutu tinggi untuk menghasilkan gaya jepit di antara 2 pelat yang tersambung. Menurut AISC-LRFD 2005, selain kontrol kekuatan baut harus dilakukan, pelat yang tersambung pun perlu dilakukan kontrol kekuatannya dengan menggunakan persamaan kekuatan tumpu pada pelat, karena kemungkinan terjadinya mekanisme tumpu antara tepi lubang pelat dengan batang baut bila tahanan kritis yang dihasilkan tidak mampu menahan beban eksternal yang diaplikasikan. Asumsi ini berbeda dengan prinsip sambungan geser kritis, yaitu slip tidak boleh terjadi. Studi numerik berikut ini mempelajari tentang perilaku pelat berlubang pada sambungan geser-kritis dan gaya kontak yang terjadi di antara dua pelat yang tersambung. Perilaku yang diamati meliputi deformasi dan tegangan yang terjadi sehubungan dengan adanya proof load dan beban eksternal. Studi numerik dilakukan dengan menggunakan analisis kontak yang tersedia dalam software Finite Element Analysis (FEA). Hasil dari analisis kontak menunjukkan bahwa kondisi tegangan yang terjadi pada pelat berlubang dari sambungan geser-kritis saat menerima beban tarik tersebut berbeda dengan kondisi tegangan pelat berlubang dari sambungan tipe tumpu. Selain itu diperoleh kesimpulan bahwa peningkatan proof load hingga melebihi batas minimumnya dapat memberikan pengaruh terhadap peningkatan gaya jepit, dan deformasi yang ditimbulkan di sekitar tepi lubang pelat masih relatif kecil.

PENDAHULUAN

Sambungan dengan menggunakan baut mutu tinggi dapat didesain sebagai sambungan jenis tumpu (bearing type connection) atau sambungan geser-kritis (slip-critical connection). Sebagai sambungan geser-kritis, adanya slip pada permukaan pelat tersambung tentu saja tidak diijinkan, dan gaya tarik akibat beban luar tidak boleh melebihi tahanan friksi yang dihasilkan. Tahanan friksi yang ada tersebut berasal dari *proof load* yang diberikan pada baut, yang dipengaruhi pula oleh kondisi permukaan bidang kontak dari pelat tersambung. Penggunaan sambungan tipe geser-kritis lebih banyak dijumpai dalam konstruksi

jembatan. Karena penggunaan sambungan jenis tumpu (adanya *slip* diijinkan) pada konstruksi jembatan, dikhawatirkan dalam jangka panjang akan terjadi bahaya *fatigue* pada sambungan akibat beban berulang dari kendaraan yang melintasi jembatan.

Karena sambungan geser kritis lebih banyak dipengaruhi oleh *proof load* dan kondisi permukaan bidang kontak, maka dalam perhitungan desain tahanan geser kritis selalu merupakan fungsi dari gaya normal dan koefisien friksi di antara bagian yang tersambung. Dalam AISC-LRFD 2005 disebutkan bahwa *slip-critical resistance* (R_n) dari setiap baut ditentukan dengan persamaan:

$$\phi R_n = \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s$$

Keterangan :

- μ = koefisien gesek
- $D_u = 1.13$, merupakan suatu pengali yang mencerminkan perbandingan rata-rata *proof load* terpasang terhadap spesifikasi *proof load* minimum yang telah ditentukan.
- h_{sc} = faktor lubang
- N_s = jumlah bidang geser
- T_b = minimum *proof load* yang diberikan sesuai tabel J3.1 atau J3.1M.
- f = faktor reduksi

Dengan persamaan yang sama namun berbeda notasi, SNI 03-1729-2002 juga memberikan kuat rencana tahanan friksi (V_d) dari setiap baut dengan persamaan:

$$V_d = 1,13 \cdot \phi \cdot \mu \cdot m \cdot T_b$$

Keterangan:

- m = koefisien gesek
- m = jumlah bidang geser
- T_b = gaya tarik minimum (*proof load*)
- f = faktor reduksi

Berbeda halnya dengan sambungan tipe tumpu, bahwa kekuatan sambungan tipe tumpu lebih banyak ditentukan dari kekuatan geser batang baut dan kekuatan tumpu lubang baut dari pelat yang tersambung. Kemudian dari kontribusi kedua jenis kekuatan tersebut dipilih kekuatan mana yang paling menentukan (terkecil). Jika meninjau lagi persamaan 1 dan 2, dapat diperkirakan bahwa sambungan tipe geser-kritis lebih mengutamakan kekuatan tiap baut dalam menghasilkan tahanan friksi dengan asumsi bahwa bidang kontak pada pelat tersambung memiliki kekuatan yang jauh lebih besar daripada baut, terutama setelah baut menerima *proof load*. Perhitungan kekuatan pelat yang dapat mencegah terjadinya deformasi selama pemberian *proof load* tidak dijumpai dalam AISC-LRFD 2005 maupun SNI 1729. Meskipun demikian, dalam kalimat akhir dari AISC-LRFD 2005

pasal 3.10 yang berbunyi *... "Bearing strength shall be checked for both bearing-type and slip-critical connections." ...*; menyebutkan secara tersirat bahwa persamaan kekuatan tumpu pelat dari sambungan tipe tumpu digunakan untuk mengecek kekuatan tumpu pelat dalam sambungan geser-kritis. Dengan demikian, desain AISC-LRFD 2005 mengasumsikan akan terjadi kontak antara batang baut dengan tepi lubang baut (mekanisme kerja sambungan tipe tumpu) ketika tahanan friksi dari sambungan geser-kritis tidak mampu lagi menahan beban eksternal yang berlebihan. Sehingga setelah terjadi kontak antara batang baut dan tepi lubang baut maka dalam sambungan geser-kritis yang tahanan friksinya gagal akan berlaku persamaan kuat tumpu pelat sebagai berikut;

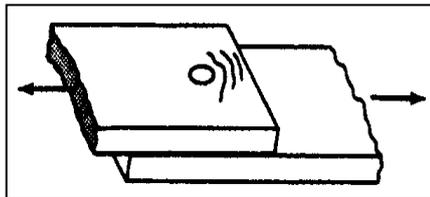
$$R_n = 1.2 \cdot L_c \cdot t \cdot F_u \leq 2.4 \cdot d \cdot t \cdot F_u$$

Keterangan:

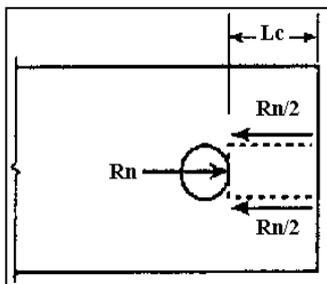
- L_c = jarak bersih antara tepi lubang dengan tepi lubang baut sebelahnya atau dengan tepi material pelat
- t = tebal pelat tersambung
- F_u = kekuatan tarik
- d = diameter baut

Dengan melihat mekanisme keruntuhan dari kekuatan tumpu lubang baut pada pelat, dimana terjadi kontak antara batang baut dan tepi lubang pelat, maka untuk sambungan tipe geser-kritis adalah tidak sesuai. Terutama jika tahanan friksi lebih besar (kuat) dibandingkan beban eksternal yang bekerja. Karena geseran dalam sambungan geser-kritis tidak diperkenankan, maka kontak antara batang baut dengan tepi lubang baut tidak mungkin terjadi. Bahkan adanya selisih toleransi antara diameter baut dengan lubang baut yang besarnya sekitar 2 mm juga memperkecil kemungkinan terjadi kontak langsung antara batang baut den-

gan tepi lubang baut. Kontak dengan lubang pelat untuk sambungan tipe geser-kritis lebih dimungkinkan terjadi melalui kepala baut dan mur pengencang.



Gambar 1 Bentuk nyata keruntuhan tumpu (Salmon & Johnson 1990)



Gambar 2 Idealisasi permukaan gagal (Segui 2003)

Studi numerik berikut ini akan membahas masalah perilaku pelat pada sambungan geser-kritis, terutama kondisi deformasi dan tegangan di sekitar tepi lubang pelat yang diakibatkan gaya *proof load* dari baut. Pelat yang menerima *proof load* dari baut ditinjau dalam keadaan tanpa beban eksternal (beban tarik) maupun dalam keadaan dengan beban eksternal telah bekerja. Prediksi tegangan dan deformasi yang terjadi tersebut dilakukan berdasarkan hasil *software finite element analysis* yaitu ADINA versi 8.3.1, yang dalam analisisnya menggunakan opsi *contact analysis*. Karena material baut diasumsikan lebih kuat (keras) dibandingkan material pelat baja, terdapat dugaan bahwa ketika pemberian *proof load* yang tegangannya melebihi tegangan leleh material pelat, telah terjadi kelelahan awal di beberapa titik sekitar tepi lubang baut pada pelat. Selain itu akan dipelajari pula

apakah kondisi tegangan yang terjadi pada pelat berlubang dari sambungan geser-kritis tersebut apakah sama dengan kondisi tegangan pelat berlubang dari sambungan tipe tumpu, dengan asumsi besar beban yang bekerja masih lebih kecil dibandingkan dengan kekuatan nominal sambungan.

PROOF LOAD DAN KARAKTERISTIK BAUT MUTU TINGGI

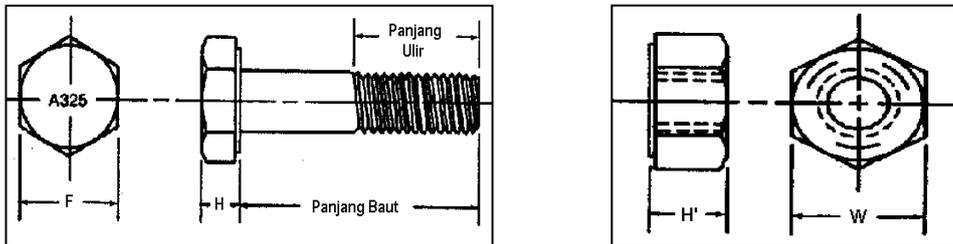
Jenis baut mutu tinggi (high-strength bolt) yang didesain sesuai dengan ASTM terdiri atas 2 macam yaitu A325 dan A490. Baut mutu tinggi tersebut terbuat dari baja dengan campuran karbon maksimum 0.3%. Dimana proses produksinya menggunakan sistem *quenching* (proses pendinginan secara cepat dengan air atau minyak pada suhu minimal 900°C menjadi 200°C) dan *tempering* (proses pemanasan ulang hingga mencapai suhu 620°C kemudian dibiarkan dingin dengan sendirinya). Proses *quenching* dan *tempering* tersebut akan menghasilkan baut mutu tinggi yang memiliki kuat tarik ultimit (F_u) dan kuat leleh (F_y) yang relatif lebih tinggi. Untuk baut jenis A325 berdiameter 12.7 mm hingga 25.4 mm memiliki nilai $F_u = 838$ MPa dan $F_y = 643$ MPa, sedangkan baut berdiameter 28.6 mm hingga 38.1 mm menghasilkan nilai $F_u = 733$ MPa dan $F_y = 566$ MPa.

Baut mutu tinggi memiliki kepala baut berbentuk segi enam dengan pengencang mur berbentuk segi enam pula. Sehingga jenis baut ini dapat disebut sebagai baut struktural heksa berat. Di atas kepala baut harus ditandai (dengan A325 misalnya) dan disertai dengan simbol pabrik pembuatnya. Bagian ulir dari baut mutu tinggi lebih pendek dibandingkan baut lainnya, sehingga dapat mengurangi kemungkinan terjadinya bidang tumpu pelat pada bagian yang berulir. Dimensi dari baut A325 dapat dilihat pada Gambar 3 dan Tabel 1.

Pemasangan baut mutu tinggi memerlukan gaya tarik awal untuk menghasilkan

Tabel 1 Detail Dimensi Baut A325 beserta Mur (Salmon & Johnson 1990)

DIMENSI BAUT								DIMENSI MUR			
Diameter		F		H		Pjg. Uilir		W		H'	
in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm
1/2	12.7	7/8	22.2	5/16	7.9	1	25.4	7/8	22.2	31/64	12.3
5/8	15.9	17/16	27.0	25/64	9.9	5/4	31.8	17/16	27.0	39/64	15.5
3/4	19.1	5/4	31.8	15/32	11.9	11/8	34.9	5/4	31.8	47/64	18.7
7/8	22.2	23/16	36.5	35/64	13.9	3/2	38.1	23/16	36.5	55/64	21.8
1	25.4	13/8	41.3	39/64	15.5	7/4	44.5	13/8	41.3	63/64	25.0
9/8	28.6	29/16	46.0	11/16	17.5	2	50.8	29/16	46.0	71/64	28.2
5/4	31.8	2	50.8	25/32	19.8	2	50.8	2	50.8	39/32	31.0
11/8	34.9	35/16	55.6	27/32	21.4	6/4	38.1	35/16	55.6	43/32	34.1
3/2	38.1	19/8	60.3	15/16	23.8	6/4	38.1	19/8	60.3	47/32	37.3



F = Diameter Kepala Baut H = Tebal Kepala Baut H' = Tebal Mur W = Diameter Mur

Gambar 3 Baut Mutu Tinggi dengan Kepala Baut dan Mur Segi Enam (Salmon & Johnson)

gaya tekan yang besar di antara dua permukaan pelat yang tersambung. Sehingga tercipta gaya jepit yang sangat besar terhadap bagian-bagian yang dihubungkannya. Sebagai akibat gaya jepit tersebut, permukaan kontak akan mempunyai kemampuan untuk meneruskan beban secara friksi.

Karena tahanan friksi diperlukan, maka gaya tarik awal harus setinggi mungkin tanpa menyebabkan terjadinya deformasi permanen atau kegagalan pada baut. Gaya tarik awal pada baut mutu tinggi disebut *proof load*, yang diperoleh dengan cara mengalikan luas penampang batang baut dengan tegangan leleh *proof*. Tegangan leleh tersebut diperkirakan minimal dari 70% hingga 80% dari tegangan tarik minimum baut mutu tinggi. ASTM mentabelkan nilai tegangan ini berdasarkan diameter baut yang digunakan. Sebagai contoh untuk baut mutu A325 berdia-

meter 1/2 hingga 1 inch memiliki tegangan tarik minimum 825 MPa maka tegangan leleh minimum yang diperlukan untuk menciptakan *proof load* adalah 585 MPa (Salmon & Johnson, 1990). Selanjutnya, AISC-LRFD 2005 mentabelkan minimum gaya tarik baut mutu tinggi yang dikencangkan secara penuh (*fully-tightened*) dalam Tabel J3.1 untuk satuan kips dan Tabel J3.1M untuk satuan kN pada halaman 103.

Sedangkan SNI 03-1729-2002 mentabelkan gaya tarik baut minimum pada halaman 171 dengan satuan kN. Berbagai nilai *proof load* berdasarkan diameter baut dapat dilihat dalam Tabel 2 dan 3 berikut, dimana nilai pada tabel tersebut mendekati dengan nilai yang diperoleh dari persamaan baut yang mengalami gaya tarik yaitu:

$$Rn_t = Fu (0.75 Ab)$$

Keterangan :

Fu = tegangan leleh minimum = 585 MPa (diameter $\frac{1}{2}$ s/d 1 inchi)

Ab = luas penampang batang baut

Rn = proof load

Dalam pelaksanaan lapangan, baut mutu tinggi dapat dikencangkan dengan salah satu di antara ketiga metode berikut ini, antara lain: pengencangan turn-of-nut, pengencangan kunci mur terkalibrasi (calibrated-wrench), dan pengencangan dengan metode indikator tarik langsung (Spiegel, 1986). Tujuan ketiga metode tersebut adalah sama, yaitu menghasilkan gaya tarik baut minimum (proof load). Pengencangan dapat diperoleh dengan memutar kepala baut serta mur tanpa menyebabkan putaran pada elemen lain. Pengencangan aktual hampir selalu dilakukan dengan menggunakan kunci mur kejut (impact wrench) atau pneumatik.

Tabel 2 Gaya Tarik Minimum untuk Baut A325 (AISC-LRFD 2005)

Diameter		Proof Load		Proof Stress
in	mm	kips	kN	MPa
1/2	12.7	12	53	418.6
5/8	15.9	19	85	429.7
3/4	19.1	28	125	441.1
7/8	22.2	39	173	446.2
1	25.4	51	227	448.2

Diameter		Proof Load		Proof Stress
in	mm	kips	kN	MPa
9/8	28.6	56	249	387.8
5/4	31.8	71	316	398.1
11/8	34.9	85	378	395.3
3/2	38.1	103	458	401.9

Pada metode *turn-of-nut*, sejumlah baut yang cukup digunakan pada kondisi kencang pas (snug-tight) untuk menjamin agar semua bagian yang dihubungkan dapat menghasilkan kontak yang baik.

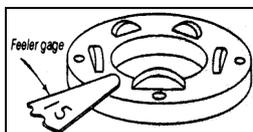
Kencang pas didefinisikan sebagai kekenangan yang dihasilkan dari kunci mur kejut atau dari tenaga penuh manusia dengan menggunakan kunci mur (spud-wrench) berujung terbuka. Dari titik kekenangan pas ini, baut harus dikencang lagi dengan sejumlah rotasi elemen yang bervariasi antara sepertiga putaran hingga satu putaran bergantung pada panjang dan diameter baut. Selama operasi ini tidak diijinkan terjadinya rotasi bagian yang tidak diputar oleh kunci mur.

Tabel 3 Gaya Tarik Baut Minimum (SNI 03-1729-2002)

Diameter Nominal Baut (mm)	Gaya Tarik Baut Minimum (kN)
16	95
20	145
24	210
30	335
36	490

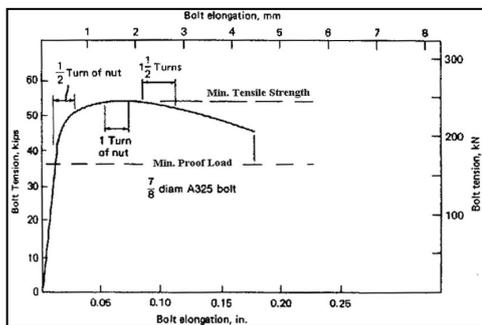
Pada metode pengencangan kunci mur terkalibrasi, kunci mur terkalibrasi digunakan dan diatur untuk memberikan gaya tarik paling sedikit 5% lebihnya dari gaya tarik baut minimum. Kunci mur harus dikalibrasi paling sedikit satu kali setiap hari kerja untuk setiap diameter baut yang digunakan. Kalibrasi harus didapat dengan pengecekan, dengan alat yang dapat menunjukkan tarik baut aktual, biasanya 3 baut untuk setiap diameter yang terpasang. Meskipun kenyataannya kunci mur diatur untuk tarik baut yang dikehendaki, harus dilakukan pengecekan lain dengan membuktikan bahwa selama proses instalasi aktual, rotasi elemen dari posisi kencang tidak melebihi yang telah ditetapkan dari metode *turn-of-nut*. Prosedur pengencangan ini identik dengan pengencangan *turn-of-nut*. Selain itu, kunci mur harus diputar kembali ke baut-baut yang sebelumnya telah dikencangkan karena mungkin baut-baut tersebut menjadi longgar kembali sebagai akibat dari pengencangan baut berikutnya. Hal ini dila-

kukan hingga semua mencapai kekencangan yang telah ditetapkan.



Gambar 4 Plat Antara Indikator untuk Baut A325 (Spiegel, 1986)

Pada metode indikator tarik langsung, salah satunya pengencangan dapat dilakukan dengan cara menambahkan pelat antara indikator beban. Metode ini bergantung pada deformasi pelat antara untuk menunjukkan tarik baut yang timbul selama dan sesudah pengencangan. Pelat antara yang bundar dan diperkeras ini mempunyai bagian-bagian yang menonjol di satu sisi muka. Pelat antara biasanya diselipkan di antara kepala baut dan pelat yang dijepit, dengan muka yang bertonjolan terletak di bawah kepala baut. Pada saat penengcangan, tonjolan tersebut menjadi relatif lebih datar sehingga celah yang semula ada menjadi berkurang. Tarik baut dievaluasi dengan pengukuran celah tersebut. Apabila celahnya berkurang hingga dimensi yang telah ditetapkan sebelumnya, maka baut telah mencapai kekencangan yang cukup. Pemasangan dengan metode ini masih tetap memerlukan kunci mur. Akan tetapi pada metode ini kalibrasi kunci mur atau penetapan rotasi mur dari kondisi kencang pas tidak diperlukan lagi.



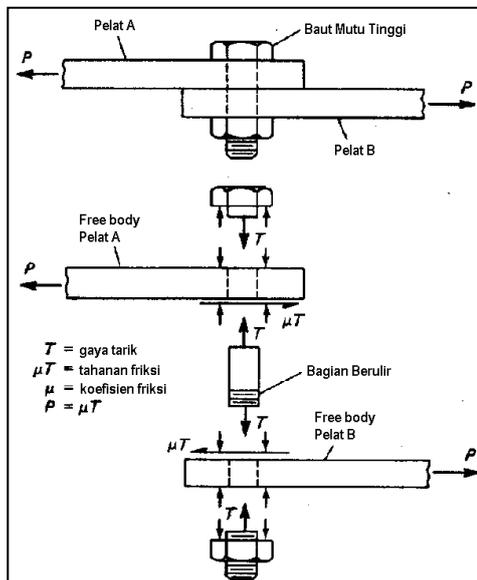
Gambar 5 Perilaku baut A325 berdiameter 7/8 inci (Rumpf and Fisher, 1963)

Umumnya baut-baut yang diberi *proof load* masih berada dalam rentang tegangan elastis, sehingga pemanjangan batang baut (*elongation bolt*) yang terjadi pun relatif kecil. Jika gaya tarik awal yang diberikan melebihi *proof load*, maka tegangan baut yang terjadi berada dalam kondisi plastis dan mendekati 90% dari kekuatan tarik baut. Kondisi tegangan demikian dipandang cukup berbahaya. Hal ini dapat dilihat dari hasil percobaan baut A325 berdiameter 7/8 (Rumpf and Fisher, 1963) yang menunjukkan bahwa pemberian putaran mur yang berlebihan dari kondisi *proof load minimum*, akan mempunyai potensi terjadinya kehancuran pada baut A325 tersebut.

3. MEKANISME TRANSFER GAYA PADA SAMBUNGAN GESER-KRITIS

Pada sambungan tipe geser-kritis, penyaluran gaya tarik P seperti Gambar 5 akan terjadi melalui gesekan, dan diasumsikan tidak ada tumpuan pada batang baut yang menahan sisi lubang. Gaya tarik awal T pada baut adalah sama dengan gaya jepit di antara permukaan pelat yang di sambung. Sehingga gaya friksi / gesekan sebesar μT akan menahan gaya geser pada baut, dimana μ adalah koefisien gesek (*coefficient of friction*).

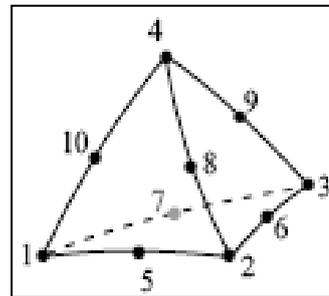
Koefisien gesek μ atau lebih tepat disebut koefisien geseran (*slip coefficient*) bergantung pada kondisi permukaan yang dipengaruhi beberapa faktor seperti *mill scale*, minyak, cat, serta perlakuan khusus lainnya untuk permukaan yang dapat mempengaruhi nilai μ . Rentang nilai μ bervariasi dari 0.2 hingga 0.6 [Kulak et al, 1987]. Dalam desain (AISC-LRFD 2005 dan SNI 03-1729-2002), untuk bidang-bidang kontak dalam keadaan bersih dari cat, minyak dan sebagainya seperti apa adanya dari hasil produksi pabrik, nilai μ dapat diambil sebesar 0.35.



Gambar 6 Transfer Gaya pada Sambungan Baut Mutu Tinggi Yang Mengalami Gaya Tarik Awal (Salmon & Johnson, 1990)

4. MODEL KONTAK DALAM FEA

FEA (finite element analysis) dilakukan dengan menggunakan jenis elemen solid 3D, yang berbentuk elemen *meshing* tetrahedron 10 titik nodal. Derajat kebebasan yang digunakan sebanyak 3 buah, yaitu translasi arah x, y, dan z. Karena opsi kontak diaktifkan, maka model FEA dibagi dalam 3 *body*, yaitu *body* pelat bagian atas, *body* pelat bagian bawah, dan *body* baut beserta kepalanya. Ketiga *body* tersebut terbagi atas 3 elemen solid 3D, yaitu elemen group 1 dan 2 yang menyatakan pelat bagian atas dan bawah, serta elemen group 3 yang menyatakan baut. Kepadatan jaring (*mesh density*) dalam model menggunakan metode '*use length*' dengan ukuran panjang tepi tiap elemen di tiap *body* adalah sebesar 2.5 mm. Sehingga total jumlah elemen solid 3D yang dihasilkan *mesh body* untuk setiap model FEA berkisar antara 30000 hingga 46000 buah dengan opsi kontak dalam kondisi aktif.



**Gambar 7
Elemen Tetrahedron dengan jumlah node
10 titik**

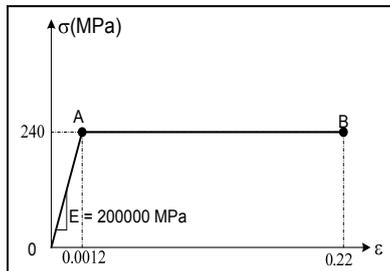
Pasangan-pasangan kontak yang dimodelkan dalam analisis kontak dalam model uji sebanyak 2 buah. Pasangan kontak pertama terdiri atas permukaan pelat atas yang mengalami kontak dengan permukaan kepala baut sisi bawah, sedangkan pasangan kontak kedua terdiri atas permukaan pelat atas yang mengalami kontak dengan permukaan pelat bawah. Dalam pasangan kontak pertama, permukaan kepala baut sisi bawah merupakan *contactor*, dan permukaan pelat atas sebagai *target*. Sedangkan dalam pasangan kontak 2, pelat atas sebagai *contactor* dan pelat bawah sebagai *target*.

Properti material baja yang digunakan untuk pelat baja berbeda dengan properti material baja untuk baut mutu tinggi. Sehingga dalam model FEA pun digunakan 2 jenis material yang berbeda pula. Material untuk pelat baja dimodelkan memiliki hubungan tegangan regangan sebagai kurva bilinear seperti Gambar 8. Modulus elastisitas diasumsikan sebesar $E = 200000$ MPa dengan rasio Poisson sebesar 0.3. Demikian pula tegangan leleh uniaksial tarik diasumsikan sebesar 240 MPa, dan pembatasan regangan plastik diberikan efektif sebesar 22% (asumsi regangan putus baja). Model material ini digunakan pada elemen group 1 dan 2. Sedangkan material untuk baut mutu tinggi dimodelkan memiliki hubungan tegangan regangan sebagai kurva bilinear seperti Gambar 9. Modulus elastisitas

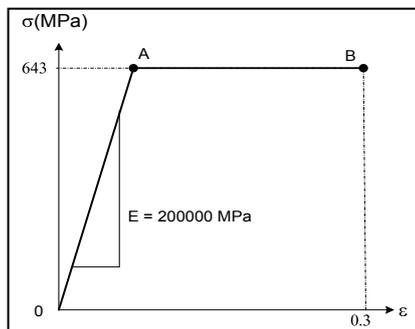
diasumsikan sebesar $E = 200000$ MPa dengan rasio Poisson sebesar 0.3. Tegangan leleh uniaksial tarik diasumsikan sebesar 643 MPa, dan pembatasan regangan plastik efektif diberikan sebesar 30% (asumsi regangan putus baut). Model material ini digunakan pada elemen group 3.

Model geometri yang diuji dengan FEA adalah seperti Gambar 10. Model tersebut terdiri atas 2 lempeng pelat yang berukuran 50 mm x 50 mm dengan tebal 5 mm dan 8 mm, serta sebuah baut (beserta kepala baut) berdiameter $\frac{1}{2}$ inci dan $\frac{5}{8}$ inci. Kepala baut dimodelkan lingkaran (bukan segienam) karena sesuai kenyataan bahwa bagian kepala baut yang mengalami kontak dengan pelat bagian atas adalah berbentuk lingkaran. Selain itu kepala baut berbentuk lingkaran lebih mudah dimodelkan daripada kepala baut berbentuk segienam. Masing-masing model diasumsikan memiliki 2 pasangan kontak seperti tergambar. Variasi ke enam model uji tersebut dapat dilihat dalam

Tabel 4.

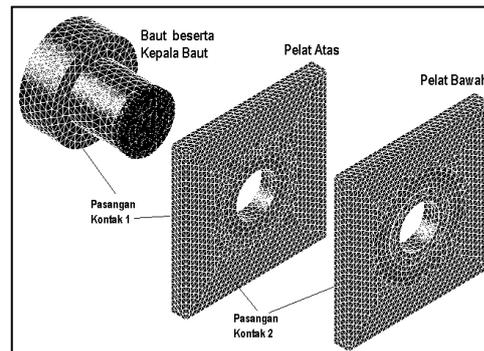
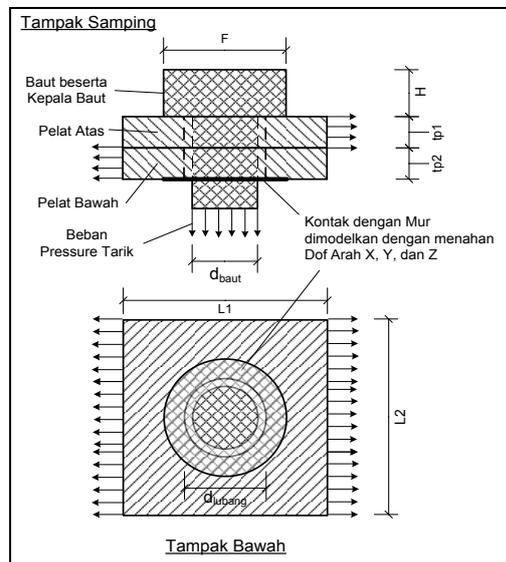


Gambar 8 Model Material untuk Pelat Baja



Gambar 9 Model Material untuk Baut Mutu Tinggi

Untuk elemen 3D, software memperhitungkan DOF yang terjadi sebanyak 3 buah, yaitu translasi arah x, y dan z (ADINA, 2001). *Boundary condition* diberikan pada sisi samping kepala baut dengan menahan translasi arah x dan z. Kemudian sisi bawah pelat bagian bawah (sebagai model kontak dengan mur) seperti tergambar diberikan pula *boundary condition* yang menahan seluruh DOF. Pemberian gaya *pressure* tarik dilakukan pada permukaan bawah baut.



Gambar 10 Model Analisis Kontak

Tabel 4 Jumlah Model FEA

Model	d (mm)	tp1	tp2	L1 (mm)	L2 (mm)	Proof Load (MPa)	Tarik Pelat
		(mm)	(mm)				(MPa)
1	12.7	5	5	50	50	418.6	-
2	12.7	5	5	50	50	418.6	70
3	15.9	8	8	50	50	429.7	-
4	15.9	8	8	50	50	429.7	80
5	12.7	5	5	50	50	Maksimal	-
6	15.9	8	8	50	50	Maksimal	-

Pemberian gaya *pressure* tarik pada model uji 1 dan 3 menggunakan *proof load* minimum seperti pada Tabel 2. Tujuan model uji ini adalah mengetahui perilaku pelat atas seperti kondisi tegangan, besarnya gaya kontak dan luas bidang kontak (node yang mengalami kontak) yang terjadi saat *proof load* minimum diberikan. Kemudian dengan dimensi yang serupa, pada model uji 2 dan 4, selain pemberian *pressure* tarik pada permukaan bawah baut, diberikan pula *pressure* tarik pada salah satu sisi pelat. Besarnya gaya tarik yang terjadi pada pelat diasumsikan sebesar 70 MPa (untuk pelat setebal 5 mm) dan sebesar 80 MPa (untuk pelat setebal 8 mm). Tujuan model uji ini adalah untuk mengetahui bagaimana perilaku pelat bagian atas yang telah memiliki gaya kontak tersebut dalam menerima beban eksternal tarik. Karena ingin diketahui bagaimana manfaatnya penambahan *proof load* yang melebihi *proof load* minimum terhadap sambungan geser-kritis, maka permukaan bawah baut model uji 5 dan 6 diberikan *pressure* tarik (*proof load*) yang maksimal. Tujuan model uji 5 dan 6 ini adalah mempelajari deformasi pada baut dan pelat bagian atas saat *proof load* maksimal diberikan. Selain itu akan dipelajari pula bagaimana perubahan gaya kontak dan daerah kontak yang terjadi pada bidang kontak antara pelat atas dan pelat bawah saat gaya *proof load* yang diberikan semakin bertambah hingga maksimal. Dalam Tabel 4 terlihat *proof load* atau beban eksternal yang diasumsikan bekerja pada tiap model uji berbeda-beda, maka input beban yang dilakukan

juga berbeda.

Karena pada model uji 1, 3, dan 5, 6, memiliki beban terapan hanya sebuah, yaitu *proof load* saja pada baut, maka *time function* dan *apply load* yang diperlukan juga hanya satu untuk mendefinisikan *proof load* tersebut. Bedanya, pemberian *proof load* pada model uji 1 dan 3 hanya menggunakan *proof load* minimum yang besarnya langsung dapat ditentukan melalui menu *time function* atau *time step*. Sedangkan pada model uji 5 dan 6, besar *proof load* maksimum harus ditentukan terlebih dahulu. Penentuan besar maksimum *proof load* dilakukan dengan menggunakan iterasi *Full Newton* dengan opsi *Automatic Time Stepping* (ATS) dalam kondisi aktif. Pada model uji 2 dan 4, beban yang diaplikasikan selain *proof load* baut terdapat pula beban tarik pada pelat. Sehingga diperlukan 2 jenis *time function* dan *apply load* untuk kedua jenis beban tersebut.

Time function dibedakan sebanyak 2 jenis, yang pertama untuk mendefinisikan fungsi pembebanan dari beban tarik pelat, dimana pelat dikondisikan menerima beban tarik sebesar nol saat waktu awal hingga sebesar 70 MPa (model uji 2) atau 80 MPa (model uji 4) saat waktu akhir. Jenis *time function* kedua, digunakan untuk mendefinisikan fungsi pembebanan dari *proof load* baut, dimana nilai *proof load* yang diberikan saat waktu awal hingga saat waktu akhir adalah konstan sebesar 418.6 MPa. Selanjutnya, *time function* tersebut digunakan untuk pengaturan *apply load*.

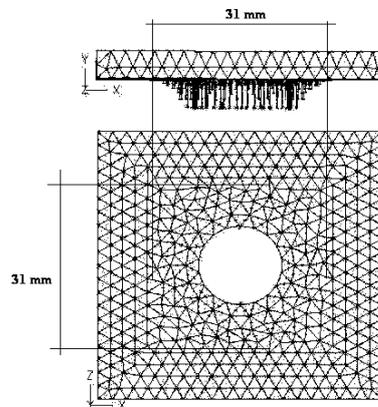
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gaya Kontak dan Luas Kontak

Hasil analisis kontak untuk model uji 1 dan 3 dapat dilihat pada Tabel 5 berikut. Dari hasil analisis elemen hingga (FEA) tersebut, diperoleh nilai gaya kontak yang terjadi di antara kedua permukaan pelat yang saling bergesekan adalah sebesar 53024 N dan 85244 N. Angka tersebut merupakan penjumlahan dari seluruh gaya kontak arah sumbu y di setiap node pada pelat bagian atas, yang menurut FEA terjadi saling kontak antara 2 permukaan pelat. Nilai gaya kontak yang sama juga dihasilkan, jika melalui penjumlahan gaya kontak pada pelat bagian bawah. Jika melihat mekanisme transfer gaya seperti Gambar 5, maka besarnya perbedaan yang terjadi antara gaya kontak teoritis dengan hasil FEA untuk kedua model uji adalah sebesar -0.05% dan -0.28% (negatif menunjukkan hasil FEA memiliki nilai yang lebih besar).

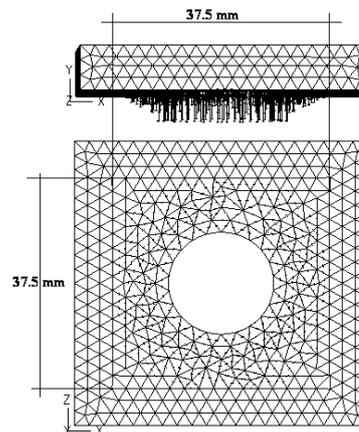
Gambar 11 dan 12 memperlihatkan gaya kontak (consistent contact force) yang terjadi pada sisi bawah permukaan pelat bagian atas, akibat *proof load* pada baut. Terlihat bahwa hasil kontak antara 2 pelat akibat *proof load* pada baut 1/2 inchi maupun baut yang lebih besar yaitu 5/8 inchi menunjukkan perilaku yang sama, yaitu gaya kontak yang terjadi memiliki nilai yang relatif lebih besar di sekitar radius kepala baut atau mur. Sedangkan daerah kontak meluas hingga melebihi radius kepala baut, yaitu dengan pertambahan panjang diameter yang mengalami kontak sebesar 34 % hingga 39.5 % dari diameter kepala baut. Daerah kontak tersebut ditunjukkan dengan titik-titik node berwarna yang mempunyai gaya kontak (disimbolkan sebagai panah).

Hasil ini menunjukkan bahwa kekuatan jepit terbesar pada sambungan geser-kritis adalah berlokasi di sekitar lubang baut, dan besarnya kekuatan jepit tersebut tidak seragam. Dikatakan tidak



Gambar 11 Gaya Kontak Pada Pelat Akibat Proof Load Minimum Baut 1/2 inchi

seragam karena semakin menjauhi lokasi lubang baut maka gaya kontak yang terjadi akan semakin mengecil. Hasil yang sama tentang perilaku gaya kontak tersebut ditunjukkan pula oleh model uji 2 dan 4. Pada model uji 2 dan 4, pelat yang mengalami gaya tarik akan memiliki luas daerah kontak yang tetap sama, dan besarnya gaya kontak yang dihasilkan pun tidak berbeda jauh dengan gaya kontak yang dihasilkan saat pelat belum diberi gaya tarik.



Gambar 12 Gaya Kontak Pada Pelat Akibat Proof Load Minimum Baut 5/8 inchi

Tabel 6 memperlihatkan besaran gaya kontak yang terjadi selama pemberian

Tabel 5 Hasil Gaya Kontak dan Luas Daerah Kontak

Model Uji	d_{baut}	Proof Load		Diameter Kepala Baut (mm)	Diameter Kontak (mm)	Perluasan Kontak (%)	Gaya Kontak (kN)	Beda (%)
	(mm)	(MPa)	(kN)					
1	12.7	418.6	53.0	22.2	31	39.48	53.02	-0.05
3	15.9	429.7	85.0	27.0	37.5	38.95	85.24	-0.28

Tabel 6 Hubungan Gaya Kontak dan Beban Tarik Pelat Model Uji 2 dan 4

Time	1.0	2.0	3.0	4.5	5.0	Model Uji
Beban Tarik Pelat (MPa)	14.0	28.0	42.0	63.0	70.0	2
Beban Tarik Pelat (kN)	3.50	7.00	10.50	15.75	17.50	
Gaya Kontak (kN)	53.02	53.02	53.02	53.02	53.02	
Beban Tarik Pelat (MPa)	16.0	32.0	48.0	72.0	80.0	4
Beban Tarik Pelat (kN)	6.40	12.80	19.20	28.80	32.00	
Gaya Kontak (kN)	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	

beban tarik pada pelat dilakukan. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa besar gaya kontak relatif konstan selama gaya eksternal tarik yang besarnya bervariasi diaplikasikan.

Perubahan gaya kontak dan daerah kontak yang terjadi pada bidang kontak antara pelat atas dan pelat bawah saat gaya *proof load* meningkat dapat dilihat pada Gambar 13. Gambar tersebut merupakan hasil analisis kontak dari model uji 5, dan perilaku yang mirip terjadi juga pada model uji 6.

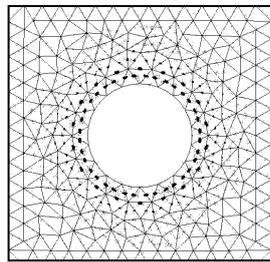
Setiap kenaikan nilai gaya tarik baut, maka akan terlihat perubahan daerah kontak yang terjadi pada permukaan pelat atas tersebut, disertai pula dengan peningkatan gaya kontak.

Perubahan daerah kontak yang dimaksud yaitu terjadinya kemunculan titik-titik node baru yang saling kontak ketika nilai gaya tarik baut ditingkatkan. Dalam FEA, kemunculan titik-titik node baru yang saling kontak tersebut ditandai dengan adanya nilai *consistent contact force* pada titik node yang bersangkutan. Namun, peningkatan jumlah titik-titik node baru yang saling kontak tersebut tidaklah signifikan bila dibandingkan dengan peningkatan gaya kontak yang terjadi.

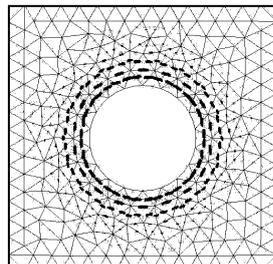
Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh penambahan *proof load* hanya meningkatkan gaya kontak (kekuatan jepit) antara kedua pelat yang tersambung, terutama pada bagian tepi lubang pelat. Penambahan luas bidang yang mengalami kontak sejak awal *proof load* hingga maksimum *proof load* yang dapat diberikan adalah tidak signifikan.

5.2 DEFORMASI PELAT

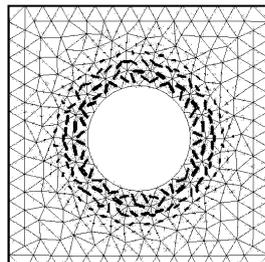
Deformasi searah sumbu longitudinal baut (peralihan dalam arah y) dari hasil FEA untuk model uji 5 dan 6 dapat dilihat pada Gambar 14 dan 15. Nilai deformasi dari baut tersebut diambil berdasarkan titik *node* yang berlokasi di permukaan ujung bawah baut (bukan kepala baut). Sedangkan deformasi arah y pada pelat diambil berdasarkan titik *node* yang berlokasi di tepi lubang pelat bagian atas yang mengalami kontak dengan pelat bagian bawah. Deformasi yang terjadi pada pelat bagian bawah terutama yang mengalami kontak dengan pelat bagian atas memiliki nilai yang sama, sehingga dalam hal ini akan ditinjau deformasi pelat bagian atas saja.



Gaya Tarik Baut = 26.50 kN
Gaya Kontak = 26.51 kN

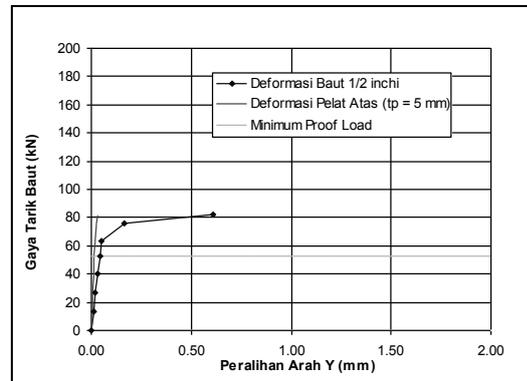


Gaya Tarik Baut = 63.31 kN
Gaya Kontak = 63.34 kN

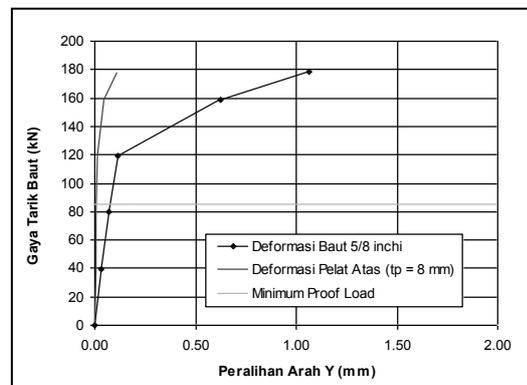


Gaya Tarik Baut = 82.15 kN
Gaya Kontak = 82.18 kN

Gambar 14 dan 15 tersebut menunjukkan bahwa minimum *proof load* yang diberikan pada baut berdiameter 1/2 inchi maupun 5/8 inchi terlihat masih berada dalam rentang elastis. Maksimum *proof load* pada baut 1/2 inchi menurut prediksi FEA dicapai dengan nilai sekitar 82 kN. Sedangkan maksimum *proof load* pada baut 5/8 inchi dicapai dengan nilai sekitar 178 kN.



Gambar 14 Deformasi Arah Y untuk Baut 1/2 inchi dan Pelat Atas 5 mm



Gambar 15 Deformasi Arah Y untuk Baut 5/8 inchi dan Pelat Atas 8 mm

Saat mencapai *proof load* maksimum tersebut, deformasi yang terjadi pada pelat masih sangat kecil (di bawah 0.15 mm). Bahkan saat *proof load* minimum tercapai pun dapat dikatakan deformasi yang terjadi tidak signifikan. Deformasi kecil pada tepi lubang pelat tersebut terjadi saat awal pembebanan *proof load* dimulai hingga *proof load* maksimum dapat diberikan. Hal ini disebabkan adanya bidang kontak antar 2 permukaan pelat yang saling menahan peralihan arah y selama pemberian gaya *proof load*.

Meskipun nilai deformasi pada pelat yang ditunjukkan Gambar 14 dan 15 terlihat sangat kecil, namun untuk kondisi pemberian *proof load* yang bernilai sama sebesar 40 kN terlihat dengan jelas bahwa pelat atas dengan tebal $t_p = 8$ mm

menghasilkan deformasi yang lebih kecil (peralihan arah $y = 0.003\text{mm}$) dibandingkan pelat atas yang memiliki ketebalan $t_p = 5\text{ mm}$ (peralihan arah $y = 0.01\text{ mm}$).

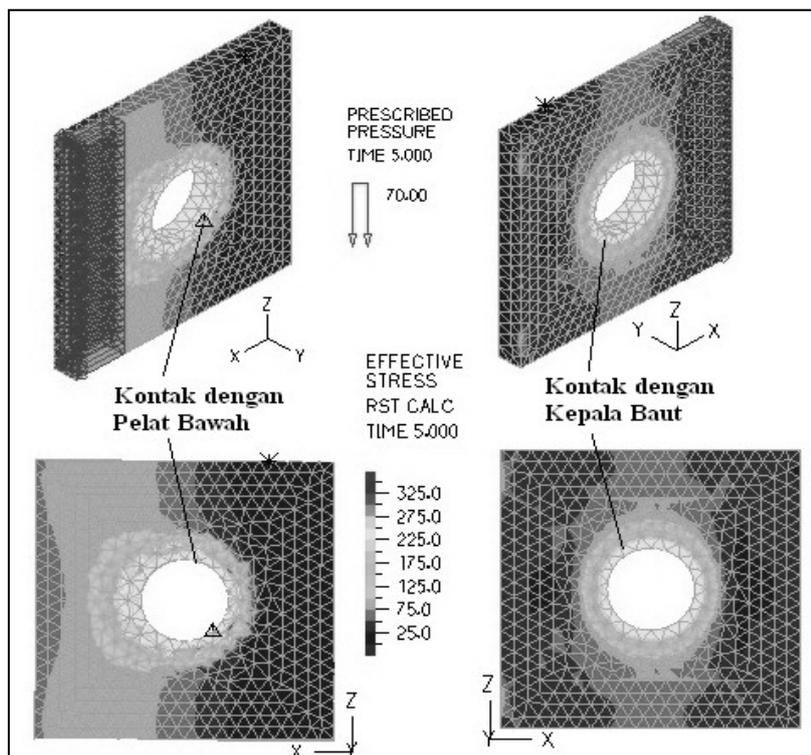
Sedangkan deformasi pelat atas untuk arah X dan Y, berdasarkan lokasi titik node yang sama dengan penentuan deformasi pelat atas untuk arah Y, maka terlihat deformasi yang terjadi pada pelat untuk arah X dan Y selama *proof load* diberikan adalah sangat kecil, atau dapat dikatakan dalam kondisi nyata tidak akan terlihat oleh mata.

Tegangan Pada Pelat

Saat baut menerima *proof load* minimum, terjadi kontak di antara pelat bagian atas dengan pelat bagian bawah. Akibat kontak tersebut timbul tegangan-tegangan

di sekitar lubang pelat. Jika melihat distribusi tegangan efektif pada pelat bagian atas, maka daerah yang mengalami tegangan terbesar adalah bagian tepi lubang baut. Bahkan hasil FEA dari model 1 dan 3 menunjukkan bahwa tegangan efektif di beberapa titik elemen pada tepi lubang pelat telah mencapai tegangan lelehnya. Semakin menjauhi lubang pelat maka tegangan efektif semakin mengecil. Hal ini sesuai dengan distribusi gaya kontak yang dihasilkan, dimana gaya kontak di sekitar lubang mempunyai nilai yang relatif besar dibanding di lokasi lain.

Distribusi tegangan efektif untuk pelat bagian atas akibat *proof load* pada baut berdiameter $\frac{1}{2}\text{ in}$ dan $\frac{5}{8}\text{ in}$, untuk kedua model uji tersebut memperlihatkan perilaku yang sama. Pelat bagian atas mempunyai permukaan yang mengalami kon-



Gambar 16 Tegangan Efektif Pada Pelat Atas dengan Kondisi Terbebani Tarik Sekaligus Menerima Beban dari Baut Berdiameter $\frac{1}{2}$ Inchi Akibat *Proof Load*

tak dengan pelat bagian bawah. Distribusi tegangan efektif yang mengelilingi lubang pelat membentuk lingkaran-lingkaran tegangan efektif yang memiliki nilai seragam, dan jika ditinjau secara radial memiliki nilai tegangan efektif yang semakin mengecil bila menjauhi lubang pelat. Pelat bagian atas juga memiliki permukaan yang mengalami kontak dengan kepala baut. Distribusi tegangan efektif yang terjadi adalah tidak seragam dan relatif memiliki tegangan efektif yang lebih besar dibandingkan permukaan yang mengalami kontak dengan pelat bagian bawah.

Gambar 16 memperlihatkan distribusi tegangan efektif hasil FEA untuk pelat bagian atas akibat *proof load* pada baut dan sekaligus pelat tersebut menerima beban tarik. Model uji 2 dan 4 tersebut memperlihatkan perilaku yang sama. Pelat bagian atas mempunyai permukaan yang mengalami kontak dengan pelat bagian bawah. Distribusi tegangan yang terjadi pada permukaan tersebut sangat tidak seragam. Terlihat tegangan efektif yang semula membesar hanya di tepi lubang pelat saat sebelum ada gaya tarik diberikan, setelah gaya tarik diberikan maka tegangan efektif tersebut bergeser atau membesar dalam arah gaya tarik yang terjadi. Sedangkan pelat bagian atas yang mengalami kontak dengan kepala baut memiliki distribusi tegangan efektif yang berbeda dengan pelat bagian atas yang permukaannya mengalami kontak dengan kepala baut. Pada permukaan yang mengalami kontak dengan kepala baut tersebut terlihat bahwa tegangan efektif yang terpusat di tepi lubang baut tidak mengalami pergeseran. Hal ini menunjukkan bahwa selama ada beban yang bekerja pada sambungan geser – kritis, kontak atau gaya jepit yang dihasilkan antara pelat atas dan kepala baut tidak memberikan kontribusi dalam menahan gaya tarik yang bekerja. Melainkan kontak atau gaya jepit yang dihasilkan antara pelat atas dan pelat bawah akibat *proof load* pada bautlah, yang lebih memberikan kontribusi utama dalam menahan gaya tarik yang

bekerja pada pelat. Sehingga jelas bahwa dalam perhitungan desain kekuatan sambungan geser-kritis, pengaruh bidang kontak (banyaknya bidang kontak, m) yang diperhitungkan adalah gesekan antara pelat yang disambung, sedangkan gesekan kepala baut dengan pelat tidak diperhitungkan.

KESIMPULAN

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

1. Hasil dari model uji FEA menunjukkan bahwa gaya kontak dan jumlah node yang mengalami kontak (luas daerah kontak) yang terjadi pada bidang kontak antara pelat atas dan pelat bawah semakin bertambah, seiring dengan membesarnya gaya tarik baut yang diberikan. Penambahan jumlah node yang mengalami kontak antara pelat atas dan pelat bawah tidak signifikan seperti halnya penambahan nilai gaya kontak yang terjadi. Dalam hal ini pengaruh penambahan *proof load* hanya meningkatkan gaya kontak (gaya jepit) antara kedua pelat yang tersambung, terutama bagian tepi lubang pelat.
2. Beban tarik yang diaplikasikan pada pelat yang telah mengalami tegangan kontak tersebut, tidak mempengaruhi luas daerah bidang kontak yang telah terjadi akibat gaya tarik baut, meskipun nilai beban tarik tersebut bervariasi.
3. Saat *proof load* diberikan hingga mencapai maksimum, deformasi yang terjadi di sekitar lubang pelat relatif masih kecil dibandingkan dengan deformasi yang terjadi pada baut. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian *proof load* yang berlebihan dapat berpotensi menyebabkan kehancuran pada baut (terutama bagian ulir), dibandingkan kehancuran pada pelat.
4. Kondisi tegangan yang terjadi pada pelat atas memiliki perbedaan distribusi tegangan di kedua sisi permukaannya. Sisi permukaan yang merupakan bidang kontak dengan pelat

bawah, memiliki daerah yang mengalami tegangan tarik yang berlokasi di depan lubang pelat dalam arah gaya tarik, dan memiliki pula daerah yang mengalami tegangan tekan yang berlokasi di sekitar tepi lubang pelat. Sedangkan sisi permukaan yang merupakan bidang kontak dengan kepala baut, lebih banyak mengalami tegangan tarik. Saat proof load minimum dicapai, di beberapa sekitar tepi lubang baut telah terjadi kelelahan, yang ditunjukkan dengan distribusi tegangan efektif.

5. Kondisi tegangan pada pelat berlubang yang menggunakan sambungan tipe geser kritis berbeda dengan kondisi tegangan pada pelat berlubang yang menggunakan sambungan tipe tumpu. Jika diasumsikan *slip* dapat terjadi dalam sambungan geser kritis, maka penggunaan persamaan kekuatan tumpu pelat pada sambungan tipe tumpu untuk mengecek kekuatan tumpu pelat pada sambungan tipe geser friksi, masih memerlukan faktor koreksi. Karena sebelum batang baut bertumpu pada pelat telah terjadi kelelahan dan deformasi di sekitar tepi lubang pelat
6. Penelitian lanjutan di laboratorium tentang topik di atas perlu dilakukan untuk menguji kebenaran dari hasil numerik di atas, terutama parameter-parameter model material dan model kontak yang dilakukan berdasarkan asumsi numerik.

DAFTAR PUSTAKA

- ADINA R&D. (2001). *Theory an Modeling Guide*, Volume 1, ADINA R&D, Water-town, USA.
- ADINA R&D. (2001). *User Interface Primer*, Report ARD 01-6, ADINA R&D, Water-town, USA.
- 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.
- 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.
- Kulak, G.L, Fisher, J.W, and Struik, J.H.A. (1987). *Guide to Desain Criteria for Bolted and Riveted Joints*, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Rump, J.L. and Fisher, J.W. (1963). *Journal of the Structural Division*. "Calibration of A325 Bolts". ASCE, 89, ST6 (December 1963).
- Salmon, C.G. and Johnson, J.E. (1990). *Steel Structure: Design and Behavior*, Third Edition, Harper Collins Publisher, USA.
- Segui, William T. (2003). *LRFD Steel Design*, Third Edition, Thomson Learning, USA.
- Setiyarto, Y.D., *Studi Numerik: Perilaku Pelat Berlubang Akibat Proof Load Baut Mutu Tinggi dengan Menggunakan Analisis Kontak*, Seminar Bidang Kajian 3, Program Doktor Pascasarjana UNPAR.
- SNI (2000). *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung* - SNI 03-1729-2002.
- Spiegel, L and Limbrunner, G.F. (1986). *Applied Structural Steel Design*. Prentice-Hall, USA.