

Distorsi Sambungan Baut akibat *Curling* dan Pencegahannya Studi Kasus Sambungan Pelat Tipe Geser (*lap-joint*) dengan Baut Tunggal

Wiryanto Dewobroto

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Lippo-Karawaci, Tangerang, 15811, E-mail: wir@uph.edu

Sahari Besari

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132,
E-mail: sahari_besari@yahoo.com

Abstrak

Fenomena *curling* jarang dijumpai dan dibahas pada perilaku keruntuhan sambungan pelat baja hot-rolled yang relatif tebal, tetapi menjadi fenomena biasa pada perilaku keruntuhan sambungan pelat baja cold-formed yang relatif tipis (Cornell 1954; Roger-Hancock 2000; AISI 2001; Wallace et.al 2001). Jadi ketika pada uji tarik sambungan pelat hot-rolled yang relatif tebal (Dewobroto, 2009) dijumpai adanya *curling* dan mekanisme keruntuhan akhir memperlihatkan distorsi sambungan, yang berbeda dengan bentuk-bentuk mekanisme keruntuhan sambungan yang ada (Vinnakota, 2006), maka hal itu tentu patut dipertanyakan. Permasalahan yang akan diungkap, yaitu: (1) apa yang menyebabkan timbulnya *curling*; (2) apakah itu menjadi penyebab terjadinya distorsi pada sambungan; (3) bagaimanakah strategi untuk mengatasinya. Makalah ini menyajikan hasil penelitian numerik yang mencoba menjawab pertanyaan tersebut, sekaligus dapat menjelaskan dampak positif memakai ketentuan jumlah baut minimum pada sambungan lap (geser) dengan konfigurasi tertentu, yang ternyata secara efektif dapat menjadi mencegah distorsi sambungan sehubungan dengan adanya efek *curling* tersebut.

Kata-kata Kunci: *Curling*, baut mutu tinggi; sambungan lap (*lap-joint*), perilaku keruntuhan.

Abstract

The phenomena of *curling* seldom happened on failure behavior of hot-rolled steel plate bolts connection, but relatively common found on the failure of cold-formed bolts connection (Cornell 1954; Roger-Hancock 2000; AISI 2001; Wallace et.al 2001), that relatively thin. So, it is interesting to find the *curling* phenomena on single bolts connection experiment (Dewobroto, 2009) that consist of hot-rolled steel plate. Also the final failure mechanism is different from the common mechanism of failure of bolts steel connection (Vinnakota, 2006), so it is to be questionable. Issues that are going to viewed are: (1) What caused *curling* to occur; (2) Was the same cause result distortion on the connection; (3) What are the strategies to overcome it. This paper will report the result of numerical simulation that suppose to resolve the question, also explains the benefit of using minimum bolt requirement, in a certain configuration on lap joint that can effectively avoid the distortion of the connection due to influence of *curling*.

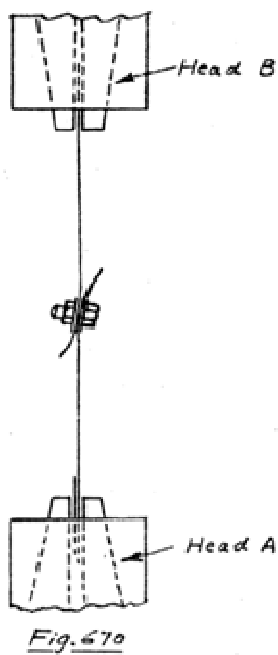
Keywords: *Curling*, high-strength bolts; lap-joint, failure behavior.

1. Pendahuluan

Fenomena *curling* (lihat **Gambar 1**), terjadi pada ujung pelat sambungan baut tipe geser, yaitu ketika ujung pelat melengkung ke arah luar. Itu diamati terjadi pada sambungan pelat *cold-formed* yang relatif tipis (Cornell, 1954; Roger-Hancock, 2000; AISI, 2001; Wallace et.al., 2001), sehingga dianggap sebagai fenomena yang umum. Banyak yang menduga bahwa eksentrisitas pelat sambungan dianggap sebagai penyebabnya, meskipun fakta adanya *curling* tersebut terjadi juga pada sambungan baut geser tipe tunggal maupun tipe ganda.

2. Perilaku Keruntuhan Sambungan Baut Tunggal

Fenomena *curling* jarang dijumpai dan dibahas pada sambungan *lap-joint* yang memakai pelat *hot-rolled* yang relatif tebal. Hal tersebut juga tidak termasuk sebagai fenomena perilaku keruntuhan yang diperhitungkan dalam perencanaan sambungan baut dengan mekanisme tumpu (Kulak et. Al., 2001; Vinnakota, 2006). Adapun berbagai mekanisme keruntuhan yang diperhitungkan terjadi pada sambungan baut tunggal terlihat pada **Gambar 2**.

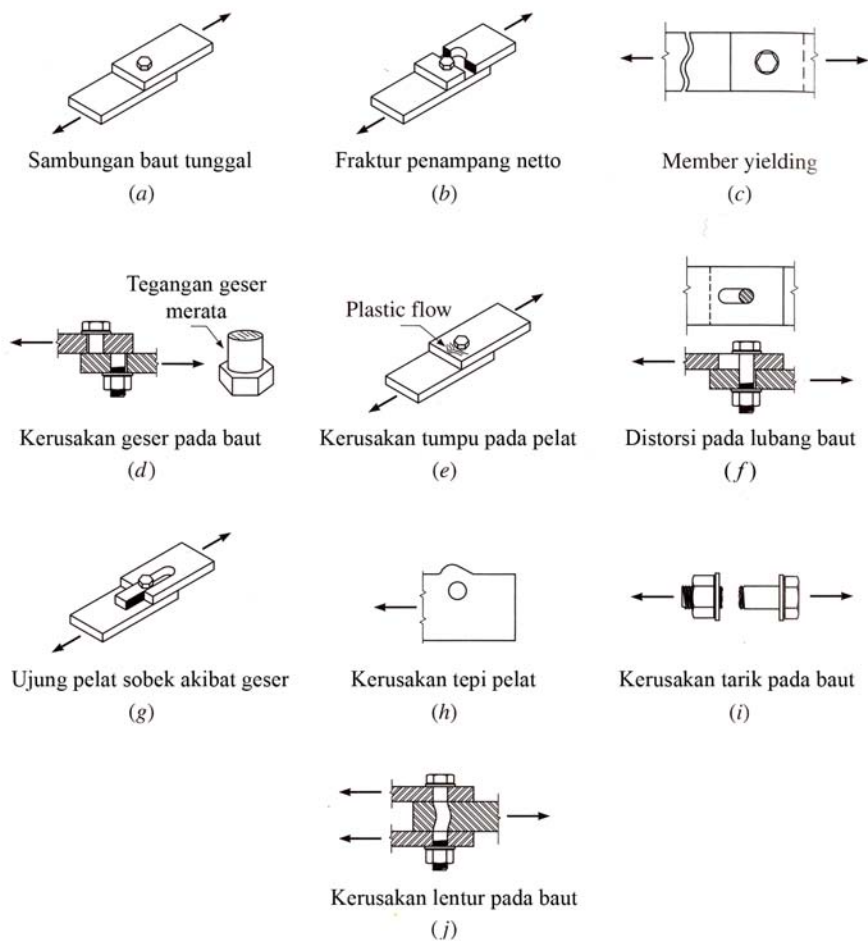


(a) Baut geser tunggal (Cornell, 1954)



(b) Baut geser ganda (AISI, 2001)

Gambar 1. Fenomena curling pada pelat ujung



Gambar 2. Mekanisme keruntuhan sambungan baut tunggal dengan baut (Vinnakota, 2006)

Mode-mode keruntuhan yang teridentifikasi pada **Gambar 2** dipakai sebagai faktor yang menentukan kekuatan batas sistem sambungan, dan secara umum dapat dipisahkan dalam dua kategori, yaitu [A] kerusakan pelat dan [B] kerusakan baut. Beberapa hal yang dianggap menentukan kekuatan sistem sambungan yang direncanakan adalah: [1] kerusakan fraktur pada penampang netto pelat (pada bagian lubang baut); [2] kerusakan leleh pada penampang bruto pelat di luar daerah lubang baut; [3] kerusakan geser pada baut; [4] kerusakan tumpuan pelat; [5] berbagai macam kerusakan pada bagian ujung pelat (*shear-tear-out*, dll); [6] kerusakan tarik baut; [7] kerusakan lentur baut; [8] kerusakan ulir (*thread*) baut; [9] bagian pelat mengalami slip (Vinnakota, 2006).

Dari berbagai fenomena mode keruntuhan yang disajikan baik pada **Gambar 2** atau uraian selanjutnya, ternyata tidak memperlihatkan atau memperhitungkan adanya fenomena *curling* (lihat **Gambar 1**). Hal itu dapat diinterprestasikan dengan berbagai hal, bahwa fenomena *curling* dianggap tidak memberi pengaruh terhadap kekuatan *ultimate* sistem sambungan atau bisa saja dianggap bahwa fenomena tersebut tidak akan terjadi pada sambungan baut dengan pelat yang relatif lebih tebal, karena semua fakta (Cornell, 1954; AISI 2001) mengacu pada sistem sambungan baut dengan pelat *cold-formed* yang tipis.

3. Masalah *Curling* pada Sambungan Pelat Baja *Hot-rolled*

Telah dipahami bahwa fenomena *curling* terjadi pada sambungan baja *cold-formed* (Cornell, 1954; AISI 2001), tetapi ada bukti empiris (Dewobroto, 2009) menunjukkan bahwa *curling* juga terjadi pada sambungan pelat baja *hot-rolled*. Oleh karena itu timbul pertanyaan ‘mengapa selama ini fenomena *curling* tidak diperhitungkan dalam perancangan sambungan’. Jika itu adalah suatu kelalaian, mengapa tidak pernah ada laporan kerusakan struktur berkaitan dengan *curling* tersebut. Padahal bukti empiris tadi menunjukkan bahwa *curling* menyebabkan pelat sambungan mengalami rotasi sedemikian sehingga mengalami sobek, lihat **Gambar 3**.

Konfigurasi sambungan pada awal mula, sebelum diuji (**Gambar 3a**), menunjukkan pelat-pelat saling sejajar satu dengan yang lain. Selesai diuji (**Gambar 3b**) terlihat pelat saling melengkung keluar (*curling*) sehingga kondisi keruntuhannya tidak sama dengan mode keruntuhan yang umum diperhitungkan sesuai kriteria perencanaan yang baku, seperti AISC atau yang sejenisnya (**Gambar 2**). Adanya temuan di atas itulah yang dijadikan masalah untuk diteliti dan diuraikan dalam tulisan ini.



(a) Sebelum uji tarik



(b) Setelah uji tarik

Gambar 3. Fenomena *curling* pada sambungan geser pelat *hot-rolled* (Dewobroto, 2009)

4. Tujuan Penelitian dan Batasan Permasalahan yang Dibahas

Tulisan ini akan membahas kejadian *curling* dan pengaruhnya pada sambungan baja dengan baut mutu tinggi. Tipe sambungan yang dievaluasi adalah sambungan pelat baja tipe geser (*lap-joint*) memakai baut tunggal. Akan dibahas juga pengaruh jumlah baut dan penempatannya terhadap fenomena *curling*. Selanjutnya diharapkan dapat diketahui apakah fenomena *curling* perlu diperhitungkan untuk setiap desain, atau hanya pada kasus-kasus tertentu, juga mengetahui faktor-faktor apa yang dominan menyebabkan *curling* tersebut, termasuk juga strategi pencegahannya.

5. Hipotesis Penyelesaian Masalah

Fenomena *curling* terjadi pada ujung pelat sambungan tipe geser dengan baut, awal mulanya dianggap hanya terjadi pada pelat tipis (*cold-formed*), tetapi kenyataannya terjadi juga pada pelat tebal (*hot-rolled*) (Dewobroto, 2009). Fenomena tersebut juga dapat terjadi pada sambungan baut geser tipe tunggal maupun tipe ganda (lihat **Gambar 1**). Pada sambungan geser pelat tipe ganda tentunya faktor eksentrisitas antara pelat-pelat sambungan dapat saling menghilangkan. Jadi jika masih ada *curling* pada tipe sambungan tersebut tentunya ada penyebab lain dan bukan akibat faktor eksentrisitas pelat sambungan saja.

Dalam praktek hal tersebut tidak menjadi masalah, yaitu tidak diketemukan kasus-kasus kerusakan di lapangan yang diakibatkan oleh fenomena *curling*. Itu dimungkinkan karena adanya kebiasaan praktis di lapangan yang cukup baik, yang ternyata dapat mengantisipasi *curling*, seperti misalnya adanya ketentuan praktis untuk memakai minimal dua baut pada setiap sambungan tipe geser. Adanya dua baut yang dipasang searah gaya akan membentuk momen kopel yang mampu menahan momen eksentrisitas pelat tersebut. Kecuali itu elemen-elemen sambungan dalam praktek umumnya tidak berbentuk pelat, tetapi merupakan element berprofil sehingga mempunyai kekakuan yang relatif cukup untuk mengantisipasi *curling*.

Dengan hipotesis di atas, maka langkah awal penelitian ini adalah membuktikan apakah memang benar hanya eksentrisitas saja yang menyebabkan *curling* atau masih ada faktor lain. Selanjutnya akan dibahas pengaruh penempatan baut (minimal dua baut) dan pengaruhnya untuk mengantisipasi timbulnya *curling* tersebut.

Untuk membuktikan bahwa eksentrisitas mempunyai pengaruh atau tidak maka akan dibuat suatu simulasi pelat sambungan yang diuji tarik tanpa memberikan

eksentrisitas sekecil apapun, atau kondisi pelat sentris. Untuk mencapai kondisi ideal maka digunakan simulasi numerik.

6. Simulasi Numerik Uji Sentris pada Pelat Tunggal

6.1 Persiapan percobaan

Untuk mengetahui mekanisme terjadinya fenomena *curling*, akan ditinjau perilaku pelat tunggal yang ditumpu pada bagian baut. Perilaku pelat akan dianalisis dengan simulasi numerik khususnya untuk mengetahui distribusi gaya-gaya (tegangan) di sekitar daerah yang biasanya mengalami *curling*. Karena digunakan simulasi numerik maka uji pelat dapat dikondisikan bebas dari eksentrisitas secara sempurna. Jika masih saja timbul *curling* maka dapat dipastikan bahwa eksentrisitas bukan satu-satunya penyebab *curling*, ada faktor lain yang belum diketahui. Jadi diharapkan dari simulasi ini akan diperoleh faktor apa yang menyebabkan *curling* selain dari eksentrisitas.

Simulasi numeriknya sendiri akan menggunakan program ABAQUS, suatu program komputer rekayasa komersil berbasis *finite element analysis*. Program tersebut banyak dipakai untuk melacak perilaku keruntuhan struktur, yang daktail (*yielding*) (Komuro, 2004; Kim, 2007).

6.2 Penyiapan input data numerik bahan material

Data numerik bahan material atau *material property* menentukan ketelitian hasil. Karena simulasi mencakup masalah non-linier (material dan geometri), maka perlu dihindari hal-hal memungkinkan menjadi sumber *error* sehingga diperlukan proses kalibrasi. Istilah kalibrasi disini, lebih dikaitkan dengan berbagai usaha yang perlu dilakukan agar hasil analisa numerik berbasis komputer mempunyai korelasi dan dapat mewakili kondisi real sebenarnya dari objek struktur yang sedang diteliti. Karena seperti diketahui bahwa pengujian empiris, meskipun menghasilkan fakta yang tidak dapat diganggu-gugat, tetapi agar hasilnya teliti dan valid memerlukan sumber daya yang relatif lebih mahal dibanding simulasi numerik. Sedangkan keuntungan simulasi numerik adalah jika sekali diperoleh korelasi dengan fakta empiris, maka dapat dengan mudah diulang atau dikaji parameter-parameter lain yang mirip untuk dapat diteliti pengaruh satu dengan yang lainnya.

Implementasi dari proses kalibrasi tersebut mencakup tiga hal yang perlu perhatian khusus, dan bila perlu hal-hal berikut tetap harus disesuaikan dengan apa-apa yang menjadi persyaratan atau keterbatasan program komputer yang dipakai, yaitu :

1. Data material properti, dari uji tarik sampel

material berupa kurva engineering-stress-strain. Untuk input data program ABAQUS perlu dikonversi menjadi kurva true-stress-true-strain dan dipisahkan komponen elastis dan plastisnya.

2. Data geometri, input data yang mudah dicek secara visual karena program ABAQUS telah menyiapkan modulnya dengan baik. Termasuk dalam hal ini adalah menyesuaikan dengan kondisi batas / tumpuan dari model.
3. Opsi khusus program ABAQUS ada yang diaktifkan manual. Ini tantangan tersendiri, karena sebagai general purpose program maka program ABAQUS menyediakan banyak sekali opsi atau fasilitas. Itu semua jelas memerlukan pemahaman yang benar, karena pengaruhnya kadang sangat signifikan.

Jadi sebenarnya yang akan dievaluasi dalam bab ini adalah bagaimana strategi pemodelan simulasi struktur yang akan dilakukan. Simulasi berupa penyelesaian permasalahan struktur pejal 3D (ruang) dengan model element solid 3D (element C3D8R) pada program ABAQUS, program komputer berbasis finite element method dengan opsi non-linier yang sangat lengkap. Meskipun demikian telah diketahui, bahwa secanggih-canggihnya program komputer yang digunakan maka permasalahan yang diselesaikan hanya berupa model atau representatif numerik dari kasus sebenarnya, sehingga hasilnya tetap berupa pendekatan. Adapun evaluasi yang dimaksud berupa perbandingan dengan fakta sebenarnya, untuk mengetahui seberapa besar perbedaan antara model dan real.

Dari ketiga proses kalibrasi di atas, maka hanya material properti yang perlu disiapkan secara khusus, sedangkan item 2 dan item 3 akan diatur di dalam program ABAQUS. Properti bahan dihasilkan dari uji eksperimen (Dewobroto, 2009) dari dua sampel yang diuji yaitu UPH-SC1 dan UPH-SC2 yang ternyata memperlihatkan kurva yang meskipun secara kualitatif mirip tetapi berbeda besarnya. Meskipun demikian dari hasil penelitian Dewobroto (2009), perbedaan data tersebut tidak mempengaruhi ketelitian hasil simulasi, kedua hasil data dapat didekati secara memuaskan menggunakan simulasi numerik memakai program ABAQUS. Selanjutnya hanya akan disajikan hasil kalibrasi data UPH-SC2.

Data empiris hasil pengujian sampel selanjutnya disederhanakan agar proses simulasi dapat berjalan lancar dan menghemat sumber daya komputer. Proses penyederhanaan dengan program MS-Excel dengan fasilitas Trendline, yaitu dengan memprediksi persamaan sebagai suatu kurva. Prosesnya semi-manual, oleh sebab itu hasilnya perlu di-plot-kan terlebih dahulu dengan data empiris untuk

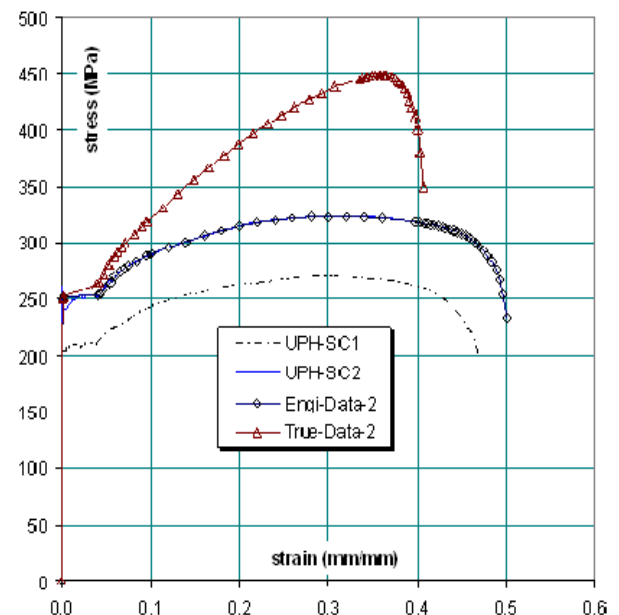
memperlihatkan hubungan atau kecocokan kedua data tersebut, sebagaimana terlihat pada **Gambar 4**.

Engi-Data adalah notasi data *engineering-stress-strain* ($\sigma_{Eng}, \epsilon_{Eng}$), yang didasarkan pada penampang asli (penampang sebelum mengalami deformasi), sedangkan True-Data adalah notasi untuk data *true-stress-strain* yang berdasarkan penampang setelah berdeformasi. Karena menghitung penampang setelah berdeformasi adalah sulit maka digunakan konversi tegangan $\sigma_{True} = \sigma_{Eng} (1 + \epsilon_{Eng})$ dan regangan $\epsilon_{True} = \ln(1 + \epsilon_{Eng})$. Regangan elastis dihitung berdasarkan Modulus Elastis Baja, $E_s = 200,000$ MPa.

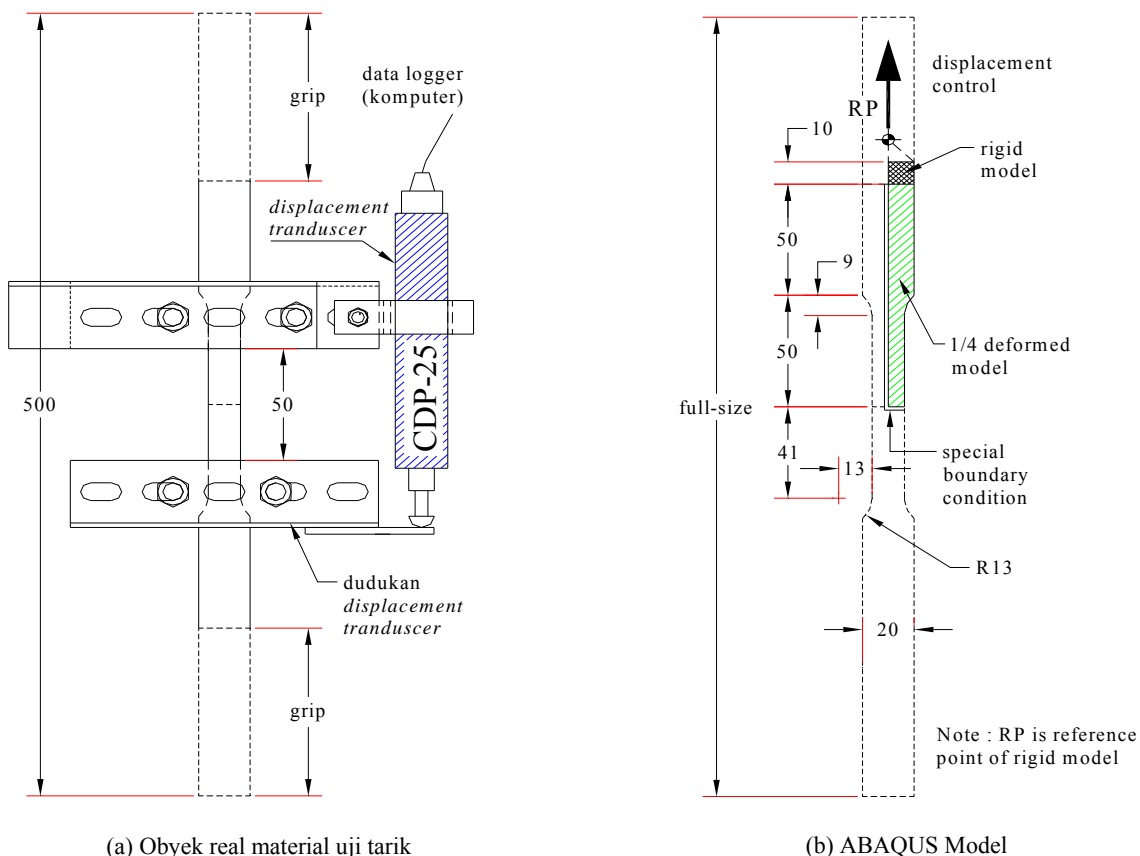
6.3 Kalibrasi data dan proses simulasi numerik

Uji tarik untuk mengetahui perilaku pelat merupakan bentuk uji yang paling sederhana, apabila dapat diperoleh korelasi antara perilaku real (uji tarik di laboratorium) dan model numerik (hasil running program ABAQUS) maka tentu dapat diketahui bahwa pemasukan data material pada program komputer dapat dianggap benar.

Karena elemen yang diuji berbentuk simetris, baik pada arah horizontal maupun vertikal, maka cukup ditinjau ¼ model sebagaimana terlihat pada **Gambar 6**. Model disusun memakai element Solid-3D untuk model deformed (model elastis-plastis atau yang dapat berdeformasi) dan element Rigid pada rigid model untuk mewakili bagian grip yang kaku, yang dianggap tidak bisa mengalami deformasi.

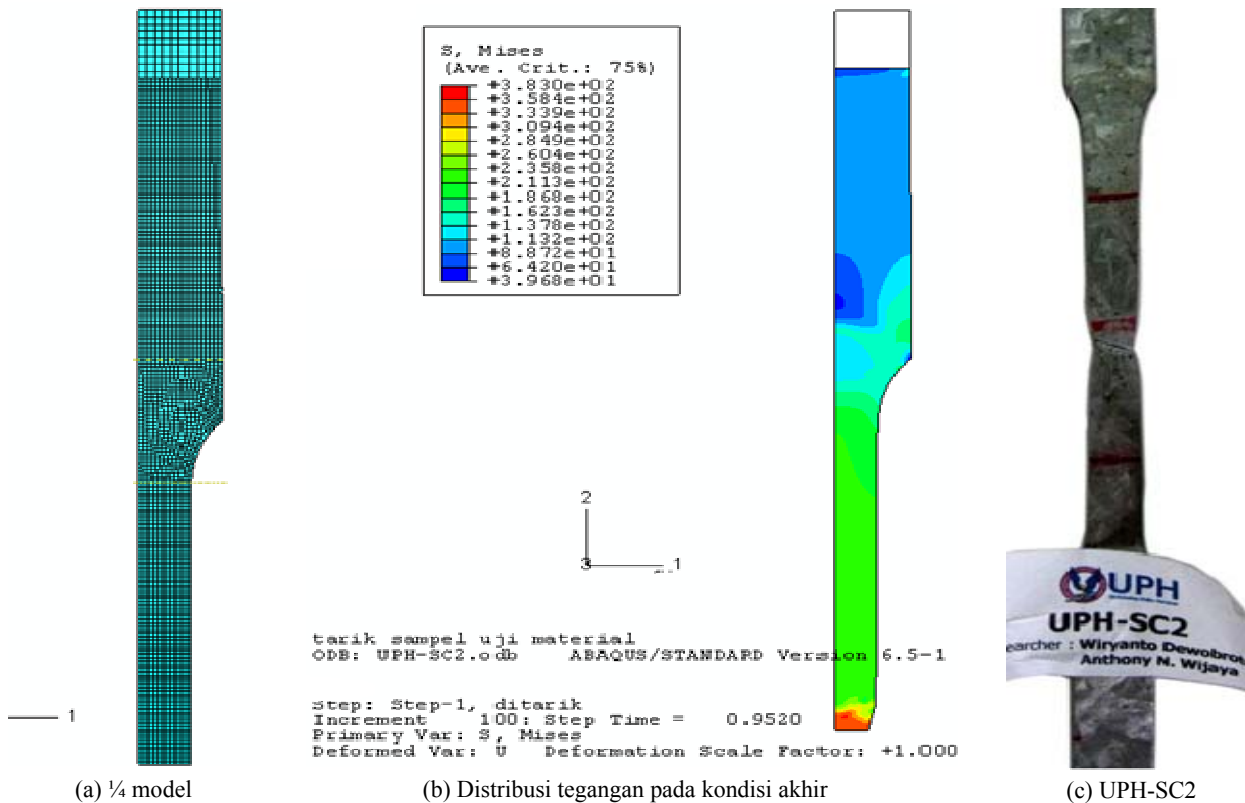


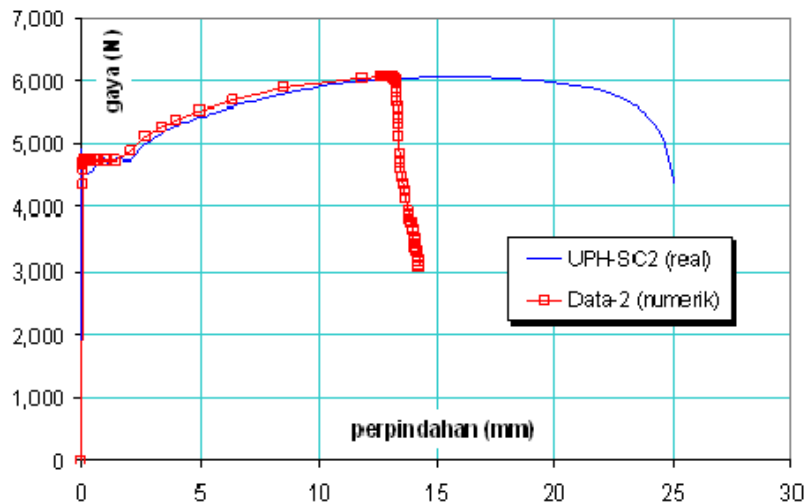
Gambar 4. Kurva regangan-tegangan material properti baja rencana (Dewobroto, 2009)



Gambar 5. Konfigurasi uji material tarik dan model simulasinya (Dewobroto, 2009)

Hasil kalibrasi antara uji simulasi numerik dan uji empiris adalah sebagai berikut:



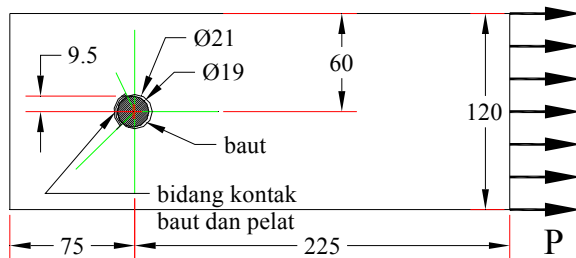


(d) Kurva hubungan beban-perpanjangan

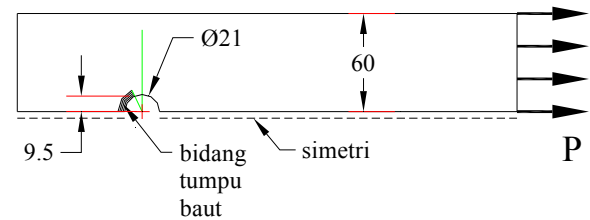
Gambar 6. Simulasi numerik uji tarik baja (Dewobroto, 2009) (a, b, c, d)

Tabel 1. Validitas hasil simulasi dengan hasil empiris

Materi	P_u (N)	%	d_u (mm)	%	Note
UPH-SC2	6070	100.00%	15.20	100%	Uji Laboratorium
Data-2	6073	100.05%	12.77	84%	Simulasi Komputer



(a) Pelat tunggal (utuh)



(b) Model FEM (separo)

Gambar 7. Simulasi numerik pada komponen pelat sambungan

Berdasarkan kurva perilaku keruntuhan pelat (**Gambar 6d**) dan hasil perbandingan nilai kuantitatif yang disajikan pada **Tabel 1**, baik dari segi kuat ultimate (*strength*) maupun perpanjangannya (*stiffness*), dapat dibuktikan bahwa simulasi numerik cukup valid digunakan memprediksi perilaku keruntuhan struktur yang mendekati kondisi real, sehingga dapat dilakukan proses parametris untuk mengamati berbagai macam kombinasi atau jenis konfigurasi geometri yang mirip untuk memprediksi perilaku keruntuhannya, termasuk model yang akan dibuat.

Selanjutnya dengan data dan strategi yang sama maka model akan dikembangkan untuk mengevaluasi perilaku sambungan pelat untuk menyelidiki fenomena curling.

6.4 Model numerik geometri pelat dengan *curling*

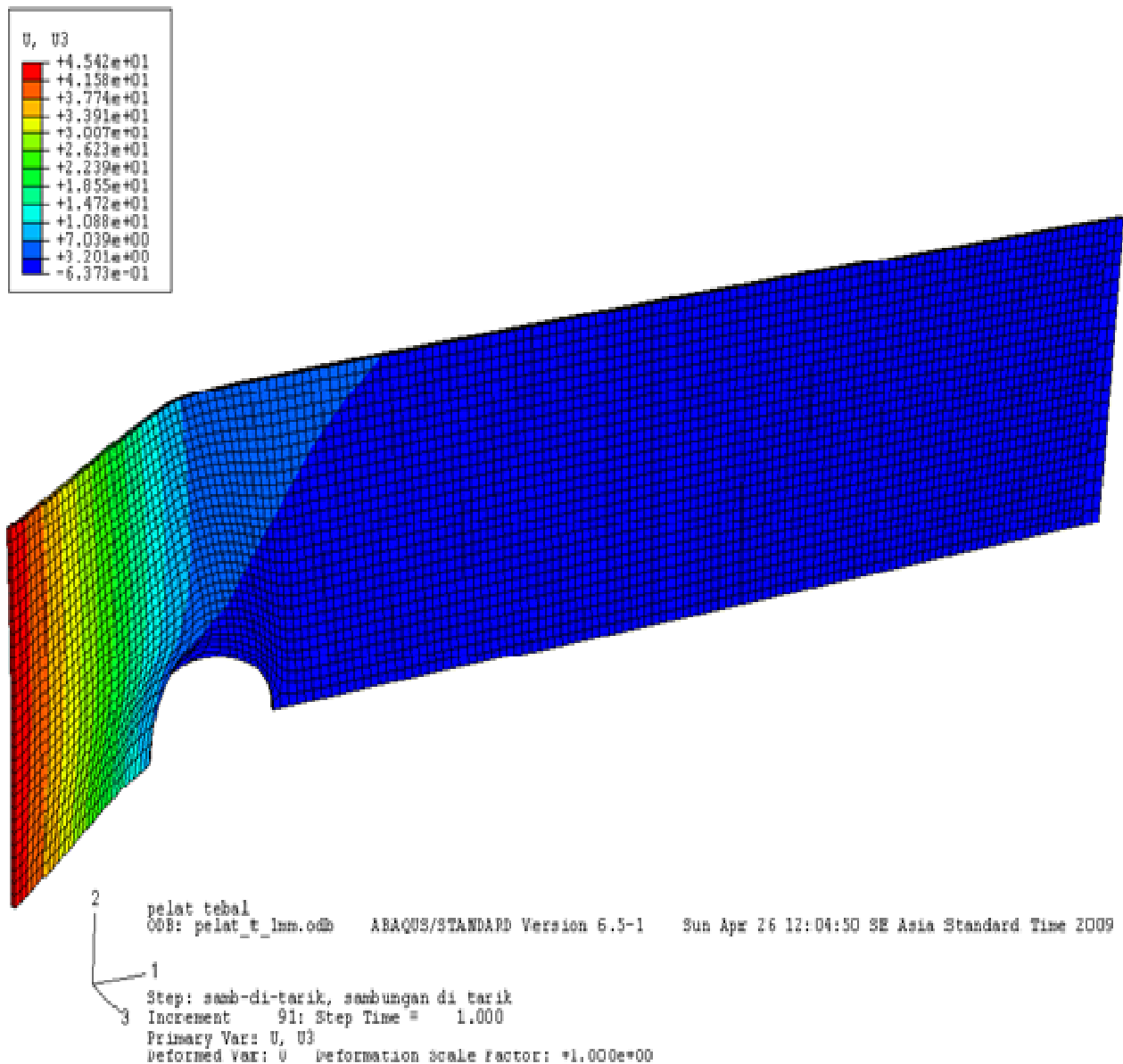
Pada simulasi numerik ini hanya ditinjau pelat tunggal sehingga efek eksentrisitas tidak ada (kondisi ideal), adapun dimensi dan ukurannya akan disesuaikan dimensi sample uji eksperimental (lihat **Gambar 7**).

Ukuran lubang pada pelat lebih besar dari baut, sehingga tumpuan pelat didasarkan pada bidang kontak baut, (diameter baut). Gaya P diberikan dalam bentuk perpindahan arah Δ_1 (*displacement control*) untuk menghasilkan kondisi pembebanan *ultimate* (runtuh). Simulasi akan meninjau tiga (3) ketebalan pelat, yaitu 1 mm, 5 mm dan 10 mm, yang dapat dengan mudah dilaksanakan dengan konsep *copy and edit* berdasarkan data yang sama (*parametric simulation*). Prinsip ini merupakan salah satu keunggulan simulasi numerik dibanding uji empiris.

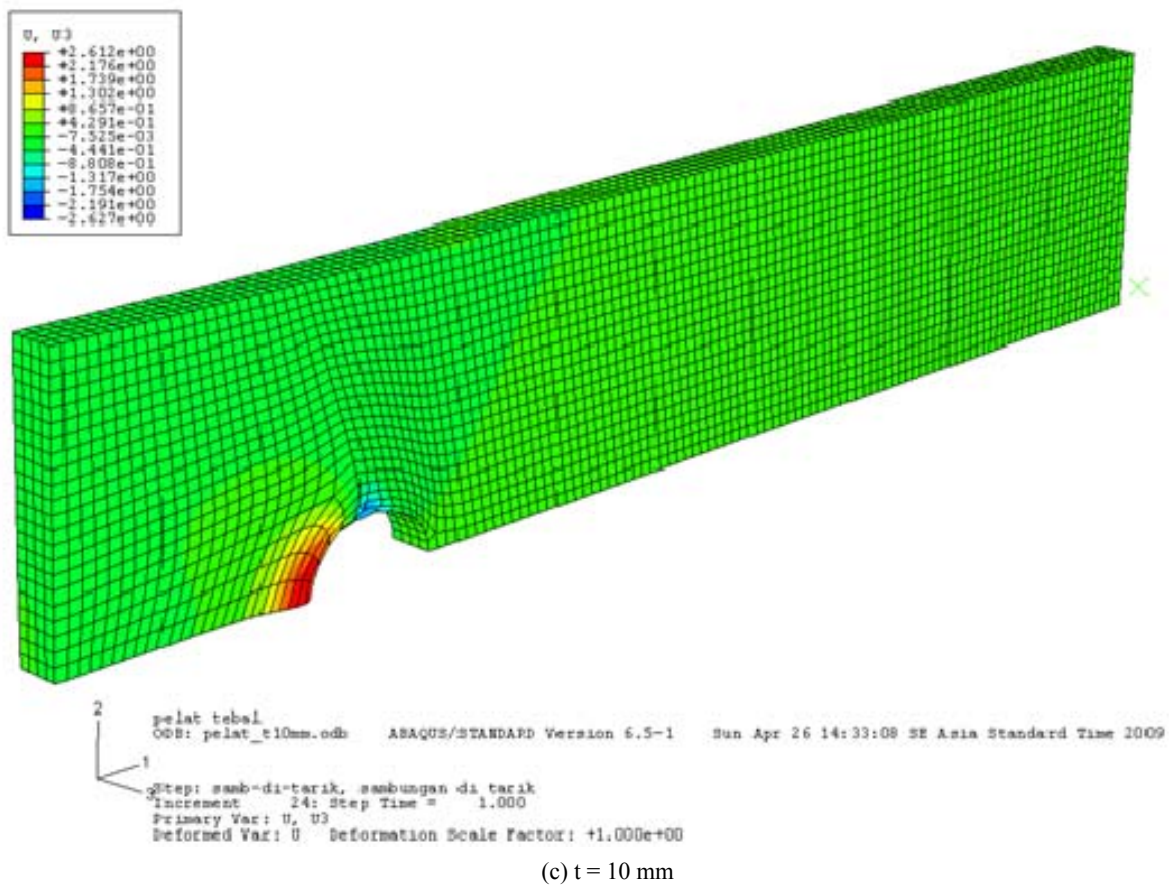
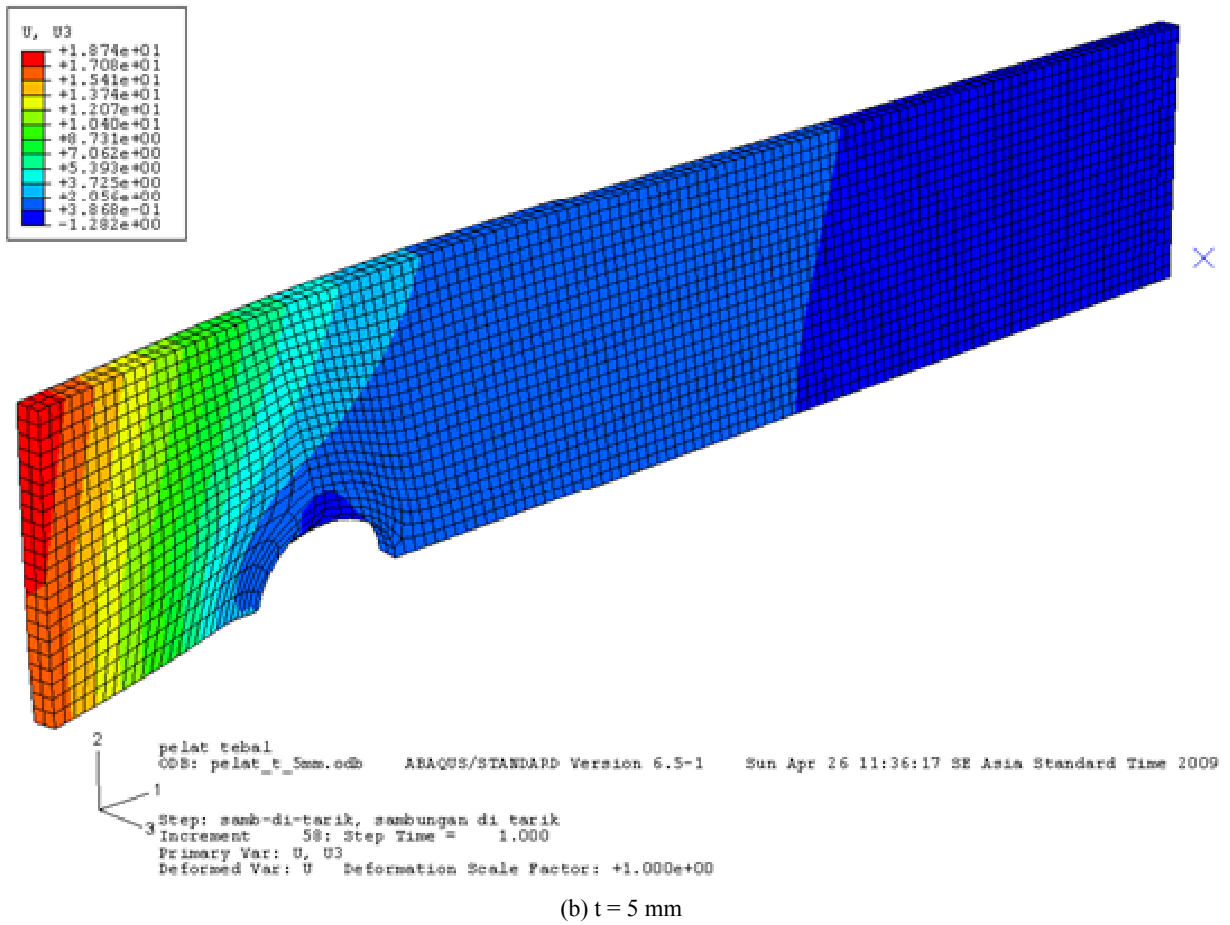
6.5 Hasil simulasi – curling dan tebal pelat

Hasil simulasi numerik untuk setiap ketebalan dibandingkan terhadap besarnya deformasi tegak lurus pelat (U_3) masing-masing pelat. Nilainya ditunjukkan dalam peta kontur pada pelat yang terdeformasi. Deformasi tegak lurus pelat itulah yang menimbulkan *curling*. Dari **Gambar 8**: pelat 1 mm (tipis) mengalami *curling* terbesar, pelat 5 mm (sedang) juga mengalami *curling* meskipun relatif kecil, sedangkan pelat 10 mm (tebal) sama sekali tidak memperlihatkan fenomena *curling*.

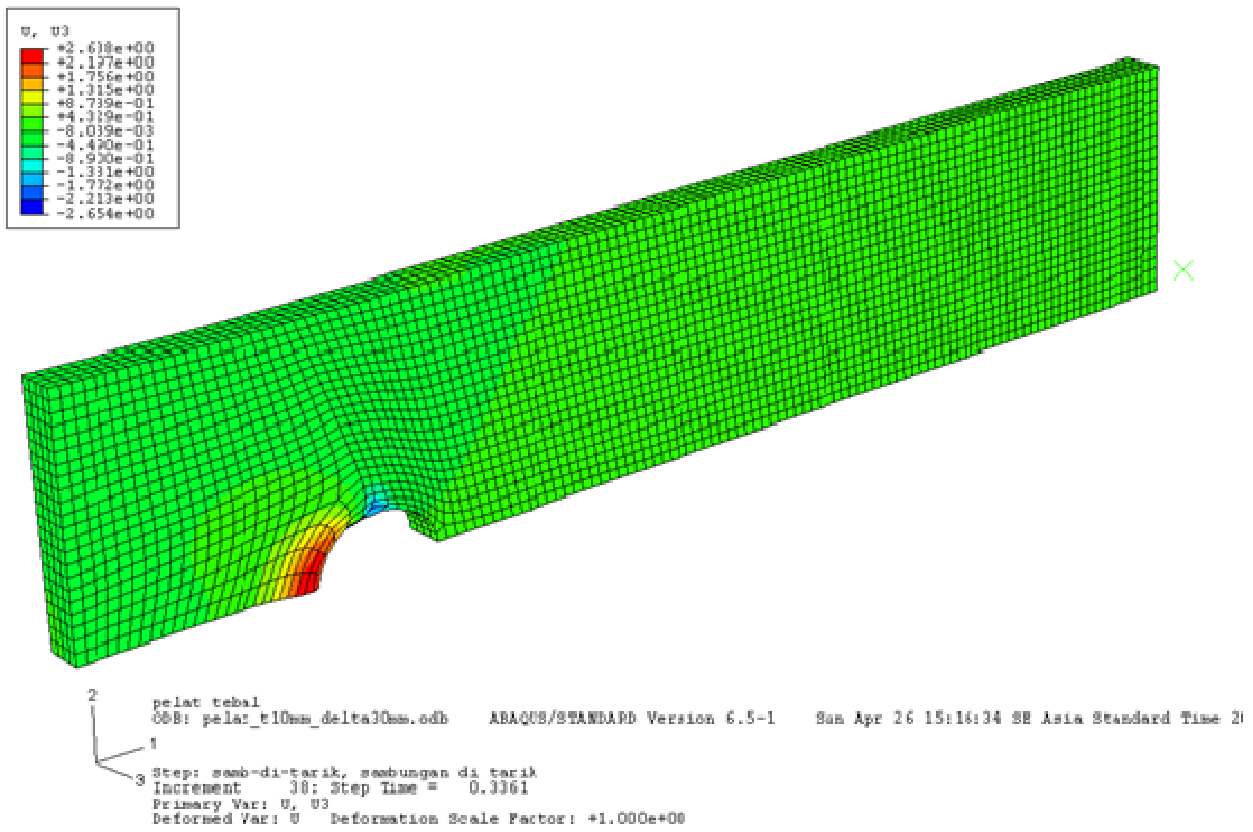
Perlu diperhatikan bahwa pada hasil simulasi di atas, meskipun ketebalannya berbeda tetapi semuanya memakai kontrol perpindahan yang sama, yaitu $\Delta_1=10$ mm, sehingga kondisi tegangan dan regangannya tidak sama. Untuk melihat kemungkinan adanya *curling* pada pelat tebal dilakukan simulasi tambahan dengan $\Delta_{1 \text{ maks}} = 30$ mm. Hasilnya untuk berbagai tahap disajikan pada **Gambar 9**. Ternyata tidak ada juga efek *curling* pada pelat tebal, yaitu dengan ditunjukkan dengan peta kontur U_3 yang sama pada setiap kondisi pembebanan (Δ_1).



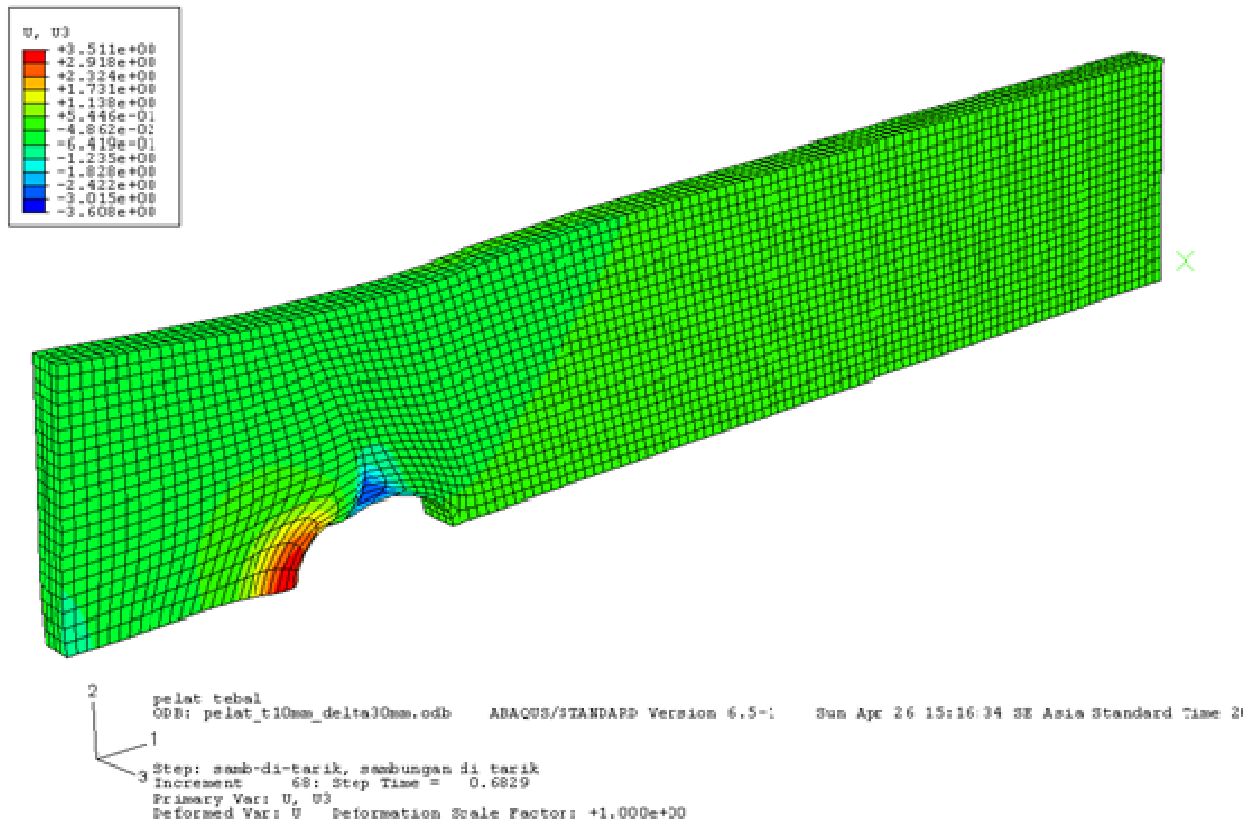
(a) $t = 1$ mm



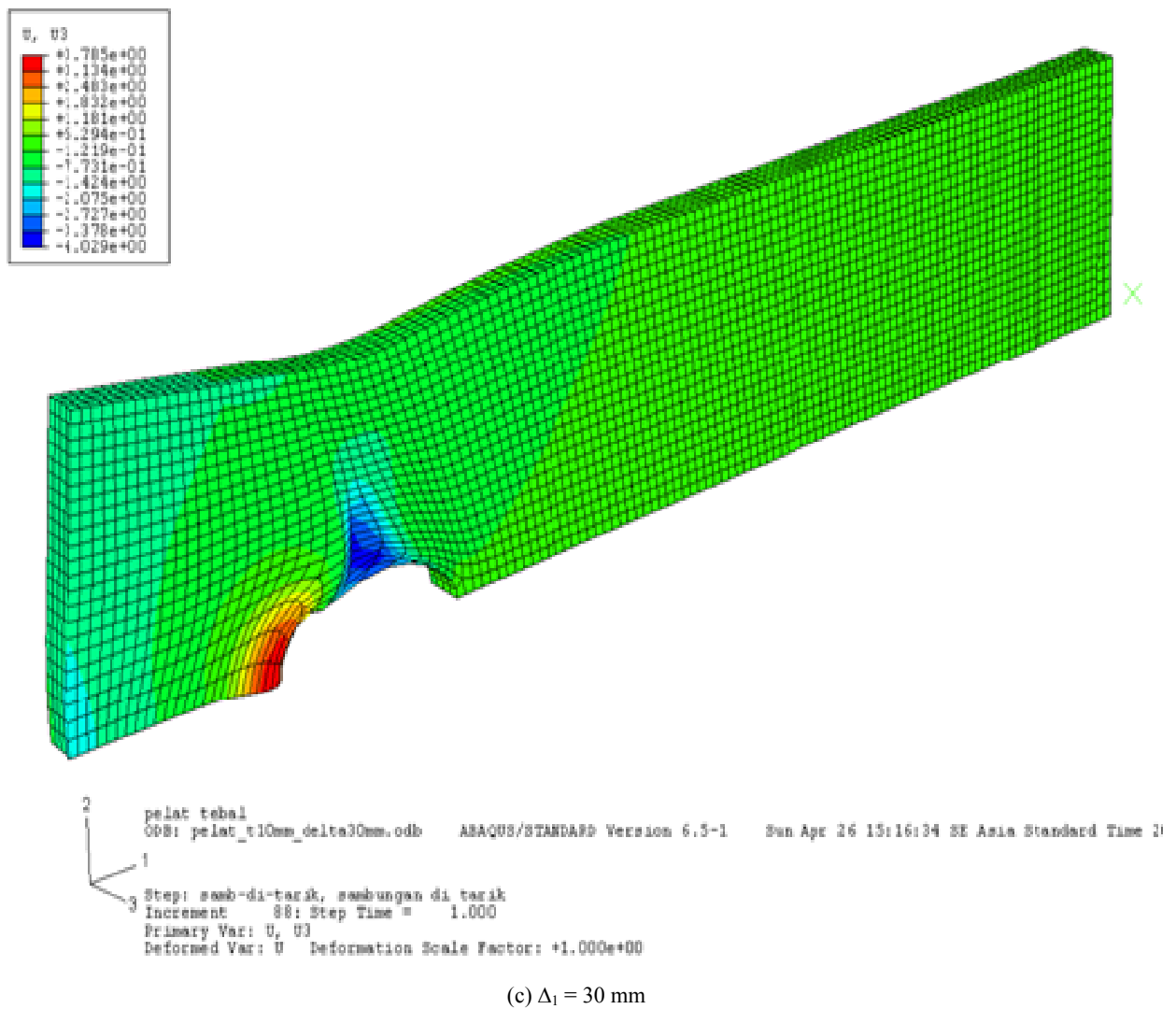
Gambar 8. Deformasi tegak lurus pelat (U_3) pada kontrol perpindahan yang sama (a, b, c)



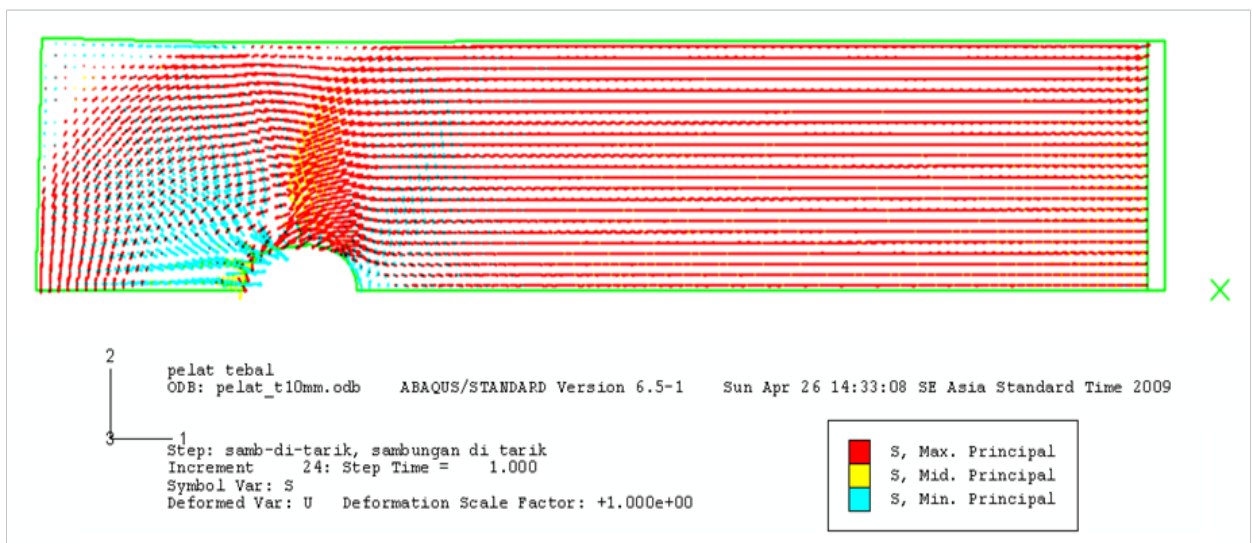
(a) $\Delta_1 = 10$ mm



(b) $\Delta_1 = 20$ mm



Gambar 9. Deformasi tegak lurus (U3) pelat tebal pada berbagai kontrol perpindahan (Δ_1) (a, b, c)



Gambar 10. Tensor tegangan utama pelat

7. Observasi Tegangan dan Gaya-gaya Internal Pelat ketika Curling

Simulasi numerik dikerjakan pada pelat tunggal tanpa mempertimbangkan adanya eksentrisitas, meskipun demikian pada pelat tipis (1 mm) dan pelat sedang (5 mm), fenomena *curling* tetap terjadi, sedangkan pada pelat yang relatif tebal (10 mm) tidak terlihat. Dengan demikian dapat diketahui bahwa *curling* disebabkan oleh mekanisme internal di dalam pelat itu sendiri, yaitu oleh aliran gaya-gaya internal pelat menuju tumpuannya.

Untuk meneliti mekanisme internal pelat khususnya di bagian yang mengalami *curling*, maka akan disajikan orientasi tegangan utama pelat (tebal) memanfaatkan opsi program ABAQUS, lihat **Gambar 10**.

Berdasarkan visualisasi tegangan utama (tarik dan tekan) pada pelat maka dapat dipetakan aliran gaya-gaya yang terjadi dari aksi (ujung pelat) menuju tumpuannya (baut) seperti terlihat pada **Gambar 11**.

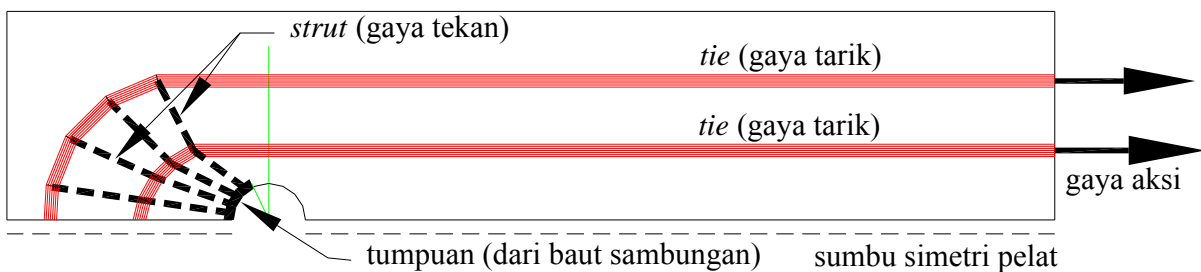
Berdasarkan model penyederhanaan aliran gaya-gaya internal pelat (**Gambar 11**) maka dapat diketahui bahwa pada daerah pelat yang mengalami *curling* terdapat aliran gaya-gaya tekan ke tumpuan (baut). Gaya tekan selalu terkait dengan tekuk (*buckling*), yaitu fenomena stabilitas akibat konfigurasi geometri yang relatif langsing. Mempelajari hasil simulasi numerik,

meskipun tidak ada eksentrisitas, tetapi ternyata pada pelat tipis (langsing) tetap ada *curling*, sedangkan pada pelat tebal tidak terjadi. Jika demikian adanya maka *curling* bukan diakibatkan oleh eksentrisitas pelat, tetapi adalah fenomena tekuk (*buckling*) akibat gaya internal tekan (*strut*) pada pelat.

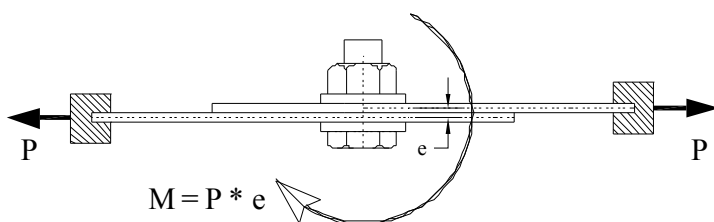
8. Pengaruh Eksentrisitas Pelat terhadap Distorsi Sambungan Lap

Sambungan dengan sistem lap (*lap-joint*) menempatkan pelat-pelat sambungan saling *overlapping*, sehingga sumbu-sumbu pelat menjadi tidak segaris. Kondisi tersebut menghasilkan eksentrisitas pada gaya-gaya yang akan dipindahkan (lihat **Gambar 12a**).

Adanya eksentrisitas pada sambungan lap, ditambah terjadinya slip saat mekanisme tumpu baut bekerja akan menyebabkan baut cenderung untuk berotasi. Jika kekakuan pelat tidak mencukupi maka pelat cenderung untuk melengkung. Pada sistem sambungan lap yang memakai pelat yang relatif langsing, kemungkinan besar mengalami *curling*, yang sebenarnya merupakan perilaku tekuk. Pada kondisi tersebut maka kekakuan pelat dapat menjadi tidak ada (akibat efek tekuk), sehingga resiko pelat melengkung sangat besar untuk dapat terjadi. Bila hal tersebut terjadi, orientasi baut juga akan berputar, tidak lagi tegak lurus pelat, sehingga sambungan akan



Gambar 11. Aliran gaya-gaya internal pada pelat sambungan



(a) eksentrisitas pada lap-joint



(b) distorsi baut

Gambar 12. Eksentrisitas gaya-gaya pada sambungan lap baut tunggal (Dewobroto, 2009)

mengalami distorsi sebagaimana terlihat pada **Gambar 12b**, yang mengakibatkan mekanisme tumpu sebagaimana yang diharapkan pada sambungan baut (lihat **Gambar 2**) tidak akan dapat bekerja dengan baik, yang ditunjukkan oleh kinerjanya di bawah rata-rata.

9. Pengaruh Jumlah Baut terhadap Distorsi Sambungan Lap

Baut yang mengalami distorsi (**Gambar 12b**) dapat terjadi pada sambungan lap dengan baut tunggal. Penggunaan jumlah baut > 1 (dua atau lebih) dengan konfigurasi sejajar dengan arah gaya (**Gambar 13b**), dapat menghasilkan mekanisme momen kopel reaksi yang mencegah distorsi. Momen kopel reaksi ($P' * e'$) lebih besar dari momen aksi akibat eksentrisitas lap-joint (**Gambar 12a**), sehingga tidak terjadi distorsi seperti pada **Gambar 13a**. Pada konfigurasi tersebut, meskipun digunakan dua buah baut, tetapi tidak dapat menghasilkan momen kopel reaksi.

10. Kesimpulan

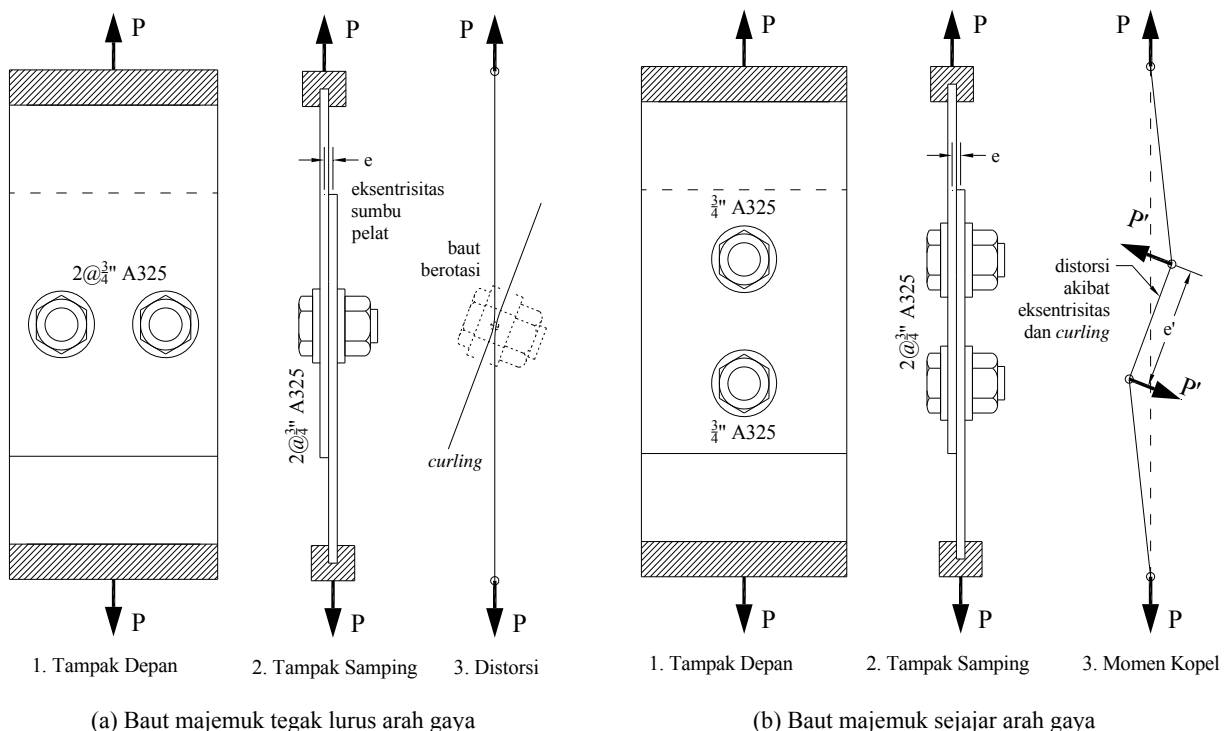
Curling terjadi sebagai akibat mekanisme gaya-gaya tekan internal pelat, yang tidak lain adalah *buckling* (tekuk), dan hanya terjadi pada pelat yang relatif tipis (lansing). Adanya *curling* pada sambungan lap yang secara natural mempunyai eksentrisitas (**Gambar 12a**), ditambah slip, menyebabkan sambungan lap dengan baut tunggal beresiko mengalami distorsi

(**Gambar 12b**) sehingga kinerjanya menjadi tidak optimum. Untuk menghindarinya, harus digunakan baut minimal dua, dengan konfigurasi sejajar arah gaya (**Gambar 13b**). Jadi pertimbangan praktis memakai minimal dua baut sudah benar, tetapi konfigurasi pemasangan baut tersebut terhadap arah gaya yang akan bekerja, perlu mendapat perhatian juga.

11. Ucapan Terimakasih

Data pada makalah ini adalah hasil penelitian Jurusan Teknik Sipil UPH, No: P-008A-FDTP/I/2008 dan No: P-009-FDTP/I/2008, dengan dana LPPM UPH, Lippo Karawaci. Adapun pelaksanaannya di Laboratorium Struktur Fakultas Teknik Jurusan Sipil, Unika Parahyangan, Bandung. Untuk itu diucapkan terima kasih kepada kedua institusi tersebut atas dukungannya sehingga fakta empiris ini dapat diungkapkan.

Penulis ingin mengucapkan terima kasih secara khusus kepada Dr. Ir. Paulus Kartawijaya, bapak Cucun, rekan sejawat di Unpar, serta Dip.Ing. Joe Kwan Hoei, Hendrik Wijaya, Anthony Natanael, Rendi, Jerry Atmaja, Firtz, dan Frederik Anggi, rekan-rekan di JTS-UPH. Berkat bantuannya maka pekerjaan berat menjadi terasa ringan. Semoga Tuhan membalaskan budi baik anda semua.



Gambar 13. Pengaruh jumlah baut dan penempatannya terhadap distorsi sambungan

Daftar Pustaka

- AISI, 2001a, *Testing of Bolted Cold-Formed Steel Connections in Bearing (With and Without Washers)*, Research Report RP01-4, Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, Revised Edition Copyright 2006 American Iron and Steel Institute
- AISI, 2001b, *Calibrations of Bolted Cold-Formed Steel Connections in Bearing (With and Without Washers)*, Research Report RP01-5, Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, Revised Edition Copyright 2006 American Iron and Steel Institute
- AISC, 2005, *ANSI/AISC 360-05: an American National Standard - Specification for Structural Steel Buildings*, Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, March 9.
- Cornell University, 1954, *Tests on Bolted Connections*, Unpublished Report to AISI.
- Dewobroto, W., 2009, *Pengaruh Bentuk dan Ukuran Washer (Ring) pada Perilaku Sambungan Baut Mutu Tinggi dengan Pretensioning di Baja Cold Rolled*, Bandung (*unpublished*): Disertasi pada Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan.
- Hibbit et al., 2004, *ABAQUS/Standard User's and Theory Manuals*, Ver. 6.5, HKS, Inc.
- Kim, T.S., Kuwamura, H., 2007, *Finite Element Modeling of Bolted Connections in Thin-Walled Stainless Steel Plates Under Static Shear*, Thin-Walled Structures 45.
- Komuro, M., Kishi, N., Chen, W.F., 2004. *Elasto-Plastic FE Analysis on Moment-Rotation Relations of Top-and Seat-Angle Connections*, Connections in Steel Structures V - Amsterdam-June 3-4.
- Kulak, G.L., Fisher, J.W., John H.A. Struik, 2001, *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*, Chicago: 2nd Edition", Published by: American Institute of Steel Construction, IL
- Rogers, C.A. dan Hancock, G.J., 2000, Failure Modes of Bolted-Sheet-Steel Connections Loaded in Shear, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 3, pp. 288-296.
- Rogers, C.A., Hancock, G.J., 1998, *Failure Modes of Bolted Sheet Steel Connections Loaded in Shear*, Sydney: Research Report R772, Department of Civil Engineering, The University of Sydney.
- Rogers, C.A., Hancock, G.J., 1998b, *Failure Modes of Bolted Sheet Steel Connections Loaded in Shear*, Australia: Research Report No. R772, CASE, Department of Civil Engineering, University of Sydney.
- Vinnakota, S., 2006, *Steel Structures: Behavior and LRFD*, McGraw-Hill International Edition.
- Wallace. J.A., Schuster, R.M., LaBoube, R.A., 2001, *Testing of Bolted Cold-Formed Steel Connections in Bearing (With and Without Washers)-Final Report*, Waterloo, Ontario, Canada: Canadian Cold Formed Steel Research Group, Department of Civil Engineering, University of Waterloo.