

STUDI PARAMETRIK DAN EKSPERIMENTAL: PENGARUH TATA LETAK BAUT PADA SAMBUNGAN MOMEN SEBIDANG UNTUK STRUKTUR BAJA COLD FORMED

Y. DJOKO SETIYARTO

Jurusan Teknik Sipil - Universitas Komputer Indonesia

Jl. Dipatiukur No. 112 - 116 Bandung

Email: trivi46@yahoo.com

Pengaruh bentuk profil pada baja *cold formed* menimbulkan adanya keterbatasan dalam mengatur tata letak baut. Meskipun dengan eksentrisitas besar terhadap titik pusat kelompok baut akan menimbulkan tahanan momen yang besar pula, namun pengaturan tata letak baut menjadi hal kecil yang bukan prioritas dalam perencanaan. Penelitian secara studi parametris dan eksperimental berikut memaparkan tentang pengujian spesimen *lip channel* 150 x 50 x 20 x 2.3 yang menahan momen sebidang, dengan pengaturan tata letak baut bereksentrisitas 30 mm secara diagonal, vertikal, dan horisontal. Jumlah baut berdiameter 16 mm yang digunakan bervariasi, yaitu 2, 3 dan 5 buah. Hasil penelitian dari studi parametris dan eksperimental menunjukkan hasil yang sama, yaitu penambahan jumlah baut akan meningkatkan kekuatan sambungan momen sebidang, tetapi dengan tetap mempertimbangkan tata letak baut. Tata letak baut yang diatur secara diagonal berpotensi memberikan kekuatan sambungan momen sebidang yang paling optimal. Selain itu diketahui pula bahwa baut yang diletakkan pada titik pusat sambungan cenderung tidak memberikan pengaruh terhadap peningkatan kekuatan.

KATA KUNCI: tata letak baut, momen sebidang, baja *cold formed*

PENDAHULUAN

Sambungan momen sebidang merupakan salah satu jenis sambungan yang paling banyak direncanakan dalam struktur baja. Momen sebidang timbul akibat adanya eksentrisitas antara gaya dengan titik pusat sambungan, dimana arah putaran momen yang ditimbulkan terletak pada bidang sambungan baut. Akibat momen sebidang, batang baut akan mengalami gaya geser, sedangkan tepi lubang pelat akan mengalami gaya tekan akibat adanya kontak tumpu dari batang baut.

Perencanaan sambungan baut baja *cold formed* berbeda dengan baja *hot rolled*. Karena baja *cold formed* merupakan baja ringan yang memiliki pelat berdingding tipis, maka perencanaan sambungan baut yang menahan momen sebidang lebih

banyak ditentukan oleh kuat tumpu dari pelat *cold formed*.

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk memperbesar tahanan momen sebidang adalah dengan memperbesar jarak baut (eksentrisitas) terhadap titik pusat sambungan. Namun upaya tersebut sering terbatas dengan luasan bidang sambungan, sebagai akibat bentuk profil penampang yang menghasilkan ukuran lebar tertentu. Keterbatasan luas bidang sambungan ini lebih banyak dijumpai pada profil-profil seperti *C-Section*, *Hat - Section* dan *Z - Section*. Akibat keterbatasan luas bidang sambungan tersebut maka perlu diupayakan cara efektif untuk menghasilkan kekuatan sambungan momen yang optimal. Salah satunya adalah

dengan meninjau tata letak baut yang efektif.

Penelitian berikut bertujuan untuk mempelajari tata letak baut yang terbaik; relasi gaya dan peralihan dari hasil uji eksperimental maupun studi parametris; mengetahui distribusi tegangan di sekitar lubang pelat *cold-formed*; bentuk dan mekanisme keruntuhan sambungan momen yang menggunakan kelompok baut.

EKSPERIMENTAL UJI TARIK

Kegiatan penelitian diawali dengan kegiatan eksperimental uji tarik pelat baja *cold formed* dengan tujuan untuk memperoleh properti material (hubungan tegangan regangan) dari baja *cold formed* berpenampang *lip channel* 125 x 50 x 20 x 2.3, yang akan digunakan dalam studi parametris. Bentuk dan ukuran spesimen uji tarik menyesuaikan dengan ketentuan yang ada pada ASTM A370 - 03a (*Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*) seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Bentuk Awal dan Kehancuran dari Spesimen Uji Tarik

Pengujian tarik menggunakan UTM (*Universal Testing Machine*) berkapasitas 50 ton yang dilengkapi dengan alat pengukur regangan yaitu *transducer*. Penempatan spesimen uji tarik dan pemasangan *transducer* pada UTM dapat dilihat pada Gambar 2. Hubungan tegangan-regangan yang diperoleh dari eksperimental ini dinamakan *Engineering Stress Strain*.



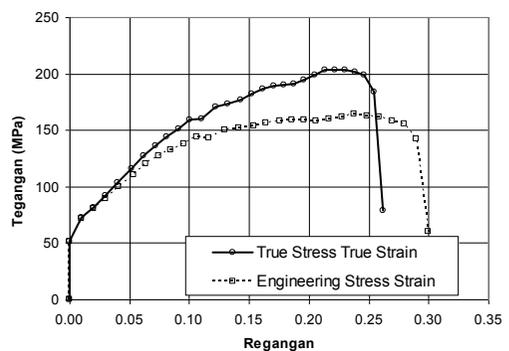
Gambar 2. Pemasangan Spesimen Uji Tarik dan Transducer Pada UTM

Adanya efek *Poisson* yang terjadi selama pengujian tarik berlangsung, menyebabkan data tegangan-regangan eksperimental ini perlu diolah lebih lanjut untuk menghasilkan data tegangan regangan sebenarnya (*True Stress True Strain*). Sehingga diperlukan korelasi (Ling 2006) sebagai berikut:

$$\sigma_{True} = \sigma_{Eng} (1 + \epsilon_{Eng}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{True} = \ln(1 + \epsilon_{Eng}) \quad (2)$$

Kurva yang menyatakan hubungan tegangan regangan dari hasil pengujian tarik *cold formed* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Properti Material Lip Channel 125 x 50 x 20 x 2.3

PEMODELAN DAN HASIL PARAMETRIC STUDY

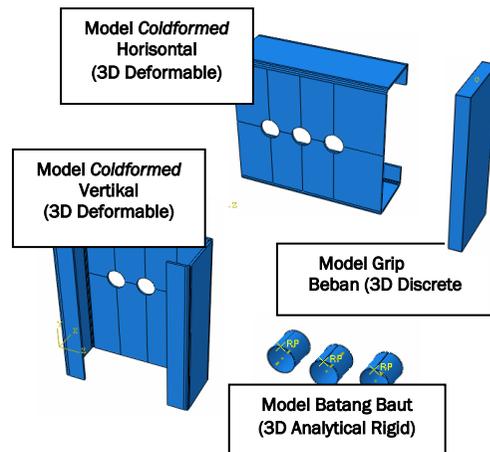
Kegiatan studi parametris dilakukan sebelum kegiatan eksperimental pengujian sambungan momen dimulai dengan maksud untuk memprediksi perilaku dari spesimen yang akan diuji dalam eksperimental. Selain itu, dengan adanya kegiatan studi parametris ini, maka kegiatan-kegiatan penelitian yang sukar atau tidak dapat dilakukan dalam eksperimental, akan menjadi relatif mudah bila dilakukan dalam studi parametris ini.

Selain properti material seperti Gambar 3, beberapa parameter-parameter lain yang digunakan dalam studi parametris ini adalah Modulus Elastisitas $E = 200.000$ MPa dan angka perbandingan Poisson $\nu = 0.3$. Studi parametris ini menggunakan software berbasis *Finite Element Analysis* yaitu ABAQUS 6.8.1. Spesimen dimodelkan secara 3D dengan menggunakan elemen C3D8R.

Pemodelan Numerik Spesimen Sambungan Baut

Pemodelan dalam ABAQUS dikenal dengan istilah PART. Pada simulasi uji sambungan momen untuk spesimen yang menggunakan sambungan baut ini, model disusun atas bagian-bagian (PART) sebagai berikut:

1. *Cold Formed C 125 x 50 x 20 x 2.3* bagian yang vertikal, menggunakan jenis *3D Deformable*
 2. *Cold Formed C 125 x 50 x 20 x 2.3* bagian yang horisontal, menggunakan jenis *3D Deformable*
 3. Beberapa buah baut berdiameter 16 mm, menggunakan jenis *3D Analytical Rigid*.
 4. Sebuah grip beban untuk kontrol *load*, menggunakan jenis *3D Discrete Rigid*
- Bagian - bagian yang telah dimodelkan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Pemodelan PART dalam Studi Parametris

Pelat *coldformed* menggunakan jenis *3D Deformable* karena deformasi pada pelat *cold formed* akibat momen yang diberikan akan dipelajari. Baut dipilih menggunakan jenis *3D Analytical Rigid* karena batang baut saat kontak tumpu terjadi dianggap sangat kaku (asumsi baut tidak runtuh, seperti dalam perhitungan *pre analysis*). Sedangkan grip beban dipilih menggunakan jenis *3D Discrete Rigid* adalah untuk memudahkan interaksi dengan pelat *Cold Formed* yang menggunakan jenis *3D Deformable* ketika beban diaplikasi. Dalam hal ini grip beban tidak akan berdeformasi, dan fungsinya sebagai kontrol *displacement*.

Model alat sambung baut tidak disimulasikan secara utuh (hanya berupa batang baut) karena fungsi baut hanya menerima beban kontak tumpu dari penampang pelat *coldformed*. Sedangkan pengaruh pengencangan baut terhadap pelat, dilakukan dengan cara pemberian gaya *pressure* yang kecil dan *restraint* di sekitar lubang baut, sedemikian hingga pelat *coldformed* hanya mengalami perpindahan tegak lurus dengan batang

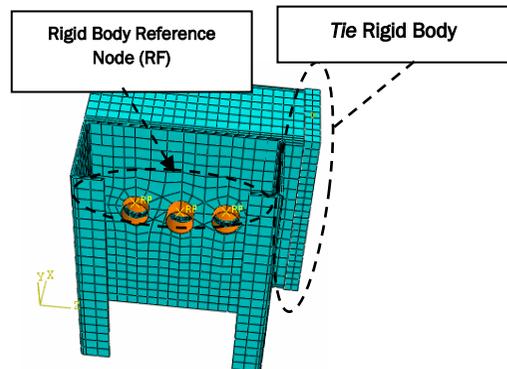
baut.

Demikian pula model grip bantu juga tidak dimodelkan, dengan tujuan agar simulasi menjadi lebih sederhana. Grip bantu hanya dimodelkan sebagai tumpuan jepit pada pelat *coldformed channel* vertikal karena sesuai kondisi realnya bahwa spesimen tersebut dijepit pada kedua ujung pelat *coldformed channel* vertikal.

Seluruh bagian-bagian *PART* tersebut disusun menjadi satu kesatuan sebagai spesimen sambungan baut yang menahan momen dengan proses *ASSEMBLY* menjadi model yang siap dilakukan simulasi numerik seperti pada Gambar 5. Agar menjadi satu kesatuan dan tidak saling terpisah-pisahkan lagi, maka interaksi antara part satu dengan yang lain harus terdefinisi dalam proses *INTERACTION*. Interaksi-interaksi kontak yang harus terdefinisi yaitu:

- a. **Kontak 1**, yaitu kontak antara pelat *cold formed* vertikal dengan *cold formed* horisontal. Gesekan yang terjadi diantara kedua pelat diperhitungkan sebagai kontak tangensial dengan koefisien gesek sebesar 0.18 (Kulak et al 2001).
- b. **Kontak 2**, yaitu kontak antara batang baut dengan pelat *cold formed* yang terdiri atas 3 jenis interaksi lagi yaitu kontak 3 buah batang baut berdiameter 16 mm dengan pelat *coldformed*. Gesekan yang terjadi di antara permukaan batang baut dengan penampang kedua pelat *coldformed* diperhitungkan sebagai kontak tangensial tanpa adanya gesekan (koefisien gesek = 0)
- c. **Kontak 3**, yaitu kontak antara grip beban dengan *cold formed* horisontal. Kedua *part* yang menggunakan elemen berbeda tersebut disatukan dengan opsi *tie* yang tersedia pada menu ABAQUS. Karena dengan opsi tersebut dapat menggabungkan elemen pelat *coldformed* yang dapat berdeformasi dapat digabungkan dengan elemen grip beban yang tidak dapat berdeformasi. Sebagai permukaan *master* adalah grip

beban dan sebagai permukaan *slave* adalah pelat *coldformed* horisontal.



Gambar 5. Proses ASSEMBLY dan MESHING pada ABAQUS untuk Model Spesimen Sambungan Baut dalam Studi Parametris

Untuk mencegah terjadinya *rigid body motion* pada model spesimen yang berakibat program tidak akan berjalan, maka kondisi-kondisi batas (*boundary condition*) yang diambil adalah sebagai berikut:

- a. Ujung bawah *channel coldformed* vertikal diberi *constraint* jepit. Karena elemen pelat *coldformed* menggunakan elemen solid 3D (C3D8R), maka DOF yang ada hanya 3 buah (DOF translasi) sehingga bagian yang terkekang adalah U1, U2, dan U3.
- b. Pemberian *rigid body reference node* (RF) pada model baut yang menggunakan elemen *analytical rigid* (benda tegar). Karena pergerakan benda tegar secara keseluruhan hanya ditentukan gerakan satu titik nodal yaitu RF, yang mempunyai kebebasan bergerak arah translasi dan rotasi, maka titik tersebut harus didefinisikan secara spesifik untuk setiap batang baut. Pada titik RF tersebut diatur *constraint*-nya dengan cara 6 buah DOF pada tahap awal dalam kondisi terkekang,

kemudian saat tahap kontak dan beban diaplikasikan dof U1, U2, R3 saja yang bebas bergerak.

- c. Pemberian *rigid body reference node* (RF) pada elemen grip beban sebagai benda tegar yang menggunakan elemen rigid diskrit (*3D Discrete Rigid*). Melalui titik nodal RF ini, pada tahap awal, seluruh 6 dof dikekang, kemudian pada tahap kontak dan pembebanan, hanya dof U1, U2, dan R3 yang bebas bergerak.

Penyelesaian problem kontak dengan ABAQUS memerlukan tahapan (STEP) untuk memudahkan analisis dan *software* dapat menganalisis dengan baik. Setiap STEP harus berurutan sesuai logika kenyataan, dan STEP sebelumnya akan mempengaruhi STEP berikutnya (propagated). Untuk model numerik Spesimen Sambungan Baut yang digunakan dalam penelitian ini, jumlah STEP yang ditetapkan adalah sebanyak 4 buah, yaitu:

- a. **Step Initial.** Pada tahap ini, seluruh *part* yang telah di-*assembly* untuk menjadi satu kesatuan model perlu didefinisikan jenis interaksi kontak dan kondisi batas (boundary condition) yang diperlukan. Pada tahap ini belum ada beban atau peralihan yang diberikan.
- b. **Step 1 – CF ke CF.** Pada tahap ini diasumsikan telah terjadi kontak antara pelat *coldformed* (CF) horisontal dengan pelat *coldformed* vertikal. Agar pelat CF dianggap saling kontak maka perlu diberikan gaya pemicu yang sangat kecil, dalam hal ini pemberian *pressure* sebesar 0.001 N yang saling berlawanan. Gaya ini juga merupakan model dari pengencangan baut yang tidak divisualisasikan bentuk bautnya.
- c. **Step 2 – kontak pin.** Pada tahap ini diasumsikan telah terjadi kontak antara penampang pelat *coldformed* dengan batang baut berdiameter 5 mm dan berdiameter 18 mm. Gesekan yang timbul antara batang baut dan

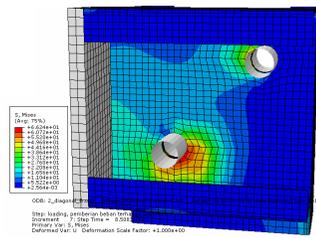
penampang *coldformed* diatur tidak ada. Kemudian agar dapat dipelajari perilaku tumpu kontak *coldformed* selama kontak pin terjadi, maka pada tahap ini pergerakan baut dalam arah U1, U2 dan R3 dibebaskan.

- d. **Step 3 – grip beban.** Pada tahap ini pelat *coldformed* horisontal sudah diberikan gaya angkat ke atas pada ujungnya melalui kontrol *displacement* pada titik nodal RF dari elemen grip beban. Besarnya *displacement* yang dapat diberikan dilakukan secara *trial and error*.

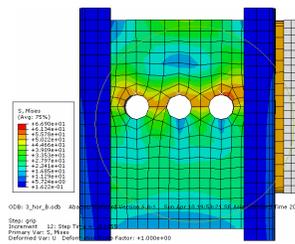
Penentuan kesuksesan dari simulasi numerik atau studi parametris ini juga bergantung pada penentuan kepadatan *meshing* yang digunakan sebagai model. Semakin rapat (ukuran kecil) mesh yang digunakan maka semakin teliti hasil yang diperoleh dalam simulasi numerik. Namun semakin mahal (lama) waktu yang diperlukan untuk proses penyelesaian iterasinya. Dalam penelitian ini, penggunaan *mesh* yang berukuran 5 – 8 mm sudah dapat memberikan penyelesaian iterasi numerik secara konvergen.

Hasil Studi Parametris Sambungan Momen dengan 2 Baut Diagonal

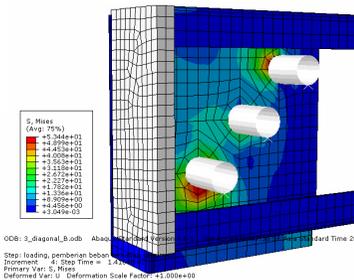
Hasil studi parametris yang memperlihatkan distribusi tegangan efektif *Von Misses* dapat dilihat pada Gambar 6 s/d 11. Pada gambar tersebut memperlihatkan kondisi kehancuran yang dialami seluruh spesimen adalah sama, yaitu kehancuran diprediksi akan terletak pada tepi lubang baut yang berada dekat dengan grip beban. Sedangkan pada zona selain tepi lubang baut, tidak dijumpai adanya tegangan efektif yang relatif besar.



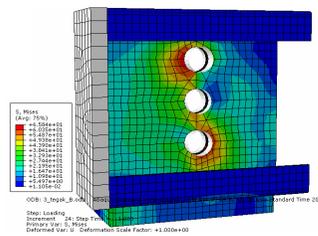
Gambar 6. Distribusi Tegangan Von Mises untuk Sambungan Momen yang Menggunakan 2 Baut Diagonal



Gambar 9. Distribusi Tegangan Von Mises untuk Sambungan Momen yang Menggunakan 3 Baut Horizontal

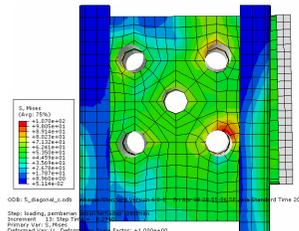


Gambar 7. Distribusi Tegangan Von Mises untuk Sambungan Momen yang Menggunakan 3 Baut Diagonal

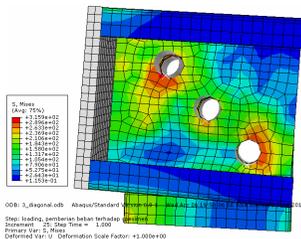


Gambar 10. Distribusi Tegangan Von Mises untuk Sambungan Momen yang Menggunakan 3 Baut Vertikal

Untuk mengetahui pengaruh tata letak baut pada sambungan 3 baut diagonal, maka juga telah disimulasikan model yang memiliki baut berjumlah sama dan dipasang diagonal dalam arah lainnya. Hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 8, dan model tersebut tidak akan dilakukan dalam eksperimental.



Gambar 11. Distribusi Tegangan Von Mises untuk Sambungan Momen yang Menggunakan 5 Baut



Gambar 8. Distribusi Tegangan Von Mises untuk Sambungan Momen yang Menggunakan 3 Baut Diagonal dalam Arah Diagonal lainnya

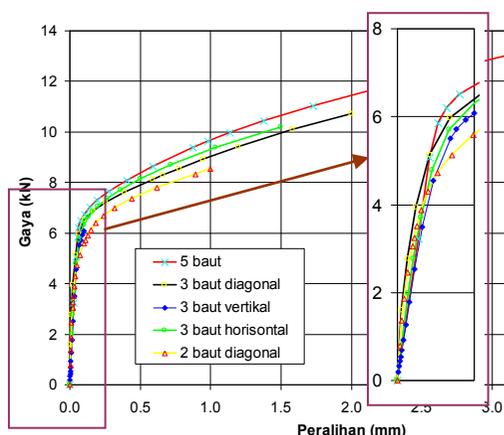
Kesamaan hasil simulasi tersebut juga menyatakan lokasi kelelahan yang berada pada tepi lubang baut yang berada dekat dengan grip beban. Seluruh kegiatan studi parametris menghasilkan prediksi kekuatan ultimit seperti pada Tabel 1 dan menghasilkan bentuk hubungan tegangan regangan seperti pada Gambar 12.

Berdasarkan pada Tabel 1 dan Gambar tersebut dapat dipelajari beberapa hal

penting sebagai berikut:

- a. Hasil studi parametris tentang sambungan momen menunjukkan bahwa penambahan sebuah baut dari semula yang hanya memiliki 2 baut dengan tata letak diagonal, menghasilkan perbedaan kekuatan sebesar 25.53%.
- b. Penambahan jumlah baut pada sambungan momen sebaiknya perlu memperhatikan tata letak baut. Pada Tabel 1 terlihat signifikansi yang berbeda-beda akibat pola pengaturan tata letak baut. Bahkan akibat pengaturan tata letak baut secara vertikal (spesimen 3 baut vertikal) justru memperlemah kekuatan sambungan, terlihat terjadi penurunan kekuatan sebesar 28.69%.
- c. Semakin menambah banyak jumlah baut belum tentu akan menghasilkan kekuatan sambungan secara signifikan. Terlihat penambahan dari 3 baut menjadi 5 baut hanya memberikan penambahan kekuatan sebesar 28.08%.
- d. Nilai kekuatan sambungan yang paling besar hingga ke paling kecil diprediksi akan dihasilkan dengan urutan spesimen sebagai berikut; 5 baut, 3 baut diagonal, 3 baut horisontal, 3 baut vertikal, dan 2 baut diagonal.

- e. Sambungan baut dengan tata letak diagonal memberikan kinerja paling baik, sedangkan sambungan dengan tata letak vertikal (tegak lurus arah gaya) memberikan kinerja paling buruk. Hal ini terlihat pada Gambar 12 tentang hubungan tegangan regangan yang dihasilkan
- f. Bentuk keruntuhan yang dialami oleh spesimen adalah terjadinya kelelahan pada tepi lubang pelat. Namun tidak semua tepi lubang pelat mengalami kelelahan, melainkan pada lubang pelat yang berdekatan dengan beban.



Tabel 1 Prediksi Kekuatan Ultimit Hasil dari FEA

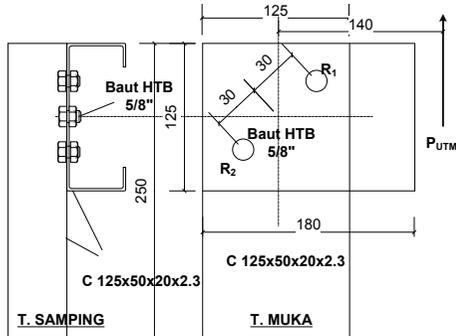
Spesimen	Kekuatan Ultimit (kN)	Perbedaan 1 (%)	Perbedaan 2 (%)
2 baut diagonal	8.54	0.00	
3 baut diagonal	10.72	25.53	0.00
3 baut horisontal	10.16	18.97	-5.22
3 baut vertikal	6.09	-28.69	-43.19
5 baut	13.73	60.77	28.08

Gambar 12. Perbandingan Gaya & Peralihan Untuk Model-model Tata Letak Sambungan Baut Yang Menahan Momen

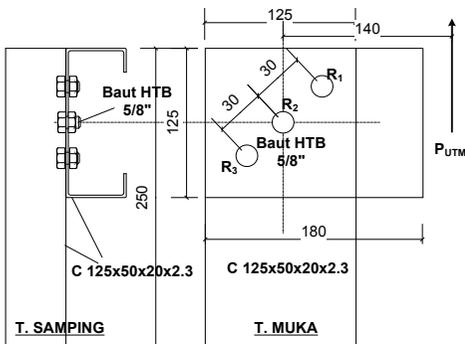
HASIL EKSPERIMENTAL Geometri Spesimen

Setelah diperoleh informasi penting tentang hasil prediksi FEA untuk spesimen yang akan diuji dalam laboratorium, maka kegiatan penelitian selanjutnya adalah memperoleh data empiris dari pengujian eksperimental. Spesimen yang akan diuji memiliki geometri yang sama dengan model numerik. Detail geometri spesimen dapat dilihat pada Gambar 13 s/d 17. Sedangkan *test setup* pada UTM adalah seperti Gambar 18. Beban UTM diberikan pada ujung

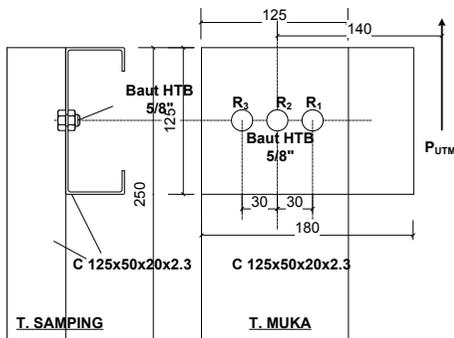
channel horizontal sehingga memiliki eksentrisitas terhadap titik pusat kelompok baut sebesar 140 mm.



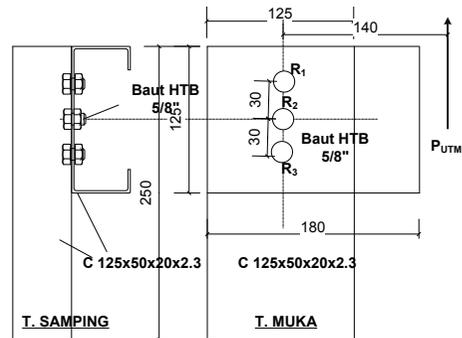
Gambar 13. Spesimen Sambungan Momen dengan 2 Baut Diagonal



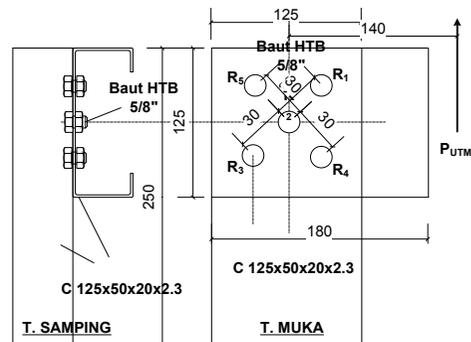
Gambar 14. Spesimen Sambungan Momen dengan 3 Baut Diagonal



Gambar 15. Spesimen Sambungan Momen dengan 3 Baut Horizontal



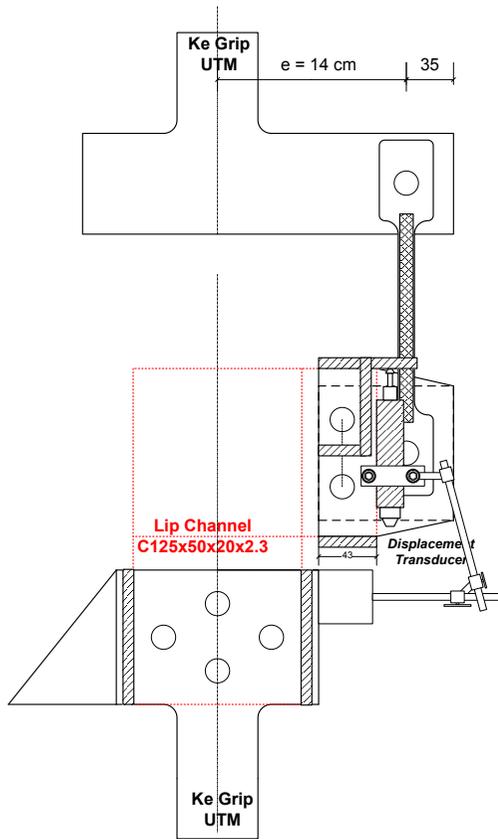
Gambar 16. Spesimen Sambungan Momen dengan 3 Baut Vertikal



Gambar 17. Spesimen Sambungan Momen dengan 5 Baut

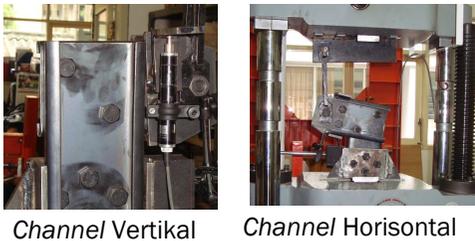
Kegiatan pengujian momen untuk kelima model spesimen dapat dilihat pada Gambar 19 s/d 23. Selama pengujian spesimen sambungan momen berlangsung, terdapat beberapa catatan pengamatan yang cukup penting, yaitu:

1. Tidak dijumpai kehancuran pada batang baut, artinya baut kuat.
2. Pemberian beban oleh UTM berhenti ketika peralihan mencapai sekitar 20 mm. Saat berhenti tersebut, salah satu tepi lubang sudah terjadi *elongation* yang cukup signifikan.
3. Tidak dijumpai kerusakan atau deformasi pada batang horisontal maupun vertikal, demikian pula di sekitar lokasi yang berhubungan dengan grip.



Gambar 18. Set Up Eksperimen

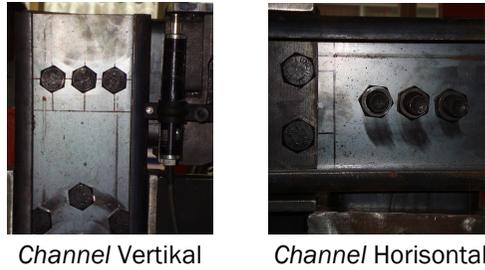
- Selama pengujian berlangsung, bentuk kehancuran yang dijumpai hanyalah di sekitar sambungan, yaitu terjadinya *elongation* pada tepi lubang baut.



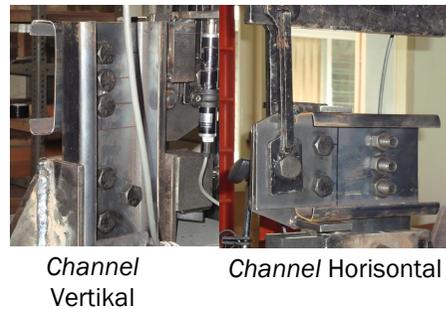
Gambar 19. Pengujian Sambungan 2 Baut Diagonal dengan Beban Eksentris



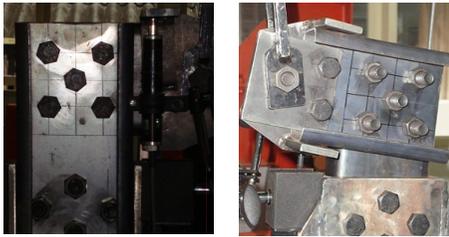
Gambar 20. Pengujian Sambungan 3 Baut Diagonal dengan Beban Eksentris



Gambar 21. Pengujian Sambungan 3 Baut Horizontal dengan Beban Eksentris



Gambar 22. Pengujian Sambungan 3 Baut Vertikal dengan Beban Eksentris

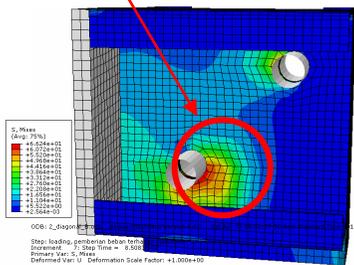


Channel Vertikal Channel Horisontal

Gambar 23. Pengujian Sambungan 5 Baut dengan Beban Eksentris

Hasil Eksperimental dan Bentuk Kehancuran

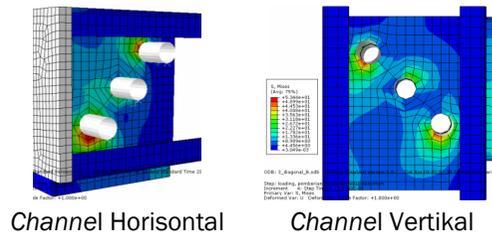
Bentuk kehancuran yang dialami spesimen umumnya terjadinya *elongation* (kehancuran tumpu) di sekitar lubang baut seperti Gambar 24 s/d 28. Hasil ini sesuai dengan prediksi studi parametris bahwa *elongation* terbesar terjadi pada lubang baut tepi dekat dengan arah gaya diberikan.



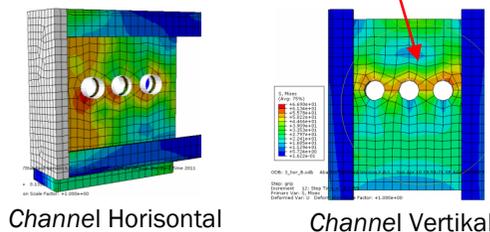
Gambar 24 Bentuk Kehancuran dari Pengujian Sambungan 2 Baut Diagonal

Apabila mempelajari hasil eksperimental untuk masing-masing bentuk

kehancuran pada *channel* vertikal dan *channel* horisontal, maka terlihat bahwa *elongation* yang terjadi pada tepi lubang baut adalah saling bertolak belakang.



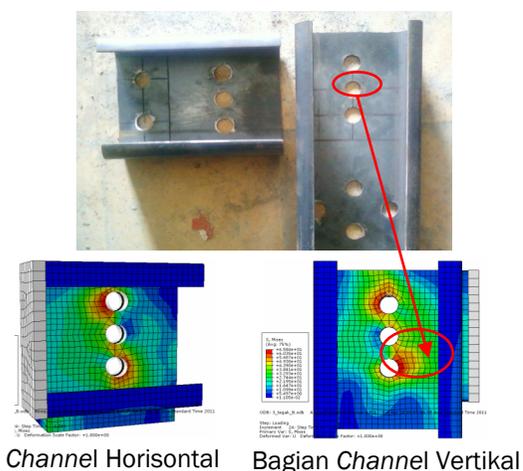
Gambar 25. Bentuk Kehancuran dari Pengujian Sambungan 3 Baut Diagonal



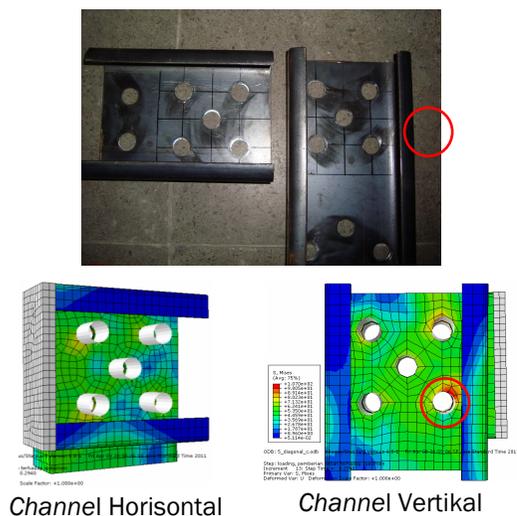
Gambar 26. Bentuk Kehancuran dari Pengujian Sambungan 3 Baut Horisontal

Rangkuman Kegiatan Eksperimental

Seluruh kegiatan eksperimental secara umum memberikan hasil pengujian yang tidak jauh berbeda dengan hasil yang diberikan oleh studi parametris. Rangkuman hasil pengujian beserta perbedaan dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 27. Bentuk Kehancuran dari Pengujian Sambungan 3 Baut Vertikal



Gambar 28. Bentuk Kehancuran dari Pengujian Sambungan 5 Baut

Sedangkan perbandingan bentuk hubungan tegangan regangan yang dihasilkan oleh UTM dan *transducer* dapat dilihat pada Gambar 29. Berdasarkan kegiatan eksperimental dapat diambil fakta-fakta empiris sebagai berikut:

- Seperti yang telah diprediksi dalam studi parametris, dengan jumlah baut yang sama 3 buah, baut dengan tata letak diagonal memberikan pengaruh paling besar berupa kekuatan sambungan. Pengaturan baut dengan tata letak vertikal (tegak lurus dengan arah beban) akan menghasilkan kekuatan sambungan yang relatif rendah.
- Urutan nilai kekuatan sambungan yang paling besar hingga ke paling kecil seperti yang diprediksi oleh studi parametris, yaitu dengan urutan spesimen sebagai berikut; 5 baut, 3 baut diagonal, 3 baut horizontal, 3 baut vertikal, dan 2 baut diagonal.
- Penambahan jumlah baut akan menghasilkan penambahan kekuatan sambungan, namun pengaruh tata letak baut akan turut menentukan kekuatan sambungan tersebut. Pada Tabel 3 terlihat signifikansi yang berbeda-beda akibat pola pengaturan tata letak baut.
- Sambungan 3 baut dengan tata letak horizontal memberikan kinerja daktilitas dan kekakuan yang paling baik untuk tahap awal pembebanan. Namun untuk tahap selanjutnya, sambungan 3 baut diagonal tetap memperlihatkan kinerja yang paling baik. Hal ini terlihat pada Gambar 29 tentang hubungan tegangan regangan yang dihasilkan untuk seluruh spesimen.
- Bentuk keruntuhan yang dialami seluruh spesimen adalah sama, yaitu terjadinya kelelahan pada tepi lubang pelat terutama pada lubang pelat yang berdekatan dengan beban.
- Lubang baut yang terletak di titik pusat kelompok sambungan tidak mengalami perubahan deformasi. Berdasarkan studi parametris maupun eksperimental, untuk seluruh spesimen tidak ditemukan adanya bagian tepi lubang baut (baut

Tabel 2 Rangkuman Perbedaan Kekuatan Ultimit Hasil Eksperimen dan FEA

Spesimen	Eksperimental	Parametris	Beda %
2 Baut Diagonal	8.86 kN	8.54 kN	3.72
3 Baut Diagonal	10.47 kN	10.72 kN	-2.39
3 Baut Horisontal	8.66 kN	10.16 kN	-17.32
3 Baut Vertikal	5.66 kN	6.09 kN	-7.6
5 baut	13.55 kN	13.73 kN	-13.73

Tabel 3 Perbedaan Peningkatan Kekuatan Ultimit Hasil Eksperimen

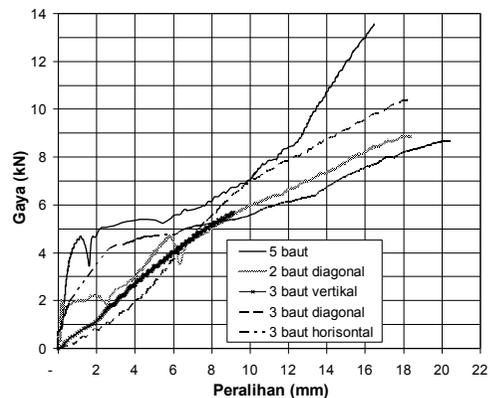
Spesimen	Kekuatan (kN)	Perbedaan 1 (%)	Perbedaan 2 (%)
2 Baut Diagonal	8.86	0.00	
3 Baut Diagonal	10.47	18.17	0.00
3 Baut Horisontal	8.66	-2.26	-17.29
3 Baut Vertikal	5.66	-36.12	-45.94
5 Baut	13.55	52.93	29.42

Keterangan:

Perbedaan 1 = Perbedaan terhadap 2 baut diagonal

Perbedaan 2 = Perbedaan terhadap 3 baut diagonal

yang diletakkan pada titik pusat kelompok sambungan) yang mengalami kelelahan. Demikian pula berdasarkan kegiatan eksperimen dan studi parametris 1 & 2, ternyata penambahan kekuatan yang disumbang oleh penambahan 1 baut di titik pusat kelompok sambungan tersebut tidaklah signifikan. Dalam hal ini dapat dikatakan, baut yang terletak pada titik pusat kelompok baut tidak efektif dalam memberikan sumbangan kekuatan.



Gambar 29. Hubungan Gaya & Peralihan Sambungan Kelompok Baut yang Menahan Momen Sebidang

KESIMPULAN & SARAN

Seluruh rangkaian kegiatan penelitian untuk pengaruh tata letak baut terhadap kinerja sambungan baja *cold formed* yang menahan momen sebidang menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

- a. Penambahan jumlah baut akan menghasilkan penambahan kekuatan sambungan, namun pengaruh tata letak baut akan turut menentukan kekuatan sambungan tersebut. Pada Tabel 3 terlihat signifikansi yang berbeda-beda akibat pola pengaturan tata letak baut. Menambah jumlah baut dari 3 buah menjadi 5 buah dipandang kurang efektif, karena hanya memberikan peningkatan kekuatan sebesar 29.42% (di bawah 50%).
- b. Untuk sambungan baut dengan jumlah yang sama (3 buah), tata letak diagonal memberikan kinerja kekuatan paling baik, sedangkan sambungan dengan tata letak vertikal (tegak lurus arah gaya) memberikan kinerja kekuatan paling buruk. Sambungan 3 baut dengan tata letak horisontal memberikan kinerja daktilitas dan kekakuan yang paling baik untuk tahap awal pembebanan. Namun untuk tahap selanjutnya, sambungan 3 baut diagonal tetap memperlihatkan kinerja yang paling baik.
- c. Nilai kekuatan sambungan yang dihasilkan dari percobaan eksperimental mirip dengan prediksi studi parametris. Beberapa fakta yang menunjukkan kemiripan hasil:
 - Perbedaan nilai kekuatan yang dihasilkan relatif kecil (kurang dari 20%), hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.
 - Urutan nilai kekuatan sambungan dari yang paling besar hingga ke yang paling kecil. Urutan nilai kekuatan dari besar ke kecil yaitu; sambungan dengan 5 baut; sambungan dengan 3 baut diagonal; sambungan dengan 3 baut horisontal; sambungan dengan

3 baut vertikal; dan sambungan dengan 2 baut diagonal.

- Bentuk dan lokasi kehancuran dari hasil eksperimen serupa dengan hasil studi parametris, yaitu lokasi dimana tegangan efektif melebihi tegangan leleh. Seluruh spesimen mengalami terjadinya kelelahan pada tepi lubang pelat terutama pada lubang pelat yang berdekatan dengan beban.
- d. Lubang baut yang terletak di titik pusat kelompok sambungan tidak mengalami perubahan deformasi. Berdasarkan studi parametris maupun eksperimental, untuk seluruh spesimen tidak ditemukan adanya bagian tepi lubang baut (baut yang diletakkan pada titik pusat kelompok sambungan) yang mengalami kelelahan. Demikian pula berdasarkan kegiatan eksperimen dan studi parametris 1 dan 2, ternyata penambahan kekuatan yang disumbang oleh penambahan 1 baut di titik pusat kelompok sambungan tersebut tidaklah signifikan. Dalam hal ini dapat dikatakan, bahwa baut yang terletak pada titik pusat kelompok baut tidak efektif dalam memberikan sumbangan kekuatan.

Beberapa saran yang dapat diambil sehubungan dengan hasil kesimpulan yang diperoleh:

1. Untuk meningkatkan kekuatan sambungan momen pada struktur baja *cold formed*, sebaiknya pengaturan tata letak baut secara diagonal lebih dipertimbangkan, karena penambahan jumlah baut belum tentu menghasilkan penambahan kekuatan sambungan bila tidak memperhatikan tata letak baut.
2. Semakin banyak jumlah baut belum tentu efektif dalam meningkatkan kekuatan sambungan, mengingat bahwa kekuatan sambungan momen pada struktur baja *cold formed* lebih banyak ditentukan dari kekuatan tumpu pelat *cold formed* itu sendiri. Sehingga apabila ingin diperoleh peningkatan kekuatan sambungan secara signifikan, maka

dengan memperluas bidang kontak tumpu antara batang baut dengan penampang tepi lubang pelat (misal dengan menambah pelat tambahan) dipandang lebih efektif.

3. Mengingat pula bahwa keruntuhan banyak terjadi pada lubang baut yang berdekatan dengan lokasi beban, maka memperkuat bagian pelat di tepi lubang baut (misal dengan memperbesar diameter baut) tentu saja akan meningkatkan sambungan.
4. Pengaturan letak baut yang berada di titik pusat kelompok sambungan dianggap tidak efektif, karena hanya memberikan penambahan kekuatan sambungan yang relatif kecil, sehingga apabila ingin dilakukan penambahan jumlah baut maka posisi letak baut sebaiknya berada pada lokasi yang memiliki eksentrisitas tertentu terhadap titik pusat sambungan (tidak berada pada titik pusat sambungan).

DAFTAR PUSTAKA

- AISC. (2005). *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- Aulia, M.D., Setiyarto, Y.D., Supriyatna, Y. (2011). Laporan Penelitian Internal Unikom 2011 – Jurusan Teknik Sipil
- Brockenbrough, R.L and Merrit, F.S. (2006). *Structural Steel Designer's Handbook: AISC, AASHTO, AISI, ASTM, AREMA, and ASCE-07 Design Standards*, 4th Ed, McGraw-Hill, Inc.
- 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.
- Hong, J.K., Sato, A., Uang, C.M., and Wood, K. (2004). "Cyclic Testing of A Type of Cold-Formed Steel Moment Connections for Pre-Fabricated Mezzanines", Report No. TR-04/03, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, CA.
- Ling, Y. (1996). "Uniaxial True Stress-Strain After Necking", AMP Journal of Technology V5.
- Rogers, C.A., Hancock, G.J. (1997). "Bolted Connection Tests of Thin G550 and G300 Sheet Steels", Research Report No. R749, Centre for Advanced Structural Engineering, Dept. of Civil Engineering, The University of Sydney, Australia.
- Salmon, C.G. and Johnson, J.E. (1990). *Steel Structure: Design and Behavior*, Third Edition, Harper Collins Publisher, USA.
- Wallace, J.A., Schuster, R.M., and Laboube, R.A. (2001). "Testing of Bolted Cold-Formed Steel Connections in Bearing (with and without washer) – Final Report", Canadian Cold Formed Steel Research Group, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- Yu, W.W. (2000). "Cold-Formed Steel Design 3rd Ed.", John Wiley & Sons, New York.
- Zaharia and Dubina. (2000). "Behaviour of Cold Formed Steel Truss Bolted Joints", Connections in Steel Structures IV – 4th Int. Workshop on Connections in Steel Structures, AISC, October