

STUDI EKSPERIMENTAL DAN ANALISIS KAPASITAS SAMBUNGAN BAJA AKIBAT EKSENTRISITAS PELAT SAMBUNG

Baehaki¹, Akhmad Aminullah² dan Suprpto Siswosukarto²

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

²Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Bulaksumur

Email: baehaki@untirta.ac.id

Abstrak: Mekanisme-mekanisme keruntuhan dari sambungan digunakan untuk menentukan kekuatan batas dari sistem sambungan. Beberapa jenis keruntuhan sambungan baja adalah kerusakan fraktur pada penampang netto pelat, kerusakan leleh pada penampang bruto pelat di luar daerah lubang baut, kerusakan geser pada baut, kerusakan tumpu pada pelat, dan kerusakan tarik pada baut. Dari beberapa jenis keruntuhan yang diprediksi dalam menentukan kapasitas sambungan, ternyata tidak memperhitungkan adanya torsi akibat eksentrisitas. Adanya eksentrisitas pada pelat sambung dan kekakuan pelat tidak mencukupi maka pelat cenderung untuk memuntir, hal tersebut dapat mengurangi kapasitas sambungan. Permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini yaitu, berapakah kapasitas sambungan akibat adanya eksentrisitas pada pelat sambung dan manakah perhitungan analisis kapasitas sambungan yang paling mendekati hasil eksperimental. Penelitian ini menyajikan hasil studi eksperimental dan analisis yang mencoba menjawab pertanyaan tersebut, sekaligus dapat menjelaskan dampak negatif dari penggunaan sambungan tipe pelat tunggal. Penelitian ini menggunakan 3 buah benda uji sambungan tipe pelat tunggal skala penuh untuk menguji dampak dari dua parameter pengujian yaitu, eksentrisitas pada sambungan dan kekakuan dari pelat sambung. Hasil semua pengujian eksperimental menunjukkan kapasitas sambungan rata-rata sebesar 9,39 ton. Kapasitas tersebut mendekati nilai kapasitas sambungan hasil analisis penampang dalam menahan torsi dan gaya geser. Rasio rata-rata antara hasil pengujian dengan hasil analisis penampang adalah 1,43.

Kata kunci: sambungan pelat tunggal, kapasitas sambungan, eksentrisitas sambungan

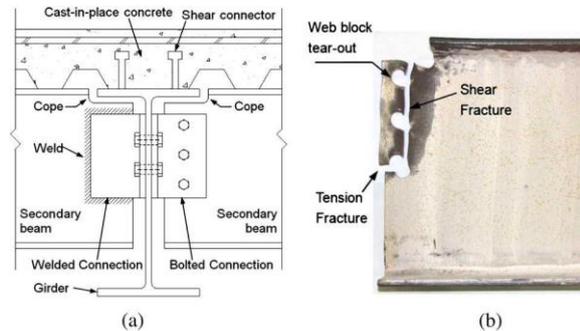
EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF STEEL CONNECTION CAPACITY DUE TO ECCENTRICITY OF GUSSET PLATES

Abstract: Failure mechanisms of the connection are used to determine the strength capacity of the connection system. Some types of steel connection failure are fracture failure in the net cross section of the plate, yield failure in the gross cross section of the plate outside of the bolt hole area, shear failure of the bolt, bearing failure of the plate, and tensile failure of the bolt. From the various modes failure of predicted in determining the connection capacity, it doesn't take calculation of the torsion due to the eccentricity. Because of the eccentricity and insufficient stiffness of the gusset plate, it occurs twisting behaviour and it reduces the connection capacity. Issues that are going to be showed are, the capacity of steel connection due to the of eccentricity on the gusset plate and the calculation methods that can predict accurately the capacity of experimental results. This study shows the result of experimental and analytical studies that suppose to resolve the issues, and it explains the negative impact of the use single plate connection type. Three full scale tests of a single plate connection type were conducted to examine the effects of two main test parameter which are eccentricity in connection and stiffness of gusset plate. The average connection capacity from the all result of eksperimental test is 9.39 ton. That result is close to the capacity value from cross sectional analytical methode in the combination of torsional and shear capacity. The average ratio of test-to-predict is 1.43.

Keywords: single plate connection, connection capacity, connection eccentricity

PENDAHULUAN

Pada konstruksi baja, balok anak sering dihubungkan dengan balok induk pada elevasi yang sama untuk mendukung beban dari pelat lantai. Sayap pada balok dicoak (*coped*) untuk mendapatkan jarak bersih yang diijinkan antara interaksi balok, balok tipe ini disebut dengan *coped beam*. Ilustrasi sambungan *coped beam* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Model sambungan *coped beam* (Fang at all, 2013)

Variasi sambungan yang digunakan pada sambungan *coped beam* yaitu siku ganda, siku tunggal, plat las, dan profil T.

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan pada sambungan *coped beams* dalam memprediksi kapasitas sambungan, yang didasarkan pada kapasitas geser blok sesuai prediksi yang diberikan oleh AISC-LRFD 2005. Penelitian telah dilakukan oleh Fang (2013) dengan 10 benda uji *coped beams* skala penuh untuk menguji efek dari dua parameter pengujian, yaitu, (1) eksentrisitas pada sambungan dan (2) aspek rasio balok dari web balok yang merupakan bagian dari sambungan. Dihadirkan sembilan hasil tes benda uji mengalami kegagalan tarik di sepanjang baris bawah baut, dan satu benda uji mengalami kegagalan geser blok. Selain itu, beberapa hasil tes menunjukkan bahwa adanya eksentrisitas sambungan menyebabkan puntiran pada pelat badan balok. Hal ini diamati pada benda uji dengan tipe sambungan siku tunggal dan profil T.

Perilaku keruntuhan sambungan *coped beams* juga diamati oleh Franchuk (2003). Penelitian ini dengan 17 benda uji *coped beams* skala penuh untuk menentukan kapasitas geser blok dan perilaku sambungan *coped beams*. Parameter yang diperhitungkan dalam penelitian ini meliputi rotasi ujung balok, ujung dan jarak tepi, dan tata letak baut. Hal ini ditemukan bahwa beberapa parameter ini secara signifikan mempengaruhi kapasitas sambungan.

Sambungan yang akan diteliti pada penelitian ini merupakan sambungan tipe pelat tunggal pada balok anak dengan baut. Menurut Dewobroto dan Besari (2009), sambungan dengan tipe pelat tunggal menempatkan pelat sambung saling *overlapping* dengan pelat badan balok sehingga sumbu pelat menjadi tidak segaris dengan sumbu balok. Kondisi tersebut menghasilkan eksentrisitas pada gaya-gaya yang akan dipindahkan. Dewobroto dan Besari (2009) mengamati fenomena *curling* pada pelat baja *hot-rolled*, dan mensimulasikan beberapa ketebalan sambungan dengan bantuan program ABAQUS. Dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa *curling* terjadi sebagai akibat mekanisme gaya-gaya tekan internal pelat, yang tidak lain adalah *buckling* (tekuk), dan hanya terjadi pada pelat yang relatif tipis (langsing). Adanya *curling* pada sambungan lap yang secara natural mempunyai eksentrisitas, ditambah slip, menyebabkan sambungan lap dengan baut tunggal beresiko mengalami distorsi, sehingga kinerjanya menjadi tidak optimum.

Dengan adanya permasalahan tersebut, sehingga perlu adanya penelitian tentang kapasitas kekuatan sambungan baja tipe pelat tunggal yang umumnya digunakan pada konstruksi bangunan baja. Pada sambungan yang diuji pada penelitian ini, tipe sambungan memiliki perbedaan pada titik perlemahannya jika dibandingkan dengan sambungan *coped beam*, yaitu pada pelat penyambung cenderung akan mengalami kegagalan karena adanya coakan sudut, namun pada baloknya tidak diberikan coakan sebagaimana pada *coped beam*. Potensi mode kegagalan ini termasuk geser blok pada pelat penyambung. Potensi kegagalan lainya bisa terjadi pada pelat sambung yaitu puntiran (*twisting*) akibat adanya beban eksentris, sehingga hal tersebut dapat mengurangi kapasitas sambungan pelat tunggal.

Kapasitas Geser Blok

Menurut AISC-LRFD 2005, kekuatan geser blok selalu ditentukan oleh kekuatan tarik pada bidang tarik bersih yang diakumulasikan dengan kekuatan geser minimal pada bidang geser kotor atau bersih. Sehingga diasumsikan bahwa fraktur selalu terjadi pertama kali pada bidang tarik, yang kemudian diikuti dengan leleh pada bidang geser. Tahanan nominal tarik dalam keruntuhan geser blok diberikan oleh persamaan:

$$R_n = \phi [U_{bs} f_u A_{nt} + 0,6 f_u A_{nv}] \leq \phi [U_{bs} f_u A_{nt} + 0,6 f_y A_{gv}] \tag{1}$$

Dimana, A_{gv} adalah luas bruto yang menahan geser (mm^2), A_{nv} adalah luas netto yang menahan geser (mm^2), A_{nt} adalah luas netto yang menahan gaya tarik (mm^2), f_u adalah kuat tarik, f_y adalah kuat leleh, U_{bs} adalah koefisien reduksi, 1.0 bila tegangan tarik merata, 0.5 bila tegangan tarik tidak merata ϕ adalah 0,75.

Torsi pada Penampang Persegi

Menurut Popov (1976) momen torsi (*twist*) merupakan momen yang bekerja terhadap sumbu longitudinal elemen struktur. Penampang segiempat yang dibebani puntir, pada bagian sudut-sudut penampang akan mengalami distorsi, lihat Gambar 2b. Pada Gambar 2c diperlihatkan distribusi tegangan disepanjang garis yang arahnya radial dari titik pusat berat. Tegangan geser maksimum terjadi pada serat terluar sisi panjang, sedangkan pada bagian sudut tegangan geser menjadi nol.

Persamaan untuk menghitung tegangan geser maksimum τ_{maks} yang nilainya tergantung dari perbandingan antara sisi panjang dan pendek (Popov, 1976), yaitu :

$$\tau_{maks} = \frac{T}{\alpha b t^2} \tag{2}$$

$$\theta = \frac{d\theta}{dx} = \frac{TL}{\beta b t^3 G} \tag{3}$$

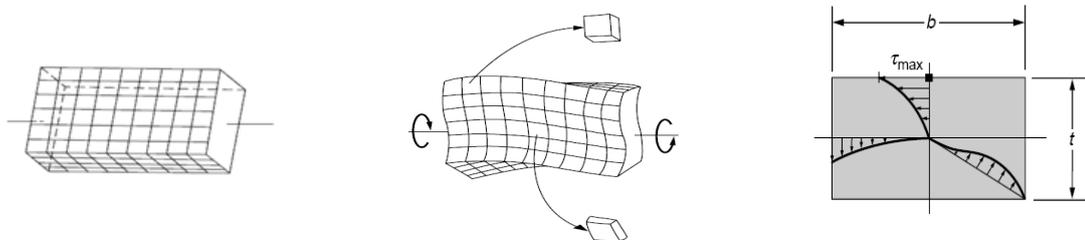
Dengan t dan b masing-masing adalah sisi pendek dan panjang dari penampang persegi. α , β adalah koefisien untuk penampang persegi, lihat Tabel . Untuk nilai b yang jauh lebih besar dibandingkan dengan t ($b/t > 10$), kedua koefisien ini mendekati 1/3 atau 0,333.

Dalam praktek jarang puntiran murni bekerja sendiri, melainkan bersama-sama dengan lentur dan gaya lintang. Jika tegangan geser dibatasi oleh tegangan ijin τ_i , maka harus dipenuhi persamaan dibawah ini (Popov, 1976):

$$\tau_i \geq \tau_T + \tau_V \tag{4}$$

$$\tau_T = \frac{T}{\alpha b t^2} \tag{5}$$

$$\tau_V = \frac{3V}{2bt} \tag{6}$$



(a) Sebelum menerima puntiran (b) Setelah menerima puntiran (c) Distribusi tegangan geser
Gambar 2. Distorsi dan distribusi tegangan geser pada penampang persegi (a, b dan c) (Popov,1976)

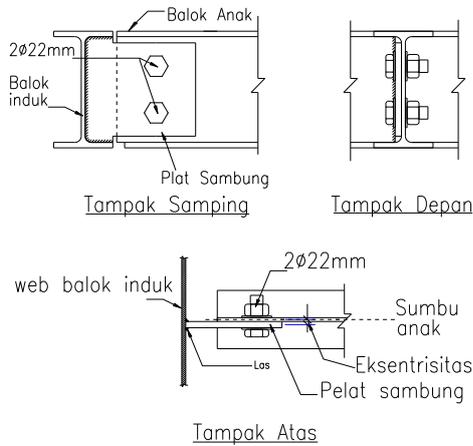
Tabel 1. Koefisien α dan β untuk penampang persegi (Higdon et al.,1985)

b/t	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	4,00	6,00	10,00	∞
α	0,208	0,231	0,246	0,256	0,267	0,282	0,299	0,312	0,333
β	0,141	0,196	0,229	0,249	0,263	0,281	0,299	0,312	0,333

METODOLOGI

Benda Uji

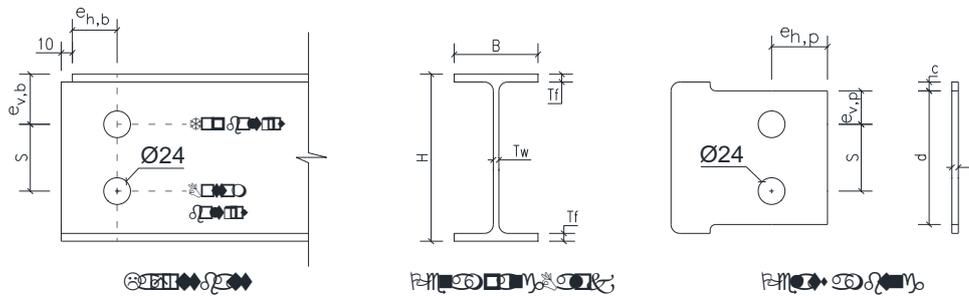
Benda uji berupa balok anak profil WF150 dengan panjang 1,25 m dihubungkan pada balok induk dengan dimensi profil yang sama, dengan menggunakan pelat sebagai pelat sambung. Sambungan antara pelat penyambung dengan balok adalah sambungan dengan baut. Sedangkan sambungan antara pelat penyambung dengan balok induk adalah sambungan las. Untuk lebih jelasnya model tipe sambungan terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Tipe sambungan yang diuji

Tiga buah benda uji skala penuh digunakan untuk meninjau kapasitas sambungan tipe pelat tunggal pada sambungan balok anak dengan baut, dengan memvariasikan ketebalan pelat sambung, yaitu 3.8 mm, 4.8 mm dan 5.8 mm, dan dua buah balok baja profil IWF 150x75x5x7. Benda uji merupakan hasil pabrikan baja yang umum digunakan pada konstruksi. Untuk memudahkan identifikasi pengujian, penamaan benda uji diberikan berdasarkan ketebalan yaitu CN-1, CN-2, dan CN-3. CN-1 merupakan benda uji dengan ketebalan pelat sambung 3.8 mm, CN-2 merupakan benda uji dengan ketebalan pelat sambung 4.8 mm, dan CN-3 merupakan benda uji dengan ketebalan pelat sambung sebesar 5.8 mm.

Pada sambungan digunakan baut ISO 8.8 diameter 22 mm, dengan ukuran lubang pada pelat sambung sesuai standar yaitu 2 mm lebih besar dari diameter nominal baut, sehingga ukuran lubang baut menjadi 24 mm. Ukuran dimensi balok dan sambungan benda uji dapat dilihat pada Gambar 4 dan simbol dimensi yang diukur dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 4. Dimensi benda uji: a) detail balok, b) detail pelat sambung

Tabel 2. Dimensi balok dan sambungan uji

Benda uji	Dimensi (mm)											
	B	H	T_f	T_w	S	$e_{v,b}$	$e_{h,b}$	$e_{v,p}$	$e_{h,p}$	c	d	t
CN-1	75	150	7	5	60	45	50	30	50	8	120	3.8
CN-2	75	150	7	5	60	45	50	30	50	8	120	4.8
CN-3	75	150	7	5	60	45	50	30	50	8	120	5.8

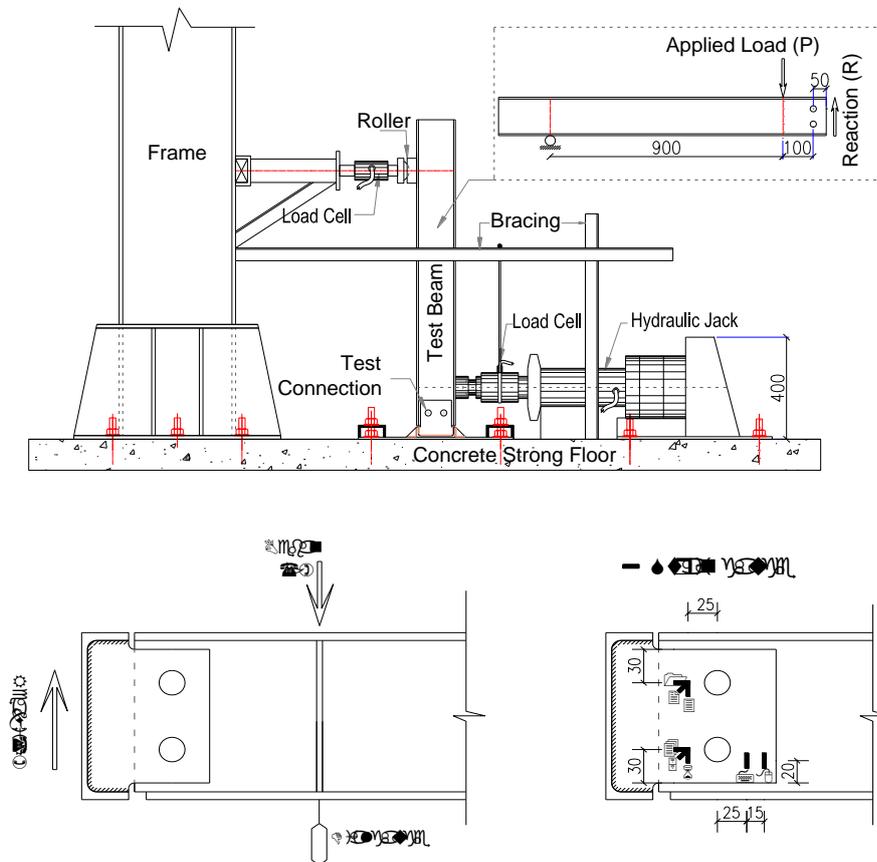
Setup Pengujian

Setup pengujian dirancang untuk memastikan terjadi kegagalan pada pelat sambung, dan untuk mensimulasikan sebuah balok anak yang terhubung dengan balok induk pada konstruksi baja. Balok diletakan berdiri tegak untuk menjamin kekakuan pada sambungan antara pelat uji dengan balok induk yang disambung dengan las dan diangkur ke rigid floor. Balok induk dimodelkan seperti profil kanal lalu dilas pada pelat datar sebagai tumpuan yang kemudian diperkuat dengan angkur pada rigid floor. Kekakuan pelat datar harus mencukupi, agar tidak terjadi kegagalan karena akan mempengaruhi pada hasil pengujian sambungan, oleh karena itu ditambakan perkuatan berupa bresing pada pelat datar di setiap sisinya. Skematik pengujian dapat dilihat pada Gambar 5. Hydraulic jack yang digunakan memiliki kapasitas 100 ton untuk membebani benda uji, sebagai beban terpusat pada balok. Beban ditempatkan sangat dekat dengan sambungan, untuk mencegah terjadi keruntuhan lain sebelum terjadi keruntuhan pada pelat sambung. Posisi pembebanan terletak pada jarak 0,1 m dari titik

sambungan baut. Tumpuan rol diletakan di ujung balok pada jarak 0.9 m dari sambungan baut dan diletakan load cell dengan kapasitas 10 ton untuk membaca reaksi yang terjadi akibat pembebanan, sehingga besarnya reaksi yang terjadi pada sambungan dapat diketahui. Pada balok diberikan bresing untuk mencegah agar tidak terjadi pergerakan arah lateral.

Prosedur Pengujian

Pembebanan dan reaksi tumpuan secara otomatis dicatat oleh load cell sedangkan lendutan yang terjadi diukur oleh dial gauge yang dipantau oleh rekaman kamera. Strain gauge dan rosette diletakan di dekat lubang baut untuk mencatat distribusi regangan yang terjadi pada daerah kritis dari pelat sambung, layout penempatan strain gauge dan rosette ditunjukkan pada Gambar 5. Pengujian dilakukan dengan kontrol beban dalam tahap pembebanan awal, dimana beban diterapkan secara bertahap. Pengujian dihentikan ketika terjadi keruntuhan pada benda uji yaitu terjadi robek pada pelat atau terjadi penghilangan beban secara signifikan.



Gambar 5. Dimensi benda uji: a) detail balok, b) detail pelat sambung

HASIL DAN PEMBAHASAN

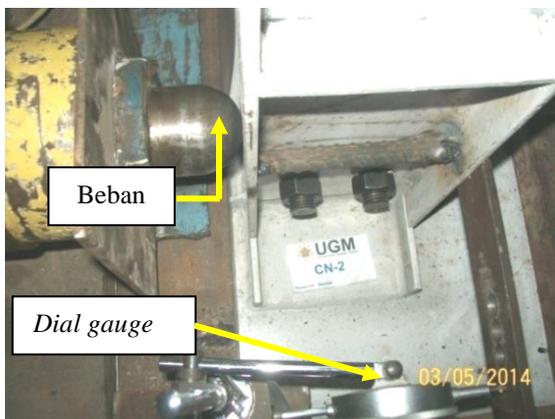
Perilaku Beban-Defleksi

Kurva beban-defleksi untuk semua benda uji ditunjukkan dalam Gambar 6b. Secara umum, respons linier diamatai pada pembebanan awal. Ketika beban yang diterapkan mencapai beban ultimit rencana, benda uji mulai mengembangkan perilaku puntiran pada pelat sambung. Perilaku puntiran ini ditandai dengan adanya nilai negatif atau berlawanan arah pada nilai perpindahan arah vertikal yang dapat dilihat pada hasil pengujian CN-2 dan CN-3. Defleksi vertikal diperoleh dari *dial gauge* yang terekam dalam video. Setelah benda uji mencapai beban ultimit, kurva beban-lendutan menunjukkan penurunan tiba-tiba mewakili awal dari keruntuhan sambungan. Selanjutnya, kurva beban-lendutan dilanjutkan secara bertahap dan terbatas pada beban yang diterapkan.

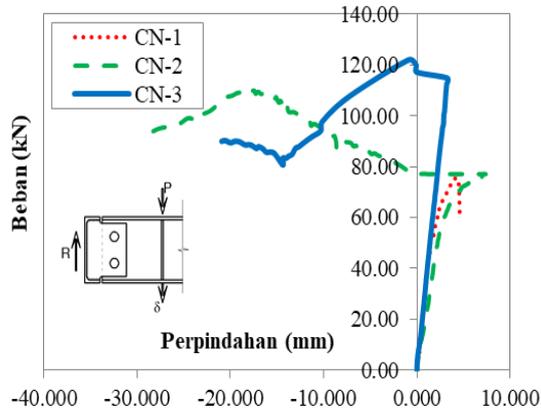
Distribusi Regangan

Hasil dari regangan tarik CN-1 ditunjukkan pada Gambar 7a. Hasil tes CN-1 ($t=3,8\text{mm}$) pada pembebanan awal menunjukkan distribusi regangan tarik maksimum didekat lubang baut dan regangan bertahap menurun menuju tepi

pelat, ketika pembebanan mencapai beban ultimit ($P=75,10\text{ kN}$) dan menunjukkan perilaku puntiran pada pelat, regangan tarik didekat lubang baut menurun (menjadi tertekan) dan meningkat menuju tepi pelat. Hal ini disebabkan karena pelat tertekuk, sehingga regangan didekat lubang baut menjadi menurun. Hasil regangan tarik pada benda uji CN-1 belum mencapai kondisi leleh, dimana kondisi leleh benda uji CN-1 sebesar 1800 microstrain . Hasil pengamatan benda uji CN-2 ($t=4,8\text{mm}$) dan CN-3 ($t=5,8$), ditemukan bahwa regangan tarik terbesar terjadi di dekat lubang baut dan lebih konsisten dibawah tingkat beban yang berbeda seperti terlihat pada Gambar 7b dan Gambar 7c. Hal ini disebabkan oleh kekakuan pelat sambung CN-2 ($t=4,8\text{mm}$) dan CN-3 ($t=5,8\text{mm}$) yang lebih tinggi dibandingkan CN-1 ($t=3,8$), sehingga gaya-gaya internal yang terjadi pada pelat sambung lebih terdistribusi secara merata, berbeda dengan CN-1 yang memiliki ketebalan pelat lebih tipis, sehingga gaya-gaya internal yang terjadi pada pelat sangat mempengaruhi pada distribusi regangan yang terjadi.



(a)



(b)

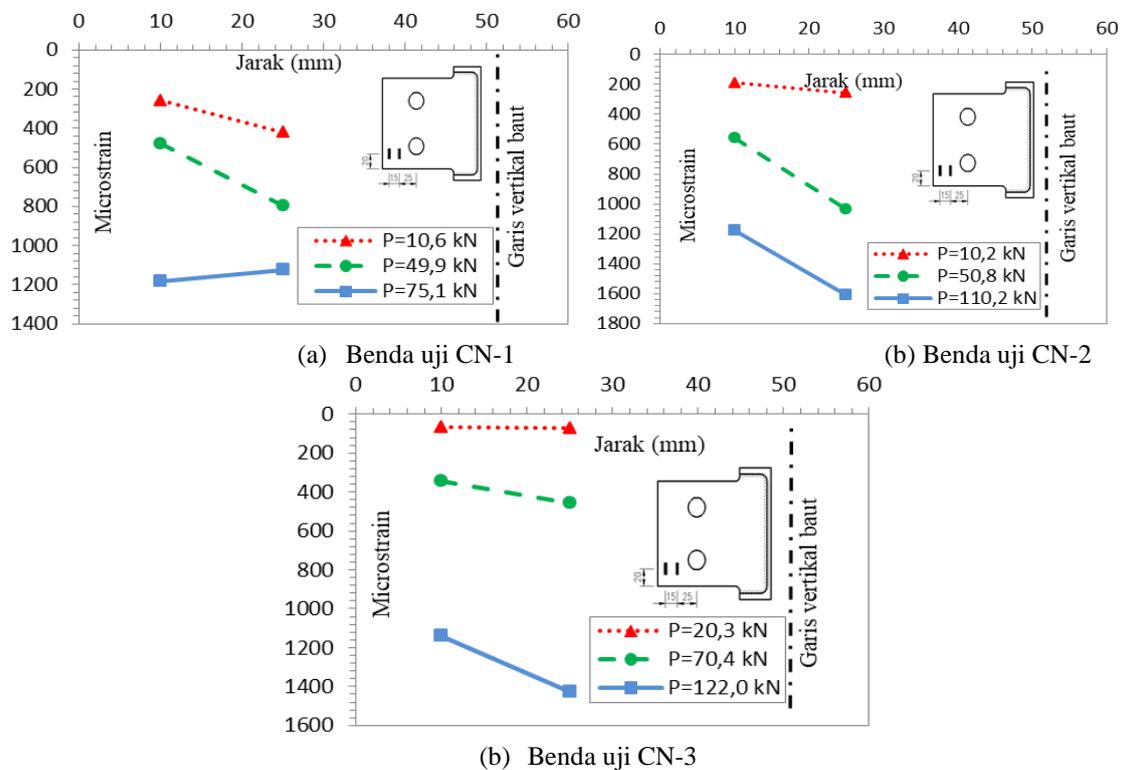
Gambar 6.a) posisi pembebanan, b) Kurva hubungan beban-perpindahan

Tabel 3. Perbandingan hasil pengujian dengan hasil analisis

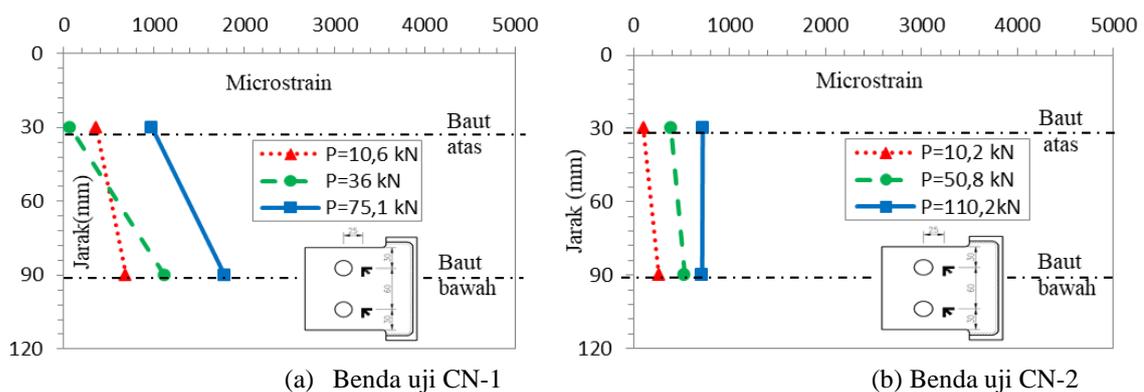
Benda Uji	P-Exp (ton)	Mode kegagalan	P-Anl (ton)			P-min	P-Exp / P-Anl
			Tumpu Pelat	Geser Blok	Torsi + Geser		
CN-1, $t=3,8\text{mm}$	7,60	puntir	14,71	16,42	5,30	5,30	1,43
CN-2, $t=4,8\text{mm}$	11,23	puntir	18,76	20,94	7,36	7,36	1,53
CN-3, $t=5,8\text{mm}$	12,44	puntir	22,54	24,69	9,40	9,40	1,32

Berdasarkan pengolahan data regangan tarik diatas, dapat ditarik kesimpulan bahwa konsentrasi tegangan/regangan terjadi di sekitar lubang baut. Dalam pengujian ini selain dilakukan pengukuran terhadap regangan tarik juga dilakukan pengukuran terhadap regangan geser. Pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan *rectangular rosettes*. Distribusi regangan geser yang dibaca dari *rosette* dianalisis pada bab ini untuk mendapatkan kondisi regangan geser maksimum yang terjadi pada benda uji. Dari hasil analisis data pengukuran *rosette* pada benda uji CN-1 ($t=3,8$ mm) dengan $P=10,6$ kN regangan geser terbesar terjadi di daerah dekat lubang baut

bawah. Analisis regangan geser dari tingkat beban yang berbeda ditampilkan pada Gambar 8a. Gambar 8a menunjukkan distribusi regangan geser yang dibaca dari *rosette* untuk benda uji CN-1 ($t=3,8$ mm) pada tingkat beban yang berbeda. Distribusi regangan geser adalah seragam, dimana regangan geser terbesar terjadi di dekat lubang baut bawah. Secara umum dari Gambar 8a dan Gambar 7c, deformasi geser lebih besar ditunjukkan berdekatan dengan lubang baut, terutama di sekitar lubang baut bawah.

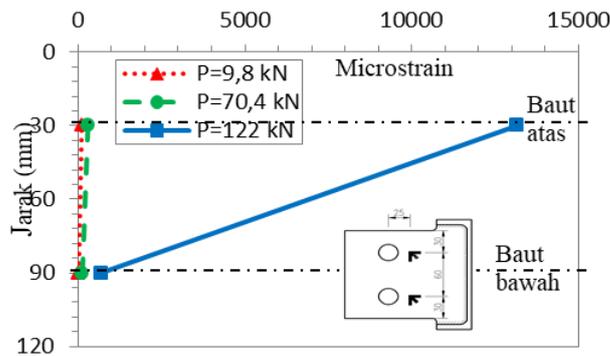


Gambar 7. Distribusi regangan tarik pada benda uji



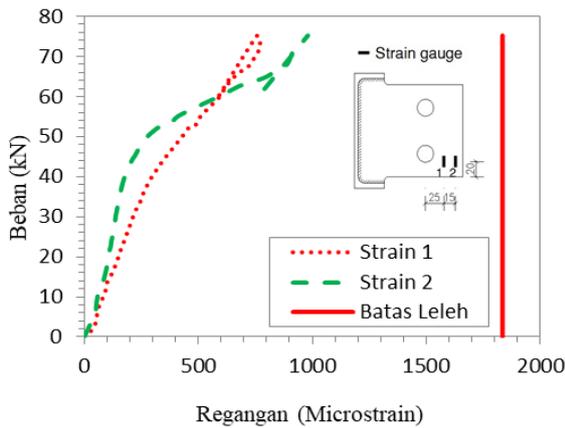
Berdasarkan pengolahan data regangan tarik diatas, dapat ditarik kesimpulan bahwa konsentrasi tegangan/regangan terjadi di sekitar lubang baut. Hal ini juga ditunjukkan dari kurva hubungan beban dan regangan dari masing-masing benda uji pada Gambar 9a sampai dengan Gambar 9c. Pada Gambar 9a sampai dengan Gambar 9c terlihat kurva beban-regangan untuk *strain gauge* yang berada di daerah tarik pelat sambung. Dari kedua *strain*

gauge pada masing-masing benda uji tersebut, pada daerah di dekat lubang baut terjadi regangan tarik maksimum dengan nilai di bawah batas leleh, sehingga bisa disimpulkan bahwa tegangan maksimum terjadi di daerah dekat lubang baut dan menurun ke daerah tepi pelat sambung. Selain itu hasil tersebut menunjukkan keruntuhan benda uji yang disebabkan karena puntiran (*twisting*).

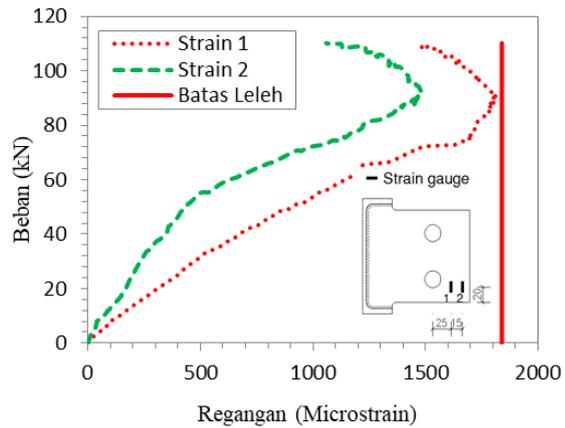


(c) Benda uji CN-3

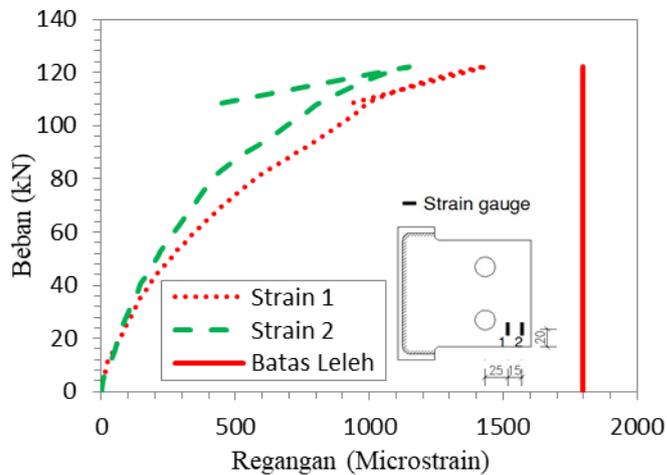
Gambar 8. Distribusi regangan geser pada benda uji



(a) Benda uji CN-1



(b) Benda uji CN-2



(c) Benda uji CN-3

Gambar 9. Kurva hubungan beban-regangan pada benda uji

SIMPULAN

Dari hasil pengujian eksperimental dan analisis kapasitas sambungan baja tipe pelat tunggal, dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1. Kapasitas sambungan baja tipe pelat tunggal ditentukan oleh kapasitas penampang dalam menahan tegangan geser akibat puntiran dan gaya geser. Nilai kapasitas sambungan rata-rata dari ketiga benda uji adalah 9,39 ton.
2. Berdasarkan hasil pengujian, analisis penampang dalam menahan tegangan geser akibat puntiran dan gaya geser merupakan nilai dari kapasitas sambungan tipe pelat tunggal. Hal ini dapat dilihat dari hasil analisis dengan persamaan tersebut yang dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium. Metode analisis tersebut lebih mendekati hasil pengujian yang memiliki rasio rata-rata 1,43 terhadap hasil analisis.

DAFTAR PUSTAKA

- AISC, ANSI/AISC 360-05. (2005). *An American National Standard - Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, Illinois.*
- Dewobroto, W. & Besari, S., (2009). “*Distorsi Sambungan Baut akibat Curling dan Pencegahannya*”, Jurnal Teknik Sipil, Vol. 16, No. 2. Agustus 2009, 49-62
- Fang, C., Lam, A.C.C., Yam, M.C.H. & Seak, K.S., 2013. Block shear of coped beams with single-sided bolted connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 86(2013), pp.153 - 166.
- Franchuk, C.R., Driver, R.G., and Grondin, G.Y. (2003). “*Experimental investigation of block shear failure in coped beams*”, Can. J. Civ. Eng. Vol. 30, 2003, 871-881.
- Popov, E.P., (1976). *Mechanics of Materials*. New Jersey: Prentice - Hall.