

Pengaruh Panjang dan Diameter Stud terhadap Keruntuhan Geser Struktur Komposit Baja-Beton

*Rahma Nindya Ayu Hapsari¹, Ilham Nurhuda², Nuroji²

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Semarang

²Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

^{*)}rahmanindyaayuhapsari@gmail.com

Received: 22 Desember 2017 Revised: 3 September 2018 Accepted: 7 September 2018

Abstract

Composite structures of concrete slabs and steel beams require shear connectors to transfer shear force between steel beams and concrete slabs. The strength of stud shear connector specified on SNI 03-1729-2013 only considers the effect of stud diameter, however the length of a stud may influence its behavior and strength. This research observes the effects of length and diameter (ℓ/d) of shear connectors on the strength. This research was conducted using the push out method explain in AS-4347- Part I. The test specimens observed in this research were concrete and steel composites, composing IWF 350x175x11x14 mm and concrete blocks of size 450x225x160 mm. The studs were made of steel reinforcements with diameter (d) of 10, 16 and 22 mm, were welded on IWF with 5 mm weld thickness. The length of studs for each stud diameter were 4d, 5d, and 6d. The results indicate that the increase in stud diameter will increase the load capacity of stud. The length of studs effect its load capacity. A slim stud experiences large bending moment at the base of the shear connector. The results show that the highest value of load capacity is measured at specimens with ℓ/d ratio of 5.

Keywords: Composite structure, shear connector, ratio ℓ/d

Abstrak

Struktur komposit antara pelat beton dan balok baja membutuhkan shear connector untuk mentransfer gaya geser antara baja dan plat beton. Persamaan nilai kuat nominal stud yang ditentukan pada SNI 03-1729-2013 hanya didasarkan pada diameter stud, sedangkan panjang suatu material dapat mempengaruhi perilaku dan kekuatannya. Penelitian ini mengamati pengaruh panjang dan diameter (ℓ/d) terhadap kekuatan stud shear connector. Penelitian ini dilakukan dengan metode Push Out yang dijelaskan pada AS-4347-Part I. Benda uji yang diamati pada penelitian ini adalah komposit antara baja profil WF 350x175x11x14 mm dan beton berdimensi 450x225x160 mm. Stud terbuat dari baja tulangan polos dengan diameter 10, 16 dan 22 mm yang dilas menggunakan tipe las sudut setinggi 5 mm pada IWF. Variasi panjang stud yang digunakan adalah 4d, 5d, dan 6d untuk masing-masing diameter stud. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan ukuran diameter shear connector berpengaruh pada kenaikan nilai kapasitas beban. Panjang shear connector dapat mempengaruhi kelangsingan batang yang menyebabkan shear connector mengalami momen lentur yang besar di pangkal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kapasitas beban tertinggi ada pada benda uji dengan rasio ℓ/d adalah 5.

Kata kunci : Struktur komposit, shear connector, rasio ℓ/d

Pendahuluan

Struktur komposit antara pelat beton dan balok baja merupakan struktur yang memanfaatkan kelebihan dari beton dan baja yang bekerja bersama-sama sebagai satu kesatuan.

Kelebihannya adalah beton kuat terhadap tekan, dan baja kuat terhadap tarik. Penggabungan kedua material diatas untuk memanfaatkan keunggulan sifat material pembentuknya dibutuhkan penghubung yang memiliki sifat *adhesion*, *friction* atau *bearing* dan disebut sebagai penghubung geser atau *shear connectors* (Galambos, 1998).

Pada struktur komposit terdapat gaya geser horisontal yang timbul selama pembebanan. Gaya geser yang terjadi antara pelat beton dan balok baja akan dipikul oleh sejumlah penghubung geser (*shear connector*) sehingga tidak terjadi slip pada saat masa layan. Untuk mendapatkan penampang yang sepenuhnya komposit, penghubung geser harus cukup kaku sehingga dapat menahan gaya geser yang terjadi. Adanya penghubung geser menyebabkan balok baja dan beton di atasnya bekerja secara integral. (Zuhri, 2011). Fungsi utama dari elemen-elemen penghubung untuk membantu meneruskan gaya-gaya yang ada di titik hubung dari suatu elemen struktur ke elemen struktur lainnya sehingga timbul gaya geser pada baut.

Penghubung geser (*shear connector*) memberikan pengaruh terhadap elemen balok baja, dalam menahan gaya geser yang terjadi antara balok baja dan pelat beton. Balok baja dan pelat beton yang tidak dihubungkan dengan penghubung geser memiliki tegangan yang lebih besar karena elemen profil dan plat belum menyatu sehingga tegangan yang dihasilkan masih bersifat sendiri-sendiri. (Tumimomor *et al.*, 2016). Secara umum, penghubung geser terbuat dari baja yang dilas atau dibaut ke sayap atas baja dan ditanam pada beton (Dowling *et al.*, 1992).

Salah satu tipe *shear connector* yang banyak digunakan adalah tipe *stud*. Pada penelitian Lahamukang *et al* (2014) bentuk dari *shear connector* tipe *stud* memberikan kekuatan dan kekakuan yang lebih besar dari *shear connector* tipe L.

Dalam SNI 03-1729-2013, persamaan untuk mencari kuat nominal *stud*, menyatakan bahwa luas bidang kontak berpengaruh pada kuat nominal *shear connector*, luas bidang kontak atau luas permukaan selama ini hanya didasarkan pada diameter *stud*, sedangkan secara teoretis, panjang suatu material, yang dalam hal ini adalah *shear connector*, akan mempengaruhi faktor kelangsingan dan elastisitas dari material itu sendiri, sehingga dimungkinkan mempengaruhi perilaku dan kekuatannya. Sehingga dalam penelitian ini akan diamati pengaruh panjang dari *stud* terhadap kekuatan *shear connector*, dan faktor rasio perbandingan panjang dan diameter (ℓ/d) dari *stud shear connector* terhadap perilaku dan kekuatan *stud shear connector*. Pada penelitian Liu, *et al.* (2008) pun dinyatakan bahwa spesimen dengan *stud* yang lebih panjang memiliki kekuatan tarik dan daktilitas yang lebih baik daripada spesimen dengan *stud* yang lebih pendek. Dan pada penelitian Shariati, *et al.* (2012) juga dinyatakan bahwa spesimen dengan *shear*

connector yang lebih panjang menunjukkan fleksibilitas yang lebih tinggi dan dapat memikul beban yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen dengan *shear connector* yang lebih pendek.

Pada penelitian ini akan digunakan tiga variasi panjang per diameter (ℓ/d) dengan tujuan untuk mengamati rasio perbandingan panjang dan diameter (ℓ/d) terhadap perilaku dan kekuatan *stud shear connector*. Pada penelitian terdahulu, milik Pavlovic, (2013) dengan beberapa variasi rasio (ℓ/d), rasio (ℓ/d) yang rendah meningkatkan kegagalan slip pada beton, yang mengarah pada sifat ulet dari *shear connector*.

Shear connector adalah bagian terpenting dari balok komposit yang menjadi penghubung antara balok baja dengan pelat beton. *Shear connector* ini mentransfer gaya pada pelat beton menuju ke balok baja serta mencegah gaya angkat vertikal pada permukaan hubungannya. *Shear connector* ini memastikan bahwa kedua material dapat bekerja sebagai satu kesatuan pada suatu komponen struktur (Pashan, 2006). Tanpa adanya *shear connector*, slip akan terjadi meski pada kondisi tegangan yang rendah.

Secara mekanis, penghubung geser (*shear connector*) memiliki dua fungsi dasar yaitu mentransfer gaya geser horizontal dan mencegah pemisahan secara vertikal yang terjadi antara pelat beton dan balok baja. (Mursid, 2013) Supaya pelat beton dan balok baja dapat bekerja bersama membentuk satu kesatuan maka pada bidang pertemuan antara pelat beton dan balok baja tersebut perlu dipasang alat penghubung geser (*shear connector*). Jenis sambungan pada struktur baja yaitu sambungan baut (*bolted connections*) dan sambungan las (*welded connection*).

Konektor-konektor geser secara mekanis sangat dibutuhkan, kecuali untuk balok baja yang sepenuhnya dicetak di dalam beton. Konektor geser yang secara khusus dibuat untuk memenuhi spesifikasi AISC adalah *stud shear connector* dan *channel shear connector* (Salmon & Johnson, 1986).

Menurut SNI 03-1729-2013, kekuatan nominal suatu *stud shear connector* dapat ditentukan menggunakan Persamaan 1 berikut ini:

$$Q_n = 0,5A_{sc}\sqrt{f'_c E_c} \leq A_{sc} f_u \quad (1)$$

Dimana Q_n merupakan kekuatan nominal satu *stud* (N), A_{sc} adalah luas penampang *shear connector* *stud* berkepala (mm^2), E_c adalah modulus elastisitas beton f'_c adalah kekuatan tekan beton

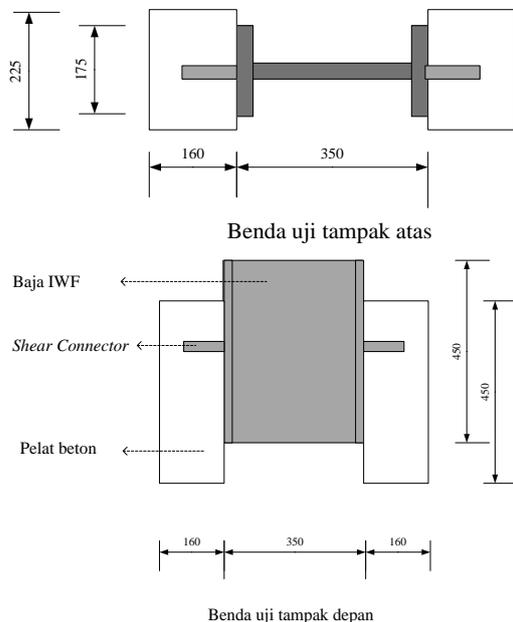
(MPa), f_u adalah tegangan putus *shear connector* (MPa).

Metode Penelitian

Perencanaan dimensi benda uji

Di awal tahun 1930, *push out test* digunakan sebagai alat untuk menentukan kapasitas penghubung geser spiral. Pada pengembangan selanjutnya, uji *push out* digunakan secara luas untuk mempelajari jenis *shear connector* lain. Meskipun kondisi tegangan yang terjadi tidak menunjukkan kondisi tegangan yang terjadi pada balok komposit sebenarnya, *push out test* digunakan untuk mengetahui karakteristik beban-slip pada kondisi pembebanan statis (Gattesco & Giuliani, 2001).

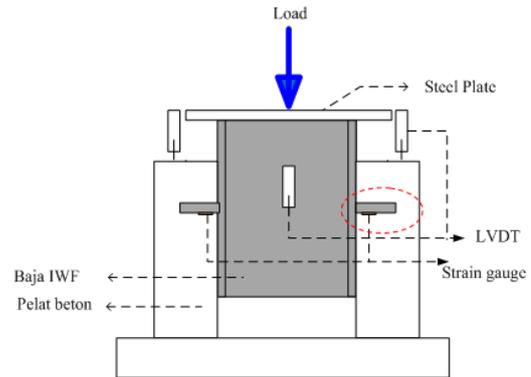
Desain dan perencanaan spesimen untuk menentukan kekuatan karakteristik *shear connector* melalui *push out test* dibuat berdasarkan AS 2327, Part 1-2003. Pengujian *push out* dilakukan dengan menggunakan spesimen berupa dua buah pelat beton yang dihubungkan pada tiap flens (sayap) pada balok baja WF dengan menggunakan *shear connector*. Untuk rencana dimensi benda uji penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



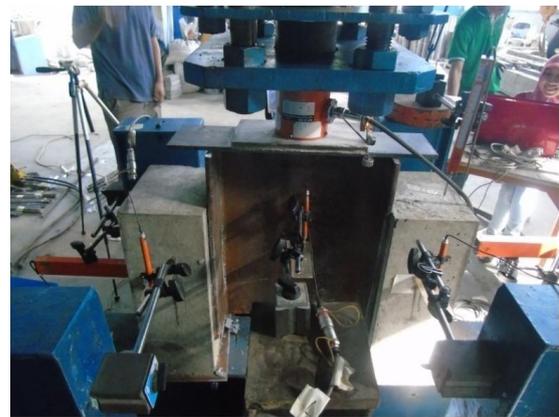
Gambar 1. Rencana dimensi benda uji

Push out test dilakukan terhadap benda uji yang telah berumur 28 hari dengan cara menekan baja dan pelat beton yang merupakan struktur komposit. Langkah-langkah pengujian ini antara lain dengan benda uji diletakkan pada mesin, dengan posisi vertikal pada bagian memanjang, seperti yang

ditampilkan pada Gambar 2 dan 3. *Dial gauge* diletakkan diatas badan dan sayap baja. Beban diaplikasikan pada penghubung geser dan diberikan secara konstan dengan penambahan secara bertahap.



Gambar 2. Gambaran *push out test* dan tampilan dalam benda uji



Gambar 3. *Push-out test* benda uji

Hasil Penelitian

Perilaku kegagalan struktur komposit

Pengamatan awal kegagalan struktur pada pengujian dilihat dari perilaku keruntuhan struktur beton, kerusakan beton pada pengujian ini umumnya diawali dari terjadinya celah horisontal antara beton dan baja, kemudian terjadi retak pada sekitar lokasi *shear connector*.

Untuk melakukan pengamatan perilaku *shear connector*, dilakukan pembongkaran beton setelah pengujian selesai. Tipe-tipe kegagalan struktur tersebut seperti yang dijabarkan pada Tabel 1.

1. Struktur komposit dengan *shear connector* d10

Pada benda uji dengan *shear connector* d10, kegagalan struktur ditandai dengan terjadinya retak

Tabel 1. Tipe kegagalan struktur benda uji

Kode benda uji	l/d	Kegagalan struktur	
		Shear connector	Beton
d10-1	4,004	bengkok	retak
d10-2	5,005	1 shear connector bengkok, 1 shear connector patah	retak
d10-3	6,004	bengkok	retak
d16-1	4,009	bengkok	retak
d16-2	5,011	bengkok	retak
d16-3	6,013	bengkok	retak
d22-1	4,001	lurus	terbelah
d22-2	5,002	lurus	terbelah
d22-3	6,002	lurus	terbelah

dan *spalling* beton, selain itu terjadi pula pemisahan antara baja dan beton yang menunjukkan telah terjadi kegagalan aksi komposit. Dan pada benda uji d10-2 atau rasio 5,005 l/d pengujian diakhiri dengan putusya salah satu *shear connector* pada posisi tengah bentang *shear connector* yang mengakibatkan lepasnya ikatan beton dari struktur. Setelah pengujian selesai, dilakukan pembongkaran terhadap seluruh benda uji untuk melihat perilaku *shear connector*, dari pengamatan ini terlihat bahwa *shear connector* mengalami kebengkokan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Contoh kegagalan struktur, terjadi kebengkokan pada *shear connector* diameter 10 mm dengan panjang 50 mm



Gambar 5. Terjadi kebengkokan pada *shear connector* diameter 16 mm dengan panjang 80 mm

Pada uji tarik material *shear connector*, didapat data titik leleh *shear connector* d10 sebesar 403,435 MPa pada beban sebesar 11,02 kN dan pada saat benda uji nampak mengalami keruntuhan

struktur, pembacaan data *strain gauge* menunjukkan angka beban rata-rata dari tiga benda uji d10 adalah 25,41 kN yang besarnya lebih besar dari hasil pengujian tarik material *shear connector*. Sehingga dimungkinkan, keruntuhan benda uji dan kebengkokan *shear connector* yang terjadi mengindikasikan telah terjadinya leleh pada *shear connector*.

2. Kegagalan struktur komposit dengan *shear connector* d16

Pada benda uji dengan *shear connector* d16 terjadi kegagalan struktur yang sama dengan benda uji dengan *shear connector* d10, yaitu terjadinya retak dan *spalling* beton, dan terjadi kegagalan aksi komposit karena terjadi pemisahan antara baja dan beton. Kemudian setelah pengujian selesai, dilakukan pembongkaran terhadap benda uji untuk melihat perilaku *shear connector*, dari pengamatan ini terlihat bahwa *shear connector* mengalami kebengkokan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Pada uji tarik material *shear connector*, didapat data titik leleh *shear connector* d16 sebesar 403,74 MPa pada beban sebesar 31,03 kN dan pada saat benda uji nampak mengalami keruntuhan struktur, pembacaan data *strain gauge* menunjukkan angka beban rata-rata dari tiga benda uji d16 adalah 52,09 kN yang besarnya lebih besar dari hasil pengujian tarik material *shear connector*. Sehingga dimungkinkan, keruntuhan benda uji dan kebengkokan *shear connector* yang terjadi mengindikasikan telah terjadinya leleh pada *shear connector*.

3. Kegagalan struktur komposit dengan *shear connector* d22

Kegagalan struktur pada benda uji d22 cenderung terjadi secara tiba-tiba karena pecahnya beton terjadi seketika dengan terbelah tepat pada posisi *shear connector*. Seperti benda uji yang lain,

setelah pengujian selesai, dilakukan pula pembongkaran terhadap seluruh benda uji ini untuk melihat perilaku *shear connector*, dari pengamatan ini terlihat bahwa *shear connector* diperkirakan belum mengalami kebengkokan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Belum terjadi kebengkokan pada *shear connector* diameter 22 mm dengan panjang 110 mm

Pada uji tarik material *shear connector*, didapat data titik leleh *shear connector* d22 sebesar 384,26 MPa pada beban sebesar 42,5 kN dan pada saat benda uji nampak mengalami keruntuhan struktur, angka beban rata-rata dari tiga benda uji d22 adalah 25,3 kN yang besarnya lebih kecil dari hasil pengujian tarik material *shear connector*. Sehingga dimungkinkan, pada saat terjadinya keruntuhan benda uji belum terjadi leleh pada *shear connector*.

Fenomena beton terbelah seperti pada Gambar 7, terjadi pada seluruh benda uji dengan *shear connector* d22. Hal ini merupakan kegagalan struktur berupa keruntuhan tarik beton searah beban, yang mendahului lelehnya *shear connector*. Rincian perilaku kegagalan benda uji diatas menggambarkan bahwa walaupun dengan rasio l/d yang sama, *shear connector* belum tentu menunjukkan perilaku yang sama. Hal ini dimungkinkan karena sifat elastisitas *shear connector* bukan hanya dilihat dari panjang terhadap diameternya saja, namun juga harus dilihat dari panjang per diameter terhadap struktur keseluruhan. Serta dimungkinkan juga karena pengaruh luas bidang kontak *shear connector*

terhadap beton turut pula membantu dalam menahan beban.



Gambar 7. Beton terbelah memanjang pada posisi *shear connector*

Hubungan beban-*displacement*

Grafik beban – perpindahan diperoleh dari hasil pengolahan data pengujian dengan memasukkan nilai beban dalam satuan kN sebagai ordinat dan data *displacement* yang terjadi pada tiap beban dalam satuan mm sebagai absis. Data beban diperoleh melalui pembacaan *data logger* dan data *displacement* didapat dari pembacaan LVDT vertikal. Hasil pembacaan data beban – *displacement* hasil pengujian eksperimental ditampilkan pada Tabel 2, perilaku dan grafik hubungan antara beban dan *displacement* dijelaskan pada Gambar 8, 9, dan 10.

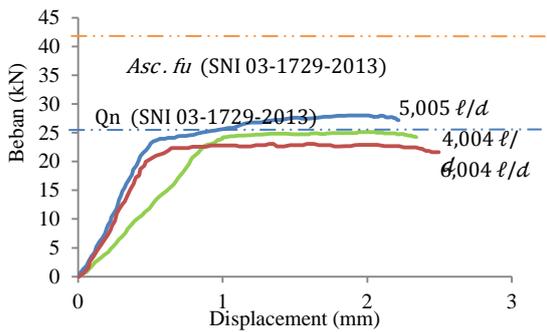
Dari grafik perbandingan beban – *displacement* untuk benda uji dengan *shear connector* berdiameter 10, 16, dan 22 mm pada Gambar 8, 9, dan 10, dapat diamati bahwa benda uji dengan rasio $l/d=5$ memiliki kapasitas beban yang lebih tinggi dengan nilai *displacement* yang lebih kecil dibandingkan dengan rasio $l/d=4$ dan $l/d=6$. Benda uji dengan rasio $l/d=6$ justru merupakan rasio dengan kapasitas beban terendah.

Tabel 2. Hasil pembacaan data beban – *displacement* hasil pengujian eksperimental

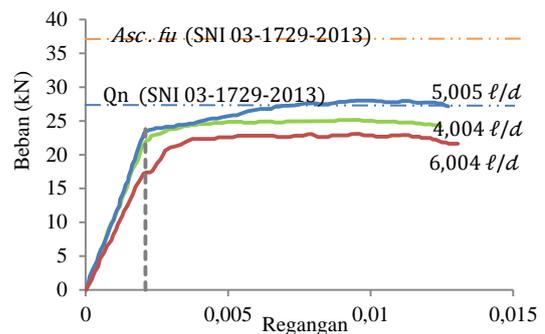
diameter stud	Kode benda uji	l/d	Eksperimental		Numerik	
			Pult (kN)	δ maks (mm)	Pult (kN)	δ maks (mm)
d10	d10-1	4,004	25,15	2,34	19,32	1,15
	d10-2	5,005	28,03	2,22	19,40	1,15
	d10-3	6,004	23,05	2,49	17,92	1,16
d16	d16-1	4,009	56,53	2,93	44,67	2,00
	d16-2	5,011	59,74	2,08	44,40	1,95
	d16-3	6,013	40,00	3,53	44,90	2,13
d22	d22-1	4,001	92,54	4,73	81,40	2,51
	d22-2	5,002	102,58	4,62	82,76	2,36
	d22-3	6,002	89,08	4,74	80,80	2,53

Tabel 3. Hasil pembacaan data beban – regangan hasil pengujian eksperimental

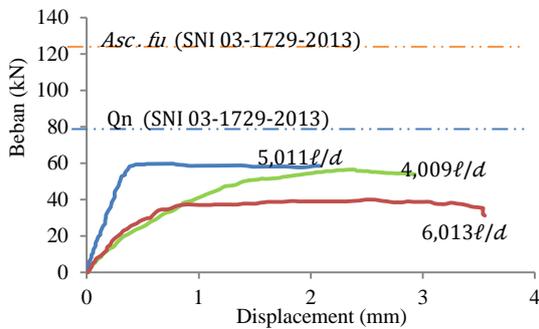
d stud	ℓ/d	Eksperimental			Numerik		
		ε _{yield}	P _{yield} (kN)	P _{ult} (kN)	ε _{yield}	P _{yield} (kN)	P _{ult} (kN)
d10	4,004	0,002	22,0	25,2	0,002	10,5	19,3
	5,005	0,002	23,9	28,0	0,002	10,7	19,4
	6,004	0,002	17,4	23,1	0,002	9,9	17,9
d16	4,009	0,002	47,3	56,5	0,002	19,8	44,7
	5,011	0,002	58,5	59,7	0,002	26,5	44,4
	6,013	0,002	34,6	40,0	0,002	21,1	44,9
d22	4,001	0,002	89,0	92,5	0,002	38,8	81,4
	5,002	0,002	97,3	102	0,002	45,1	82,8
	6,002	0,004	88,9	89,1	0,002	35,5	80,8



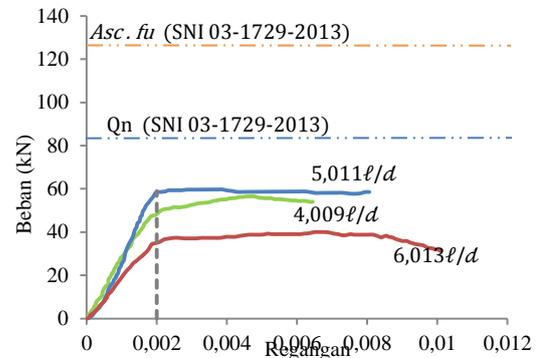
Gambar 8. Grafik perbandingan beban - displacement benda uji dengan shear connector d10



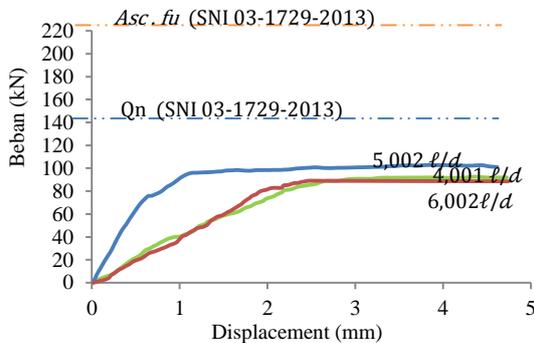
Gambar 11. Beban-regangan benda uji dengan shear connector d10



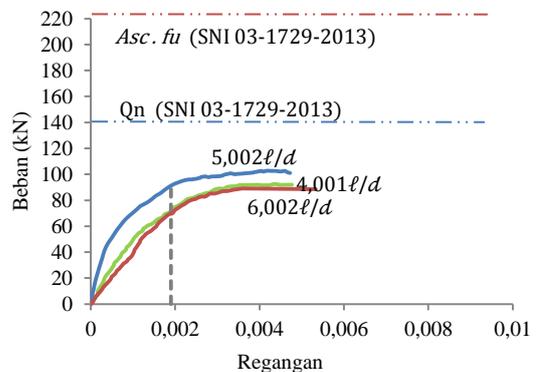
Gambar 9. Grafik perbandingan beban-displacement benda uji dengan shear connector d16



Gambar 12. Beban-regangan benda uji dengan shear connector d16



Gambar 10. Perbandingan beban - displacement benda uji dengan shear connector d22



Gambar 13. Beban-regangan benda uji dengan shear connector d22

Hubungan beban - regangan

Hubungan beban dan regangan menunjukkan besarnya regangan yang terjadi pada beban tertentu. Regangan diamati dengan memasang *strain gauge* pada *shear connector*. Pengamatan regangan tulangan dapat membuktikan seberapa besar peran *shear connector* dalam menerima beban yang ditransfer dari profil baja. Hasil pembacaan data beban-regangan hasil pengujian eksperimental ditampilkan pada Tabel 3.

Dari grafik perbandingan beban – regangan untuk benda uji dengan *shear connector* berdiameter 10 mm pada Gambar 11 dan grafik perbandingan beban – regangan untuk benda uji dengan *shear connector* berdiameter 16 mm pada Gambar 12, dapat diamati bahwa benda uji dengan rasio $l/d=5$ memiliki kapasitas beban yang lebih tinggi dibandingkan dengan rasio $l/d=4$ dan 6, dan benda uji dengan rasio $l/d=6$ justru merupakan rasio dengan kapasitas beban terendah.

Hal ini dimungkinkan karena pengaruh kelangsingan material, sehingga pada benda uji dengan rasio $l/d=6$ memiliki nilai kapasitas beban yang rendah karena terlalu langsing jika dibandingkan dengan rasio l/d yang lain.

Sedangkan berdasarkan grafik perbandingan beban – regangan untuk benda uji dengan *shear connector* berdiameter 22 mm pada Gambar 13, grafik tidak memiliki daerah linier dan *landing* yang jelas, maka tegangan leleh didefinisikan sebagai tegangan yang menghasilkan regangan permanen sebesar 0,2%, tegangan leleh ditentukan dengan menarik garis *offset* sebesar 0,2% dari regangan dimulai dari titik 0, metode ini disebut sebagai *offset-strain*.

Pada benda uji d22-1 dengan rasio l/d sebesar 4,001 titik leleh terjadi pada beban 179,017 kN yang menghasilkan regangan sebesar 0,0036, dan beban puncak terjadi pada 180,476 kN. Pada benda uji d22-2 dengan rasio l/d sebesar 5,002 titik leleh terjadi pada beban 180,476 kN yang menghasilkan regangan sebesar 0,0030, dan beban puncak terjadi pada 205,328 kN. Pada benda uji d22-3 dengan rasio l/d sebesar 6,002 titik leleh terjadi pada beban 184,698 kN yang menghasilkan regangan sebesar 0,0043, dan beban puncak terjadi pada 189,477 kN.

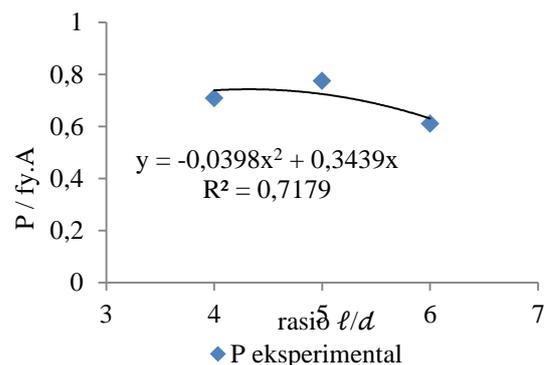
Pada pengujian kuat tarik tulangan yang sebelumnya telah dilakukan, diperoleh hasil kuat tarik tulangan polos diameter 22 mm untuk material *shear connector* adalah 384,262 MPa. Modulus elastisitas baja ditetapkan 200.000 MPa. Sehingga diperoleh regangan leleh untuk *shear connector* diameter 22 mm adalah sebesar

$(384,262 \text{ MPa} / 200.000 \text{ MPa}) = 0,001921$. Berdasarkan perbandingan dari nilai regangan pada uji tarik tulangan dan nilai regangan pada pengujian benda uji, dapat dikatakan bahwa nilai regangan benda uji lebih besar dibandingkan dengan nilai regangan uji tarik tulangan, sehingga dengan nilai regangan yang besar tersebut dimungkinkan kegagalan struktur terjadi karena beton sudah mengalami leleh terlebih dahulu sebelum *shear connector* leleh, karena beton juga terbelah pada posisi *shear connector* pada saat terjadi beban puncak. Beton yang sudah leleh terlebih dahulu sebelum *shear connector* leleh juga ditunjukkan oleh bentuk grafik yang garis awalnya naik secara tidak linear.

Nilai kapasitas beban tertinggi pada benda uji dengan *shear connector* diameter 22 mm ini ada pada benda uji d22-2 dengan rasio l/d sebesar 5,002, kemudian nilai tertinggi kedua ada pada benda uji d22-3 dengan rasio l/d sebesar 6,002, dan nilai kapasitas beban terendah ada pada benda uji d22-1 dengan rasio l/d sebesar 4,001.

Nilai rasio l/d optimum

Pada SNI 03-1729-2013 mencantumkan bahwa syarat minimum panjang *shear connector* adalah empat kali diameternya. Pada penelitian ini diamati pengaruh *shear connector* dengan panjang 4, 5, dan 6 kali diameternya yang masing-masing rasio panjang berbanding diameter memberikan pengaruh perilaku yang berbeda pada struktur, seperti yang sudah dibahas pada sub-bab sebelumnya.



Gambar 14. Grafik regresi perbandingan nilai kapasitas beban antara perhitungan rumus dan pengujian eksperimental untuk masing-masing rasio l/d

Dari grafik regresi pada Gambar 14 didapat Persamaan 2 berupa persamaan polinomial, yaitu :

$$\eta = -0,0398\xi^2 + 0, \quad (2)$$

dengan: η adalah $P / (f_{y.A})$ dan ξ adalah rasio l/d

nilai optimum didapat dari ξ saat $\eta'=0$

$$\frac{d\eta}{d\xi} = 0$$

$$\eta' = 2(-0,0398)\xi + 0,3439$$

$$\eta' = -0,0796\xi + 0,3439$$

$$\xi = \frac{0,3439}{0,0796} = 4,3$$

ξ merupakan rasio ℓ/d dimana $\ell/d = 4,3$ dan ℓ merupakan 4,3 d. Dari perhitungan diatas dapat dilihat bahwa nilai rasio ℓ optimum adalah 4,3 d.

Mencari persamaan baru

Pada SNI 03-1729-2013, persamaan untuk mencari kekuatan *stud shear connector* ditentukan oleh luas permukaannya, seperti dinyatakan pada Persamaan 1 diatas, yaitu:

$$Q_n = 0,5Asc\sqrt{f'c \cdot Ec} \leq Asc \cdot f_u$$

Dimana Q_n adalah kekuatan nominal satu *stud* (N), Asc adalah luas penampang *shear connector stud* berkepala (mm^2), Ec adalah modulus elastisitas beton, $f'c$ adalah kekuatan tekan beton (MPa), f_u adalah tegangan putus *shear connector* (MPa).

dimana persamaan untuk mencari Asc adalah

$$Asc = \frac{\pi}{4} x d^2 \quad (3)$$

Pada Persamaan 3 tersebut, dinyatakan bahwa luas bidang kontak berpengaruh pada kuat nominal *shear connector*, luas bidang kontak atau luas permukaan selama ini hanya didasarkan pada diameter *stud*, maka untuk mencari persamaan yang dapat memprediksi kuat nominal *stud shear connector* dengan pengaruh panjang dari *stud*, perlu dimasukkan *variable* rasio (ℓ/d) kedalam Persamaan 2, yaitu persamaan yang sebelumnya telah didapat dari regresi polinomial.

$$\eta = -0,0398\xi^2 + 0,3439\xi$$

$$\text{dengan: } \eta = P / (fy.A)$$

$$\xi = \text{rasio } \ell/d$$

maka

$$\frac{P}{fy.A} = -0,0398 \left(\frac{\ell}{d}\right)^2 + 0,3439 \left(\frac{\ell}{d}\right)$$

$$\frac{P}{fy \cdot (0,25 \cdot \pi \cdot d^2)} = -0,0398 \left(\frac{\ell}{d}\right)^2 + 0,3439 \left(\frac{\ell}{d}\right)$$

$$\frac{4P}{fy \cdot \pi \cdot d^2} = -0,0398 \frac{\ell^2}{d^2} + 0,3439 \frac{\ell d}{d^2}$$

$$P = (-0,0398 \ell^2 + 0,3439 \ell d) \frac{fy \cdot \pi}{4}$$

$$P = (-0,031 \ell + 0,270 d) \ell \cdot fy$$

$$P = (0,270 d - 0,031 \ell) \ell \cdot fy \dots (4)*$$

*Persamaan ini dirumuskan untuk mencari nilai kuat nominal *stud shear connector* tanpa kepala

Pada persamaan 4 dapat diamati bahwa suku pertama dari persamaan tersebut mengandung *variable* diameter *shear connector*, seperti halnya persamaan SNI 03-1729-2013 yang menyatakan bahwa besarnya kapasitas beban *shear connector* dipengaruhi oleh luasan *shear connector*, pada suku pertama pada persamaan ini hal tersebut juga berlaku, jika persamaan ini hanya terdiri dari suku pertama yang mengandung *variable* diameter *shear connector* (d), maka pada setiap peningkatan nilai diameter *shear connector* juga akan selalu diiringi dengan peningkatan nilai kapasitas beban.

Sedangkan suku kedua dari persamaan tersebut mengandung *variable* panjang *shear connector* (ℓ) dan angka pada suku tersebut bernilai negatif, hal tersebut merupakan penanda bahwa *variable* panjang *shear connector* (ℓ) merupakan suatu kerugian bagi struktur komposit yang menggunakan *shear connector* karena panjang *shear connector* (ℓ) justru menjadi faktor pengurang nilai kapasitas beban, karena *shear connector* yang terlalu panjang dapat menyebabkan perilaku material menjadi ulet sehingga mengakibatkan defleksi yang besar.

Kesimpulan

Berdasarkan seluruh pengujian, analisis data, dan pembahasan yang dilakukan dalam penelitian, maka dapat diperoleh kesimpulan bahwa panjang *shear connector* dapat mempengaruhi kelangsingan batang *shear connector*. Semakin kecil angka kelangsingan suatu batang, akan semakin *rigid* atau kaku batang tersebut. Sebaliknya, semakin besar angka kelangsingannya, batang tersebut akan mudah melentur. Batang yang terlalu langsing juga menyebabkan defleksi terlalu besar.

Pada pengujian eksperimental benda uji dengan *shear connector* berdiameter 10 mm, 16 mm, dan 22 mm, nilai kapasitas beban tertinggi berturut-turut adalah benda uji dengan rasio ℓ/d 5, 4, kemudian 6. Pada perhitungan dengan menggunakan regresi polinomial, nilai optimum ℓ/d adalah pada rasio 4,3. Nilai optimum didapatkan dengan cara menurunkan persamaan dari kurva regresi, sebagai absis adalah rasio ℓ/d dan ordinat adalah $P/fy.A$. Kemudian nilai optimum didapat dari rasio ℓ/d saat turunan $P / (fy.A) = 0$.

Perhitungan pada regresi polinomial diatas menunjukkan nilai optimum l/d pada rasio 4,3 semakin mempertegas hasil pengujian eksperimental bahwa nilai optimum l/d ada pada kisaran rasio 5, hal ini dimungkinkan pada rasio l/d 4, *shear connector* masih bersifat lebih kaku dibandingkan dengan *shear connector* dengan rasio l/d yang lebih tinggi sehingga terjadi leleh dengan lebih cepat, sedangkan meningkatnya rasio l/d dari nilai 4 ke 5 terjadi peningkatan panjang batang yang berpengaruh pada meningkatnya fleksibilitas dan kekuatan material.

Pada pengujian eksperimental benda uji dengan *shear connector* diameter 10 mm dan 16 mm, kegagalan struktur terjadi karena lelehnya *shear connector*, sedangkan pada uji dengan *shear connector* diameter 22 mm terjadi kegagalan struktur berupa keruntuhan beton. Hal ini terjadi karena kegagalan struktur pada benda uji d22 berupa keruntuhan tarik beton searah beban, yang mendahului lelehnya *shear connector*. Didapatkan Persamaan baru untuk mencari nilai kuat nominal *stud shear connector* yang memperhitungkan pengaruh panjang *shear connector* adalah:

$$P = (0,270 d - 0,031 l)l.fy$$

Persamaan yang diperoleh lebih konservatif sehingga cukup aman jika digunakan untuk keperluan *design*.

Saran

Untuk menindaklanjuti penelitian ini kiranya perlu dilakukan beberapa koreksi yang diperlukan antara lain: perlu dilakukan penelitian lanjutan pada rasio l/d yang lebih detail dan lebih bervariasi, untuk penelitian selanjutnya dapat dicoba menggunakan diameter tulangan yang lebih bervariasi. Untuk penelitian selanjutnya dapat dipertimbangkan menggunakan tulangan ulir sebagai material *shear connector*. Untuk penelitian selanjutnya dapat dicoba membuat permodelan numerik dengan memodelkan las sudut seperti halnya studi eksperimental. Perlu ditambah variasi kuat tekan beton pada penelitian selanjutnya.

Daftar Pustaka

Dowling, *et al.* (1992), *Constructional steel design*. Elsevier Science Publishers.

Galambos, T. V. (Ed.). (1998). *Guide to stability design criteria for metal structures*. John Wiley & Sons.

Gattesco & Giuliani. (2001). Experimental Study on Stud Shear Connector Subjected to Cyclic Loading. *Journal of Constructional Steel Research*, University of Trieste, Italy.

Lahamukang, K. M., Pah, J. J., & Messah, Y. A. (2014). Kuat Geser Komposit Baja-Beton dengan Variasi Bentuk Penghubung Geser Ditinjau dari Uji Geser Murni. *Jurnal Teknik Sipil*, 3(1), 45-62.

Liu, *et al.* (2008). Numerical and Experimental Study On Pull-out Behaviour of Stud Shear Connector Embedded in Concrete, *Dissertation*, Tongji University, China: Department of Bridge Engineering.

Mursid, M. (2013). Modifikasi Perencanaan Struktur Gedung Perkantoran Telkomsel di Surabaya Barat Menggunakan Baja-Beton Komposit. *Jurnal Teknik POMITS*, 1(1), 1-6.

Nn. (1980). *AS 2327 (Part I)*. Australia: Australian Standard.

Nn. (2013). SNI 03-1729-2013, *Tata cara perencanaan struktur baja untuk bangunan gedung*, Indonesia.

Pashan. (2006). Behaviour of Channel Shear Connectors: Push-Out Tests, *Thesis*, Canada: University of Saskatchewan.

Pavlovic. (2013). Resistance of Bolted Shear Connectors In Prefabricated Steel-Concrete Composite Decks, *Doctoral Dissertation*, Serbia: Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade,

Shariati, M., Sulong, N. R., Suhatri, M., Shariati, A., Khanouki, M. A., & Sinaei, H. (2012). Behaviour of C-shaped angle shear connectors under monotonic and fully reversed cyclic loading: An experimental study. *Materials & Design*, 41, 67-73.

Salmon & Johnson. (1986). *Steel structures: design and behaviour (5th ed.)*. Madison: University of Wisconsin.

Tumimomor, M. E., Dapas, S. O., & Mondoringin, M. R. (2016). Analisis Penghubung Geser (Shear Connector) pada Balok Baja dan Pelat Beton. *Jurnal Sipil Statik*, 4(8), 461-470.

Zuhri. (2011) *Sistim struktur pada bangunan bertingkat*. Klaten: Yayasan Humaniora.