

Pengaruh Penambahan Tulangan Tekan Eksternal terhadap Perilaku Struktur Beton Bertulang

Nuroji

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH., Semarang. E-mail: nuroji@lecturer.undip.ac.id

Abstrak

Daktilitas struktur merupakan syarat yang harus dipenuhi pada struktur tahan gempa dimana struktur mampu berdeformasi besar pasca leleh tanpa runtuh. Kondisi demikian hanya dapat terjadi jika struktur direncanakan berdasarkan kaidah *strong column weak beam* dimana ketika terjadi gempa kuat sendi plastis hanya boleh terjadi pada balok di muka kolom kecuali pada kolom lantai dasar. Empat benda uji balok 180 mm×250 mm×2400 mm ditumpu sendi rol dengan jarak antar tumpuan 2250 mm dikenakan pembebanan *four point bending* dengan dimana jarak beban ke beban 630 mm. Tipe I terdiri dari dua benda uji dengan kuat tekan $f'_c=47,280$ MPa dan rasio tulangan dan $\rho=26,00\%$ ρ_b dan dua lainnya adalah tipe II dengan $f'_c=38,168$ MPa dan $\rho=59,02\%$ ρ_b . Masing-masing tipe satu balok untuk benda uji kontrol dan satu lainnya untuk benda uji dengan penambahan pelat baja dengan lebar 50 mm dan tebal 5 mm di permukaan beton tekan. Peningkatan kapasitas, kekakuan dan daktilitas untuk tipe I masing-masing sebesar 27,50 %; 32,02 % dan 103,67 %, sedangkan untuk tipe II peningkatannya masing-masing sebesar 16,30 %; 0,77 % dan 21,24 %. Semakin tinggi rasio luas pelat dan luas tulangan tarik A_p/A_s , semakin besar pengaruhnya dalam peningkatan kapasitas, kekakuan dan daktilitas penampang beton.

Kata-kata Kunci: Pelat baja, Tulangan eksternal, Kapasitas, Kekakuan, dan Daktilitas.

Abstract

The ductility requirements of a structure are defined by the degree of deformation after steel yielding induced by the earthquake responses. Such a condition can only be achieved when the structure is designed based on the *strong column weak beam* philosophy, where the plastic hinges only form in the beam at the column face due to seismic force, except the first floor. Four 180 mm×250 mm×2400 mm beams supported by hinge and roll with 2250 mm span subjected to *four-point bending*, where load to load span is 630 mm. Type I consists of two specimens with concrete compressive strength $f'_c=47.280$ MPa and reinforcing steel ratio $\rho=26,00\%$ ρ_b , and two others are type II with concrete compressive strength $f'_c=38.168$ MPa, and reinforcing steel ratio $\rho=59,02\%$ ρ_b . Each types one beam is the controlling specimen, and the other one is the specimen that has to be attached steel plate with 50 mm width and 5 mm thickness on compression concrete fiber. Increased capacity, stiffness, and ductility of type I are 27.50 %, 32.02 %, and 103.67 % respectively, while the increase of type II is 16.30 %, 0.77 %, and 21.24 % respectively. The higher the ratio of the steel plate area and the tensile reinforcement area A_p/A_s , the greater the effect on the increasing capacity, stiffness, and ductility to the concrete section.

Keywords: Steel plate, External bar, Capacity, Stiffness, and Ductility.

1. Pendahuluan

Dalam konsep desain struktur tahan gempa, ketika struktur menerima beban gempa kuat, struktur bisa saja rusak parah yang kemungkinan tidak dapat dikembalikan lagi fungsinya. Akan tetapi keselamatan jiwa manusia harus menjadi prioritas dalam desain, sehingga struktur tidak boleh mengalami runtuh. Kondisi demikian hanya dapat dipenuhi jika struktur dapat berperilaku *daktail* dimana ketika terjadi gempa kuat struktur masih mampu mengalami deformasi pasca leleh yang cukup besar. Untuk mendapatkan perilaku *daktail* pada struktur beton bertulang khususnya untuk bangunan gedung, maka struktur harus didesain dengan konsep *strong column weak beam* dimana sendi plastis hanya boleh terjadi pada balok di muka kolom kecuali kolom di lantai dasar.

Untuk menjamin struktur mampu berdeformasi lateral secara baik pasca leleh, maka balok harus dapat berperilaku *daktail*, dimana sendi plastis pada balok mampu mengalami deformasi besar tanpa adanya reduksi kekuatan secara signifikan (Tahnat dkk, 2020). Rendahnya kapasitas regangan pada beton sering menjadi kendala dalam peningkatan *daktilitas* pada struktur beton bertulang. Atas dasar alasan tersebut, maka banyak peneliti terdahulu melakukan studi eksperimental yang bertujuan untuk meningkatkan *daktilitas* lentur pada balok beton bertulang.

Priastiwi dkk (2014) melakukan penelitian eksperimental dengan menambahkan tulangan pengekan berbentuk persegi pada daerah tekan beton yang ditujukan untuk meningkatkan *daktilitas* lentur pada balok. Dari pengujian eksperimental

menunjukkan adanya peningkatan *daktilitas* balok dalam menerima lentur yang ditandai dengan peningkatan regangan beton dan kurvatur balok, bahkan pada penampang dengan rasio tulangan tarik yang besar perilaku getas dapat dihindari. Studi tentang tulangan pengekan juga dilakukan oleh Jeffry dan Hadi (2008) dengan mengamati respon balok *over-reinforced* dengan berbagai bentuk kekangan sengkang. Pengekangan pada daerah tekan dengan menggunakan sengkang juga dilakukan oleh Kwak dkk (2002), Han dkk (2015) dan Krishna dkk (2018) yang menganalisa pengaruh bentuk dan konfigurasi sengkang. Penelitian menunjukkan bahwa baik momen retak dan kapasitas momen lentur meningkat signifikan. Pengujian dilakukan pada balok *under-reinforced* akibat lentur murni. Delalibera dan Giongo (2008) dan Mohamed (2018) melakukan penelitian serupa dengan menambahkan tulangan sengkang persegi yang ditempatkan pada daerah tekan beton dengan tujuan untuk meningkatkan *daktilitas* balok beton bertulang dengan tulangan *over-reinforced*.

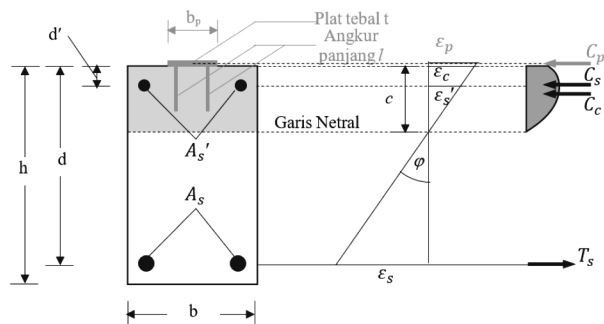
Oscar Fithrah Nur (2009), Ahmed dkk (2007) dan Ali dkk (2015) menyatakan bahwa penambahan tulangan tekan pada balok beton bertulang dapat meningkatkan *daktilitas* kurvatur penampang beton bertulang. Peningkatan kekuatan pada daerah tekan penampang balok mengakibatkan tulangan tarik mencapai tegangan leleh lebih awal yang berakibat pada peningkatan kurvatur.

Ahmed dkk (2007) melakukan penelitian dengan membandingkan tiga perlakuan penampang balok lentur yaitu penampang dengan tulangan pengekan berbentuk *helical* pada daerah tekan dan penampang dengan tulangan pengekan persegi pada daerah tekan keduanya merepresentasikan kekangan internal pada beton tekan serta penampang dengan penambahan pelat baja di permukaan beton tekan yang merupakan bentuk pengekan eksternal. Dalam penelitiannya disimpulkan bahwa pengekan eksternal dengan memasang pelat baja pada permukaan tekan balok dapat berfungsi seefektif pengekan internal jika dilakukan dengan pemasangan yang benar. Penelitian pengekan eksternal dengan memasang pelat baja terangkur (*bolted plates*) di permukaan beton tekan pada balok lentur juga dilakukan oleh Sarhan dkk (2017), dalam penelitiannya menyebutkan bahwa balok yang diberi pelat baja terangkur (*bolted plates*) di permukaan beton tekan menunjukkan *daktilitas* yang jauh lebih besar dibanding penampang biasa tanpa pelat.

Alasadi dkk. (2020a) dan Alasadi dkk (2020b) dalam penelitiannya menggunakan pelat terangkur pada daerah beton tekan (*bolted compression plates*) untuk meningkatkan *daktilitas*. Pengukuran pelat baja dilakukan dengan cara menanam angkur baut pada saat pengecoran balok, setelah beton mengeras pelat baja yang telah dilubangi dipasang baut mur untuk dikencangkan pada angkur. Hasil studi eksperimental ini menunjukkan bahwa penggunaan *bolted compression plates* memberikan efek pengekan pada beton yang dapat mengurangi retak horisontal dan *spalling* pada bagian selimut beton. Perbaikan

balok *over reinforced* dengan memberikan pelat baja dapat meningkatkan *daktilitas*, kapasitas dan kekakuan lentur.

Gambar 1 menunjukkan diagram regangan pada penampang balok beton bertulang yang mengalami lentur. Dengan menganggap distribusi regangan berperilaku linier, maka posisi tulangan akan berpengaruh pada perannya dalam menerima gaya. Pada kasus *under reinforced* diakui dapat memberikan perilaku keruntuhan daktail. Kelelahan terjadi pada tulangan tarik dimana regangan tulangan tarik melampaui regangan lelehnya $\epsilon_s > \epsilon_y$, di sisi lain terbatasnya kapasitas regangan *ultimate* beton ϵ_c yang dalam desain dibatasi hanya 0,003 (SNI 2847) menyebabkan jarak garis netral ke serat tekan terluar c menjadi kecil. Kecilnya nilai c bukan hanya memperkecil area beton tekan saja, tetapi juga tulangan tekan menjadi tidak efektif bahkan ketika regangan tulangan tarik terus meningkat hingga garis netral di atas batas selimut beton d' yaitu $c < d'$ tulangan tekan dapat berubah menjadi tarik. Pada kondisi ini gaya tekan pada penampang balok didominasi oleh gaya tekan beton C_c , dengan luas area tekan yang kecil beton akan mengalami *over stress* dan beton mengalami pecah sebelum tulangan tarik mengembangkan regangannya secara maksimal. Pada kasus *over reinforced*, regangan beton ϵ_c mencapai *ultimate* sebelum tulangan tarik mengalami leleh yang berakibat pada keruntuhan tekan yang bersifat *brittle*. Keruntuhan ini sangat dihindari dalam desain struktur tahan gempa, sehingga dalam desain struktur tahan gempa rasio tulangan tarik balok maksimum tidak boleh melebihi 75 % dari rasio tulangan *balance* (SNI 2847).



Gambar 1. Diagram regangan dan tegangan pada penampang balok beton bertulang

Penambahan pelat baja sebagai tulangan tekan eksternal pada balok beton bertulang ditujukan untuk memberikan gaya tekan C_p pada penampang balok yang berfungsi untuk mereduksi laju peningkatan regangan tekan beton akibat meningkatnya momen, sehingga keruntuhan beton dapat ditunda dan tulangan tarik dapat meregang lebih besar. Meningkatnya regangan tulangan tarik akan berakibat pada meningkatnya kurvatur j dan lengan momen yaitu jarak antara gaya Tarik T_s dan resultante gaya tekan $C_c + C_s + C_p$ yang berarti meningkatkan *duktilitas* dan kapasitas moment penampang.

Paper ini membahas pengaruh penambahan pelat baja pada serat tekan terluar terhadap perilaku penampang beton bertulang dalam menerima lentur. Penambahan pelat baja pada permukaan beton tekan dalam penelitian ini ditujukan untuk melakukan pengembangan desain yang memasukkan pelat baja sebagai tulangan tekan eksternal dan menjadi bagian dari tulangan tekan secara keseluruhan. Pemasangan pelat baja dilakukan dengan melakukan pengelasan antara pelat dan angkur untuk menghindari terjadinya slip antara pelat dan beton akibat adanya *gap* pada lubang pelat, selanjutnya pelat baja yang telah dilas dengan angkur dicor bersamaan pada saat pengecoran balok.

2. Metodologi Penelitian

Pengujian material ditujukan untuk mengetahui mutu beton dan baja yang akan digunakan dalam penelitian ini. Pengujian beton dilakukan dengan cara mengambil sampel silinder beton yang dilakukan pada saat pengecoran sebanyak 5 sampel untuk masing-masing tipe, selanjutnya silinder-silinder beton dilakukan uji kuat tekan pada umur 28 hari bersamaan dengan pengujian lentur balok sesuai dengan tipenya untuk mendapatkan nilai kuat tekannya. Nilai kuat tekan beton f'_c merupakan hasil rata-rata dari pengujian tekan 5 silinder seperti terlihat pada **Tabel 1**.

Pengujian kuat tarik baja dilakukan untuk mengetahui mutu masing-masing material baik tulangan maupun pelat baja. Uji tarik dilakukan dengan mengambil tiga sampel untuk masing-masing material yaitu tulangan dan

pelat. Pengujian tarik baja dilakukan dengan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) sampai beban ultimate. Tegangan leleh f_y dan tegangan ultimate f_{ult} masing-masing material diambil dari nilai rata-rata hasil pengujian tiga sampel seperti disajikan dalam **Tabel 2**.

Empat balok beton bertulang berdimensi 180 mm × 250 mm dengan panjang benda uji 2400 mm dilakukan pengujian lentur. Tipe I terdiri dari dua benda uji balok yang diberi tulangan 2D16 dan 2D10 masing-masing sebagai tulangan tarik dan tulangan tekan yang merupakan representasi penampang dengan rasio tulangan kecil yaitu 0,00949 (26,00 % ρ_b). Sedangkan tipe II, dua balok lainnya diberi tulangan 4D16 dan 2D10 masing-masing sebagai tulangan tarik dan tulangan tekan yang merupakan representasi penampang dengan rasio tulangan yang lebih besar yaitu 0,01899 (59,02 % ρ_b) meskipun masih dalam rentang *under-reinforced*. Dua benda uji dari tipe yang sejenis dibuat secara bersamaan dalam satu kali campuran beton untuk menjamin keduanya mempunyai kuat tekan beton yang sama. Masing-masing tipe, satu benda uji berfungsi sebagai kontrol sedangkan benda uji lainnya diberi perlakuan dengan penambahan pelat baja sebagai tulangan tekan eksternal. Pelat baja dengan tebal 5 mm dan lebar 50 mm dengan panjang 1500 mm ditempatkan di permukaan beton tekan secara memanjang dan simetris terhadap tengah bentang. Sebelum pengecoran benda uji pelat baja dilas terlebih dahulu dengan dua buah angkur dari baja tulangan diameter 8 mm yang tertanam dalam beton dengan kedalaman 80 mm, angkur dipasang setiap jarak 100 mm arah memanjang balok. Untuk menghindari keruntuhan geser, semua benda uji diberi tulangan geser Ø 8mm – 150 mm. Bentuk, dimensi dan penulangan untuk masing-masing penampang balok seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**. Sedangkan keterangan detail penampang disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 1. Hasil pengujian kuat tekan beton

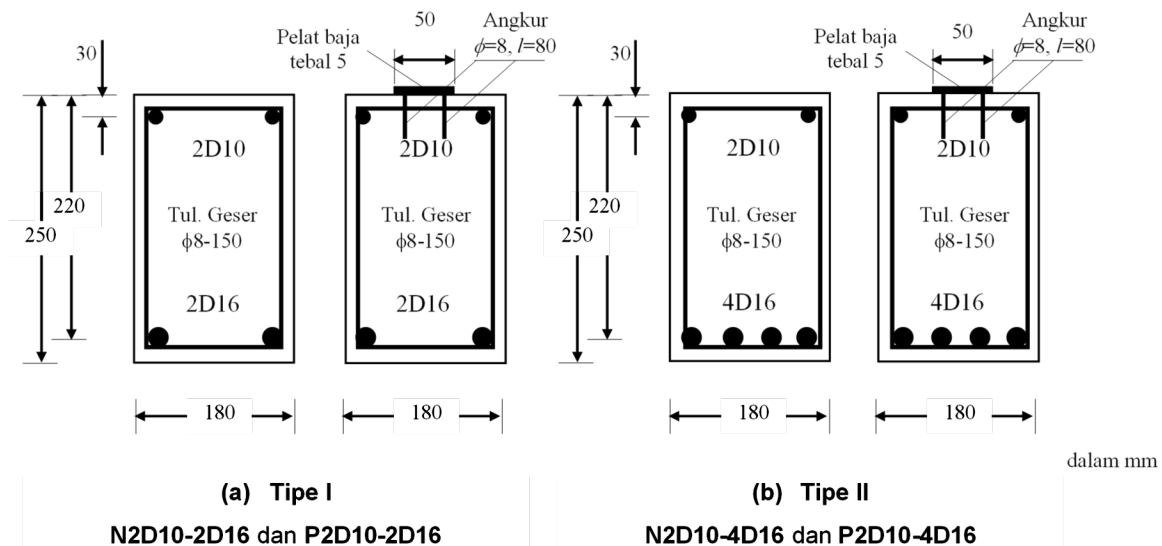
No	Tipe	Kuat tekan f'_c (Mpa)
1	Tipe I	47.280
2	Tipe II	38.168

Tabel 2. Hasil pengujian baja tulangan dan pelat baja

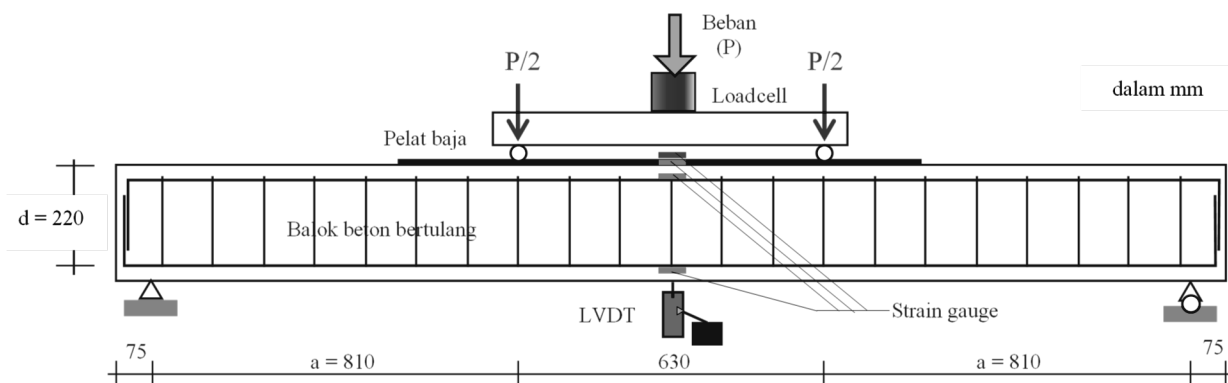
No	Tulangan / Pelat baja	Diameter terukur (mm)	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Luas (mm ²)	f_y (MPa)	f_{ult} (MPa)	Keterangan
1	Ø8 (Tulangan Polos)	6.86	-	-	36.92	465.19	682.18	Tulangan geser
2	D10 (Tulangan Ulir)	8.67	-	-	58.99	477.42	666.63	Tulangan tekan
3	D16 (Tulangan Ulir)	15.47	-	-	188.04	448.48	657.65	Tulangan tarik
4	Pelat baja	-	5.00	50.00	250.00	368.45	404.75	Tulangan tekan eksternal

Tabel 3. Keterangan detail penampang

No	Tipe	Nama Benda Uji	b (mm)	h (mm)	d (mm)	A_s' (mm ²)	A_s (mm ²)	f'_c (MPa)	ρ	Pelat
1	Tipe I	N 2D10-2D16	180	250	220	2D10 (117.98)	2D16 (376.08)	47.280	26,00 % ρ_b	-
2	Tipe I	P 2D10-2D16	180	250	220	2D10 (117.98)	2D16 (376.08)	47.280	26.00 % ρ_b	tebal = 5 mm, lebar = 50 mm
3	Tipe II	N 2D10-4D16	180	250	220	2D10 (117.98)	4D16 (752.17)	38.168	59,02 % ρ_b	-
4	Tipe II	P 2D10-4D16	180	250	220	2D10 (117.98)	4D16 (752.17)	38.168	59.02 % ρ_b	tebal = 5 mm, lebar = 50 mm



Gambar 2. Nomenklatur penampang balok



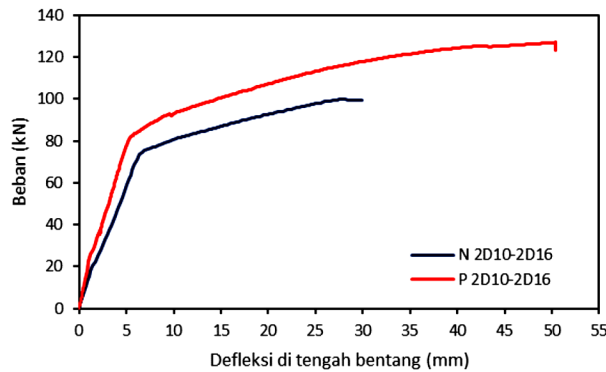
Gambar 3. Setup pengujian

Semua benda uji balok dengan panjang 2400 mm ditumpu dengan tumpuan sendi dan roll pada masing-masing ujung dengan jarak antar tumpuan 2250 mm. Balok dikenakan sistem pembebanan *four point bending* untuk mendapatkan perilaku lentur murni, dimana jarak dari beban ke beban sebesar 630 mm secara simetris. Untuk menjamin perilaku keruntuhan benda uji dalam keruntuhan lentur, maka *span to depth ratio* a/d untuk semua benda uji diambil tidak boleh kurang dari 2,5 (ASCE-ACI Committee 445,1998). Pada penelitian ini a/d ditentukan sebesar 3,68, dimana a adalah jarak dari tumpuan ke beban terdekat dan d adalah tinggi efektif balok yang diukur dari jarak tulangan tarik ke serat tekan terluar. Pengujian lentur pada benda uji dilakukan dengan mengenakan pembebanan statis secara bertahap dengan sistem kendali beban (*load control*) hingga mencapai runtuh. Beban diberikan melalui *hydraulic jack* yang ditempatkan di tengah bentang dan dikendalikan oleh operator. *Load Cell* dipasang tepat di bawah *stroke* dari *hydraulic jack* untuk mengukur beban secara elektrik. Sedangkan *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT) ditempatkan di bawah balok tepat di tengah bentang untuk mengukur lendutan balok. Beberapa *strain gauge* diperlukan dalam penelitian ini, dua

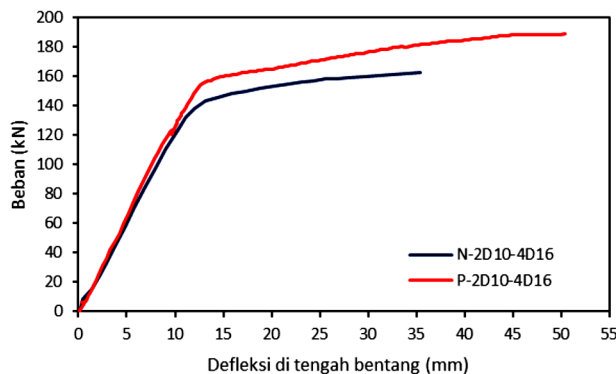
strain gauge ditempatkan di permukaan atas beton dan pelat baja di tengah bentang yang masing-masing untuk mengukur regangan beton tekan dan pelat baja, sedangkan dua *strain gauge* lainnya ditempatkan di permukaan tulangan tarik dan tulangan tekan yang tertanam di dalam beton untuk mengukur regangan pada kedua tulangan tersebut. Untuk benda uji balok kontrol *strain gauge* ditempatkan pada permukaan beton tekan, tulangan tekan dan tulangan tarik. Semua alat ukur dihubungkan ke data logger yang dikendalikan melalui komputer untuk merekam dan menyimpan data. Pemasangan *Load Cell*, *LVDT* dan *Strain gauge* dalam pengujian eksperimental secara skematis disajikan dalam bentuk gambar setup pengujian seperti terlihat pada Gambar 3.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian keempat benda uji dipresentasikan dalam bentuk grafik hubungan beban – perpindahan untuk mengetahui respon benda uji seperti terlihat pada Gambar 4 dan Gambar 5. Masing-masing gambar menyajikan hubungan antara beban dan perpindahan dua penampang beton bertulang yaitu balok kontrol dan balok dengan penambahan pelat baja untuk tipe I



Gambar 4. Grafik hubungan beban – defleksi di tengah bentang benda uji tipe I (N 2D10-2D16 dan P 2D10-2D16)

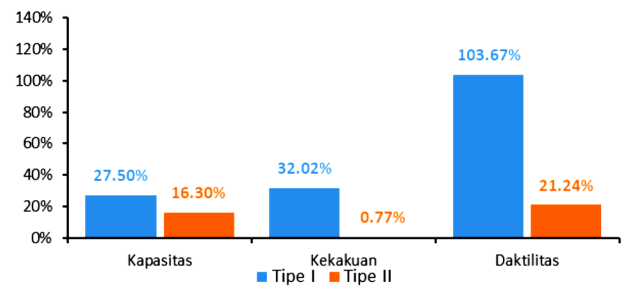


Gambar 5. Grafik hubungan beban – defleksi pada tengah bentang benda uji tipe II (N 2D10-4D16 dan P 2D10-4D16)

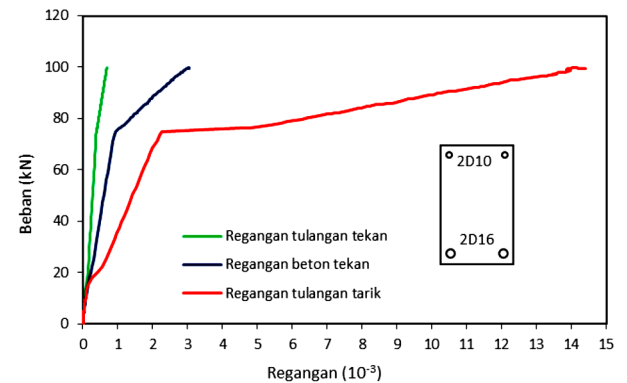
dan tipe II sebagai perbandingan. Dari kedua gambar tersebut menunjukkan bahwa penambahan pelat pada serat tekan bukan hanya meningkatkan kapasitas penampang dan kekakuan tetapi juga meningkatkan daktilitas secara sangat signifikan.

Gambar 4 memperlihatkan respon hubungan antara beban dan perpindahan balok tipe I dengan kuat tekan beton $f_c' = 47,28$ MPa dan rasio tulangan sebesar $r = 26,00\%$ r_b . Pada gambar tersebut terlihat bahwa benda uji N 2D10-2D16 sebagai kontrol mengalami kelelahan pada beban 73,676 kN dengan defleksi di tengah bentang 6,360 mm dan mencapai beban *ultimate* 99,593 kN dengan defleksi maksimum sebesar 29,886 mm. Sedangkan benda uji dengan tambahan pelat baja tekan P 2D10-2D16 mengalami kelelahan pada beban 80,522 kN dengan defleksi 5,265 mm dan beban mencapai *ultimate* mencapai 126,977 kN dengan defleksi 50,390 mm. Dari **Gambar 4** menunjukkan bahwa pada penampang dengan tambahan pelat baja sebagai tulangan tekan eksternal kapasitas dan kekakuannya meningkat masing-masing sebesar 27,50 % dan 32,02 %. Sedangkan daktilitas penampang memperlihatkan adanya peningkatan yang sangat signifikan hingga mencapai 103,67 %.

Perilaku hubungan antara beban dan perpindahan pada benda uji tipe II dengan kuat tekan beton $f_c' = 38,168$ MPa dan rasio tulangan $r = 59,02\%$ r_b ditunjukkan pada **Gambar 5**. Hasil pengujian balok kontrol N 2D10-4D16 mengalami leleh pada beban 131,704 kN dengan defleksi



Gambar 6. Grafik pengaruh penambahan pelat tekan

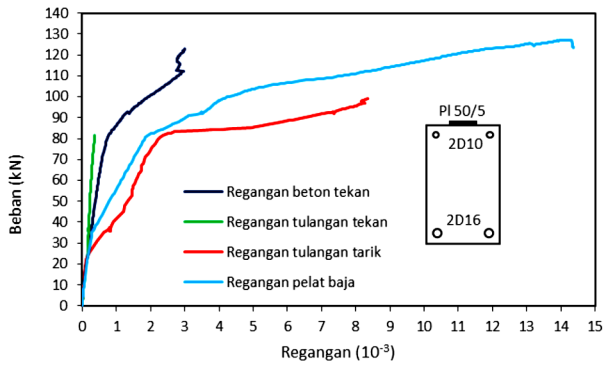


Gambar 7. Grafik hubungan beban – regangan benda uji tipe I N 2D10-2D16

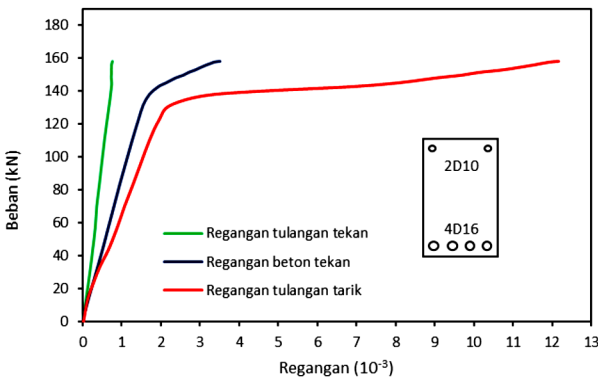
11,070 dan pada kondisi *ultimate* beban mencapai 162,022 kN dengan penurunan di tengah bentang sebesar 35,460 mm. Sedangkan pada benda uji dengan tambahan pelat baja P 2D10-4D16 kelelahan terjadi pada beban 155,502 kN dengan defleksi sebesar 12,970 mm dan beban maksimum yang dapat diterima adalah 188,428 kN dengan defleksi 50,370 mm, pada beban ini pelat baja mengalami *buckling*. Pengaruh penambahan pelat baja sebagai tulangan tekan eksternal pada benda uji tipe II menunjukkan adanya peningkatan kapasitas penampang sebesar 16,30 %, dan peningkatan kekakuan yang relatif kecil yaitu 0,77 %. Sedangkan daktilitas mengalami peningkatan sebesar 21,24 %.

Kapasitas penampang didasarkan pada besarnya beban maksimum yang dapat diterima oleh penampang sampai pada kondisi *ultimate*. Kekakuan penampang ditentukan berdasarkan kemiringan kurva hubungan antara beban dan perpindahan pada rentang elastis. Sedangkan daktilitasnya diperoleh dari daktilitas perpindahan yaitu rasio antara perpindahan *ultimate* dan perpindahan leleh. Dari pembahasan di atas, maka pengaruh penambahan pelat baja sebagai tulangan tekan eksternal terhadap peningkatan kapasitas, kekakuan dan daktilitas untuk tipe I dan II dapat digambarkan dalam bentuk grafik seperti terlihat pada **Gambar 6**.

Dalam pengujian benda uji selain pengukuran beban dan perpindahan, juga dilakukan pengukuran terhadap regangan pada beton tekan, tulangan tarik, tulangan tekan dan pelat baja untuk mengetahui respon masing-masing material tersebut ketika pembebanan berlangsung. Pada **Gambar 7** terlihat bahwa beton pada balok kontrol tipe I N 2D10-2D16 menunjukkan



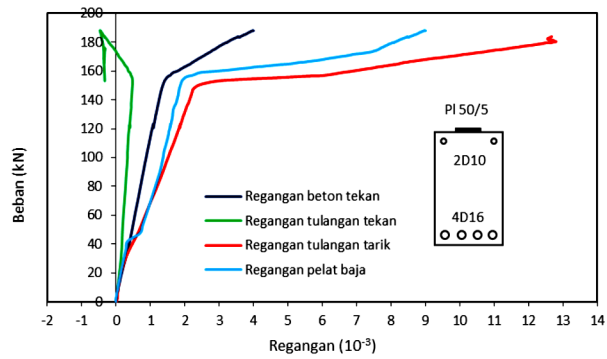
Gambar 8. Grafik hubungan beban – regangan benda uji tipe I P 2D10-2D16



Gambar 9. Grafik hubungan beban – regangan benda uji tipe II N 2D10-4D16

perilaku linier mulai awal pembebanan hingga mencapai beban leleh 73,676 kN dimana regangan tekan beton $0,8974 \times 10^{-3}$. Selanjutnya regangan beton terus meningkat secara linier dengan laju pertambahan regangan yang lebih besar sampai $3,0477 \times 10^{-3}$ pada beban ultimate 99,593 kN dan pada beban ini beton mengalami *crushing* yang diawali dengan retak horisontal pada serat beton tekan. Regangan tulangan tekan terlihat linier dan lebih kecil dari regangan beton tekan yaitu tercatat $0,3984 \times 10^{-3}$ pada beban 75,470 kN. Setelah itu regangannya meningkat sedikit lebih besar yang ditunjukkan dengan slope yang lebih landai hingga mencapai $0,6832 \times 10^{-3}$ pada beban ultimate 99,593 kN. Sedangkan tulangan tarik dari awal pembebanan hingga beban 13,20 kN dimana beton mulai retak pada regangan sebesar $0,1588 \times 10^{-3}$ dan hampir berimpit dengan regangan beton tekan. Setelah penampang retak sebagian energi pada beton tarik dilepas yang menyebabkan regangan pada tulangan tarik berkembang lebih besar hingga beban mencapai 73,676 kN dimana tulangan tarik mengalami regangan leleh $2,2400 \times 10^{-3}$. Pasca kelelahan, tulangan tarik mengalami peningkatan regangan yang cukup besar meskipun dengan penambahan beban yang kecil hingga mencapai regangan $14,2646 \times 10^{-3}$ pada beban ultimate 99,593 kN.

Gambar 8 merupakan hubungan antara beban dan regangan-regangan yang terjadi pada beton, tulangan Tarik, tulangan tekan dan pelat baja pada balok dengan penambahan pelat baja sebagai tulangan tekan



Gambar 10. Grafik hubungan beban – regangan benda uji tipe II P 2D10-4D16

eksternal tipe I P 2D10-2D16. Regangan beton pada serat tekan menunjukkan perilaku linier dari awal pembebanan sampai beban mencapai 81,663 kN dengan regangan $0,7660 \times 10^{-3}$. Regangan beton terus meningkat secara linier dengan laju peningkatan regangan yang relatif lebih tinggi, akan tetapi alat ukur hanya mampu mencatat regangan sebesar $2,9579 \times 10^{-3}$ sebelum beban ultimate yaitu pada beban 112,307 kN dan berikutnya pembacaan tidak stabil. Regangan tulangan tekan terlihat linier dan lebih kecil dari regangan beton tekan, pada benda uji ini strain gauge yang dipasang pada tulangan tekan tidak berfungsi secara baik dan regangan yang tercatat hanya sampai $0,3621 \times 10^{-3}$ pada beban 81,663 kN. Sedangkan regangan tulangan tarik dari awal pembebanan sampai beban 22,331 kN terlihat linier dan hampir berimpit dengan regangan beton tekan yaitu sebesar $0,1268 \times 10^{-3}$. Pada beban ini beton mengalami retak yang diikuti dengan meningkatnya regangan tulangan tarik yang lebih besar dari sebelumnya dan terus berkembang hingga mencapai regangan leleh $2,3002 \times 10^{-3}$ pada beban 84,108 kN. Setelah tulangan leleh regangan tulangan mengalami peningkatan yang cukup besar, tetapi strain gauge tidak berfungsi dengan baik, sehingga regangan tulangan tarik yang terukur hanya sampai beban 96,659 kN yaitu sebesar $8,2016 \times 10^{-3}$. Regangan pelat baja menunjukkan data yang hampir sama dengan regangan beton dari awal pembebanan hingga beban 35,045 kN, hal ini dikarenakan lokasi pelat baja yang berada di permukaan serat tekan beton. Selanjutnya regangan pelat baja meningkat lebih besar dibanding beton dan mencapai leleh pada beban 81,663 kN dengan regangan sebesar $1,9242 \times 10^{-3}$, regangan pelat baja terus bertambah lebih progresif hingga mencapai $14,3120 \times 10^{-3}$ pada beban ultimate 126,977 kN. Dari grafik terlihat bahwa regangan pelat baja jauh lebih besar dibandingkan dengan regangan tulangan tekannya, kondisi demikian menunjukkan bahwa penambahan pelat baja di permukaan beton tekan sangat efektif sebagai tulangan tekan. Selain itu penambahan pelat baja juga berakibat pada tertundanya peningkatan regangan beton tekan, sehingga tulangan tarik dapat meregang lebih besar yang dapat meningkatkan daktilitas penampang.

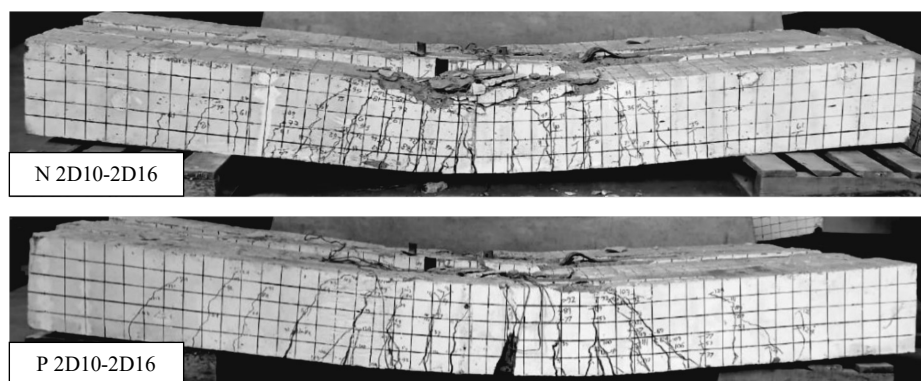
Gambar 9 menunjukkan hubungan antara beban dan regangan-regangan pada beton, tulangan tekan dan tulangan tarik pada balok kontrol tipe II N 2D10-4D16.

Regangan beton pada serat tekan meningkat linier sejak awal pembebanan hingga beban 131,704 kN dengan regangan $1,5524 \times 10^{-3}$, kemudian regangan beton terus meningkat lebih cepat dari sebelumnya sampai $3,5153 \times 10^{-3}$ pada beban maksimum 158,273 kN selanjutnya pembacaan strain gauge tidak stabil. Regangan yang terjadi pada tulangan tekan terlihat linier dari awal pembebanan sampai beban 142,951 kN dengan regangan $0,7456 \times 10^{-3}$, kemudian regangan berkembang sangat kecil dan hampir konstan sampai beban 157,947 kN dengan pembacaan regangan $0,7660 \times 10^{-3}$. Sementara regangan tulangan tarik meningkat secara perlahan yaitu sebesar $0,0626 \times 10^{-3}$ pada beban 8,313 kN dimana penampang mulai retak, setelah itu peningkatan regangan tulangan tarik menjadi lebih besar sampai mencapai regangan leleh $2,2426 \times 10^{-3}$ pada beban 131,704 kN. Setelah itu tulangan tarik terus berkembang secara progresif hingga mencapai $12,1680 \times 10^{-3}$ pada beban 158,273 kN sedikit dibawah beban ultimate karena pembacaan strain gauge yang tidak stabil lagi.

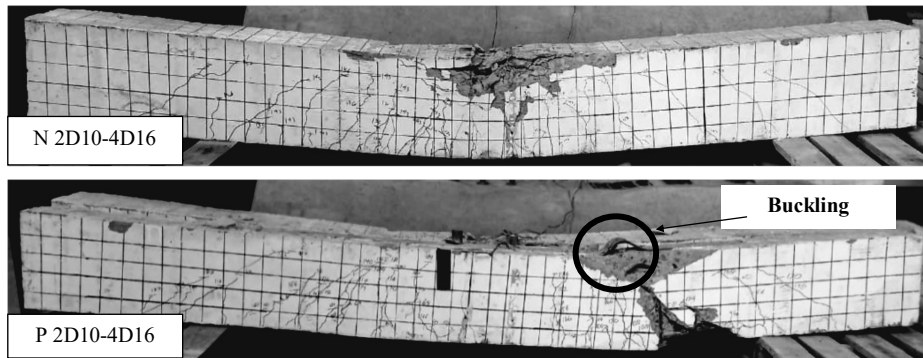
Hubungan antara beban dan regangan-regangan pada beton, tulangan tekan, tulangan tarik dan pelat baja pada balok tipe II yang diberi tambahan pelat baja di permukaan serat beton tekan P D10-4D16 seperti terlihat pada **Gambar 10**. Dari gambar ini menunjukkan adanya peningkatan regangan beton tekan yang linier sampai beban mencapai 153,546 kN dengan regangan sebesar $1,4113 \times 10^{-3}$, kemudian regangan terus berkembang lebih besar lagi sampai beban ultimate 188,428 kN dengan regangan $3,9683 \times 10^{-3}$. Perkembangan regangan pada tulangan tekan menunjukkan perilaku linier dan lebih lambat dari beton hingga beban 155,502 kN dengan regangan $0,4546 \times 10^{-3}$, tetapi pada beban berikutnya regangan tulangan tekan justru berbalik menjadi menurun dan bahkan pada beban 188,248 kN regangan berubah dari tekan menjadi Tarik yaitu sebesar $0,4721 \times 10^{-3}$ dan selanjutnya regangan tulangan tekan tidak terbaca dengan baik. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan jarak garis netral terhadap tulangan tarik hingga melampaui selimut beton d_c akibat penambahan pelat baja. Regangan tulangan tarik meningkat relatif lambat dan hampir berimpit dengan regangan beton pada rentang *uncracked* sampai pembebanan mencapai 21,027 kN yaitu sebesar $0,1436 \times 10^{-3}$, selanjutnya regangan tulangan tarik terus berkembang pasca retak dan mencapai regangan leleh $2,2420 \times 10^{-3}$ pada beban 147,841 kN. Setelah leleh regangan berkembang lebih

progresif tetapi regangan hanya terbaca $12,6805 \times 10^{-3}$ pada beban 183.212 kN sedikit di bawah beban ultimate karena strain gauge rusak dan pembacaan tidak stabil. Sedangkan perkembangan regangan pelat baja sampai pada beban 41.891 kN relatif kecil dan berimpit dengan regangan beton tekan, selanjutnya regangan pelat baja berkembang hingga mencapai regangan leleh $1,9242 \times 10^{-3}$ pada beban 153,546 kN kemudian berkembang progresif sampai mencapai $8,9952 \times 10^{-3}$ pada beban 188,428 kN, pada beban ini pelat baja tekan mengalami *buckling* akibat ketidak sempurnanya las antara pelat dan angkur yang diikuti dengan retak beton yang besar di daerah antara tumpuan dan beban. Meskipun demikian regangan pelat baja pada benda uji P 2D10-4D16 juga berkembang sangat progresif jauh melampaui regangan tulangan tekannya yang menunjukkan tingkat efektifitas pelat baja sebagai tulangan tekan.

Dari **Gambar 7** dan **Gambar 8** maupun **Gambar 9** dan **Gambar 10**, menunjukkan regangan tulangan tekan untuk benda uji tipe I dan tipe II dengan rasio tulangan masing-masing $\rho = 26,00 \% \rho_b$ dan $\rho = 59,02 \% \rho_b$ sangat kecil, sehingga tidak terlalu efektif dalam menerima tekan. Penambahan pelat baja sebagai tulangan tekan eksternal sangat efektif dalam menerima tekan yang dibuktikan dengan adanya perkembangan regangan pada pelat baja yang sangat progresif hingga beban mencapai ultimate. Hal ini dikarenakan lokasi pelat yang berada pada serat terluar menyebabkan berapapun kenaikan garis netral tidak akan menurunkan regangan pada pelat baja. Kondisi demikian menjadikan tulangan tarik dapat meregang lebih besar yang akibatnya jarak garis netral ke serat tekan c menjadi kecil dan tentu saja meningkatkan lengan momen gaya Tarik baja T_s , kondisi inilah yang mengakibatkan kapasitas penampang meningkat. Selain itu peningkatan pada regangan tulangan tarik juga dapat berakibat pada peningkatan kurvatur atau lendutan yang diikuti dengan peningkatan daktilitas. Akan tetapi pengaruh penambahan pelat baja pada penampang bergantung pada besarnya rasio A_p/A_s , dimana A_p adalah luas penampang pelat baja dan A_s adalah luas tulangan tarik. Pada blok tipe I dengan rasio $A_p/A_s = 66,48\%$ peningkatan kapasitas, kekakuan daktilitasnya lebih besar dibanding dengan blok tipe II dengan rasio $A_p/A_s = 33,24 \%$. Hal ini dikarenakan rasio A_p/A_s yang lebih besar memberikan kontribusi yang lebih besar pada



Gambar 11. Pola retak benda uji tipe I (N 2D10-2D16 dan P 2D10-2D16)



Gambar 12. Pola retak benda uji tipe II (N 2D10-4D16 dan P 2D10-4D16)

pelat dalam menerima gaya tekan yang akan memberikan keseimbangan gaya dalam pada penampang.

Keruntuhan dan Pola retak benda uji balok untuk tipe I dan II setelah pengujian seperti terlihat pada Gambar 11 dan Gambar 12.

Dari Gambar 11 dan Gambar 12 menunjukkan bahwa semua balok kontrol baik tipe I maupun II bentuk keruntuhannya adalah keruntuhan tekan yang diawali dengan terbentuknya retak horisontal pada daerah selimut beton tekan kemudian diikuti dengan mengelupasnya beton (*concrete spalling*) dan beton mengalami pecah (*crushing*) pada beton pada beban *ultimate*. Sedangkan benda uji dengan penambahan pelat di serat beton tekan untuk tipe I dan II tidak dijumpai *spalling* pada beton. *Spalling* terjadi pada P 2D10-2D16 setelah terjadi *buckling* pada plat baja di lokasi beban P/2 ke arah tumpuan terjadi retak geser yang cukup besar. Secara umum bentuk pola retak antara balok kontrol dan balok dengan tambahan pelat baja baik tipe I maupun II hampir sama, akan tetapi jarak antara ujung retak (*crack tip*) dan serat tekan terluar untuk balok kontrol relatif lebih kecil dibanding dengan balok dengan tambahan pelat baja. Fakta ini membuktikan bahwa penambahan pelat baja di serat beton tekan dapat memberikan kesempatan pada tulangan tarik untuk meregang lebih besar yang berakibat pada peningkatan daktilitas penampang.

4. Kesimpulan

1. Dari pembahasan sebelumnya secara umum dapat disimpulkan bahwa penambahan pelat baja pada serat beton tekan sangat efektif berfungsi sebagai tulangan tekan pada penampang. Pengaruh penambahan pelat baja pada serat beton tekan dapat uraikan sebagai berikut:
2. Penambahan pelat baja dapat mencegah spalling dan keruntuhan beton akibat tereduksinya regangan beton tekan.
3. Penambahan pelat baja pada serat tekan untuk balok tipe I dengan $\rho = 26,00 \% \rho_b$ dan rasio $A_p/A_s = 66,48 \%$ memberikan peningkatan kapasitas, kekakuan dan daktilitas secara berturut-turut sebesar 27,50 %; 32,02 % dan 103,67 %.

4. Penambahan pelat baja pada serat tekan untuk balok tipe II dengan $\rho = 59,02 \% \rho_b$ dan rasio $A_p/A_s = 33,24 \%$ peningkatan kapasitas, kekakuan dan daktilitas secara berturut-turut sebesar 16,30 %; 0,77 % dan 21,24 %.
5. Semakin tinggi rasio A_p/A_s semakin tinggi pengaruhnya dalam peningkatan kapasitas, kekakuan dan daktilitas penampang beton. Akan tetapi pada penampang dengan rasio A_p/A_s kecil tidak berpengaruh banyak pada peningkatan kekakuan penampang.
6. *Buckling* yang terjadi pada pelat baja akibat ketidaksempurnaan pengelasan antara angkur dan pelat baja menunjukkan bahwa daktilitas untuk tipe II masih berpotensi meningkat lebih tinggi dari yang tercatat dalam penelitian ini.

Ucapan Terima Kasih

Terima kepada Fakultas Teknik Universitas Diponegoro yang telah berkontribusi pendanaan dan Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Diponegoro yang telah memberikan fasilitasi dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Ahmed, M. M., O. A. Farghal, A. K. Nagah, and A. A. Haridy, 2007, Effect of Confining Method on The Ductility of Reinforced Concrete Beams, *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 35, No. 3, 617-633.
- Alasadi, S., Shafigh P., and Ibrahim Z., 2020a, Experimental Study on the Flexural Behavior of over Reinforced Concrete Beams Bolted with Compression Steel Plate: Part I, *Applied Science*, Vol 10, 822. <https://doi.org/10.3390/app10030822>
- Alasadi, S., Ibrahim Z., Shafigh P., Javanmardi A., and Nouri K., 2020b, An Experimental and Numerical Study on the Flexural Performance of Over-Reinforced Concrete Beam Strengthening with Bolted-Compression Steel Plates: Part II, *Applied Science*, Vol 10, 94. <https://doi.org/10.3390/app10010094>

- Ali, Ahmed M., and Mohamed A. Tarkhan, 2015, Experimental Investigation of Confining The Compression Zone in Over-Reinforced Beams, *International Journal of Engineering Sciences & Research*, Vol. 4, No.11, 611-617.
- ASCE-ACI Committee 445 on Shear and Torsion (1998), Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Volume 124, No 12, December 1998, pp. 1375-1417.
- Delalibera, R. G., and J. S. Giongo, 2008, Theoretical and Numerical Analysis of Reinforced Concrete Beams with Confinement Reinforcement, *IBRACON Structures and Materials Journal*, Vol. 1, No.1, 17-30. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952008000100002>
- Han Ay Lie, Antonius, and Aldyan W. Okiyarta, 2015, Experimental study of steel-fiber reinforced concrete beams with confinement, *Procedia Engineering*, Vol. 125, 1030-1035. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.158>
- Jeffry, R., and Hadi M. N. S., 2008, The Effect of Confinement Shapes on Over-Reinforced HSC Beams, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 4, 71-78. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1055952>
- Krishna, N. Kaarthik, S. Sandeep, and K. M. Mini, 2018, Study on reinforced concrete beams with helical transverse reinforcement, *IOP Publishing: Materials Science and Engineering*, 310, 1-10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012046>
- Kwak, Yoon-Keun, Marc O., Eberhard, Woo-Suk Kim, and Jubum Kim, 2002, Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups, *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 4, 530-538. <https://doi.org/10.14359/12122>
- Mohamed, Heba A., 2018, Improvement in the Ductility of Over-reinforced NSC and HSC Beams by Confining the Compression Zone, *Institution of Structural Engineers*, Vol. 16, 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.005>
- Nur, Oscar Fithrah, 2009, Analisa Pengaruh Penambahan Tulangan Tekan terhadap Daktilitas Kurvatur Balok beton Bertulang, *Jurnal Rekayasa Sipil*, Vol. 5, No.1, 23-24. <https://doi.org/10.25077/jrs.5.1.23-34.2009>
- Priastiwi, Yulita A., Iswandi Imran, Nuroji, dan Arif Hidayat, 2014, Behavior of ductile beam with addition confinement in compression zone, *2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials 2014*, Yogyakarta, Indonesia, September 23-25, paper Vol. 95, No.132-138. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.172>
- Sarhan, M. M., Hadi, N. S., and The, L. H., 2017, Strength and Ductility Behaviour of Steel Plate Reinforced Concrete Beams under Flexural Loading, *Proc. 1st International Conference on Structural Engineering Research (iCSER 2017)*, 20-22 Nov 2017, Sydney, Australia.
- Tahnat, Y. B. A., Samaanehb M. A., Dwaikatb M. M. S., and Halahlac A. M., 2020, Simple equations for predicting the rotational ductility of fiber-reinforced polymer strengthened reinforced concrete joints, *Institution of Structural Engineers*, Vol. 24, 73-86. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.01.010>

