

KOMPONEN STRUKTUR BETON DENGAN PERKUATAN EKSTERNAL

Fredi L. Nge¹ (fredy_nge@yahoo.co.id)

Jusuf J. S. Pah² (yuserpbdaniel@yahoo.co.id)

Tri M. W. Sir³ (trimwsir@yahoo.com)

ABSTRAK

Struktur beton seperti balok bila memikul beban yang berlebihan atau tidak sesuai dengan perencanaan awal akan menyebabkan struktur beton tersebut mengalami penurunan daya dukung. Hal ini bisa disebabkan apabila suatu bangunan/struktur tersebut mengalami perubahan/alih fungsi dari yang direncanakan sebelumnya. Penelitian ini dilakukan dengan membuat tata cara perencanaan dari perkuatan eksternal kemudian dibuat benda uji di laboratorium yang digunakan untuk memverifikasi hasil desain dari tata cara perencanaan. Hasil desain dengan menggunakan tata cara perencanaan pada balok beton tulangan tunggal dengan perkuatan eksternal, kapasitas balok dalam memikul momen sebesar 4905467,88Nmm. Hasil pengujian lentur balok di laboratorium diperoleh kekuatan rata-rata dari 3 balok uji dalam memikul momen yaitu sebesar 4843750,00 Nmm. Hasil uji statistik *Student T Test* dengan tingkat kepercayaan 95% tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara hasil desain dan hasil pengujian di laboratorium. Dengan menggunakan tata cara perencanaan, maka hasil desain balok beton tulangan rangkap dengan perkuatan eksternal diperoleh kapasitas balok sebesar 6068337,70Nmm. Hasil pengujian lentur dari 3 balok uji memperoleh kekuatan rata-rata balok dalam memikul momen sebesar 6052083,33 Nmm. Hasil uji statistik *Student T Test* dengan tingkat kepercayaan 95% menghasilkan perbedaan yang tidak signifikan antara hasil desain dan hasil pengujian di laboratorium.

Kata Kunci : Perkuatan eksternal, pelat baja, lem epoxy.

ABSTRACT

Concrete structures such as beams when carried an excessive load or not based on the initial planning, will lead the concrete structure to have a decreased in load capacity. This condition can be caused when a building/structure had changed the function of the building that is planned before. This research was conducted by making a procedures for design an external strengthening and then created a test specimens in laboratory which will be used to verify the results from the design of external strengthening. The results of the design from the procedures of design an external strengthening on concrete beam with a single bar reinforcement, the beam moment capacity is 4905467,88Nmm. Flexure test in laboratory results an average strength of three tested beam that carried the moment, had capacity of 4843750,00 Nmm. Statistical test results of Student T test with 95% trust level was not significantly different between the results of the design and the results that were conducted in laboratory tests. By using the procedure of design an external strengthening on concrete beam with double bar reinforcement, results a momen capacity by 6068337,70 Nmm. The 3 tested beam on flexural strength test had the average moment capacity of 6052083,33 Nmm. Statistical test results of Student T Test with trust level of 95% resulted that there is no significant difference between the results of the design and the results of laboratory tests.

Keywords: External strengthening, steel plate, epoxy glue

¹ Penamat dari Jurusan Teknik Sipil, FST Undana.

² Dosen pada Jurusan Teknik Sipil, FST Undana.

³ Dosen pada Jurusan Teknik Sipil, FST Undana.

PENDAHULUAN

Struktur beton mempunyai kelebihan yaitu kuat dalam menahan beban tekan namun lemah dalam menahan beban tarik. Untuk mengatasi kelemahan dari struktur beton ini, maka komponen struktur beton seperti balok perlu diberi perkuatan dengan menggunakan baja tulangan dalam menahan kondisi tarik yang terjadi pada balok beton ketika dibebani lentur.

Struktur bangunan yang dibangun bila mengalami penambahan beban yang tidak mampu dipikul oleh struktur tersebut akan menyebabkan struktur tersebut gagal/runtuh sehingga perlu untuk didesain ulang dan dibangun yang baru. Suatu bangunan/struktur beton tidak perlu dibangun ulang namun dibutuhkan suatu metode perkuatan komponen struktur beton agar bangunan/struktur beton tersebut dapat menjalankan fungsinya.

TINJAUAN PUSTAKA

Pengertian Beton

Semen Portland

Karena beton terbuat dari agregat yang diikat bersama oleh pasta semen yang mengeras maka kualitas semen sangat mempengaruhi kualitas beton. Pasta semen adalah perekat yang bila semakin tebal tentu semakin kuat, namun jika terlalu tebal juga tidak menjamin lekatan yang baik.

Agregat

Agregat menempati 70%-75% dari total volume beton maka kualitas agregat sangat berpengaruh terhadap kualitas beton.

Air Campuran

Air harus selalu ada di dalam beton cair, tidak saja untuk hidrasi semen, tetapi juga untuk mengubahnya menjadi suatu pasta sehingga beton-nya lecah (workable). Dihitung dari komposisi mineral semen, jumlah air yang diperlukan untuk hidrasi secara teoritis adalah 35 – 37% dari berat semen.

Pengertian Beton Bertulang

Beton bertulang didefinisikan sebagai beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum, yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja (SNI 03-2847-2002).

Kekuatan Beton, Tulangan Baja dan Pelat Baja

Kekuatan Beton

Sifat utama dari beton adalah sangat kuat jika menerima beban tekan, maka mutu beton pada umumnya hanya ditinjau terhadap kuat tekan beton tersebut. Sifat yang lain (misalnya kuat tarik, modulus elastisitas beton) dapat dikorelasikan terhadap kuat tekan beton. Untuk pengujian kuat tekan beton, benda uji berupa silinder beton berdiameter 15 cm dan tingginya 30 cm ditekan dengan beban P sampai runtuh. Karena ada beban tekan P , maka terjadi tegangan tekan pada beton (σ_c) sebesar beban (P) dibagi dengan luas penampang beton (A), sehingga dirumuskan:

$$\sigma_c = P/A \quad (1)$$

Keterangan:

- σ_c =tegangan tekan beton, MPa
- P=besar beban tekan, N
- A=luas penampang beton, mm²

Kekuatan Baja Tulangan

Menurut SNI 03-2847-2002, tulangan yang dapat digunakan pada elemen beton bertulang dibatasi hanya pada baja tulangan dan kawat baja saja. Baja tulangan yang tersedia di pasaran ada 2 jenis, yaitu baja tulangan polos (BJTP) dan baja tulangan ulir atau deform (BJTD). Meskipun baja tulangan juga mempunyai sifat tahan terhadap beban tekan, tetapi karena harganya cukup mahal, maka baja tulangan ini hanya diutamakan untuk menahan beban tarik pada struktur beton bertulang, sedangkan beban tekan yang bekerja cukup ditahan oleh betonnya.

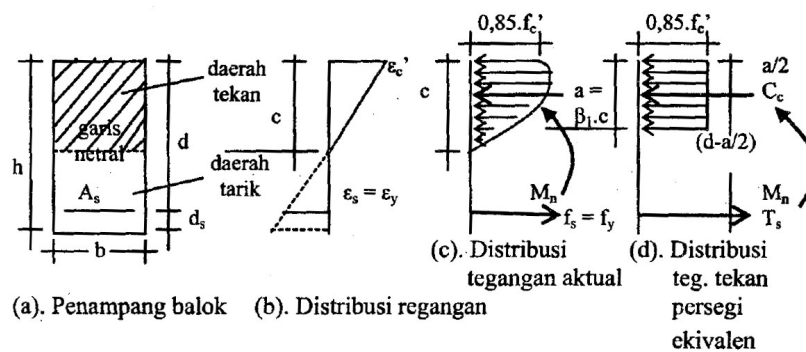
Kekuatan Pelat Baja

Menurut SNI 07-0371-1998 tentang batang uji tarik untuk bahan logam, pengujian tarik untuk bahan logam dibagi menjadi 14 macam dengan nomor batang uji dari nomor 1 sampai dengan nomor 14 yang dikelompokkan berdasarkan ukuran dan bentuknya sedangkan tata cara pengujian pelat baja diatur dalam SNI 07-0408-1989 tentang cara uji tarik logam.

Teori Perencanaan

Perencanaan Beton Bertulang Tunggal

Balok beton bertulang dengan tulangan tunggal sering disebut dengan balok bertulang sebelah atau balok dengan tulangan saja. Untuk keperluan hitungan balok persegi panjang dengan tulangan tunggal, berikut ini dilukiskan bentuk penampang balok yang dilengkapi dengan distribusi regangan dan tegangan beton seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tulangan Tunggal (Asroni, 2010)

Berdasarkan Gambar 1 momen nominal diperoleh dengan menggunakan rumus berikut

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) \text{ atau} \tag{2}$$

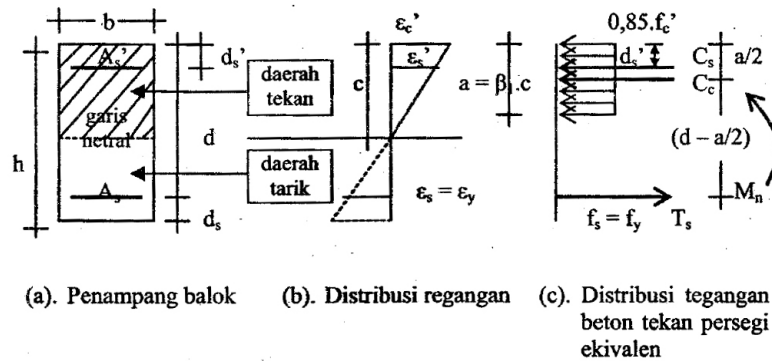
$$M_n = T_s \left(d - \frac{a}{2} \right) \tag{3}$$

Keterangan:

- M_n =momen nominal aktual, kNm
- C_c =gaya tekan beton, kN
- T_s =gaya tarik baja tulangan, kN

Perencanaan Beton Bertulangan Rangkap

Tulangan longitudinal tarik maupun tekan pada balok dipasang sejajar sumbu balok. Biasanya tulangan tarik dipasang lebih banyak daripada tulangan tekan. Untuk keperluan hitungan balok persegi panjang dengan tulangan rangkap, berikut ini dilukiskan bentuk penampang balok yang dilengkapi dengan distribusi regangan dan tegangan beton seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tulangan Rangkap (Asroni, 2010)

Berdasarkan Gambar 2 momen nominal diperoleh dengan menggunakan rumus berikut

$$M_n = M_{nc} + M_{ns} \text{ atau} \tag{4}$$

$$M_n = \left(C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) \right) + \left(C_s (d - d_s') \right) \tag{5}$$

Keterangan:

M_n =momen nominal aktual, kNm

C_c =gaya tekan beton, kN

C_s =gaya tekan baja tulangan, kN

Perencanaan Perkuatan Eksternal

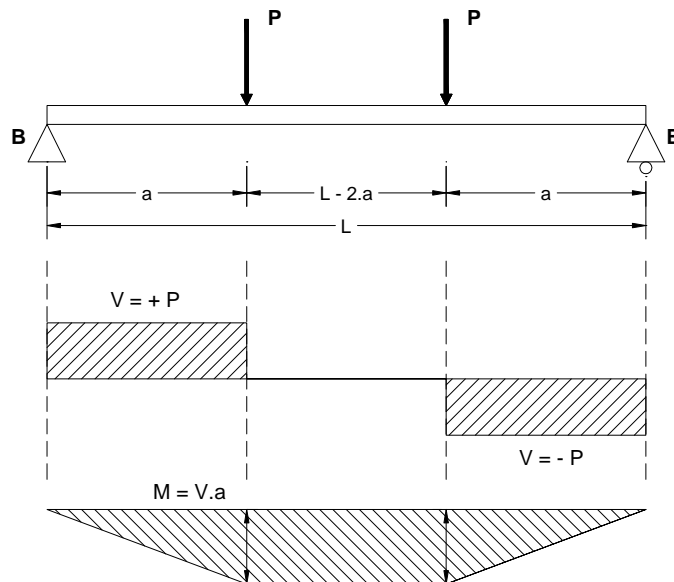
Perencanaan perkuatan eksternal dibuat apabila terdapat penambahan beban yang mengakibatkan bertambahnya momen yang harus dipikul oleh balok beton. Dalam perencanaan perkuatan eksternal ini perlu di asumsi beberapa hal antara lain:

1. Mengasumsi tinggi efektif penampang balok beton, d sama dengan tinggi penampang balok beton, h ($d=h$).
2. Mengusulkan tebal dari pelat perkuatan baja, t_p
3. Mengusulkan mutu dari pelat perkuatan baja, f_{y-eks}

Setelah di asumsi beberapa hal di atas, maka perencanaan perkuatan eksternal dapat dilakukan dengan menerapkan aturan-aturan yang berlaku dalam perencanaan beton.

Balok dengan Lentur Murni

Lentur murni mengandung arti lentur pada suatu balok akibat momen lentur konstan. Dengan demikian, lentur murni terjadi hanya di daerah balok dimana gaya geser adalah nol. Menurut SNI 03-4431-1997 tentang Metode Pengujian Kuat Lentur Normal Dengan Dua Titik Pembebanan menjelaskan bahwa sebuah balok beton yang tertumpu bebas dengan dua beban terpusat P di atasnya apabila berat balok sendiri diabaikan, diagram gaya lintang dan diagram momen lentur dapat dilihat dalam Gambar 3.



Gambar 3. Balok yang Dibebani Lentur Murni

Dari Gambar 3 di atas dapat dilihat bahwa diantara kedua beban lintang P diagram gaya geser V adalah nol dan diagram momen lentur M konstan, dengan demikian balok yang terdapat pada Gambar 3 di atas dapat disebut mendapat kondisi lentur murni.

Uji Statistik Student T Test

Setelah memperoleh hasil dari perencanaan perkuatan eksternal, maka dalam penelitian ini akan dilakukan pengujian di laboratorium untuk menguji kebenaran dari hasil perencanaan. Untuk mengetahui kebenaran ini, maka perlu dilakukan uji statistik. Uji statistik yang dilakukan adalah uji *Student T Test*. *Student T Test* adalah uji komparatif untuk menilai perbedaan antara nilai tertentu dengan rata-rata kelompok populasi. *Student T Test* disebut juga dengan istilah *One Sample T Test* atau uji T satu sampel oleh karena uji T pada penelitian ini menggunakan satu hasil perencanaan. *Student T Test* dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \quad (6)$$

Keterangan:

T=t hitung

\bar{x} = rata-rata sampel

μ_0 =rata-rata spesifik atau rata-rata tertentu (yang menjadi perbandingan)

s=standar deviasi sampel

n=jumlah sampel

METODELOGI PENELITIAN

Benda Uji

Pembuatan benda uji yang dilakukan bersifat eksperimental yaitu pembuatan benda uji beton berupa silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm serta balok dengan ukuran penampang 15 cm x 15 cm x 60 cm. Adapun variasi yang dibuat adalah:

1. Variasi I, 3 buah silinder beton dengan mutu rencana 25 MPa dan 3 buah balok beton bertulang dengan mutu rencana 25 MPa yang diberi nama TGL. Pada balok beton dipasang

tulangan baja dengan diameter tulangan 6 mm pada tulangan pokok/lentur dan tulangan baja dengan diameter 10 mm pada tulangan sengkang/geser.

2. Variasi II, 3 buah silinder beton dengan mutu rencana 12,5MPa dan 3 buah balok beton bertulang dengan mutu rencana 12,5 MPa yang diberi nama RKP. Pada balok beton dipasang tulangan baja dengan diameter tulangan 6 mm pada tulangan pokok/lentur dan tulangan baja dengan diameter 10 mm pada tulangan sengkang/geser.

Masing-masing balok beton pada variasi I dan II di atas dipasang pelat baja dengan tebal 3 mm yang direkatkan pada permukaan balok beton yang mengalami tarik.

Langkah-langkah Penelitian

Pembuatan Tata Cara Perencanaan

Tata cara perencanaan yang dibuat adalah perencanaan berdasarkan perhitungan beton bertulang sesuai dengan SNI 03-2847-2002. Dari hasil perencanaan beton bertulang yang ada pada SNI, dihasilkan luas tulangan baja yang diperlukan ($A_{s,u}$) untuk mengimbangi momen yang bekerja pada balok beton (M_u). Dengan asumsi perencanaan yang digunakan dalam perencanaan kekuatan eksternal beton bertulang, maka akan diperoleh luas penampang perlu dari pelat kekuatan baja.

Perencanaan Campuran dan Pembuatan Benda Uji

Perencanaan Campuran beton (mix design) dan pembuatan benda uji dalam pengujian ini mengacu kepada SNI 03-2834-2000 tentang proses pembuatan rencana campuran beton normal.

Pengujian Benda Uji

Pada penelitian ini pengujian terhadap benda uji silinder dilakukan untuk mengetahui kualitas beton yang diperoleh yaitu melalui pengujian kuat tekan beton serta benda uji balok untuk mengetahui kuat lentur dari beton.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tata Cara Perencanaan Perkuatan Eksternal

Perencanaan perkuatan eksternal pada tata cara ini memerlukan data perencanaan awal berupa momen lentur (M_{u-a}) yang dapat dipikul oleh balok dan momen lentur tambahan (ΔM_u) yang akan dipikul oleh balok, sehingga momen lentur yang akan dipikul merupakan penjumlahan dari kedua momen lentur tersebut ($M_u = M_{u-a} + \Delta M_u$). Selain itu atribut-atribut balok yang diperlukan dari data perencanaan sebelumnya adalah:

1. Tinggi balok, h
2. Lebar balok, b
3. Tulangan lentur tarik terpasang, A_{s-int}
4. Tulangan lentur tekan terpasang, A_s' (untuk balok dengan tulangan rangkap)
5. Jarak titik berat tulangan lentur tarik terpasang ke tepi atas balok, d_{-int}
6. Jarak titik berat tulangan lentur tekan terpasang ke tepi atas balok, ds' (untuk balok dengan tulangan rangkap)
7. Mutu beton yang digunakan, f_c'
8. Mutu tulangan baja terpasang, f_{y-int}

Dalam perencanaan ini juga perlu di usul dan di asumsi beberapa hal, yaitu:

1. Mengasumsi tinggi efektif penampang balok beton, d sama dengan tinggi penampang balok beton, h ($d=h$)
2. Mengusulkan tebal dari pelat perkuatan baja, t_p
3. Mengusulkan mutu dari pelat perkuatan baja, f_{y-eks}

Pada tata cara perencanaan ini di khusus-kan untuk menghitung perkuatan eksternal pada daerah beton yang mengalami beban tarik saja.

Pembuatan Program Komputer Sederhana Menggunakan Microsoft Excel Dengan Macro

Perhitungan Perkuatan Eksternal Untuk Balok Dengan Tulangan Tunggal

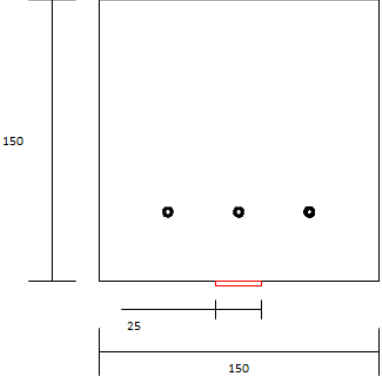
Pada program sederhana ini terdapat input data yang harus dimasukkan oleh pengguna program, antara lain:

1. Tinggi penampang balok, h
2. Lebar penampang balok, b
3. Selimut beton, S_b
4. Diameter penampang tulangan sengkang/geser terpasang
5. Jumlah dan ukuran tulangan lentur tarik terpasang
6. Mutu beton, f_c'
7. Mutu tulangan lentur baja terpasang, f_{y-int}
8. Modulus elastisitas tulangan lentur baja terpasang, $E_{s-tulangan}$
9. Momen awal balok ketika didesain, M_{u-a}
10. Penambahan momen akibat bertambahnya beban, ΔM_u
11. Gaya geser yang bekerja, $Q_{(y)}$
12. Tebal pelat, t_p
13. Mutu pelat, f_{y-eks}
14. Modulus elastisitas pelat baja, $E_{s-pelat}$
15. Kekuatan geser lem epoxy, $\tau_{lem epoxy}$
16. Lebar pelat baja, x

Tampilan program komputer untuk perhitungan ini dapat dilihat dalam Gambar 4.

INPUT DATA		
Tinggi Penampang Balok, h	=	150 mm
Lebar Penampang Balok, b	=	150 mm
Selimut Beton, S_b	=	25 mm
Diameter Penampang Tulangan Sengkang/Geser Terpa	=	9.25 mm
Jumlah Dan Ukuran Tulangan Lentur Tarik Terpasang	=	3 \varnothing 5.60
Mutu Beton, f_c'	=	23.58 MPa atau N/mm ²
Mutu Tulangan Lentur Baja Terpasang, f_{y-int}	=	351.73 MPa atau N/mm ²
Modulus Elastisitas Tulangan Lentur Baja Terpasang, E	=	203982.11 MPa atau N/mm ²
Momen Awal Balok Ketika Didesain, M_{u-a}	=	2.82 kNm
Penambahan Momen Akibat Bertambahnya Beban, ΔM	=	0.94 kNm
Gaya Geser Bekerja, $Q_{(y)}$	=	39.26 kN
Tebal pelat, t_p	=	2.55 mm
Mutu pelat, f_{y-eks}	=	270.64 MPa atau N/mm ²
Modulus Elastisitas Pelat Baja, $E_{s-pelat}$	=	457172.57 MPa atau N/mm ²
Kekuatan Geser Lem Epoxy, $\tau_{lem epoxy}$	=	4.00 MPa atau N/mm ²

Keterangan:	
	= Input data
	= Output data



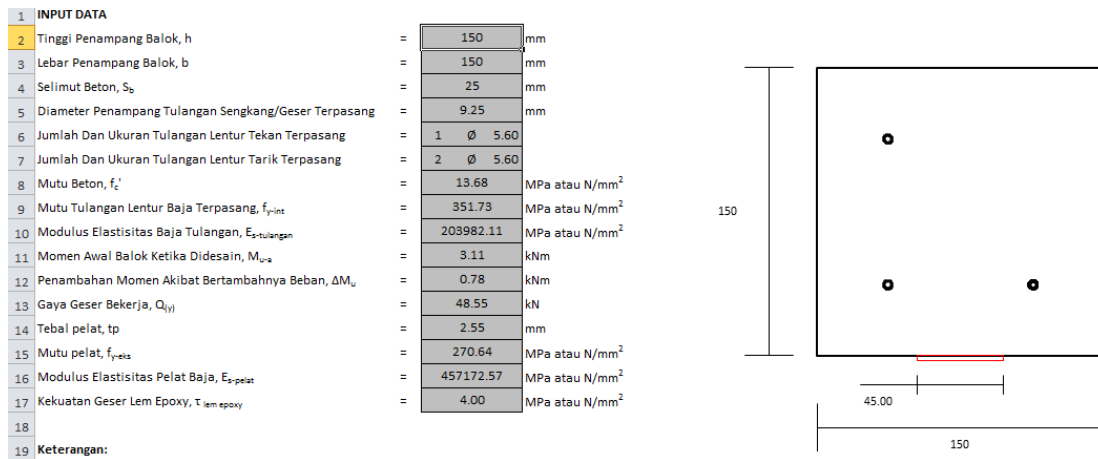
Gambar 4. Tampilan Program Komputer Untuk Perhitungan Perkuatan Eksternal Pada Balok Dengan Tulangan Tunggal

Perhitungan Perkuatan Eksternal Untuk Balok Dengan Tulangan Rangkap

Pada program sederhana ini terdapat input data yang harus dimasukkan oleh pengguna program, antara lain:

1. Tinggi penampang balok, h
2. Lebar penampang balok, b
3. Selimut beton, S_b
4. Diameter penampang tulangan sengkang/geser terpasang
5. Jumlah dan ukuran tulangan lentur tekan terpasang
6. Jumlah dan ukuran tulangan lentur tarik terpasang
7. Mutu beton, f_c'
8. Mutu tulangan lentur baja terpasang, f_{y-int}
9. Modulus elastisitas tulangan lentur baja terpasang, $E_{s-tulangan}$
10. Momen awal balok ketika didesain, M_{u-a}
11. Penambahan momen akibat bertambahnya beban, ΔM_u
12. Gaya geser yang bekerja, $Q_{(y)}$
13. Tebal pelat, t_p
14. Mutu pelat, f_{y-eks}
15. Modulus elastisitas pelat baja, $E_{s-pelat}$
16. Kekuatan geser lem epoxy, $\tau_{lem epoxy}$
17. Lebar pelat baja, x

Tampilan program komputer untuk perhitungan ini dapat dilihat dalam Gambar 5.



Gambar 5. Tampilan Program Komputer Untuk Perhitungan Perkuatan Eksternal Pada Balok Dengan Tulangan Rangkap

Hasil Pengujian Laboratorium

Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja

Pada pengujian kuat tarik baja, benda uji terdiri dari tulangan baja dengan ukuran diameter penampang sebesar 6 mm, 10 mm dan 12 mm, ketiga baja tulangan tersebut adalah baja tulangan dengan jenis baja tulangan polos. Benda uji yang berikut adalah pelat baja dengan tebal 3 mm. Tabel 1 menunjukkan rekap hasil pengujian tarik untuk keempat benda uji dengan masing-masing benda uji mempunyai 3 sampel uji.

Tabel 1. Rekap hasil pengujian kuat tarik baja

Benda Uji	No Sampel	Beban (F)	Perubahan panjang (ΔL)	Titik leleh (f _y)	Regangan, ε (ΔL/L ₀)	Tegangan, σ (F/A ₀)
(mm)		(mm)	(mm)	(N/mm ²)	(%)	(N/mm ²)
Polos 12 mm	1	24.500,00	21,80	360,27	20,78	487,66
	2	24.700,00	22,80	342,36	21,65	491,64
	3	25.200,00	25,20	345,63	24,11	489,32
	Rata-rata	24.800,00	23,27	349,42	22,18	489,54
Polos 10 mm	1	26.400,00	22,60	389,88	21,92	538,89
	2	26.600,00	22,60	418,45	22,01	542,97
	3	26.500,00	22,10	402,07	21,31	527,47
	Rata-rata	26.500,00	22,43	403,47	21,75	536,44
Polos 6 mm	1	12.600,00	25,20	404,21	34,14	530,53
	2	12.300,00	24,03	333,33	24,03	482,35
	3	11.900,00	24,90	317,65	24,90	466,67
	Rata-rata	12.266,67	24,71	351,73	27,69	493,18
Pelat baja	1	17.200,00	29,30	270,37	27,98	327,49
	2	17.000,00	26,30	261,54	23,34	326,92
	3	17.100,00	26,20	280,00	22,57	342,00
	Rata-rata	17.100,00	27,27	270,64	24,63	332,14

Pengujian Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian untuk kuat tekan beton dengan benda uji silinder yang berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm pada umur 28 hari dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kuat Tekan Silinder Beton Pada Umur 28 Hari

Mutu Rencana (MPa)	Gaya Tekan Rata-Rata (kN)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
12,5	241,67	13,68
25	416,67	23,58

Pengujian Kuat Lentur

Hasil pengujian untuk mendapatkan gaya yang menyebabkan lentur pada balok beton bertulang dengan perkuatan eksternal dilakukan pada benda uji yang mempunyai tinggi penampang 15 cm, lebar penampang 15 cm dan panjang 60 cm pada umur beton 28 hari dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Hasil Pengujian Lentur Pada Balok Beton Bertulangan Tunggal Dengan Perkuatan Eksternal

Balok Beton Dengan Tulangan Tunggal	Satuan	Nomor Benda Uji		
		TGL-I	TGL-II	TGL-III
Umur Benda Uji	hari	28,00	28,00	28,00
Lebar Balok Beton	mm	150,00	150,00	150,00
Tinggi Balok Beton	mm	150,00	150,00	150,00
Lebar Pelat Baja	mm	25,00	25,00	25,00
Tebal Pelat Baja	mm	2,50	2,50	2,50
Panjang Benda Uji	mm	600,00	600,00	600,00
Jarak Antar Tumpuan	mm	450,00	450,00	450,00
Jarak Antar Beban	mm	200,00	200,00	200,00
Beban Saat Retak Pertama, P	kN	76,00	79,50	77,00
Beban Maksimum	kN	84,00	83,00	81,00
Momen Nominal dari hasil pengujian, Mn-uji	kNmm	4750,00	4968,75	4812,50
	Nmm	4750000,00	4968750,00	4812500,00
	kNm	4,75	4,97	4,81

Tabel 4. Hasil Pengujian Lentur Pada Balok Beton Bertulangan Rangkap Dengan Perkuatan Eksternal

Balok Beton Dengan Tulangan Rangkap	Satuan	Nomor Benda Uji		
		RKP-I	RKP-II	RKP-III
Umur Benda Uji	hari	28,00	28,00	28,00
Lebar Balok Beton	mm	150,00	150,00	150,00
Tinggi Balok Beton	mm	150,00	150,00	150,00
Lebar Pelat Baja	mm	45,00	45,00	45,00

Tabel 4. Hasil Pengujian Lentur Pada Balok Beton Bertulangan Rangkap Dengan Perkuatan Eksternal (Lanjutan)

Balok Beton Dengan Tulangan Rangkap	Satuan	Nomor Benda Uji		
		RKP-I	RKP-II	RKP-III
Tebal Pelat Baja	mm	2,50	2,50	2,50
Panjang Benda Uji	mm	600,00	600,00	600,00
Jarak Antar Tumpuan	mm	450,00	450,00	450,00
Jarak Antar Beban	mm	200,00	200,00	200,00
Beban Saat Retak Pertama, P	kN	98,00	96,50	96,00
Beban Maksimum	kN	-	-	-
Momen Nominal dari hasil pengujian, Mn-uji	kNmm	6125,00	6031,25	6000,00
	Nmm	6125000,00	6031250,00	6000000,00
	kNm	6,13	6,03	6,00

Hasil Uji Statistik

Pada penelitian ini dilakukan uji statistik untuk mengetahui apakah antara hasil desain dan hasil pengujian di laboratorium berbeda secara signifikan atau tidak, untuk itu dilakukan uji statistik *Student T Test*. Berikut adalah hasil pengujian statistik *Student T Test* pada balok dengan tulangan tunggal yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji Statistik Student T Test Pada Balok Beton Bertulangan Tunggal Dengan Perkuatan Eksternal

Uraian	Hasil Pengujian
Benda Uji I	4750000,00
Benda Uji II	4968750,00
Benda Uji III	4812500,00
Hasil Perencanaan	4905467,88
Jumlah Sampel	3,00
Alpha	0,05
Mean	4843750,00
StdDev	112673,48
Std Err	65052,06
Mean Difference	-61717,88
t	-0,95
df	2,00
T Test One Tail	
p-value	0,22
sig	No Sig
T Test Two Tail	
p-value	0,44
sig	No Sig

Berikut adalah hasil uji statistik *Student T Test* pada balok dengan tulangan rangkap yang dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Uji Statistik Student T Test Pada Balok Beton Bertulangan Rangkap Dengan Perkuatan Eksternal

Uraian	Hasil Pengujian
Benda Uji I	6125000,00
Benda Uji II	6031250,00
Benda Uji III	6000000,00
Uraian	Hasil
Hasil Perencanaan	6068337,70
Jumlah Sampel	3,00
Alpha	0,05
Mean	6052083,33
StdDev	65052,06
Std Err	37557,83
Mean Difference	-16254,36
t	-0,43
Df	2,00
T Test One Tail	
p-value	0,35
sig	No Sig
p-value	0,71
sig	No Sig

Kesimpulan

1. Berdasarkan tata cara perencanaan perkuatan eksternal perlu diasumsi beberapa hal, antara lain:

- Mengasumsi tinggi efektif penampang balok beton, d sama dengan tinggi penampang balok beton, h ($d=h$)
- Mengusulkan tebal dari pelat perkuatan baja, t_p
- Mengusulkan mutu dari pelat perkuatan baja, f_{y-eks}

Data-data yang dibutuhkan dalam perencanaan perkuatan eksternal adalah tinggi balok, lebar balok, tulangan lentur tarik terpasang, tulangan lentur tekan terpasang (untuk balok dengan tulangan rangkap), mutu beton yang digunakan, mutu tulangan baja terpasang.

2. Berdasarkan hasil perhitungan perencanaan dan hasil pengujian di laboratorium yang telah dilakukan, maka perbandingan antara hasil desain dan hasil pengujian adalah sebagai berikut:

- Pada balok beton dengan tulangan tunggal yang diberi perkuatan eksternal, hasil desain menghasilkan kapasitas balok berupa nilai momen nominal (M_n) sebesar 4905467,88 Nmm. Dari hasil pengujian diperoleh hasil untuk masing-masing 3 sampel uji yaitu:

- Benda uji I (TGL – I) : 4750000,00 Nmm

- Benda uji II (TGL – II) : 4968750,00 Nmm
- Benda uji III(TGL – III): 4812500,00 Nmm

Ketiga hasil pengujian di atas mempunyai rata-rata sebesar 4843750,00 Nmm. Dari hasil pengujian statistik *Student T Test*, maka diperoleh perbedaan antara hasil desain dengan rata-rata hasil pengujian di laboratorium tidak berbeda secara signifikan dengan tingkat kepercayaan 95% atau probabilitas 5%, dengan demikian hasil desain dapat diterima.

- b. Pada balok beton dengan tulangan rangkap yang diberi perkuatan eksternal, hasil desain menghasilkan kapasitas balok berupa nilai momen nominal (M_n) sebesar 6068337,70 Nmm. Dari hasil pengujian diperoleh hasil untuk masing-masing 3 sampel uji yaitu:

- Benda uji I (RKP – I) : 6125000,00 Nmm
- Benda uji II (RKP – II) : 6031250,00 Nmm
- Benda uji III (RKP – III): 6000000,00 Nmm

Ketiga hasil pengujian di atas mempunyai rata-rata sebesar 6052083,33 Nmm. Dari hasil pengujian statistik *Student T Test*, maka diperoleh perbedaan antara hasil desain dengan rata-rata hasil pengujian di laboratorium tidak berbeda secara signifikan dengan tingkat kepercayaan 95% atau probabilitas 5%, dengan demikian hasil desain dapat diterima.

Saran

Dari hasil yang diperoleh pada penelitian ini, maka penulis dapat memberikan saran sebagai berikut:

1. Bagi yang tertarik ingin melakukan penelitian, khususnya pada struktur beton yang akan diberi perkuatan, maka sebaiknya mengecek kapasitas dari alat uji yang tersedia atau alat uji yang akan digunakan sebelum membuat benda uji.
2. Pada penelitian ini juga dapat dilakukan penelitian lanjutan, yaitu membuat perhitungan perkuatan eksternal dengan jumlah tulangan yang lebih dari 1 baris tulangan, baik pada baris tulangan tekan maupun pada baris tulangan rangkap.
3. Pada penelitian ini menggunakan lem epoxy sebagai perekat pelat perkuatan ke badan beton, maka pada penelitian selanjutnya, dapat dikembangkan metode perkuatan yang berbeda.
4. Penelitian ini mempunyai benda uji dengan 3 sampel pada masing-masing tipe benda uji, maka pada penelitian selanjutnya dapat digunakan sampel uji yang lebih banyak agar memperoleh data yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Asroni A. 2010. Balok dan Pelat Beton Bertulang, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 1989. SNI 07-0408-1989 (Cara Uji Tarik Logam). BSN, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. 1991. SNI-07-2529-1991 (Metode Pengujian Kuat Tarik Baja Beton). BSN, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. 1995. SNI 03-3976-1995 (Tata Cara Pengadukan Pengecoran Beton). BSN, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. 1998. SNI 03-4804-1998 (Metode Pengujian Bobot Isi Dan Rongga Udara Dalam Agregat). BSN, Jakarta

- Badan Standarisasi Nasional. 1998. SNI 07-0371-1998 (Batang Uji Tarik Untuk Bahan Logam). BSN, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. 2000. SNI 03-2834-2000 (Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal). BSN, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. 2002. SNI 03-2847-2002 (Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung). BSN, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. 2002. SNI 13-6669-2002 (Penentuan Kadar Lempung Bahan Pasir). BSN, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. 2008. SNI 1970:2008 (Cara Uji Berat Jenis Dan Penyerapan Air Agregat Halus). BSN, Jakarta
- Departemen Pekerjaan Umum. 1990. SNI 03-1968-1990 (Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan Agregat Halus Dan Kasar). Pustran-Balitbang PU, Bandung
- Departemen Pekerjaan Umum. 1990. SNI 03-1971-1990, (Metode Pengujian Kadar Air Agregat). Pusjatan, Bandung
- Dunia Teknik Sipil, Desain Balok Beton Bertulang. (Online) <http://duniatekniksipil.web.id/>. Diakses pada tanggal 03 September 2015 pada pukul 7:54 WITA
- Mulyono, Tri. 2007. Teknologi Beton. Penerbit Andi, Yogyakarta
- Nugraha, Paul dan Antoni. 2007. Teknologi Beton. Penerbit Andi, Yogyakarta
- Pusjatan-Balitbang PU. 1997. Metode Pengujian Kuat Lentur Normal Dengan Dua Titik Pembebanan (SNI-03-4431-1997), Bandung
- Sikadur ® -31 CF Normal. 2013. Product Data Sheet, Edition 02/12/2013, Identification No: 02 04 02 03 001 0 000039, United Kingdom
- Sitepu N.N. 2014. Perilaku Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan Pelat Baja Dalam Memikul Lentur, Universitas Sumatera Utara, Sumatera Utara
- Statistic How To, How to Find Outliers in Data: Easy Steps and Video. (Online) <http://www.statisticshowto.com/>. Diakses pada tanggal 07 Desember 2015 pada pukul 03:43 WITA
- Uji Statistik, Jarque Bera. (Online) <http://www.statistikian.com/>. Diakses pada tanggal 16 November 2015 pada pukul 22:09 WITA
- Uji Statistik, Student T Test. (Online) <http://www.statistikian.com/>. Diakses pada tanggal 17 November 2015 pada pukul 00:22 WITA