

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Pemikiran

Rehabilitasi struktur dimaksudkan untuk mengembalikan kinerja struktur dan memperpanjang umur **masa layan** suatu struktur yang telah mengalami degradasi struktur akibat kondisi kerusakan. Disamping itu, rehabilitasi struktur dapat dilakukan jika terjadi keraguan terhadap kekuatan struktur, yang dapat menimbulkan rasa kekuatiran bagi penggunanya. Banyak struktur beton bertulang yang memerlukan peningkatan kekuatan dalam memikul beban, misalnya struktur jembatan sejalan dengan meningkatnya beban lalu lintas, ataupun struktur gedung yang direncanakan akan beralih fungsi. Selain itu struktur beton terutama didaerah pantai banyak yang mengalami korosi pada tulangnya yang akhirnya menyebabkan penurunan kekuatan struktur. Rehabilitasi struktur beton bertulang untuk bangunan gedung biasanya dilakukan karena alasan-alasan sebagai berikut :

1. Kesalahan dalam perencanaan, misalnya : konfigurasi dan sistem struktur yang lemah, kesalahan dalam merancang beban rencana, dimensi penampang dan tulangan yang tidak cukup untuk memikul beban rencana.
2. Kesalahan dalam pelaksanaan, misalnya : Jumlah dan diameter tulangan lebih kecil dari yang ditetapkan dalam gambar rencana, mutu beton dan baja tulangan tidak sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan.
3. Peningkatan beban hidup, misalnya alih fungsi bangunan dari rumah tinggal menjadi gudang, dari kantor menjadi ruang pertemuan.

4. Penurunan kekuatan akibat pengaruh dinamis, suhu dan lingkungan seperti : gempa bumi, getaran, beban berulang, ledakan, tumbukan, kebakaran, lingkungan korosif dan atau agresif.

Proyek Palur Plaza terletak di Jalan Solo-Sragen KM 6 Palur, Karanganyar. Bangunan tersebut dimulai pelaksanaan pada awal Tahun 2005, dan pada bulan Januari 2007 pelaksanaan pembangunan dihentikan karena adanya keraguan terhadap kekuatan struktur. Mengingat proyek Palur Plaza akan difungsikan sebagai Mall dan banyak dikunjungi oleh masyarakat umum, maka seluruh elemen struktur harus dijamin kekuatannya. Dalam rangka menjamin kekuatan ini, perlu dilakukan investigasi dan evaluasi, untuk mengetahui sejauh mana kondisi kekuatan elemen struktur tersebut. Selanjutnya, pada bagian-bagian elemen struktur yang tidak kuat, harus dilakukan perkuatan.

Ada 4 (empat) komponen utama struktur Proyek Palur Plaza yang diragukan kekuatannya, yaitu struktur pelat, struktur balok, struktur kolom dan struktur pondasi. Pada tinjauan balok untuk bangunan gedung dapat dibedakan : balok anak satu bentang (statis tertentu), balok anak dua bentang atau lebih (balok menerus), dan balok portal yang membentuk satu kesatuan dengan kolom. Balok portal menurut fungsinya mempunyai peran yang lebih penting dibanding balok anak, yaitu sebagai pendukung utama struktur, yang memikul beban pelat dan balok anak beserta seluruh kombinasi beban yang mungkin terjadi, misalnya : beban mati, beban hidup dan beban gempa. Karena pentingnya masalah ini maka rehabilitasi balok didalam penelitian ini utamakan pada balok portal.

B. Rumusan masalah

Didalam latar belakang telah disebutkan bahwa terjadi keraguan terhadap kekuatan struktur pada Proyek Palur Plaza. Dari keraguan tersebut dapat ditentukan masalahnya dalam bentuk rumusan yaitu, sejauh mana kapasitas/kinerja tampang balok pada Proyek Palur Plaza dapat memikul beban rencana. Apabila kapasitas/kinerja tampang balok tersebut tidak cukup didalam memikul beban rencana, tindakan rehabilitasi apa yang harus dilakukan.

C. Batasan masalah :

Berdasarkan gaya yang bekerja, kapasitas/kinerja tampang struktur balok dapat ditinjau melalui kapasitas lentur, geser, torsi dan aksial. Dengan mempertimbangkan bahwa lentur dan geser merupakan gaya yang paling dominan terjadi pada balok, maka didalam penelitian ini dibatasi masalah lentur dan geser.

Bagian struktur yang ditinjau dibatasi pada bangunan portal as 20A sampai dengan as 23D. Portal ini dipilih dengan pertimbangan bahwa bekerjanya beban diperhitungkan paling tinggi dibanding portal yang lain. Portal yang ditinjau terdiri dari portal bangunan tiga lantai dengan atap beton, sedangkan pada portal bangunan yang lain diberikan atap galvalum.

Rehabilitasi struktur yang dibahas pada penelitian ini dibatasi tiga macam bahan perkuatan, yaitu : perkuatan dengan pelapisan *Carbon Fiber reinforced Plastic (CFRP)*, perkuatan dengan pelapisan pelat baja, perkuatan dengan pembesaran beton bertulang. Analisis kapasitas tampang lentur dan geser sesuai SNI-03-2847-2002, dan analisis beban rencana dibatasi pada kombinasi : beban mati, beban hidup, beban gempa.

D. Tujuan

Penelitian ini didasari adanya keraguan terhadap kekuatan balok pada proyek bangunan gedung Palur Plaza , maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui elemen balok di bagian mana yang dinyatakan tidak aman terhadap lentur dan geser, dan mengetahui seberapa besar kapasitas lentur dan geser yang tersedia dapat memikul kapasitas beban rencana.
2. Mengetahui dimensi perkuatan lentur dan geser yang diperlukan, agar kapasitas balok mampu memikul beban rencana dengan aman. Tiga alternatif bahan perkuatan yang diberikan adalah Pelapisan CFRP, Pelapisan Pelat Baja dan Pembesaran Beton Bertulang.
3. Mengetahui Peningkatan Kapasitas lentur dan geser di Laboratorium, pada benda uji balok beton bertulang yang diperkuat dengan pelapisan CFRP, pelapisan pelat baja, dan pembesaran beton bertulang.
4. Mengetahui rasio kekuatan lentur dan geser, yaitu kapasitas lentur dan geser hasil uji di Laboratorium dibanding dengan kapasitas lentur dan geser hasil analisis sesuai SNI 03-2847-2002.
5. Mengetahui alternatif bahan perkuatan terbaik dari tiga alternatif bahan perkuatan yang diberikan pada Proyek Palur Plaza, khususnya ditinjau dari aspek kekuatan.

D. Manfaat

Ada dua manfaat yang diperoleh didalam penelitian ini yaitu manfaat teoritis dan manfaat praktis. Manfaat teoritis adalah dapat memberikan kontribusi ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya tentang rehabilitasi balok beton bertulang. Manfaat praktis di dalam penelitian ini adalah :

1. Memberikan prosedur dan cara-cara investigasi proyek, dengan melakukan pengambilan sampel-sampel benda uji di lapangan dan pengujian di laboratorium sebagai dasar evaluasi kekuatan struktur.
2. Memberikan prosedur evaluasi kekuatan struktur balok, dengan melalui tahapan analisis pembebanan, analisis struktur, analisis kapasitas tampang perlu, analisis kapasitas tampang yang tersedia, analisis faktor aman.
3. Memberikan cara-cara rehabilitasi struktur, yaitu membuat desain perkuatan lentur dan geser balok beton bertulang dengan bahan perkuatan pelapisan CFRP, pelapisan pelat baja dan pembesaran beton bertulang
4. Memberikan prosedur pengujian secara eksperimen kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang tanpa perkuatan, dan balok beton bertulang yang diperkuat dengan : pelapisan CFRP, pelapisan pelat baja, dan pembesaran beton bertulang .
5. Memberikan prosentase peningkatan kekuatan lentur dan geser balok beton bertulang yang diperkuat dengan : pelapisan CFRP, pelapisan pelat baja, dan pembesaran beton bertulang .
6. Memberikan rekomendasi pilihan terbaik bahan perkuatan lentur dan geser balok pada proyek Palur Plaza , khususnya ditinjau dari aspek kekuatan.

BAB II

KAJIAN TEORI

A. Tinjauan Pustaka

Untuk mengembalikan kinerja struktur dan memperpanjang umur masa layan suatu struktur yang telah mengalami degradasi struktur akibat kondisi kerusakan pada sebagian besar komponen strukturnya, yang dapat menimbulkan rasa kekuatiran, maka diperlukan langkah-langkah penanggulangan. Penanggulangan ini untuk mengatasi seluruh permasalahan yang ada, termasuk perkuatan (*strengthening*) untuk peningkatan kapasitas penampang jika memang dipersyaratkan. Pemilihan material perbaikan dan/atau perkuatan pada struktur beton adalah penting dan kompleks. Hal ini harus memahami apa yang dipersyaratkan oleh pemilik/pengguna, dan harus memperhatikan kondisi lingkungan serta kemudahan dalam metode pelaksanaan. Tergantung kepada ukuran, lokasi serta kondisi, pertimbangan pemilihan material perbaikan dicirikan antara lain oleh beberapa faktor yaitu : material perbaikan (*repair*) sesuai/cocok dengan lapisan dasar material lama, mutu sama atau lebih dari material lama, kecukupan nilai kekuatan lekat dengan lapisan dasar material lama, biaya yang efektif. Bahan perbaikan yang digunakan sebagai perbaikan yang bersifat struktur atau tidak struktur (kosmetik) dibagi dalam dua kelompok yaitu : material semen (*Cement-based*) dan material polimer (*polymer-based*). Bilamana suatu struktur beton setelah dilakukan re-analisis menunjukkan bahwa kekuatan nominal struktur atau elemen tidak cukup, dapat dilakukan improvisasi dengan berbagai teknik / variasi perkuatan (*strengthening*). Perkuatan

merupakan suatu cara perbaikan sehingga dapat meningkatkan kemampuan kapasitas/kinerja penampang untuk dapat memikul beban seperti yang direncanakan. Berbagai teknik/metoda perkuatan yang lazim dilakukan adalah : (a) Dengan memperbesar penampang dan menambah tulangan, (b) Dengan memberikan pelapisan lembaran metalic atau *non-metalic*, (c) Dengan kombinasi keduanya. (Rezady Munaf, 2003)

Beberapa tindakan yang dihasilkan dari evaluasi terhadap kapasitas/kinerja penampang dapat berupa : tidak melakukan tindakan apapun, penurunan kapasitas struktur (menurunkan beban operasional), melakukan perkuatan struktur, melakukan pembongkaran. Apabila ditentukan tindakan perkuatan, maka evaluasi yang dilakukan selanjutnya adalah menentukan metode dan material perkuatan. Metode perkuatan yang umum dilakukan adalah : memperpendek bentang struktur, memperbesar dimensi dari beton, menambah plat baja, melakukan eksternal prestressing. Sejak tahun 90-an mulai sering digunakan metoda baru dalam melakukan perkuatan yaitu dengan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)*. Prinsip metode perkuatan dengan metode CFRP menyerupai penggunaan plat baja. Tiga prinsip penggunaan CFRP dalam perkuatan struktur adalah : meningkatkan kapasitas momen lentur pada balok atau pelat dengan menambahkan CFRP pada bagian tarik, meningkatkan kapasitas geser pada balok dengan menambahkan CFRP dibagian sisi pada daerah geser, meningkatkan kapasitas beban aksial dan geser pada kolom dengan menambahkan CFRP disekeliling kolom. (Hartono, 2003)

Norris & Hamid memaparkan hasil penelitiannya tentang perkuatan geser dan lentur balok dengan Carbon fiber Sheets. Sampel yang dibuat adalah balok beton

bertulang tumpuan sederhana dengan dimensi : lebar 127 mm, tinggi 203 mm, panjang 2440 mm, tulangan tarik 2 D16, tulangan tekan 2 D 10. Untuk pengujian lentur, *Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)* dipasang pada daerah tarik yaitu pada sisi bawah balok dan untuk pengujian geser CFRP dipasang dibagian sisi daerah geser. Hasil studi dengan analisis dan eksperimen menunjukkan bahwa CFRP dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan balok tanpa adanya keruntuhan getas. Dari 19 sampel yang diuji diperoleh grafik hubungan antara Beban-Lendutan, yang menunjukkan bahwa penggunaan CFRP dapat meningkatkan daktilitas struktur. (Norris & Hamid, 1997)

Rebeiz & Fowler memaparkan hasil penelitiannya tentang Uji balok persegi dengan beban lentur. Sampel yang dibuat adalah balok beton bertulang dengan dimensi penampang : lebar 4 in, tinggi 6 in dan panjang 3 kali 18 in. Pada daerah tumpuan dipasang tulangan rangkap dengan sengkang # 3 - 3 in sepanjang 18 in, dan pada tengah bentang sepanjang 18 in dipasang tulangan tunggal tanpa sengkang. Sebagai variasi sampel diambil rasio tulangan ρ antara 3 sampai dengan 6 %. Dari hasil penelitian diketahui hubungan beban dan lendutan adalah mempunyai hubungan positif, artinya semakin besar beban yang bekerja selalu diikuti lendutan yang besar pula. Sampai dengan titik tertentu hubungan antara beban dan lendutan mendekati linier, kemudian cenderung lengkung sedikit setelah melampaui lelehnya tulangan. Dari variasi rasio tulangan ρ yang telah dibuat, diperoleh hasil bahwa semakin kecil rasio tulangan ρ menunjukkan balok lebih dapat mengembangkan lendutan sebelum mengalami putus. (Rebeiz & Fowler, 1996).

B. Dasar Teori

Analisis kapasitas tampang balok beton normal terlentur bertulangan tarik saja, dalam kondisi *under reinforced* berdasarkan SNI 03 – 2847 - 2002

Gaya-gaya yang bekerja pada beton dan baja tulangan

$$C_c = 0,85 f'_c a b \dots\dots\dots (2.1)$$

$$z = d - (a)/2 \dots\dots\dots (2.2)$$

$$T_s = A_s f_y \dots\dots\dots (2.3)$$

Persyaratan kesetimbangan gaya-gaya dalam, memberikan :

$$C_c - T_s = 0 \dots\dots\dots (2.4)$$

$$a = A_s f_y / 0,85 f'_c b \dots\dots\dots (2.5)$$

Sehingga momen nominal dihitung dengan formulasi :

$$M_n = 0,85 f'_c a b (d - a/2) \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana:

b = Lebar balok (mm)

h = Tinggi balok (mm)

d = Tinggi manfaat penampang (mm)

c = Jarak antara garis netral terhadap sisi beton tekan terluar (mm)

a = Tinggi blok tegangan tekan ekuivalen (mm)

z = Lengan momen, jarak antara titik pusat T_s dan C_c (mm)

f'_c = Kuat desak beton/ kuat tekan yang disyaratkan (MPa)

f_y = Tegangan leleh baja tulangan (MPa)

C_c = Gaya desak beton (N)

T_s = Gaya tarik tulangan baja (N)

M_n = Momen nominal balok (Nmm)

Ehsani (1997) mengusulkan, Diagram Regangan dan Gaya untuk Analisis kekuatan Tampang beton bertulang dengan perkuatan Carbon Fiber reinforced Plastic

Dalam penelitian ini, diagram blok tegangan untuk dasar analisis kapasitas lentur balok yang diberi perkuatan, dijabarkan dengan menggabungkan kedua formula analisis, yaitu standard SNI 03-2847-2002 dengan usulan Ehsani 1997.

Ada tiga jenis perkuatan yang dianalisis dan diseleksi pada proyek Palur Plaza yaitu :

- (1) Perkuatan dengan pelapisan *Carbon Fiber Reinforced Plastic* (CFRP).
- (2) Perkuatan dengan pelapisan pelat baja
- (3) Perkuatan dengan pembesaran penampang beton dan pemasangan tulangan tambahan.

Analisis ketiga jenis perkuatan tersebut akan dijabarkan secara rinci seperti formula sebagai berikut.

1. Analisis Kapasitas tampang dengan perkuatan pelapisan *Carbon fiber reinforced plastic* (CFRP)

Gaya-gaya yang bekerja pada beton dan baja tulangan :

$$C_c = 0,85 f'_c a b \dots\dots\dots (2.7)$$

$$T_s = A_s f_y \dots\dots\dots (2.8)$$

$$T_f = A_f f_f \dots\dots\dots (2.9)$$

Persyaratan kesetimbangan gaya-gaya dalam, memberi hubungan :

$$C_c - T_s - T_f = 0 \dots\dots\dots (2.10)$$

$$a = (T_s + T_f) / 0,85 f'_c b \dots\dots\dots (2.11)$$

$$z_1 = d_1 - a/2 \dots\dots\dots (2.12)$$

$$z_2 = d_2 - a/2 \dots\dots\dots (2.13)$$

Sehingga momen nominal dihitung dengan formulasi :

$$M_n = T_s z_1 + T_f z_2 \dots\dots\dots (2.14)$$

Rasio tulangan pada kondisi *balanced* pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan CFRP dijabarkan dengan rumus sebagai berikut :

$$\rho_b = \frac{0,85 f'_c}{f_y} \beta_1 \left(\frac{600}{600 + \left(1 + \left(\frac{E_s}{E_f} \right) \left(\frac{f_f}{f_y} \right) \right) f_y} \right) \dots\dots\dots (2.15)$$

Untuk menjamin daktilitas, luas total tulangan dan perkuatan harus dibatasi sedemikian hingga :

$$A_t = (A_s + A_f) \leq 0,75 A_{sb} \dots\dots\dots (2.16)$$

$$A_{sb} = \rho_b b d \dots\dots\dots (2.17)$$

Analisis Kekuatan geser beton bertulang dengan perkuatan CFRP telah direkomendasikan oleh SNI – 03 – 2847 – 2002, bahwa Kekuatan geser Nominal V_n dihitung dengan rumus :

$$V_n = V_c + V_s + V_f \dots\dots\dots(2.18)$$

Dimana V_c dan V_s diberikan oleh Persamaan SNI – 03 – 2847 – 2002. Kontribusi dari CFRP V_f ditentukan oleh kekuatan *fiber*, dan diasumsikan mempunyai lekatan secara sempurna sepanjang badan balok. Kekuatan geser yang disumbangkan oleh CFRP adalah , sebagai berikut :

$$V_f = b_f t_f f_f d / s_f \dots\dots\dots(2.19)$$

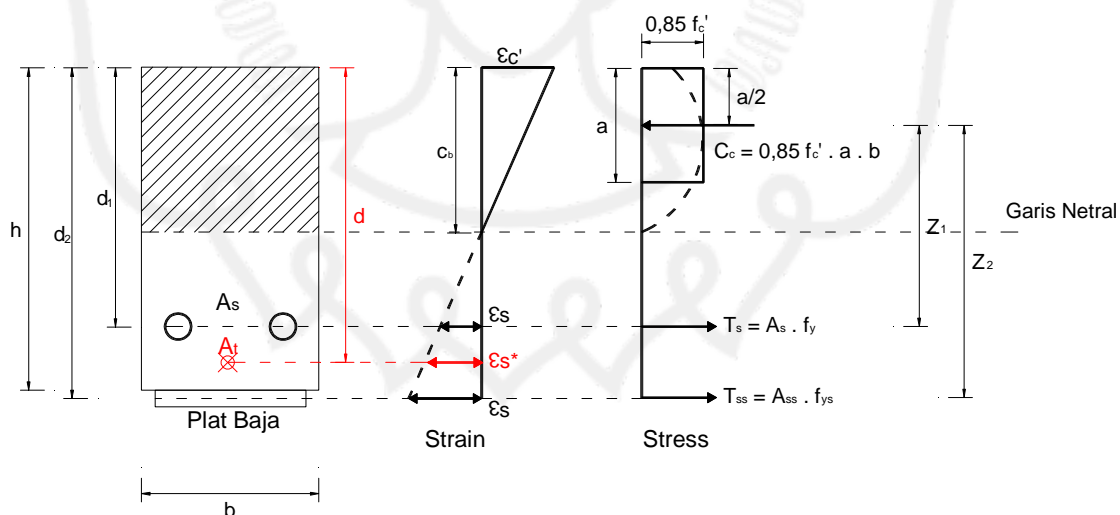
dimana:

- d_1 = Jarak antara titik berat tulangan tarik thd sisi beton tekan (mm)
- d_2 = Jarak antara titik berat CFRP thd sisi beton tertekan (mm)
- d = Jarak antara titik berat A_t thd sisi beton yang tertekan (mm)
- f'_c = Kuat desak beton (MPa)
- f_y = Tegangan leleh baja tulangan (MPa)
- f_f = Tegangan leleh pelapisan CFRP (MPa)
- A_s = Luas tulangan (mm^2)
- A_{sb} = Luas tampang tulangan pada kondisi regangan berimbang.
- A_f = Luas pelapisan CFRP (mm^2)

- A_t = Luas total tulangan dan perkuatan CFRP (mm).
 M_n = Momen nominal balok (Nmm)
 ρ_b = Rasio tulangan pada kondisi regangan berimbang.
 V_f = Kekuatan geser yang disumbangkan oleh CFRP (N)
 b_f = Lebar CFRP (mm)
 t_f = Tebal lapisan CFRP (mm)
 d_f = Tinggi lapisan CFRP untuk perkuatan geser (mm)
 s_f = Spasi perkuatan geser (mm)

2. Analisis Kapasitas Tampang dengan perkuatan Plat baja

Pada perkuatan penampang dengan pelat baja, maka pada daerah tarik terdapat dua komponen kekuatan yaitu akibat kuat tarik tulangan dan kuat tarik akibat pelapisan pelat baja, kekuatan lentur nominal dijabarkan berdasarkan diagram-diagram sebagai berikut :



Gambar 2.4. Diagram Tegangan dan regangan balok beton bertulang dengan perkuatan pelat baja

Gaya-gaya yang bekerja pada beton dan baja tulangan adalah :

$$C_c = 0,85 f'_c a b \dots\dots\dots (2.20)$$

$$T_s = A_s f_y \dots\dots\dots (2.21)$$

$$T_{ss} = A_{ss} f_{ys} \dots\dots\dots (2.22)$$

Persyaratan kesetimbangan gaya-gaya dalam, memberi hubungan :

$$C_c - T_s - T_{ss} = 0 \dots\dots\dots (2.23)$$

$$a = (T_s + T_{ss}) / 0,85 f'_c b \dots\dots\dots (2.24)$$

Sehingga momen nominal dihitung dengan formulasi :

$$M_n = T_s (d_1 - a/2) + T_{ss} (d_2 - a/2) \dots\dots\dots (2.25)$$

Rasio tulangan pada kondisi *balanced* pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan pelapisan pelat baja dijabarkan dengan rumus sebagai berikut :

$$\rho_b = \frac{0,85 f'_c}{f_y} \beta_1 \left(\frac{600}{600 + \left(1 + \left(\frac{E_s}{E_{ss}} \right) \left(\frac{f_{ys}}{f_y} \right) \right) f_y} \right) \dots\dots\dots (2.26)$$

Agar kekuatan pelat baja mencapai kondisi leleh, harus dipenuhi:

$$A_t = (A_s + A_{ss}) \leq A_{sb} \dots\dots\dots (2.27)$$

$$A_{sb} = \rho_b b d \dots\dots\dots (2.28)$$

Analisis Kekuatan geser Beton bertulang dengan kekuatan pelat baja sesuai SNI-03-2847-2002, dihitung dengan rumus :

$$V_n = V_c + V_s + V_{sp} \dots\dots\dots (2.29)$$

Dimana V_c dan V_s diberikan oleh Persamaan SNI – 03 – 2847 – 2002. Kontribusi dari plat baja V_{sp} untuk kekuatan geser ditentukan sebagai berikut :

$$V_{sp} = b_{sp} t_{sp} f_{sp} d_{sp} / s_{sp} \dots\dots\dots (2.30)$$

Dimana :

f_{ys} = Tegangan leleh pelapisan pelat baja untuk lentur (MPa)

A_{ss} = Luas tampang pelapisan pelat baja untuk lentur (mm²)

V_{sp} = Kekuatan geser yang disumbangkan oleh plat baja (N)

b_{sp} = Lebar plat baja untuk perkuatan geser (mm)

t_{sp} = Tebal plat baja untuk perkuatan geser (mm)

f_{sp} = Kekuatan tarik dari plat baja untuk perkuatan geser (MPa)

d_{sp} = Tinggi pelat baja untuk perkuatangeser (mm)

s_{sp} = Jarak pemasangan pelat baja untuk perkuatan geser (mm)

3. Analisis Kapasitas Tampang Dengan Perkuatan Beton Betulang

Alternatif ketiga adalah perkuatan penampang dengan menambah beton dan baja tulangan. Apabila sistem perkuatan ini dipilih, maka mutu beton yang digunakan untuk bahan perkuatan minimal harus sama atau lebih tinggi dari beton yang diperkuat. Struktur terdiri dari dua mutu beton yang berbeda, maka untuk perhitungan kapasitas lentur maupun geser terlebih dulu harus dilakukan perhitungan penyesuaian penampang berdasarkan rasio modulus elastisitas kedua mutu beton tersebut. Keterangan lebih lanjut mengenai penyesuaian penampang berkenaan mutu beton yang berbeda disajikan pada

Gambar 2.5. Penyesuaian tampang berkenaan perbedaan mutu beton.

Modulus Elastisitas beton awal, $E_c = 4700 \sqrt{f_c'}$ (2.27)

Modulus Elastisitas beton perkuatan, $E_{c,p} = 4700 \sqrt{f_c', p}$ (2.28)

Faktor penyesuaian mutu beton, $f_e = E_{c,p}/E_c$ (2.29)

Luas tampang beton awal, $A_0 = bh$ (2.30)

Luas Tampang beton perkuatan, $A_p = (b_p t_p + 2 h t_p)$ (2.31)

Luas tampang beton baru setelah adanya penyesuaian :

$$A_{br} = A_0 + A_p f_e \dots\dots\dots(2.32)$$

Ukuran Lebar dan tinggi penampang baru setelah penyesuaian luas tampang :

$$b_t (h_p/b_p) b_t = A_{br} \rightarrow b_t^2 = A_{br} / (h_p/b_p)$$

$$b_t = \sqrt{\left(\frac{A_{br}}{(h_p/b_p)}\right)} \dots\dots\dots(2.33)$$

$$h_t = b_t (h_p/b_p) \dots\dots\dots(2.34)$$

Analisis kekuatan lentur nominal penampang dilakukan dengan rumus-rumus sebagai berikut :

Gaya-gaya yang bekerja pada beton dan baja tulangan

$$C_c = 0,85 f'_c a b_t \dots\dots\dots(2.33)$$

$$T_s = A_s f_y \dots\dots\dots(2.34)$$

$$T_{sp} = A_{sp} f_{yp} \dots\dots\dots(2.35)$$

Persyaratan kesetimbangan gaya-gaya dalam, memberi hubungan :

$$C_c - T_s - T_{sp} = 0 \dots\dots\dots(2.36)$$

$$a = (T_s + T_{sp}) / 0,85 f'_c b_t \dots\dots\dots(2.37)$$

$$z_1 = d_1 - a/2 \dots\dots\dots(2.38)$$

$$z_2 = d_2 - a/2 \dots\dots\dots(2.39)$$

Sehingga momen nominal dihitung dengan formulasi :

$$M_n = T_s (d_1 - a/2) + T_{sp} (d_2 - a/2) \dots\dots\dots(2.40)$$

Kekuatan geser nominal penampang setelah dilakukan perkuatan adalah sebagai berikut :

$$V_c = 1/6 \sqrt{f'_c} b_t d \dots\dots\dots(2.41)$$

$$V_{s1} = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d_1}{s_1} \dots\dots\dots(2.42)$$

$$V_{s2} = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d_2}{s_2} \dots\dots\dots (2.43)$$

Total kekuatan geser akibat tulangan geser awal dan perkuatan adalah :

$$V_{st} = V_c + V_{s1} + V_{s2} \dots\dots\dots (2.44)$$

dimana:

T_{sp}	=	Gaya tarik tulangan perkuatan (N)
b_t	=	Lebar balok baru setelah adanya penyesuaian f_c' (mm)
h_t	=	Tinggi balok baru setelah adanya penyesuaian f_c' (mm)
f'_{cp}	=	Kuat desak beton perkuatan (MPa)
E_c	=	Modulus elastisitas beton awal (MPa)
E_{cp}	=	Modulus elastisitas beton perkuatan (MPa)
f_{sp}	=	Tegangan leleh tulangan perkuatan (MPa)
A_{sp}	=	Luas tulangan tambahan untuk perkuatan (mm ²)
d	=	Jarak antara titik berat A_t thd sisi beton tekan terluar (mm)
s_1	=	Spasi sengkang awal sebelum diperkuat (mm)
s_2	=	Spasi sengkang perkuatan (mm)

4. Metode Kekuatan Didalam Analisis Kapasitas Tampang.

Dengan metode kekuatan, suatu penampang harus dirancang sedemikian hingga, kekuatan yang ada \geq kekuatan yang diperlukan untuk memikul beban berfaktor. Kekuatan yang ada dihitung berdasarkan aturan dan pemisalan atas perilaku yang ditetapkan menurut peraturan. Kekuatan yang diperlukan, ditetapkan dengan jalan menganalisis struktur terhadap beban berfaktor. Untuk menjamin keamanan struktur, kekuatan yang ada ini harus dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan (ϕ), yang

memperhitungkan kemungkinan kurangnya mutu bahan dilapangan. Faktor beban (U) harus diperhitungkan untuk memperhitungkan kemungkinan terjadinya pelampauan beban dalam struktur.

Disamping faktor beban (U) dan faktor Reduksi kekuatan (ϕ), di dalam ACI-440 juga terdapat faktor reduksi lainnya yaitu :

- Faktor reduksi pasial CFRP untuk elemen Lentur = 0,85 ; Geser = 0,85 dan kolom bulat = 0,60; kolom bujur sangkar = 0,50.
- Faktor reduksi untuk material CFRP akibat pengaruh lingkungan (c_e), dipakai sebagai dasar perencanaan untuk tegangan tarik ultimate $f_{tu} = c_e f_f$ dan $\epsilon_u = c_e \epsilon$, dimana f_f dan ϵ adalah tegangan tarik dan regangan CFRP dari pabrik.

Sesuai peraturan SNI 03-2847-2002, besaran faktor reduksi kekuatan (ϕ) untuk berbagai kondisi gaya diperlihatkan pada Tabel 2.1, dan besaran faktor beban (U) diperlihatkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Faktor reduksi kekuatan menurut SNI 03-2847-2002

No	Kondisi Gaya	Faktor Reduksi (ϕ)
1	Lentur, tanpa beban aksial	0,80
2	Aksial tarik dan aksial tarik dengan lentur	0,80
3	Geser dan torsi	0,65

4	Geser pada komponen struktur penahan gempa	0,55
---	--	------

Tabel 2.2. Faktor beban sesuai SNI 03-2847-2002

No	Kombinasi beban	Faktor beban
1	D	1,4 D
2	D, L	1,2 D + 1,6 L + 0,5 (A atau R)
3	D, L, E	1,2 D + 1,0 Lr ± 1,0 E
4	D, E	0,9 D ± 1,0 E

Keterangan :

D = Beban mati

Lr = Beban hidup tereduksi

L = Beban hidup

E = Beban gempa

A = Beban atap

5. CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*)

Plat CFRP adalah suatu bahan perkuatan struktur yang tipis, mempunyai kekuatan sangat tinggi (± 10 kali kekuatan baja). Plat CFRP yang digunakan dalam penelitian ini produksi *sika CarboDur* yang mempunyai tipe dan spesifikasi seperti Tabel 2.3. dan Tabel 2.4.

Tabel 2.3. Tipe dan ukuran plat perkuatan CFRP.

Tipe CFRP	Lebar (mm)	Tebal (mm)
Sika CarboDur S512	50	1.2
Sika CarboDur S612	60	1.2
Sika CarboDur S812	80	1.2
Sika CarboDur S1012	100	1.2
Sika CarboDur S1212	120	1.2
Sika CarboDur S1512	150	1.2

Sika CarboDur S614	60	1.4
Sika CarboDur S914	90	1.4
Sika CarboDur S1214	120	1.4

Sumber : *The Latest SIKA Technology in Structural Strengthening with SIKA CARBODUR Composite Strengthening Systems*

Tabel 2.4. Spesifikasi Plat perkuatan CFRP

Type of CFRP	Sika CarboDur S
Base	Carbon fiber reinforced with an epoxy matrix
Fiber volumetric content*	>68 %
E-Modulus (mean value)	>165.000 N/ mm ²
Tensile strength* (min value)	>2.800 N/ mm ²
Mean value of tensile strength at break* (mean value)	3.050 N/ mm ²
Elongation at break* (min value)	>1.7 %
Density	1.5 g/cm ³
*Mechanical values obtained from longitudinal direction of fibers	

Sumber : *The Latest SIKA Technology in Structural Strengthening with SIKA CARBODUR Composite Strengthening Systems*

6. Perkat Antara Plat CarboDur Dengan Beton Bertulang.

Untuk merekatkan plat CarboDur pada permukaan beton bertulang, dilakukan dengan sistem pelapisan eksternal, digunakan suatu *epoxy matrix* yang bersama-sama membentuk suatu material baru yang mempunyai kekuatan lebih besar dari pada kekuatan awal. Sebelum dilakukan pelapisan dengan plat CarBodur, permukaan beton yang akan dilapis dengan plat CarBodur harus dikasarkan lebih dahulu agar perekatan antara plat CarboDur dengan beton bisa lebih sempurna. Dalam penelitian ini *epoxy* yang digunakan adalah *epoxy SikaDur-30*. Data-data teknis perekat antara plat CFRP dengan beton diperlihatkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Data teknik perekat antara CFRP dengan beton.

Type epoxy	Sikadur-30
Appearance	Comp. A : White paste Comp. B : Black paste Comp. A+B : Light grey when mixed
Application temperature	Substrate and ambient +10°C to +35°C
Shelf life	One year in original packing at +5°C to +25°C
Mix Ratio	A : B = 3 : 1 (part by weight and volume)
Density	1.77 kg/l (A + B)
Pot Life (to FIP)	40 minutes (at + 35°C) 100 minutes (at + 15°C)
Open time (to FIP)	30 minutes (at + 35°C)

Sumber : *The Latest Sika Technology in Structural Strengthening with Sika CARBODUR Composite Strengthening Systems*

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan **metode analisis** dan **metode eksperimen**. Metode analisis, dilakukan kajian secara analisis terhadap kondisi kekuatan struktur balok pada proyek Palur Plaza berdasarkan peraturan yang berlaku, dengan memberikan desain perkuatan bagi struktur yang tidak aman. Metode eksperimen, dilakukan “pengujian secara eksperimen” terhadap benda uji balok beton bertulang dilaboratorium.

Pada metode analisis, sebagai populasi adalah balok beton bertulang pada proyek Palur Plaza. Sampel yang diambil adalah balok-balok portal pada As 20A s/d 23D. Dari pengujian lapangan dan laboratorium menghasilkan data-data : mutu beton, mutu baja tulangan, dimensi beton, dimensi tulangan pada kondisi eksisting. Data-data tersebut dievaluasi secara analisis untuk mengetahui bagian-bagian balok yang tidak aman. Pada bagian balok-balok yang tidak aman, diberikan desain perkuatan lentur dan geser dengan mengambil tiga alternatif bahan perkuatan, yaitu : *Carbon fiber reinforced plastic* (CFRP), pelat baja, beton bertulang. Dengan tiga alternatif bahan perkuatan yang diambil, diharapkan dapat dipilih jenis bahan perkuatan yang paling sesuai untuk proyek Palur Plaza.

Pada metode eksperimen, dilakukan pengujian kapasitas lentur dan geser dilaboratorium. Benda uji berupa balok beton bertulang dengan tiga alternatif bahan perkuatan, yaitu : *Carbon fiber reinforced plastic* (CFRP), pelat baja, beton bertulang.

Pada desain benda uji balok beton bertulang, pola keruntuhan direncanakan pada posisi yang benar. Benda uji pada pengujian lentur, keruntuhan balok direncanakan terjadi pada daerah momen maksimum, yaitu pada daerah sepertiga bentang bagian tengah. Hal ini bisa dilakukan dengan merancang kapasitas tampang geser jauh lebih besar dari pada kapasitas tampang lentur. Demikian juga benda uji pada pengujian geser, keruntuhan direncanakan pada daerah sepertiga bentang bagian tepi, dengan jalan merancang kapasitas lentur jauh lebih besar dari pada kapasitas geser. Sampel benda uji tersebut diuji di Laboratorium Struktur Fakultas Teknik UNS dengan peralatan *Loading test* dilengkapi hydrolic Jack kapasitas 25 ton. Dengan interval pembebanan 100 kg diperoleh data pengujian berupa : beban, lendutan, pola retak dan posisi keruntuhan. Data-data tersebut dikumpulkan, dianalisis untuk mendapatkan suatu grafik hubungan antara Beban dan Lendutan. Kapasitas tampang hasil uji dianalisis berdasarkan data beban pada kondisi leleh. Kapasitas tampang hasil uji diverifikasi dengan kapasitas tampang hasil analisis sesuai SNI-03-2847-2002, untuk memberikan pertimbangan didalam merekomendasi tentang “Desain perkuatan lentur dan geser pada proyek Palur Plaza. Dari analisis data dapat diketahui pula nilai peningkatan kekuatan tertinggi dari ketiga alternatif bahan perkuatan, sebagai masukan berharga didalam memilih jenis bahan perkuatan terbaik pada Proyek Palur Plaza.

Kerangka pikir didalam penelitian ini disajikan pada Gambar 3.1, selanjutnya tahapan penelitian secara lebih mendetail mengenai Inspeksi pendahuluan, Evaluasi, Solusi Rehabilitasi dan Pengujian eksperimen di Laboratorium diuraikan pada pasal-pasal berikut ini.



A. Inspeksi pendahuluan.

Inspeksi pendahuluan; dimaksudkan untuk mengumpulkan data-data struktur kondisi eksisting yang meliputi geometri struktur, cacat struktur, mutu beton dan mutu baja tulangan yang terpasang dilapangan.

- a. Geometri struktur ; mengamati dimensi struktur beton bertulang yang terpasang dilapangan. Berkenaan tidak tersedia gambar kerja dilapangan, maka untuk mendapatkan informasi yang akurat tentang kondisi eksisting struktur, dilakukan

pengukuran langsung dilapangan yang meliputi denah struktur, panjang bentang balok, tinggi antar tingkat kolom, dimensi kolom, dimensi balok, tulangan lentur balok, tulangan geser balok. Jumlah dan diameter tulangan diukur langsung dilapangan, yaitu dengan jalan menampakkan tulangan pada daerah-daerah tertentu yang berpotensi terjadinya gaya-gaya maksimum. Data jumlah tulangan terpasang diverifikasikan dengan informasi yang diberikan oleh pelaksana lapangan.

- b. Investigasi cacat struktur ; mengamati kemungkinan adanya cacat struktur seperti keropos, berlobang, retak, mengelupas dan sebagainya. Hal ini sebagai data luas tampang balok netto, untuk keperluan analisis kapasitas tampang pada kondisi eksisting.
- c. Investigasi mutu beton dilapangan dilakukan dengan alat hammer test; dimaksudkan untuk mendapatkan pemetaan secara menyeluruh tentang mutu beton yang terpasang dilapangan. Penentuan titik-titik pengujian diambil sedemikian hingga dapat mewakili semua elemen struktur yang ada, dan diutamakan pada elemen-elemen struktur yang secara visual kualitasnya dipandang kurang baik. Didalam penelitian ini jumlah titik hammer test yang diambil sebanyak 15 titik yang mewakili struktur pelat, balok dan kolom.
- d. Pengambilan sampel beton dilapangan dengan Core Drill; dimaksudkan untuk mendapatkan data akurat tentang kualitas beton yang terpasang dilapangan. Sampel-sampel berupa silinder dari core- drill ini ini diuji di Laboratorium Bahan Fakultas Teknik UNS untuk mengetahui kuat tekan beton yang disyaratkan. Didalam penelitian ini diambil 6 buah sampel silinder, dengan ukuran diameter silinder 60 mm

dan tinggi 120 mm. Pengambilan core-drill diposisikan pada pelat lantai yang berdekatan dengan balok, dan dianggap telah mewakili populasi yang ada.

e. Pengambilan sampel-sampel baja tulangan; dimaksudkan untuk mengetahui kualitas baja tulangan yang terpasang pada struktur kondisi eksisting dilapangan. Sampel-sampel baja tulangan ini kemudian diuji di laboratorium Bahan Bangunan Fakultas Teknik UNS. Dalam penelitian ini diambil 9 buah sampel benda uji, sebagai berikut :

- Baja deform : 3 buah benda uji diameter 16 mm, untuk tulangan memanjang balok dan kolom.
- Baja deform : 3 buah benda uji diameter 13mm, untuk tulangan memanjang kolom.
- Baja polos : 3 buah benda uji diameter 8 mm, untuk sengkang balok dan kolom.

B. Evaluasi

Evaluasi dimaksudkan untuk mengetahui apakah kekuatan struktur eksisting mampu memikul beban rencana dengan aman menurut peraturan pembebanan yang berlaku di Indonesia.

Prosedur evaluasi kekuatan struktur dijabarkan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut :

- a. Hitung gaya nominal perlu ($F_{n,perlu}$) ; beban rencana meliputi beban mati, beban hidup dan beban gempa. Beban mati dan beban hidup dirancang sesuai SNI 1727-1989. Beban gempa dirancang dengan cara analisis statik ekuivalen sesuai SNI 03-1726-2002 dengan mengambil asumsi bahwa sistem struktur sebagai sistem pemikul momen menengah (SPMM). Kombinasi beban berfaktor (F_u) pengaruh beban mati, beban hidup dan beban gempa dihitung sesuai SNI 03-2847-2002. Gaya nominal perlu ($F_{n,perlu}$) dihitung berdasarkan beban berfaktor maksimum dibagi dengan faktor reduksi kekuatan (ϕ). Faktor reduksi kekuatan (ϕ) untuk elemen lentur dan geser disesuaikan SNI 03-2847-2002. Analisis Struktur digunakan alat bantu software SAP 2000.
- b. Hitung Kapasitas tampang nominal (F_n); meliputi kapasitas tampang lentur dan kapasitas tampang geser. Pada setiap bentang balok ditinjau pada 3 titik ekstrim yaitu daerah tumpuan kiri, daerah Lapangan dan daerah tumpuan kanan. Berdasarkan mutu beton dan baja tulangan yang terpasang di Lapangan, analisis tampang lentur dan geser balok pada kondisi eksisting dihitung sesuai standar SNI 03-2847-2002.
- c. Hitung apakah kapasitas tampang balok mampu memikul beban rencana dengan aman; bandingkan Gaya nominal perlu ($F_{n,perlu}$) dan Kapasitas tampang nominal ada ($F_{n,ada}$). Bila $F_n > F_{n,perlu}$, maka Kapasitas tampang balok memenuhi syarat keamanan, sehingga tidak diperlukan adanya tindakan perkuatan. Bila $F_n < F_{n,perlu}$, maka kapasitas tampang balok tidak cukup untuk memikul beban rencana, sehingga tindakan perkuatan harus dilakukan agar balok dijamin keamanannya.

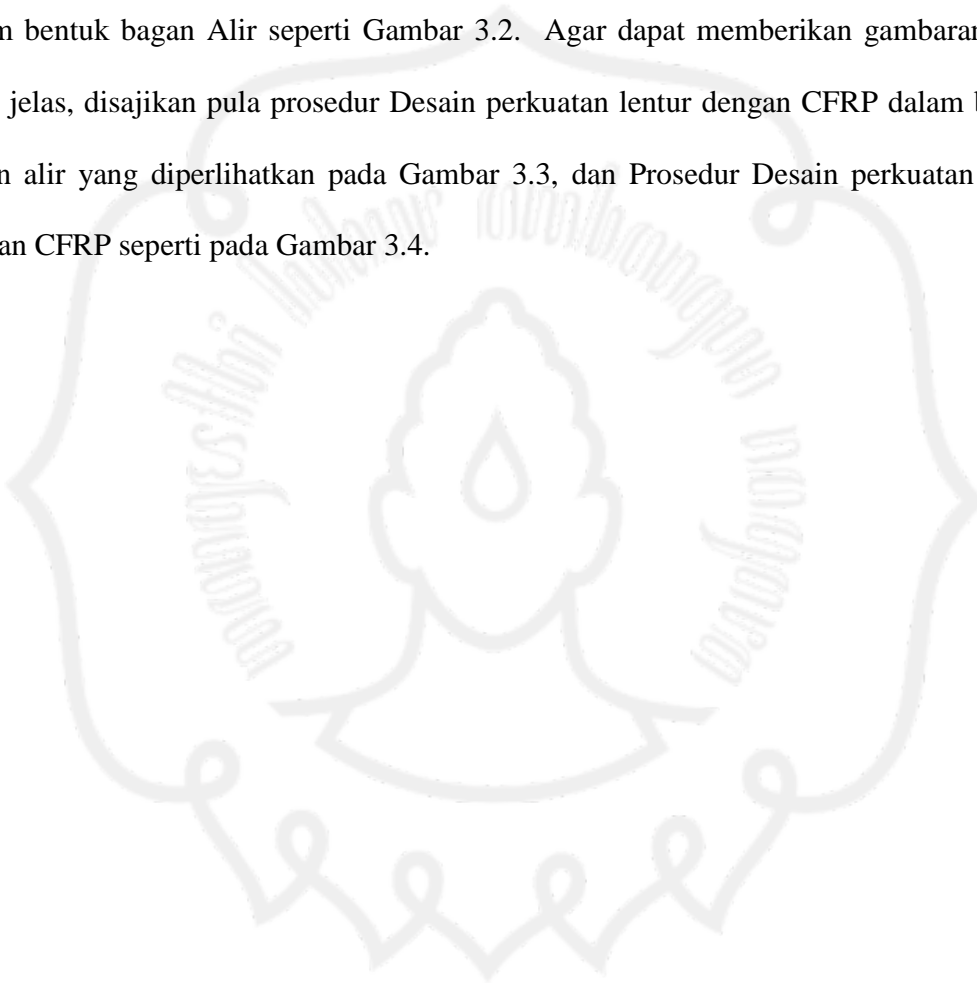
C. Solusi Rehabilitasi

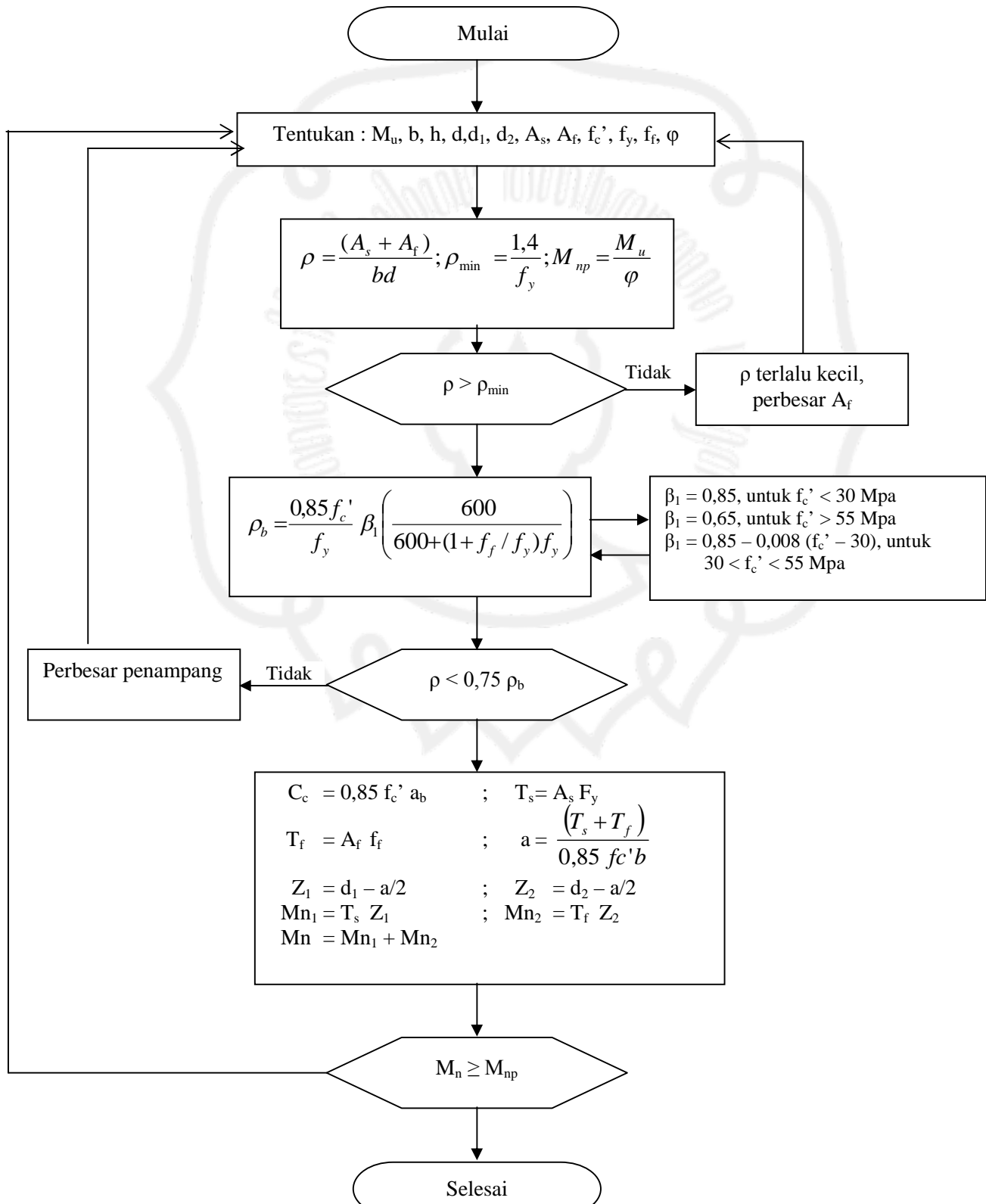
Solusi rehabilitasi dimaksudkan untuk memberikan desain perkuatan bagi tampang balok yang dinyatakan tidak aman. Didalam penelitian ini diberikan tiga alternatif bahan perkuatan, dan diharapkan dari tiga alternatif tersebut dapat dipilih alternatif yang paling sesuai untuk proyek Palur Plasa. Desain perkuatan dengan tiga alternatif bahan perkuatan adalah sebagai berikut :

1. Perkuatan kapasitas lentur dan geser dengan pelapisan *Carbon Fiber Reinforced Plastic* (CFRP). Bahan perkuatan dipilih produksi Sika Carbudur tipe S dengan kuat tarik ≥ 2800 MPa. Kapasitas tampang nominal (F_n), dianalisis sesuai standart SNI 03-2847-2002 dengan dilakukan penyesuaian gaya-gaya tambahan akibat perkuatan sika carbudur. Disain perkuatan harus dijamin keamanannya, sedemikian hingga struktur mempunyai faktor keamanan yang cukup, dengan tanpa mengabaikan batas tulangan (*under reinforced*).
2. Alternatif kedua, Perkuatan Kapasitas Lentur dan geser dengan pelapisan Pelat baja. Bahan Baja pelat didalam penelitian ini dipakai baja pelat BJ 36 yang mempunyai kuat leleh 2400 kg/cm². Kapasitas tampang nominal (F_n) dianalisis sesuai standart SNI 03-2847-2002 dengan penyesuaian adanya gaya-gaya tambahan akibat perkuatan pelat baja. Disain perkuatan harus dijamin keamanannya, sedemikian hingga struktur mempunyai faktor keamanan yang cukup, dengan tanpa mengabaikan batas tulangan maksimum (*under reinforced*).
3. Alternatif ketiga, Perkuatan kapasitas lentur dan geser dengan pembesaran beton bertulang. Pembesaran tampang beton dirancang dengan ketebalan 50 mm. Mutu beton perkuatan ditetapkan lebih tinggi dari pada mutu beton awal yaitu 50 MPa, mutu baja perkuatan 320 MPa. Kapasitas tampang nominal (F_n) dianalisis sesuai

standart SNI 03-2847-2002 dengan penyesuaian adanya gaya-gaya tambahan akibat adanya perkuatan pembesaran penampang. Disain perkuatan harus dijamin keamanannya, sedemikian hingga struktur mempunyai faktor keamanan yang cukup dengan tanpa mengabaikan batas tulangan maksimum (*under reinforced*).

Prosedur Evaluasi sampai dengan Solusi rehabilitasi didalam penelitian ini disajikan dalam bentuk bagan Alir seperti Gambar 3.2. Agar dapat memberikan gambaran yang lebih jelas, disajikan pula prosedur Desain perkuatan lentur dengan CFRP dalam bentuk bagan alir yang diperlihatkan pada Gambar 3.3, dan Prosedur Desain perkuatan Geser dengan CFRP seperti pada Gambar 3.4.

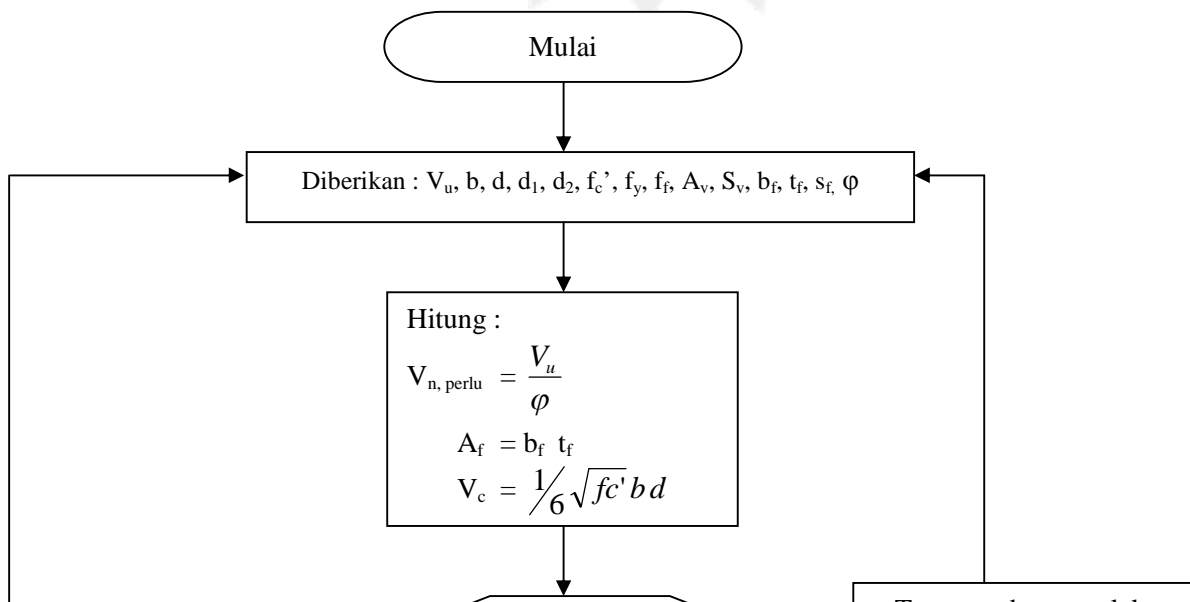




Tidak



Gambar 3.3. Desain Perkuatan Lentur Balok Dengan CFRP





Gambar 3.4. Desain Perkuatan Geser Balok Dengan CFRP

D. Pengujian Ekspesimen

Guna memberikan verifikasi terhadap ketiga alternatif Desain perkuatan diatas, didalam penelitian ini dilakukan pengujian sebanyak 24 buah sampel-sampel balok beton bertulang dengan berbagai bahan perkuatan sebagai berikut :

1. Pengujian kapasitas tampang lentur balok normal tanpa perkuatan, sebanyak 3 buah benda uji.
2. Pengujian kapasitas tampang lentur dengan perkuatan pelapisan CFRP jenis Sika Carbudur, sebanyak 3 buah benda uji.
3. Pengujian kapasitas tampang lentur dengan perkuatan pelapisan pelat baja, sebanyak 3 buah benda uji.
4. Pengujian kapasitas tampang lentur dengan perkuatan pembesaran beton bertulang, sebanyak 3 buah benda uji.
5. Pengujian kapasitas tampang geser balok normal tanpa perkuatan, sebanyak 3 buah benda uji.
6. Pengujian kapasitas tampang geser dengan perkuatan pelapisan CFRP jenis Sika Carbudur.
7. Pengujian kapasitas tampang geser dengan perkuatan pelapisan pelat baja, sebanyak 3 buah benda uji.
8. Pengujian kapasitas tampang geser dengan perkuatan pembesaran beton bertulang, sebanyak 3 buah benda uji.

Dimensi benda uji balok beton bertulang lebar 120 mm, tinggi 180 mm dan panjang 2000 mm. Pada kondisi awal, sampel berupa beton bertulang tanpa perkuatan, kemudian pada usia beton berumur 21 hari dipasang bahan perkuatan. Untuk merekatkan Lapisan perkuatan pada permukaan beton bertulang digunakan suatu *epoxy matrix*. Dalam penelitian ini *epoxy* yang digunakan adalah *epoxy SikaDur-30*. Pengujian dilakukan setelah beton mencapai usia lebih dari 28 hari. Verifikasi analisis, dimaksudkan untuk mengetahui besarnya rasio kekuatan (*Strength ratio, Sr*), yaitu

kekuatan tampang berdasarkan hasil uji eksperimen dibagi dengan kekuatan tampang berdasarkan analisis SNI 03-2847-2002. Spesifikasi benda uji didalam penelitian ini diperlihatkan pada Tabel 3.1, Detail benda uji Perkuatan balok diperlihatkan pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6. Prosedur pengujian kapasitas lentur dan geser diperlihatkan pada Gambar 3.7.

Tabel 3.1. Spesifikasi sampel dengan perkuatan lentur dan geser.

No-sampel	Tampang balok	Kondisi awal		Dimensi Perkuatan	
		Lentur	geser	Lentur	Geser
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1. Perkuatan lentur balok dengan pelapisan CFRP (Sika Carbodur S512)					
M1-1	120x180	2 ϕ 8	\emptyset 8-50	50 X 1,2	-
M1-2	120x180	2 ϕ 8	\emptyset 8-50	50 X 1,2	-
M1-3	120x180	2 ϕ 8	\emptyset 8-50	50 X 1,2	-
2. Perkuatan lentur balok dengan pelapisan pelat baja					
M2-1	120x180	2 ϕ 8	\emptyset 8-50	63 x 8	-
M2-2	120x180	2 ϕ 8	\emptyset 8-50	63 x 8	-
M2-3	120x180	2 ϕ 8	\emptyset 8-50	63 x 8	-
3. Perkuatan lentur balok dengan pembesaran beton bertulang					
M3-1	120x180	2 ϕ 8	\emptyset 8-50	40- (2 ϕ 8)	40- (\emptyset 8-50)
M3-2	120x180	2 ϕ 8	\emptyset 8-50	40- (2 ϕ 8)	40- (\emptyset 8-50)
M3-3	120x180	2 ϕ 8	\emptyset 8-50	40- (2 ϕ 8)	40- (\emptyset 8-50)
4. Perkuatan geser balok dengan pelapisan CFRP (Sika Carbodur S512)					
V1-1	120x180	2 ϕ 16	\emptyset 6-300	50 X 1,2	(12 x 1,2)-250
V1-2	120x180	2 ϕ 16	\emptyset 6-300	50 X 1,2	(12 x 1,2)-250
V1-3	120x180	2 ϕ 16	\emptyset 6-300	50 X 1,2	(12 x 1,2)-250
5. Perkuatan geser balok dengan pelapisan pelat baja					
V2-1	120x180	2 ϕ 16	\emptyset 6-300	63 x 8	(22 x 2,5)- 250
V2-2	120x180	2 ϕ 16	\emptyset 6-300	63 x 8	(22 x 2,5)- 250
V2-3	120x180	2 ϕ 16	\emptyset 6-300	63 x 8	(22 x 2,5)- 250
6. Perkuatan geser balok dengan pembesaran beton bertulang					
V3-1	120x180	2 ϕ 16	\emptyset 6-300	40- (3 ϕ 10)	\emptyset 6-300
V3-2	120x180	2 ϕ 16	\emptyset 6-300	40- (3 ϕ 10)	\emptyset 6-300
V3-3	120x180	2 ϕ 16	\emptyset 6-300	40- (3 ϕ 10)	\emptyset 6-300

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ada 4 (empat) hasil utama yang didapat didalam penelitian ini yaitu hasil Inspeksi pendahuluan, hasil evaluasi, hasil solusi rehabilitasi dan hasil pengujian eksperimen. Inspeksi pendahuluan digunakan sebagai dasar didalam Evaluasi kekuatan struktur. Pada evaluasi kekuatan struktur, diketahui elemen struktur yang aman dan elemen struktur yang tidak aman. Pada bagian elemen struktur yang tidak aman, dilakukan rehabilitasi, sedemikian hingga struktur menjadi aman bagi penggunaannya. Dalam penelitian ini, rehabilitasi struktur berupa **desain perkuatan lentur dan geser** dengan memberikan tiga alternatif bahan perkuatan, yaitu : pelapisan CFRP, pelapisan pelat baja dan pembesaran dimensi beton bertulang. Untuk memberikan keyakinan didalam desain perkuatan lentur dan geser dilakukan pengujian eksperimen melalui sampel-sampel benda uji.

A. Hasil Inspeksi pendahuluan

Hasil Inspeksi pendahuluan didalam penelitian meliputi (1) Bentuk Geometri dan dimensi struktur pada kondisi eksisting ; (2) Kondisi catat struktur; (3) hasil pengujian kuat tekan beton dan (4) Hasil Pengujian Kuat leleh baja tulangan

1. Geometri dan dimensi struktur kondisi eksisting

Struktur yang ditinjau adalah bangunan yang dibatasi As 20A s/d As 23D terdiri dari bangunan 3(tiga) lantai. Peninjauan bagian struktur tersebut didasari dengan pemilihan struktur dengan beban rencana yang dianggap paling besar dibanding struktur yang lain, dimana bagian yang lain terdiri atas atap galvalum dan bagian yang ditinjau dengan atap beton. Pada saat inspeksi ini dilakukan, pelaksanaan pekerjaan baru sampai dengan pengecoran struktur lantai-2 , perkembangan berikutnya pengecoran struktur lantai-3 (atap dag) dilakukan. Data-data teknis hasil investigasi dilapangan diuraikan pada Tabel 4.1. Geometri bangunan kondisi eksisting dan proses inspeksi pendahuluan di lapangan diperlihatkan pada Lampiran A.

Tabel 4.1. Data-data Struktur yang ditinjau.

No	Uraian	besaran
1	Bentang balok kotor (jarak as-as kolom)	5,00 m
2	Bentang balok bersih (jarak antar muka kolom)	4,75 m
3	Tinggi kolom (jarak antar muka balok)	4,00 m
4	Dimensi balok : <ul style="list-style-type: none"> • Lebar balok (b_b) • Tinggi balok (h_b) 	200 mm 450 mm
	Dimensi kolom <ul style="list-style-type: none"> • Lebar kolom (b_c) • Tinggi kolom (h_c) 	250 mm 400 mm
5	Tulangan pada tumpuan	

	<ul style="list-style-type: none"> • Tulangan tarik (posisi di sisi atas) • Tulangan tekan (posisi di sisi bawah) • Tulangan geser (sengkang) 	3 D 16 3 D 16 Φ 8 - 150
6	Tulangan pada Lapangan <ul style="list-style-type: none"> • Tulangan tarik (posisi disisi bawah) • Tulangan tekan (posisi di sisi atas) • Tulangan geser (sengkang) 	3 D 16 3 D 16 Φ 8 -150

2. Cacat struktur

Dari pengamatan secara visual tidak ditemukan adanya cacat struktur, hasil pengecoran baik, tidak ada pengecoran yang keropos atau berlobang. Hal ini bisa dipahami karena struktur beton yang berada diproyek ini tidak terjadi kerusakan pengaruh kebakaran atau pengaruh adanya gempa. Dengan tidak ditemui cacat struktur, maka didalam evaluasi kekuatan tampang didasarkan pada penampang riil yang ada pada kondisi eksisting, tanpa adanya reduksi tampang.

3. Hasil pengujian Beton

Hasil pengujian dengan Rebound Hammer Test di perlihatkan pada Tabel 4.2, hasil uji kuat tekan beton dilaboratorium dari sampel pengambilan sampel Core-drill disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.2. Nilai Kuat tekan beton hasil pengujian dilapangan dengan Rebound Hammer test.

No	Kuat tekan rata-rata (MPa)	No	Kuat tekan rata-rata (MPa)
1	25.30	8	25.63
2	20.40	9	23.90
3	26.36	10	27.93
4	32.23	11	27.54
5	26.70	12	29.80
6	27.55	13	29.48
7	28.40	14	28.65

Sumber : Data investigasi Tim Teknik Jurusan Teknik Sipil FT UNS, Mei 2007.

Tabel 4.3. Hasil Uji Kuat tekan beton sampel di Laboratorium

(Sampel Silinder dari pengambilan CoreDrill)

No	Ukuran Sampel silinder	Kuat tekan rata-rata (MPa)	Posisi pengambilan sampel
1	Ø6 cm-tinggi 12 cm	28.755	Pelat lantai dekat balok
2	Ø6 cm-tinggi 12 cm	20.868	Pelat lantai dekat balok
3	Ø6 cm-tinggi 12 cm	44.128	Pelat lantai dekat kolom
4	Ø6 cm-tinggi 12 cm	33.719	Pelat lantai dekat kolom
5	Ø6 cm-tinggi 12 cm	34.562	Pelat lantai dekat balok
6	Ø6 cm-tinggi 12 cm	20.990	Pelat lantai dekat balok

Sumber : Data investigasi Tim Teknik Jurusan Teknik Sipil FT UNS, Mei 2007.

Dengan dua cara pengujian yang telah dilakukan, hasil kuat tekan beton minimumnya mendekati sama, yaitu 20,4 MPa dari pengujian dengan Rebound Hamer test, dan 20,868 MPa dari pengujian silinder core-drill. Maka didalam penelitian ini , nilai

kuat tekan beton (f_c') sebesar 20 MPa ditetapkan sebagai dasar evaluasi kekuatan tampang.

4. Hasil Uji kuat tarik Baja Tulangan

Hasil pengujian baja tulangan diperlihatkan pada Tabel 4.4. Kuat leleh rata-rata baja tulangan deform diameter 16 mm sebesar 324 MPa, diameter 13 mm sebesar 330 MPa. Kuat leleh tulangan polos diameter 8 mm sebesar 240 MPa.

Tabel 4.4. Hasil pengujian kuat leleh baja tulangan.

No	Diameter	Kuat leleh baja (MPa)	Rata-rata (f_y =MPa)	Kegunaan
1	BJTD- 16 mm	325	324	Tulangan memanjang Kolom & balok
2	BJTD- 16 mm	323		
3	BJTD- 16 mm	324		
4	BJTD- 13 mm	328	330	Tulangan memanjang kolom
5	BJTD- 13 mm	332		
6	BJTD- 13 mm	330		
7	BJTP- 8 mm	241	240	Sengkang balok & kolom
8	BJTP- 8 mm	240		
9	BJTP- 8 mm	240		

Sumber : Data investigasi Tim Teknik Jurusan Teknik Sipil FT UNS, Mei 2007.

B. Hasil Evaluasi.

Hasil evaluasi kekuatan Lentur, ditinjau pada kondisi momen maksimum setiap tingkat, ditinjau pada Portal arah X dan Portal Y, ditinjau pada daerah tumpuan dan Lapangan, disajikan pada Tabel 4.5. Hasil evaluasi kekuatan Geser, ditinjau pada kondisi momen maksimum setiap tingkat, ditinjau pada Portal arah X dan Portal Y, ditinjau pada daerah tumpuan dan Lapangan, disajikan pada Tabel 4.6. Evaluasi kekuatan lentur dan geser secara lebih mendetail dilakukan dengan alat bantu program microsoft excel, diperlihatkan pada Lampiran C-1 s/d Lampiran C-4. Hasil Evaluasi kekuatan tampang lentur dan geser secara manual diperlihatkan pada Lampiran D-1 s/d Lampiran D-2.

Tabel 4.5. Hasil evaluasi kekuatan lentur balok pada kondisi eksisting, ditinjau pada Momen maksimum.

Posisi Balok	Ukuran (bxh) (cm ²)	Tulangan Tarik terpasang	Momen nominal,perlu $M_{n,p}$ (tm)	Momen nominal M_n (tm)	SF ($M_n/M_{n,p}$)	Keterangan
a. Balok Portal Arah –X						
Lantai - 1						
• Tumpuan	20 x 45	3 D 16	17,875	7,250	0,41	nok-st
• Lapangan	20 x 45	3 D 16	13,913	7,250	0,52	nok-st
Lantai - 2						
• Tumpuan	20 x 45	3 D 16	17,425	7,250	0,42	nok-st
• Lapangan	20 x 45	3 D 16	9,163	7,250	0,79	nok-st
Lantai – 3 (atap)						
• Tumpuan	20 x 45	3 D 16	7,275	7,250	1,00	ok-nst
• Lapangan	20 x 45	3 D 16	4,863	7,250	1,49	ok-nst
b. Balok Portal arah – Y						

Lantai - 1						
• Tumpuan	20 x 45	3 D 16	17,750	7,250	0,41	nok-st
• Lapangan	20 x 45	3 D 16	12,388	7,250	0,59	nok-st
Lantai - 2						
• Tumpuan	20 x 45	3 D 16	17,613	7,250	0,41	nok-st
• Lapangan	20 x 45	3 D 16	9,450	7,250	0,77	nok-st
Lantai - 3 (atap)						
• Tumpuan	20 x 45	3 D 16	7,200	7,250	1,01	ok-nst
• Lapangan	20 x 45	3 D 16	4,663	7,250	1,55	ok-nst

Catatan :

- nok-st : penampang balok tidak aman, shg perlu adanya perkuatan
- ok-nst : penampang balok sudah aman, tidak diperlukan perkuatan

Tabel 4.6. Hasil evaluasi kekuatan Geser balok kondisi eksisting, ditinjau pada gaya geser maksimum.

Posisi Balok	Ukuran (bxh) (cm ²)	Tulangan geser terpasang	Geser Nominal,perlu $V_{n,p}$ (ton)	Geser nominal V_n (ton)	SF $V_n / V_{n,p}$	Keterangan
a. Balok Portal Arah -X						
Lantai - 1						
• Tumpuan	20 x 45	ø8 – 150	22,855	10,896	0,48	nok-st
• Lapangan	20 x 45	ø8 – 150	10,285	10,896	1,06	ok-nst
Lantai - 2						
• Tumpuan	20 x 45	ø8 – 150	19,691	10,896	0,55	nok-st
• Lapangan	20 x 45	ø8 – 150	8,861	10,896	1,23	ok-nst
Lantai - 3 (atap)						
• Tumpuan	20 x 45	ø8 – 150	9,909	10,896	1,10	ok-nst
• Lapangan	20 x 45	ø8 – 150	6,364	10,896	1,71	ok-nst

b. Balok Portal arah – Y						
Lantai - 1						
• Tumpuan	20 x 45	ø8 – 150	25,091	10,896	0,43	nok-st
• Lapangan	20 x 45	ø8 – 150	10,036	10,896	1,09	ok-nst
Lantai - 2						
• Tumpuan	20 x 45	ø8 – 150	25,364	10,896	0,43	nok-st
• Lapangan	20 x 45	ø8 – 150	10,145	10,896	1,07	ok-nst
Lantai – 3 (atap)						
• Tumpuan	20 x 45	ø8 – 150	10,836	10,896	1,01	ok-nst
• Lapangan	20 x 45	ø8 – 150	7,691	10,896	1,42	ok-nst

Catatan :

- nok-st : penampang balok tidak aman, shg perlu adanya perkuatan
- ok-nst : penampang balok sudah aman, tidak diperlukan perkuatan

Dari Tabel 4.5 dan 4.6 menunjukkan, bahwa balok portal pada tingkat pertama (Lantai-2) dan Lantai tingkat kedua (Lantai-3) dinyatakan **tidak aman terhadap lentur dan geser**. Pada kondisi beban maksimum, kapasitas lentur yang tersedia hanya mampu memikul 41 % dari Kapasitas lentur perlu. Demikian pula kapasitas geser yang tersedia hanya mampu memikul 43 % dari Kapasitas geser perlu. Mengingat proyek Palur Plasa akan difungsikan sebagai Mall dan dikunjungi oleh banyak orang, maka perkuatan struktur mutlak diperlukan.

C. Hasil Solusi rehabilitasi

Dari Hasil Evaluasi dinyatakan, bahwa balok Portal pada lantai-2 dan lantai-3 dinyatakan **tidak aman terhadap Lentur dan geser**. Maka didalam penelitian ini, solusi

rehabilitasi berupa perkuatan lentur dan geser. Bahan perkuatan dipilih tiga alternatif yaitu : *Carbon Fiber Reinforced Plastic* (CFRP), pelat baja, beton bertulang.

Hasil Desain perkuatan lentur dan geser dengan ketiga alternatif bahan perkuatan disajikan pada Tabel 4.7 s/d Tabel 4.12.

Analisis secara manual Desain perkuatan lentur dan geser dengan ketiga alternatif bahan perkuatan disajikan pada Lampiran D-1 s/d Lampiran D- 9. Untuk mempercepat proses analisis evaluasi, didalam penelitian ini digunakan alat bantu program microsoft excel, dan disajikan pada lampiran E 1 s/d Lampiran E 4. Gambar kerja Struktur, yang meliputi balok kondisi eksisting beserta ketiga alternatif desain perkuatannya, yang disajikan pada Gambar 4.1 s/d Gambar 4.4.

Tabel 4.7. Hasil Desain Kapasitas Lentur balok dengan perkuatan CFRP, ditinjau bekerjanya momen maksimum.

Posisi Balok	Kode Sika Carbudur	Dimensi (b x t)	$M_{n,perlu}$ (tm)	M_n (tm)	SF ($M_n/M_{n,perlu}$)	Ket
1	2	3	4	5	$6 = (5) / (4)$	7
a. Balok Portal Arah – X						
Lantai - 1						
• Tumpuan	S1012	100x1,2	17,875	18,835	1,05	ok
• Lapangan	S1012	100x1,2	13,913	18,835	1,35	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	S1012	100x1,2	17,425	18,835	1,08	ok
• Lapangan	S1012	100x1,2	9,163	18,835	2,05	ok
b. Balok Portal arah – Y						
Lantai - 1						
• Tumpuan	S1012	100x1,2	17,750	18,835	1,06	ok

• Lapangan	S1012	100x1,2	12,388	18,835	1,52	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	S1012	100x1,2	17,613	18,835	1,07	ok
• Lapangan	S1012	100x1,2	9,450	18,835	1,99	ok

Tabel 4.8. Hasil Desain Kapasitas Geser balok dengan Perkuatan CFRP, ditinjau bekerjanya gaya geser maksimum.

Posisi Balok	Kode Sika Carbudur	Dimensi (b x t - s)	$V_{n,perlu}$ (tm)	V_n (tm)	SF ($V_n/V_{n,perlu}$)	Ket
1	2	3	4	5	$6 = (5) / (4)$	7
a. Balok Portal Arah – X						
Lantai - 1						
• Tumpuan	S512	50x1,2-200	22,855	30,634	1,34	ok
• Lapangan	S512	-	10,285	10,896	1,06	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	S512	50x1,2-200	19,691	30,634	1,56	ok
• Lapangan	S512	-	8,861	10,896	1,23	ok
b. Balok Portal arah – Y						
Lantai - 1						
• Tumpuan	S512	50x1,2-200	25,091	30,634	1,22	ok
• Lapangan	S512	-	10,036	10,896	1,09	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	S512	50x1,2-200	25,364	30,634	1,21	ok
• Lapangan	S512	-	10,145	10,896	1,07	ok

Tabel 4.9. Hasil Desain Kapasitas Lentur balok dengan Perkuatan Pelapisan Pelat baja, ditinjau bekerjanya momen maksimum.

Posisi Balok	Kode Pelat baja	(b x t) (mm ²)	$M_{n,perlu}$ (tm)	M_n (tm)	SF ($M_n/M_{n,perlu}$)	Ket
1	2	3	4	5	$6 = (5) / (4)$	7
a. Balok Portal Arah – X						
Lantai - 1						
• Tumpuan	P-1212	120x12	17,875	19,299	1,08	ok
• Lapangan	P-1212	120x12	13,913	19,299	1,39	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	P-1212	120x12	17,425	19,299	1,11	ok
• Lapangan	P-1212	120x12	9,163	19,299	2,11	ok
b. Balok Portal arah – Y						

Lantai - 1						
• Tumpuan	P-1212	120x12	17,750	19,299	1,09	ok
• Lapangan	P-1212	120x12	12,388	19,299	1,56	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	P-1212	120x12	17,613	19,299	1,10	ok
• Lapangan	P-1212	120x12	9,450	19,299	2,04	ok

Tabel 4.10. Hasil Desain Kapasitas Geser balok dengan Perkuatan Pelapisan Pelat baja, ditinjau bekerjanya geser maksimum

Posisi Balok	Kode Pelat baja	(b x t - s) (mm ²)	V _{n,perlu} (tm)	V _n (tm)	SF (V _n /V _{n,perlu})	Ket
1	2	3	4	5	6 = (5) / (4)	7
a. Balok Portal Arah –X						
Lantai - 1						
• Tumpuan	P-508	50x8-200	22,855	32,795	1,43	ok
• Lapangan	P-508	-	10,285	10,896	1,06	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	P-508	50x8-200	19,691	32,795	1,67	ok
• Lapangan	P-508	-	8,861	10,896	1,22	ok
b. Balok Portal arah – Y						
Lantai - 1						
• Tumpuan	P-508	50x8-200	25,091	32,795	1,31	ok
• Lapangan	P-508	-	10,036	10,896	1,07	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	P-508	50x8-200	25,364	32,795	1,29	ok
• Lapangan	P-508	-	10,145	10,896	1,07	ok

Tabel 4.11. Hasil Analisis Kapasitas Lentur balok dengan Pembesaran Beton bertulang, ditinjau bekerjanya momen maksimum.

Posisi Balok	Tebal (mm)	Dimensi Tulangan	M _{n,perlu} (tm)	M _n (tm)	SF (M _n /M _{n,perlu})	Ket
1	2	3	4	5	6 = (5) / (4)	7
a. Balok Portal Arah –X						
Lantai - 1						
• Tumpuan	50	3 D 19	17,875	19,704	1,10	ok
• Lapangan	50	3 D 19	13,913	19,704	1,42	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	50	3 D 19	17,425	19,704	1,13	ok
• Lapangan	50	3 D 19	9,163	19,704	2,15	ok

b. Balok Portal arah – Y						
Lantai - 1						
• Tumpuan	50	3 D 19	17,750	19,704	1,11	ok
• Lapangan	50	3 D 19	12,388	19,704	1,59	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	50	3 D 19	17,613	19,704	1,12	ok
• Lapangan	50	3 D 19	9,450	19,704	2,09	ok

Tabel 4.12. Hasil Analisis Kapasitas Geser Balok Dengan Pembesaran

Beton Bertulang

Posisi Balok	Tebal (mm)	Dimensi sengkang	$V_{n,perlu}$ (tm)	V_n (tm)	SF ($V_n/V_{n,perlu}$)	Ket
1	2	3	4	5	$6 = (5) / (4)$	7
a. Balok Portal Arah –X						
Lantai - 1						
• Tumpuan	50	∅ 8-150	22,855	26,173	1,15	ok
• Lapangan	50	∅ 8-150	10,285	26,173	2,54	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	50	∅ 8-150	19,691	26,173	1,33	ok
• Lapangan	50	∅ 8-150	8,861	26,173	2,95	ok
b. Balok Portal arah – Y						
Lantai - 1						
• Tumpuan	50	∅ 8-150	25,091	26,173	1,04	ok
• Lapangan	50	∅ 8-150	10,036	26,173	2,61	ok
Lantai - 2						
• Tumpuan	50	∅ 8-150	25,364	26,173	1,03	ok
• Lapangan	50	∅ 8-150	10,145	26,173	2,58	ok

D. Hasil Pengujian eksperimen

Dari pengujian sejumlah benda uji di Laboratorium diperoleh data-data dan hasil sebagai berikut :

1. Data Beban dan lendutan dengan interval pembebanan 100 kg dicatat, dianalisis, kemudian dibuat grafik Beban-Lendutan seperti pada Gambar 4.5. dan Gambar 4.6.

2. Beban pada kondisi leleh dan kondisi runtuh dicatat, dianalisis untuk mengetahui kapasitas Momen Nominal dan Kapasitas Geser Nominal balok, seperti diperlihatkan pada Tabel 4.13 dan 4.14.
3. Data Pola retak, lebar retak, posisi retak pertama dan posisi runtuh dicatat, untuk mengetahui kebenaran posisi keruntuhan yang diharapkan. Dari 24 sampel yang diuji ternyata posisi keruntuhan seperti yang diharapkan. Keruntuhan lentur terjadi pada daerah sepertiga bentang bagian tengah, dan keruntuhan geser terjadi pada daerah sepertiga bentang bagian tepi balok.
4. Dari Tabel 4.13 dan Tabel 4.14 dapat dihitung peningkatan Kapasitas Lentur dan Geser seperti pada Tabel 4.15. Kemudian dari Tabel 4.15 dibuat Diagram Peningkatan kapasitas lentur dan geser dalam berbagai bahan perkuatan seperti diperlihatkan pada Gambar 4.7.
5. Dari Tabel 4.13 dan Tabel 4.14 dapat dihitung **rasio kekuatan Sr**, yaitu **kapasitas hasil uji** dibagi dengan **Kapasitas hasil analisis** seperti diperlihatkan pada Tabel 4.16. Selanjutnya dari Tabel 4.16 dapat dibuat Diagram **rasio kekuatan Sr** untuk lentur dan geser seperti tersaji pada Gambar 4.8.

Tabel 4.13. Kapasitas Momen Nominal hasil Uji & Analisis

Kode sampel	Tampang balok	Tulangan lentur	Perkuatan lentur	$M_{n,analisis}$ (tm)	$M_{n,uji}$ (tm)	Posisi keruntuhan lentur
BALOK NORMAL (TANPA PERKUATAN)						
M0-1	120x180	2 ϕ 8	-	0,499	0,648	1/3 bentang tengah
M0-2	120x180	2 ϕ 8	-	0,499	0,588	1/3 bentang tengah
M0-3	120x180	2 ϕ 8	-	0,499	0,588	1/3 bentang tengah

Rerata				0,499	0,606	
BALOK DENGAN PERKUATAN CFRP						
M1-1	120x180	2 ϕ 8	50 X 1,2	1,272	1,218	1/3 bentang tengah
M1-2	120x180	2 ϕ 8	50 X 1,2	1,272	1,098	1/3 bentang tengah
M1-3	120x180	2 ϕ 8	50 X 1,2	1,272	1,158	1/3 bentang tengah
Rerata				1,272	1,158	
BALOK DENGAN PERKUATAN PELAT BAJA						
M2-1	120x180	2 ϕ 8	63 x 8	1,226	0,888	1/3 bentang tengah
M2-2	120x180	2 ϕ 8	63 x 8	1,226	0,918	1/3 bentang tengah
M2-3	120x180	2 ϕ 8	63 x 8	1,226	0,978	1/3 bentang tengah
Rerata				1,226	0,928	
BALOK DENGAN PERKUATAN BETON						
M3-1	120x180	2 ϕ 8	t 40- 2 ϕ 8	1,199	1,324	1/3 bentang tengah
M3-2	120x180	2 ϕ 8	t 40- 2 ϕ 8	1,199	1,354	1/3 bentang tengah
M3-3	120x180	2 ϕ 8	t 40- 2 ϕ 8	1,199	1,354	1/3 bentang tengah
Rerata				1,199	1,344	

Catatan :

Kuat tekan beton normal	= 29 MPa
Kuat tekan beton perkuatan	= 50 MPa
Kuat tarik baja tulangan lentur	= 383 MPa
Kuat tarik baja pelat	= 296 MPa
Kuat tarik CFRP Sika CarBodur S	= 2800 MPa

Tabel 4.14. Kapasitas Geser Nominal Hasil Uji Dan Analisis.

Kode sampel	Tampang balok	Tulangan geser	Perkuatan geser	V_n (t)	$V_{n,uji}$ (t)	Posisi keruntuhan geser
BALOK NORMAL (TANPA PERKUATAN)						
V0-1	120x180	ϕ 6-300	-	1,996	2,600	1/3 bentang tepi
V0-2	120x180	ϕ 6-300	-	1,996	2,550	1/3 bentang tepi

V0-3	120x180	Ø6-300	-	1,996	2,400	1/3 bentang tepi
Rerata				1,996	2,520	
BALOK DENGAN PERKUATAN CFRP						
V1-1	120x180	Ø6-300	12 X 1,2	3,080	3,100	1/3 bentang tepi
V1-2	120x180	Ø6-300	12 X 1,2	3,080	3,200	1/3 bentang tepi
V1-3	120x180	Ø6-300	12 X 1,2	3,080	3,000	1/3 bentang tepi
Rerata				3,080	3,100	
BALOK DENGAN PERKUATAN PELAT BAJA						
V2-1	120x180	Ø6-300	22 x 2,5	3,893	3,300	1/3 bentang tepi
V2-2	120x180	Ø6-300	22 x 2,5	3,893	4,200	1/3 bentang tepi
V2-3	120x180	Ø6-300	22 x 2,5	3,893	3,700	1/3 bentang tepi
Rerata				3,893	3,733	
BALOK DENGAN PERKUATAN BETON						
V3-1	120x180	Ø6-300	t 40- ø 6-300	5,232	6,150	1/3 bentang tepi
V3-2	120x180	Ø6-300	t 40- ø 6-300	5,232	6,05	1/3 bentang tepi
V3-3	120x180	Ø6-300	t 40- ø 6-300	5,232	6,10	1/3 bentang tepi
Rerata				5,232	6,100	

Catatan :

Kuat tekan beton normal	= 29 MPa
Kuat tekan beton perkuatan	= 50 MPa
Kuat tarik sengkang	= 304 MPa
Kuat tarik baja pelat	= 296 MPa
Kuat tarik CFRP Sika CarBodur S	= 2800 MPa

Tabel 4.15. Peningkatan Kapasitas lentur dan Geser

Kode sampel	Tanpa perkuatan	Perkuatan CFRP	Perkuatan Pelat baja	Perkuatan Beton	Peningkatan kekuatan
Kapasitas Lentur					
B1	0,606	1,158	-	-	91 %

B2	0,606	-	0,928	-	52 %
B3	0,606	-	-	1,344	121%
Kapasitas Geser					
B1	2,520	3,100	-	-	23 %
B2	2,520	-	3,733	-	48 %
B3	2,520	-	-	6,100	142 %

Tabel 4.16. Rasio kekuatan lentur dan Geser

Kode sampel	Jenis Perkuatan	Hasil analisis (tm)	Hasil uji (tm)	Rasio kekuatan Sr
1	2	3	4	(4/3)
Kapasitas Lentur				
M0	Normal	0,499	0,606	1,214
M1	CFRP	1,272	1,158	0,910
M2	Pelat baja	1,226	0,928	0,755
M3	Beton	1,199	1,344	1,121
Kapasitas Geser				
V0	Normal	1,996	2,520	1,263
V1	CFRP	3,080	3,100	1,006
V2	Pelat baja	3,893	3,733	0,959
V3	Beton	5,232	6,100	1,172

E. Pembahasan

Hasil inspeksi pendahuluan menunjukkan, bahwa kondisi balok pada Proyek Palur Plaza tidak ditemui cacat struktur. Kualitas beton cukup baik ($f_c' = 20$ MPa), namun ukuran penampang balok terlalu kecil, demikian juga dimensi tulangan. Hal yang

demikian dikarenakan bahwa dalam proses perancangan struktur, perencana belum memperhitungkan adanya beban gempa didalam perancangan pembebanan.

Dari hasil evaluasi diketahui, bahwa kekuatan balok tidak aman. Kapasitas lentur yang ada hanya mampu memikul 41 % dari kapasitas lentur perlu maksimum, dan kapasitas geser yang ada sebesar 47 % dari kapasitas geser perlu maksimum. Ini membuktikan bahwa ukuran balok dan tulangan pada proyek Palur Plaza tidak mencukupi kebutuhan, sehingga harus dilakukan tindakan rehabilitasi berupa peningkatan kekuatan struktur.

Perkuatan dengan CFRP dipakai SikaCarbodor tipe S1012 untuk lentur dan tipe S512-200 untuk geser. Berdasarkan diagram momen lentur pada kombinasi beban maksimum, pelapisan perkuatan harus dipasang sepanjang balok sisi bawah (daerah tarik lapangan), dan pada sisi atas (daerah tarik tumpuan) sepanjang 1,55m dari muka kolom. Balok di Proyek Palur Plaza saat ini telah dilakukan perkuatan dengan pelapisan CFRP, namun pemasangannya hanya dilakukan pada daerah tarik lapangan sepanjang $\frac{1}{2}$ bentang bagian tengah. Letak pemasangan ini kurang efektif mengingat beban kritis yang terjadi justru pada daerah tumpuan. Hal ini membuktikan bahwa Analisis beban gempa tidak mendapat perhatian pada proyek Palur Plaza, dan dianggap pengaruh gravitasi yang dominan.

Dari pengujian secara eksperimen terhadap 24 buah balok pada pengujian lentur dan geser dapat dicatat hal-hal berikut :

1. Pola retak balok sesuai yang diharapkan, dimana untuk pengujian lentur keruntuhan balok terjadi pada $\frac{1}{3}$ bentang bagian tengah, dan untuk pengujian geser terjadi

keruntuhan pada $1/3$ bentang bagian tepi. Berarti desain sampel yang memperhitungkan rasio kapasitas lentur dan geser pada penelitian ini berhasil .

2. Pada pengujian lentur, tidak semua benda uji mengalami keruntuhan daktail. Keruntuhan daktail hanya dicapai pada balok normal tanpa perkuatan dan balok dengan perkuatan pembesaran tampang beton. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.5 bahwa balok normal dan balok perkuatan pembesaran tampang terjadi peristiwa leleh sebelum terjadi keruntuhan. Pada kondisi leleh ditandai naik turunnya beban dengan bertambahnya lendutan. Tetapi kondisi ini tidak dicapai pada balok dengan perkuatan CFRP dan perkuatan pelat baja tidak dicapai kondisi leleh. Keruntuhan didahului oleh rusaknya beton kemudian ditandai pengelupasan pelat CFRP maupun pelat baja. Hal ini disebabkan karena kurangnya perhatian didalam merancang dimensi benda uji, khususnya dalam perhitungan daktilitas. Setelah dilakukan perhitungan terbukti bahwa Luas tampang tulangan dan perkuatan melebihi luas tampang pada kondisi *balanced*, berarti sampel yang diuji termasuk kondisi tulangan kuat (*over reinforced*). Hal ini perlu diperhatikan bagi peneliti berikutnya.
3. Dari Tabel 4.18 dapat diketahui bahwa perkuatan balok dengan pembesaran penampang beton bertulang mempunyai **kelebihan** dibanding perkuatan dengan pelapisan CFRP atau pelapisan pelat baja. Besarnya peningkatan kapasitas lentur dengan perkuatan CFRP = 91 %; pelat baja = 52 %; pembesaran beton bertulang = 121%. Peningkatan kapasitas geser dengan perkuatan CFRP = 23 %; pelat baja = 48 %; pembesaran beton bertulang = 142 %.

4. Dari Tabel 4.19 dapat diketahui bahwa kekuatan balok dengan pembesaran penampang beton bertulang memberikan nilai terbaik ditinjau dari nilai rasio kekuatan Sr. Besarnya Sr_{lentur} dengan kekuatan CFRP = 0,91; dengan kekuatan pelat baja = 0,755; dan dengan pembesaran beton = 1,121. Nilai Rasio kekuatan geser Sr_{geser} dengan kekuatan CFRP = 1,006; dengan kekuatan pelat baja = 0,959; dan dengan pembesaran beton = 1,172.
5. Ditinjau dari aspek kekuatan, dari pembahasan nomor 3 dan 4 dapat direkomendasikan bahwa kekuatan balok pada Proyek Palur Plaza sebaiknya menggunakan bahan kekuatan Pembesaran Penampang beton bertulang dengan penambahan tulangan seperti pada Gambar 4.4.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Dari kajian analisis maupun pengujian secara eksperimen, didalam penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Mutu beton pada Proyek Palur Plasa cukup baik ($f_c' = 20$ MPa), Kekuatan balok balok lantai ke-1 dan ke-2 pada bangunan as 20A s/d 23D tidak aman terhadap lentur dan geser. Kapasitas lentur yang ada = 41 % dari kapasitas lentur yang diperlukan. Kapasitas geser yang ada = 43 % kapasitas geser yang diperlukan.
2. Rehabilitasi balok dengan jalan melakukan perkuatan lentur dan geser. Diberikan tiga pilihan alternatif bahan perkuatan yaitu pelapisan CFRP, pelapisan pelat baja dan pembesaran beton bertulang. Dengan pelapisan CFRP, perkuatan lentur dipakai *sikaCarbodur* tipe S1012, dan untuk geser tipe S512-200. Dengan pelapisan pelat baja, perkuatan lentur diperlukan pelat P12012, dan pelat P508-200 untuk geser. Dengan pembesaran beton bertulang, diperlukan tebal penebalan 50 mm, tulangan lentur tambahan 3 D 19, tulangan geser tambahan dengan sengkang $\emptyset 8 - 150$.
3. Pada pengujian secara eksperimen, peningkatan kapasitas lentur dengan perkuatan CFRP = 91 %; pelat baja = 52 %; pembesaran beton bertulang = 121%. Peningkatan kapasitas geser dengan perkuatan CFRP = 23 %; pelat baja = 48 %; pembesaran beton bertulang = 142 %. Ditinjau dari aspek kekuatan, perkuatan balok dengan pembesaran penampang dapat memberikan nilai peningkatan kekuatan paling tinggi dibanding dengan CFRP dan pelat baja.
4. Perkuatan balok dengan pembesaran penampang beton memberikan nilai terbaik ditinjau dari rasio kekuatan S_r . Besarnya Rasio kekuatan lentur $S_{r(\text{lentur})}$ balok dengan perkuatan CFRP = 0,91; dengan perkuatan pelat baja = 0,755; dan dengan pembesaran beton = 1,121. Besarnya nilai rasio kekuatan geser $S_{r(\text{geser})}$ balok

dengan kekuatan CFRP = 1,006; dengan kekuatan pelat baja = 0,959; dan dengan pembesaran beton = 1,172.

5. Dengan memperhatikan nilai peningkatan kapasitas dan nilai Rasio kekuatan pada kesimpulan nomor 3 dan 4 dapat direkomendasikan bahwa kekuatan Pembesaran Penampang beton bertulang adalah merupakan kekuatan terbaik untuk Proyek Palur Plaza, khususnya bila ditinjau dari aspek kekuatan.

B. SARAN

Memperhatikan hasil penelitian yang telah dilakukan dan keterbatasan kajian, di dalam penelitian ini disarankan sebagai berikut :

1. Kondisi kekuatan struktur balok pada Proyek Palur Plaza tidak aman terhadap lentur dan geser, disarankan didalam proses perancangan struktur lebih teliti didalam memperhitungkan analisis kekuatan. Hal ini untuk menghindarkan adanya kekuatiran dan beban psikologis bagi pengguna, serta perlunya kekuatan struktur, yang justru banyak memakan waktu dan biaya tambahan.
2. Kajian terhadap pemilihan bahan kekuatan didalam penelitian ini masih terbatas pada aspek kekuatan. Disarankan penelitian tentang pemilihan bahan kekuatan/Teknik rehabilitasi struktur balok ini dilanjutkan dengan melakukan peninjauan : aspek kemudahan pelaksanaan, aspek lingkungan selama proses pelaksanaan, aspek biaya dan waktu.
3. Pada Pengujian lentur balok dengan kekuatan SikaCarbodur, bahan kekuatan SikaCarbodur tidak mencapai leleh pada saat pengujian beban. Disarankan penelitian ini dilanjutkan dengan merancang benda uji sedemikian hingga bahan

perkuatan sikaCarbodur dapat bekerja secara maksimal dan mencapai leleh. Hal ini bisa dilakukan dengan memasang benda uji CFRP sepanjang balok bagian tarik, dan dimensi CFRP sedemikian hingga rasio total tulangan dan perkuatan CFRP maksimum sebesar setengah dari rasio tulangan pada kondisi keruntuhan *balanced*.

4. Pada Pengujian lentur balok dengan perkuatan pelat baja, bahan perkuatan pelat baja tidak mencapai leleh pada saat pengujian beban. Disarankan penelitian ini dilanjutkan dengan merancang benda uji sedemikian hingga bahan perkuatan pelat baja dapat bekerja secara maksimal dan mencapai leleh. Hal ini bisa dilakukan dengan memasang benda uji pelat baja sepanjang balok bagian tarik, dan dimensi pelat baja sedemikian hingga rasio total tulangan dan perkuatan pelat baja maksimum sebesar setengah dari rasio tulangan pada kondisi keruntuhan *balanced*.
5. Pada pengujian lentur balok dengan perkuatan CFRP dan pelat baja, terjadi pengelupasan bahan CFRP maupun pelat baja sebelum mencapai beban maksimum. Disarankan ada penelitian lanjutan yang memperhatikan hal ini, agar bahan perkuatan CFRP maupun pelat baja mencapai leleh tanpa adanya pengelupasan.
6. Dengan terjadinya pengelupasan CFRP maupun plat baja pada pengujian lentur dan geser, disarankan memperhitungkan reduksi kekuatan **pengaruh delaminasi** pada hitungan analisis kapasitas lentur dan geser.

DAFTAR PUSTAKA

- American concrete Institute (ACI), Building Coderequirementsfor reinforced concrete and commentary, ACI 318-95, Detroid, Mich.
- American concrete Institute (ACI),Guide for Design and Construction of structural Concrete Reinforced with FRP bar, ACI 440-IR, Detroid, Mich.
- Edward G. Nawy, Bambang Suryoatmono (1990), Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar, Bandung, Eresco
- Ehsani (1997) Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beam With Carbon Fiber Sheet Plastic, Journal of structural Engineering, July 1997/903
- Tom Norris and Hamid Saadatmanesh, Shear and Flexural Strengthening of Reinfor Concrete Beam With Carbon Fiber Sheet, Journal of structural Engineering, July 1997/903
- Hartono dan Hari Santoso, Perkuatan Struktur Beton Dengan FRP, Concrete Repair & Maintenance, Yayasan John Hi-tech Iditama, Edisi pertam, Jakarta,2003

Park and Paulay (1975), Reinforced Concrete Structures , London , John Wiley & Son.

Rebeiz and David W Fowler, (1996), Flexural Strength of Reinforced Polymer Concrete Made With Recycled plastic waste , ACI Structural Journal Vol 93 No 5, Edisi September-oktober 1998, Detroit.

Rezady Munaf, Diagnosa dan perbaikan untuk peningkatan Kinerja struktur Beton, Concrete Repair & Maintenance, Yayasan John Hi-tech Iditama, Edisi pertam, Jakarta, 2003

SNI 03-2847-2002 tentang Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, Perhitungan Struktur Beton untuk bangunan Gedung, jakarta, 2002.

SNI 03-1726-2002, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Indonesia Untuk Gedung, jakarta, 2002.

SNI 03-1727-2002, Pedoman Pembebanan Indonesia untuk Gedung, Jakarta, 2002.