

EVALUASI KINERJA DAN PERKUATAN STRUKTUR GEDUNG GUNA ALIH FUNGSI BANGUNAN (Studi Kasus : Perubahan Fungsi Ruang Kelas Menjadi Ruang Perpustakaan Pada Lantai II Gedung G Universitas Semarang)

Ignatius Christiawan¹⁾, Andreas Triwiyono²⁾, Hary Christady²⁾

¹⁾ Program D3 Teknik Sipil, Univ. Diponegoro Jalan Prof. Sudharto, SH
Tembalang Semarang 50275

²⁾ Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, UGM
Jalan Grafika No. 2 Yogyakarta 55281

ABSTRACT

To meet the need for good infrastructure of building construction, building new one is not the only appropriate choice. Efficiency resulted from the functional substitution of existing building to be used with a new function can be a more precise alternative. The existing functional substitution will result in the change of the building load. Based on the fact, it is necessary to evaluate the performance and the strength of structure at the existing condition to take new load and to calculate the strengthening required.

The study is conducted on Building G of Campus III, Semarang University at Jl. Soekarno-Hatta, Semarang. A lecturing space in floor II was proposed to be functionally substituted into library room. It focuses on evaluating performance of structure, the strength of plate, beam, and column, and the bearing of foundation, existing condition based on SNI-2847-2002, earthquake load application based on SNI-1726-2002, and promoting a proposal for strengthening the structure required. The SAP 2000 is used to analyze the structure to gain the required strength value of U (ultimate). BETON 2000 is used to analyze the structure of existing condition to gain the existing strength value of R (resistance). The strengthening of the plate and beam is conducted by adding the Fiber Reinforced Polymer (FRP), while that of column is by adding an external reinforcement

The result of the study indicates that the existing f_c' is 17 MPa and the f_y is 390 MPa. from evaluation on the performance of structure, it can be known that the performance of servicing limit and that of ultimate limit of the building have really met the requirement of SNI-1726-2002. Based on the result of analysis on the structure of plates in floor 2, plates of A, C, E, and H need the strengthening of flexure ability. Beam in floor 2 : 1 A-E ; 1 E-I ; 2 A-E ; 2 E-I ; 3 C-E and ring beam : 0 A-C ; 0 C-E ; 0 E-G ; 0 G-I ; 3 C-E ; 3 E-I require the strengthening of flexure ability and shear ability. The strengthening of flexure and shear abilities by adding the FRP is found to be able to add the flexure and shearing abilities of plates and beam. The result of analysis on the strengthening of flexure ability by adding reinforcement shows that it can add the flexure ability of column. And from analysis on foundation, it can be known that foundation is able to bear new load so it does not require the strengthening.

KEYWORDS : *change of room function, load addition, strengthening*

PENDAHULUAN

Dalam usaha memenuhi kebutuhan infrastruktur bangunan gedung, mengalihfungsikan bangunan yang sudah ada untuk digunakan dengan fungsi baru dapat menjadi pilihan.

Ruang kuliah lantai II Gedung G Universitas Semarang menjadi studi kasus dalam alih fungsi bangunan guna memenuhi kebutuhan ruang perpustakaan. Perubahan fungsi ruang menjadi pilihan sebagai usulan bagi pengelola gedung karena selain untuk efisiensi pemanfaatan ruang,

dari segi pembiayaan dan ketersediaan lahan akan lebih hemat apabila dibandingkan dengan membangun gedung baru.

Alih fungsi bangunan menyebabkan terjadi perubahan pembebanan dari 250 kg/m^2 menjadi 500 kg/m^2 sehingga dibutuhkan evaluasi kekuatan struktur kondisi *existing*. Penelitian ini dilakukan untuk evaluasi kinerja dan kekuatan struktur pada kondisi *existing*, memberikan alternatif solusi perkuatan, menentukan spesifikasi teknis metode pelaksanaan perkuatan berdasar peraturan beton SNI-2847-2002, dan melakukan analisis struktur ulang setelah perkuatan.

Penelitian ini diharapkan dapat memberi masukan kepada pengelola gedung dalam mengalihfungsikan bangunan. Mengatasi permasalahan yang muncul akibat alih fungsi bangunan, sehingga menjamin keamanan bagi pengguna bangunan dan kepastian hukum bagi pengelola bangunan.

Sejauh penulis ketahui, penelitian tentang perkuatan struktur telah banyak dilakukan, antara lain Nguyen dkk, (2003) dalam penelitiannya menyatakan bahwa penambahan plat *carbon fiber reinforced polymer (CRFP)* menunjukkan adanya peningkatan kapasitas ultimit balok sampai 132% dengan bentuk kegagalan yang tergantung pada panjang pelat *CRFP*. Jenis kegagalan yang terjadi antara lain kegagalan lentur dan pecahnya beton antara plat *CRFP* dan tulangan longitudinal pada bagian ujung plat *CRFP*, kegagalan pecahnya beton terjadi ketika balok diperkuat dengan pelat *CRFP* dengan panjang pelat terbatas. Iswari (2004), dalam penelitiannya mendapatkan bahwa perkuatan lentur dengan 3 variasi penambahan tulangan pada balok beton bertulang akan meningkatkan kapasitas lentur 3 balok uji masing-masing sebesar 63,04%, 139,95% dan 124,14%, serta meningkatkan kekakuan balok sebesar 14,03%, 41,04% dan 100,18% dibandingkan terhadap balok kontrol. Penelitian mengenai evaluasi kekuatan struktur guna alih fungsi bangunan dengan solusi perkuatan yang diperlukan (Studi Kasus: Perubahan Fungsi Ruang Kelas Menjadi Ruang Perpustakaan Pada Lantai II Gedung G Kampus III Universitas Semarang), sejauh ini belum pernah dilakukan. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa penelitian yang akan dilakukan bersifat asli.

LANDASAN TEORI

A. Evaluasi Kinerja Struktur Gedung (mengacu pada SNI 03-1726-2002)

1. Kinerja Batas Layanan

Kinerja batas layanan struktur gedung ditentukan oleh simpangan antar-tingkat akibat pengaruh Gempa Rencana, untuk membatasi terjadinya pelelehan baja dan peretakan beton yang berlebihan, disamping untuk mencegah kerusakan non-struktur dan ketidaknyamanan penghuni.

Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas layanan struktur gedung, dalam segala hal simpangan antar-tingkat yang dihitung dari simpangan struktur gedung tidak boleh melampaui $0,03/R$ kali tinggi tingkat yang bersangkutan atau 30 mm, bergantung yang mana yang nilainya kecil.

2. Kinerja Batas Ultimit

Kinerja batas ultimit struktur gedung ditentukan oleh simpangan dan simpangan antar-tingkat maksimum struktur gedung akibat pengaruh Gempa Rencana dalam kondisi struktur gedung di ambang keruntuhan, untuk membatasi kemungkinan terjadinya keruntuhan struktur gedung yang dapat menimbulkan korban jiwa manusia dan untuk mencegah benturan berbahaya antar-gedung atau antar bagian struktur gedung yang dipisah dengan sela pemisah (sela dilatasi).

Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas ultimit struktur gedung, dalam segala hal simpangan antar-tingkat yang dihitung dari simpangan struktur gedung, tidak boleh melampaui $0,02$ kali tinggi tingkat yang bersangkutan.

B. Evaluasi Kekuatan Struktur Bangunan *Existing* dengan cara analitis (mengacu pada SNI 03-2487-2002)

Dalam melakukan evaluasi kekuatan struktur dengan cara analitis dilakukan langkah-langkah sebagai berikut :

a. Pengumpulan Data

Data-data yang diperlukan adalah data dimensi komponen struktur serta kualitas bahan yang meliputi antara lain :

(1). Kuat tekan beton

Sebagai data masukkan dalam melakukan analisis struktur, maka perlu diketahui kualitas beton, terutama kuat tekannya. Untuk mengetahui kuat tekan beton dapat dilakukan uji *non-destructive test* (uji tidak merusak) dengan pengambilan sampel bor inti (*core case*), *Schmidt Hammer Test*, *UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)* dan lain-lain. Pengujian bahan dilakukan pada bagian struktur yang pada dugaan awal diragukan kekuatannya.

(2). Baja Tulangan

Tegangan leleh baja tulangan ditentukan berdasar data mutu baja yang digunakan pada pelaksanaan pembangunan (*as build drawing*).

b. Penilaian Kekuatan Penampang Komponen Struktur

Apabila dimensi komponen struktur dan kualitas bahan sudah diketahui, maka kekuatan struktur dalam mendukung momen, gaya geser, dan aksial dapat dianalisis. Komponen struktur harus mempunyai kekuatan tersedia R (*resistance*) minimum sama dengan kekuatan diperlukan atau kuat perlu U (*ultimate*) atau dapat dituliskan $R \geq U$. Kuat tersedia R adalah sama dengan kapasitasnya (kuat nominal) dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan ϕ sesuai pasal 22.2.5 SNI-2847-2002. Kuat perlu U dihitung berdasarkan kombinasi beban, masing-masing dikalikan dengan faktor beban γ sesuai pasal 11.1. SNI-2847-2002.

C. Kapasitas Kelompok dan Efisiensi Tiang dalam Tanah Kohesif

Kapasitas dukung tiang yang berkaitan dengan keruntuhan blok, oleh Terzaghi dan Peck (1948) dihitung dengan asumsi-asumsi sebagai berikut :

(a). Pelat penutup tiang (*pile cap*) sangat kaku

(b). Tanah yang berada di dalam kelompok tiang-tiang berkelakuan seperti blok padat.

Dengan asumsi-asumsi tersebut, keseluruhan blok dapat dianggap sebagai fondasi dalam, dengan kapasitas ultimit yang dinyatakan oleh persamaan (Terzaghi dan Peck, 1948 dalam Hardiyatmo, 2003) :

$$Q_g = 2D(B+L)c + 1,3 c_b N_c BL \quad (1)$$

dengan :

Q_g : Kapasitas ultimit kelompok, nilainya harus tidak melampaui nQ_u (dengan n = jumlah tiang dalam kelompoknya)(kN)

c : kohesi tanah di sekeliling kelompok tiang (kN/m^2)

c_b : kohesi tanah di bawah dasar kelompok tiang (kN/m^2)

B : lebar kelompok tiang, dihitung dari pinggir tiang-tiang (m)

L : panjang kelompok tiang (m)

D : Kedalaman tiang di bawah permukaan tanah (m)

N_c : faktor kapasitas dukung

Persamaan efisiensi untuk menghitung kapasitas kelompok tiang yang diusulkan *Converse-Labarre Formula* sebagai berikut :

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n'-1)m + (m-1)n'}{90mn'} \quad (2)$$

dengan :

E_g : efisiensi kelompok tiang

m : jumlah baris tiang

n' : jumlah tiang dalam satu baris

θ : Arc tg d/s , dalam derajat

S : jarak pusat ke pusat tiang

d : diameter tiang

Efisiensi kelompok tiang didefinisikan sebagai :

$$E_g = \frac{Q_g}{nQ_u} \quad (3)$$

dengan :

E_g : efisiensi kelompok tiang

Q_g : beban maksimum kelompok tiang yang mengakibatkan keruntuhan

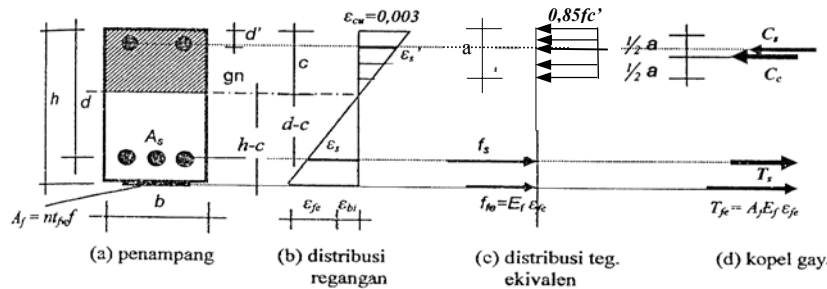
Q_u : Beban maksimum tiang tunggal yang mengakibatkan keruntuhan

n : jumlah tiang dalam kelompok

D. Perkuatan Struktur dengan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*

1. Perkuatan Lentur

Kapasitas lentur balok didasarkan pada *limit state* sesuai dengan *ACI 318*, yang ditentukan oleh batasan kuat tekan beton dan tegangan leleh baja tulangan serta tegangan efektif *FRP*.



Gambar.1 Distribusi regangan, distribusi tegangan dan keseimbangan gaya pada penampang balok.

Dalam analisis tampang, sebagai dasar perhitungan untuk mendapatkan M_n pada kondisi lentur murni dapat diturunkan dari persamaan kesetimbangan gaya-gaya dalam, lihat persamaan (4) dan Gambar 1.

$$T_s + T_{fe} = C_c + C_s \tag{4}$$

dengan :

- T_s = gaya tarik baja tulangan
- T_{fe} = gaya tarik sumbangan FRP
- C_c = gaya tekan beton
- C_s = gaya tekan baja tulangan

Dengan memperhatikan letak titik masing-masing resultan gaya serta ukuran penampang, akan didapatkan kuat lentur nominal M_n .

Atas saran *ACI Committee 440*, kontribusi *FRP* masih perlu dikalikan dengan faktor reduksi $\psi_f = 0,85$, sehingga momen nominal total M_n dapat dicari dengan persamaan (5) berikut :

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{a}{2} \right) \tag{5}$$

Karena pertimbangan kompatibilitas regangan *FRP* sebaiknya hanya digunakan untuk menahan gaya tarik (*ACI Committee 440*, 2002). Selain itu dalam

Altmark dkk (1998) disarankan bahwa kuat lentur nominal balok setelah diperkuat M_n tidak boleh melebihi dua kali kuat lentur sebelum diperkuat M_{no} , atau :

$$\eta_B = M_n / M_{no} \leq 2 \tag{6}$$

2. Perkuatan Geser

Kuat geser nominal V_n merupakan gabungan kontribusi beton V_c dan tulangan geser V_s dan *FRP* V_f (*ACI Committee 440*). Ketahanan geser masih dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

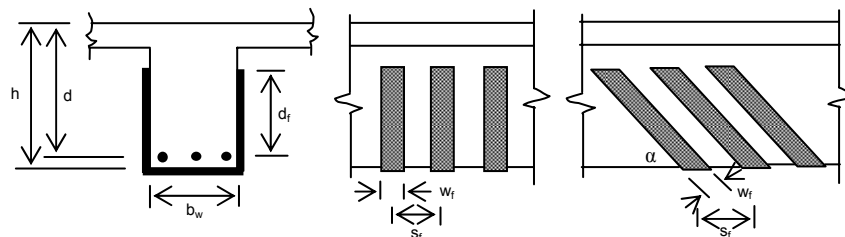
$$\Phi V_n = \Phi (V_c + V_s + \psi V_f) \tag{7}$$

dengan :

- Φ = faktor reduksi kekuatan,
- $\Phi = 0,65$ ψ = faktor reduksi tambahan untuk *FRP* ;
- $\psi = 0,95$ untuk komponen yang ditutup lembaran kelling penampang atau keempat sisinya
- $\psi = 0,85$ untuk *U-wrap* tiga sisi atau bentuk pelat.

Kekuatan geser V_f kontribusi *FRP* adalah :

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} \tag{8}$$



Gambar.2. perkuatan geser dengan FRP tiga sisi.

METODA PENELITIAN

Obyek penelitian adalah gedung G Kampus III Universitas Semarang yang terletak di jalan Soekarno-Hatta Semarang, Jawa Tengah.

Dalam penelitian ini, alat yang digunakan meliputi *Rebar Locator*, *Schmidt Rebound Hammer Test* dan *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Test*. Penelitian diawali dengan persiapan/*setting* alat di laboratorium dengan melakukan kalibrasi, untuk memastikan alat berfungsi dengan baik dan akurat. Pengambilan data pada gedung G Universitas Semarang dilakukan pada 5 titik kolom lantai 1 (1-C ; 2-C ; 0-B ; 0-C ; 1-E), 2 titik kolom (2-C ; 2-A), 2 titik balok (1/A-C ; 1/C-E) serta 2 luasan pelat (BC-01 ; DE-12) pada lantai 2, serta masing-masing 1 titik kolom (3-A) dan balok (2/AC) lantai 3. Dari hasil uji kuat tekan yang didapat, dihitung nilai rerata dan deviasi standar dari seluruh hasil uji. Dalam Triwiyono (2005) dinyatakan bahwa penetapan nilai kuat tekan beton f'_c yang digunakan untuk evaluasi kekuatan struktur tidak boleh diambil lebih besar dari nilai terkecil dari 2 nilai kuat tekan yang dihitung dengan persamaan (9) dan (10) berikut:

- (1). Menurut pasal 7.6.5). (4) SNI 03-3403-1991-03 disyaratkan bahwa kuat tekan rata-rata dari tiga beton inti adalah minimal sama dengan $0,85 f'_c$ atau jika diperhitungkan suatu kemungkinan (*probability*) rentang kuat tekan minimum, dihitung dengan :

$$f'_c = \frac{f'_c \text{ rerata 3 benda uji kuat tekan terendah}}{0,85} \quad \dots(9)$$

- (2). Tidak ada satupun beton inti yang kuat tekannya kurang dari $0,75 f'_c$, sehingga nilai kuat tekan beton dihitung dengan:

$$f'_c = \frac{f'_c \text{ terendah}}{0,75} \quad (10)$$

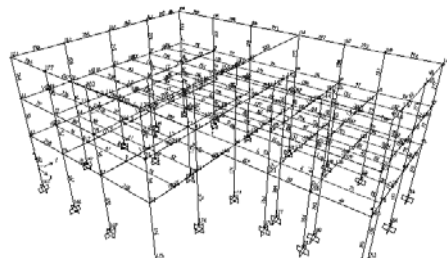
Data berupa *as build drawing* dan hasil uji bahan dengan beban baru mengacu pada SNI 03-1727-1989 untuk beban statik dan SNI-1726-2002 untuk beban dinamik (beban gempa *response spectrum*) dimodelkan dengan program analisis struktur SAP 2000 versi 10.0.7 (gambar 3). Hasil analisis struktur didapatkan momen lentur, gaya geser dan gaya aksial pada balok dan kolom portal gedung. Analisis Beban Statik Dorong (*Pushover Analysis*) dilakukan untuk mendapatkan nilai daktilitas gedung dan nilai faktor reduksi (R) gedung sebenarnya. Jika tidak terpenuhi maka perhitungan diulang kembali dengan memasukkan nilai (R) hasil analisis beban statik dorong pada perhitungan beban dinamik. Evaluasi kinerja struktur gedung dengan meninjau kinerja batas layan dan kinerja batas ultimit mengacu pada pasal 8 SNI-1726-2002. Data hasil uji bahan digunakan untuk menghitung kekuatan sisa struktur kondisi eksisting dengan program BETON 2000. Data tanah berupa boring dan sondir digunakan untuk melakukan perhitungan ulang daya dukung kelompok tiang akibat perubahan beban.

Alternatif usulan teknis perkuatan (*strengthening*) bangunan dilakukan dengan mengacu pada *output* dari analisis struktur dengan SAP 2000 dan BETON 2000.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengolahan Data Lapangan

Dari hasil uji bahan kondisi eksisting sesuai persamaan (9) dan (10) didapat kuat tekan beton $f'_c = 17 \text{ MPa}$ dan tegangan leleh baja tulangan berdasar *as build drawing* didapatkan $f_y = 390 \text{ MPa}$.



Gambar 3. Pemodelan struktur gedung G USM dengan 3 D frames.

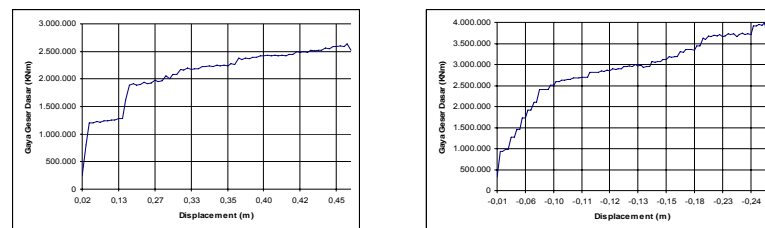
B. Evaluasi Struktur

1. Analisis Pushover

Gedung G berada pada wilayah gempa 2 dibangun diatas tanah lunak, hasil analisis *pushover* berupa grafik hubungan antara perpindahan (*displacement*, δ) titik ujung atas kolom lantai 3 dengan gaya geser tingkat dasar (*base shear*, V), untuk masing-masing arah sumbu x dan sumbu y bangunan, didapat hasil seperti Gambar 4.

Dari grafik hubungan antara perpindahan (*displacement*, δ) titik ujung atas kolom lantai 3 dengan gaya geser tingkat dasar (*base shear*, V) tersebut didapatkan nilai daktilitas dan faktor reduksi gempa selengkapnya tercantum dalam Tabel 2.

Dari nilai-nilai reduksi gempa yang telah diketahui untuk nilai $R_x = R_y = R_{maks}$ dihasilkan nilai faktor reduksi gempa representatif sebesar R_{maks} , sehingga nilai R yang akan dipakai untuk analisis struktur adalah 4,8.



Gambar 4. Kurva hubungan δ - V arah X dan Y.

Tabel 2. Rekapitulasi perhitungan nilai daktilitas dan reduksi gempa

Arah	δ_y (m)	δ_m (m)	μ	R	R_{maks}	R <i>terpakai</i>
X	0,071	0,466	6,254	10,439	4,8	4,8
Y	0,031	0,283	9,066	14,506	4,8	4,8

Tabel 3. *Displacement* arah X dan Y pada gedung G

Tingkat	<i>Displacement</i> (mm)	
	sumbu X	Sumbu Y
Tingkat I (+4.00)	33,94	27,05
Tingkat II (+8.00)	45,65	37,57
Tingkat III (+12.00)	66,06	51,99

Tabel 4. Simpangan antar tingkat arah X dan Y pada gedung G

Tingkat	Tinggi (m)	simpangan terjadi (mm)		simpangan ijin (mm)	
		X	Y	X	Y
Tingkat I	5,9	33,94	27,06	36,87	36,87
Tingkat II	4,0	11,72	10,52	25,0	25,0
Tingkat III	4,0	20,40	14,41	25,0	25,0

2. Evaluasi Kinerja Struktur Gedung

Hasil analisis struktur didapatkan pergeseran (*displacement*) untuk arah sumbu x dan y gedung tampak seperti tercantum dalam Tabel 3.

a. Kinerja Batas Layan

Hasil analisis simpangan antar-tingkat tercantum dalam Tabel 4.

Dari Tabel 4 tampak simpangan antar-tingkat yang terjadi pada semua tingkat dibawah simpangan ijin sehingga struktur gedung memenuhi standar kinerja batas layan sesuai ketentuan pasal 8.1.2 SNI-1726-2002.

b. Kinerja Batas Ultimit

Hasil analisis simpangan dan simpangan antar-tingkat maksimum dalam kondisi struktur gedung diambang keruntuhan tercantum dalam tabel 5.

Tabel 5. Simpangan dan Simpangan antar tingkat maksimum arah X dan Y pada gedung G dengan R = 4,8

Tingkat	Tinggi (m)	FS		ζ		simpangan terjadi (mm)		simpangan ijin (mm)	
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Tingkat I	5,9	2,62	3,44	1,28	0,98	43,54	26,43	118	118
Tingkat II	4,0	2,62	3,44	1,28	0,98	15,03	10,28	80	80
Tingkat III	4,0	2,62	3,44	1,28	0,98	26,18	14,08	80	80

Dari Tabel 5 tampak simpangan dan simpangan antar-tingkat maksimum struktur gedung yang terjadi pada semua tingkat dibawah simpangan ijin sehingga struktur gedung memenuhi standar kinerja batas layan sesuai ketentuan pasal 8.2.2 SNI-1726-2002.

3. Evaluasi Struktur Pelat, Balok dan Kolom

Analisis struktur pelat, balok dan kolom dilakukan pada seluruh elemen, sedangkan pembahasan dilakukan hanya pada pelat, balok dan kolom yang memerlukan perkuatan saja.

a. Evaluasi Struktur Pelat.

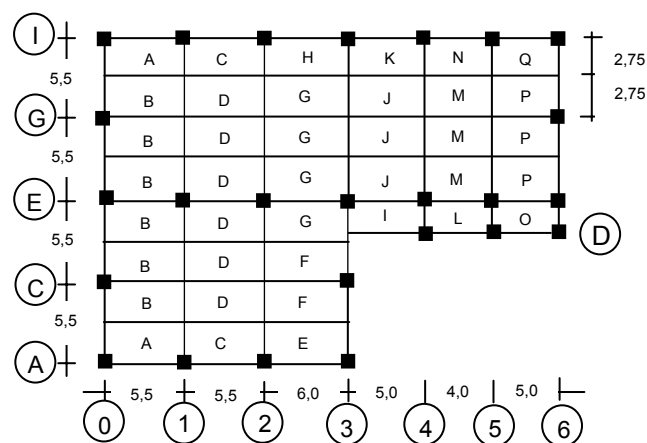
Hasil analisis struktur pelat lantai eksisting lantai 2 yang membutuhkan perkuatan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 6, dengan posisi pelat dapat dilihat pada Gambar 5.

b. Evaluasi Struktur Balok

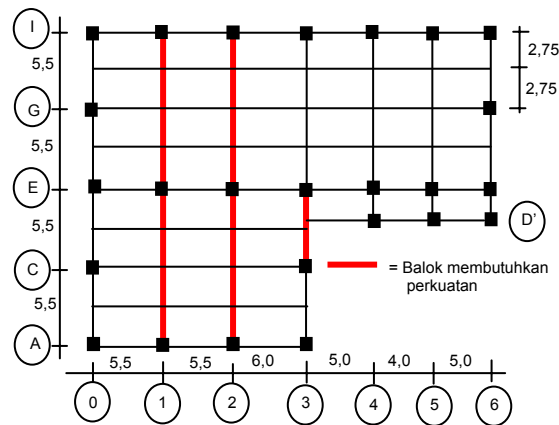
Dari hasil analisis struktur didapatkan elemen balok eksisting pada lantai 3 memenuhi untuk menerima beban baru, sedangkan balok eksisting pada lantai 2 dan balok ring perlu perkuatan lentur dan geser. Hasil analisis balok selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 7 dan 8 dengan posisi balok seperti pada Gambar 6.

Tabel 6. Perbandingan momen *resistance* dan momen perlu *ultimate* pada pelat lantai 2 dengan life loads redesain 500 kg/m²

NO	PELAT	REDESAIN				KONDISI EKSISTING				KETERANGAN
		ARAH X		ARAH Y		ARAH X		ARAH Y		
		MT _x	ML _x	MT _y	ML _y	MT _x	ML _x	MT _y	ML _y	
1	A	8,6287	5,3100	22,4198	5,6050	21,763	21,763	21,763	21,763	Ty perkuatan
3	C	8,4074	5,1625	22,4198	5,0150	21,763	21,763	21,763	21,763	Ty perkuatan
5	E	8,7628	5,5245	26,2985	6,6704	21,763	21,763	21,763	21,763	Ty perkuatan
8	H	8,5951	5,4038	26,2985	5,8404	21,763	21,763	21,763	21,763	Ty perkuatan



Gambar 5. Denah pelat lantai 2.



Gambar 6. Denah balok dan Kolom

Tabel 7. Perbandingan Momen *Resistance* dan Momen Perlu *Ultimate* pada balok lantai 2 dan balok ring

NO	KODE	NO ELM	DIM (cm)	REDESAIN		KONDISI EKSISTING				KETERANGAN
				Mu (KNm)		TULANGAN		Mr (KNm)		
				(-)	(+)	tump	lap	(-)	(+)	
BALOK LANTAI 2										
1	1 A-E	111	35 X 85	883,71	518,81	9 d 22	9 d 22	869,70	869,70	perkuatan (-)
2	1 E-I	112	35 X 85	872,98	509,25	9 d 22	9 d 22	869,70	869,70	perkuatan (-)
3	2 A-E	114	35 X 85	1085,6	625,22	9 d 22	9 d 22	869,70	869,70	perkuatan (-)
4	2 E-I	116	35 X 85	1136,2	672,33	9 d 22	9 d 22	869,70	869,70	perkuatan (-)
5	3 C-E	106	35 X 50	227,26	83,74	4 d 22	4 d 22	221,81	221,81	perkuatan (-)
BALOK RING										
6	0 A-C	285	20 x 30	85,41	38,27	3D19	3D19	59,146	59,146	perkuatan (-)
7	0 C-E	284	20 x 30	79,27	78,69	3D19	3D19	59,146	59,146	perkuatan (-) & (+)
8	0 E-G	283	20 x 30	71,33	62,78	3D19	3D19	59,146	59,146	perkuatan (-) & (+)
9	0 G-I	282	20 x 30	78,05	38,29	3D19	3D19	59,146	59,146	perkuatan (-)
10	3 C-E	299	25 x 60	162,75	110,38	3D19	3D19	152,13	152,13	perkuatan (-)
11	3 E-I	300	25 x 60	216,93	121,28	3D19	3D19	152,13	152,13	perkuatan (-)

Tabel 8. Perbandingan Geser *Resistance* dan Geser Perlu *Ultimate* pada balok lantai 2 dan balok ring

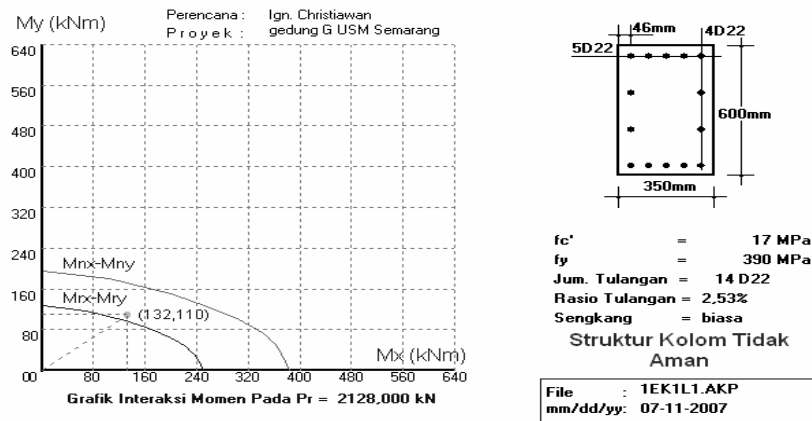
NO	KODE	NO ELM	DIM (cm)	REDESAIN		KONDISI EKSISTING				KETERANGAN
				Vu (KN)		TULANGAN		Vr (KN)		
				bag 1	bag 2	bag 1	bag 2	bag 1	bag 2	
BALOK LANTAI 2										
1	2 A-E	114	35 X 85	465,10	160,06	d10-10	d10-15	441,27	371,84	perkuatan bag 1
2	2 E-I	116	35 X 85	507,33	80,89	d10-10	d10-15	441,27	371,84	perkuatan bag 1
3	3 E-I	106	35 X 85	465,99	105,15	d10-10	d10-15	441,27	371,84	perkuatan bag 1
BALOK RING										
4	0 A-C	285	20 X 30	100,01	13,80	d 8-10	d 8-15	95,71	80,03	perkuatan bag 1
5	1 5-6	294	20 x 30	105,63	11,25	d 8-10	d 8-15	95,71	80,03	perkuatan bag 1

c. Evaluasi Struktur Kolom

Hasil analisis struktur pada seluruh kolom didapatkan bahwa kolom lantai 1 : 1E ; 2A ; 2E ; 2I ; 3E ; 3 I dan kolom lantai 2 : 1E ; 1I ; 2A ; 2E ; 2I ; 3E ; 3 I ; 4E ; 4I ; 5E serta kolom lantai 3 : 3 I perlu perkuatan lentur, seperti contoh Gambar 7. Hasil analisis struktur kolom selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 9.

4. Evaluasi Pondasi

Pondasi gedung G adalah pondasi tiang pancang *mini pile* bujur sangkar dengan dimensi \square 20 x 20 cm, panjang 3 x 6 meter, terangkai dalam 3 tipe penutup tiang yang untuk selanjutnya disebut sebagai tipe pondasi dengan ukuran dan jumlah tiang seperti dalam Tabel 10.



Gambar 7. interaksi P dan M kolom 1E

NO	KODE	NO ELM	DIM (cm)	REDESAIN			KONDISI EKSISTING	
				Pu (KN)	Mux (KNm)	Muy (KNm)	tul terpasang	KETERANGAN
LANTAI 1								
1	1E	168	35 x 60	2128,11	132,22	110,96	14 D 22	perkuatan
2	2A	170	35 x 60	1194,56	249,66	107,72	14 D 22	perkuatan
3	2E	171	35 x 60	2396,04	114,65	106,56	14 D 22	perkuatan
4	2I	172	35 x 60	1204,93	261,27	107,37	14 D 22	perkuatan
5	3E	174	35 x 60	1870,65	190,27	106,27	14 D 22	perkuatan
6	3I	173	35 x 60	1308,50	261,57	107,31	14 D 22	perkuatan
LANTAI 2								
7	1A	57	35 x 60	522,55	410,82	66,75	14 D 22	perkuatan
8	1I	77	35 x 60	498,25	373,08	62,40	14 D 22	perkuatan
9	2A	58	35 x 60	543,49	448,77	52,40	14 D 22	perkuatan
10	2I	76	35 x 60	549,06	469,65	49,48	14 D 22	perkuatan
11	3E	68	35 x 60	981,31	375,61	61,38	14 D 22	perkuatan
12	3I	75	35 x 60	667,16	471,08	54,92	14 D 22	perkuatan
13	4E	67	35 x 60	518,81	383,77	62,49	14 D 22	perkuatan
14	4I	74	35 x 60	502,65	398,21	58,03	14 D 22	perkuatan
15	5E	66	35 x 60	470,79	339,63	59,04	14 D 22	perkuatan
LANTAI 3								
16	3I	279	35 x 35	155,79	150,58	6,29	8 D 22	perkuatan

Tabel 10. Tipe dan Dimensi Pondasi, dan jumlah Tiang Pancang

No	Tipe Pondasi	Dimensi <i>pile cap</i> (cm)	Jumlah Tiang
1	pondasi tipe 1	240 x 180	12
2	pondasi tipe 2	180 x 120	6
3	pondasi tipe 3	120 x 120	5

Tabel 11. Gaya Aksial, Lateral dan Momen pada Pondasi dengan beban baru

No	Pondasi	P		M _x		M _y		H _a	
		P _D	P _L	M _{Dx}	M _{Lx}	M _{Dy}	M _{Ly}	H _x	H _y
		(KN)	(KN)	(KNm)	(KNm)	(KNm)	(KNm)	(KN)	(KN)
1	tipe 1	1336,5	521,21	53,61	34,38	2,27	2,14	70,06	143,31
2	tipe 2	720,62	225,29	14,97	9,45	51,32	32,63	69,10	130,18
3	tipe 3	248,33	35,04	2,07	1,64	2,07	1,27	58,48	63,16

Hasil analisis dengan beban baru untuk 3 tipe pondasi didapat hasil harga beban aksial (P_a) P_D dan P_L kolom, Gaya Lateral (H_a) arah sumbu X (H_x), Gaya Lateral arah sumbu Y (H_y), Momen arah sumbu X (M_{Lx} dan M_{Dx}) dan Momen arah sumbu Y (M_{Ly} dan M_{Dy}) seperti tercantum dalam Tabel 11.

a. Evaluasi Penutup tiang

Hasil analisis berdasar masukkan data beban baru seperti tercantum dalam Tabel 11, didapat hasil jarak tulangan pokok kondisi eksisting lebih kecil daripada kondisi dengan beban baru, maka tulangan pokok eksisting masih mampu untuk menerima tambahan beban baru. Hasil analisis penutup tiang selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 12.

b. Evaluasi Daya Dukung Tiang

Berdasar data uji tanah berupa sondir dan uji bor diketahui jenis tanah adalah lempung. Pada kedalaman -19.50 meter (ujung tiang bagian bawah) didapatkan harga tahanan kerucut rata-rata (q_c) = 17,13 kg/cm². Tahanan gesek kerucut statis (q_f) sepanjang tiang (18 meter) didapatkan harga sebesar = 1088 kg/cm². Dari data q_c dan q_f didapatkan kapasitas ultimit tiang tunggal (Q_u) sebesar = 290,36 kN.

Hasil analisis didapatkan kapasitas dukung pondasi P_u eksisting > P_{perlu} maka kelompok tiang mampu menerima beban baru dan tidak perlu perkuatan. Hasil analisis tipe pondasi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 13.

C. Usulan Perkuatan Struktur

1. Usulan Perkuatan Pelat

Guna menambah kapasitas lentur pelat digunakan metode *external reinforcement* dengan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* yang direkatkan pada permukaan komponen beton yang diperkuat dengan bantuan perekat *epoxy*. Hasil selengkapnya perkuatan pelat lantai 2 dengan FRP dapat dilihat pada Tabel 14.

2. Usulan Perkuatan Balok

Guna menambah kapasitas lentur dan geser balok digunakan metode *external reinforcement* dengan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* yang direkatkan pada permukaan komponen beton yang diperkuat dengan bantuan perekat *epoxy*, seperti ilustrasi pada Gambar 8.

Hasil analisis perkuatan lentur dan geser untuk balok dapat dilihat pada Tabel 15 dan 16.

Tabel 12. Hasil analisis penutup tiang

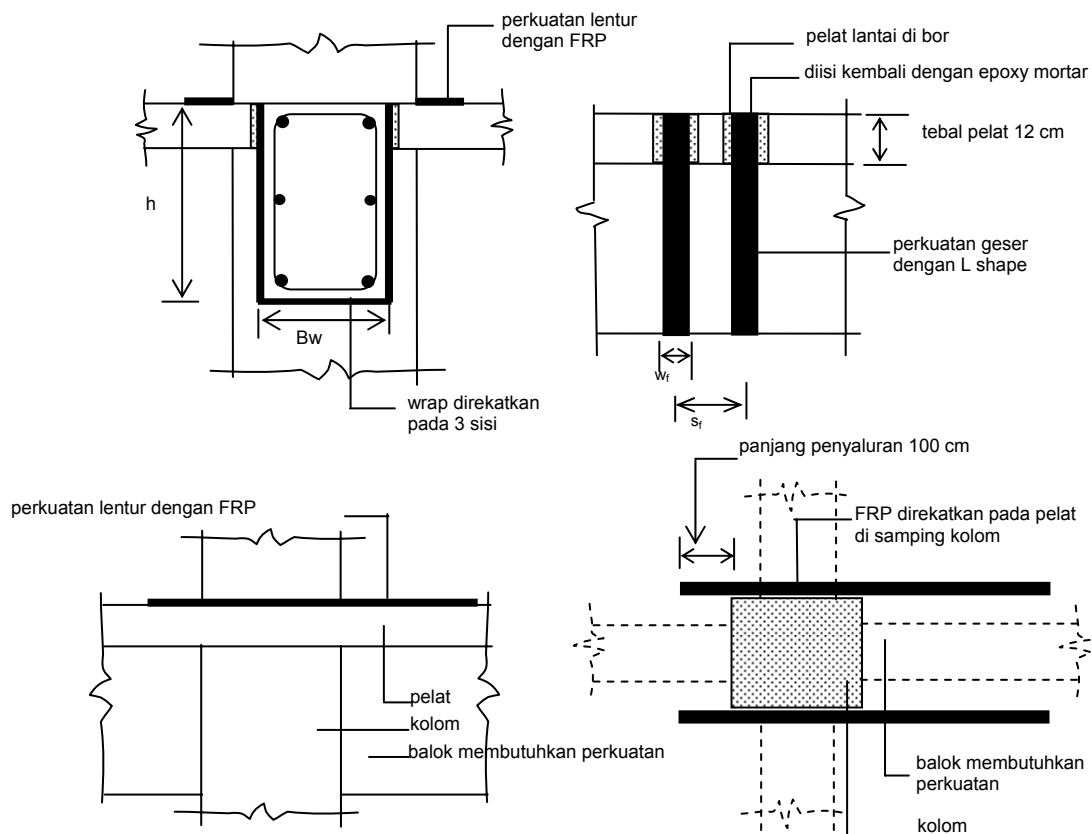
No	pondasi	dim (cm)	jml tiang	tulangan pokok				keterangan
				eksisting		perlu		
				X	Y	X	Y	
1	tipe 1	240 x 180	12	D19-150	D19-150	D19-187	D19-285	memenuhi
2	tipe 2	180 x 120	6	D19-150	D19-150	D19-154	D19-420	memenuhi
3	tipe 3	120 x 120	5	D19-150	D19-150	D19-500	D19-500	memenuhi

Tabel 13. Hasil analisis kapasitas dukung tiang

No	pondasi	dim	jumlah tiang	kapasitas tiang		keterangan
				P_{perlu}	$P_{eksisting}$	
1	tipe 1	240 x 180	12	2437,75	2470	memenuhi
2	tipe 2	180 x 120	6	1225,22	1640,97	memenuhi
3	tipe 3	120 x 120	5	348,43	1197,56	memenuhi

Tabel 14. Perbandingan Momen *Resistance* dan Momen Perlu *Ultimate* pada pelat lantai 2 setelah diperkuat dengan FRP

NO	PELAT	REDESAIN				PERKUATAN				KETERANGAN
		ARAH X		ARAH Y		ARAH X		ARAH Y		
		MT _x	ML _x	MT _y	ML _y	MT _x	ML _x	MT _y	ML _y	
1	A	8,6287	5,3100	22,4198	5,6050	21,763	21,763	34,23	21,763	memenuhi
2	C	8,4074	5,1625	22,4198	5,0150	21,763	21,763	34,23	21,763	memenuhi
3	E	8,7628	5,5245	26,2985	6,6704	21,763	21,763	34,23	21,763	memenuhi
4	H	8,5951	5,4038	26,2985	5,8404	21,763	21,763	34,23	21,763	memenuhi



Gambar 8. Perkuatan lentur dan geser balok dengan FRP

Tabel 15. Perbandingan Momen *Resistance* dan Momen Perlu *Ultimate* pada balok lantai 2 dan balok ring setelah diperkuat dengan FRP

NO	KODE	NO ELM	DIM (cm)	REDESAIN		PERKUATAN					KETERANGAN
				Mu (KNm)		FRP			Mrp (KNm)		
				(-)	(+)	t (mm)	b (mm)	n	(-)	(+)	
BALOK LANTAI 2											
1	1 A-E	111	35 X 85	883,71	518,81	2	100	2	1002,42	869,70	memenuhi
2	1 E-I	112	35 X 85	872,98	509,25	2	100	2	1002,42	869,70	memenuhi
3	2 A-E	114	35 X 85	1085,6	625,22	2	250	2	1136,43	869,70	memenuhi
4	2 E-I	116	35 X 85	1136,2	672,33	2	300	2	1177,20	869,70	memenuhi
5	3 C-E	106	35 X 50	227,26	83,74	1	100	2	270,50	221,81	memenuhi
BALOK RING											
6	0 A-C	285	20 x 30	85,41	38,27	2	100	2	94,91	59,146	memenuhi
7	0 C-E	284	20 x 30	79,27	78,69	2	100	2	94,91	94,91	memenuhi
8	0 E-G	283	20 x 30	71,33	62,78	2	50	2	84,00	84,00	memenuhi
9	0 G-I	282	20 x 30	78,05	38,29	2	100	2	94,91	59,146	memenuhi
10	3 C-E	299	25 x 60	162,75	110,38	1	100	2	215,72	152,13	memenuhi
11	3 E-I	300	25 x 60	216,93	121,28	2	75	2	236,88	152,13	memenuhi

Tabel 16. Perbandingan Geser *Resistance* dan Geser Perlu *Ultimate* pada balok lantai 2 dan balok ring setelah diperkuat dengan *FRP*

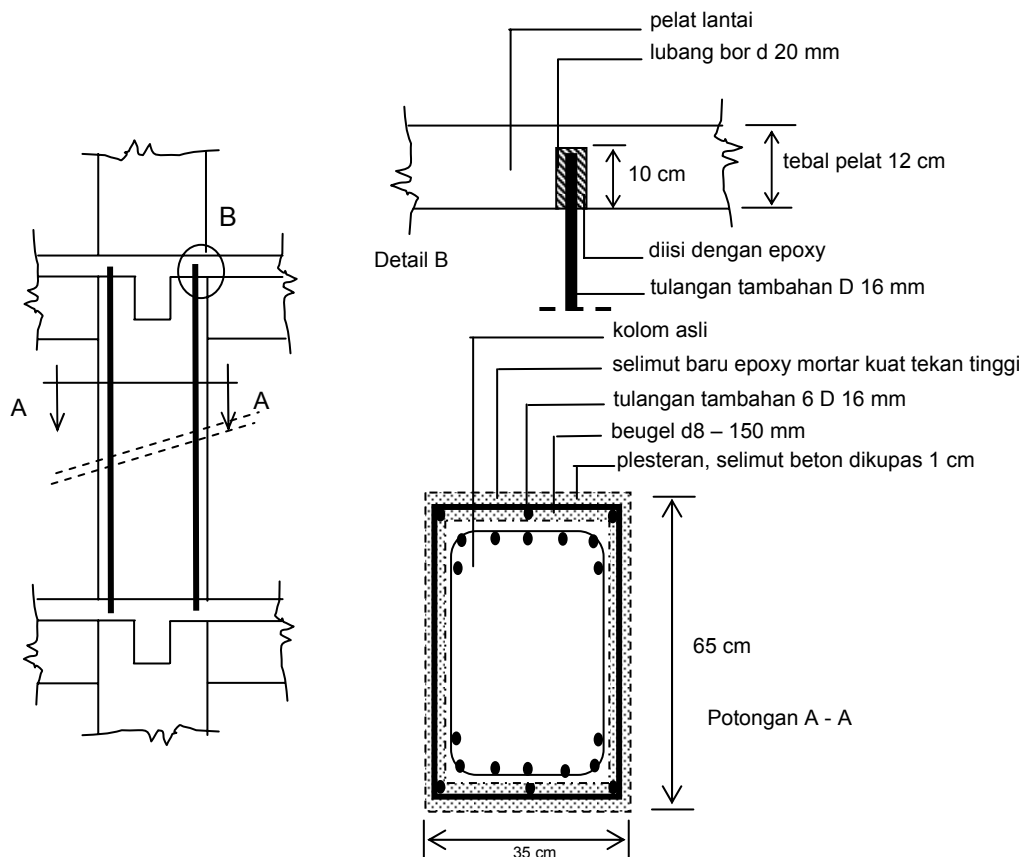
NO	KODE	NO ELM	DIM (cm)	REDESAIN		PERKUATAN					KETERANGAN	
				V_u (KN)		FRP			V_{rp} (KN)			
				(-)	(+)	t (mm)	b (mm)	n	(-)	(+)		
BALOK LANTAI 2												
1	2 A-E	114	35 X 85	465,10	160,06	2	100	3	568,26	371,84	memenuhi	
2	2 E-I	116	35 X 85	507,33	80,89	2	100	3	568,26	371,84	memenuhi	
3	3 E-I	106	35 X 85	465,99	105,15	2	100	3	568,26	371,84	memenuhi	
BALOK RING												
4	0 A-C	285	20 X 30	100,01	13,80	2	100	2	124,64	80,03	memenuhi	
5	1 5-6	294	20 x 30	105,63	11,25	2	100	2	124,64	80,03	memenuhi	

3. Usulan Perkuatan Kolom

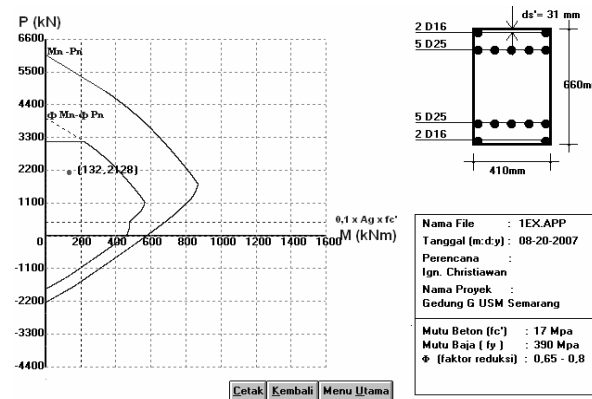
Perkuatan lentur kolom dilakukan dengan penambahan tulangan. Tulangan tambahan dirangkaikan pada kolom asli dengan ikatan beugel d8-15 cm, setelah terlebih dahulu dilakukan pengelupasan lapis plesteran dan selimut beton setebal 1 cm. Tulangan tambahan diangkerkan terhadap pelat lantai sedalam 10 cm dan disela lubang diisi dengan *epoxy*. Kemudian tutup tulangan dengan selimut beton baru menggunakan

epoxy mortar kuat tekan tinggi dengan $f_c \geq 30$ MPa, seperti tampak pada Gambar 9.

Setelah dilakukan penambahan tulangan kolom, maka dilakukan analisis ulang menggunakan Program BETON 2000 pada kolom-kolom tersebut dengan beban rencana P_u , M_{ux} dan M_{uy} hasil analisis struktur SAP 2000 beban baru seperti contoh Gambar 10. Hasil analisis perkuatan kolom selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 15.



Gambar 9. Perkuatan Kolom dengan penambahan tulangan



Gambar 10 interaksi P dan M kolom 1E

Tabel 17. Hasil Analisis Struktur Kolom dengan Perkuatan

NO	KODE	NO ELM	DIM baru (mm)	REDESAIN			PERKUATAN		KETERANGAN
				Pu (KN)	Mux (KNm)	Muy (KNm)	tul terpasang		
LANTAI 1									
1	1E	168	410 x 660	2199,37	439,14	191,78	14D22 + 8D16	memenuhi	
2	2A	170	410 x 660	1274,58	461,87	249,06	14D22 + 8D16	memenuhi	
3	2E	171	410 x 660	2103,72	399,65	201,15	14D22 + 8D16	memenuhi	
4	2I	172	410 x 660	1167,40	463,38	255,26	14D22 + 8D16	memenuhi	
5	3E	174	410 x 660	1909,72	477,92	209,48	14D22 + 8D16	memenuhi	
6	3I	173	410 x 660	1358,39	485,76	246,01	14D22 + 8D16	memenuhi	
LANTAI 2									
1	1A	57	410 x 660	547,73	519,48	152,07	14D22 + 6D16	memenuhi	
2	1I	77	410 x 660	524,64	508,86	145,69	14D22 + 6D16	memenuhi	
3	2A	58	410 x 660	576,10	518,77	137,05	14D22 + 6D16	memenuhi	
4	2I	76	410 x 660	565,08	516,53	125,23	14D22 + 6D16	memenuhi	
5	3E	68	410 x 660	998,11	515,54	161,98	14D22 + 6D16	memenuhi	
6	3I	75	410 x 660	691,15	507,32	130,53	14D22 + 6D16	memenuhi	
7	4E	67	410 x 660	499,51	504,74	167,85	14D22 + 6D16	memenuhi	
8	4I	74	410 x 660	504,09	513,47	150,92	14D22 + 6D16	memenuhi	
9	5E	66	410 x 660	493,46	498,64	175,13	14D22 + 6D16	memenuhi	
LANTAI 3									
7	3I	279	410 x 410	162,07	159,77	24,12	8D22 + 6D22	memenuhi	

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil uji bahan kondisi eksisting didapat $f_c' = 17$ MPa dan $f_y = 390$ MPa.
2. Hasil analisis beban statik dorong (*Pushover analysis*) didapatkan nilai faktor reduksi gempa representatif (R) = 4,8.

3. Evaluasi kinerja batas layan dan kinerja batas ultimit didapatkan simpangan antar tingkat < simpangan ijin, sehingga memenuhi syarat sesuai SNI-1726-2002.
4. Hasil analisis struktur didapatkan pelat lantai 2 : pelat A, C, E dan H pada bagian tumpuan Y membutuhkan perkuatan lentur. Perkuatan lentur dengan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* didapatkan mampu menambah kuat lentur pelat : A, C, E dan H masing-masing 39,28 %.

5. Hasil analisis struktur didapatkan balok lantai 2 : 1 A-E ; 1 E-I ; 2 A-E ; 2 E-I ; 3 C-E, balok ring : 0 A-C ; 0 C-E ; 0 E-G ; 0 G-I ; 3 C-E ; 3 E-I ; I 5-6 perlu perkuatan lentur dan geser. Perkuatan lentur dan geser dengan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* didapatkan mampu menambah kuat lentur balok lantai 2 masing-masing : 7,44 % ; 7,44 % ; 14,65 % ; 21,64 % ; 17,75 % dan menambah kuat geser masing-masing : 28,77 %.
6. Hasil analisis struktur kolom lantai 1 : 1E ; 2A ; 2E ; 2I ; 3E ; 3 I dan kolom lantai 2 : 1A ; 1I ; 2A ; 2E ; 2I ; 3E ; 3 I ; 4E ; 4I ; 5E serta kolom lantai 3 : 3 I perlu perkuatan lentur. Perkuatan lentur kolom digunakan metode *external reinforcement* dengan penambahan tulangan 8D16 mm pada kolom lantai 1 : 1E ; 2A ; 2E ; 2I ; 3E ; 3 I, kolom lantai 2 : 1I ; 3E ; 4E ; 4I ; 5E. Penambahan 6D16 mm pada kolom lantai 2 : 1A ; 2A ; 2I ; 3I, kolom lantai 3 : 3I.
7. Analisis terhadap penutup tiang (*pile cap*) didapatkan kebutuhan tulangan pokok (A_{perlu}) < tulangan kondisi eksisting ($A_{eksisting}$) dan kapasitas dukung kelompok tiang pada : pondasi 1 didapatkan $P_{u\ eksisting} = 2470,08\text{ kN} > P_{perlu} = 2437,75\text{ kN}$; pondasi 2 didapatkan $P_{u\ eksisting} = 1640,97\text{ kN} > P_{perlu} = 1225,22\text{ kN}$; pondasi 3 didapatkan $P_{u\ eksisting} = 1161,45\text{ kN} > P_{perlu} = 348,43\text{ kN}$. Pondasi mampu menerima beban baru tidak perlu perkuatan.

B. Saran

Dari hasil analisis dan pembahasan di atas ada beberapa saran yang perlu disampaikan yaitu :

Pengujian bahan kondisi eksisting selain menggunakan *Schmidt Rebound Hammer Test* dan *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Test* diperlukan uji *core case* untuk mendapatkan hasil yang lebih teliti.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional, 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, SNI-2487-2002, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional, 1989, *Tata Tata cara perencanaan pembebanan untuk rumah dan gedung*, SNI 03-1727-1989, Jakarta
- Hardiyatmo, H.C., 2003, *Teknik Pondasi II*, Edisi ke dua, Penerbit Beta Offset, Yogyakarta.
- Iswari AY, 2004, *Perkuatan Lentur Balok Tampan Persegi dengan Penambahan Tulangan Menggunakan Perekat Epoxy*, Tesis S2
- Nguyen,D.M.,Chan, T.K., dan Cheng, H.K., 2003, *Effects of Plates Lenght on the Strength of Reinforced Concrete Beams Bonded with CFRP Plates*, <http://ww.must.edu.my/tkchan/nguyen1999a.pdf>.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Pemukiman Departemen Pemukiman dan Presarana Wilayah, 2002, *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung*, SNI-1726-2002, Jakarta.
- Triwiyono,A., 2006, *Perbaikan dan Perkuatan Struktur Beton Pasca Gempa dengan FRP*, Makalah Seminar Perkembangan Standard dan Methodologi Konstruksi Tahan Gempa, Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia, Medan.